

**InGaAs/InP ve InGaAs/GaAs KUANTUM KUYULU GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU**

Kürşat KIZILKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2012

ANKARA

Kürşat KIZILKAYA tarafından hazırlanan “InGaAs/InP ve InGaAs/GaAs KUANTUM KUYULU GÜNEŞ PİLLERİNİN ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU” adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet KASAP

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Elif ORHAN

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 20 / 06 / 2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kürşat KIZILKAYA

**InGaAs/InP ve InGaAs/GaAs KUANTUM KUYULU GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**
(Yüksek Lisans Tezi)

Kürşat KIZILKAYA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2012

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında, InGaAs kuantum kuyulu güneş hücresi (QWSC) yapıları GS174 için GaAs ve GS249 için InP alttaş üzerine, Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yöntemi kullanılarak büyütüldü. Büyütülen GS174 ve GS249 QWSC yapılarının öncelikle; Yüksek Çözünürlüklü X-Işınları Kırınımı (HRXRD), Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM), Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) ve İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) analizleri yapıldı. Analizlerin ardından, GS174 ve GS249 QWSC yapılarının 1x1 cm²'lik kesilmiş ikişer parçalarına litografi ve metalizasyon adımlarını içeren fabrikasyon işlemleri yapıldı. Fabrikasyonu tamamlanan GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin birer parçalarının ve cam alttaşın üzerine 500 Å kalınlıklı Si₃N₄ yansımaya önleyici tabaka kaplandı. Cam alttaş üzerine kaplanan Si₃N₄ yansımaya önleyici tabakanın UV-VIS spektrometre analizi yapılarak, yansımaya önleyici tabakanın optik geçirgenlik özelliği incelendi. Si₃N₄ yansımaya önleyici tabaka kaplanmış ve kaplanmamış GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin Akım-Gerilim (I-V) karakteristikleri incelenerek, yansımaya engelleyici tabakanın üretilen güneş hücrelerinin ışığa duyarlılığını arttırdığı gözlemlendi.

Bilim Kodu : 202.1.147
Anahtar Kelimeler : SC, QWSC, MBE, AFM, InGaAs, HRXRD, I-V
Sayfa Adedi : 86
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

**THE FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF
InGaAs/InP AND InGaAs/GaAs QUANTUM WELL SOLAR CELLS**

(M.Sc. Thesis)

Kürşat KIZILKAYA

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2012

ABSTRACT

Within the scope of this study, for GS174, GaAs and GS249 which are of the structures of InGaAs quantum well solar cells (QWSC) was magnified using Molecular Beam Epitaxy (MBE) method on InP substrate. High Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD), Atomic Force Microscope, (AFM), Scanning Electron Microscope (SEM) and Secondary Ion Mass Spectrometer (SIMS) analysis of magnified GS174 and GS249 QWSC structures were done. After the analysis, fabrication operations containing lithography and metallization steps were made to parts of GS174 and GS249 QWSC structures cut into two parts as $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Upon completing the fabrication, one part of GS 174 and GS249 QWSC samples and glass substrate were covered with a 500 \AA tickness Si_3N_4 antireflection layer. Optical permeability quality of antireflection layer on glass substrate was analyzed through UV-VIS spectrometer analysis. Analyzing Current-Voltage characteristics of GS174 and GS249 QWSC samples, it was found out that the antireflection layer raised the sensibility of solar cells to light.

Science Code : 202.1.147
Keywords : SC, QWSC, MBE, AFM, InGaAs, HRXRD, I-V
Total Page : 86
Supervisor of Thesis : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Bana dünya yüzünü gösteren, benim ben olmamı sağlayan, benliğimi kazandıran, ezeli-ebedi öğreten ve ruhumun özü olan AİLEME binlerce kez şükürler olsun.

Emeğini ve yüreğini hiçbir zaman eksik etmeyen, hayatımı rengarenk kılan yol arkadaşım Dilek ŞİMŞEK'e sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimini seçmemde, alanımda emin adımlarla ilerlemem konusunda, engin bilgi ve ülkü önderliğiyle her daim yol gösterici olması hususunda kıymetli hocam Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü Sayın Prof Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e ömür boyu minnettar kalacağımı bildiririm.

Bu tezin başından sonuna kadar alınının terini esirgemeyen, hayatımdaki dostluğunu ve var oluşununun eksikliğini bir an olsun hissettirmeyen, Abim ve Hocam Sayın Uzm. Tarık ASAR'a ve sevgili eşi Arş. Gör. Yasemin ASAR'a şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen, Hocalarım; Sayın Prof. Dr. Tofig MEMMEDLİ, Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK, Doç. Dr. M. Kemal ÖZTÜRK, Yrd. Doç. Dr. Süleyman ÇÖREKÇİ ve Arş. Gör. Dr. S. Şebnem ÇETİN'e teşekkür ederim.

Her daim yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen, Barış KINACI, Alaaddin COŞKUN, Merve BIÇEN, Seda BENGİ, Umut AYDEMİR, Gökhan SÜRÜCÜ, ve Yunus ÖZEN'e teşekkür ederim.

Örneklerimizin, SEM görüntülerinin alınmasına sağladıkları destekten dolayı Dr. Matteo BOSÍ (IMEM/CNR-İTALYA) ve Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a (NANOTAM/Bilkent Üniversitesi) teşekkür ederim.

Ayrıca, varlıklarıyla hayatımı dolduran ve yaşanır hale getiren, dostlarım Erhan YILDIZ, Hüseyin TAŞÇI ve İsa SANDIKÇIOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu tez, 110T333 nolu projelerle TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR..... | vi |
| İÇİNDEKİLER | viii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... | xi |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ | xii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. YARIİLETKENLER | 3 |
| 2.1. III-V Grubu Yarıiletkenler | 4 |
| 2.2. III-V Grubu Yarıiletkenlerin Teknolojik Uygulama Alanları | 6 |
| 2.2.1. Sıcaklık ölçme | 6 |
| 2.2.2. Basınç ölçme | 6 |
| 2.2.3. Işık şiddetini ölçme | 6 |
| 2.3. Yarıiletken Kuantum Kuyuları | 7 |
| 2.4. Yarıiletken Kuantum Kuyulu Yapılar | 10 |
| 2.4.1. Tekli kuantum kuyusu | 10 |
| 2.4.2. Çoklu kuantum kuyusu..... | 11 |
| 2.4.3. Süperörgüler | 11 |
| 2.5. III-V Grubu Yarıiletken Güneş Hücreleri | 13 |
| 2.5.1. Güneş hücreleri için yansımaya önleyici katman oluşturulması..... | 13 |
| 3. GÜNEŞ HÜCRELERİ..... | 14 |
| 3.1. Güneş Hücresi Türleri | 19 |
| 3.1.1. Si tabanlı güneş hücreleri | 19 |
| 3.1.3. III-V grubu kuantum kuyulu güneş hücreleri..... | 21 |

Sayfa

| | |
|--|----|
| 3.2. Kuantum Kuyulu Güneş Hücreleri (QWSC)..... | 21 |
| 3.2.1. Kuantum kuyulu güneş hücreleri tarihçesi..... | 22 |
| 4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER | 25 |
| 4.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Yöntemi | 25 |
| 4.1.1. VG-Semicon V80H-MBE sistemi..... | 28 |
| 4.1.2. GS174 QWSC yapısının MBE yöntemi ile büyütülmesi | 30 |
| 4.1.3. GS249 QWSC yapısının MBE yöntemi ile büyütülmesi | 33 |
| 4.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işınları Kırınımı (HRXRD)..... | 36 |
| 4.2.1. HRXRD analiz sisteminin çalışma prensibi | 37 |
| 4.2.2. GS174 ve GS249 QWSC yapılarının HRXRD analizi | 38 |
| 4.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) | 39 |
| 4.3.1. AFM analiz sisteminin çalışma prensibi | 41 |
| 4.3.2. GS174 ve GS249 QWSC yapılarının AFM analizi..... | 44 |
| 4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) | 44 |
| 4.4.1. SEM analiz sisteminin çalışma prensibi..... | 45 |
| 4.4.2. GS174 ve GS249 QWSC yapılarının SEM analizi | 46 |
| 4.5. İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS) | 47 |
| 4.5.1. SIMS analiz sisteminin çalışma prensibi | 48 |
| 4.5.2. GS174 QWSC yapısının SIMS analizi..... | 50 |
| 4.6. GS174 ve GS249 QWSC Yapılarının Fabrikasyonu | 51 |
| 4.6.1. Litografik işlemler | 51 |
| 4.6.2. Metalizasyon | 54 |
| 4.7. Yansıma Önleyici Katman Oluşturulması..... | 57 |
| 4.7.1. Kopartma (Sputtering) yöntemi | 57 |
| 4.7.2. Si ₃ N ₄ katmanının oluşturulması | 59 |

Sayfa

| | |
|--|----|
| 4.8. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri..... | 60 |
| 5. BULGULAR VE TARTIŞMA | 62 |
| 5.1. HRXRD Analiz Bulguları | 62 |
| 5.2. AFM Analiz Bulguları..... | 64 |
| 5.3. SEM Analiz Bulguları | 66 |
| 5.4. SIMS Analiz Bulguları | 68 |
| 5.5. UV-VIS Analiz Bulguları..... | 69 |
| 5.6. I-V Analiz Bulguları..... | 70 |
| 6. SONUÇLAR | 72 |
| KAYNAKLAR | 75 |
| ÖZGEÇMİŞ | 84 |

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | Sayfa |
|--|--------------|
| Çizelge 2. 1. Yapay yarıiletkenlerin elde edildiği elementler..... | 4 |
| Çizelge 2. 2. İndiyum, Galyum ve Arsenik' in bazı özellikleri. | 4 |
| Çizelge 2. 3. III-V grubu yarıiletken bileşimler. | 5 |
| Çizelge 4. 1. GS174 InGaAs/GaAs QWSC yapısı için akı değerleri..... | 33 |
| Çizelge 4. 2. GS249 InGaAs QWSC yapısı için akı değerleri..... | 36 |
| Çizelge 4. 3. X-ışınları difraktometresinin teknik özellikleri | 38 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 2.1. Kuantum kuyulu p-i-n yapısı | 7 |
| Şekil 2.2. Örgü sabiti-yasak enerji diyagramı | 8 |
| Şekil 2.3. Tekli kuantum kuyusu (E_v : valans bandı enerji seviyesi; E_c : iletkenlik bandı enerji seviyesi)..... | 11 |
| Şekil 2.4. Çoklu kuantum kuyusu (L_b bariyer genişliğive L_w kuantum kuyusunun genişliği)..... | 12 |
| Şekil 2.5. Süperörgü yapısı | 12 |
| Şekil 3.1. Güneşin spektral ışınması | 15 |
| Şekil 3.2. Tek eklemli fotovoltaiik hücrenin yapısı | 16 |
| Şekil 3.3. Yarıiletkendeki sıcak taşıyıcıların gevşemesi..... | 17 |
| Şekil 3.4. İki eklemli güneş hücresi | 18 |
| Şekil 4.1. MBE işleminin şematik diyagramı | 26 |
| Şekil 4.2. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi | 28 |
| Şekil 4.3. GS174 QWSC yapısı | 30 |
| Şekil 4.4. GS249 QWSC yapısı | 33 |
| Şekil 4.5. Kristal düzlemlerinden x-ışınlarının saçılması..... | 37 |
| Şekil 4.6. Çift kristal x-ışını kırınım düzeneği | 38 |
| Şekil 4.7. AFM analiz sisteminin şematik gösterimi | 40 |
| Şekil 4.8. SEM Analiz sisteminin şematik gösterimi..... | 46 |
| Şekil 4.9. Hiden Analytical SIMS sistemi. | 48 |
| Şekil 4.10. SIMS analiz sistemini oluşturan kısımlar | 49 |
| Şekil 4.11. Saçtırılan iyonların şematik gösterimi | 50 |
| Şekil 4.12. Litografik ön kontak foto-maske görüntüsü | 52 |
| Şekil 4.13. Litografik arka kontak foto-maske görüntüsü | 53 |

| Şekil | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 4.14. Güneş hücresi fabrikasyon süreci (a) PR kaplama (b) Maskeleme ve pozlandırma (c) PR aşındırma-uzaklaştırma (d) yüzeye metal kaplama metalizasyon (e) PR uzaklaştırma..... | 54 |
| Şekil 4.15. Kopartma yönteminin şematik gösterimi..... | 57 |
| Şekil 5. 1. GS174 QWSC yapısının HRXRD grafiği | 63 |
| Şekil 5. 2. GS249 QWSC yapısının HRXRD grafiği | 63 |
| Şekil 5. 3. GS174 QWSC yapısının 10 x10µm lik AFM görüntüsü..... | 64 |
| Şekil 5. 4. GS174 QWSC yapısının 3x3µm lik AFM görüntüsü..... | 65 |
| Şekil 5. 5. GS249 QWSC yapısının 10 x10µm lik AFM görüntüsü..... | 65 |
| Şekil 5. 6. GS249 QWSC yapısının 3x3µm lik AFM görüntüsü..... | 66 |
| Şekil 5. 7. GS249 QWSC yapısının SEM görüntüsü | 67 |
| Şekil 5. 8. GS174 QWSC yapısının SEM görüntüsü | 67 |
| Şekil 5. 9. GS174 QWSC yapısının SIMS grafiği | 68 |
| Şekil 5. 10. Si ₃ N ₄ katmanı için geçirgenlik spektrumları..... | 69 |
| Şekil 5. 11. GS174 lnI-V grafiği (-2V ile +2V aralığında) | 70 |
| Şekil 5. 12. GS249 lnI-V grafiği (-1V ile +1V aralığında) | 71 |

RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim | Sayfa |
|--|--------------|
| Resim 4.1. Büyüme sırasındaki RHEED deseni | 27 |
| Resim 4.2. V80H-10 model MBE sistemi | 29 |
| Resim 4. 3. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü | 39 |
| Resim 4. 4. Omicron-Variable Temperature AFM/STM sistemi | 42 |
| Resim 4. 5. Hiden Analytical SIMS sistemi. | 48 |
| Resim 4.6. Hızlı termal tavlama (RTA) Sistemi | 56 |
| Resim 4.7. BESTEC Kopartma sistemi | 58 |
| Resim 4.8. Kopartma sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları | 59 |
| Resim 4.9. UV-VIS Spektrometre | 59 |
| Resim 4.10. I-V ölçüm düzeneği (Keithley 4200 ve NewPort Oriel Sol1A)..... | 61 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler | Açıklama |
|-----------------|-------------------|
| Å | Angstrom |
| Al | Aluminyum |
| As | Arsenik |
| B | Boron |
| C | Karbon |
| Cd | Kadmiyum |
| DC | Doğru akım |
| λ | Dalga boyu |
| Ga | Galyum |
| Ge | Germanyum |
| Hg | Civa |
| In | İndiyum |
| Mg | Magnezyum |
| N | Azot |
| O | Oksijen |
| P | Fosfor |
| Pb | Kurşun |
| Sb | Antimoni |
| Se | Selenyum |
| Si | Silikon |
| T | Sıcaklık |
| Te | Tellür |
| T _s | Büyütme sıcaklığı |
| x | Kompozisyon oranı |
| Zn | Çinko |

| Kısaltmalar | Açıklama |
|--------------------|---|
| AC | Alternatif Akım |
| AFM | Atomik Kuvvet Mikroskopi |
| AlAs | Aluminyum Arsenik |
| AlN | Alimunyum Nitrat |
| AlGaAs | Alimunyum Galyum Arsenik |
| AlGaN | Alimunyum Galyum Nitrat |
| BEP | Demete eşdeğer basınç |
| DC | Doğru Akım |
| GaAs | Galyum Arsenik |
| GaN | Galyum Nitrat |
| GaP | Galyum Fosfat |
| GR | Büyüme hızı |
| FWHM | Yarı Genişlik |
| HRXRD | Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı |
| I-V | Akım-Gerilim |
| InAs | İndiyum Arsenik |
| InN | İndiyum Nitrat |
| InGaAs | İndiyum Galyum Arsenik |
| InGaAsP | İndiyum Galyum Arsenik Fosfat |
| InGaN | İndiyum Galyum Nitrat |
| InGaP | İndiyum Galyum Fosfat |
| InGaSb | İndiyum Galyum Antimoni |
| InP | İndiyum Fosfat |
| InSb | İndiyum Antimoni |
| MBE | Moleküler Demet Epitaksi |
| p-i-n | Pozitif-Katkısız-Negatif |
| p-n | Pozitif-Negatif |
| PV | Fotovoltaik |
| RF | Radyo Frekansı |
| RHEED | Yüksek Enerjili Elektron Kırınımı |

Kısaltmalar**Açıklama****RTA**

Hızlı Termal Tavlama

SC

Güneş Hücresi

SEM

Taramalı Elektron Mikroskopu

SIMS

İkincil İyon Kütle Spektrometresi

QW

Kuantum Kuyusu

QWSC

Kuantum Kuyulu Güneş Hücresi

UHV

Ultra Yüksek Vakum

UV-VIS

Morötesi - Görünür Bölge

1. GİRİŞ

Son zamanlarda, üçüncü nesil güneş hücreleri olarak sınıflandırılan, güneş spektrumunun daha büyük bölümünü soğurmak için, III-V grubu çok eklemli ve kuantum kuyulu güneş hücreleri (QWSCs) üzerindeki araştırmalar hız kazanmıştır [1]. Eklemli fotovoltaik (PV) hücrelerde uygun tünel diyot büyütülmesi, verimi artırıcı öneme sahiptir. 90'lı yıllarda ilk olarak önerilen QW güneş hücresi, geleneksel p-n eklem güneş hücresi verimini artırmaya aday bir yapıya sahiptir [2,3]. Kuantum kuyu sayısının artırılması ve büyütme şartlarının mükemmelleştirilmesi ile keskin arayüzeyler oluşturulması ve fabrikasyon süreçlerinin iyileştirilmesi, bu hücre türleri için verimi artırıcı ve halen devam eden araştırmalardır [4,5]. Eklemli güneş hücrelerinin geliştirilme çalışmaları, kuantum kuyulu hücrelerden daha eskidir. Bununla birlikte, son on yıl içerisinde bu alandaki araştırma-geliştirme faaliyetlerinin arttığı görülmektedir [2,4,6-9]. Bu gruptaki hücreler üzerinde yapılan çalışmalarındaki artışın başlıca gerekçesi güneş ışınımının hücre üzerine yoğunlaştırılması sonucunda yüksek verime ulaşılabilir olması ve böylece üretilen güç başına üretim maliyetlerinin azalmasıdır [10,11].

Çok eklemli güneş hücrelerinde; optik geçirgenliğin ve maksimum akım iletkenliğinin sağlanması için bütün katmanların kristal yapılarının birbirine uyumlu olması gerekmektedir [3,12]. Ayrıca, fotonun bant aralığının üzerindeki fazlalık enerjisi ısı ile kaybolacağından, komşu katmanların bant aralıklarının birbirine yakın olması gerekir. Örgü uyumlu alttaş üzerine büyütülebilen InGaP (1,87 eV) ve InGaAs (1,41eV); gerilmeli InGaP (1,87 eV) ve GaAs (1,42 eV) yapılarıyla oluşturulan iki eklemli PV hücrelerin 500 güneşte verimlilikleri %35'in üzerine çıkmıştır [13-16]. Bu verim değerleri InGaP, InGaPAs gibi yakın bant aralıklı tabakaların hem çok eklemli hem de kuantum kuyulu yapılar için kullanılarak örgü uyumlu aygıt yapılarının geliştirilmesiyle artırılabilir. Fotovoltaik hücreler, temiz, güvenli ve yenilenebilir enerji kaynağı olmakla birlikte, mevcut enerji kaynaklarına alternatif olabilmesi için verimlilikleri artırılmalı ve ürettikleri gücün watt başına maliyeti uygun değere (~1 \$/watt) düşürülmelidir. III-V grubu PV

hücrelerin maliyetleri, Si PV hücrelerden daha fazla olmasına rağmen, yüksek verimlilikleri nedeniyle uzay teknolojisinde kullanılmaktadır [17-23]. Son yıllarda küçük alanlı (1 cm^2) PV hücreler, yoğunlaştırıcı teknolojisinin gelişmesiyle yeryüzünde enerji üretimi için geliştirilmektedirler.

Bu çalışma kapsamında üçüncü nesil güneş hücrelerinden InGaAs/GaAs ve InGaAs/InP kuantum kuyulu PV yapıları geliştirildi. PV yapıları en gelişmiş kristal büyütme tekniği olan Moleküler Demet Kristal Büyütme (MBE) tekniği ile büyütülerek, yapısal, eletro-optik özellikleri X-ışını kırınımı (HRXRD) ve İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) ile belirlendi. Yüzey morfolojisi Atomik Kuvvet mikroskopu (AFM), yapının görüntüsü Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) yöntemi ile gerçekleştirildi. Güneş hücresi aygıtlarının, litografi-metalizasyon süreçleriyle fabrikasyonları gerçekleştirildi. Fabrikasyonu tamamlanan QWSC'lerin AM1,5 için Akım-Gerilim (I-V) karakteristikleri ve hücre çıktı parametreleri belirlendi.

2. YARIİLETKENLER

Yarıiletken, iletkenliği yalıtkan ile iletken arasında olan, uyarıldıklarında iletkenlik özelliği gösteren malzemelerdir. Bazen metallere, bazen de yalıtkanlara benzer özellikler gösteren yarıiletken malzemeler küçük, hafif ve daha verimli olmaları nedeniyle tercih edilirler [24].

Yarıiletken malzemelerin fiziksel özellikleri genel anlamıyla birbirlerine benzerdir. Bu malzemelerin en önemli iki özelliği; serbest elektronların bulunduğu iletim bantı ile bağlı elektronların bulunduğu valans bantı arasında bir yasak enerji aralığının bulunması ve bu malzemelere yapılacak çok düşük orandaki uygun katkı atomlarının, yapını elektriksel özelliklerini büyük ölçüde değiştirmesidir.

Kristal örgünün periyodikliği nedeniyle yarıiletkenlerde, yasak bant aralığı adı verilen izinli ve yasaklanmış enerji bölgeleri vardır ve bu yasak bant aralığı yarıiletkenlerin birçok özelliklerini tanımlamakta kullanılan önemli bir parametredir. İzinli enerji bölgeleri yasak bandın altında ve üstünde yer alır. Yasak bandın altında kalan ve bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesi valans bandı ve üstünde kalan serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesi iletkenlik bandı olarak adlandırılır [25].

Sıcaklığın 0K'de oluşu durumunda, tüm elektronlar/taşıyıcılar valans bandında bulunurlar. İletkenlik bandında ise birçok boş seviye olduğundan, uygulanan küçük bir potansiyel bu elektronları kolaylıkla valans bandından iletkenlik bandına hareket ettirebilir. Bütün bu hareketlenmeler, yarıiletkenlerin iletkenliğini değiştirir. Bu iletkenlik genellikle; sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının konsantrasyonuna bağlıdır. İletkenlikteki değişimi sağlayan bu tür etkiler, yarıiletken malzemeleri elektronik uygulamalar için daha çok kullanılabilir hale getirir.

Yarıiletken malzeme çalışmalarına 19.yüzyılın başlarında başlanmış ve günümüze kadar, farklı opto-elektronik cihaz geliştirmede kullanılabilen çok sayıda yarıiletken

malzeme geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında da kullanılmış olan III-V grubu yarıiletkenler aşağıdaki Çizelge 2.1’de verilen elementlerinin uygun şartlarda bir araya getirilmesi ile elde edilmektedir.

Çizelge 2. 1. Yapay yarıiletkenlerin elde edildiği elementler.

| Periyot | II. Sütun | III. Sütun | IV. Sütun | V. Sütun | VI. Sütun |
|------------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|
| • <u>2</u> | • - | • B | • C | • N | • O |
| • <u>3</u> | • Mg | • Al | • Si | • P | • S |
| • <u>4</u> | • Zn | • Ga | • Ge | • As | • Se |
| • <u>5</u> | • Cd | • In | • Sn | • Sb | • Te |
| • <u>6</u> | • Hg | • - | • Pb | • - | • - |

2.1. III-V Grubu Yarıiletkenler

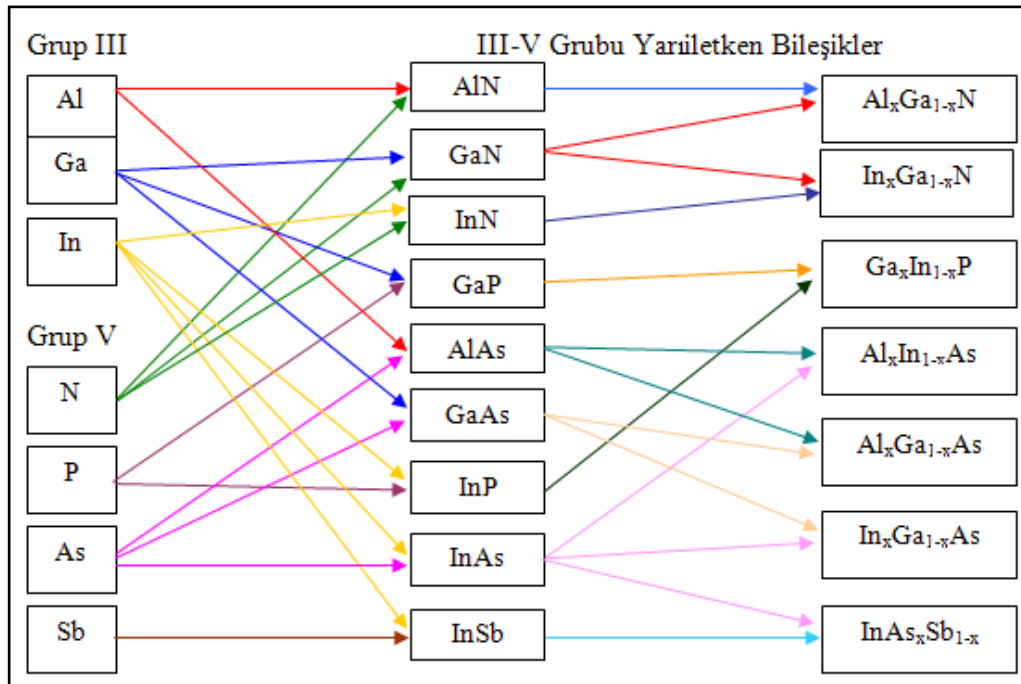
III-V grubu yarıiletkenleri oluşturan grup III elementleri İndiyum (In), Galyum (Ga) ve Alüminyum (Al), Grup V elementleri ise Azot (N), Arsenik (As), Fosfor (P) ve Antimoni (Sb)’ dur. Bu tez çalışmasında kullanılan In, Ga ve As’ in özellikleri Çizelge 2.2. de verilmiştir.

Çizelge 2. 2. İndiyum, Galyum ve Arsenik’ in bazı özellikleri.

| Adı | Sembolü | Atom Numarası | Erime Noktası (°C) | Kaynama Noktası (°C) | Yoğunluğu (g/cc) |
|---------|---------|---------------|--------------------|----------------------|------------------|
| İndiyum | In | 49 | 156,76 | 2073,0 | 7,31 |
| Galyum | Ga | 31 | 29,9 | 2403,0 | 5,907 |
| Arsenik | As | 33 | 808,0 | 603,0 | 5,72 |

III-V Grubu bileşiklerinden GaAs, InP, AlGaAs ve InGaAs, AlGaN tipik yarıiletken bileşimlerdir. Bunlar III ve V gruplarına ait olan elementlerin uygun biçimde birleşmesi ile oluşmaktadır. III ve V gruplarına ait olan elementlerin yarıiletken bileşikleri Çizelge 2.3’ de verilmiştir.

Çizelge 2. 3. III-V grubu yarıiletken bileşimler.



Ga atomu üç, As atomu beş değerlik (valans) elektronuna sahiptir. Ga atomu üç elektronunu, As atomu da beş elektronunu tetrahedral kovalent bağa katar. Bu gruptaki bağlanma tam olarak kovalent değildir. Bileşikteki iki element farklı olduğundan, bağ boyunca elektronların dağılımı simetrik değildir. Bundan dolayı yük yoğunluğu atomlardan daha büyük olana doğru kaymış vaziyettedir. Bunun sonucu olarak atomlardan biri net bir elektrik yükü fazlalığı taşır. Böyle bir bağ ‘heteropolar’ olarak adlandırılır. Bağdaki elektronların dağılımı, negatifliği fazla olan atoma doğru kayar. GaAs da; As atomu Ga dan daha büyük bir negatifliğe sahiptir ve atom başına eksi bir yük fazlalığı vardır. Ga ise pozitif yük fazlalığına sahip olur. Atom başına aktarılan yük etkin yük olarak bilinir [26].

Bu yük aktarması, III-V grubundaki bağlanmaya iyonik bir görünüm kazandırır. Bu yüzden onların bağlanmaları, kovalent ve iyonik bileşenlerin karışımıdır. Fakat bu atomların çoğunda kovalent bağ baskındır. III-V grubu bileşikleri, polar kovalent karaktere sahiptir.

2.2. III-V Grubu Yarıiletkenlerin Teknolojik Uygulama Alanları

Yarıiletkenlerin çok çeşit kullanım alanları vardır. Ancak bu kullanım alanları aşağıda açıklanan üç ana grupta verilebilir:

2.2.1. Sıcaklık ölçme

Yarıiletkenlerin enerji aralığı sıcaklığa çok duyarlıdır. Sıcaklığın artması ile iletkenlikleri de artar. Bu özelliklerinden yararlanılarak geliştirilen termistörler sayesinde yaklaşık $10^{-4}C$ 'lik sıcaklık farkı bile ölçülebilmektedir. Dolayısı ile sıcaklığa karşı duyarlı bir çok aletin yapımında yarıiletkenler kullanılmaktadır.

2.2.2. Basınç ölçme

Kovalent bağlı yarıiletkenlerin koordinasyon sayısı düşüktür. Bu, basınçla atomların birbirine daha fazla yaklaştırılabileceği anlamına gelir. Yani enerji bant aralığı azalır, iletkenliği artar. Basınç ölçüm cihazlarında bu tür yarıiletkenler kullanılabilir.

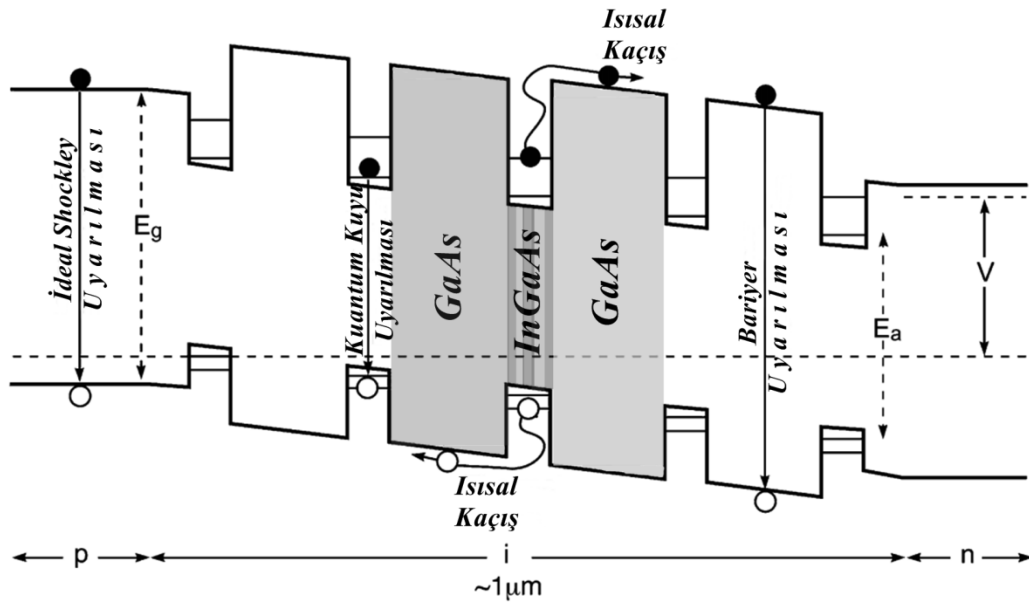
2.2.3. Işık şiddetini ölçme

Görünür ışık fotonlarının enerjileri (1,7 - 3,5eV) yarıiletken elektronlarını uyarabilecek düzeydedir. Bu tür devrelerde devreden akacak akım miktarı uyarılan foton sayısına, dolayısı ile de ışık şiddetine bağlıdır.

Bu gibi parametrelerin ölçümü için gerekli teknolojik altyapı, ince film büyütme teknikleri ile elde edilebilen; p-n eklem, transistor, detektör, süperörgü, kuantum kuyusu gibi yarıiletken malzeme üretimine dayanmaktadır.

2.3. Yarıiletken Kuantum Kuyuları

Çoklu-yapıların kalınlığı, elektronların de Broglie dalgaboyu mertebesinde olduğunda ($d < 20 \text{ nm}$) kuantum etkileri ortaya çıkar ve artık enerji seviyeleri sürekli olmak yerine kesiklidir. Bu türdeki çoklu-yapılar “kuantum kuyuları” olarak adlandırılır [27]. Yani kuantum kuyulu hücre, yüksek bant aralıklı yarıiletken tabakaların arasına yerleşmiş düşük bant aralıklı ince tabakalardan oluşan tipik bir p-i-n diyot yapısıdır. İlk tasarımlarda, kuantum kuyusu bir p-n aygıtın katkılanmış bölgeleri üzerine yerleştirilirdi [28]. Fakat yüksek kaliteli taşıyıcı toplama işlemi kuantum kuyuları içinden bir elektrik akımı mevcutken elde edildi. Daha sonraki kuantum kuyulu hücre tasarımlarında p-i-n yapılar kullanıldı [29] ve kuantum kuyusu katkısız bölge olarak büyütüldü. Şekil 2.1’ de bu duruma ait bant diyagramı şematik olarak verilmiştir. Taşıyıcılar, kuyu içinden termal olarak ya da tünelleme yaparak kaçarlar [30-32].

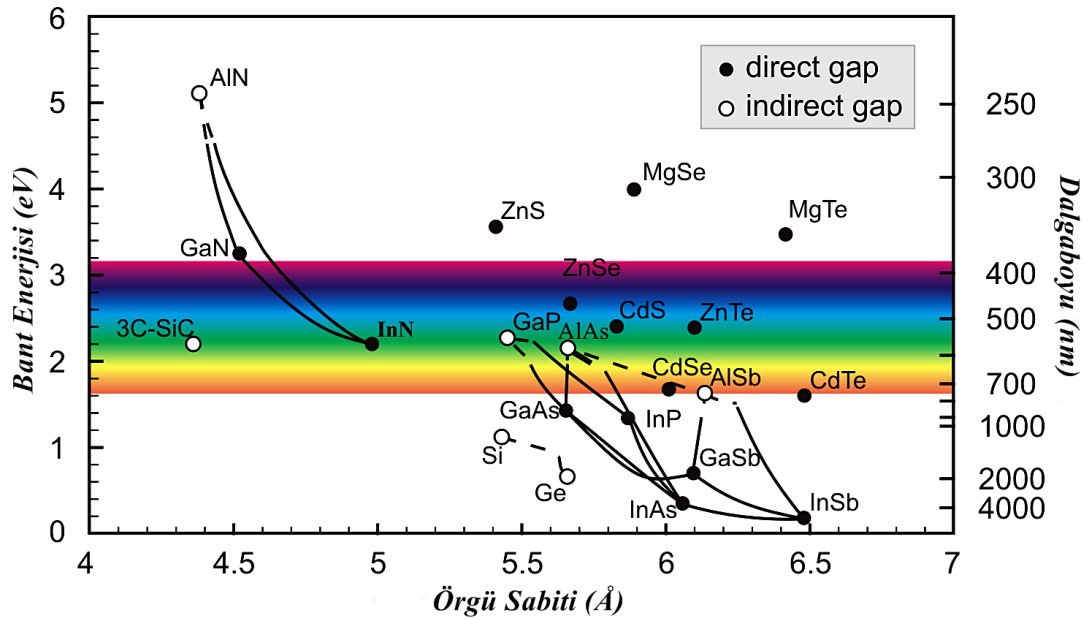


Şekil 2.1. Kuantum kuyulu p-i-n yapısı [12]

Kuantum kuyulu bir hücre ile kuantum kuyusuz bir hücre kıyaslandığında, kuyulu hücrede fotoakımının daha fazla iyileştiği gözlenmiştir. Kuantum kuyusuz hücre

bariyer kontrolü olarak da bilinir ve bir kuantum kuyulu bulk hücre ile kıyaslandığında voltajın iyileştirildiği deneysel olarak gözlenmiştir [33]. Bundan başka, fotoakım iyileştirmesi voltajdaki kayıptan daha iyi ise verimliliği de artırır [34]. Kuantum kuyularının sayısı, kuyu etrafındaki elektrik alanın devamlılığını sağlayan katkısız bölgenin maksimum kalınlığı ile sınırlıdır. Tarihsel olarak ilk p-i-n kuantum kuyulu hücreler GaAs üzerine AlGaAs büyütülmesiyle elde edildi [35-39].

Kuantum sınırlamasının, kuantum kuyularının etkin yasak enerji aralığını arttırdığını akılda tutarak, GaAs alttaş üzerine büyütülecek ikinci bir yarıiletkenin yasak enerji aralığını uzun dalga boyundaki ışığı soğurmak için küçük olması gerektiği GaAs alttaş üzerine büyütülen InGaAs QWSC'ler bu kriteri yerine getirir [40-44]. Ancak InGaAs'ı örgü parametresi GaAs örgü parametresinden daha büyük olduğu için yapıda gerilme meydana gelir (Şekil 2.2). Eğer gerilme kritik bir değeri aşarsa, rahatlama çoklu kuantum kuyusu grubunun altında ve üstünde meydana gelir. Kusurlar, yeniden oluşumları tetikler ve bundan dolayı da karanlık akım artar [45]. Kusurların artışı ile de verimlilik düşer. Bu sorunu gidermek için, gerilmeyi azaltıcı teknikler kullanılır.



Şekil 2.2. Örgü sabiti-yasak enerji diyagramı

1990'da önerilen kuantum kuyulu güneş hücresi, geleneksel p-n eklem güneş hücresinin verimini artırmaya aday bir yapıya sahiptir (Şekil 2.1) [46]. Bu yapı, büyük bant aralığına sahip yarıiletken malzeme içerisinde, küçük bant aralığına sahip malzemenin çok ince katmanlar halinde üretilmesi ile elde edilir. Böylece, küçük bant aralığına sahip malzemenin soğurma özelliği ile fotoakımın artması, çıkış gerilimininse azalmaması hedeflenir. Kuantum kuyulu güneş hücrelerinde teorik verim sınırı %44.5 olarak verilmiştir [47]. Kuantum kuyuları, özellikle fotovoltaik (PV) cihazların performansını artırmak amacıyla, solar spektrumun iyi uyumunu elde etmek için çok katmanlı yapı içerisine (p-n eklem içerisine) yerleştirilir. QWSC teknolojisi yüksek dönüşüm verimliliğine sahip cihazların geliştirilmesine önemli bir adaydır [48].

QW'li güneş hücrelerinde engel malzemesinden daha dar enerji aralıklı QW veya QD yapılarının kullanımı termal uyarma ve tünelleme etkisi nedeniyle elektron-deşik çiftlerinin üretilmesi ve kuantize boyutlu bölgedeki uzun-dalga ışınımının yutulması nedeniyle fotoakımda bir artışa yol açar. Bu durum elektron-deşik çiftlerinin etkin ayırımının yüksek elektrik alanına yol açmasına özdeştir. Bu amaçla p-i-n yapısı, düşük katkı seviyeli ve düşük kalınlıklı i-bölgesi içerecek şekilde büyütülür. Bununla birlikte, QW'de dengede olmayan elektron-deşik çiftlerinin transferi termal uyarma da sağlamalıdır [49]. Kuantum kuyularının sayısı, kuyu etrafındaki elektrik alanın devamlılığını sağlayan katkısız bölgenin maksimum kalınlığı ile sınırlıdır.

Yarıiletken seçimindeki büyük esneklik ve QWSC'lerinin kesikli enerji seviyelerine sahip olması; güneş ışığının istenilen spektrumunun soğurulabilmesi için yasak enerji aralığının değiştirilmesine imkân verir. Soğurma eşiği, kuyunun genişliği ve / veya yarıiletken kompozisyon oranının değiştirilmesi ile ayarlanır. Kusurların ve gerilmelerin giderilmesiyle de güneş ışığının daha geniş spektrumu soğurulabilir.

Düşük-boyutlu sistemlere dayalı PV hücrelerin geliştirilmesinde gelişen teknoloji için gerekenler şu şekilde sıralanabilir [49].

- ✓ Mümkin olduğu kadar keskin süperörgü arakesitleri
- ✓ Yapısal düzensizlik ve örgü gerilmelerinin kontrolü
- ✓ QW periyodikliğinin düzenli olması ve bant-aralığı profilinin belirlenmesinde deneysel ve modelleme arasında iyi uyumluluk
- ✓ Başlangıç safsızlıklarının derin seviye yoğunluğunun azaltılması

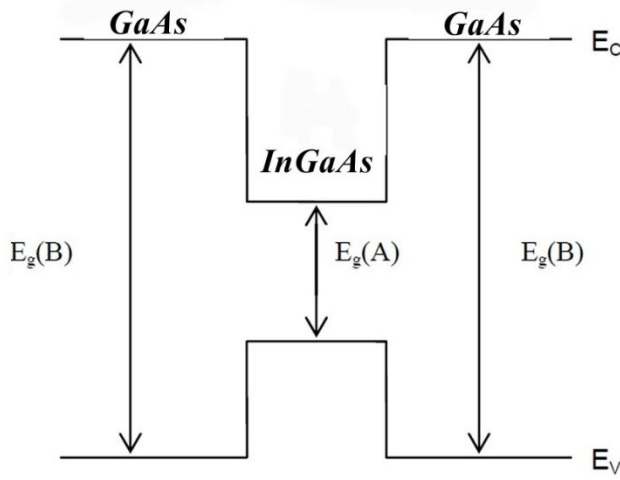
Kuantum PV cihazların performanslarının iyileştirilmesi için gerekli olan bu dört parametre, kristallerin büyütülmesi sürecinde başarılması gerekmektedir. Başlangıç kirliliklerinin en aza indirilebildiği ve mükemmel kuyu periyodikliği ile keskin arayüzey elde edilmesinde en başarılı büyütme tekniği MBE olduğu bilinmektedir.

2.4. Yarıiletken Kuantum Kuyulu Yapılar

Fotovoltaik etkinin oluşabilmesinin temellerinden biri, elektron-boşluk çiftlerinin fotonlar tarafından parçalanarak fotoakımın oluşturulması temeline dayanmaktadır. Bu amaçla yola çıkıldığında; daha iyi bir fotovoltaik etki, daha küçük enerji bant aralığına sahip p ve n tipi yarıiletkenlerin birleşmesiyle oluşturulabilir. Böyle bir yapıdaki tabaka kalınlığının değeri, De Broglie dalga boyuna yaklaştığında (yarıiletken lazer diyotlarda yaklaşık 10 nm civarındadır) elektronların hareketi kuantum etkisi göstermeye başlar [50]. Yani yarıiletkenin boyutları, taşıyıcıların ortalama serbest yolu ile kıyaslanabilir olduğu zaman, Kuantum Boyut Etkisi önem kazanır ve bu da malzemenin elektronik özelliklerini etkiler [51-56]. Böylelikle kuantum kuyulu yapılar önemini ortaya koymaya başlar.

2.4.1. Tekli kuantum kuyusu

Tekli kuantum kuyuları, dar enerji bant aralığına sahip yarıiletkenin, daha geniş bant aralığına sahip iki yarıiletken arasına sandviç edilmesiyle oluşur [57]. Şekil 2.3 tekli kuantum kuyusunu göstermektedir. Dar enerji bant aralığına sahip yarıiletken, kuantum kuyusunu oluşturur.



Şekil 2.3. Tekli kuantum kuyusu (E_v : valans bandı enerji seviyesi; E_c : iletkenlik bandı enerji seviyesi).

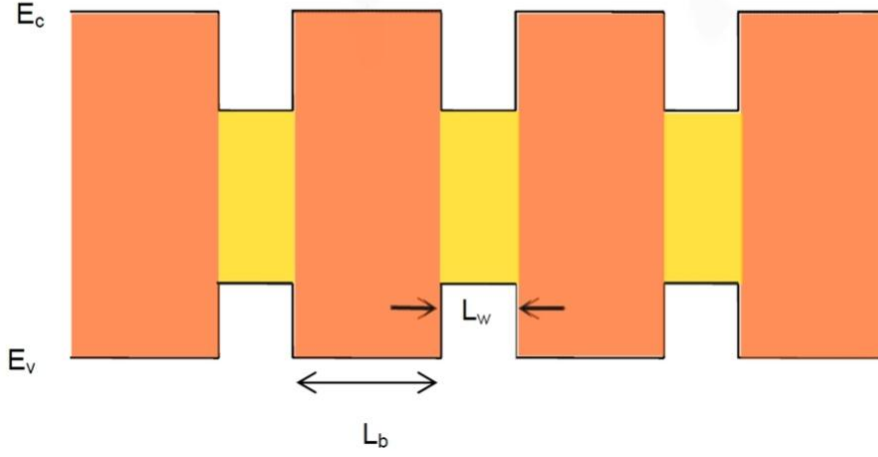
2.4.2. Çoklu kuantum kuyusu

Bariyer tabakanın kalınlığının kuyu genişliğinden daha büyük olduğu, tekli kuantum kuyulu yapıların birbiri ardına sıralanarak büyütülen bu tip yapılara, Çoklu Kuantum Kuyulu (MQW; Multiple Quantum Well) yapılar denir [58,59]. Bu bariyer tabakasının genişliği iki komşu kuyunun dalga fonksiyonlarının üst üste binmesini engellemeye yetecek kadar fazladır. Her bir kuantum kuyusu diğerinden izole edildiğinden, farklı sınırlı seviyeler takımını tanımlamak için, taşıyıcılar her kuyuda sınırlanırlar. Bu nedenle her bir kuyu bağımsız olarak tabakalara paralel, boyuna harekete katkıda bulunur.

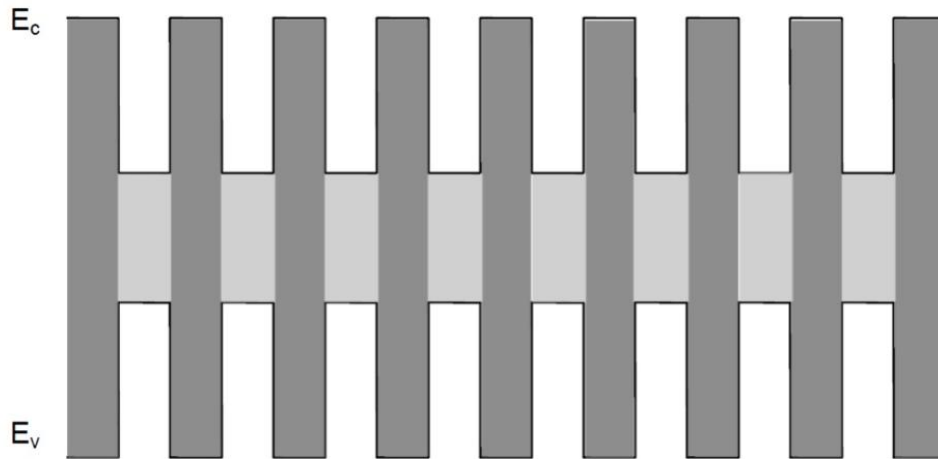
2.4.3. Süperörgüler

Süperörgülerde, bariyer genişliği, kuantum kuyularına göre daha dar olduğundan yüklü parçacıklar bir kuyudan diğer kuyuya tünellenebilmektedir, (dalga fonksiyonları üst üste binmesine izin verecek kadar), yani kuantum kuyusu içerisindeki elektron ve boşlukların dalga fonksiyonlarının kuyrukları ince bariyerleri rahatlıkla aşabilmekte ve komşu kuyulara ulaşabilmektedir. Burada taşıyıcılar (elektron ve boşluklar) küçük bantların bir serisine yerleşirler ve paralel iletim bulk yapıdakine benzer şekilde baskın hale gelir. Dikey hareket bu tip yapılarda artar.

Şekil 2.4. de tipik bir çoklu kuantum kuyusu ve şekil 2.5 de süperörgüye ait enerji bant diyagramları çizilmiştir.



Şekil 2.4. Çoklu kuantum kuyusu (L_b bariyer genişliğive L_w kuantum kuyusunun genişliği)



Şekil 2.5. Süperörgü yapısı

2.5. III-V Grubu Yarıiletken Güneş Hücreleri

Güneş hücreleri (fotovoltaik hücreler), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken aygıtlardır. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş hücrelerinin alanları genellikle 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,2–0,4 mm arasındadır.

2.5.1. Güneş hücreleri için yansımaya önleyici katman oluşturulması

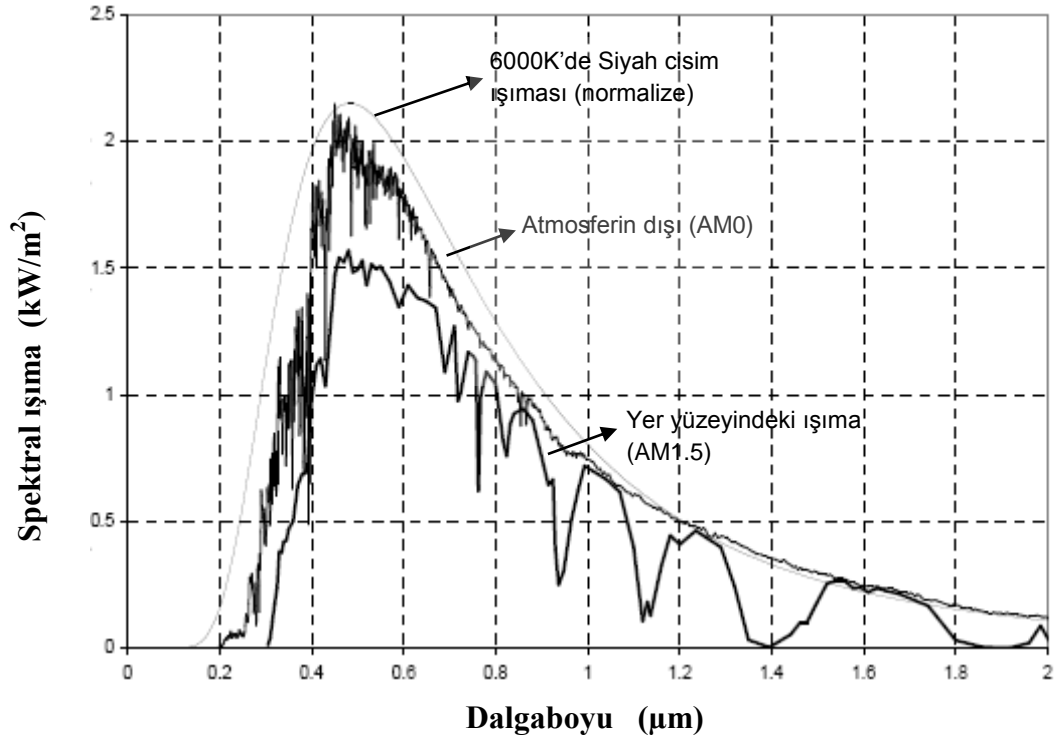
Güneş ışınlarının yüzeyden yansımalarını önlemek ve böylece hücrenin daha fazla foton soğurmasını temin etmek amacıyla hücre yüzeyleri Si₃N₄, TiO₂ gibi tekli ve TiO₂/Al₂O₃, Ta₂O₅/SiO₂ veya ZnS/MgF₂ gibi iki katlı bir dielektrik tabaka ile kaplanır. Bu yansımaya önleyici yapı, yüksek yansıtıcılığı olan (%30 civarı) malzemelerin yansıtıcılığını azaltmak (<%1) üzere tasarlanmaktadır. Bahsedilen bu etkide verime katkıda bulunmaktadır.

3. GÜNEŞ HÜCRELERİ

Güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Hücrenin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş hücresi modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç watt'tan mega watt'lara kadar sistem oluşturulabilir. Günümüzde 100 MW kurulu güce ulaşmış güneş enerjisi santralleri kurulmaktadır.

Güneşin yüzeyindeki sıcaklık 6000 K civarındadır. Güneşten yayılan enerji yeryüzüne farklı şiddetlerde ve farklı dalga boylarında ulaşmaktadır. Şekil 3.1.'de güneş enerjisinin dalga boyuna göre ışımaya şiddeti görülmektedir. AM (air mass: AM) atmosferden geçen ışığın yol uzunluğunu tarif eder ve yaklaşık olarak $1/\cos\theta$ 'dir. Burada θ , düşeyle güneşin yaptığı açıdır.

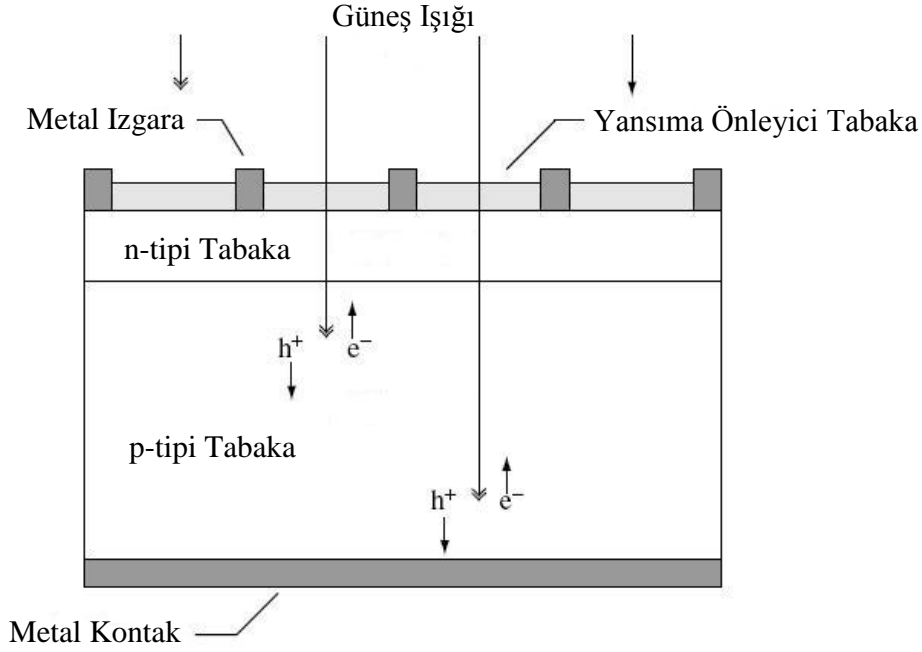
AM0, güneş ışığının atmosfer dışındaki spektral dağılımıdır ve 1366.1 W/m^2 değerine sahiptir. Bazı dalga boylarındaki ışık atmosfer içerisinde ozon O_2 , H_2O ve CO_2 gibi atmosferik gazlar tarafından yutulur. Enerjisinin bir kısmı ise, toz parçacıkları ve bazı moleküllerle Rayleigh saçılması ile azalır. Soğrulma bantları Şekil 3.1'de görünmektedir. Böylece yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarının enerji yoğunluğu AM1,5 için 970 W/m^2 olur. Bununla birlikte fotovoltaik kapsamında AM1,5 için 1000 W/m^2 olarak standart haline getirilmiştir.



Şekil 3.1. Güneşin spektral ışınması

Güneş hücrelerinin yapımında kullanılan yarıiletken malzemelerin bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar, güneş hücresinde, elektron-boşluk çiftleri üreterek, fotoakımı oluştururlar. Güneş hücrelerinde verimi sınırlayan en önemli etken ise, güneş spektrumunun (Şekil 3.2) tam olarak soğurulamamasıdır. Seçilen bant aralığının büyüklüğüne göre, enerjisi bant aralığından küçük olan fotonlar soğurulamazken, büyük enerjili fotonların enerjisinin bir kısmı ısısal iletim yoluyla kaybolmaktadır.

Güneş hücrelerinin tarihsel gelişimine bakıldığında ilk geliştirilen ve günümüzde de kullanılan tek eklemlili güneş hücreleri Şekil 3.2'deki gibi bir p-n eklemden oluşur.



Şekil 3.2. Tek eklemli fotovoltaik hücrenin yapısı

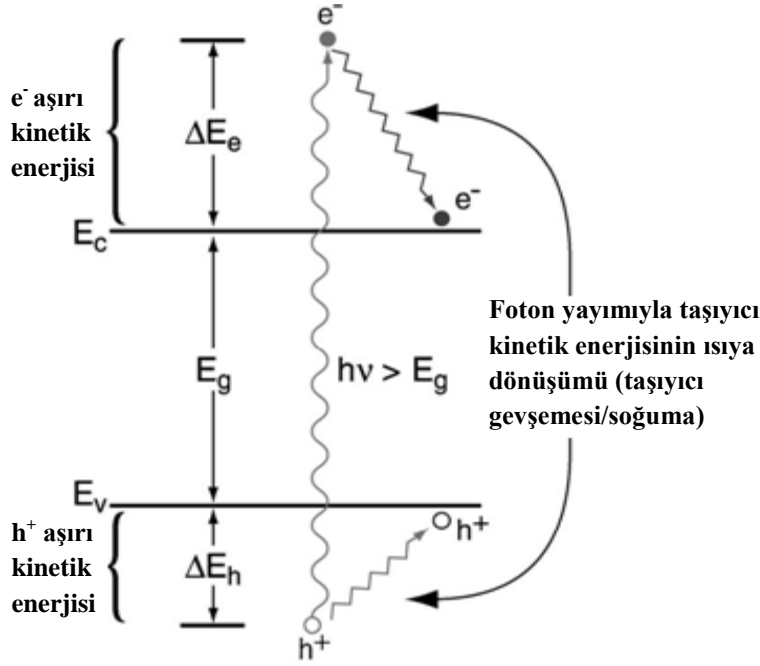
Güneş spektrumu yaklaşık 0.5 eV'dan 3.5 eV'ye kadar enerjili fotonları içerir [60]. Yarıiletkenin bant aralığından düşük elektronlar yutulamazlar; bant aralığından büyük enerjili fotonlar, aşırı kinetik enerjili yük taşıyıcılarını (sıcak elektron ve sıcak deşikler) meydana getirir. Bant-aralığı (E_g) ile fotonların enerjilerinin farkına eşit olan bu fazla kinetik enerji, normal örgü sıcaklığından fazla olabilecek şekilde foto-üretmiş taşıyıcı grupları için bir etkin sıcaklık oluşturur. Hacimli yarıiletkenlerde elektron ve deşikler arasındaki kinetik enerji oranı etkin kütleleriyle belirlenir. Düşük etkin kütleli taşıyıcılar fazla kinetik enerjiye sahiptir. Böylece

$$\Delta E_e = (h\nu - E_g) [1 + m_e^*/m_h^*]^{-1} \quad (3.1)$$

$$\Delta E_h = (h\nu - E_g) - \Delta E_e \quad (3.2)$$

'dir.

Burada ΔE_e foto-üretilmiş elektronların başlangıç enerjisi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji farkı, ΔE_h foto-üretilmiş deşik ve valans bandı arasındaki enerji farkı (Şekil 3.3), m_e^* ve m_h^* sırasıyla elektron ve hol etkin kütleleridir.

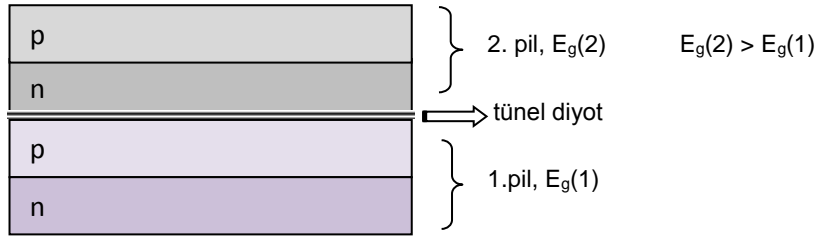


Şekil 3.3. Yarıiletkendeki sıcak taşıyıcıların gevşemesi [60].

1,2-1,4 eV bant aralıklı tek eklemli yapılar için Shockley-Queisser tarafından yapılan analize [61] göre dönüşüm verimliliğini %32'ye sınırlayan faktör, E_g 'den büyük enerjili fotonların yutulması nedeniyle, elektron-fonon saçılması ve bunu takip eden fonon yayınlanması, kendi bant kenarlarına (elektronlar için iletkenlik bandının altı, deşikler için valans bandının üstü) taşıyıcıların gevşemesi (Şekil 3.3) gibi kayıplardır. Bu kayıpları azaltmak ve verimi %32'nin üzerine çıkartmak için temel yaklaşım, güneş spektrumu ile daha iyi örtüşen bant aralıklı pn-eklemlerini ardışık bir yığın olarak kullanmaktır. Bu yolla yüksek enerjili fotonlar yüksek E_g 'li yarıiletken, düşük enerjili fotonlar düşük E_g 'li yarıiletken tarafından soğurulacaktır. Böylece fonon emisyonuyla taşıyıcıların gevşemesi sonucu oluşan ısı kaybı azaltılmış olacaktır.

p-n eklemelerinin üst üste bindirilmesiyle oluşturulan yapılar çok eklemli güneş hücreleri olarak adlandırılır. Çok eklemli (tandem) güneş hücreleri, farklı bant aralığına sahip malzemelerin üst üste konulması ile elde edilmektedir.

İki eklemli hücre için bant aralığı en büyük olan malzeme $E_g(2)$ en üste, en küçük olan malzeme $E_g(1)$ ise en alta yerleştirilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. İki eklemli güneş hücresi

Çok eklemli güneş hücreleri üzerindeki çalışmalar 1960 yılında başlamıştır [62]. Tünel diyot ve metal iç bağlantılar içerecek şekilde üretilen ilk AlGaAs/GaAs iki eklemli güneş hücresinden yüksek verim elde edilemedi [63]. Bunun sebebi, tünel diyotların kararlı olmamasına ve AlGaAs içindeki oksijen safsızlıklarına bağlandı [64]. Çift hetero-eklemli tünel diyot kullanılarak üretilen AlGaAs/GaAs 2E yapı ile %20,2 verim elde edildi [65]. 1990'da, üst katmandaki hücre için InGaP önerildi [66] ve InGaP/GaAs yapılı 2E hücrelerde %30'un üzerinde verim sağlandı [67]. InP tabanlı InGaAsP yapıları kullanılarak yüksek verimli yapılar üretildi [68]. İki eklemli güneş hücrelerinin yanı sıra üç ve daha fazla eklemli yapılar üzerine çalışmalar devam etmektedir; son olarak üretilen InGaP/GaAs/Ge 3E yapı ile yüksek ışık konsantrasyonu altında, %41,1 verim elde edildi [69].

3.1. Güneş Hücresi Türleri

3.1.1. Si tabanlı güneş hücreleri

PV üretiminde dünya genelinde kristal-silikon teknolojisi en çok rağbet gören teknoloji durumundadır. Fakat yapılan çalışmalar ve araştırmalar bu teknolojiye alternatif olacak yeni üretim teknikleri ve materyaller bulma yolunda ilerlemektedir. İnce-Film (Thin-Film) teknolojisinin daha ince tabakalar halinde olması ve kullanım alanlarının daha çeşitli olması gibi etkiler bu konuda yapılan araştırmaları artırmaktadır.

Kristal-Si teknolojisinde tekli ve çoklu silikon kullanımı ya da ince-film teknolojisinde kullanılan farklı türde materyaller (a-Si, CIS, a-Si/c-Si, CdTe vs) ticari alanda kullanılan materyaller olarak gösterilebilir.

Tek Kristalli Silisyum Güneş hücreleri

İlk ticari güneş hücrelerinde, Chrozalski kristal çekme tekniği ile büyütülen tek kristal yapılı silisyum kullanılmıştır. Fotovoltaik endüstride hala en çok kullanılan yöntem olan bu teknikte öncelikle ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli kimyasal ve termal reaksiyonlardan geçirilerek saf silisyum elde edilir. Daha sonra silisyum eriyiğe çekirdek denen tek kristal yapılı bir silisyum parçası batırılır. Bu çekirdek eriyikten çıkarıldığında soğuyan silisyum eriyik, çekirdeğin üzerine külçe şeklinde yığılmış olur. “Czochralski”, “Float-zone” ya da “Ribbon” metodu ile üretilen silindirik şeklindeki tek kristalli silisyum külçeleri ince “wafer”lar olarak kesilir. Daha sonra bu “wafer”lar üzerinde, fosfor ve bor atomları eklenmiş katmanlar (N-tipi katman ve P-tipi katman) oluşturulur ve son haline getirilmiş olunur.

Çok Kristalli Silisyum Güneş hücreleri

Çok kristalli malzemede damarlar kristal yapıda olup birbirlerine yönlenmişlerdir. Elektriksel özellikleri hemen hemen tek kristalli hücrelerle özdeşdir. Kristalin kalitesi

damarların kalınlıklarıyla doğru orantılıdır. Damarlar arasındaki süreksizlik iletimde engelleyici rol oynar. Çok kristalli silisyum üretim teknolojileri daha az enerji gerektirir, yani maliyet tek kristalli hücre baz alındığında düşüktür. Buna rağmen çok kristalli yapının verimi tek kristalli yapının verimine göre daha düşüktür. Ancak bahsedildiği gibi maliyetinin az olması onu daha fazla alanda kullanışlı hale getirmiştir.

Amorf Silisyum Güneş hücreleri

Hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) ilk olarak, 1955 yılında Sterling tarafından incelenmiş; fakat hidrojenin rolü üzerinde durulmamıştır. a-Si:H, amorf silisyumdan (a-Si 'dan) farklı bir çok özelliğe sahiptir. Fotoiletkenlik, a-Si filmlerde ihmal edilebilir olduğu halde, a-Si:H filmlerde büyük bir fotoiletkenlik olayı gözlenmektedir. Güneş hücreleri için de önemli olan fotoiletkenliktir. 1977 yılında, Wronski ve Carlson tarafından ilk defa a-Si:H güneş hücresi yapılmış ve verimi %5,5 bulunmuştur.

Amorf silisyum malzemesini kristalli silisyumdan ayıran özellik; silisyum atomlarının malzeme içindeki düzenlerinin, birinci derece komşu atomların ötesinde gelişi güzel olmasıdır. Amorf silisyum malzemedeki atomların, uzun mesafelerde etkili olabilen (uzun erimli) bir düzenlemesi yoktur. Silisyum atomlarının arasındaki bağların bazıları doymamış (dangling bonds) durumdadır. Atomların düzenli sıralanmayışı; yasak bant aralığına çok fazla izinli enerji durumu sokarak, birleşme merkezleri oluşmasına sebep olur. Malzeme içerisindeki yapı taşlarının bu gelişi güzel dizilişi, amorf-silisyumun elektriksel iletim kalitesini düşürse de; yarıiletken içerisine %5-10 oranında hidrojen katılarak, elektriksel özellikleri fotovoltaj çevrime uygun düzeyde tutulabilir. Hidrojen; doymamış Si bağlarının bazılarını doyurarak, yasak enerji aralığında bulunan izinli durumların sayısını azaltır.

3.1.2. III-V grubu güneş hücreleri

Güneş hücrelerinde fotovoltaik dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için p-n eklemi oluşturulup, ışığın p-n eklemi yakınına düşürülmesi gerekir.

Tek eklemli güneş hücreleri

Yapısında bir tane p-n eklemi bulunduran güneş hücrelerine tek eklemli güneş hücreleri denir.

Çok eklemli güneş hücreleri

Yapısında birden fazla p-n eklemi bulunduran güneş hücrelerine çok eklemli güneş hücreleri denir. Ardışık güneş hücresi yaklaşımında, en geniş yasak bant genişliğine sahip güneş hücresi en üste gelecek şekilde, gittikçe daha küçük yasak bant genişliğine sahip güneş hücreleri seri halinde art arda getirilirler. Ardışık güneş hücrelerinin yapımları daha karmaşık ve pahalı olduğundan, odaklayıcı sistemlerde kullanılması daha uygundur.

3.1.3. III-V grubu kuantum kuyulu güneş hücreleri

Kuantum kuyulu güneş hücreleri, yüksek band aralıklı yarıiletken tabakaların arasına yerleşmiş düşük band aralıklı ince tabakalardan oluşan tipik bir p-i-n diyot yapısında olan hücrelerdir. Bu tip hücrelerin avantajları; katkısız tabaka (*i*)'nin yasak enerji aralığının ayarlanabilmesi ve katkısız tabakada kuantum kuyu yapısının büyütülebilmesidir. Bu tip yapılardan olan InGaAs kuantum kuyulu güneş hücresi (QWSC) yapıları tez içerisinde ayrıca incelenecektir.

3.2. Kuantum Kuyulu Güneş Hücreleri (QWSC)

Kuantum kuyusu, bir potansiyel basamağı elde etmek için küçük yasak bant aralığına sahip yarıiletkenin büyük yasak bant aralığına sahip yarıiletkenlerin arasına yerleştirilmesiyle oluşan yapıdır. Sekil 4.2' de gösterildiği gibi elde edilen kuyu

yapısı elektronların bir yönelimdeki (z-doğrultusu) hareketini sınırlarken diğer iki yönelimdeki (x-y doğrultuları) hareketlerini serbest bırakır. Kuyunun genişliği yeterince küçük olursa, kuyunun içerisindeki elektronların hareketi büyütme yönünde kuantize olur ve bu yöndeki enerji seviyeleri farklı değerler alır [70,71]. Kuantum kuyu yapısı kullanılarak elde edilen en temel elektronik devrelerinden biride, kuantum kuyulu güneş hücreleri yapısıdır [72].

3.2.1. Kuantum kuyulu güneş hücreleri tarihçesi

Kuantum kuyuları, 1980’li yıllardan beri ledler, fotodetektörler, lazerler, optik modilatörler, yüksek mobiliteli transistörler ve biyomedikal görüntüleme ajanları gibi oldukça geniş bir alanda kullanılmakla beraber geliştirme çalışmaları da yoğun bir şekilde devam etmektedir. Kuantum kuyularının gelişimine bakarsak yarıiletken lazer tarihi ile örtüşüğünü görürüz. Bu konuda ilk olarak 1974 yılında Chang Esaki ve Tsu “Kuantum kuyu seviyelerinden rezonans tünellemeleri” adında ilk deneysel kuantum kuyu çoklu yapısını yapmışlardır [73]. Bu çalışmanın devamında da 1975 yılında J.P. van der Ziel ve arkadaşları ilk kuantum kuyu lazer işlemi (*optik uyarımlı ve 15K da çalışabilen*) çalışmasını yapmışlardır.

Kuantum kuyularının getirdiği yenilik, küçük boyutlarda istenilen bant genişliğinin ayarlanması ile soğurma bölgesinin uzun dalga boyuna doğru genişlemesi ve ışımsız geçiş olasılığının azalmasıydı. Soğurma spektrumunun özellikle kızıl ve kızılötesi bölgesinde düşük bant genişlikli kuantum kuyuları %100’e yakın verimlilik sağladılar.

Kuantum kuyusu fotovoltaikler, güneş hücrelerinin teorik verimlilik limitlerinin de üst sınırını oluşturur [74]. Kuantum kuyularının bu denli önemli bir alan olmasının temel sebebi üstün özelliklerinin yanı sıra optik ve elektronik özelliklerinin istenilen uygulamaya uygun olacak şekilde ayarlanabilmesidir.

PV hücrelerde kuantum kuyusu kullanılarak verim artışının sağlanabileceği ilk kez 1991 yılında Barnham tarafından gösterildi. Bir $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ p-i-n ve bir $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ /GaAs çok katmanlı p-i-n diyotun katkılanmamış -i- bölgesine kuantum noktalarının eklenmesi ile kısa devre akımında (I_{sc}) ciddi bir artış olduğu gözlemlendi. AM1,5 spektrumu altında verim kaybı AM0' in çok altında kalsa da yine de yaklaşık %50 oranında bir artış görülür [75]. Bu tarihten itibaren bant genişlikleri ayarlanabilen kuantum kuyuları çok katmanlı fotovoltailer veya termofotovoltailer gibi araştırma konuları doğdu.

QWSC'ler 1980'lerde deneysel olarak çalışılmaya başlanmış olmasına rağmen, deneysel çalışmaların teoriksel bir tabana taşınması çok daha sonralara dayanmaktadır.

QWSC'in çalışmasının anlaşılması için farklı teorik modeller geliştirilmiştir [76-78]. Günümüzde, QW güneş hücresinin, geleneksel güneş hücresinden daha yüksek verim sağlayıp sağlayamayacağına dair bir anlaşmazlık mevcuttur. Araujo ve Marti, termodinamik argümanları kullanarak, QWSC'in sıradan güneş hücrelerinin verim sınırını aşamayacağını göstermişlerdir [79]. Ancak Barnham (2002'de) [77] ve N.G. Anderson (2002'de) [78] verimde iyileştirme sağlayan deneysel sonuçlar sunmuşlar ve quasi-Fermi seviyelerinin Araujo ve Marti'nin varsayımlarının aksine sabit olmadığını bildirmişlerdir. Connolly'nin, kuantum kuyularından kaçış ve kuantum kuyularının taşıyıcı tutma hızlarını hesaba katmadan geliştirdiği modelde, elde edilen karanlık akımı deneysel ölçümlere göre daha fazla bulunmuştur [80]. Yine Luque ve arkadaşları, kuantum kuyusundaki taşıyıcıların ikinci bir foton tarafından bir üst enerji seviyesine çıkarılmaması halinde, kuantum kuyulu güneş hücrelerinin geleneksel güneş hücrelerinden daha fazla verim sağlayamayacağı sonucuna ulaşmışlardır [81]. Ramey ve Khoie, p-i-n güneş hücresinin katkısız bölgesine yerleştirilen kuantum kuyularının verimi artırabileceğini bildirmişlerdir [82]. Rimada ve arkadaşları, 15 tane kuantum kuyusu içeren bir yapının verimi artırdığını ve modellerinin deneysel ölçümlerle uyumlu olduğunu göstermişlerdir [83]. Guodan Wei ve arkadaşları, geliştirdikleri modelde, QWSC için verim sınırını %44,5 (normal güneş hücrelerinden yüksek) olarak rapor etmişlerdir [84]. A.V. Sachenko, kuantum

kuyusunu oluşturan malzemenin ve bariyer malzemenin saf olmaları yerine, optimum katkı konsantrasyonuna sahip olduklarında verimde iyileştirme meydana geldiğini gösteren bir model geliştirmiştir [85].

4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER

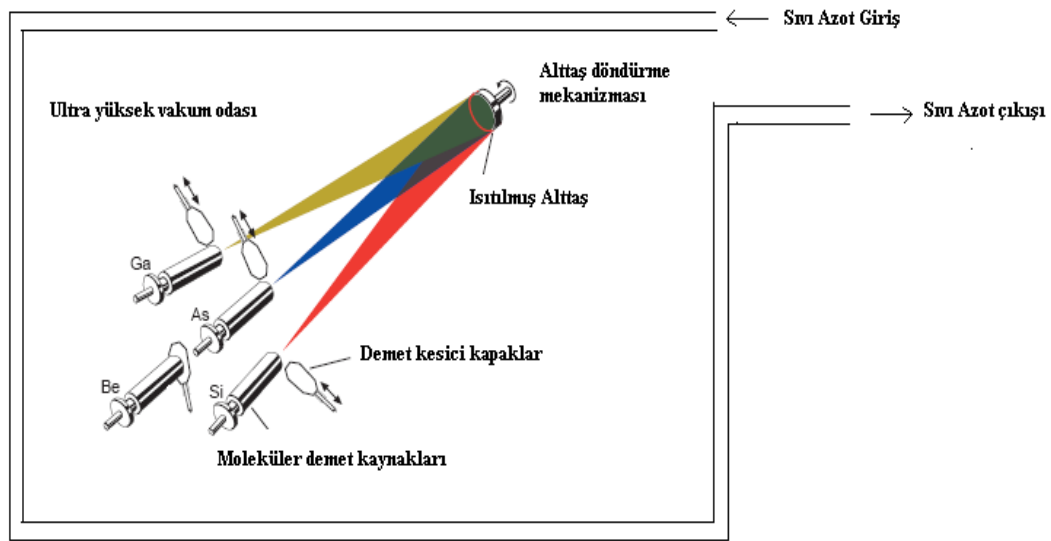
Bu tez çalışmasında incelenen kuantum kuyulu güneş hücreleri MBE yöntemi ile büyütüldü. Ardından büyütülen QWSC'lerin yapısal analizleri; Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Kırınımı (HRXRD), Atomik Kuvvet mikroskobu (AFM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) yöntemleri ile gerçekleştirildi. Yapısal analizleri tamamlanıp, güneş hücresi fabrikasyonu için uygun olan numunelere fabrikasyon işlemleri litografik süreçler şeklinde uygulandı. Fabrikasyonu tamamlanan QWSC'lerin AM1,5'teki karanlık ve güneş altındaki Akım-Gerilim (I-V) sonuçları incelendi ve gerekli hesaplamalar yapılarak, güneş hücresi çıktı parametreleri elde edildi.

MBE, HRXRD, AFM, SEM, SIMS, litografi ve I-V yöntemleri, bu bölümde teorisiyle beraber incelenmiştir.

4.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Yöntemi

Fizik dünyasında, özellikle de yarıiletken fiziğinde önemli bir yer bulan MBE yöntemi; kuantum kuyuları, kuantum noktaları, süper-örgüler, tünelleme devreleri gibi kuantum devrelerinin yapısını oluşturan yarıiletken çoklu yapılarının çok kaliteli büyütülmesini sağlayan bir tekniktir. MBE esas olarak bir vakumda buharlaştırma tekniğidir ve yüksek kalitede ince film büyütme için kullanılır [86-95]. MBE yönteminin iki önemli özelliği vardır: Vakum, ultra-yüksek vakum (UHV)'dur (toplam basınç $< 10^{-10}$ Torr) ve üretilen filmler tek kristal özelliğindedir. Termal Knudsen kaynaklarında uygun elementlerin buharlaştırılmayla üretilen moleküler demetler, ısıtılmış bir alttaş üzerine gönderilerek tek kristal katmanların oluşması sağlanır. Temel olarak MBE işleminin şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Büyütülmek istenilen yapının elementleriyle yüklenmiş olan kaynakların sıcaklığı istenilen alaşım oranını elde edecek şekilde ayrı ayrı ayarlanabilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere kaynaklar, büyütülecek filmin homojenliğini sağlayabilmek amacıyla ısıtılmış alttaşın karşısında, uygun bir geometride sıralanmıştır. Ayrıca büyütme işlemi sırasında alttaşın döndürülmesi yine homojen bir film elde

edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Büyütülen filmin istenilen kalınlıkta olabilmesi için ayrıca kaynaklar ve alttaş arasında mekanik kapaklar (kaynak kesicileri) bulunmaktadır. İçerisinden sıvı azot akışı sağlanan bir panel ile kaynaklar ve büyütme işleminin yapıldığı oda (büyütme odası) çevrilidir. Böylece hem kaynak hücreleri arasında olabilecek ısı alışverişinin engellenmesi, hem de ortamdan gelerek büyütülen filmde safsızlık oluşturabilecek kirliliklerin tuzaklanarak asgari seviyeye inmesi sağlanır.

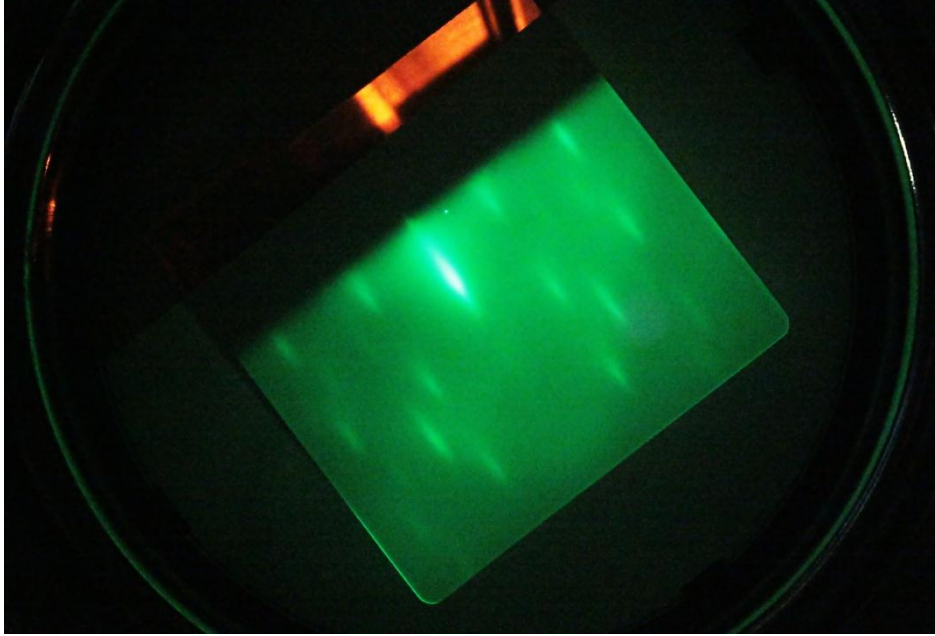


Şekil 4.1. MBE işleminin şematik diyagramı [95]

MBE yönteminin üstünlükleri genel olarak şu şekilde sıralanabilir

MBE yönteminde, büyütme oranının $1\mu\text{m/saat}$ veya *tekkatman/saniye* civarında olması hedeflenir. Bu hedefin ayarlanabilmesi için sistemin operatörü kaynakların sıcaklıklarında değişiklik yapar ve bu büyütme oranının kalibrasyonu Resim 4.1 deki RHEED desenlerine bakılarak yapılır. Bu düşük büyütme oranı, bize istenilen biçimde birleşim ve katkı atomu oranı ayarlanabilme imkânını sunar. Hızlı büyütme oranı ile yapılan tekniklerde bunu sağlamak neredeyse imkânsızdır. Bununla birlikte, düşük büyütme oranı, film büyütme süresinde uzamaya neden olduğundan bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Bu duruma ek olarak, kaynak kesicilerinin de hareketini 1 saniyeden daha kısa bir sürede tamamlaması, büyütme oranının

ayarlanmasında, istenmeyen tek tabaka büyütülmesinin engellenmesinde oldukça önemli bir role sahiptir.



Resim 4.1. Büyüme sırasındaki RHEED deseni

MBE yönteminde diğer büyütme yöntemlerine göre büyütme sıcaklığı daha düşüktür. Bu üretilen numunede film tabakalarını oluşturan elementlerin birbirleri arasında meydana gelebilecek difüzyonun ortadan kaldırılmasını sağlar.

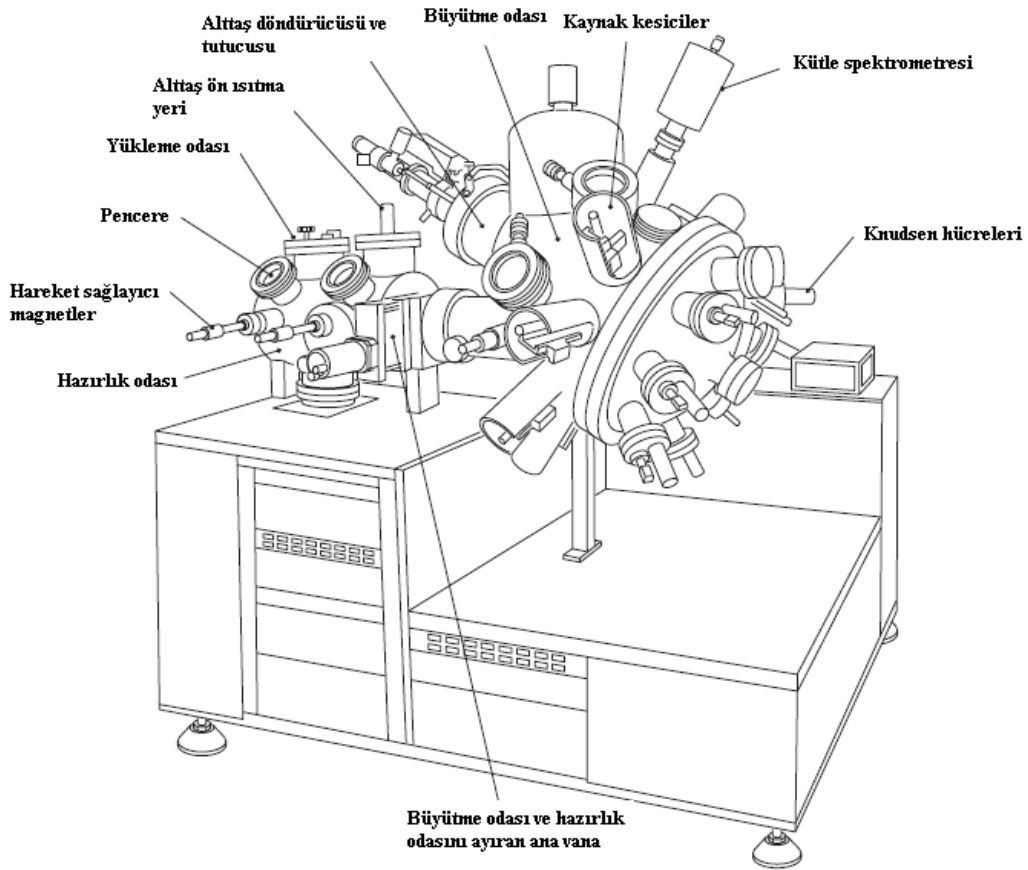
Büyütme odasına eklenebilecek elipsometri gibi cihazlarla büyütme işleminden önce, büyütme işlemi sırasında ve ya büyütme işleminden sonra epitaksiyel katmanların kimyasal ve yapısal özelliklerini analiz edilebilir.

MBE sistemlerinin diğer büyütme sistemlerine olan en önemli üstünlüğü, büyüme oranını, yüzey morfolojisini büyütme süresince kontrol ve analiz etmeye yarayan yüksek enerjili elektron kırınımı yansıma sistemine (RHEED) sahip olmasıdır. RHEED sistemi ile alttaş yüzeyi incelenerek, oksit tabakanın temizlenme durumu, yüzey yapılanması gibi kristal büyütme için uygun yüzey oluşumu gözlenerek değerlendirilebilmektedir.

Günümüz teknolojisinde büyütme işlemi sırasındaki bütün işlemler bilgisayarlar yardımıyla tam olarak kontrol edilebildiğinden, büyütme işlemi eksiksiz olarak yapılabilmektedir.

4.1.1. VG-Semicon V80H-MBE sistemi

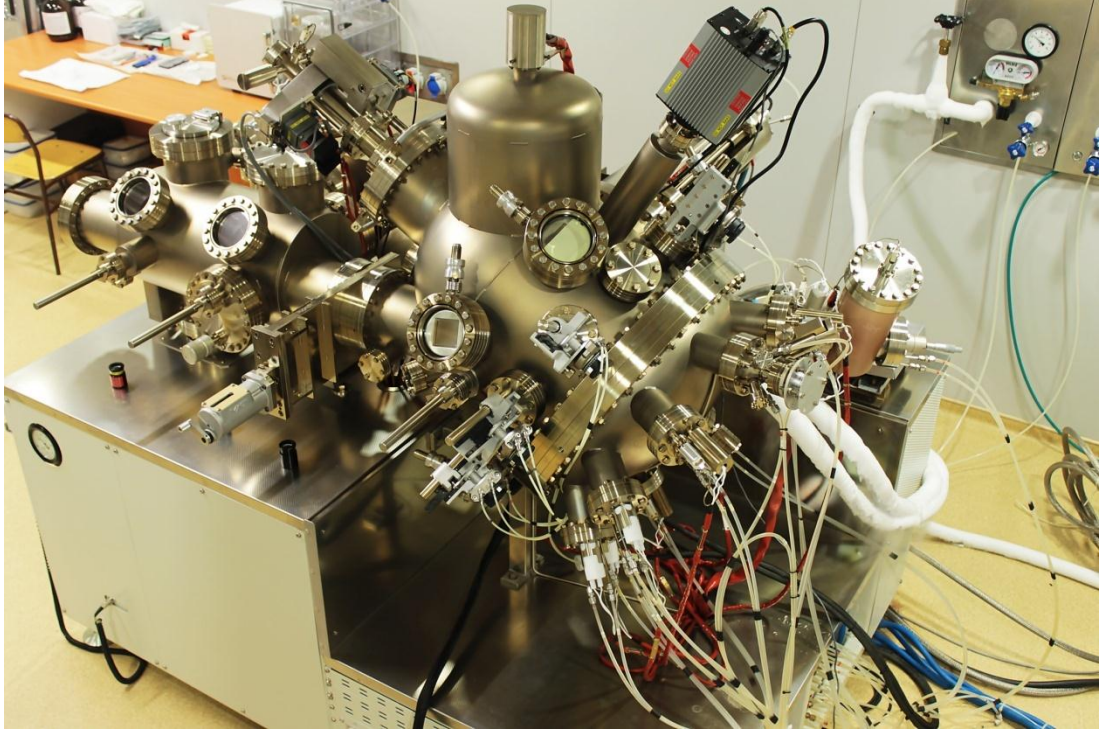
Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan VG-Semicon V80H-MBE Sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi [95]

Resim 4.2'de gösterilen MBE sistemi kısaca; büyütme odasını, yükleme odasını, hazırlık odasını, transfer mekanizmasını, bilgisayara bağlı kontrol ünitesini içermektedir. Yükleme, hazırlık ve büyütme odası UHV şartları altında tutulmaktadır. Büyütme odasında; alttaş ısıtıcısı, homojenlik sağlamak için alttaş

döndürücü, alttaşı yüklemek ve transfer yapabilmek için hareket edebilen magnetler, kaynak hücreleri, kesicileri, RHEED cihazının bileşenleri, kütle spektrometresi, akı ölçümü için iyon sayacı ve gözlem pencereleri bulunmaktadır.



Resim 4.2. V80H-10 model MBE sistemi

Hazırlık odasında, transfer mekanizması, hareketli magnetler, yükleme odası ve ilk temizleme bölümü bulunmaktadır.

Yükleme odası asansörlü sisteme sahip alttaşların kasetlik denilen raflara dizildiği kısmı içermektedir. Uygun vakum şartlarında kaset asansörü açılarak alttaşın hazırlık odasına yüklenmesi sağlanır.

Sistemin kontrolü “Modül 2500” kontrol paneline sahip, “Crystal” yazılımı ile çalışan bir bilgisayar tarafından sağlanmaktadır. Isıtıcıların sıcaklıkları, kaynak kesicilerin hareketleri, alttaşın döndürülmesi bu bilgisayar yardımıyla devamlı olarak kontrol edilir.

Büyütme odasında vakumu sağlayan iyon pompası, titanyum süblimleşme pompası, turbo moleküler pompası ve soğuk (cryo) pompası mevcuttur. Sistemde vakuma yardımcı olmak amacıyla büyütme yapılırken büyütme odasının dış kısmında bulunan panel içerisinde sıvı azot dolandırılır.

4.1.2. GS174 QWSC yapısının MBE yöntemi ile büyütülmesi

GS174 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ QWSC yapısı (100) yönelimli p tipi GaAs alttaş üzerine VG-Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü. GS174 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ QWSC yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. GS174 QWSC yapısı

GS174 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ QWSC yapısının büyütülmesindeki şartlar ve adımlar şu şekilde anlatılabilir:

- p tipi GaAs alttaş büyütme odasında transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C' de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve bu sıcaklıkta altttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.

- b) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, manipülatöre yüklendi.
- c) Alttaş manipülatöre yüklendikten sonra MIG “IN” pozisyonuna getirildi, yani alttaş tutucusunun önüne getirildi. Böylece hem kaynak hücrelerden elde edilen moleküllerin alttaş ısıtıcısı üzerine birikme yapması önlenmiş, hem de akı kalibrasyonunun doğru yapılması için MIG doğru konumlandırılmış oldu.
- d) Sıvı azotla panel doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresince sabit kalacak şekilde ayarlandıktan sonra, kaynak hücreler çok düşük sıcaklık artışlarıyla (8 °C/dak.) ısıtmaya başlandı.
- e) GS174 InGaAs/GaAs QWSC yapısını büyütme için; Arsenik (As), İndiyum (In), Galyum (Ga), Berilyum (Be) ve Silikon (Si) kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları Çizelge 4.1 ile verilen büyütme sıcaklık değerlerinin 15-20 °C üzerine kadar ısıtıldı ve o sıcaklıklarda 10 dakika bekletildi. Bu bekletme sırasında birkaç defa kaynak kesicileri açılarak hücrenin içinde ısıtılma sonucu ortaya çıkan artık gazların ve oksijenin dışarı atılması sağlandı.
- f) Kaynakların sıcaklıkları, oksijen ve diğer artık gazların çıkması sağlandıktan sonra tekrardan büyütme sıcaklıklarına indirildi.
- g) GS174 InGaAs/GaAs QWSC yapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde Crystal programı ile büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.
- h) GS174 InGaAs/GaAs QWSC yapısı için yüklenen alttaşın üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürülerek, 600 °C 'ye kadar ısıtmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 600 °C 'ye (termoçift sıcaklığı) ulaştığı zaman RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 A oluncaya kadar artırıldı. 600 °C 'den sonra alttaş yüzeyden

ayrılan As atomlarını telafi etmek için As akısı altında 680 °C 'ye kadar tam oksit kaldırma işlemi için ısıtılmaya başlandı.

- i) Alttaş sıcaklığı 620 °C olduktan sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının artık kalkmaya başladığı, desenin belirginleşmeye başlamasından anlaşıldı. Alttaşın sıcaklığı adım adım kontrollü olarak, 680 °C 'ye çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 15 dakika beklenerek tamamen oksit tabakasının alttaş yüzeyinden kalkması sağlandı. Bu işlem sonunda; RHEED deseninin netleşerek, beklenen kristal yapı düzeni belirdi. Bunun sonucunda oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- j) Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra ise alttaş sıcaklığı tampon tabakası büyütülmek üzere 660 °C' ye düşürüldü. p tipi GaAs tampon tabakası için Ga kaynak sıcaklığı 934 °C, Be kaynak sıcaklığı 850 °C olarak yazılan Crystal programına büyütme işleminin devam etmesi için komut verildi. Bu komuttan sonra Ga ve Be akı kesicisi açılarak, saatte 0,2 µm büyütme oranı ile 60nm p tipi GaAs tampon tabakası büyütüldü.
- k) GaAs tampon tabakası büyütüldükten sonra alttaş sıcaklığı 570 °C'ye, Ga kaynak sıcaklığı ise 910 °C'ye düşürüldü.
- l) Bu tabakadan sonra; In ve Ga akı kesicileri açılarak ve hâlihazırda ortamda bulunan As kullanılarak, 4 nm i-tipi InGaAs tabakası, yine As akısı altında, Ga akı kesicisi açılarak 11 nm i-tipi GaAs tabakası büyütüldü. Bu büyütmenin bir adet kuantum kuyu yapısı oluşturduğu düşünülerek; bu adımdaki büyütme yedi kez daha tekrarlandı.
- m) Kuantum kuyu yapısı büyütüldükten sonra son tabaka olarak, As, Ga ve Si akıları kullanılarak, 10 nm n-tipi GaAs tabakası büyütüldü.

Böylece GS174 InGaAs/GaAs QWSC yapısının büyütme süreçleri tamamlanmış oldu. Büyütme süreçleri tamamlandıktan sonra, As akısı altında alttaş sıcaklığı 250

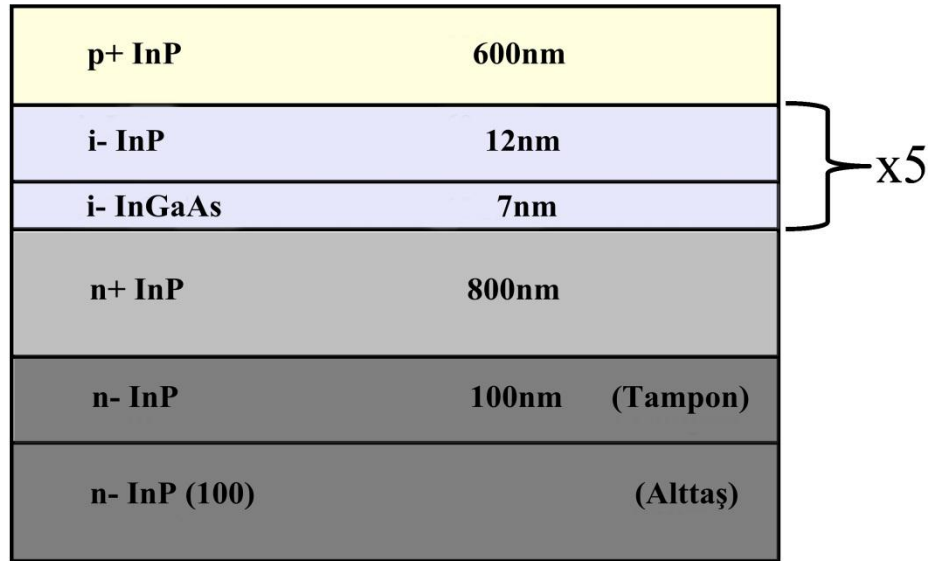
°C ye kadar soğutuldu. As akısı, alttaş sıcaklığı 250 °C'de iken As valfi kapatılarak kesildi. Alttaş döndürülmesi durdurularak, alttaş önce hazırlık odasına, daha sonra da yükleme odasına transfer edildi.

Çizelge 4. 1. GS174 InGaAs/GaAs QWSC yapısı için akı değerleri

| <i>Kaynak Hücresi</i> | <i>Sıcaklık (°C)</i> | <i>Demete Eşdeğer Basınç (BEP) (mbar)</i> |
|----------------------------|----------------------|---|
| İndiyum (In) | 760 | $1,8 \times 10^{-7}$ |
| Galyum (Ga) | 910 | $9,5 \times 10^{-7}$ |
| Arsenik Bulk (As_B) | 380 | ----- |
| Arsenik Cracker (As_C) | 950 | $2,2 \times 10^{-6}$ |
| Silikon (Si) | 1130 | ----- |
| Berilyum (Be) | 850 | ----- |

4.1.3. GS249 QWSC yapısının MBE yöntemi ile büyütülmesi

GS249 $In_xGa_{1-x}As/InP$ QWSC yapısı (100) yönelimli n tipi InP alttaş üzerine VG-Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü. GS249 InGaAs/InP QWSC yapısı Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. GS249 QWSC yapısı

GS249 InGaAs/InP QWSC yapısının büyütülmesindeki şartlar ve adımlar şu şekilde anlatılabilir:

- a) n tip InP alttaş büyütme odasında transfer edilmeden önce hazırlık odasında 350 °C’ de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve bu sıcaklıkta alttttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.
- b) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, manipülatöre yüklendi.
- c) Alttaş manipülatöre yüklendikten sonra MIG “IN” pozisyonuna getirildi, yani alttaş tutucusunun önüne getirildi. Böylece hem kaynak hücrelerden elde edilen moleküllerin alttaş ısıtıcısı üzerine birikme yapması önlenmiş, hem de akı kalibrasyonunun doğru yapılması için MIG doğru konumlandırılmış oldu.
- d) Sıvı azotla panel doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresince sabit kalacak şekilde ayarlandıktan sonra, kaynak hücreler çok düşük sıcaklık artışlarıyla (8 °C/dak.) ısıtmaya başlandı.
- e) GS249 InGaAs/InP QWSC yapısını büyütme için; Arsenik (As), İndiyum (In), Galyum (Ga), Fosfat (P) kaynağı olarak kullanılan Galyum Fosfat (GaP), Berilyum (Be) ve Silikon (Si) kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları Çizelge 4.2 ile verilen büyütme sıcaklık değerlerinin 15-20 °C üzerine kadar ısıtıldı ve o sıcaklıklarda 10 dakika bekletildi. Bu bekletme sırasında birkaç defa kaynak kesicileri açılarak hücrenin içinde ısıtılma sonucu ortaya çıkan artık gazların ve oksijenin dışarı atılması sağlandı.
- f) Kaynakların sıcaklıkları, oksijen ve diğer artık gazların çıkması sağlandıktan sonra tekrardan büyütme sıcaklıklarına indirildi.
- g) GS249 InGaAs/InP QWSC yapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde Crystal programı ile büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.

- h) GS249 InGaAs/InP QWSC yapısı için yüklenen alttaşın üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürülerek, 520 °C 'ye kadar ısıtılmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 520 °C 'ye (termoçift sıcaklığı) ulaştığı zaman RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 A oluncaya kadar artırıldı. 520 °C 'den sonra alttaş yüzeyden ayrılan As atomlarını telafi etmek için As akısı altında 570 °C 'ye kadar tam oksit kaldırma işlemi için ısıtılmaya başlandı.
- i) Alttaş sıcaklığı 510 °C olduktan sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının artık kalkmaya başladığı, desenin belirginleşmeye başlamasından anlaşıldı. Alttaşın sıcaklığı adım adım kontrollü olarak, 570 °C 'ye çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 20 dakika beklenerek tamamen oksit tabakasının alttaş yüzeyinden kalkması sağlandı. Bu işlem sonunda; RHEED deseninin netleşerek, beklenen kristal yapı düzeni belirdi. Bunun sonucunda oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- j) Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra ise alttaş sıcaklığı tampon tabakası büyütölmek üzere 550 °C' ye düşüröldü. n tipi InP tampon tabakasının büyütölmesi için; In kaynak sıcaklığı 758 °C, Si kaynak sıcaklığı 1100 °C, GaP kaynak sıcaklığı 1040 °C olarak ayarlanan Crystal programına "devam et" komutu verildi. Bu komuttan sonra In, GaP ve Si akı kesicisi açılarak, saatte 0,2 µm büyütme oranı ile 100nm n tipi InP tampon tabakası büyütöldü.
- k) Tampon tabakası büyütöldükten sonra, Si kaynak sıcaklığı 1150 °C'ye çıkarılarak; 800nm kalınlıklı, yüksek Si katkılı InP (n+InP) tabakası In, GaP ve Si akı kesicisi açılarak büyütöldü.
- l) Bu tabakadan sonra; In,Ga ve As akı kesicileri açılarak 7 nm i-tipi InGaAs tabakası; In ve GaP akı kesicisi açılarak 12 nm i-tipi InP tabakası büyütöldü. Bu büyütmenin bir adet kuantum kuyu yapısı oluşturduğu düşünölererek; bu adımdaki büyütme dört kez daha tekrarlandı.

m) Kuantum kuyu yapıları büyütüldükten sonra son tabaka olarak, In, GaP ve Be akıları kullanılarak, 600nm p-tipi InP tabakası büyütüldü.

Böylece GS249 InGaAs/InP QWSC yapısının büyütme süreçleri tamamlanmış oldu. Alttaş 200 °C'ye soğutulduktan sonra önce hazırlık odasına, daha sonra da yükleme odasına transfer edildi.

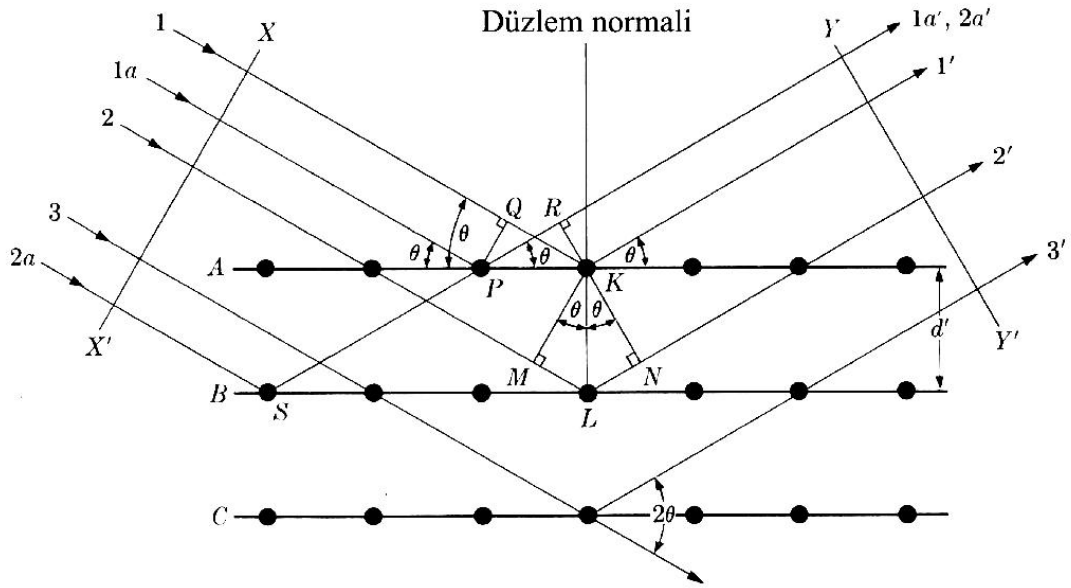
Çizelge 4. 2. GS249 InGaAs QWSC yapısı için akı değerleri

| <i>Kaynak hücresi</i> | <i>Sıcaklık (°C)</i> | <i>Demete Eşdeğer Basınç (BEP) (mbar)</i> |
|------------------------------------|----------------------|---|
| İndiyum (In) | 758 | $3,7 \times 10^{-7}$ |
| Galyum (Ga) | 853 | $1,8 \times 10^{-7}$ |
| Arsenik Bulk (As _B) | 380 | ----- |
| Arsenik Cracker (As _C) | 950 | $2,2 \times 10^{-6}$ |
| Silikon (Si) | 1150 | ----- |
| Silikon (Si) | 1100 | ----- |
| Berilyum (Be) | 875 | ----- |

4.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işınları Kırınımı (HRXRD)

Kırınım deneyleri kristalleşmiş materyallerin yapısal kalitesini göstermek için kullanılan tekniklerdir [96]. Bu teknikler kristallerin örgü parametrelerinin ölçülmesini sağlayarak yapısal kusurlar hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Bütün kırınım deneylerinin temeli Şekil 4.5'te gösterilen Bragg kanununa dayanır. ve basitçe Eş. 4.1 ile verilir.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4.1)$$



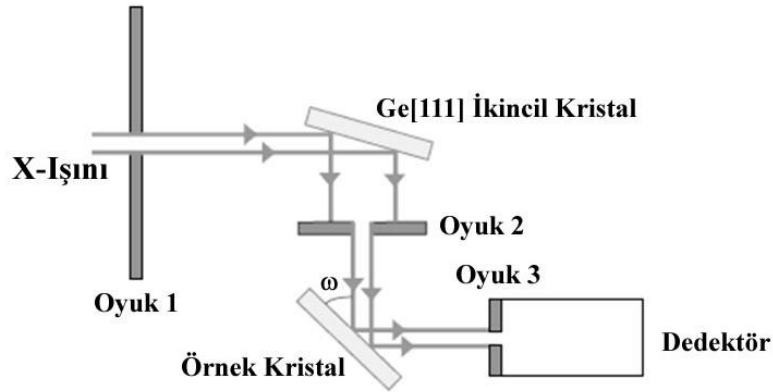
Şekil 4.5. Kristal düzlemlerinden x-ışınlarının saçılması

Burada d özdeş düzlemler arasındaki uzaklık ve θ kırınım açısıdır. Teknolojinin ilerlemesiyle gelişmiş deney setlerinde yukarıdaki basit eşitlik kullanılarak yapılan analizler detaylı yapısal bilgiler verebilir. Elbet ki, kırınım deneyleri ayrıca hacim (bulk) yarıiletkenlerin örgü sabitleri hakkında da bilgi vermektedir.

4.2.1. HRXRD analiz sisteminin çalışma prensibi

Bu teknik için tipik bir ölçüm düzeneği Şekil 4.6'de verilmiştir. X-ışını demeti ilk olarak yüksek kaliteli bir kristale çarparak kırınımına uğrar. Kırınan demet örnek kristal üzerine düşer. Eğer iki kristal için Bragg açıları eşitse oldukça dar bir kırınım deseni gözlenir. Örnek kristalin geniş-aralıkta yapısal dizilimini veren rocking-eğrilerini elde etmek için örnek kristal küçük bir ω açısıyla döndürülür ve kırınan demet şiddeti kaydedilir. Yüksek kaliteli kristaller birkaç arc-saniye genişliğinde piklere sahiptirler. Bu teknik özellikle kalın alttaşlar üzerine büyütülmüş ince katman filmler için yararlıdır. Genellikle, bu durumlarda birisi alttaştan ve diğeri ise ince film katmanından gelen iki pik gözlenir. Alttaş ve ince katmanın Bragg yansımaları için $\Delta\omega$ farkı $\Delta\theta$ ve $\Delta\phi$ olmak üzere iki bileşen içermektedir. Alttaş ve katman için

$\Delta d/d$ örgü düzlemleri arasındaki fark Bragg açılarındaki $\Delta\theta$ farkına neden olur. $\Delta\omega'$ nın ikinci bileşeni $\Delta\phi$ ise ince katmanın ve alttaş örgü düzlemlerinin eğiklikleri arasındaki farktır.



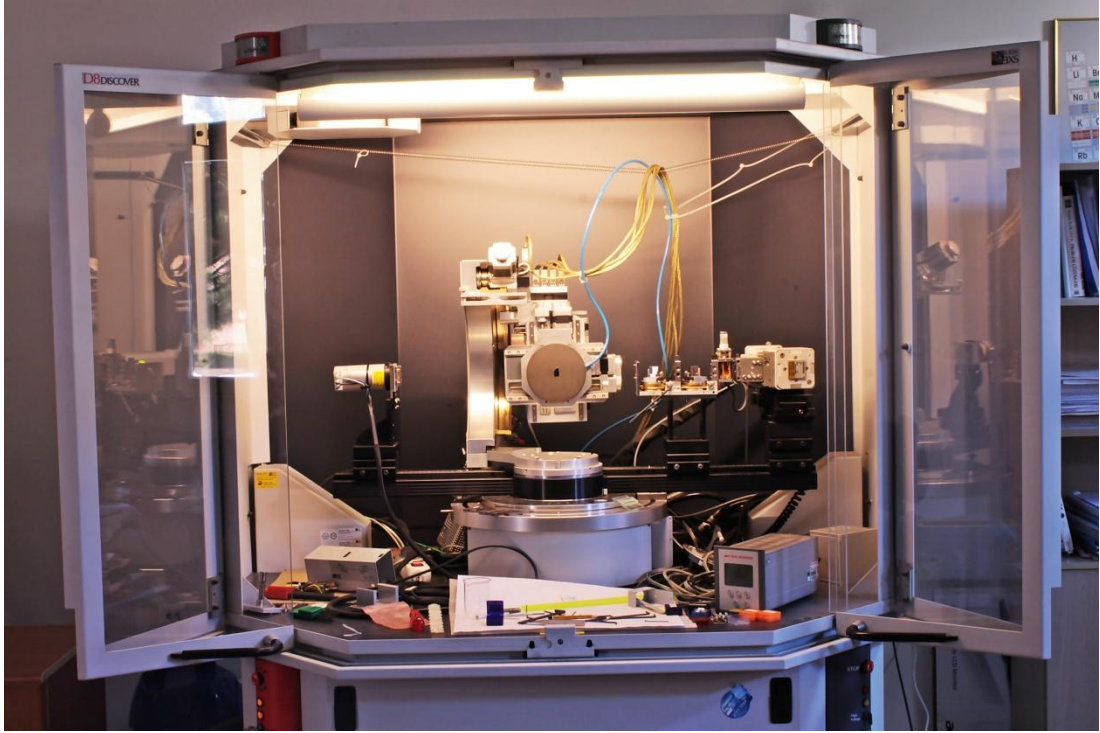
Şekil 4.6. Çift kristal x-ışını kırınım düzeneği [97]

4.2.2. GS174 ve GS249 QWSC yapılarının HRXRD analizi

Bu tez çalışmasında GS174 ve GS249 QWSC yapılarının HRXRD analizi; Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Bruker D8 Discover XRD cihazı kullanıldı. Bu cihaz Ge(022) yönelimli dört kristal monokromatöre ve x-ışını kaynağı olarak KPLCu $2\alpha'$ ya sahiptir. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 4.3'de ve cihazın resmi de Resim 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4. 3. X-ışınları difraktometresinin teknik özellikleri

| | |
|------------------------|----------------|
| Difraktometre çemberi | Bruker axs D8 |
| Jeneratör gerilimi | 40 kV |
| Jeneratör akımı | 40 mA |
| Radyasyon | CuK α 1 |
| Monokromatör tipi | Jhannson |
| Monokromatör malzemesi | Ge(022) |
| Odak | Line odak |
| α 1 dalga boyu | 1.54 Å |

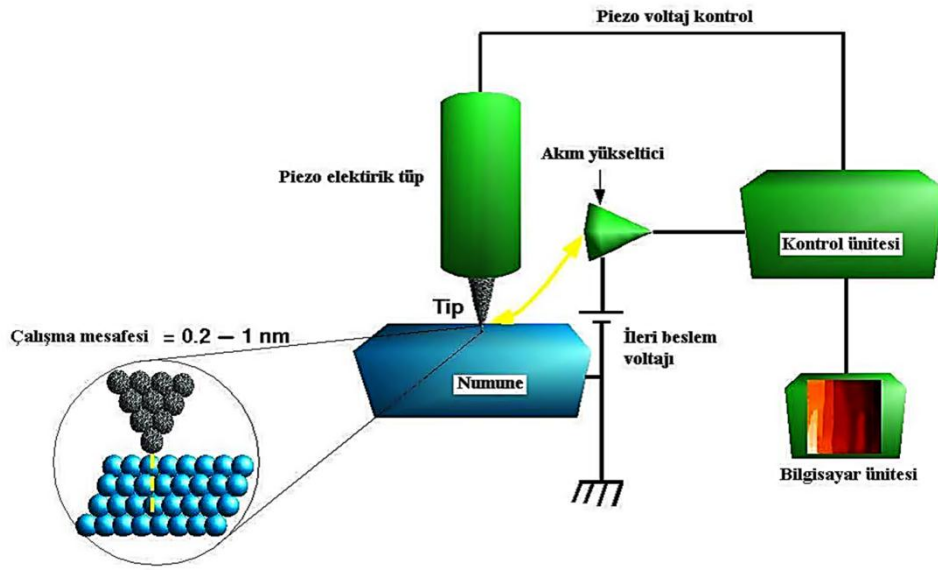


Resim 4. 3. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü

4.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Ulaşılmış çözünürlüğü bir kaç nanometre ölçeğinde olup, optik tekniklerden en az 1000 kat fazla olan AFM tekniğinin gün ışığına çıkmasından önce; Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM), 1980'lerin başında Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer IBM Research Zürich'te geliştirilmiş, araştırmacılara 1986 Nobel Ödülü'nü kazandırmıştır [98]. Sonrasında Binnig, Quate ve Gerber 1986'da ilk AFM'yi geliştirdiler. İlk ticari AFM 1989'da piyasaya sürüldü. AFM, nano boyutta görüntüleme, ölçme ve malzeme işleme konusunda en gelişmiş araçlardan biridir.

Şekil 4.7 de şematize edilen AFM taramasından istenilen bilgi, mekanik bir ucun (Cantilever) yüzeyi algılamasıyla toplanır. Elektronik kumanda üzerinde bulunan, küçük fakat hassas hareketleri sağlayan piezo elektrik öğeler doğruluğu kesin hassas bir tarama sağlar. İletken manivelalar kullanmak suretiyle numune yüzeyindeki elektrik potansiyeli de taranabilir.



Şekil 4.7. AFM analiz sisteminin şematik gösterimi [99]

AFM kullanılarak aşağıda ana maddeler olarak verilen özellikler hakkında bilgi edinilebilir.

- ✓ Yüzeyinin nasıl görüldüğü, yüzey üzerinde bulunan moleküler yapılar arasındaki ilişkiler hakkında bilgi veren yüzey topografisi,
- ✓ Maddeyi oluşturan parçacıkların büyüklükleri ve şekli, bu parçacıkların birbirleriyle etkileşimleri ile ilgili bilgi veren yüzey morfolojisi,
- ✓ Aşınma, korozyon, pürüzlendirme, sürtünme, kayganlaştırma, kaplama ve cilalama, elektriksel yük, manyetiklik, nano mekanik özellikler hakkında bilgi veren yüzey etkileşim özellikleri,

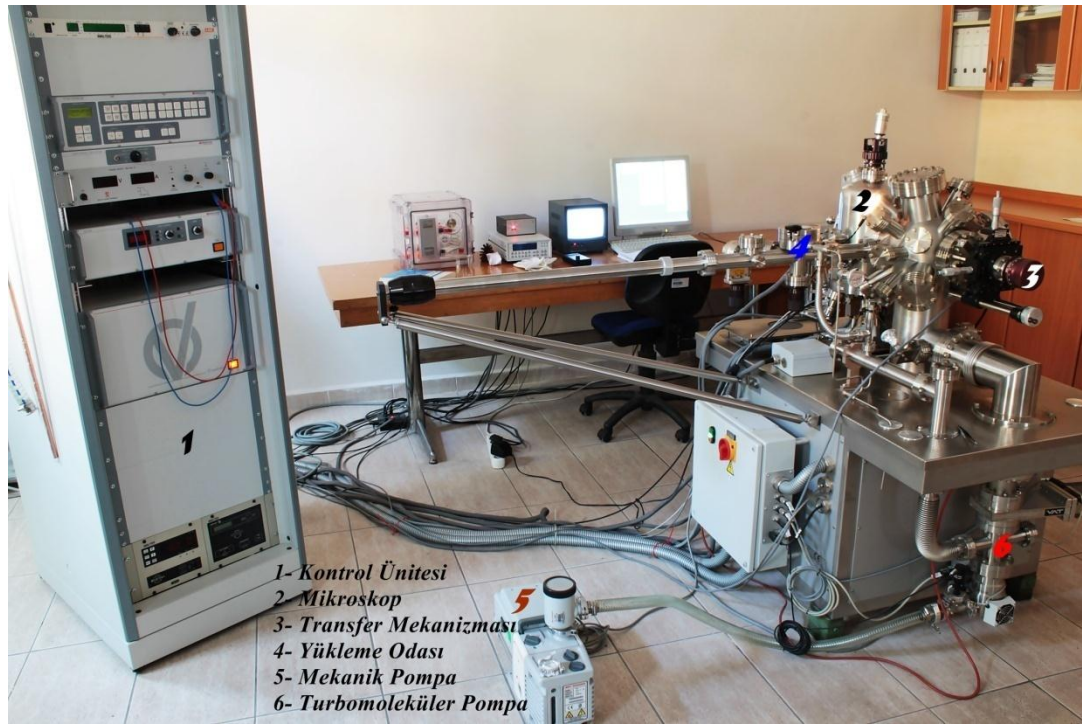
Ayrıca AFM kullanılarak örneği oluşturan molekül ve elementlerin bileşimi, bunların relatif miktarları ve maddelerin erime noktaları ve sertliği gibi bazı maddesel özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Bunların yanında atomların madde içinde nasıl düzenlendikleri, bu düzenler arasındaki ilişkiler ve örneği oluşturan maddelerin

elektriksel özellikleri (örneğin iletkenlik) gibi kristalografik bilgi de veren AFM görüntüleri elde edilebilir.

4.3.1. AFM analiz sisteminin çalışma prensibi

Şematik gösterimi Resim 4.4' de verilen Omicron AFM sistemi kısaca; yükleme odası, transfer mekanizması, numune depolama alanı, mikroskop kısmı ve bilgisayara bağlı kontrol ünitesini içermektedir. Yükleme odası, mikroskop ve diğer kısımların içinde bulunduğu oda UHV şartları altında tutulmaktadır.

- *Yükleme Odası:* Analizi yapılacak olan numunenin sisteme ilk entegre yeridir.
- *Transfer Mekanizması:* Sistem içerisinde, Mikroskop, magazin ve yükleme odası arasındaki transfer işlemi gerçekleştiren mekanizmadır.
- *Numune Depolama Alanı:* Analiz yapılmış ya da yapılacak olan numunelerin sistem içerisinde bekletildiği yerdir.
- *Mikroskop:* Numunelerin analizinin yapıldığı kısımdır.
- *Kontrol Ünitesi:* Sistemin basınç, sıcaklık ve güç kontrollerinin yapıldığı kısımdır.



Resim 4. 4. Omicron-Variable Temperature AFM/STM sistemi

Analizi gerçekleştirecek olan cantilever, yüzeyi taramak için kullanılan sivri bir uçtan oluşur ve yaklaşık tek atom boyutlarındadır. Cantilever genellikle silikon ya da silikon nitrürdür. Nanometre ölçeğinde eğrilik yarıçapı olan bir uç taşır. Uç, numune yüzeyine yakın bir mesafeye getirilince, uç ile yüzey arasındaki kuvvetler Hooke kanunu uyarınca manivelanın bükülmesine yol açar. Duruma bağlı olarak AFM’de ölçülen kuvvetler mekanik temas kuvveti, Van der Waals kuvveti, kimyasal bağ, elektrostatik kuvvet, manyetik kuvvet, casimir kuvveti, çözünme kuvveti olabilir. Kuvvetler ile birlikte, diğer başka özellikler eşzamanlı olarak özel tip algılama teknikleri ile ölçülebilir. Örneğin, taramalı ısı mikroskopisi, taramalı joule genişleme mikroskopisi, foto ısı mikro spektroskopisidir.

AFM analizi yaparken, eğer uç sabit bir yükseklikte tarama yaparsa, yüzeye çarpıp hasar oluşturma riski doğar. Bu nedenle genellikle uç ile yüzey arasındaki kuvveti sabit tutmak ve mesafeyi ayarlamak amacıyla bir negatif geri besleme mekanizması kullanılır. Tipik olarak numune, “z” yönünde hareket edip yüksekliği ayarlayan, “x” ve “y” yönünde hareket edip taramayı sağlayan bir dizi piezo elektrik düzenek

aracılığıyla taranır. Buna alternatif olarak, her biri x,y,z yönlerine karşılık gelen üç piezo kristalin üçayaklı düzeneği sayesinde tarama yapılabilir. Bu düzenek tüp tarayıcılarda görülen bozulmaları da ortadan kaldırır. Daha yeni düzeneklerde, tarama ucu dikey piezo tarayıcıya monte edilirken, incelenen örnek başka bir piezo grup kullanılarak X, Y doğrultusunda taranır. Açığa çıkan $z = f(x,y)$ haritası yüzeyin topografyasını temsil eder.

AFM uygulamaya bağlı olarak çeşitli modlarda kullanılabilir. Bu görüntüleme modları “*statik*” (temas) ya da “*dinamik*” (temassız) olabilir.

- ✓ *Dinamik mod*; cantileverin akustik ya da manyetik yollarla titreştirilmesini gerektirir ve yumuşak yüzeyler (biyolojik süsratlar ve polimerler gibi) için daha yaygın olarak kullanılır.
- ✓ *Statik mod*; analizi yapılan numuneye temas edilerek ölçüm yapılırken kullanılır. Temas etkisinden dolayı çözünürlüğü yüksek ve atomik seviyede görüntüler elde edilir.

Bunların yanında iki mod daha vardır. Bu iki mod ise; sabit yükseklik ve sabit kuvvet modudur.

- ✓ *Sabit yükseklik*; tarama yapılırken cantilever ile yüzey arası mesafe sabit tutulur ve kuvvetteki değişim esas alınır.
- ✓ *Sabit kuvvet*; tarama yapılırken cantilever ve yüzey arasında kuvvet sabit tutulacağı için mesafe değişir, bu mesafe değişimine göre topografya oluşturulur.

4.3.2. GS174 ve GS249 QWSC yapılarının AFM analizi

Bu tez çalışmasında GS174 ve GS249 QWSC yapılarının AFM analizi; Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Omicron-Variable Temperature AFM/STM sistemi ile alınmıştır. AFM analizine başlamadan önce numuneler, propanol ile temizlendi ve hemen ardından N₂ gazı ile kurutulup, her biri 1x1 cm² olan numuneler AFM sistemine yüklendi.

4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM, çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışır. Manfred von Ardenne öncülüğünde 1930'lı yıllarda geliştirilmiştir. En sık kullanıldığı biçimiyle, yüzeyden yayılan ikincil elektronlarla yapılan ölçüm, özellikle yüzeyin engebeli (topografik) yapısıyla ilişkili bir görüntü oluşturur [100].

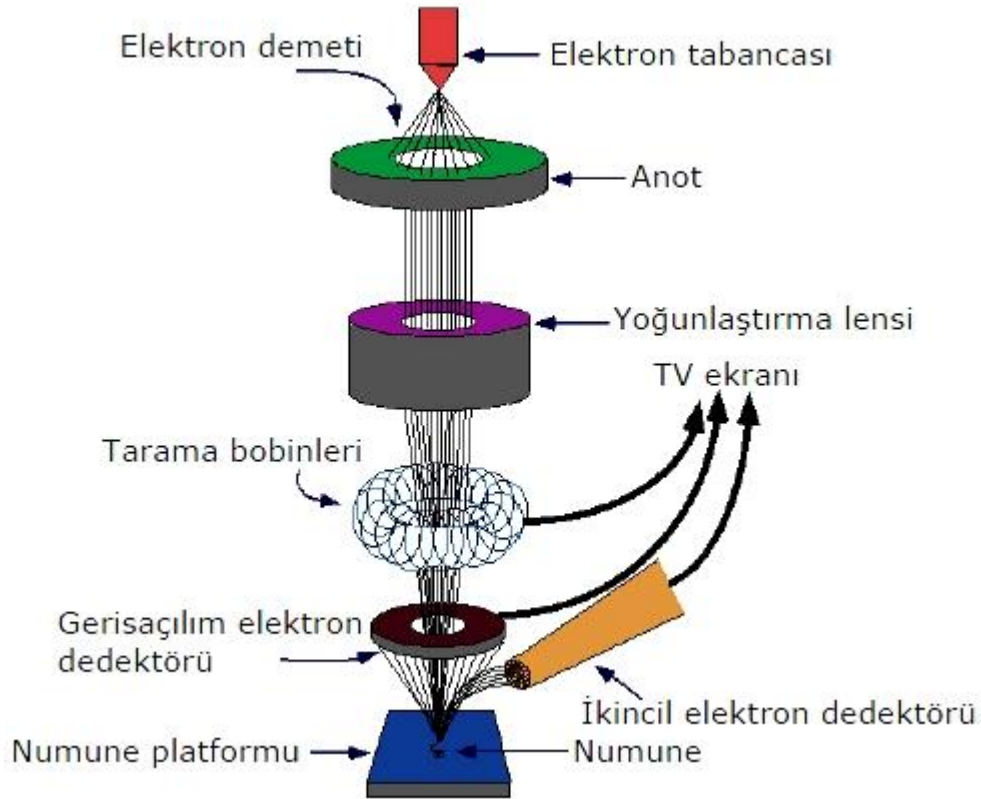
Temel olarak taramalı elektron mikroskobu; Tungsten, Lantan hekza borit katottan veya alan emisyonlu (FEG) tabancadan ortaya çıkan elektronların kullanımı incelenecek malzeme yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşimlerden yararlanılması esasına dayanır. SEM'lerin genel olarak bu elektron enerjisi 200-300 eV dan 100 keV a kadar değişebilir. Bu amaçla, yoğunlaştırıcı elektromanyetik mercekle (condenser lense) toplanan, objektif mercekle odaklanan elektron demeti, yine elektromanyetik saptırıcı bobinlerle örnek yüzeyinde tarama işlemi (scanning) gerçekleştirir. Bir taramalı elektron mikroskobunda görüntü oluşumu temel olarak; elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşimlerin (elastik, elastik olmayan çarpışmalar ve diğerleri) sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve incelenmesi prensibine dayanır.

Oluşan elektron gruplarından ilki, gelen elektron demetindeki elektronların, malzemedeki atomlarla yapmış olduğu elastik olmayan çarpışma sonucu (yani, örnek yüzeyindeki atomlardaki elektronlara enerjilerini transfer ederek) ortaya çıkan ikincil elektronlardır. Bu elektronlar örnek yüzeyinin yaklaşık 10 nm'lik bir derinliğinden

ortaya çıkarlar ve bunların tipik enerjileri en fazla 50 eV civarındadır. İkincil elektronlar foto çoğaltıcı tüp yardımıyla toplanıp, örneğin tarama sinyali konumuyla ilişkilendirilerek yüzey görüntüsü elde edilir. Elektron demeti ile incelenen örnek yüzeyindeki malzeme arasındaki etkileşimde ortaya çıkan diğer bir elektron grubu ise geri saçılma elektronları (backscattered electrons) adı verilen elektronlardır (bu elektronlar, yüzeye gelen elektron demeti ile yaklaşık 1800 açı yapacak biçimde saçılırlar). Geri saçılma elektronları, yüzeyin derin bölgelerinden (yaklaşık 300 nm'ye kadar) gelen daha yüksek enerjili elektronlardır. Bu enerjideki elektronlar bir foto çoğaltıcı tüp tarafından tespit edilemeyecek kadar yüksek enerjiye sahip olduklarından, genellikle quadrant foto detektörlerle (yani katihal detektörleri) yardımıyla tespit edilir. Bilindiği üzere bu tür detektörler üzerine gelen elektronların indüklediği elektrik akımın şiddetine göre çıkış sinyali verirler (kısaca hatırlatmak gerekirse, incelenecek örnekteki yüksek atom numarasına sahip bir atomdan saçılan elektronun enerjisi küçük atom numaralı bir atomdan saçılana göre daha yüksektir). Sonuç olarak ikincil elektronlar incelenen örneğin kompozisyonu hakkında bilgi verir.

4.4.1. SEM analiz sisteminin çalışma prensibi

Şekil 4.8. da gösterildiği üzere gelen elektron demetinin incelenen örnek yüzeyi ile yapmış olduğu diğer bir etkileşime ise (yaklaşık 1000 nm derinlik civarında), karakteristik X ışınlarının çıktığı durumdur (enerjileri keV mertebesindedir). Buna göre örneğe çarpan elektron, örnekteki atomun iç yörüngesinden bir elektron kopmasına neden olunca, enerji dengelenmesi gereği bir üst yörüngedeki elektron bu seviyeye geçer ve geçerken de ortama bir X ışını yayar ve buna da karakteristik X ışını adı verilir. Bu X ışını mesela 10 mm² çapındaki bir Si (Li) detektörle algılanır, ortaya çıkan sinyal yükselticiye, oradan çok kanallı analizöre ve daha sonra da SEM sistemin bilgisayarına gönderilir. Sonuçta ortaya çıkan karakteristik X ışını (ki bu ışının enerjisi her atoma özeldir), SEM' de incelenen malzemenin element bakımından muhtevasının nitel ve nicel olarak tespit edilmesine yardımcı olur [101].



Şekil 4.8. SEM Analiz sisteminin şematik gösterimi

4.4.2. GS174 ve GS249 QWSC yapılarının SEM analizi

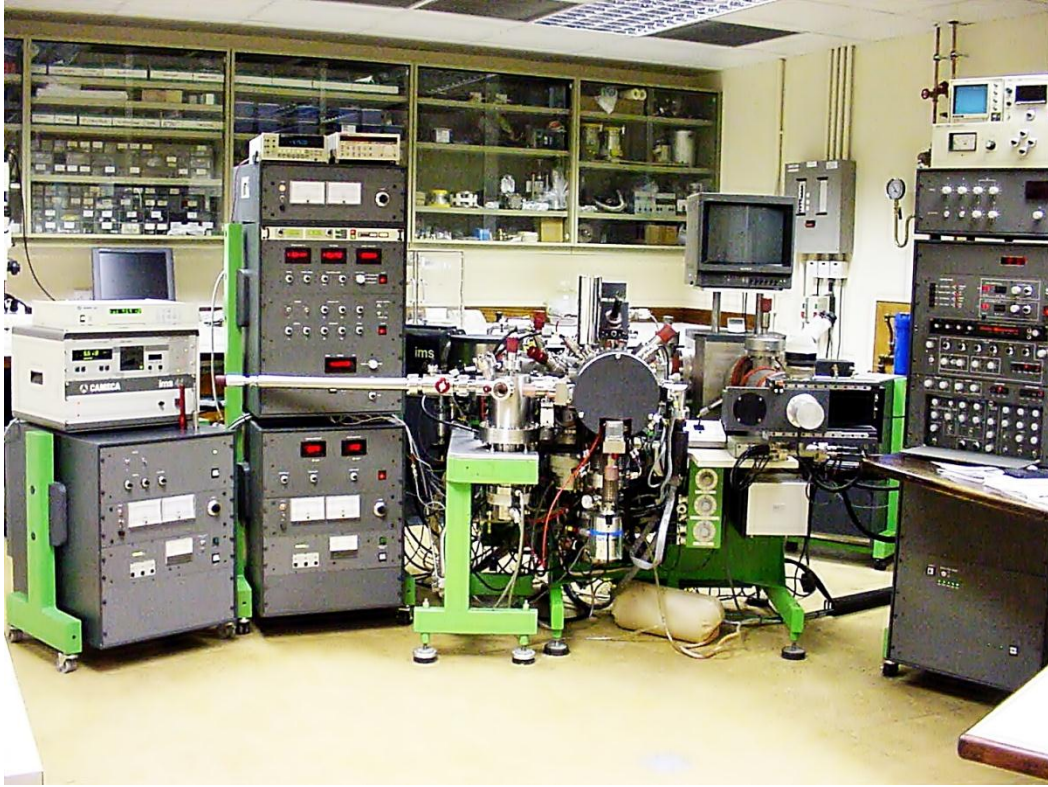
Bu tez çalışmasında GS174 ve GS249 QWSC yapılarının, görüntüleri ileriki bölümlerde verilecek ve sonuçları irdelenecek olan SEM analizlerinin GS174 QWSC yapısına ait olanları, İtalya'nın Parma kentindeki, Elektronik ve Manyetizma İçin Malzeme Enstitüsü (Institute of Materials for Electronics and Magnetism (IMEM))'de; GS249 QWSC yapısına ait olanları ise Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'da bulunan SEM analiz sisteminde, ortak yürütülen projeler kapsamında yapılan bilimsel ziyaret esnasında yapılmıştır.

4.5. İkincil İyon Kütle Spektrometresi (SIMS)

1910da İngiliz Fizikçi J. J. Thomson, iyon bombardımanı ile uyarılan katı bir yüzeyden indüklenen pozitif iyonlar ve nötr atomların salınımını gözlemledi [102]. 1940'larda vakum pompasının geliştirilmesi, Viyana üniversitesindeki Herzog and Viehböck tarafından ilk SIMS prototip denemesinin yapılmasına imkan verdi [103]. SIMS alanında son gelişmeler ise, bizmut ve altının iyonize olmuş kümeleri veya C_{60} gibi birincil iyon türleri üzerinde devam etmektedir [104].

SIMS, yüksek vakum ortamında katıların bir kaç mikrometre derinliğe kadar elementel ve izotopik analizlerinde kullanılır. Bu teknikte, iyon kaynaklarından elde edilen oksijen (O_2) veya sezyum (Cs) iyonları, uygun voltaj altında hızlandırılarak analiz edilecek numune yüzeyine çarptırılırlar. Bu (birincil) iyon demetinin numune ile etkileşimi sonucu incelenen numune yüzeyinden sıçratılan (ikincil) iyonlar, manyetik alan altında kütlelerine göre ayrılırlar ve uygun detektörlerle sayılırlar.

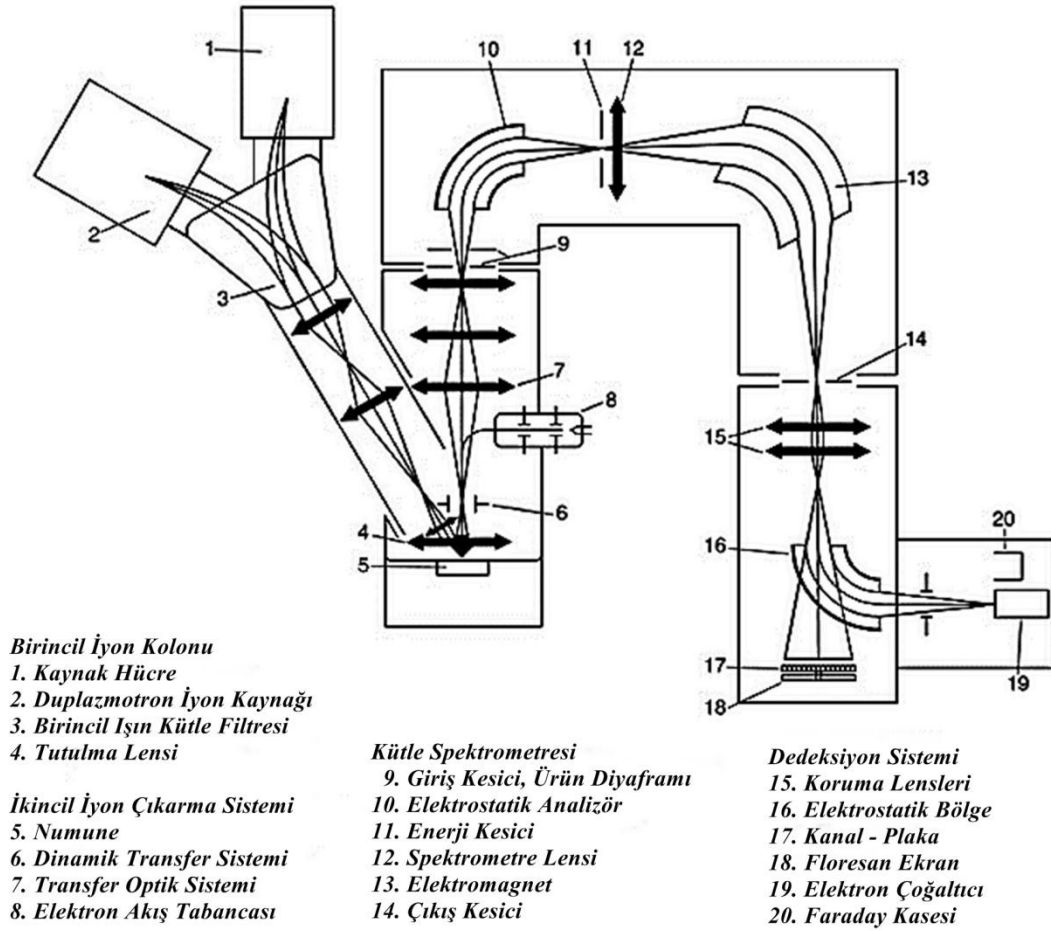
Bu tez kapsamındaki SIMS analizleri, Resim 4.5'de görülen Hiden Analytical SIMS sisteminde yapılmıştır.



Resim 4. 5. Hiden Analytical SIMS sistemi.

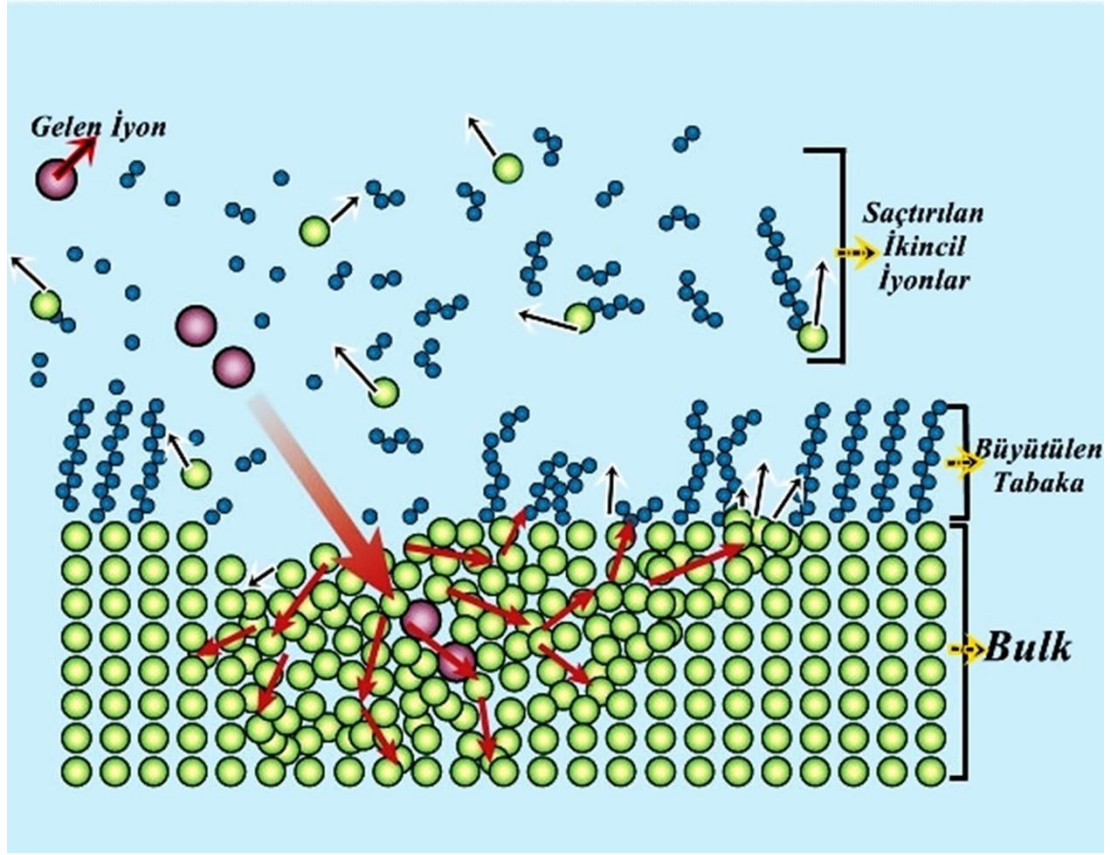
4.5.1. SIMS analiz sisteminin çalışma prensibi

Katı bir numune, Şekil 4.9. da gösterildiği gibi bir sisteme yerleştirilip analize başlandığında, enerjisi birkaç keV olan iyonlar tarafından saçılır, hedeften yayılan partiküllerin bir kısmı iyonlaştırılır. İkincil iyon kütle spektrometresi, kütle spektrometresi ile bu ikincil iyonların analizini içerir. İyon bombardımanı altında, katı bir yüzeyden ikincil iyon salınımı en üstteki atomik tabakanın elementeli, izotopisi ve moleküler yapısı hakkında bilgi sağlar. Oluşturulan ikincil iyonlar, kimyasal çevreye ve kopartma koşullarına (iyon, enerji, açı) göre büyük ölçüde değişir. Bu, teknik açıdan nicelliğe karmaşıklık ekleyebilir. Bunlara karşın SIMS, elementel ve izotopik yüzey analizi için en hassas tekniktir.



Şekil 4.9. SIMS analiz sistemini oluşturan kısımlar

SIMS tekniği, hidrojenden uranyuma ve daha fazla element yelpazesi için (algılama limiti ppb seviyesinin altındaki birçok element için), yüksek yanıl çözünürlüğü görüntüleme (40nm'den düşük) ve yüksek dinamik orana (HDR) izin veren çok düşük arka plan için (50 kattan daha fazla) bununla birlikte bütün elementler için son derece yüksek hassasiyetin kombinasyonunu sağlar. Şekil 4.10 de de gösterildiği üzere bu teknik doğası gereği, malzemenin yüzeyinde iyon saçtırıldığı için, yıkıcıdır. Vakum ortamında, malzemenin herhangi bir tipine (metal, yarıiletken, yalıtkan) uygulanabilir.



Şekil 4.10. Saçtılan iyonların şematik gösterimi

Çoğunlukla moleküler karakterizasyonu sağlayan statik SIMS en üst tek tabaka üzerine konsantre olurken, dinamik SIMS modunda, elementlerin bulk kompozisyonu ve derinliklerdeki dağılımı, en alt yapıdan en üst yapıya kadar derin bir çözünürlük ile incelenir Bu nedenle SIMS, ileri malzemelerin araştırılması için en yaygın yüzey analiz tekniklerinden biridir.

4.5.2. GS174 QWSC yapısının SIMS analizi

Bu tez çalışmasında GS174 QWSC yapısının, grafikleri ileriki bölümlerde verilecek ve sonuçları detaylıca irdelenecek olan SIMS analizleri, İngiltere’de faaliyet gösteren Hiden Analytical firmasında bulunan SIMS analiz sisteminde yapılmıştır.

4.6. GS174 ve GS249 QWSC Yapılarının Fabrikasyonu

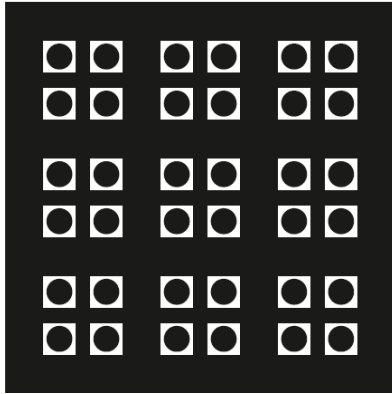
Güneş hücrelerinin önemli parametrelerinin (dolum faktörü (FF), verim (η),...) elde edilmesi için elektriksel ölçümlerin yapılması gerekir. Elektriksel ölçümler için güneş hücresi fabrikasyonunun tamamlanması gerekmektedir.

Bu tez çalışması içerisinde InGaAs/GaAs (GS174) ve InGaAs/InP (GS249) QWSC numunelerinin fabrikasyon adımları; “litografik işlemler” ve “metalizasyon” şeklinde incelenecektir.

4.6.1.Litografik işlemler

Litografik işlemler GS174 ve GS249 QWSC numuneleri için iki ayrı aşamada; “litografik ön kontak” ve “litografik arka kontak” olarak tamamlandı.

Fabrikasyon işlemine başlamadan önce numunenin sürece hazırlanması gerekir. Bu amaçla GS174 ve GS249 no’lu QWSC numunelerinden birer adet 1 cm x 1 cm’lik parça kesildi ve hemen ardından numunelerin temizliği yapıldı. Kesilen parçalar önce 1HF:20 DI-H₂O çözeltisinde 20 saniye bekletilerek oksit tabakası kaldırıldı, sonra alkol ile temizlendi ve kuru azot ile kurutuldu. Daha sonra QWSC numuneleri Spin Coater cihazı ile 5500 rpm dönme hızında 4 ramp ile 40 s döndürülerek AZ5214E fotorezistinin (PR) numune yüzeyine homojen bir şekilde kaplanması sağlandı. PR kaplama işlemi ardından numuneler hot-plate (ısıtıcı) ile 110 °C de 50 saniye süreyle tavlandı. PR kalınlığı yüzey profilometresi (Veeco Dektak 150) ile her bir numune için yaklaşık 1.30 μ m olarak ölçüldü.

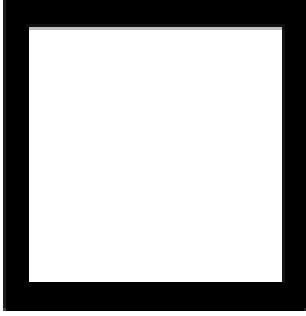


Şekil 4.11. Litografik ön kontak foto-maske görüntüsü

Bilindiği üzere; numune yüzeyinde herhangi bir koruma yoksa aşındırma işlemi tüm numuneyi etkileyen bir işlemdir. “Litografik ön kontak” metalizasyon basamağındaki amaç ise tüm QWSC numune yüzeyinin değil, sadece Şekil 4.11’ de görülen foto-maskedeki daireler (adacıklar) kadarlık bir kısmının korunmasıdır. Bu amaca uygun olarak PR kaplanmış numunelere Şekil 4.11’ de gösterilen Karl-Suss marka maske hizalama sistemi ile ilk UV pozlama işlemi uygulandı.

Pozlama işlemi sonunda PR ile korunmayıp, UV ışığa maruz bırakılan bölgeler developer denilen çözelti içinde çözülebilir hale gelmektedir. Develop işlemi için AZ5214E fotorezistini çözebilen AZ400K developer çözeltisi kullanılmaktadır. Bu işlem için AZ400K ile de-iyonize su 1:4 oranında (1 AZ400K : 4 H₂O) karıştırılarak developer çözeltisi hazırlandı. Develop işlemiyle, QWSC numuneleri developer çözeltisi içinde 25 s bekletilerek önceden UV ışığa maruz bırakılmış olan PR alanlarının çözünüp gitmesi sağlandı. Ardından QWSC numuneleri hemen de-iyonize (DI) suda durulandı ve kuru azot ile kurutuldu. Böylece GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin ön (büyütme) yüzeylerinde PR kaplı olmayan ve Şekil 4.11’ de görülen adacıklar metalizasyon işlemine uygun hale getirildi.

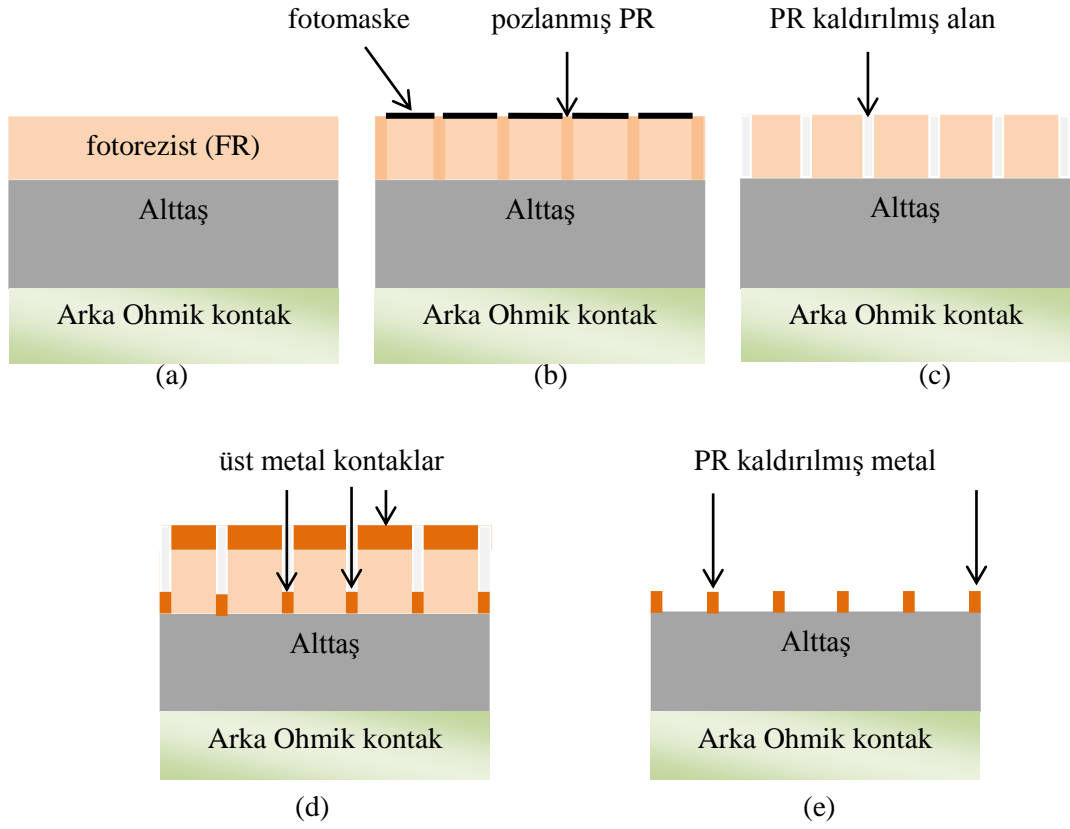
Hücre adacıkları GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin ön (büyütme) yüzeylerine oluşturulduktan sonra, “litografik arka kontak” metalizasyon adımına geçildi. Bu süreçte, Şekil 4.12’de görülen, içteki boş alanı 8 mm² olan çerçeve şeklindeki foto-maske kullanıldı.



Şekil 4.12. Litografik arka kontak foto-maske görüntüsü

Bu aşamada yine “litografik ön kontak” metalizasyon aşamasındaki şekilde PR kaplama ve UV pozlama işlemleri yapıldı. “Litografik arka kontak” için gerekli hizalama ve UV pozlama işlemleri yapıldıktan sonra develop işlemi yapıldı. Develop işlemiyle, QWSC numuneleri developer çözeltisi içinde 25 s bekletilerek önceden UV ışığa maruz bırakılmış olan PR alanlarının çözünüp gitmesi sağlandı. Ardından QWSC numuneleri hemen de-iyonize (DI) suda durulandı ve kuru azot ile kurutuldu. Böylece GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin arka (büyütme olmayan) yüzeylerinde PR kaplı olmayan ve Şekil 4.12’ de görülen 8 mm²’lik kare kısım metalizasyon işlemine uygun hale getirildi.

Litografik işlemleri tamamlanmış QWSC numunelerinin, işlem aşamaları Şekil 4.13’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Güneş hücresi fabrikasyon süreci (a) PR kaplama (b) Maskeleme ve pozlandırma (c) PR aşındırma-uzaklaştırma (d) yüzeye metal kaplama metalizasyon (e) PR uzaklaştırma

4.6.2. Metalizasyon

Metalizasyon işlemleri GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin ön (büyütme olan) ve arka (büyütme olmayan) yüzeylerinde PR ile korunmayan, yani açıkta kalan bölgelerine kopartma (sputtering) yöntemi ile altın (Au) kaplanarak gerçekleştirildi. Metalizasyon işlerinin hemen ardından; QWSC numunelerinin ohmik kontaklarının oluşabilmesi için, numuneler Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan hızlı termal tavlama (RTA) sisteminde tavlandı.

GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin ön (büyütme olan) yüzeylerine; Au metal kaplama aşamasında kullanılan cihaz parametreleri aşağıda verilmektedir.

- ✓ $T = \text{oda sıcaklığında}$
- ✓ $P_{base} = 5,8 \times 10^{-7} \text{ mbar}$
- ✓ $P_{Ar} = 4,0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$
- ✓ $GR (Au) = 3,0 \text{ Å/s}$
- ✓ $d (Au) = 1500 \text{ Å}$

GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin arka (büyütme olmayan) yüzeylerine; Au metal kaplama aşamasında kullanılan cihaz parametreleri aşağıda verilmektedir.

- ✓ $T = \text{oda sıcaklığında}$
- ✓ $P_{base} = 6,8 \times 10^{-7} \text{ mbar}$
- ✓ $P_{Ar} = 4,2 \times 10^{-3} \text{ mbar}$
- ✓ $GR (Au) = 3,1 \text{ Å/s}$
- ✓ $d (Au) = 1500 \text{ Å}$

Oda sıcaklığında yapılan metalizasyon işlemi sonrası GS174 ve GS249 QWSC numunelerine Ultrasonik banyoda, asetonla PR kaldırma işlemi uygulandı. İşlem sonucunda numelerin ön yüzeylerinde altın daireler, arka yüzeylerinde ise kare alanlar oluştuğu gözlemlendi. Bu işlemin başarılı olduğu anlaşıldı ve ardından omik kontakların oluşturulması için tavlama işlemine geçildi. GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin tavlama işlemi, Şekil 4.14' da görülen hızlı termal tavlama (RTA) sisteminde, her iki numune için azot (N₂) ortamında ayrı ayrı yapıldı.



Resim 4.6. Hızlı termal tavlama (RTA) Sistemi

GS174 QWSC numunesinin tavlama işleminin parametreleri aşağıda verilmektedir:

- ✓ $P_{base} = 4,84 \times 10^{-6} \text{ mbar}$
- ✓ $P(N_2) N_2 = 5,34 \times 10^{-3} \text{ mbar}$
- ✓ $T = 380 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ $t = 1 \text{ dk}$

GS249 QWSC numunesinin tavlama işleminin parametreleri aşağıda verilmektedir:

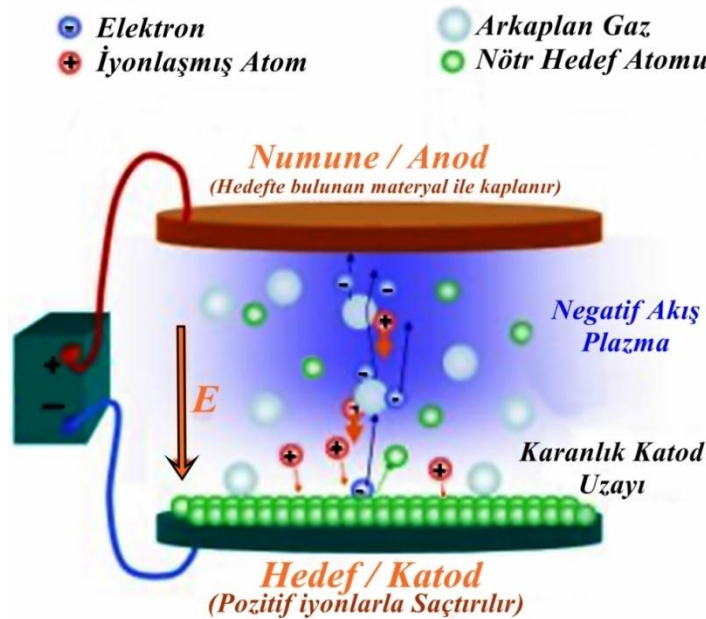
- ✓ $P_{base} = 5,54 \times 10^{-6} \text{ mbar}$
- ✓ $P(N_2) N_2 = 6,75 \times 10^{-3} \text{ mbar}$
- ✓ $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ $t = 1 \text{ dk}$

4.7. Yansıma Önleyici Katman Oluşturulması

Ohmik kontağı tamamlanmış olan GS174 ve GS249 QWSC numunelerin üzerine, güneş ışınlarının yüzeyden yansımalarını önlemek ve böylece hücrenin daha fazla foton soğurmasını temin etmek amacıyla, hücre yüzeyleri yansıma önleyici malzeme olarak Si_3N_4 katmanı, radyo frekans (RF) magnteron kopartma (sputtering) sisteminde Si_3N_4 hedefi kullanılarak oluşturuldu.

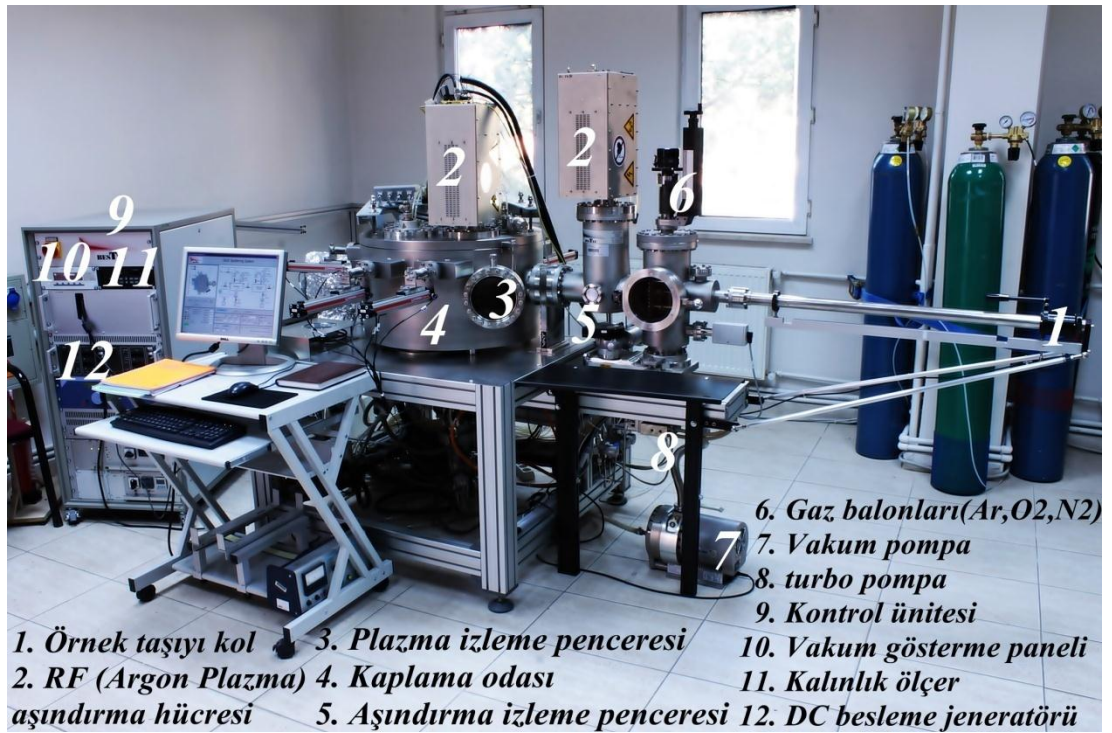
4.7.1. Kopartma (Sputtering) yöntemi

Kopartma sistemi, vakum ortamında fiziksel olarak hedef malzeme(target)den koparılan atomların alltaşa ince film biriktirmesi için yaygınca kullanılan sistemlerden biridir. Bu sistemde yüksek gerilimle hızlandırılan iyonlar hedef malzemenin yüzeyini bombardıman eder ve bombardıman sonucu sökülen moleküller alltaş üzerine birikir. Bu sistemin en büyük avantajlarından bir tanesi de düşük sıcaklıklarda biriktirme işlemi yapılabilmesidir. Dolayısıyla hemen her tür alltaşa istenilen malzeme biriktirilebilir. Şekil 4.15’de hedef malzemedan bir molekölün kopması ve alltaş yüzeyine yerleşmesi gösterilmiştir. Burada sarı renkte gösterilen Ar^+ iyonlarından oluşturulan plazma ortamıdır.



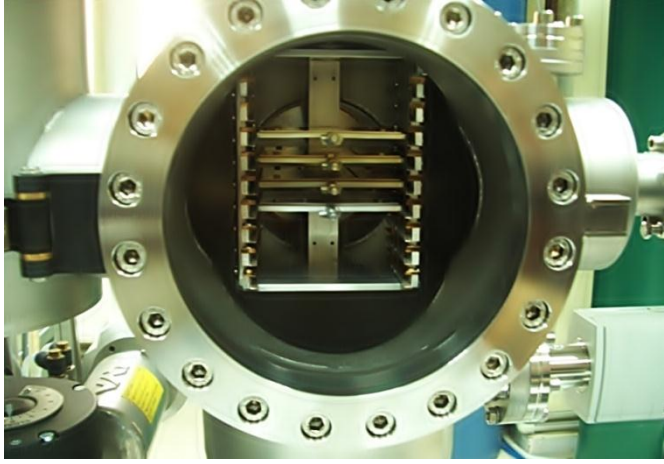
Şekil 4.14. Kopartma yönteminin şematik gösterimi

Kopartma yöntemi çok çeşitli iletken, yarıiletken veya yalıtkan malzeme biriktirilmesine imkân tanır. İletken olan malzemeler DC Magnetron Kopartma, yalıtkan olan malzemeler ise RF Magnetron Kopartma yöntemiyle biriktirilir. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Kopartma (Sputtering) sisteminde; Resim 4.6'da görüldüğü üzere 2 RF kaynağı ve 3 tane DC güç kaynağı vardır.



Resim 4.7. BESTEC Kopartma sistemi

Resim 4.7 'de açıkça görüldüğü gibi yükleme raflarına 10 adet numune yerleştirilebilmekte ve asansör sistemi ve taşıyıcı kol yardımıyla istenilen numune biriktirme odasına taşınabilmektedir. Bu durum yükleme odasının vakumunu bozmadan 10 tane numunenin işlenebilmesine imkân vermektedir.



Resim 4.8. Kopartma sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları

4.7.2. Si_3N_4 katmanının oluşturulması

Si_3N_4 katmanı, yansımaya önleyici katman olarak dşnlmş ve GS174 QWSC, GS249 QWSC numunelerinin yanısıra; Si_3N_4 katmanının geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla cam alttaş üzerine de kaplandı. Kaplanan cam alttaşın geçirgenlik değişimi Resim 4.8’ de gösterilen ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan UV-VIS spektrometresi ile belirlendi.



Resim 4.9. UV-VIS Spektrometre

Numuneler için kaplama parametreleri aşağıda verimiştir.

- ✓ $T = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$
- ✓ $P_{base} = 4,3 \times 10^{-7} \text{ mbar}$
- ✓ $P_{Ar} = 4,5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$
- ✓ $GR (Si_3N_4) = 1,7 \text{ \AA/s}$
- ✓ $d (Si_3N_4) = 500 \text{ \AA}$

4.8. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri

Bir güneş hücresi için önemli olan ışığa duyarlılık için akım-gerilim (I-V) ölçümlerinin alınması gerekir. Bu tez çalışması kapsamında, fabrikasyonu tamamlanmış, GS174 ve GS249 QWSC'nin Si_3N_4 yansıma önleyici katman kaplanmış ve kaplanmamış numunelerinin karanlıkta ve aydınlatma altındaki logaritmik akım-gerilim (lnI-V) karakteristiklerine bakıldı.

lnI-V ölçümleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan ve Resim 4.9' da görülen Keithley 4200 I-V ölçüm sisteminde alındı. Aydınlatma altındaki I-V ölçümlerinde ise, Keithley 4200 I-V ölçüm sistemine ilave olarak, AM1,5, 1 Güneş kalibre edilmiş Newport Oriel Sol1A güneş simülatörü kullanıldı.



Resim 4.10. I-V ölçüm düzeneği (Keithley 4200 ve NewPort Oriel Sol1A)

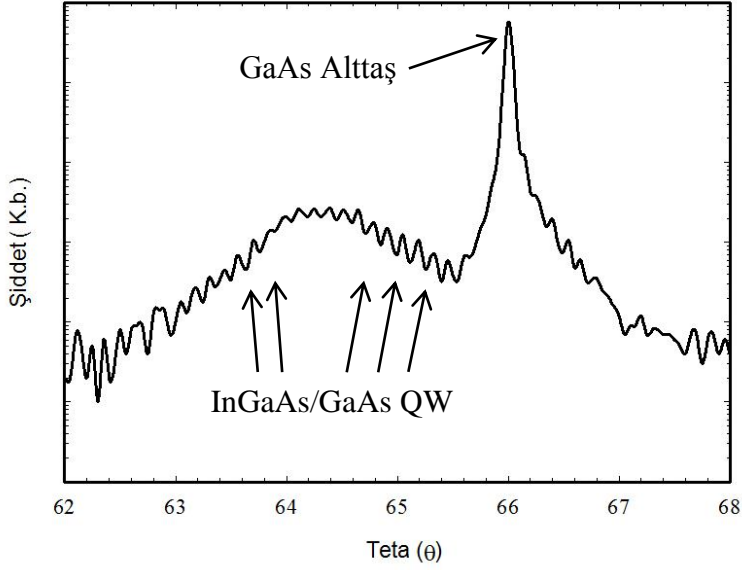
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin, omik kontakları alınmadan önce HRXRD, SIMS, SEM ve AFM analizleri; fabrikasyonları tamamlandıktan ve Si_3N_4 yansıma önleyici katman kaplama işlemleri bittikten sonra I-V ölçümleri alındı. Ayrıca, cam alttaş üzerine kaplanan Si_3N_4 yansıma önleyici katman için de UV-VIS spektrometre ile optik analizleri yapıldı. Güneş hücreleri için oldukça önemli olan yansıma önleyici katmanın GS174 ve GS249 kuantum kuyulu güneş hücrelerinin özelliklerine nasıl bir etkisi olduğu tartışıldı.

5.1. HRXRD Analiz Bulguları

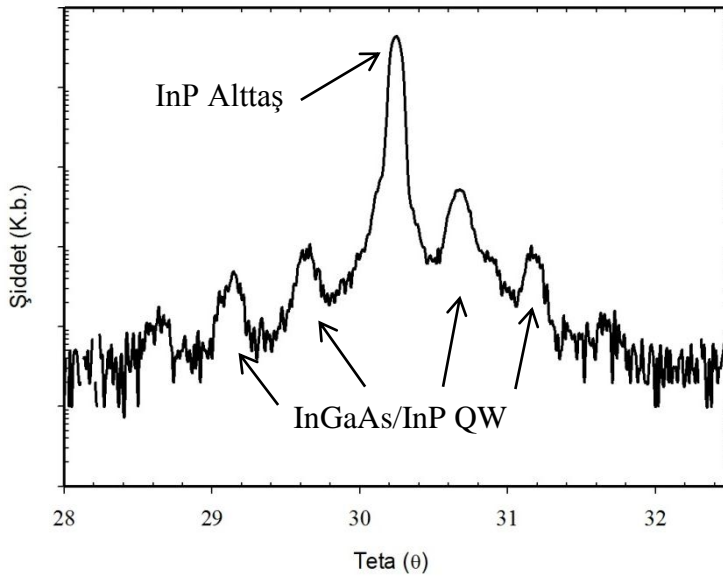
GaAs ve InP alttaşlar üzerine MBE yöntemi ile büyütülen GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin yapısal özellikleri HRXRD yöntemi ile belirlendi. Bütün simetrik ve simetrik olmayan taramalar z-yükseklik ayarı, eğim açısı optimizasyonundan sonra $\omega/2\theta$ taramalarıyla kaydedildi.

Şekil 5.1' de gösterilen GS174 QWSC yapısının HRXRD grafiğine bakıldığında, GaAs alttaştan gelen yüksek şiddetli GaAs piki ve daha düşük şiddetlerde girişimler şeklinde görülen sekiz kuantum kuyusu ve HRXRD taramalarında meydana gelebilen sekiz adet de kuyu girişim yansıması görülebilmektedir.



Şekil 5. 1. GS174 QWSC yapısının HRXRD grafiği

Şekil.5.2' de gösterilen GS249 QWSC yapısının HRXRD grafiğine bakıldığında, InP alttaştan gelen yüksek şiddetli InP piki ve daha düşük şiddetlerde girişimler şeklinde kuantum kuyuları görülebilmektedir.

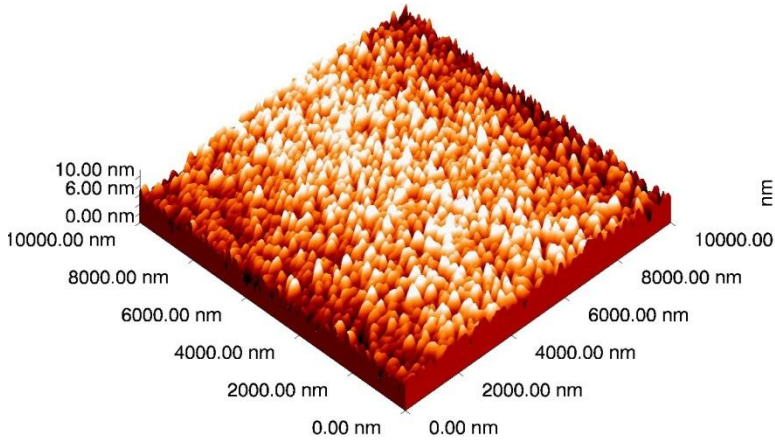


Şekil 5. 2. GS249 QWSC yapısının HRXRD grafiği

5.2. AFM Analiz Bulguları

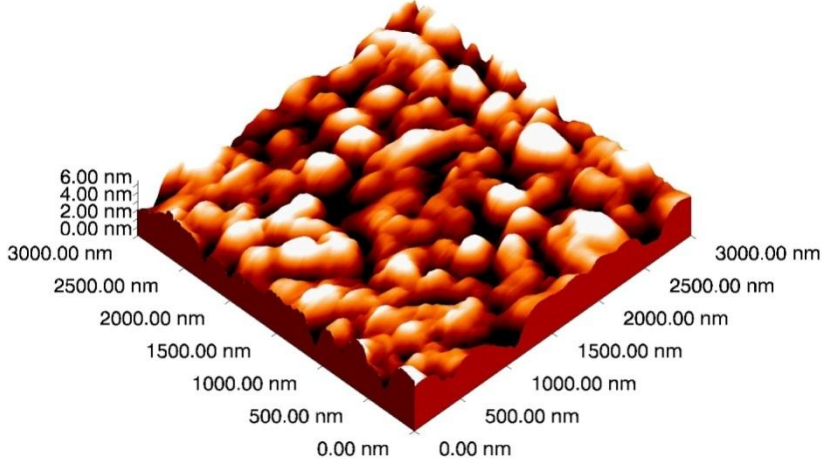
GS174 ve GS249 QWSC yapılarının AFM görüntüleri aşağıda verilmiştir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 de verilen görüntü yüzeyleri homojen bir dağılıma sahiptir. Bu homojen dağılım Root Mean Square (RMS) değerleri ile uyumludur. RMS değerinin, AFM yüzey tarama alanı arttıkça artması doğal bir sonuçtur. Ancak yüzey pürüzlülük değerinin AFM gibi yüzey görüntüleme sistemlerinde birkaç nanometre civarında olması yüzeyin kalitesinin iyi olduğunu gösterir. RMS değerlerinden yola çıkılarak, GS174 QWSC yapısının, GS249 QWSC yapısına göre daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu açıktır.

Şekil 5.3 de GS174 QWSC yapısının 10x10 μm lik görüntüsünün yüzey pürüzlülük ölçütü olan RMS değeri 1,420 nm dir.



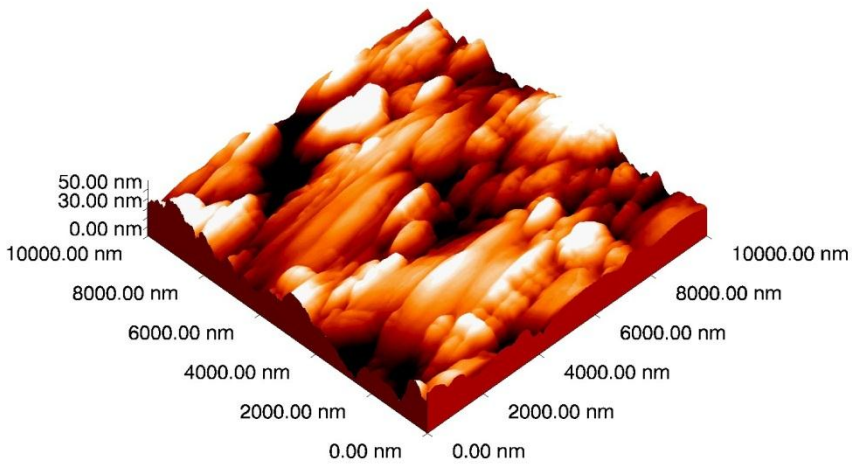
Şekil 5. 3. GS174 QWSC yapısının 10 x10 μm lik AFM görüntüsü

Şekil 5.4 de GS174 QWSC yapısının 3x3 µm lik görüntüsünün RMS değeri 0,895 nm dir.



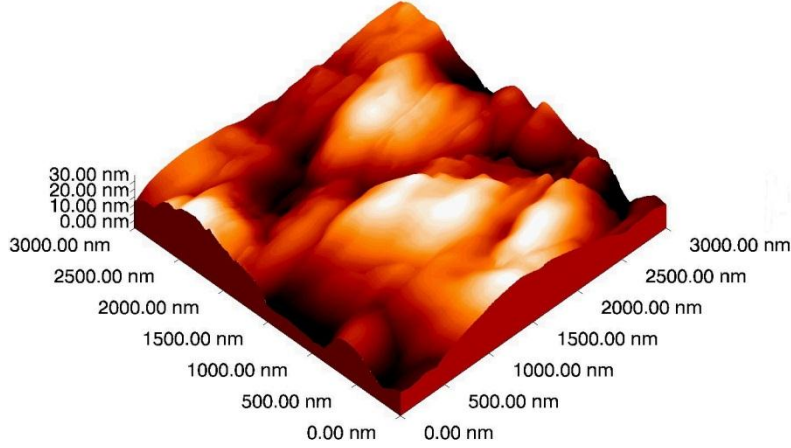
Şekil 5. 4. GS174 QWSC yapısının 3x3µm lik AFM görüntüsü

Şekil 5.5 de GS249 QWSC yapısının 10x10 µm lik görüntüsünün RMS değeri 7,683 nm dir.



Şekil 5. 5. GS249 QWSC yapısının 10 x10µm lik AFM görüntüsü

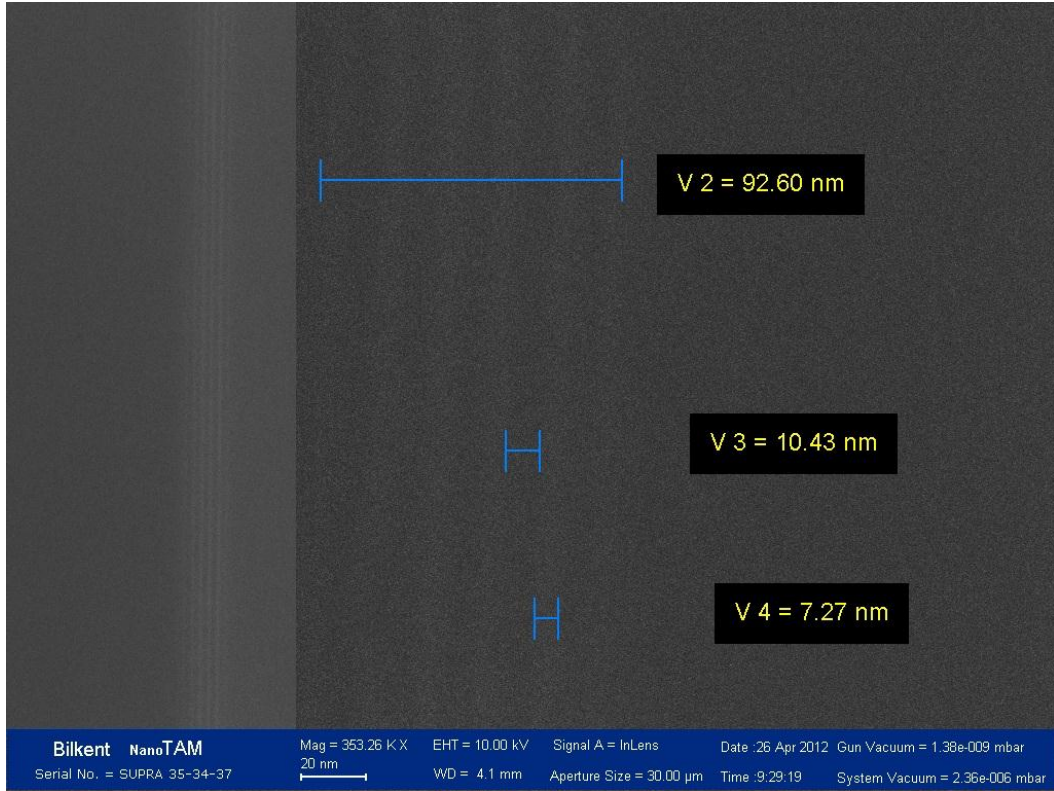
Şekil 5.6 de GS249 QWSC yapısının 3x3 µm lik görüntüsünün RMS değeri 5,645 nm dir.



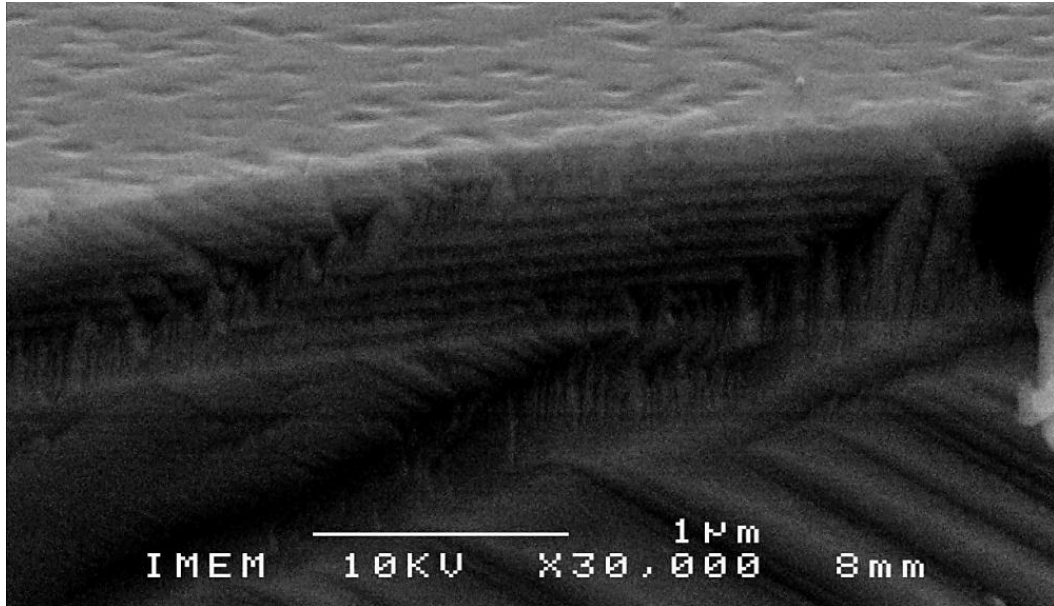
Şekil 5. 6. GS249 QWSC yapısının 3x3µm lik AFM görüntüsü

5.3. SEM Analiz Bulguları

SEM analizlerinin GS174 QWSC yapısına ait olanları, IMEM’de; GS249 QWSC yapısına ait olanları ise NANOTAM’da bulunan SEM analiz sisteminde yapılmıştır. SEM analiz görüntüleri incelendiğinde; Şekil 5.7’de görülen GS249 QWSC numunesinin beş adet kuyu yapısı ve Şekil 5.8’de görülen GS174 QWSC numunesinin sekiz adet kuyu yapısı ayrıntılı olarak görülebilmektedir. GS249 QWSC yapısında, kuyu genişliği engel yüksekliği sırasıyla, 7,27nm ve 10,43nm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.7. den görüldüğü gibi toplam kuantum kuyulu bölgenin kalınlığı 92,60nm dir. Bu toplam değer büyütülen 5 adet kuantum kuyu ve engel kalınlıkları toplamından bir miktar farklıdır. Bu farklılık, ölçüm hatasında dikkate alınarak, bazı kuyu-engel deki homojensizliğe atfedilebilir. SEM sonuçları, bölüm 4.1.3.’ te verilen büyütme hedefleriyle uyumludur. Benzer uyumluluk GS174 QWSC yapısı içinde tespit edildi.



Şekil 5. 7. GS249 QWSC yapısının SEM görüntüsü

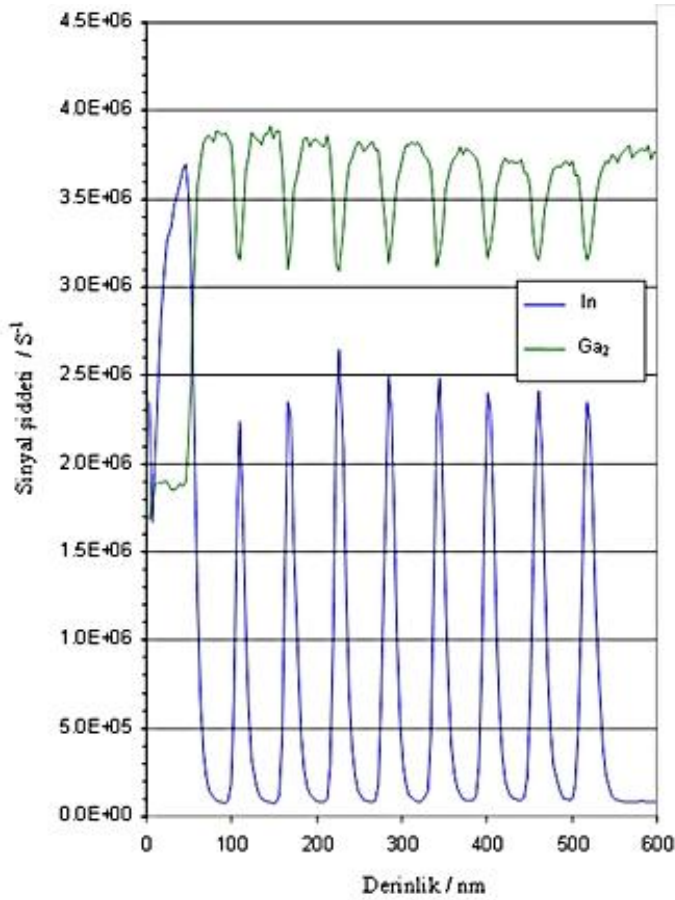


Şekil 5. 8. GS174 QWSC yapısının SEM görüntüsü

SEM görüntüleri şekil 4.3. ve şekil 4.4. de verilen MBE nominal örnek yapılarını doğrulamaktadır.

5.4. SIMS Analiz Bulguları

GS174 QWSC yapısının SIMS analizi, İngiltere’de faaliyet gösteren Hiden Analytical firmasında bulunan SIMS analiz sisteminde yapılmıştır. Şekil 5.9’de görülen SIMS analiz grafiğine bakıldığında; indiyum (*In*) sinyal şiddeti artığında, galyum (*Ga*) sinyal şiddetinin aynı derinlik boyunca bir miktar azaldığı görülmektedir. *In* şiddetinin maksimum, *Ga* şiddetinin minimum olduğu durum *InGaAs* kuantum kuyusuna karşılık gelir. *Ga*’un maksimum şiddette olduğu bölgede *In* pikinin sıfır değerine ulaştığı görülmektedir. Bu azalış-artışın sekiz kere olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum da GS174 QWSC numunesinin sekiz adet kuyu yapısına sahip olduğunun kanıtıdır. Ayrıca, grafikten kuyularda *In*’un, bariyerlerde de *Ga*’un fazlalığı seçilebilmektedir. *In* ve *Ga* Piklerinin şiddetleri oranlanıp kıyaslandığında, *In* alaşım oranının 0,38 civarında olduğu görülmüştür.

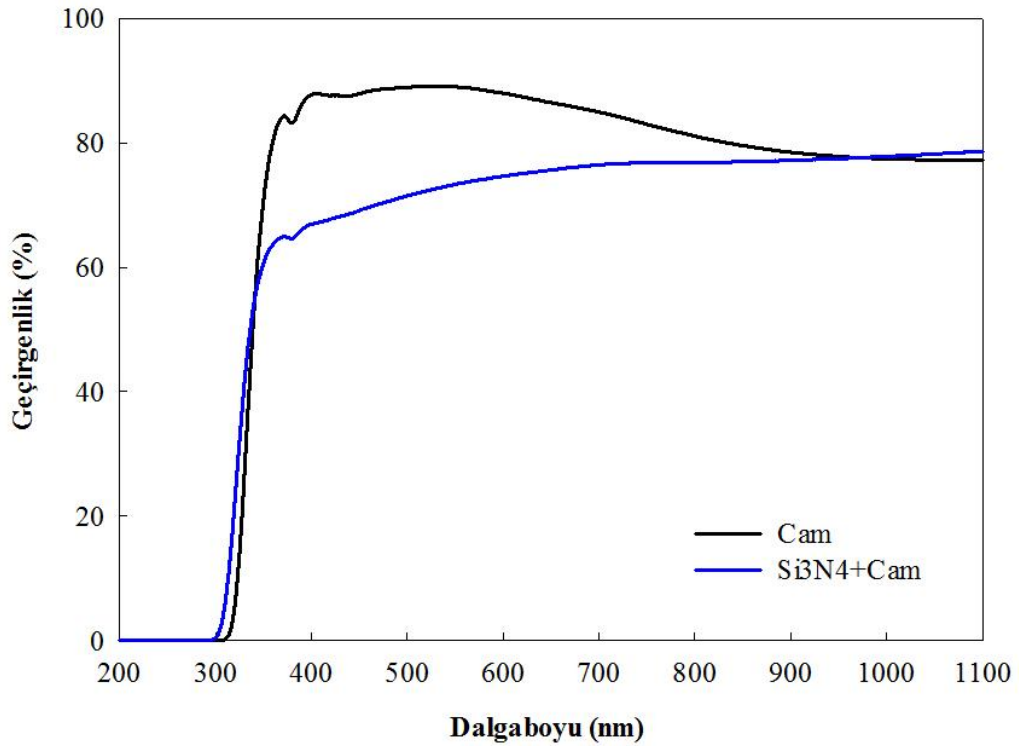


Şekil 5. 9. GS174 QWSC yapısının SIMS grafiği

5.5. UV-VIS Analiz Bulguları

Yansıma önleyici katman olarak kullanılan Si_3N_4 katmanının optik geçirgenliği, UV-VIS spektrometresi kullanılarak incelendi. Si_3N_4 'ın geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla cam alttaş üzerine Si_3N_4 katmanı kaplandı. Grafikte mavi renk ile gösterilen Si_3N_4 kaplanmış cam ve siyah renk ile gösterilen Si_3N_4 kaplanmamış camın geçirgenlik değişimi Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

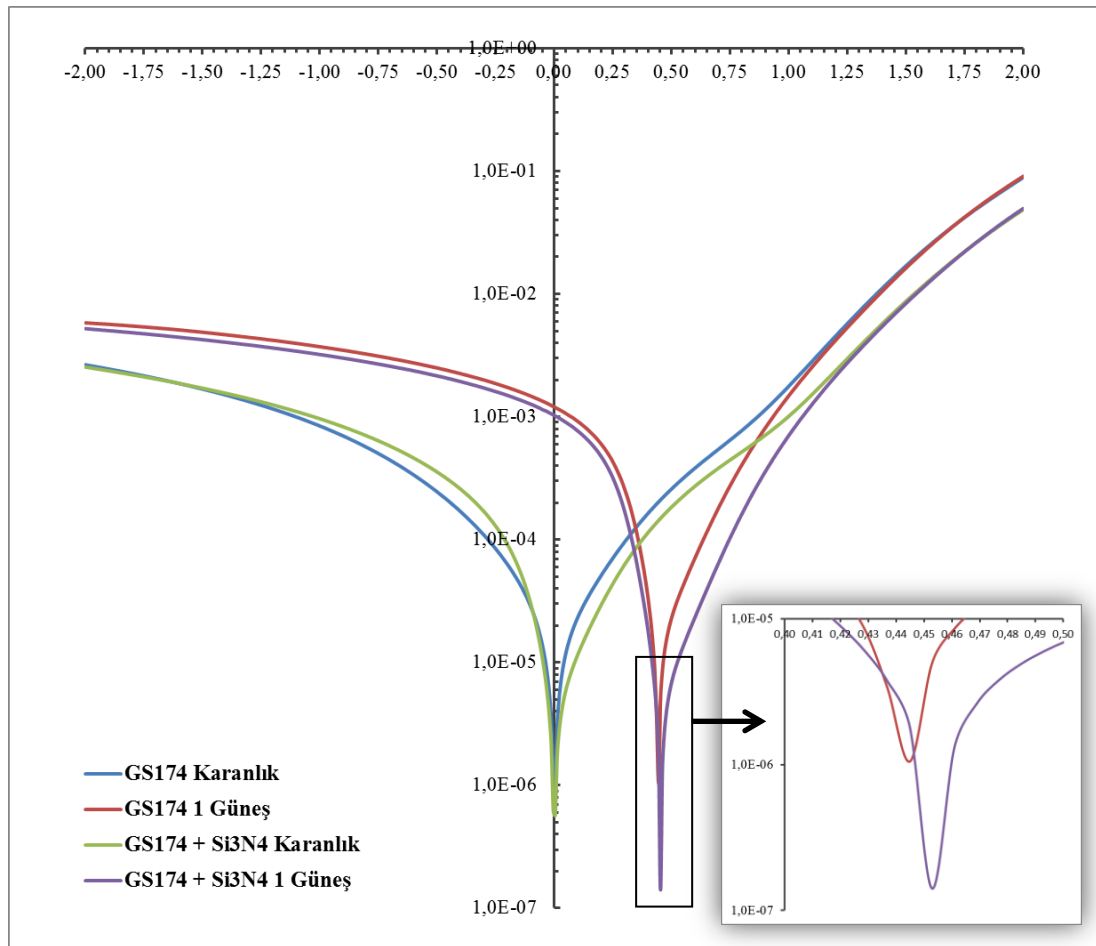
Şekil 5.10' dan da anlaşılacağı üzere; Si_3N_4 katmanı yaklaşık olarak %70 geçirgenliğe sahiptir. Bulunan bu değer literatürle kıyaslandığında, uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 10. Si_3N_4 katmanı için geçirgenlik spektrumu

5.6. I-V Analiz Bulguları

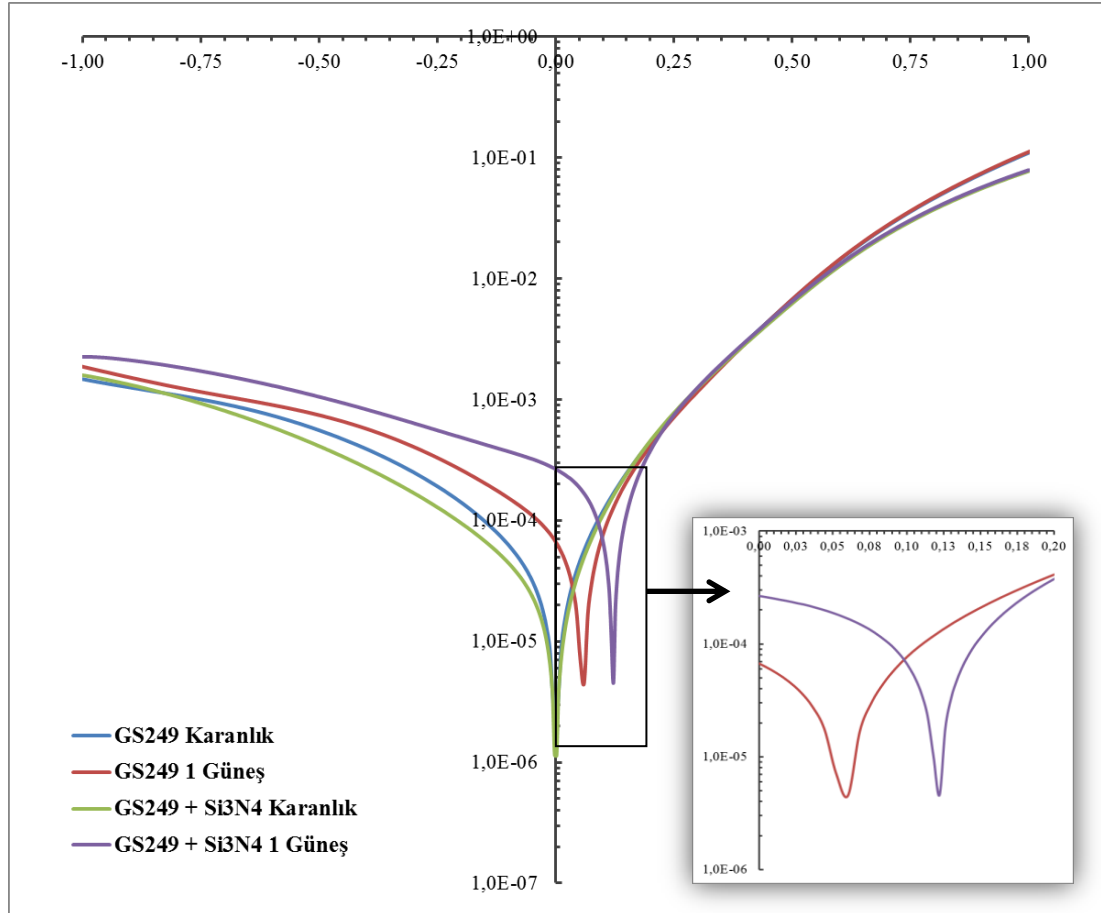
Fabrikasyonu tamamlanmış, GS174 ve GS249 QWSC'nin Si_3N_4 yansımaya önleyici katman kaplanmış ve kaplanmamış numunelerinin Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'de verilen karanlıkta ve aydınlıkta (AM1,5, 1 Güneş) altındaki lnI-V grafiklerine bakıldığında; Si_3N_4 yansımaya önleyici katmanın hem GS174 QWSC için, hem de GS249 QWSC için ışığa duyarlılığı artırıcı özellik gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 11. GS174 lnI-V grafiği (-2V ile +2V aralığında)

lnI-V grafiklerine bakıldığında; Si_3N_4 yansımaya önleyici katman kaplamanın; GS174 QWSC numunesinin açık devre voltajını 0,44V'tan 0,45V'a, GS249 QWSC numunesinin açık devre voltajını ise 0,04V'tan 0,13V'a arttırdığı görülmektedir.

Si_3N_4 yansımaya önleyici katman kaplamanın, güneş hücrelerinin açık devre voltajı gibi güneş hücresi çıktı değerlerini arttırabileceği söylenebilir.



Şekil 5. 12. GS249 lnI-V grafiği (-1V ile +1V aralığında)

Sonuç olarak, karanlıkta, GS174-GS249 QWSC yapılarının akım-gerilim ölçümleri sonucundan, GS174 ve GS249 nolu güneş hücreleri için doğrultma faktörünün 20 kat civarında olduğu görülmüştür. Düşük doğrultma faktörü, hücelere yüzey pasivizasyonu yapılmamamsından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, GS174 InGaAs/GaAs ve GS249 InGaAs/InP kuantum kuyulu güneş hücresi (QWSC) yapıları, Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yöntemi kullanılarak büyütüldü. QWSC yapılarının her birinden, güneş hücresi oluşturmak ve Si₃N₄ kaplamak üzere 1cm x 1cm 'lik parçalar kesildi. GS174 ve GS249 QWSC güneş hücresi yapılarının, yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HRXRD) ile yapısal analizleri incelendi. Yapısal analiz sonuçlarına göre seçilen GS174 ve GS249 QWSC yapılarının fabrikasyonu özel tasarlanmış maskeler ile litografi ve püskürtme sistemleri kullanılarak yapıldı. Fabrikasyon işlemi tamamlanan GS174 ve GS249 QWSC'lerin I-V ölçümleri alınarak, elde edilen verilerden logaritmik akım-gerilim (lnI-V) grafikleri çizildi. Çizilen bu grafik yardımıyla güneş hücreleri (SC) için önemli olan ışığa duyarlılıkları incelendi.

Çoklu epitaksiyel tabakaların X-ışını kırınım metodu ile incelenmesi, MBE tabanlı örneklerde örgü yapısının anlaşılmasında oldukça yararlıdır. Bu nedenle; GaAs ve InP alttaşlar üzerine MBE yöntemi ile büyütülen GS174 ve GS249 QWSC numunelerinin yapısal özellikleri HRXRD yöntemi ile belirlendi. GS174 QWSC yapısının HRXRD grafiğine bakıldığında, GaAs alttaştan gelen yüksek şiddetli GaAs piki ve daha düşük şiddetlerde girişimler şeklinde görülen sekiz kuantum kuyusu ve HRXRD taramalarında meydana gelebilen sekiz adet de kuyu girişim yansıması görüldü. GS249 QWSC yapısının HRXRD grafiğine bakıldığında ise, InP alttaştan gelen yüksek şiddetli InP piki ve daha düşük şiddetlerde girişimler şeklinde kuantum kuyuları görüldü.

GS174 QWSC yapısının AFM görüntüleri incelendiğinde, yüzey morfolojisinin homojen bir dağılıma sahip olduğu ve bunun bir sonucu olarak da yüzey kalitesinin iyi olduğu anlaşıldı. GS249 QWSC yapısının AFM görüntüleri incelendiğinde, yüzey taramasından elde edilen RMS değerlerinin, GS174 QWSC yapısının yüzey taramasından elde edilen RMS değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Bu durumun, akım-gerilim (I-V) sonuçlarını etkilediği, GS249'dan üretilen hücrenin düşük açık devre voltajı sonucunu vermesi ile örtüşmektedir. GS249 QWSC yapısının yüzey pürüzlülüğünün GS174 QWSC yapısınınkinden fazla olması, GS249 QWSC yapısının yüzeyinin morfolojik kalitesinin, GS174 QWSC yapısınınkinden daha düşük olmasının bir sonucudur. Bir başka bakış açısıyla; yüzey pürüzlülüğünün fazla olması, açık devre voltajının daha düşük olmasının sebebi olabilir.

Sonuç olarak, GS174 QWSC yapısı (AFM analizi sonucundaki RMS değerinin 1 nm civarında çıkması ile) GS249 QWSC yapısından (RMS değerinin ise 5 nm civarında çıkması ile) yüzey kalitesi açısından daha iyi sonuçlar vermiştir.

SEM analizleri incelendiğinde;GS249 QWSC numunesinin beş adet, GS174 QWSC numunesinin ise sekiz adet kuyu yapısı ayrıntılı olarak görülebilmektedir.

SIMS analiz grafiğine bakıldığında; indiyum (*In*) sinyal şiddeti artığında, galyum (*Ga*) sinyal şiddetinin aynı derinlik boyunca azaldığı ve bu azalış-artışın sekiz kere analiz edildiği açıkça görülmektedir. Bu durum da GS174 QWSC numunesinin sekiz adet kuyu yapısına sahip olduğunun kanıtıdır.

SEM ve SIMS analizleri birlikte irdelendiğinde, GS174 QWSC numunesinin sekiz adet kuyu yapısına sahip olduğunun SIMS analizinde görülmesi ve benzer şekilde SEM analizinde kuyuların fotoğrafının net bir şekilde çekilmiş olması, SEM ve SIMS sonuçlarının birbirini destekler nitelikte olduğunun bir kanıtıdır.

Si_3N_4 'ın geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla cam alttaş üzerine Si_3N_4 katmanını kaplandı. Kaplamanın ardından yapılan UV-VIS analizi sonucunda; Si_3N_4 katmanının yaklaşık olarak %70 geçirgenliğe sahip olduğu sonucuna varıldı.

Fabrikasyonu tamamlanmış, GS174 ve GS249 QWSC'nin Si_3N_4 yansımaya önleyici katman kaplanmış ve kaplanmamış numunelerinin karanlıkta ve aydınlatma (AM1,5, 1 Güneş) altındaki InI-V grafiklerine bakıldığında; Si_3N_4 yansımaya önleyici katmanın hem GS174 QWSC için, hem de GS249 QWSC için ışığa duyarlılığı artırıcı özellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

InI-V grafiklerine bakıldığında; Si_3N_4 yansımaya önleyici katman kaplamanın; GS174 QWSC numunesinin açık devre voltajını 0,44V'tan 0,45V'a, GS249 QWSC numunesinin açık devre voltajını ise 0,04V'tan 0,13V'a arttırdığı görülmektedir. Sonuç olarak; Si_3N_4 yansımaya önleyici katman kaplamanın, güneş hücrelerinin açık devre voltajı gibi güneş hücresi çıktı değerlerini arttırabileceği söylenebilir.

Günümüzde güneş hücrelerinde yüksek verimlere ulaşılabilir [92-95]. Bunun için sadece güneş hücrelerini üretmek yetmemektedir. Çeşitli yansımaya önleyici katman kaplamaları, toplayıcı ve ya odaklayıcı düzenekler içeren güneş hücresi sistemleri, farklı litografik süreçler, farklı metalizasyonlar bilimadamları tarafından tartışılmakta, tasarlanmakta ve uygulanmaktadır. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi araştırmacıları yansımaya önleyici katman kaplama, litografik süreçleri ve metalizasyon çalışmalarını içeren fabrikasyon ve güneş ışınlarını toplayıcı-odaklayıcı sistemler gibi güneş hücreleri için araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç duyulan süreçler üzerinde yoğun olarak çalışmaktadır. Bunların sonucu olarak güneş hücreleri için önemli olan çıktı parametrelerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Anderson, N.G., "On quantum well solar cell efficiencies", *Physica E* 14: 126-131 (2002).
2. Barnham, K.W.J, Ballard, I., Barnes, J., Connolly, J., Griffin, P., Kluftringer, B., Nelson, J., Ernest, T., Zachariou, A., "Quantum well solar cells", *Applied Surface Science*, 113/14: 722-733 (1997).
3. Barnham, K.W.J., Ballard, I., Bessière, A., Chatten, A.J., Connolly, J.P., Ekins-Daukes, N.J., Johnson, D.C., Lynch, M.C., Mazzer, M., Tibbits, T.N.D., Hill, G., Roberts, J.S., Malik, M.A., "Quantum Well Solar Cells and Quantum Dot Concentrators", *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion*, Chapter 16 (2006).
4. Barnham, K.W.J., Duggan, G., "A new approach to high efficiency multiband gap solar cells", *J. Appl. Phys.*, 67(7): 3490-3493, (1990).
5. Ramey, S.M., Khoie, R., "Modeling of Multiple-Quantum-Well Solar Cells Including Capture, Escape, and Recombination of Photoexcited Carriers in Quantum Wells", *IEEE Transactions On Electron Devices*, 50(5): 1179-1188 (2003).
6. Prażmowska, J., Korbutowicz, R., "Optimization of multi quantum well solar cell", *Optica Applicata*, XXXV(3): 619-626 (2005).
7. Barnham, K.W.J., Bushnell, D.B., Connolly, J.P., Ekins-Daukes, N., Kluftringer, B.G., Mazzer, M., Nelson, J., "High efficiency III-V solar cells [In] Proc. International School on Crystal Growth of Materials for Energy Production and Energy-saving Applications", "Abdus Salam", *International Centre for Theoretical Physics*, 106 (2001).
8. Rimada, J.C., Hernandez, L., "Modelling of ideal AlGaAs quantum well solar cells", *Microelectronics Journal*, 32: 719-723 (2001).
9. Barnham, K., Connolly, J., Griffin, P., Haarpaintner, G., Nelson, J., Tsui, E., Zachariou, A., Osborne, J., "Voltage enhancement in quantum well solar cells", *J. Appl. Phys.*, 80(2): 1201-1206, (1996).
10. United States, "Solar Cell Concentrator", *Patent Application Publication*, US 2012/0037205 A1, (2012).
11. Ward, J.S., Ramanathan, K., Hasoon, F.S., Coutts, T.J., Keane J., Contreras, M.A., Moriarty, T., Noifi, R., "A 21.5% efficient Cu(In,Ga)Se₂ thin film concentrator solar cell", *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 10:41-46 (2002).

12. Mazzer, M., Barnham, K.W.J., Ballard, I.M., Bessiere, A., Ioannides, A., Johnson, D.C., Lynch, M.C., Tibbits, T.N.D., Roberts, J.S., Hill, G., Calder, C., "Progress in quantum well solar cells", *Thin Solid Films*, 511: 76– 83 (2006).
13. Fan, J.C.C., Tsaur, B-Y., Palm, B.J., "Optimal Design of High-Efficiency Tandem Cells," *Proceedings of the Sixteenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 692-701 (1982).
14. Olson, J. M., Kurtz, S. R., Kibbler, A. E., Faine, P., "A 27,3% efficiency GaO.5InO.5P/GaAs tandem solar cell", *Appl. Phys. Letters*, 56, 623-625 (1990).
15. Bertness, K. A., Kurtz, S. R., Friedman, D. J., Kibbler, A. E., Kramer, C., Olson, J. M., "29,5%-efficiency GaInP/GaAs tandem solar cells", *Appl. Phys. Letters*, 65, 989-991 (1994).
16. Chiang, P. K., Krut, D. D., Cavicchi, B. T., Bertness, K. A., Kurtz S. R., Olson, J. M., "Large area GaInP₂/GaAs/Ge multijunction solar cells for space applications", *Proceeding of the 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2120-2123, (1994).
17. Takamoto, T, Ikeda, E., Kurita, H., Ohmori, M., "Over %30 efficient InGaP/GaAs tandem solar cells", *Applied Physics Letters*, 70(3): 381-383 (1997).
18. Takamoto, T., Yamaguchi, M., Khan, A., Ikeada, E., Kurita, H., "26,9% efficient and radiation resistant InGaP/GaAs tandem solar cells", *In Proceedings of the 25th International Symposium on Compound Semiconductors*, 853-856 (1998).
19. Sato, S-I, Ohshima, T, Imaizumi, M., "Modeling of degradation behavior of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cell exposed to charged particles", *J. Appl. Phys.*, 105(4): 044504-1-6 (2009).
20. Yamaguchi M., "Multi-junction solar cells and novel structures for solar cell applications", *Physica E*, 14: 84-90 (2002).
21. Yamaguchi, M., "III–V compound multi-junction solar cells: present and future.", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 75: 261-269 (2003).
22. Nishiokaa, K., Takamoto, T., Aguib, T., Kaneiwab, M., Uraokac, Y., Fuyukic T., "Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90: 1308-1321 (2006).
23. Yamaguchi, M., "Radiation-resistant solar cells for space use" *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 68: 31-53 (2001).

24. Boylestad, R., Nashelsky, L., "Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi", **Prentice-Holl, Inc.**, New York, 3-25 (2000).
25. Seeger, K., "Semiconductor Physics: An Introduction 8th edition", **Springer-Verlag**, Berlin, 10-32 (2002).
26. Dikici, M., "Katihal Fiziğine Giriş", **19 Mayıs Üniversitesi Yayınları**, Yayın no:71, Samsun, 233-234 (1993).
27. Morthier, G., Vankwikelberge, P., " Handbook of Distributed Feedback Laser Diodes", **Artech House Inc.**, Boston, London, 6-10 (1997).
28. Chaffin, R, Osbourn, G., Dawson, L., Biefeld, R., "Strained superlattice, quantum well, multi-junction photovoltaic cells", **Proc. 17th IEEE PV Specialists Conf.**, New York, 743 (1984).
29. Barnham, K. W. J., Duggan, G., "A new approach to high-efficiency multi-bandgap solar cells", **J. Appl. Phys.**, 67: 3490-3493 (1990).
30. Nelson, J., Paxman, M., Barnham, K. W. J., Roberts, J. S., Button, C., "Steady state carrier escape from single quantum wells", **IEEE J. Quantum Electron.**, 29: 1460-1467 (1993).
31. Barnes, J., Tsui, E. S. M., Barnham, K. W. J., McFarlane, S. C., Button, C., Roberts, J.S., "Steady state photocurrent and photoluminescence from single quantum wells as a function of temperature and bias", **J. Appl. Phys.**, 81: 892-900 (1997).
32. Zachariou, A., Barnes, J., Barnham, K. W. J., Nelson, J., Tsui, E. S. M., Epler, J., Pate, M., "A carrier escape study from InP/InGaAs single quantum well solar cells", **J. Appl. Phys.**, 83: 877-881 (1998).
33. Barnham, K. W. J., Connolly, J., Griffin, P., Haarpaintner, G., Nelson, J., Tsui, E., Zachariou, A., Osborne, J., Button, C., Hill, G., Hopkinson, M., Pate, M., Roberts, J. S. Foxon, T., "Voltage enhancement in quantum well solar cells", **J. Appl. Phys.**, 80: 1201-1206 (1996).
34. Barnham, K. W. J., Ballard, I., Barnes, J., Connolly, J., Griffin, P., Klufftinger, B., Nelson, J., Tsui, E. and Zachariou, A., "Quantum well solar cells", **Appl. Surf. Sci.**, 113/114: 722-733 (1997).
35. Barnham, K. W. J., Braun, B., Nelson, J., Paxman, M., Button, C., Roberts, J. S., Foxon, C. T., "Short-circuit current and energy efficiency enhancement in a lowdimensional structure photovoltaic device", **Appl. Phys. Lett.**, 59: 135-137 (1991).

36. Fox, A., Ispasoiu, R., Foxon, C., Cunningham, J., Jan, W., "Carrier escape mechanisms from GaAs/AlGaAs multiple quantum wells in an electric field", *Appl. Phys. Lett.*, 63: 2917-2919 (1993).
37. Paxman, M., Nelson, J., Braun, B., Connolly, J., Barnham, K. W. J., Foxon, C. T., Roberts, J. S., "Modeling the spectral response of the quantum well solar cell", *J. Appl. Phys.*, 74: 614-621 (1993).
38. Aperathitis, E., Scott, C. G., Sands, D., Foukaraki, V., Hatzopoulos, Z., Panayotatos, P., "Effect of temperature on GaAs/AlGaAs multiple quantum well solar cells", *Mater. Sci. Eng. B*, 51: 85-89 (1998).
39. Connolly, J. P., Barnham, K. W. J., Nelson, J., Roberts, C., Pate, M., Roberts, J. S., "Short circuit current enhancement in GaAs/AlGaAs MQW solar cells", *Proc. 2nd World PV Energy Conversion Conf.*, (Vienna), Ispra, 3631-3634 (1998).
40. Barnes, J., Ali, T., Barnham, K. W. J., Nelson, J., Tsui, E. S. M., "Gallium Arsenide/Indium Gallium Arsenide Multi-Quantum Well solar cells", *Proc. 12th European PV Solar Energy Conf.*, Amsterdam, 1374-1377 (1994).
41. Ragay, F., Wolter, J., Mart'i, A., Ara'ujo, G., "Experimental analysis of the efficiency of MQW solar cells", *12th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Amsterdam, 1429-1433 (1994).
42. Barnes, J., Nelson, J., Barnham, K., Roberts, J., Pate, M., Grey, R., Dosanjh, S., Mazzer, M., Ghirardo, F., "Characterization of GaAs/InGaAs quantum wells using photocurrent spectroscopy", *J. Appl. Phys.*, 79: 7775-7779 (1996).
43. Freundlich, A., Serdiukova, I., "Multi-quantum well tandem solar cells with efficiencies exceeding 30% AM0", *Proc. 2nd World Conf. and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Vienna, 3707-3710 (1998).
44. Ekins-Daukes, N., Barnes, J., Barnham, K. W. J., Connolly, J., Mazzer, M., Clark, J., Grey, R., Hill, G., Pate, M., Roberts, J., "Strained and strain-balanced quantum well devices for high efficiency tandem solar cells", *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 68: 71-87 (2001).
45. Griffin, P. R., Barnes, J., Barnham, K. W. J., Haarpainter, G., Mazzer, M., Zanotti-Fregonara, C., Grunbaum, E., Olson, C., Rohr, C., David, J. P. R., Roberts, J. S., Grey, R., Pate, M. A., "Effect of strain relaxation on forward bias dark currents in GaAs/InGaAs multiquantum well p-i-n diodes", *J. Appl. Phys.*, 80: 5815-5820 (1996).
46. Barnham, K.W.J., Duggan, G., "A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells", *J. Appl. Phys.*, 67 (7), (1990).

47. Guodan Wei et al., "Thermodynamic limits of quantum photovoltaic cell efficiency", *Appl. Phys. Lett.* 91, (2007).
48. Longo, M., Parisini, A., Tarricone, L., Vantaggio, S., Bocchi, C., Germini, F., Lazzarini, L., "Structural and optical characterization of MOVPE grown InGaP/GaAs MQWs for advanced photovoltaic devices", *Journal of Crystal Growth*, 311: 4293–4300 (2009).
49. Sachenko, A.V., Sokolevskii, I.O., "Comparative Analysis of Limiting Photoconversion Efficiency of Usual Solar Cells and Solar Cells with Quantum Wells", *Physics of Semiconductor Devices*, 42, 10: 1219–1227, (2008).
50. Ilaiwi, K. F., "Photoionization of shallow donor impurities in finite-barrier quantum wells", *International Atomic Energy Agency internal report*, IC/94/177 (1994).
51. Bhattacharya, P., "Semiconductor Optoelectronic Devices", *Prentice-Hall*, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 0-13-489766-8 (1994).
52. Jaros, M., "Physics and Applications of Semiconductor Microstructures", *Clarendon Press*, Oxford, 0-19-851994-X (1990).
53. Kelly, M.J., "Low Dimensional Semiconductors", *Clarendon Press*, Oxford, 0-19-851780-7(1995).
54. Shik, A., "Quantum Wells; Physics and Electronics of Two-Dimensional Systems", *Scientific World Publishing Co. Ltd.*, Singapore, 981-02-3279-9(1998).
55. Shah, J., "Hot Carriers in Quasi-2-D Polar Semiconductors", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-22: 9, 1728-1743 (1986).
56. Cardona, M., Peter, Y.Y., "Fundamental of Semiconductors", *Springer Verlag Berlin Heidelberg*, Germany, 3-540-65352-X (1999)
57. Teke, A., "Hot electron light emission in GaAs/Al_xGa_{1-x}A heterostructures", *PhD thesis at Physics Department of Essex University*, UK 11. (1997).
58. Butcher, P. March, N.H., Tosi, M.P., "Physics of Low Dimensional Semiconductor Structures", *Plenum Press*, New York, 0-306-44170-5 (1993).
59. Bube, R.H., "Photoelectronic Properties of semiconductors", *Cambridge University Press*, Great Britain, 0-521-40681-1 (1992).
60. Nozik, A.J., "Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion", Ch.15, *Elsevier B.V.*, (2006).

61. Shockley, W., Queisser, H.J., "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells", *Appl. Phys.*, 32, (1961).
62. Wolf, M., "Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters", *Proc. Inst. Radio Engineers*, 48 (1960).
63. Hutchby, J.A., Markunas, R.J., Bedair, S.M., "A review of multijunction concentrator solar cells", *18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Las Vegas, USA (1985).
64. Ando, H., Amano, C., Sugiura, H., Yamaguchi, M., Salates, A., "Nonradiative e-h recombination of mid-gap trap in AlGaAs by MBE", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26 (1987).
65. Yamaguchi, M., Amano, C., Sugiura, H., Yamamoto, A., "High efficiency AlGaAs-GaAs tandem solar cell with tunnel junction", *19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, USA, (1987).
66. Olson, J.M, Kurtz, S.R., Kibbler, "K.E., A 27,3% efficient Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs tandem solar cell." *Appl. Phys. Lett.*, 56 (1990).
67. Takamoto, T., et al., "Two-terminal monolithic In_{0.5}Ga_{0.5}P/GaAs tandem solar cells with a high conversion efficiency of over 30%.", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 36 (1997).
68. Schimper, H.-J., Kollonitsch, Z., Möller, K., Seidel, U., Bloeck, U., Schwarzburg, K., Willig, F., Hannappel, T., "Material studies regarding InP-based high-efficiency solar cells", *J. Crys. Growth*, 287 (2006).
69. Takamoto, T., "Status of Multijunction Solar Cells and Future Development", *CS MANTECH Conference*, May 18th-21st, Tampa, Florida, USA, (2009).
70. Altuntas, H., Altindal S, Özçelik, S, Shhtrikman H. "Electrical characterization of Au/n-GaAs with and without SiO₂ Insulator layer at room temperature ", *Vacuum*, 83 (7):1060-1067 (2009).
71. Altuntas, H., Altindal, S., Shtrikman, H., Özçelik, S., " A detailed study of current-voltage characteristics in Au/SiO₂/n-GaAs in wide temperature range", *Microelectronics Reliability*, 49 (8):904-911 (2009).
72. Griffin, P., Ballard, I., Barnham, K.W.J., Nelson, J., Zachariou, A., Epler, J., Hill, G., Button, C., Pate, M., "The application of quantum well solar cells to thermophotovoltaics", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 50 213-219 (1998).
73. Tsu, R., Esaki, L., "Tunneling in a finite superlattice," *Appl. Phys. Lett.*, 22, 562-564, (1973).

74. Yogi, D., Goswami, N.J. Etkins, "Advances in Solar Energy: An Annual Review of Research And Development", **Quantum well Solar cells**, sf:45
75. Anderson, N.G., "Ideal theory of quantum well solar cells", *J. Appt. Phys.*, 78 (3): 1 (1995).
76. Nelson, J., "Quantum-well structures for photovoltaic energy conversion", *Thin Films*, (1995).
77. Barnham, K.W.J., Ballard, I., Connolly, J.P., Elkins-Daukes, N.J., Klufftinger, B.G., Nelson, J., Rohr, C., "Quantum well solar cells", *Physica E*, 14 (1/2), (2002).
78. Anderson, N.G., "On quantum well solar cell efficiencies", *Physica E*, 14 (1/2) (2002).
79. Araujo, G.L., Marti, A., "Absolute limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 33 (2) (1994).
80. Connolly, J.P., Nelson, J., Barnham, K.W.J., Ballard, I., Roberts, C., Roberts, J.S., Foxon, C.T., "Simulating multiple quantum well solar cells", *Conference Records of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists*, NJ, (2000).
81. Luque, A., Mart, A., Cuadra, L., "Thermodynamic consistency of subbandgap absorbing solar cell proposals", *IEEE Trans. Electron Devices*, 48 (2001).
82. Ramey, S.M., Khoie, R., "Modelling of multiple quantum well solar cells including capture, escape, and recombination of photo-excited carriers in quantum wells", *IEEE Trans. Electron Devices*, 50 (2001).
83. Rimadaa, J.C., Hernandezb, L., Connolly, J.P., Barnham, K.W.J., "Conversion efficiency enhancement of AlGaAs quantum well solar cells", *Microelectronics Journal*, 38, (2007).
84. Guodan Wei et al., "Thermodynamic limits of quantum photovoltaic cell efficiency", *Appl. Phys. Lett.*, 91 (2007).
85. Sachenko, A.V., Sokolovskyi, I.O., "Photoconversion efficiency of quantum-well solar cells for the optimum doping level of a base", *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 11, (2008).
86. Günther, K. G., "Evaporated layers of semiconducting III-V compounds InAs and InSb", *Z. Naturforsch*, 13a:1081-1089 (1958).
87. Müller, E. K., "Structure of oriented, vapor deposited GaAs films, studied by electron diffraction", *J. Appl. Phys.*, 35: 580-585 (1964).

88. Schoolar, R. B., Zemel, J. N., "Preparation of single-crystal films of PbS", *J. Appl. Phys.*, 35: 1848-1851 (1964).
89. Steinberg, R. F., Scruggs, D. M., "Preparation of epitaxial GaAs films by vacuum evaporation of the elements", *J. Appl. Phys.*, 37: 4586-4587 (1966).
90. Davey, J. E., Pankey, T., "Epitaxial GaAs films deposited by vacuum evaporation", *J. Appl. Phys.*, 39: 1941-1948 (1968).
91. Parker, E. H. C., "The technology and physics of molecular beam epitaxy", *Plenum*, New York, 32-55 (1985).
92. Herman, M. A., Sitter, H., "Molecular beam epitaxy-fundamentals and current status", *Springer Verlag*, 43-65 (1989).
93. Hayakawa, T., Takarashi, K., Sasaki, K., Hosoda, M., Yamamoto, S., Hijikata, T., "Molecular beam epitaxial of $(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ on (100) GaAs", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27: L968-L971 (1988).
94. Varriano, J. A., Koch, M. W., Johnson, G. G., Wicks, G. W., "GaInP and AlInP grown by elemental source molecular beam epitaxy", *J. Electronic Materials*, 21: 195-198 (1992).
95. Altuntaş, H., "Al_xGa_{1-x}As/GaAs Kuantum Kuyulu Fotodetektör Yapılarının Üretilmesi ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 23-40 (2009).
96. Singh, J., "Electronic and optoelectronic properties of semiconductor structures", *Cambridge University Press*, New York, 156-178 (2003).
97. Sundaram, M., Wang, S. C., Taylor, M. F., Reisinger, A., Milne, G. L., Rei, K. B., Rose, R. E., Marin, R. R., "Two-color quantum well infrared photodetector focal plane arrays", *Infrared Phys. Technol.*, 42: 301-308 (2001).
98. Binnig, G., Quate, C.F., Gerber, C., "Atomic force microscope" *In: Physical Review Letters.*, 56: 930-933 (1986).
99. Cheal, R.L., Yong, J.P., "Characteristics of UV photodetector fabricated by Al_{0,3}Ga_{0,7}N/ GaN heterostructure", *J. Cryst. Growth*, 252: 51-57 (2003).
100. <http://tr.wikipedia.org/>
101. <http://www.taek.gov.tr/>
102. Thomson, J.J., "Rays of positive electricity", *Phil. Mag.*, 20: 752-767. (1910).

103. Herzog, R.F.K., Viehboeck, F “Ion source for mass spectrography”, *Phys. Rev.*, 76 (6): 855–856. (1949).
104. Hofmann, S., “Sputter-depth profiling for thin-film analysis”, *Phil. Trans. R. Soc.*, 362 (1814): 55–75. (2004).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KIZILKAYA, Kürşat
 Uyuğu : T.C
 Medeni hali : Bekâr
 Doğum tarihi ve yeri : 18.04.1986 - YOZGAT
 Telefon : 0 (506) 862 80 90
 e-mail : kizilkayakk@gmail.com

Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi | Mezuniyet tarihi |
|---------------|------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | Gazi Üniversitesi / Fizik Bölümü | 2012 |
| Lisans | Selçuk Üniversitesi / Fizik Bölümü | 2009 |
| Lise | Anadolu Lisesi YOZGAT | 2004 |

Yabancı Dil

İngilizce

YAYIN LİSTESİ

A. Science Citation Index (SCI) Tarafından Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler

- [A1]. S. Çörekçi, **K. Kızılkaya**, T. Asar, M.K. Öztürk, M. Çakmak, S. Özçelik, “Effects of Thermal Annealing and Film Thickness on the Structural and Morphological Properties of Titanium Dioxide Films”, Acta Physica Polonica A, 121, (2012).
- [A2]. B. Kınacı, S. Çörekçi, **K. Kızılkaya**, S. Özçelik, “Current-voltage (*I-V*) characteristics of Au/InGaAs/n-GaAs Schottky barrier diodes”, Optoelectronics and Advanced Materials, 6, 1-2, 327-330, (2012).

B. Uluslararası Kongre Tebliğleri

- [B1]. **K. Kızılkaya**, “İnce Filmlerin Optiksel Karakterizyonunda Elipsometri Yönteminin Kullanılması”, 478, Turkish Physical Society 25th International Physics Congress, 25-29 August 2008, Bodrum, Turkey.
- [B2]. T. Asar, B. Kınacı, **K. Kızılkaya**, T. Mammadov, S. Özçelik, “Investigation of the Photovoltaic Properties of p-n Junction Ge Obtained by Arsenic Diffusion”, 515, Turkish Physical Society 27th International Physics Congress, 14-17 September 2010, Istanbul, Turkey.
- [B3]. **K. Kızılkaya**, S. Çörekçi, T. Asar, M.K. Öztürk, M. Çakmak, S. Özçelik, “Effects of Thermal Annealing and Film Thickness on The Structural and Morphological Properties of Titanium Dioxide Films”, 220, Advances in Applied Physics & Materials Science - APMAS 2011, 12-15 May 2011, Antalya, Turkey.
- [B4]. T. Asar, **K. Kızılkaya**, M. Abdolapour Salari, E. Pişkin, G. Kurtuluş, H.İ. Efker, T.S. Memmedli, S. Özçelik, “The Fabrication of ZnO Thin Films; Effect of Oxygen Addition”, 664, Turkish Physical Society 28th International Physics Congress, 6-9 September 2011, Bodrum, Turkey.
- [B5]. N. Akın, **K. Kızılkaya**, M. Çakmak, T.S. Memmedli, S. Özçelik, “SrTiO₃/p-Si(100) Yapısının Magnetron Püskürtme Yöntemi İle Üretilmesi ve Alttaş Sıcaklığına Bağlı Yüzey Özelliklerinin AFM Analizi”, 650, Turkish Physical Society 28th International Physics Congress, 6-9 September 2011, Bodrum, Turkey.
- [B6]. İ. Kars, Y. Özen, **K. Kızılkaya**, M.K. Öztürk, T. Mammedov, S. Özçelik, “Effects of Annealing on The Structural and Optical Properties of Al:ZnO Thin Films”, 789, Turkish Physical Society 28th International Physics

Congress, 6-9 September 2011, Bodrum, Turkey.

- [B7]. Y. Özen, B. Kınacı, T. Asar, **K. Kızılkaya**, S. Özçelik, “The Forward Bias Current-Voltage Characteristics of (Ni/Au)/ZnO/TiO₂/n-Si Schottky Diodes”, 61, International Student Workshop on Condensed Matter and Materials Physics, 27-31 December 2011, Antalya, Turkey.
- [B8]. S. Çörekçi, **K. Kızılkaya**, T. Asar, M.K. Öztürk, M. Çakmak, S. Özçelik, “Effects of Thermal Annealing and Film Thickness on the Structural and Morphological Properties of Titanium Dioxide Films”, Acta Physica Polonica A, 121, (2012).

C. Ulusal Kongre Tebliğleri

- [C1]. T. Asar, B. Kınacı, **K. Kızılkaya**, Y. Özen, T. Memmedli, S. Özçelik, “ZnO/p-Si Güneş Hücrelerinin Fabrikasyonu”, 109, 18. Yoğun Madde Fiziği Kongresi 25 Kasım 2011, Ankara, Türkiye.

Hobiler

Fotoğrafçılık, model araba koleksiyonculuğu ve seyahat.