

**GaInP ve InGaAs KUANTUM KUYULU GÜNEŞ PİLLERİNİN (QWSC)
ÜRETİMİ**

Tarık ASAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2009

ANKARA

Tarık ASAR tarafından hazırlanan “ GaInP ve InGaAs KUANTUM KUYULU GÜNEŞ PİLLERİNİN (QWSC) ÜRETİMİ ” 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. Bora ALKAN
(Fizik Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi)

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
(Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV
(Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi)

Tarih: 24 / 12 / 2009

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

Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Fen Bilimleri Enstitüsü 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.

Tarık ASAR

**GaInP ve InGaAs KUANTUM KUYULU GÜNEŞ PİLLERİNİN (QWSC)
ÜRETİMİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Tarık ASAR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2009

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında, GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapıları GaAs alttaşlar üzerine, Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yöntemi kullanılarak büyütüldü. Büyütülen QWSC yapıları birçok parçaya kesilerek, bazı parçalar farklı sıcaklıklarda hızlı termal tavlama (RTA) sistemi yardımıyla azot (N₂) ortamında, tavlandı. Tavlanan ve tavlınmayan yapıların, yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HRXRD) ile yapısal özellikleri incelendi. Tavlama sonucunda oluşan kusurların, yapıların büyüme koşulları, kalınlıkları, indiyum oranları gibi farklı özelliklere sahip olmasına atfedildi. Tavlınmış ve tavlınmamış QWSC'lerin fabrikasyonu tamamlanarak, güneş pili için önemli olan ileri beslem karanlık, ve AM1.5G standart ışık şiddeti altında akım-gerilim (*I-V*) ölçümleri yapıldı. *I-V* ölçümleri sonucunda GaInP ve InGaAs QWSC'lerin kısa devre akımları (*I_{sc}*), açık devre gerilimleri (*V_{oc}*), dolum çarpanları (*FF*), enerji dönüşüm verimleri (*η*) bulundu. Tavlama işleminden önce GaInP ve InGaAs QWSC'lerin verimi 0,14 iken, tavlamadan sonra verimlerin sırasıyla 0,16 ve 0,15 olduğu görüldü ve tavlama işleminin pil verimini attırdığı sonucuna varıldı.

Bilim Kodu : 202.1.147
Anahtar Kelimeler : SC, QWSC, MBE, GaInP, InGaAs, HRXRD, *I-V*
Sayfa Adedi : 87
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

**THE FABRICATION OF GaInP and InGaAs QUANTUM WELL
SOLAR CELLS (QWSC)**

(M.Sc. Thesis)

Tarık ASAR

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

December 2009

ABSTRACT

In this thesis, the GaInP and InGaAs quantum well solar cell (QWSC) structures were grown on GaAs substrates using Molecular Beam Epitaxy (MBE) technique. The growth QWSC structures were cut into several pieces and some of these were annealed at different temperatures under nitrogen (N_2) flow using rapid thermal annealing (RTA) system. The structural properties of the annealed and non-annealed structures were investigated using high resolution x-ray diffraction (HRXRD). The formed dislocations as a result of annealing were attributed to the different properties of samples such as growth conditions, thicknesses and indium concentrations. After the QWSC fabrication, the forward bias dark and under AM1.5G standart illumination current-voltage (I - V) measurements that is important for the solar cells were carried out. As a result of I - V measurements, the short circuit currents (I_{sc}), open circuit voltages (V_{oc}), fill factors (FF), energy conversion efficiencies (η) of GaInP and InGaAs QWSCs were found. The efficiencies was observed as 0,16 and 0,15 after annealing, while it was 0,14 before annealing and the thermal annealing process was discussed to increase the SC efficiency.

Science Code : 202.1.147
Key Words : SC, QWSC, MBE, GaInP, InGaAs, HRXRD, I-V
Page Number : 87
Adviser : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarını benden hiçbir zaman esirgemeyen Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarı direktörü hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Engin bilgi ve tecrübesini her zaman benimle paylaşan, her zaman desteğini gördüğüm Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV'a çok teşekkür ederim.

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL, Yrd. Doç Dr. M. Kemal ÖZTÜRK hocalarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve tezimin şekillenmesinde büyük emek harcayan canım Yasemin ŞAFAK'a çok teşekkür ederim.

Lisans öğrenimimize beraber başlayıp, beraber çalışıp, beraber yüksek lisansımızı bitirdiğimiz kardeşim Umut AYDEMİR'e teşekkür ederim.

Güneş pili yapılarını beraber büyüttüğümüz Dr. Aylin BENGİ'ye ve tezimde yardımları bulunmuş; Barış KINACI'ya, Beyza SARIKAVAK'a, İlke TAŞÇIOĞLU'na, Seda BENGİ'ye, Saime Şebnem ÇETİN'e, Habibe USLU'ya, Yunus ÖZEN'e ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ailemin maddi ve manevi desteği olmadan bu çalışmayı yapamazdım. Bütün imkânlarıyla bana destek olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez 2001K120590 no' lu proje ile DPT tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. YARIİLETKENLER VE UYGULAMALARI	3
2.1. Yarıiletken Malzemeler.....	4
2.2. Yarıiletken Tipleri.....	5
2.2.1. Katkısız yarıiletkenler	5
2.2.2. Katkılı yarıiletkenler	7
2.3. Çoklu Yapılı Yarıiletkenler.....	8
2.4. p-n Eklemler.....	9
2.4.1 Termal denge koşulları.....	10
2.4.2. Akım-gerilim (I-V) karakteristikleri	12
2.5. p-i-n (Pozitif-Katkısız-Negatif) Yapı.....	14
2.6. Yarıiletken Kuantum Kuyuları.....	16
2.7. Kuantum Kuyulu Yarıiletken Cihazlar	18
3. GÜNEŞ PİLLERİ (FOTOVOLTAİK PİLLER).....	19

Sayfa

3.1. Güneş Pili Tarihinde İlk Gelişmeler	19
3.2. Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışması.....	20
3.3. Üç Nesil Güneş Pilleri.....	21
3.3.1. Kristal silikon güneş pilleri	21
3.3.2. İnce film güneş pilleri	22
3.3.3. Nanoyapılı güneş pilleri	22
3.4. Kuantum Kuyulu Güneş Pilleri (QWSC).....	23
4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER.....	26
4.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Yöntemi	26
4.2. VG-Semicon V80H-MBE sistemi.....	28
4.3. GaInP Kuantum Kuyulu Güneş Pili (QWSC) Yapısının MBE Yöntemi İle Büyütülmesi.....	31
4.4. InGaAs Kuantum Kuyulu Güneş Pili (QWSC) Yapısının MBE Yöntemi İle Büyütülmesi.....	34
4.5 GaInP ve InGaAs Güneş Pili Yapılarının Tavlanması.....	38
4.6. Yüksek Çözünürlüklü X-Işınları Difraksiyonu (HRXRD)	38
4.6.1. Kullanılan X-ışınları difraktometresinin bazı özellikleri	43
4.7. Güneş Pili Yapılarının Fabrikasyonu	44
4.7.1. Güneş pili yapılarının temizliği.....	44
4.7.2. Püskürtme (Sputtering) yöntemi	45
4.7.3. Güneş pillerinin fabrikasyonu	47
4.8. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri	53
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	55
5.1. Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Kırınımı	55

Sayfa

5.1.1. GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerine (QWSC) tavlamanın etkileri	55
5.2. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri	62
5.2.1 . Metal-Yarıiletken (MS) kontaklar.....	62
5.2.2. Güneş pili parametreleri.....	69
5.2.3. GaInP ve InGaAs güneş pili parametrelerinin bulunması.....	70
6. SONUÇLAR.....	74
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Periyodik cetvelin, yarıiletkenlerle ilgili olan bölümü	4
Çizelge 2.2. Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler.....	5
Çizelge 4.1. GaInP-QWSC yapısı için akı değerleri.....	34
Çizelge 4.2. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili yapısı için akı değerleri.....	38
Çizelge 4.3. X-ışınları difraktometresinin teknik özellikleri	43
Çizelge 5.1. Metal-yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonların göre kontakların yapısı	64
Çizelge 5.2. GaInP kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) için bazı parametreler	72
Çizelge 5.3. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) için bazı parametreler	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Katkısız yarıiletkenin enerji bant diyagramının şeması.....	6
Şekil 2.2. Bir yarıiletkende akseptör enerji düzeyleri yasak enerji aralığında ve valans bandına daha yakındır.....	7
Şekil 2.3. Bir yarıiletkende donör enerji düzeyleri yasak enerji aralığında ve iletim bandına daha yakındır.....	8
Şekil 2.4. Farklı tipteki çoklu yapılı yarıiletkenler	9
Şekil 2.5. Tipik GaAs p-n eklemnin akım-gerilim karakteristiği	10
Şekil 2.6. p-n eklem oluşumu: (a) p-n eklemnin denge durumu, (b) tüketim bölgesinin oluşumu; (c) denge durumundaki enerji bant diyagramı, (d) tüketim bölgesinin oluştuğundaki enerji bant diyagramı	12
Şekil 2.7. p-n eklemnin (a) doğru ve (b) ters beslem altında, tüketim tabakası genişliğinin ve enerji-bant diyagramının şematik gösterimi	13
Şekil 2.8. p-i-n yapısının şematik gösterimi	15
Şekil 2.9. p-i-n yapısının (a) sıfır ve (b) V_o ters beslem altında enerji-bant diyagramı.....	16
Şekil 2.10. Kuantum kuyu yapısının bant diyagramı.....	17
Şekil 2.11. Tekli kuantum kuyu yapısının şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.12. Çoklu kuantum kuyu yapısının şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.1. Fotovoltaik Pilin Yapısı.....	21
Şekil 3.2. Kuantum kuyulu p-i-n yapısı	24
Şekil 3.3. Örgü Sabiti-Yasak Enerji diyagramı.....	25
Şekil 4.1. MBE işleminin şematik diyagramı	27
Şekil 4.1. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi.....	29
Şekil 4.3. GaInP kuantum kuyulu güneş pili yapısı.....	31
Şekil 4.4. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili yapısı.....	35

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması.....	39
Şekil 4.6. GaAs, GaAsP ve InGaAs arasındaki örgü uyumsuzluğu	40
Şekil 4.7. Yönelim bozukluğu.....	41
Şekil 4.8. Çift kristal x-ışını kırınım düzeneği.....	43
Şekil 4.9. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi.....	45
Şekil 4.10. Güneş pilinin şematik gösterimi	47
Şekil 4.11. Yapının arka yüzeyine omik kontak oluşturulmasında kullanılan maske	48
Şekil 4.12. QWSC yapılarının numune tutucuya yerleştirilmesi	48
Şekil 4.13. Ön omik kontakların oluşturulmasında kullanılan paslanmaz çelik maskeler: (a) İnce Izgara Maske, (b) Toplayıcı Izgara Maske.....	50
Şekil 4.14. Arka omik kontakları alınmış QWSC yapılarının numune tutucuya yerleştirilmesi	51
Şekil 4.15. Arka omik kontakları alınmış QWSC yapılarının numune tutucuya yerleştirilmesi	52
Şekil 5.1. GaInP/GaAs (ilk sütun) ve InGaAs/GaAs (ikinci sütun) QWSC'lerin çeşitli yansımalarındaki $\omega/2\theta$ taraması	56
Şekil 5.2. (a) GaInP and (b) InGaAs QWSC yapılarında (004), (115) ve (224) yansımaları için hesaplanan örgü sabitleri.....	58
Şekil 5.3. GaInP ve InGaAs yapıları için (a) In oranı ve (b) ortalama paralel ve dik gerilmeler	59
Şekil 5.4. (a) Uyumsuzluk dislokasyonları arası ortalama uzaklık ve (b) GaInP ve InGaAs yapılarının (004), (115) ve (224) yansımaları için farklı sıcaklıklardaki kusur yoğunluğu.....	60
Şekil 5.5. (a) GaInP ve (b) InGaAs QWSC yapılarının optik mikroskoptaki yüzey görüntüleri	61
Şekil 5.6. Metal ve yarıiletken malzemeler kontak yapılmadan önce, metal ve yarıiletken için Fermi enerjileri ve iş fonksiyonları	63

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için termal denge enerji - bant diyagramı	64
Şekil 5.8. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizması: (a) Potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) Elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c) Uzay yük bölgesinde birleşme, (d) Doğal bölgede deşik enjeksiyonu	66
Şekil 5.9. Ohmik kontaklar için: (a) Düşük engel yüksekliği ve (b) Yüksek katkı yoğunluğu	67
Şekil 5.10. GaInP kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) akım-gerilim (I-V)	71
Şekil 5.11. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) akım-gerilim (I-V)	71

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Gazi Üniversitesi STARLAB' ta bulunan V80H model MBE sistemi	30
Resim 4.2. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü	44
Resim 4.3. BESTEC Püskürtme sistemi	46
Resim 4.4. Püskürtme sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları	47
Resim 4.5. Akım-gerilim (I-V) ölçüm düzeneği	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a_{\perp}	Dik örgü parametresi
a_{\parallel}	Paralel örgü parametresi
a_f	İnce filmin örgü sabiti
a_s	Altaşın örgü sabiti
AC	Alternatif akım
D	Dislokasyonun ortalama alanı
DC	Doğru akım
d_{hkl}	Kristalografik düzlem
$\Delta\Phi_B$	Potansiyel engel alçalması
E_c	İletkenlik bant kıyısı enerjisi
E_g	Yasak bant aralığı
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_{Fn}	n tipi yarıiletkenin Fermi seviyesi
E_{Fp}	p tipi yarıiletkenin Fermi seviyesi
E_i	Saf yarıiletkenler için Fermi seviyesi
E_{oo}	Tünelleme enerjisi
E_v	Valans bant kıyısı enerjisi
ϵ	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
FF	Dolum çarpanı (faktörü)
λ	Dalga boyu
Θ_B	Bragg açısı
Φ	Kırılma düzlemi ve numune yüzeyi arasındaki açı
$\bar{\Phi}$	Engel yüksekliğinin ortalama değeri

Simgeler	Açıklama
Φ_B	Elektronlar için potansiyel engel yüksekliği
Φ_{Bo}	Sıfır beslem engel yüksekliği
$\Phi_{Bo}(I-V)$	Doğru beslem I-V ölçümlerinden elde edilen sıfır beslem engel yüksekliği
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
I_{max}	Maksimum akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
J_s	Doyum akım yoğunluğu
L_n	Elektronların p-bölgesindeki difüzyon uzunluğu
L_p	Deşiklerin p-bölgesindeki difüzyon uzunluğu
m^*	Yarıiletkenin etkin kütlesi
m_e^*	Elektron etkin kütlesi
N	Katkı konsantrasyonu
N_A	Alıcı (akseptör) konsantrasyonu
N_D	Verici (donor) konsantrasyonu
n	İletkenlik bandında birim hacimdeki elektron sayısı
n_i	Saf taşıyıcı yoğunluğu
n_n	n- tarafında çoğunluk taşıyıcıların sayısı
η	Enerji dönüşüm verimi
P	Basınç
p	Valans bandında birim hacimdeki deşik sayısı
P_{in}	Güneş pili üzerine gelen toplam güneş enerjisi gücü
p_n	n- tarafında azınlık taşıyıcıların sayısı
p_p	p- tarafında azınlık taşıyıcıların sayısı
R_c	Kontak direnci

Simgeler**Açıklama**

r_c	Spesifik kontak direnci
RF	Radyo frekansı
T	Sıcaklık
T_s	Büyütme sıcaklığı
ρ	Dislokasyon yoğunluğu
θ	X-ışını demetinin düzleme gelme açısı
V_{bi}	Bariyer potansiyeli
V_F	Doğru beslem gerilimi
V_{max}	Maksimum gerilim
V_{oc}	Açık devre gerilimi
V_R	Ters beslem gerilimi
V_0	Besleme gerilimi
W	Tüketim bölgesi genişliği
ω	Omega
x	Kompozisyon oranı
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi

Kısaltmalar**Açıklama**

AE	Alan Emisyonu
BEP	Demete eşdeğer basınç
CBE	Kimyasal Demet Epitaksi
G.R	Büyüme hızı
FWHM	Yarı Genişlik
HEMT	Yüksek mobiliteli tranzistör
HRXRD	Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı
I-V	Akım-gerilim ölçümleri
LED	Işık yayan diyot
LPE	Sıvı Faz Epitaksi

Kısaltmalar	Açıklama
MBE	Moleküler demet epitaksi
MOCVD	Metal Organik Buhar Faz Epitaksi
MOMBE	Metal Organik Moleküler Demet Epitaksi
MOVPD	Metal Organik Buhar Faz Birikimi
MOSFET	Metal-oksit yarıiletken alan etkili tranzistör
MS	Metal-yarıiletken
p-i-n	Pozitif-saf-negatif
p-n	Pozitif-negatif
PV	Fotovoltaik
RF	Radyo frekansı
RHEED	Yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı
RTA	Hızlı termal tavlama
SC	Güneş pili
STARLAB	Yarıiletken İleri Araştırma Laboratuvarı
RHEED	Yüksek Enerjili Elektron Yansıma Kırınımı
QMS	4-Kutuplu Kütle Spektrometresi
QW	Kuantum Kuyusu
QWL	Kuantum kuyulu lazer
QWSC	Kuantum kuyulu güneş pili
TAE	Termiyonik Alan Emisyonu
TE	Termiyonik Emisyon Teorisi
TED	Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi
UHV	Ultra Yüksek Vakum
VPE	Buhar Faz Epitaksi

1. GİRİŞ

Enerji, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin temel ihtiyaçlarından birisidir. Teknolojinin gelişmesiyle beraber ise elektrik enerjisine olan ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyacın daha çok yanıcı fosil kaynaklardan karşılanması sonucu ortaya pek de hoş olmayan sonuçlar çıkmaktadır. Mevcut enerji üretim kaynakları hızla tükenmeye, hammadde fiyatları artmaya, çevre ve insan sağlığı olumsuz etkilenmeye başlamıştır. Bu nedenle “temiz enerji” sınıflaması içerisinde yer alan çevre dostu, kirletici gaz yayımını artırıcı özelliği olmayan elektrik enerji üretim türlerini üretmek/kullanmak zorunluluk haline gelmiş ve son yıllarda aralarında güneş enerjisinin de bulunduğu yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yapılan çalışmalar hız kazanmıştır [1].

Önemli temiz enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisini kullanılabilir hale getiren güneş pilleridir(fotovoltaik pil, PV). Güneş pilleri, fotovoltaik ilkeye, üzerlerine düşen güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme esasına göre çalışırlar. Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de yarıiletken maddelerden yapılırlar. Yarıiletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum (Si), galyum arsenit (GaAs), kadmiyum tellür (CdTe) gibi malzemelerdir. Son zamanlarda ise yüksek verimliliğe sahip GaAs teknolojisine dayalı güneş pillerine ilgi artmıştır. Bu ilgi, güneş ışığının yoğunlaştırılması ile küçük boyutlardaki bu pillerden %50 civarında verime ulaşılabilmiş olmasıdır. Daha az kristal malzeme kullanarak yüksek güçlere ulaşılabilen III-V grubu güneş pillerinin/panellerinin küçük alanlı olarak üretilebilmeleri, birim güç başına üretim maliyetlerinde azalmaya sebep olmaktadır. Bununla birlikte, dünyadaki üretim teknolojilerinin, üretim hatlarının ulaştığı durum ve sarf malzeme maliyetlerindeki azalma dikkate alındığında Si teknolojisine dayalı güneş pili üretimi, güneş pili üretimleri içerisinde %90’ın üzerindeki payını korumaya devam edecek, bu alandaki araştırma-geliştirme çalışmaları da sürecektir.

Kuantum kuyulu güneş pilleri (QWSC) yüksek yasak enerji aralıklı engeller arasına konularak oluşturulan bir kuantum kuyu p-i-n yapısıdır. Bu yapılarda fotoakımdaki artış, karanlık akım artışından daha büyüktür. Bu durum QWSC'lerde yüksek verimliliğe yol açar. GaAs tabanlı III-V grubu yarıiletken alaşımlardan yapılan çok eklemli ve ya kuantum kuyulu (QW) güneş pillerinin yüksek dönüşüm verimlilikleri ve kararlılıkları ile önemleri artmaktadır [2-4]. Diğer kuantum kuyulu güneş pilleri (QWSC) yanında GaInP QWSC şu anda uzay araştırmalarında kullanılan yüksek verimli piller arasındadır [5-7].

Bu tez çalışması kapsamında Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarında (STARLAB) MBE yöntemi ile büyütülen GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapılarının fabrikasyonu ve yapısal-elektriksel analizleri ele alınmıştır. Büyütülen güneş pili (SC) yapılarının, yapısal özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) tekniği ile incelenmiştir. GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapılarının her birinden, güneş pili oluşturmak üzere beşer adet 1cm x 1cm 'lik parçalar kesilmiştir. Bu parçalardan her yapı için dörder adeti hızlı ısı tavlama (RTA-Rapid Thermal Annealing) sisteminde, azot (N₂) ortamında tavlansmıştır. Tavlanan ve tavlansmayan güneş pili (SC) yapılarının önce yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) analizleri, daha sonra da püskürtme sisteminde özel tasarlanmış maskeler yardımıyla fabrikasyonları yapılmıştır. Pillerin elektriksel özelliklerini belirlemek amacıyla akım-gerilim (I-V) ölçümleri alınmıştır. Bu ölçüm verileri ile çizilen akım-gerilim (I-V) grafiğinden, güneş pillerinin (SC); *kısa devre akımları* (I_{sc}), *açık devre gerilimleri* (V_{oc}), *dolum çarpanları* (FF) ve *enerji dönüşüm verimliliği* (η) bulunmuştur. Yapılan bu ölçümler sonucu tavlamanın hücre verimliliği üzerine etkisi araştırılmıştır.

2. YARIİLETKENLER VE UYGULAMALARI

Yarıiletken, iletkenliği yalıtkan ile iletken arasında olan, uyarıldıklarında iletkenlik özelliği gösteren malzemelerdir. Kimi zaman metallere, kimi zamanda yalıtkanlara benzer özellikler gösteren yarıiletken malzemeler geniş uygulama alanlarına sahiptirler.

Yarıiletken malzemelerin fiziksel özellikleri genel anlamıyla birbirlerine benzerdir. Bu malzemelerin en önemli iki özelliği; serbest elektronların bulunduğu iletim bandı ile bağlı elektronların bulunduğu valans bandı 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 [8].

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.

2.1. Yarıiletken Malzemeler

Doğada bulunan yarıiletken malzemeler elemetsel yarıiletkenlerdir. Diğer yarıiletkenler ise bazı elementlerin bileşimi/alaşımı şeklinde yapay büyütme teknikleri ile elde edilen yarıiletkenlerdir. Bu tip yarıiletkenlerin oluşturulduğu elementleri içeren, periyodik tablonun yarıiletkenlerle ilgili olan bölümü Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Periyodik cetvelin, yarıiletkenlerle ilgili olan bölümü.

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

Yarıiletkenleri iki ana başlık altında inceleyebiliriz;

(i) Elementsel Yarıiletkenler:

Doğal yarıiletken olarak da adlandırılan Ge ve Si elementsel yarıiletkenlerdir. Bu yapılarda atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlanmışlardır.

(ii) Bileşik ve Alaşım Yarıiletkenler:

GaAs, GaN ve CdTe gibi iki yarıiletkenler bileşik, GaAlAs, InGaN ve InGaAsP gibi üç ve daha fazla elementten oluşan yarıiletkenler ise alaşım yarıiletkenler olarak adlandırılır. Bileşik yarıiletkenlerde kristal bağlanma, elektronegatiflikteki farklılıktan dolayı, iyonik ve kovalent bağlanmalardan meydana gelir.

Üçlü alaşım yarıiletkenler, bileşik yarıiletkenlere az miktarda üçüncü bir elementin eklenmesiyle meydana gelen yarıiletkenlerdir. Örneğin; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. Burada x, alaşım oranıdır ve elementlerin ne oranda ilave yapıldığını gösterir.

Dörtlü alaşımlara örnek olarak $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ verilebilir; burada x ve y kompozisyonları alaşımı meydana getiren element oranlarını gösterir [9].

Çizelge 2.2' de önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler verilmiştir.

Çizelge 2.2. Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler.

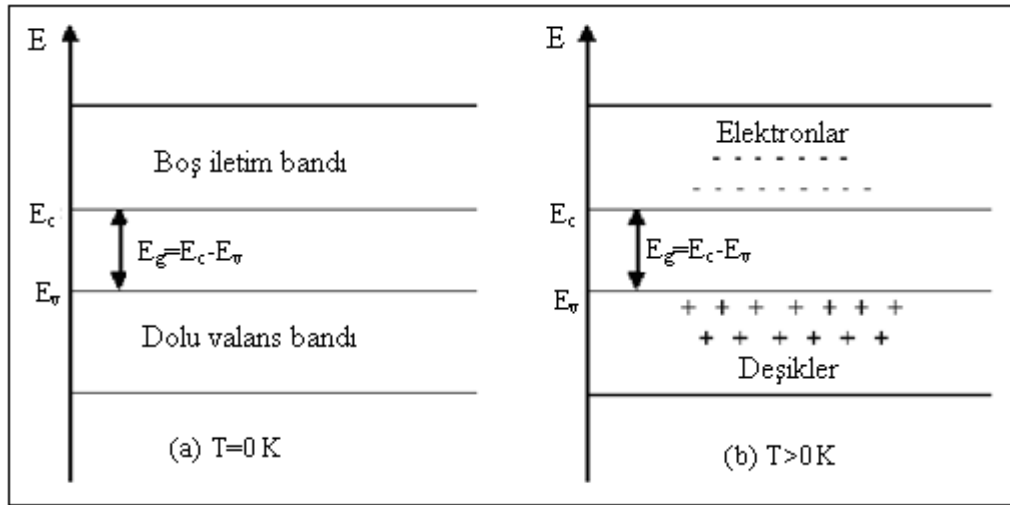
Element	İkili Bileşik				Üçlü Bileşik	Dörtlü Bileşik
	IV-IV	III-V	II-VI	IV-VI		
Ge (Germanyum)	SiC (Silisyum karbit)	AlAs (Alüminyum arsenit)	ZnO (Çinko oksit)	PbS (Kurşun sülfür)	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (Alüminyum galyum arsenit)	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (Alüminyum indiyum arsenik fosfat)
Si (Silisyum)		GaAs (Galyum Arsenit)	ZnS (Çinko sülfür)	PbTe (Kurşun tellür)	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (İndiyum galyum arsenit)	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ (Alüminyum galyum arsenik antimonit)
		GaN (Galyum nitrat)	CdSe (Kadmiyum selenit)		$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ (Galyum arsenit fosfat)	
		GaP (Galyum fosfat)	CdTe (Kadmiyum tellür)		$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (Galyum indiyum arsenit)	
		InP (İndiyum fosfat)				

2.2. Yarıiletken Tipleri

2.2.1. Katkısız Yarıiletkenler

Bu tip yarıiletken maddeler herhangi bir safsızlık içermediklerinden dolayı saf yarıiletkenler diye de adlandırılırlar. Elementsel ve bileşik yarıiletkenler katkısız yarıiletken olabilirler. Bir yarıiletkenin enerji-bant diyagramına bakıldığında Şekil 2.1(a)'da görüldüğü gibi 0K sıcaklıkta elektronik durumları tamamen dolu olan bir valans bandı, bundan E_g yasak enerji aralığı kadar yukarıda tamamen boş olan bir

iletim bandı bulunur. Bu sıcaklıkta yarıiletken mükemmel bir yalıtkandır. Oda sıcaklığında yarıiletken maddenin atomlarının termal enerjileri iletme katılacak çok az sayıda elektron sağlarlar. Metallere zıt olarak yarıiletken bir maddenin direnci sıcaklıkla düşer. Sıcaklık artarken valans elektronlarının termal enerjileri artar ve daha fazla elektron yasak enerji aralığını atlayarak iletkenlik bandına geçer (Şekil 2.1(b)).



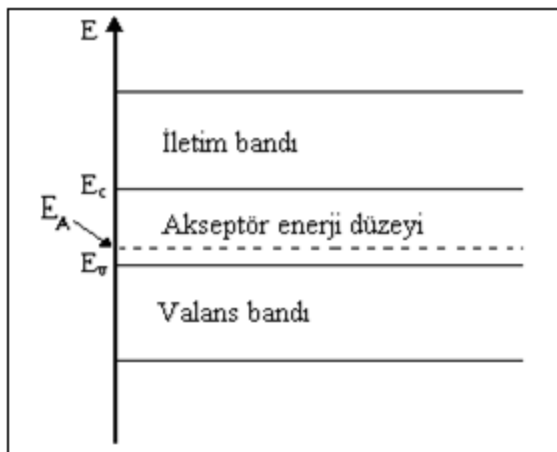
Şekil 2.1. Katkısız yarıiletkenin enerji bant diyagramının şeması.

Bir elektron bağlı bulunduğu atomun elektrostatik çekim enerjisini yenecek kadar enerji kazandığında arkasında başka bir elektron tarafından doldurulabilecek bir boşluk bırakır. Oluşan bu boşluk deşik (hol) olarak adlandırılır ve pozitif yüklü ikinci bir taşıyıcı olarak kabul edilir. Yarıiletkende elektronlar ve deşikler birbirlerine zıt yönde hareket ederler. Hakiki bir yarıiletkende ne kadar elektron varsa o kadar da deşik olmalıdır. Bu yolla üretilen elektronlar ve deşiklere katkısız yük yoğunlukları denir. Taşıyıcı yoğunluğu veya yük yoğunluğu birim hacimdeki yüklü taşıyıcı sayısını tanımlar. Bu tanımlama n birim hacimdeki elektron sayısı ve p birim hacimdeki deşik sayısı olmak üzere $n = p$ olarak yazılabilir. Farklı yarıiletkenlerde herhangi bir sıcaklıkta yasak enerji aralığındaki değişme, katkısız taşıyıcı yoğunluğundaki değişme anlamına gelmektedir.

2.2.2. Katkılı yarıiletkenler

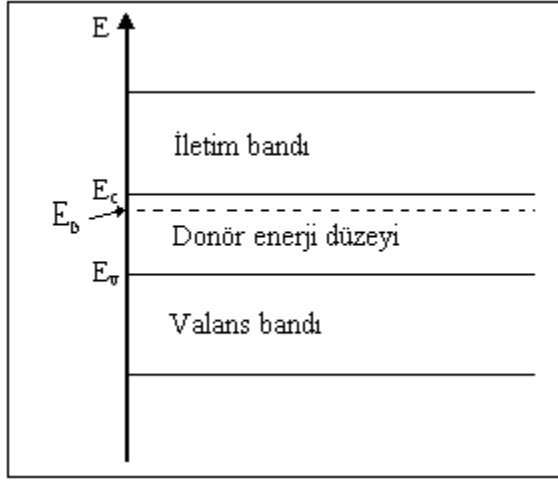
Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini değiştirmek için, yarıiletken kristalini oluşturan atomlardan bir kısmının yerine farklı fakat uygun atomların yerleştirilmesi işlemi katkılama adını alır. Katkılı yarıiletken, katkılama yöntemiyle katkısız yarıiletken kristale safsızlık atomları ilave edilmesiyle elde edilir. Arzu edilen özelliğe ve kullanım alanına bağlı olarak katkılama oranı değişir. Bu, bize yarıiletken kristalin ne ölçüde saf ve mükemmel olması gerektiği konusunda bilgi vermektedir. Yarıiletken kristale katkılanan elementler ya elektron verici (donör) ya da elektron alıcı olarak işlev yaparlar.

Deşikler üreten katkı maddeleri alıcı (akseptör) olarak bilinir. Bu tip katkı yarıiletkenler pozitif yük taşıyıcıları ürettiği için p-tipi yarıiletken denir. p-tipi yarıiletkenlerde deşik yoğunluğu elektron yoğunluğundan büyüktür. Bu tip yarıiletkenlerde deşikler (p_p) çoğunluk ve elektronlar (n_p) azınlık taşıyıcılarıdır. Alıcıların enerji düzeyleri, yasak enerji aralığında olup valans bandın yukarisındadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Bir yarıiletkende akseptör enerji düzeyleri yasak enerji aralığında ve valans bandına daha yakındır.

Verici enerji düzeyi, yasak enerji aralığında ve iyonlaşma enerjisi kadar iletim bandının altındadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Bir yarıiletkende donör enerji düzeyleri yasak enerji aralığında ve iletim bandına daha yakındır.

Kristale elektron veren katkılara verici (donör) denir ve katkılanan yarıiletkene de *n*-tipi yarıiletken denir. *n*-tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunlukta olduğu için elektronlara çoğunluk taşıyıcıları (n_n), deşikler azınlıkta olduğu için ise deşiklere azınlık taşıyıcıları (p_n) denilmektedir [10].

Alıcı yoğunluğunu artırmak suretiyle materyal *p*-tipi yapılabilmekte, yine verici katkılanarak katkısız ve *n*-tipi hale getirilebilmektedir. Bu işlem yarıiletken özelliğini kaybedinceye kadar devam edilebilmektedir. Yarıiletkenlerin *n* ve *p* tipi özelliğe sahip olabilmeleri entegre devre yapımında çok önemli bir yer tutar.

2.3. Çoklu Yapılı Yarıiletkenler

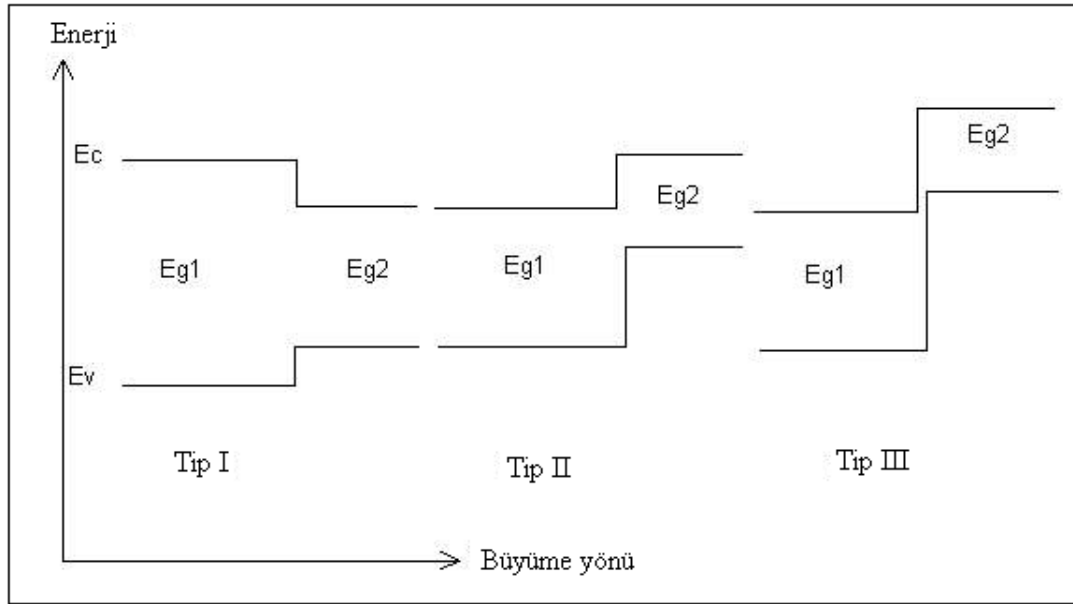
Bir yarıiletkenin üzerine başka bir yarıiletken tabakanın büyütülmesi ile elde edilen yapıya çoklu yapılı yarıiletken denir. Birkaç Epitaksiyel büyütme tekniği, monotabaka kadar ince tabakalarla büyütülen çoklu yapılar için ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan epitaksiyel büyütme teknikleri; Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD), Metal Organik Buhar Faz Birikimi (MOVPE), Kimyasal Demet Epitaksi (CBE), Metal Organik Moleküler Demet Epitaksi (MOMBE) 'dir. Bir çoklu yapılı yarıiletkenin epitaksiyel büyütülmesini yapmak için, kristal yapıları ve örgü parametreleri çeşitli

olumsuzlukları ortadan kaldırmak için uygun olan malzemeler seçilmelidir. Üç farklı çoklu yapı Şekil 2.4' de gösterildiği gibi oluşturulabilir.

TİP I : Bu tipte, daha küçük band aralıklı materyalin toplam aralığı daha büyük band aralıklı materyalin valans bandı (V.B) ve iletkenlik bandı (İ.B) arasında bulunur.

TİP II : Bu tipte, band kenarlarından birisi, iki yarıiletkenin band aralıkları arasındaki farktan daha büyüktür.

TİP III : Bu tipte, band kenarlarından biri, daha yüksek band aralıklı malzemenin band aralığından daha büyüktür [11].



Şekil 2.4. Farklı tipteki çoklu yapı yarıiletkenler.

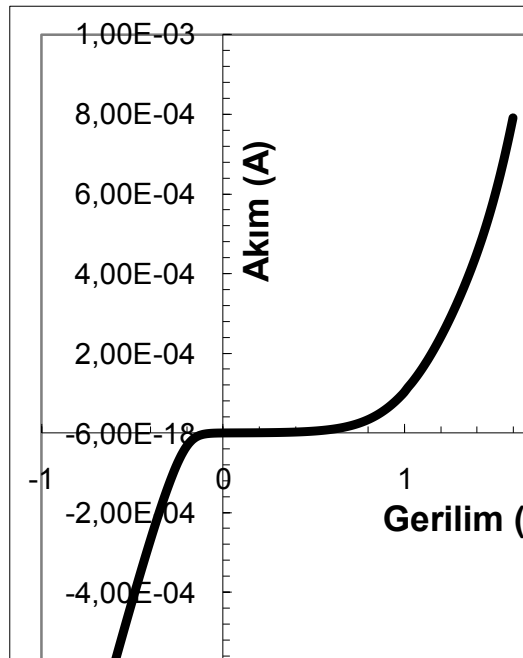
2.4. p-n Eklemler

Hem modern elektronik uygulamalarda, hem de diğer yarıiletken aygıtlar için önemli bir rol üstlenen p-n eklem; elektronik devrelerde doğrultucu, anahtarlama ve diğer işlemlerde oldukça yaygın olarak kullanılır. Uygulanan düzenli besleme yada

aydınlatma altında, p-n eklem mikrodalga yada fotonik aygıt şeklinde çalışır. p-n eklemler, bipolar transistörler ve MOSFET'ler için anahtar blok olarak işlev görür [12]. p-n eklemler difüzyon ile [12,13] iyon ekimi ile ve ince film büyütme teknikleri (MOCVD, MBE, ...) ile oluşturulur.

2.4.1 Termal denge koşulları

p-n eklem en önemli özelliği [12], doğrultmasıdır yani akımın yalnızca bir yönde kolaylıkla akmasına izin vermesidir. Şekil 2.5'de tipik bir GaAs p-n eklem akım-gerilim karakteristiği gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Tipik GaAs p-n eklem akım-gerilim karakteristiği.

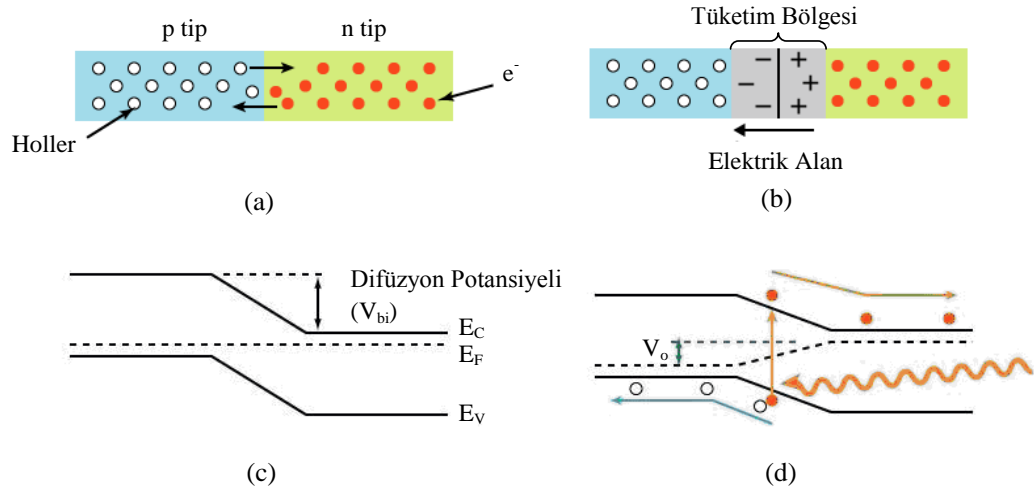
Eklem doğru beslem (p- tarafına pozitif gerilim) uygulandığı zaman, gerilim arttıkça akımda hızla artmaktadır. Buna rağmen, eklem ters besleme uygulandığı zaman, gerçekte, başlangıçta akım akmaz. Ters besleme arttırıldıkça, akımın aniden arttığı kritik voltaja ulaşıncaya kadar akım çok küçüktür. Akımdaki bu ani artış, “eklem kırılması (junction breakdown)” olarak adlandırılır. Uygulanan doğru beslem gerilimi, genellikle 1 V'tan daha azdır, fakat ters beslem kritik gerilimi yada kırılma

gerilimi, katkı konsantrasyonuna ve aygıtın diğer parametrelerine bağlı olarak birkaç volttan binlerce volta kadar değişebilir [14].

Bant diyagramı

p ve n-tipi yarıiletkenler birleştirildiğinde, eklemdeki yüksek taşıyıcı konsantrasyon gradienti, taşıyıcı difüzyonuna neden olur. p-tarafında, p-n eklem yakınında bulunan deşikler n-tarafına, n-tarafında p-n eklem yakınında bulunan elektronlarda p-tarafına nüfuz eder ve p-tarafına geçen elektronlar deşiklerle yeniden birleşir (Şekil 2.6 (a)).

Deşikler p-tarafından ayrıldıkça, eklem yakınındaki negatif alıcı iyonlar (N_A^-) dengelenmemiş olarak kalırlar. Deşikler hareketli iken, vericiler yarıiletken örgüde sabittirler. Benzer şekilde, elektronlar n-tarafından ayrıldıkça, eklem yakınındaki pozitif verici iyonlar (N_D^+) dengelenmemiş olarak kalır. Sonuç olarak, eklem p-tarafı yakınında negatif ve n-tarafı yakınında pozitif uzay yükü tabakası oluşur ve bir engel potansiyeli [13] meydana gelir (Şekil 2.6(c)). Bu uzay yükü bölgesi (tüketim bölgesi, hareketli taşıyıcı yoğunluğunun sıfır olduğu bölge), Şekil 3.2(c)'de gösterildiği gibi, pozitif yükten negatif yüke doğru bir elektrik alan yaratır [12] ve bu elektrik alan, her bir yük taşıyıcı tipi için difüzyon akımına zıt doğrultuda yönelmiştir. Şekil 2.6(b)'de elektrik alan nedeniyle deşik sürüklenme akımının sağdan sola doğru akmasına karşın, deşik difüzyon akımın soldan sağa doğru aktığı ve aynı zamanda elektron difüzyon ve sürüklenme akımları da gösterilmektedir. Şuna dikkat edilmelidir ki, negatif yüklerden dolayı, elektronlar sağdan sola doğru, yani elektron akımına zıt doğrultuda, nüfuz ederler [14].

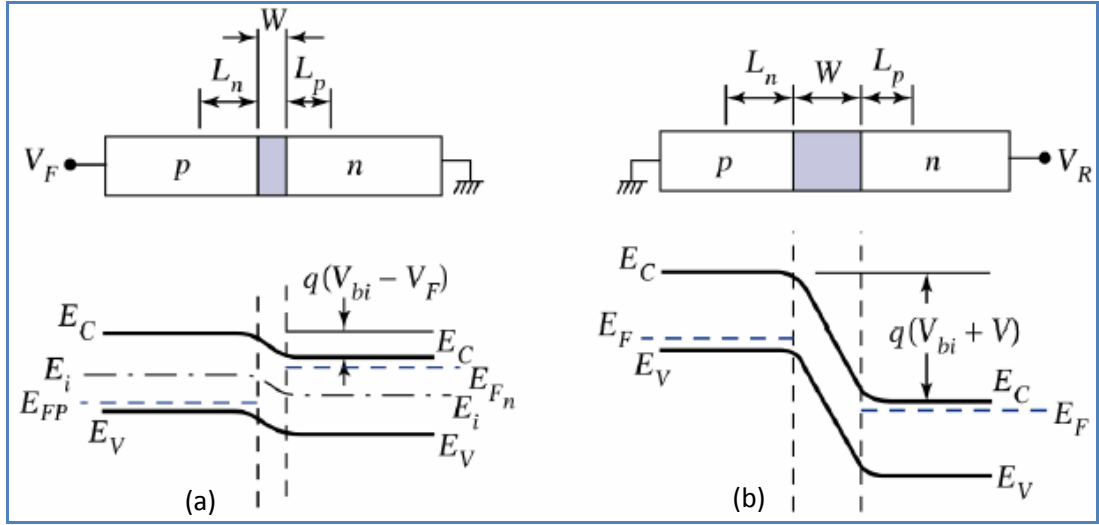


Şekil 2.6. p-n eklem oluşumu: (a) p-n eklemi denge durumu, (b) tüketim bölgesinin oluşumu; (c) denge durumundaki enerji bant diyagramı, (d) tüketim bölgesinin oluştuğundaki enerji bant diyagramı [15].

2.4.2. Akım-gerilim (I-V) karakteristikleri

p-n eklemeye uygulanan gerilim, elektronların ve deşiklerin difüzyon akımı ile sürüklenme akımı arasındaki dengeyi bozar. Doğru beslemde uygulanan gerilim, tüketim bölgesi boyunca elektostatik potansiyeli azaltır (Şekil 2.7(a)). Sürüklenme akımı, difüzyon akımına göre azalır. p-tarafından, n-tarafına doğru artmış deşik difüzyonu ve n-tarafından p-tarafına doğru elektron difüzyonu vardır. Böylece azınlık taşıyıcı enjeksiyonu meydana gelir yani, deşikler n-tarafına doğru itelenirken, elektronlar p-tarafına doğru itelenir. Tüketim bölgesinin genişliği azalır [12].

Ters beslem altında, uygulanan gerilim tüketim bölgesi boyunca elektostatik potansiyeli artırır (Şekil 2.7(b)). Bu difüzyon akımlarını azaltır, tüketim bölgesinin genişlemesine sebep olur ve küçük ters akım ile sonuçlanır.



Şekil 2.7. p-n eklemnin (a) doğru ve (b) ters beslem altında, tüketim bölgesi genişliğinin ve enerji-bant diyagramının şematik gösterimi.

İdeal karakteristikler

İdeal akım-gerilim karakteristiklerini şu yaklaşımlar üzerine kuruyoruz [12].

(i) Tüketim bölgesi keskin sınırlara sahip ve sınırlar dışında yarıiletken nötr varsayılıyor.

- Termal dengede, nötral bölgelerdeki çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu katkı konsantrasyonuna eşittir.

(iii) Tüketim bölgesinin, her iki sınırındaki elektron ve deşik yoğunluğu, termal dengedeki elektrostatik potansiyel farkı, V_{bi} , ile ilişkilidir.

- Doğru beslem, V_F , uygulandığında, elektrostatik potansiyel farkı $V_{bi} - V_F$ 'ye azalır, fakat ters besleme, V_R , uygulandığında, elektrostatik potansiyel farkı $V_{bi} + V_R$ 'ye artar.

(iv) Düşük enjeksiyon koşulu, yani enjekte edilmiş azınlık taşıyıcı yoğunlukları, çoğunluk taşıyıcı yoğunlukları ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Diğer

bir deyişle, nötral bölgenin sınırlarında, çoğunluk taşıyıcı yoğunlukları uygulanan gerilimle ihmal edilebilir bir şekilde değiştirilir.

- Doğru beslem altında, sınırlardaki azınlık taşıyıcı yoğunlukları denge değerlerinin üzerindeki değerlere artarken, geri besleme altında denge değerlerinin altına azalır.
- (v) Tüketim bölgesinde ne yaratma (generation) nede yeniden birleşme (recombination) akımı var olmaz ve tüketim bölgesi boyunca elektron ve deşik akımları sabittir.
- Tüketim bölgesinde akım yaratılmaz, tüm akımlar nötral bölgelerden gelir. Azınlık taşıyıcıları sınırlardan uzaklaşırken, enjekte edilmiş azınlık taşıyıcıları, çoğunluk taşıyıcıları ile yeniden birleşir.

Deşik difüzyon akımı n-bölgesinde L_p difüzyon uzunluğu ile ve elektron difüzyon akımı, p-bölgesinde L_n difüzyon uzunluğu ile üstel olarak azalır. Toplam akım aygıt boyunca sabittir ve şu şekilde verilir [12]:

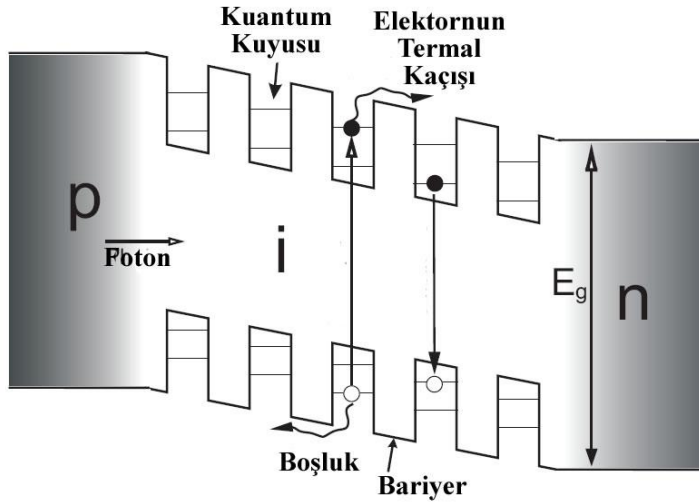
$$J = J_p(X_n) + J_p(-X_p) = J_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Burada J_s doyum akımı yoğunluğudur ve Eş. 2.1 “ideal diyot denklemi” olarak adlandırılır.

2.5. p-i-n (Pozitif-Katkısız-Negatif) Yapı

Yarıiletken p-i-n yapı, güneş pilleri, ışık yayan diyotlar (LED), fotodiyotlar, ve optik modülatörler gibi optoelektronik aygıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. p-i-n yapı, yüksek katkılanmış p-tipi ve n-tipi malzemeler arasında, sonlu alana ve kalınlığa sahip, saf (yüksek dirençli) i-bölgesi yerleştirilmesi ile meydana gelir

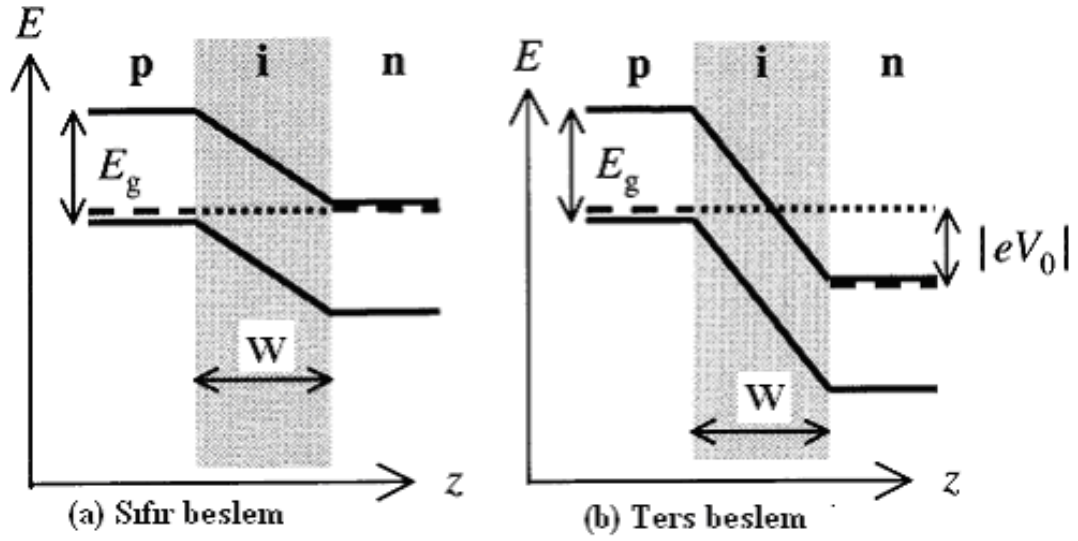
(Şekil 2.8). Bu i-bölgesi, diyotun optiksel olarak aktif olan kısmıdır. p-n eklemine amacı, aktif bölgeye enjekte edilen elektronların ve deşiklerin sayısını kontrol etmek ve güçlü elektrik alan uygulamalarına izin vermektir.



Şekil 2.8. P-I-N yapısının şematik gösterimi

p-i-n yapıya dış bir V_0 besleme gerilimi uygulandığında, eklemde tüketim bölgesinin oluşması, p-n fiziğinin önemli bir özelliğidir. Uygulanan V_0 gerilimi, tüketim bölgesinden geçerken azalır. Çünkü tüketim bölgesinin direnci, ağırca katkılanmış p-tipi ve n-tipi bölgelerle karşılaştırıldığında çok yüksektir. Uygulanan gerilim altında, tüketim bölgesinin genişliği, p-tipi ve n-tipi bölgelerdeki katkı seviyelerinden belirlenir. Yüksek katkı konsantrasyonu, ince tüketim bölgesi genişliği verir.

p-i-n yapıda, i-bölgesindeki artık katkı seviyeleri çok küçüktür ve böylece tüketim bölgesi tüm i-bölgesine genişleyebilir. Kontaklardaki ağır katkı seviyelerinden dolayı, tüketim bölgesinin p-tipi ve n-tipi bölgelerin içine doğru genişlemesi, tüketim bölgesinin kalınlığı ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Bu şu demektir; uygulanan herhangi bir dış gerilimin hemen hemen tamamı, i-bölgesine düşer [16]. Şekil 2.9(a)'da ve (b)'de sırasıyla, p-i-n yapının sıfır beslem ve V_0 ters beslem altında bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.9 p-i-n yapının (a) sıfır ve (b) V_0 ters beslem altında enerji-bant diyagramı

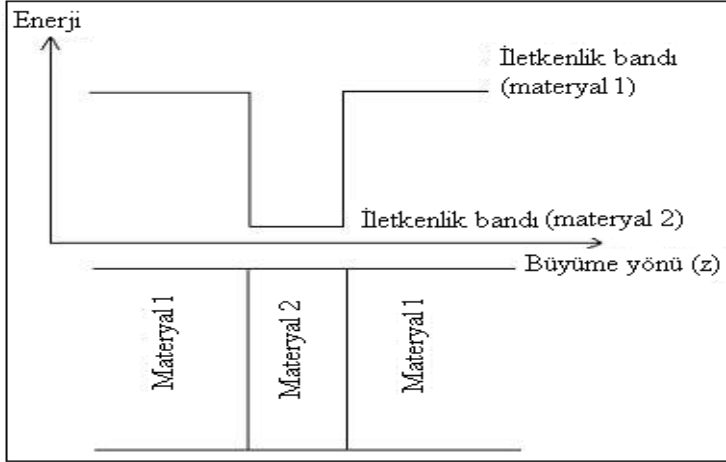
Sıfır beslemde, p-tipi ve n-tipi bölgelerin Fermi seviyeleri, aynı seviyede yer alır. Eğer Fermi enerjilerinin bant aralığıyla karşılaştırıldığında daha küçük olduğu varsayılırsa, Şekil 2.9(a)'dan da görüldüğü gibi, i-bölgesi boyunca E_g/e büyüklüğünde bir gerilim düşmesi vardır.

Beslem gerilimi uygulandığında, p-tipi ve n-tipi bölgelerin Fermi seviyeleri arasındaki fark $|eV_0|$ 'a eşit olur. Bu olay, ters beslem için yani p-bölgesine, n-bölgesine göre negatif voltaj uygulandığında, Şekil 2.9(b)'de gösterilmiştir. Doğru beslem i-bölgesi boyunca gerilim düşmesini azaltırken, ters beslem gerilim düşmesini artırır. Şekil 2.9(b)'den de görüldüğü gibi, i-bölgesi boyunca voltaj düşmesinin büyüklüğü yaklaşık olarak $|V_{bi}-V_0|$ 'dır [16].

2.6. Yarıiletken Kuantum Kuyuları

Şekil 2.10'de gösterildiği gibi bir potansiyel basamağı elde etmek için daha büyük band aralıklı iki malzeme arasına daha düşük band aralıklı yarıiletken malzemenin yerleştirildiği zaman bir kuantum kuyusu oluşturulur. Elektronlar x ve y doğrultusunda serbest hareket ederken, kuyu oluşumu z doğrultusunda elektronların hareketini sınırlar. Kuyunun genişliği (L_w) yeterince küçük olduğu zaman ($L_w < 10 \text{ \AA}$)

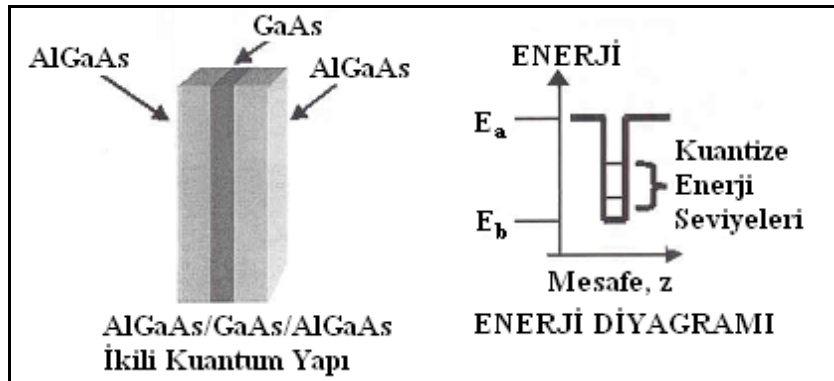
kuyuda bulunan elektronların hareketi yönünde kuantumlanmıştır ve enerji seviyeleri büyüme doğrultusunda kesiklidir [11].



Şekil 2.10. Kuantum kuyu yapısının bant diyagramı

a) *Tek Kuantum Kuyulu Yapı*

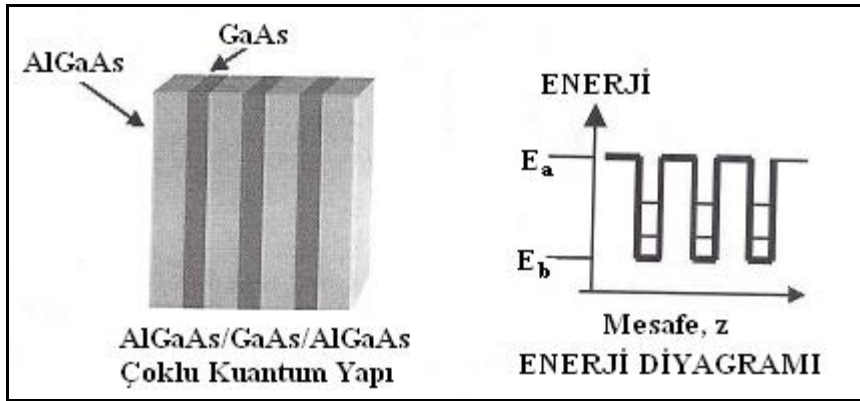
Bir tekli kuantum kuyu yapısı; bir uygun taban numune üzerine ikili, üçlü veya dörtlü yarıiletken alaşımların bir ultra ince tabaka olarak çoklu epitaksiyel olarak büyütülmesiyle elde edilir. InP/GaAs, AlGaAs/GaAs, Si/Ge örnekleri verilebilir.



Şekil 2.11. Tekli kuantum kuyu yapısının şematik gösterimi

b) Çoklu Kuantum Kuyulu Yapı

Çoklu kuantum-kuyu yapısı; dar ve geniş bant aralıklı tabakaların birini diğerinin üzerine büyüdüğü çoklu yapıdır. Genellikle geniş bant aralıklı materyaller, değişik kuantum kuyularındaki elektronlar arasında iletişimi sağlayan bir bariyer şeklindedir.



Şekil 2.12. Çoklu kuantum kuyu yapısının şematik gösterimi

2.7. Kuantum Kuyulu Yarıiletken Cihazlar

Kuantum kuyulu yarıiletken cihazların tohumları Esaki ve Tsu'nun 1969'daki araştırmalarıyla atıldı. Hızla gelişen ileri teknolojilerle beraber çeşitli kuantum kuyulu cihazlar meydana getirildi. Bunlardan başlıcaları; transistörler (MOSFET, HEMT...) [17], kuantum kuyulu lazerler (QWL) [18-20], infrared dedektörler [21], kuantum kuyu infrared fotodedektörleri [22-24] ve bu tez çalışmasında detaylı olarak incelenen kuantum kuyulu güneş pilleri(QWSC) [25,26] 'dir.

3. GÜNEŞ PİLLERİ (FOTOVOLTAİK PİLLER)

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

Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili 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.

3.1. Güneş Pili Tarihinde İlk Gelişmeler

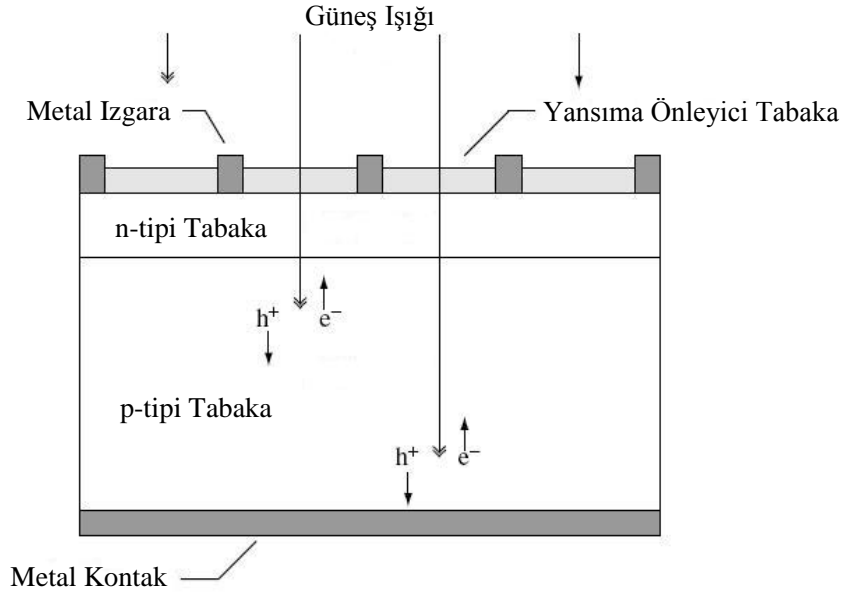
Fotovoltaik (PV)'lerin tarihi 19. Yüzyıla dayanır. İlk fonksiyonel ve intentionally yapılmış PV aygıt Fritts [27] tarafından 1883'te yapıldı. Se ince bir tabaka olarak eritip, metal bir yüzeye kapladı ve üzerine Au üst kontağını aldı. Bu yalaşık 30 cm²'lik bir alanı kaplamaktaydı. Fritts bu deneyi yaparken düşündü ki; "eğer enerji hemen kullanılmıyacaksa üretildiği yerde bataryalara depolanabilir veya kullanılacağı yere nakledilebilir". O bugünlerin PV teknolojisini ve uygulamalarını yüzyılı aşkın süreden önce öngördü. Fotovoltaiklerin modern çağı ise 1954 yılında Amerika'daki Bell laboratuvarlarındaki araştırmacıların tesadüfen, bir p-n eklemine üzerine oda lambasının ışığının düşmesi sonucunda voltaj ürettiğini fark etmesiyle başladı. Takip eden bir yıl içinde bu laboratuvarında %6 verime sahip Si p-n eklem güneş pilleri üretildi [28]. Aynı yıl içinde, Amerika'da Wright Patterson Hava Kuvvetleri Üssü'nde Cu₂S/CdS tabanlı ince film çoklu yapı ve %6 verimli güneş pilleri rapor edildi [29]. Bir yıl sonra, yine %6 verime sahip GaAs p-n eklemli güneş pilleri

Amerika'da RCA laboratuvarında rapor edildi [30]. 1960'a gelindiğinde birkaç anahtar makale Prince [31], Loferski [32], Rappaport ve Wysoski [33], Shockley (Nobel aldı) ve Queisser [34] tarafından pn eklemli güneş pillerinin çalışmasının temellerini yasak enerji aralığı, sıcaklık, termodinamik ve verimlilik gibi fiziksel parametrelerin birbiriyle ilişkisini gösterdiler. Bu arada üretilen ince film CdTe güneş pillerinin verimi %6 civarındaydı [35]. Aynı zamanda, USA uzay programı Si PV hücrelerden yararlanarak uyduların enerji ihtiyacını karşılamaktaydı. O zaman bile uzay, fotovoltaiklerin öncelikli uygulama alanlarından birisiydi ve radyasyonun aygıt üzerine etkileriyle radyasyondan daha az etkilenen Li katkılı Si temelli aygıtlar üzerine çalışmalar yapıldı [36]. 1970'de Alfarov'un (Nobel ödüllü) liderliğindeki Ioffe Enstitüsü, yeni bir çoklu yapılı AlGaAs/GaAs [37] güneş pili yapısı geliştirerek GaAs aygıtların ana problemlerini çözdüler. GaAs hücreler yüksek verim ve uzaydaki iyonize radyasyona karşı dayanıklılık gibi özelliklerinden dolayı ilgi çekmekteydi. 1973'te fotovoltaiklerin teknik ve teknik olmayan alanlarda kullanımlarının ilk yıllarıydı. Aynı yıl eski Si tabanlı hücrelere göre kısa dalga boylarında %30'luk bir verim artışına yol açan önemli bir gelişme yaşandı [38].

3.2. Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışması

Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de, yarı iletken maddelerden yapılırlar. Yarı iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir.

Yarı iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için p-n eklem oluşturulması gerekir (Şekil 3.1). p-n eklem hem modern elektronik uygulamalarda hem de diğer yarıiletken aygıtların anlaşılmasında önemli bir rol üstlenir. Elektronik devrelerde doğrultucu, anahtarlama gibi işlevlerde yaygın olarak kullanılır. Güneş piller için, aydınlatma altında, p-n eklem fotonik aygıt olarak çalışır. p-n eklemler difüzyon ile [39, 40] iyon ekimi ile ve ince film büyütme teknikleri (kimyasal buhar büyütmesi, CVD ya da moleküler demet epitaksi, MBE) ile oluşturulur.



Şekil 3.1. Fotovoltaik Pilin Yapısı

3.3. Üç Nesil Güneş Pilleri

Güneş pilinin verimini arttırabilmek için pillerin teknolojisi, yapımında kullanılan maddeler ve yapım türleri zaman içerisinde gelişim göstermiştir. Bu durum üç ana başlık altında toplanabilir.

3.3.1. Kristal silikon güneş pilleri

Silikon yarı iletken özellikleri tipik olarak gösteren ve güneş pili yapımında en çok kullanılan maddedir. Fotovoltaik özellikleri daha üstün olan başka maddeler de olmasına rağmen, silisyum hem teknolojisinin üstünlüğü nedeniyle hem de ekonomik nedenlerle tercih edilmektedir.

İlk ticari güneş pillerinde, Chrozalski kristal çekme tekniği ile büyütülen tek kristal yapıli silisyum kullanılmıştır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması bu pillerin dezavantajıdır.

Kristal silikon güneş pilleri;

- ❖ Tek-kristal (mono kristal) Güneş Pilleri
- ❖ Çoklu-kristal (Polikristal) Güneş Pilleri'dir.

3.3.2. İnce film güneş pilleri

Bu teknikte, ışığı yutma özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha iyi olan maddeler kullanılarak daha az kalınlıkta (tek kristalin 1/500'i kalınlığında) güneş pilleri yapılır. Örneğin amorf silisyum güneş pillerinin absorpsiyon katsayısı kristal silisyum güneş pillerinin katsayısından daha fazladır. Dalga boyu katsayısı 0,7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalınlığında amorf silisyum ile soğurulurken, kristal silisyumda ise aynı radyasyonu soğurmak için 500 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden amorf yapılı güneş pillerinde daha az malzeme kullanılması, daha ekonomik olması ve ayrıca tek modül halinde üretilebildiklerinden montaj kolaylığı gibi avantajlara sahiptir.

İnce film güneş pilleri;

- ❖ Amorf Silikon Güneş Pilleri(a-Si)
- ❖ Galyum Arsenik(GaAs) Güneş Pilleri
- ❖ Kadmiyum Tellür(CdTe) Güneş Pilleri
- ❖ Bakır İndiyum Selenit (CuInSe) Güneş Pilleri'dir.

3.3.3. Nanoyapılı güneş pilleri

Ticari ortama girmiş olan geleneksel Si güneş pillerinin verimlerinden daha yüksek verime sahip, ancak üretim teknolojileri hem daha zor, hem de daha pahalı olan güneş pilleri üzerinde de son yıllarda çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Bu tür çalışmalar kapsamında, çeşitli türde piller elde edilebilmekle birlikte, yüksek maliyet önemli bir sorun teşkil ettiğinden, güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünden

yararlanılabilmesi amacı ile denenen bir yöntem ise, birden fazla ince film yapısının üst üste konmasıyla elde edilen çok eklemlı film yapılarıdır.

Bunların dışında, güneş ışınımının yüksek verimli pillerin üzerine optik olarak yoğunlaştıran sistemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu tür sistemlerde güneşin hareketini izleyen düzeneklerin yanı sıra, güneş ışığını kıran (mercek) ya da yansıtan (ayna) eleman kullanılır.

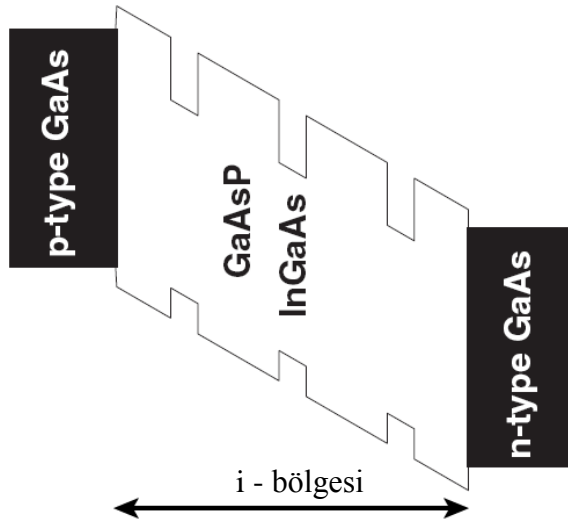
Nanoyapılı güneş pilleri; ardışık eklemlı (tandem) güneş pilleri, boya duyarlı güneş pilleri ve güneş spektrumunun çeşitli dalga boylarına uyum sağlayacak şekilde üretilebilen çeşitli enerji band aralığına sahip kuantum kuyulu güneş pilleri gibi yeni teknolojilerdir.

Nanoyapılı güneş pilleri;

- ❖ Ardışık Eklemlı (tandem) Güneş Pilleri
- ❖ Boya Duyarlı Güneş Pilleri
- ❖ Kuantum Kuyulu Güneş Pilleri

3.4. Kuantum Kuyulu Güneş Pilleri (QWSC)

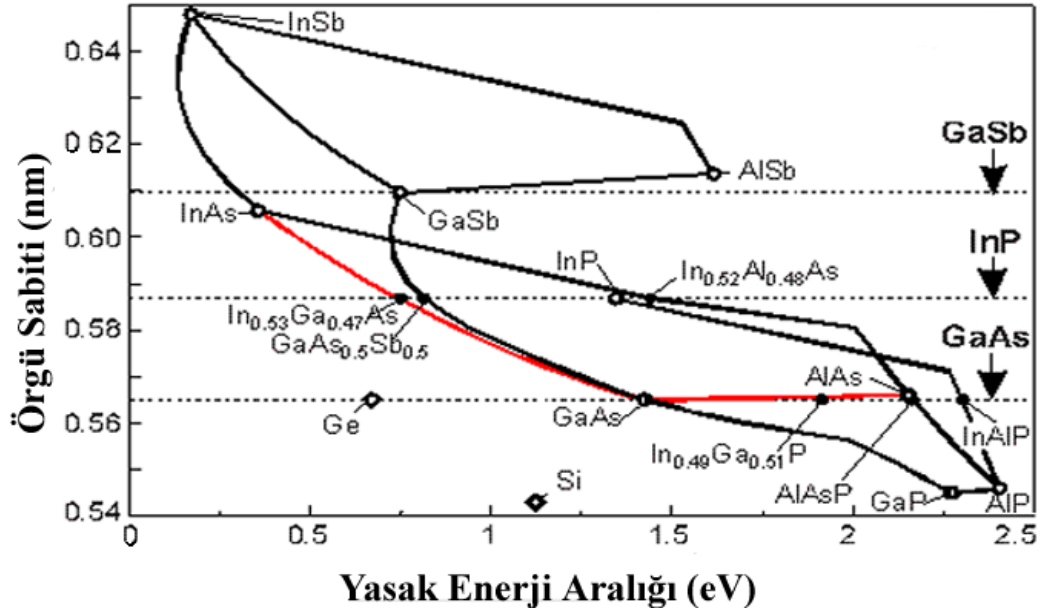
Bir kuantum kuyulu hücre, yüksek band aralıklı yarıiletken tabakaların arasına yerleşmiş düşük band aralıklı ince tabakalardan oluşan tipik bir p-i-n diyot yapısıdır. İlk tasarımlarda, kuantum kuyusu bir p-n aygıtın katkılanmış bölgeleri üzerine yerleştirilirdi [41]. Fakat yüksek kaliteli taşıyıcı toplama işlemi kuantum kuyuları içinden bir elektrik akımı mevcutken elde edildi. Daha sonraki kuantum kuyulu hücre tasarımlarında p-i-n yapılar kullanıldı [42] ve kuantum kuyusu katkısız bölge olarak büyütüldü. Şekil 3.2’de bu duruma ait band diyagramı Şematik olarak verilmiştir. Taşıyıcılar, kuyu içinden termal olarak ya da tünelleme yaparak kaçarlar [43-45].



Şekil 3.2. Kuantum kuyulu p-i-n yapısı

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 balk hücre ile kıyaslandığında voltajın iyileştirildiği deneysel olarak gözlenmiştir [46]. Bundan başka, fotoakım iyileştirmesi voltajdaki kayıptan daha iyi ise verimliliği de artırır [47]. 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 [48-52].

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 [53-58]. Ancak InGaAs'i örgü parametresi GaAs örgü parametresinden daha büyük olduğu için yapıda gerilme meydana gelir (Şekil 3.3). 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 [56]. Kusurların artışı ile de verimlilik düşer. Bu sorunu gidermek için, gerilmeyi azaltıcı teknikler kullanılır.



Şekil 3.3. Örgü sabiti-yasak enerji diyagramı

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 / ve ya yarıiletken kompozisyon oranının değiştirilmesi ile ayarlanır. Kusurların ve gerilmelerin giderilmesiyle de güneş ışığının daha geniş spektrumu soğurulabilir.

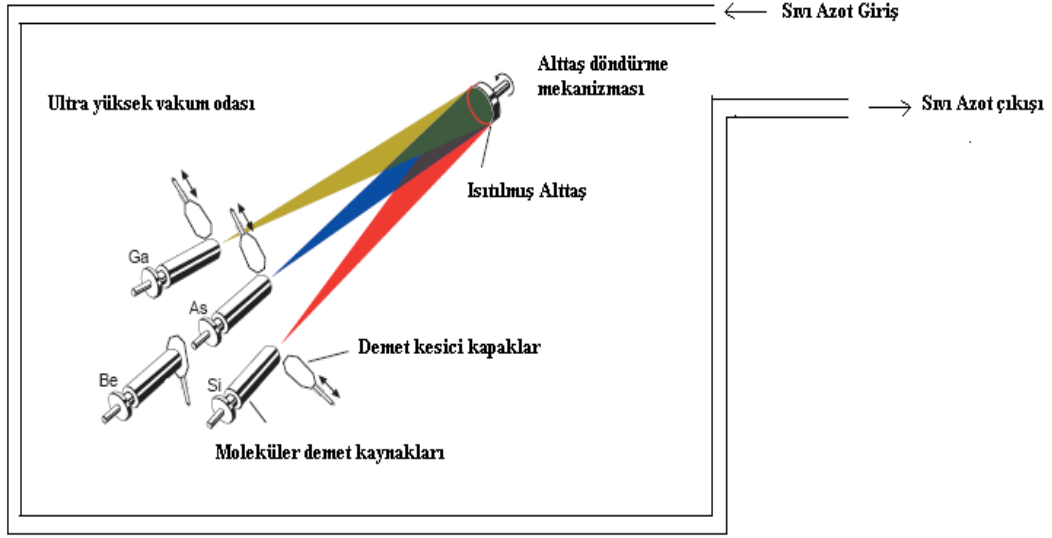
4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER

Bu tez çalışmasında incelenen kuantum kuyulu güneş pilleri MBE yöntemi ile büyütüldü. MBE yöntemi; kuantum kuyuları, kuantum noktaları, süper-örgüler, tünelleme devreleri gibi kuantum devrelerinin yapısını oluşturan yarıiletken çoklu yapılarının çok kaliteli büyütülmesini sağlayan bir kristal büyütme tekniğidir. MBE yönteminin geliştirilmesi fizik dünyasında, özellikle de yarıiletken fiziğinde önemli bir yer bulmuştur. MBE yöntemi ile büyütülen numuneler önce yüksek çözünürlüklü x-ışınları kırınımı yöntemi (HRXRD) ile yapısal olarak analiz edilmiştir. Kuantum kuyulu güneş pillerinin püskürtme (sputtering) sistemindeki fabrikasyon işlemi tamamlandıktan sonra ise akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapılmış ve güneş pilleri için en önemli parametrelerden biri olan verimlilik hesabı için gerekli olan parametreler elde edilmiştir. Bütün bu kullanılan yöntemler bu bölümde teorisiyle beraber ayrıntılarıyla incelenmiştir.

4.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Yöntemi

MBE esas olarak bir vakumda buharlaştırma tekniğidir ve yüksek kalitede ince film büyütme için kullanılır [59-68]. MBE yönteminin iki önemli özelliği vardır. Birincisi, vakum denilince bahsi geçen ultra-yüksek vakumdur (toplam basınç $< 10^{-10}$ Torr). İkincisi ise; üretilen filmlerin tek kristal özelliğinde olmasıdır. 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 ayarlanmaktadır. 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 hücreler arasında olabilecek ısıl alışverişin engellenmesi, hem de ortamdan gelerek büyütülen filmde safsızlık oluşturabilecek kirliliklerin tuzaklanarak asgari seviyeye inmesi sağlanır.



Şekil 4.2. MBE işleminin şematik diyagramı [68]

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. 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 monotabaka büyütülmesinin engellenmesinde oldukça önemli bir role sahiptir.

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

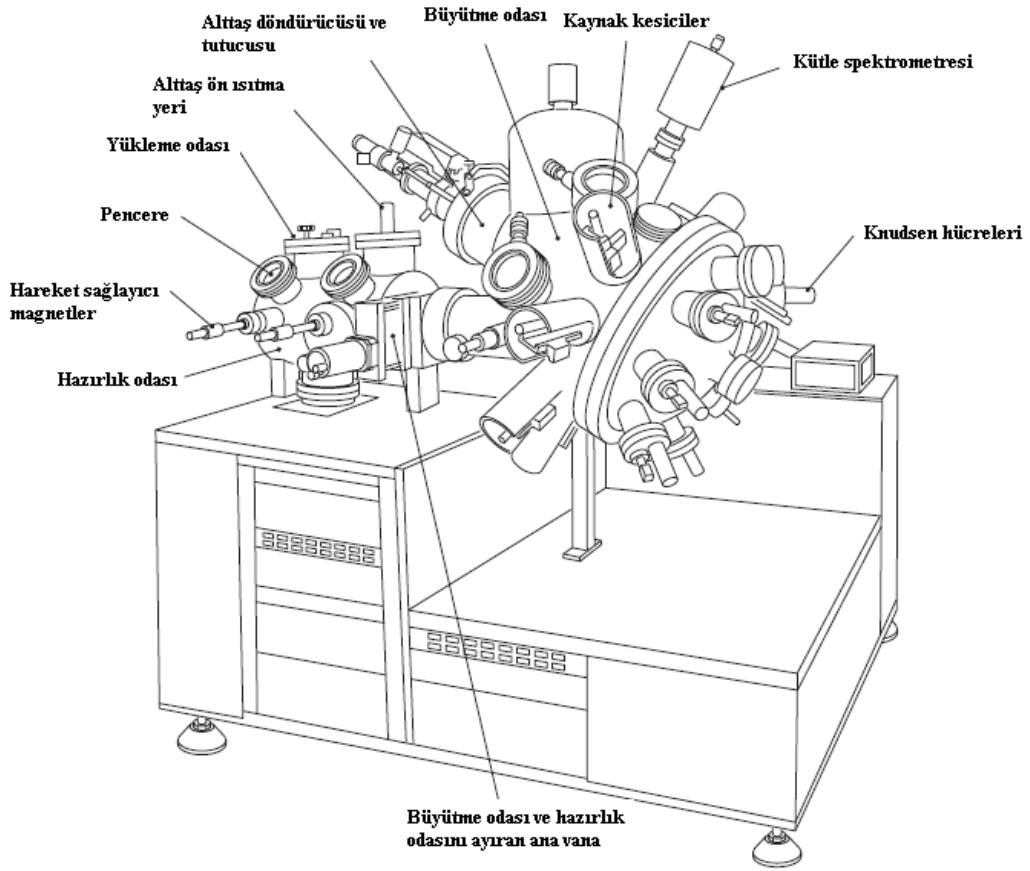
Büyütme odasına eklenebilecek elipsometri gibi cihazlarla büyütme işleminden önce, büyütme işlemi sırasında ve ya büyütme işleminden sonra epitaksiyel katmanların kimyasal ve yapısal özelliklerini analiz edilebilir.

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 gözlenerek, 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.

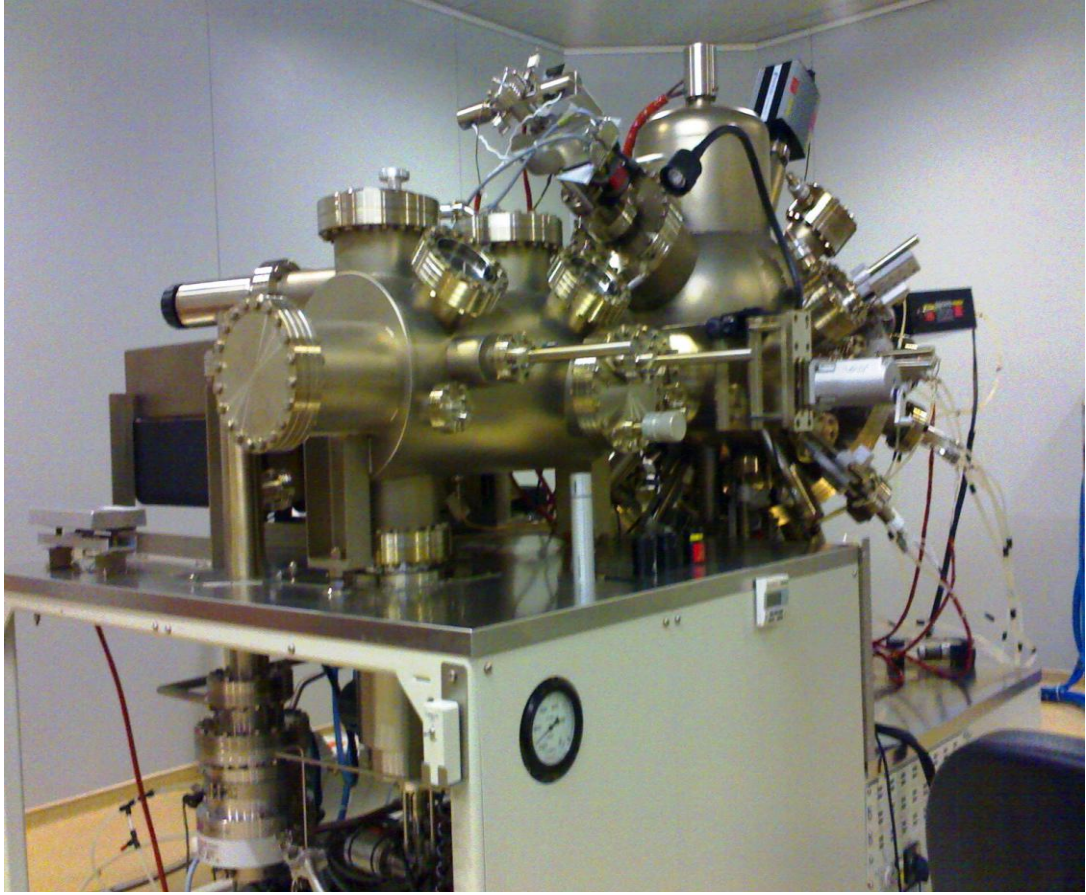
4.2. VG-Semicon V80H-MBE sistemi

Gazi Üniversitesi Fizik bölümü Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarı (STARLAB) 'nda kurulu VG-Semicon V80H-MBE Sisteminin resmi Resim 4.1 ve çizimi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi [68]

MBE sistemi kısaca; büyütme odasını, yükleme odasını, hazırlık odasını, transfer mekanizmasını, bilgisayara bağlı kontrol ünitesini içermektedir. Yükleme, hazırlık ve büyütme odası UYV şartları altında tutulmaktadır. Büyütme odasında; alttas ısıtıcısı, homojenlik sağlamak için alttas döndürücü, alttası 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. Gazi Üniversitesi STARLAB' ta bulunan V80H model MBE sistemi

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

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

Sistemin kontrolü IBM OS/2 işletim sistemi altında 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.

4.3. GaInP Kuantum Kuyulu Güneş Pili (QWSC) Yapısının MBE Yöntemi İle Büyütülmesi

$Ga_{1-x}In_xP$ kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapısı, epitaksiyel büyütme için uygun olarak satın alınan (110) yönelimli p tipi GaAs alttaş üzerine Vg-Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü. GaInP kuantum kuyulu güneş pili yapısı Şekil 4.3 'te verilmiştir.

GaAs 10A°
n-GaInP 300A°
n-GaAs 1000A°
i-GaAs 50A°
p-GaAs 20000A°
p-GaInP 500A°
p-GaAs Tampon 5000A°
p-GaAs (110) Alttaş

Şekil 4.3. GaInP kuantum kuyulu güneş pili yapısı

GaInP-QWSC kuantum kuyulu güneş pili yapısının büyütme şartları ve adımları şu şekildedir:

- GaAs alttaş büyütme odasında transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C' de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su ve buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.
- Sistemin soğuk panelinin sıvı azotla dolması sağlandı ve bu doluluğun azalmaması için sıvı azot akışının uygun miktarda devamlılığı sağlandı (MBE sisteminde büyütme sürecinde tüketilen sıvı azot miktarı 20 lt/saat dolayındadır).

Kaynak hücre sıcaklıkları, Çizelge 4.1 ile verilen değerlerin 10 °C üzerine çıkartılarak ve bu sıcaklıkta 10-15 dakika beklendikten sonra kaynak kesiciler kısa sürelerle açılıp kapatılmasıyla kaynak hücreler içinde biriken muhtemel kirliliklerin uzaklaştırılması sağlandı.

- c) Alttaş büyütme odasına transfer edildi.
- d) Alttaş büyütme odasına transfer edildikten sonra iyon ölçer (MIG) “IN” pozisyonuna getirildi, yani alttaş tutucusunun önüne getirildi. Böylece alttaş ısıtıcısı üzerine moleküllerin birikme yapması önlenmiş oldu ve moleküler demet akılarını ölçmek için hazır konuma getirilmiş oldu.
- e) Sıvı azotla panel doldurulduktan sonra sıvı azot akışı orta seviyeye düşürülüp, kaynak hücreler düşük sıcaklık artışlarıyla (0.1 °C/s) ısıtmaya başlandı.
- f) $Ga_{1-x}In_xP$ kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) çokluyapısını büyütme için; Arsenik, İndiyum, Galyum, Galyumfosfat, Berilyum ve Silikon kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları, tahmini büyütme sıcaklık değerine indirilerek her bir moleküler/atomik demetin akısı MIG ile ölçüldü ve istenilen tabaka kalınlığı ve alaşım oranını verecek şekilde olması hücre sıcaklık değerlerinin küçük değişimleri ile belirlendi.
- g) $Ga_{1-x}In_xP$ kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) çokluyapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde X-Gen2-11 programı altında bulunan yazılımla reçete denilen büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.
- h) $Ga_{1-x}In_xP$ kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) çokluyapısı için yüklenen alttaşın üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürülerek, 500 °C 'ye kadar ısıtmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 250 °C'ye ulaştığında As vanası açılarak, yüksek sıcaklıklarda yüzeyden As uzaklaşması dengelendi. Alttaş sıcaklığı 500 °C 'ye (termoçift sıcaklığı) ulaştığı zaman

RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 Å oluncaya kadar artırıldı.

- i) Alttaş sıcaklığı 600 °C olduktan sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının artık kalkmaya başladığı, fosfor ekranda elektron spotlarının görülmesi, desenin çizgileşmeye başlamasından anlaşıldı. Alttaşın sıcaklığı adım adım kontrollü olarak, 690 °C 'ye çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 10 dakika beklenerek tamamen oksit tabakasının alttaş yüzeyinden kalkması sağlandı. Bu işlem sonunda RHEED deseninin tamamen çizgi şeklini aldığı görüldü.
- j) Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra alttaş sıcaklığı tampon tabakası büyütülmek üzere 660 °C' ye düşürüldü. GaAs tampon tabakası için Ga kaynak sıcaklığı 932 °C olarak yazılan reçete programına büyütme işleminin devam etmesi için komut verildi. Bu komuttan sonra Ga ve Be akı kesicisi açılarak 2,78 Å/s büyütme oranı ile 0,5 µm p tipi GaAs tampon tabakası büyütüldü.
- k) Tampon tabakası büyütüldükten sonra alttaş sıcaklığı 530 °C' ye, Ga kaynak sıcaklığı ise 910 °C 'ye düşürüldü. Ga, In ve Be akı kesicileri açılarak 50 nm p-tipi GaInP tabakası büyütüldü.
- l) Bu tabakadan sonra PIN kuantum kuyu yapısını oluşturmak için sırasıyla; Ga ve Be akı kesicileri açılarak 2 µm p-tipi GaAs tabakası, sadece Ga akı kesicisi açılarak 5 nm i-tipi GaAs tabakası, Ga ve Si akı kesicileri açılarak ise 0,1 µm n-tipi GaAs tabakası büyütüldü.
- m) Kuantum kuyu yapısı büyütüldükten sonra, Ga, In, GaP ve Si akı kesicileri açılarak 0,3 µm n-tipi GaInP tabakası büyütüldü.
- n) En son tabaka olarak ise; sadece Ga akı kesicisi açılarak 1 nm i-tipi GaAs üst katman tabakası büyütüldü.

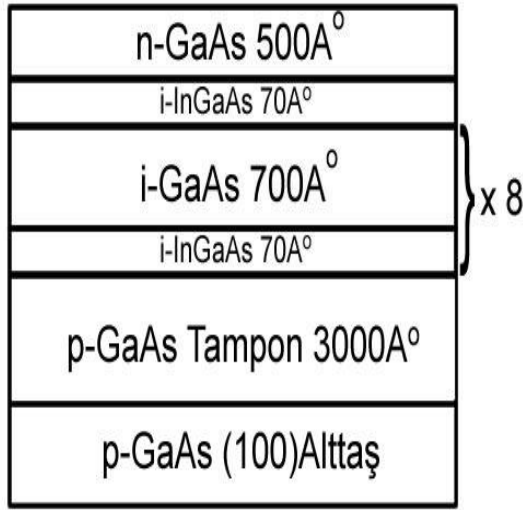
- o) Büyütme işlemi tamamlandıktan sonra alttaş sıcaklığı 250 °C ye kadar soğutuldu ve 250 °C den sonra As kaynak kesicisi kapatıldı. Alttaş döndürülmesi durdurularak, alttaş önce hazırlık odasına, daha sonra da yükleme odasına transfer edildi.

Çizelge 4.2. GaInP-QWSC yapısı için akı değerleri

<i>Kaynak hücresi</i>	<i>Sıcaklık (°C)</i>	<i>Demete Eşdeğer Basınç (BEP) (mbar)</i>
Galyumfosfat (GaP)	1040	-----
İndiyum (In)	771	-----
Galyum (Ga)	932	7.6×10^{-7}
Galyum (Ga)	910	4.9×10^{-7}
Arsenik Bulk (As)	380	2.2×10^{-6}
Arsenik Cracker	950	-----
Silikon (Si)	1130	-----
Berilyum (Be)	850	-----

4.4. InGaAs Kuantum Kuyulu Güneş Pili (QWSC) Yapısının MBE Yöntemi İle Büyütülmesi

$In_xGa_{1-x}As$ kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapısı (100) yönelimli p tipi GaAs alttaş üzerine Vg-Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili yapısının kuantum kuyulu güneş pili yapısı Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili yapısı

InGaAs kuantum kuyulu güneş pili yapısının büyütülmesindeki şartlar ve adımlar şu şekilde anlatılabilir:

- GaAs alttaş büyütme odasında transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C’ de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.
- Kaynak hücre sıcaklıkları, Çizelge 4.2 ile verilen değerlerin 10 °C üzerine çıkartılarak kaynak hücreler içinde biriken oksijen ve diğer artık gazların çıkmaları sağlandı.
- Alttaş büyütme odasına transfer edildi.
- Alttaş büyütme odasına transfer edildikten sonra MIG “IN” pozisyonuna getirildi, yani alttaş tutucusunun önüne getirildi. Böylece alttaş ısıtıcısı üzerine moleküllerin birikme yapması önlenmiş oldu.
- Sıvı azotla panel doldurulduktan sonra sıvı azot akışı orta seviyeye düşürülüp, kaynak hücreler düşük sıcaklık artışlarıyla (0.1 °C/s) ısıtılmaya başlandı.

- f) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) çokluyapısını büyütme için; Arsenik, İndiyum, Galyum, Berilyum ve Silikon kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları büyütme sıcaklıklarının 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.
- g) Kaynakların sıcaklıkları, oksijen ve diğer artık gazların çıkması sağlandıktan sonra tekrardan büyütme sıcaklıklarına indirildi.
- h) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) çokluyapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde X-Gen2-11 programı altında bulunan formül yazıcı ile reçete denilen büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.
- i) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) çokluyapısı için yüklenen alttaşın üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürülerek, 500 °C 'ye kadar ısıtılmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 500 °C 'ye (termoçift sıcaklığı) ulaştığı zaman RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 Å oluncaya kadar artırıldı. 500 °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.
- j) Alttaş sıcaklığı 620 °C olduktan sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının artık kalkmaya başladığı, desenin çizgileşmeye başlamasından anlaşıldı. Alttaşın sıcaklığı adım adım kontrollü olarak, 680 °C 'ye çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 10 dakika beklenerek tamamen oksit tabakasının alttaş yüzeyinden kalkması sağlandı. Bu işlem sonunda RHEED deseninin tamamen çizgi şeklini aldığı görüldü.

- k) Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra alttaş sıcaklığı tampon tabakası büyütölmek üzere 660 °C' ye düşüröldü. GaAs tampon tabakası için Ga kaynak sıcaklığı 934 °C olarak yazılan reçete programına büyütme işleminin devam etmesi için komut verildi. Bu komuttan sonra Ga ve Be akı kesicisi açılarak 2.78 Å/s büyütme oranı ile 0.3 µm p tipi GaAs tampon tabakası büyütöldü.
- l) Tampon tabakası büyütöldükten sonra alttaş sıcaklığı 570 °C' ye, Ga kaynak sıcaklığı ise 910 °C 'ye düşüröldü.
- m) Bu tabakadan sonra kuantum kuyu yapısını oluşturmak için sırasıyla; In ve Ga akı kesicileri açılarak 7 nm i-tipi InGaAs tabakası, sadece Ga akı kesicisi açılarak 70 nm i-tipi GaAs tabakası ve kuantum kuyu yapısını tamamlamak için In ve Ga akı kesicileri açılarak 7 nm i-tipi InGaAs tabakası büyütöldü.
- n) Kuantum kuyu yapısı büyütöldükten sonra son tabaka olarak, Ga ve Si akı kesicileri açılarak 50 nm n-tipi GaAs tabakası büyütöldü.
- o) Büyütme işlemi tamamlandıktan sonra alttaş sıcaklığı 250 °C ye kadar soğutuldu ve 250 °C den sonra As kaynak kesicisi kapatıldı. Alttaş döndürölmesi durdurularak, alttaş önce hazırlık odasına, daha sonra da yükleme odasına transfer edildi.

Çizelge 4.2. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili yapısı için akı değerleri

<i>Kaynak hücresi</i>	<i>Sıcaklık (°C)</i>	<i>Demete Eşdeğer Basınç (BEP) (mbar)</i>
İndiyum (In)	760	1.8×10^{-7}
Galyum (Ga)	934	1.4×10^{-6}
Galyum (Ga)	910	9.5×10^{-7}
Arsenik Bulk (As)	380	2.2×10^{-6}
Arsenik Cracker	950	-----
Silikon (Si)	1130	-----
Berilyum (Be)	850	-----

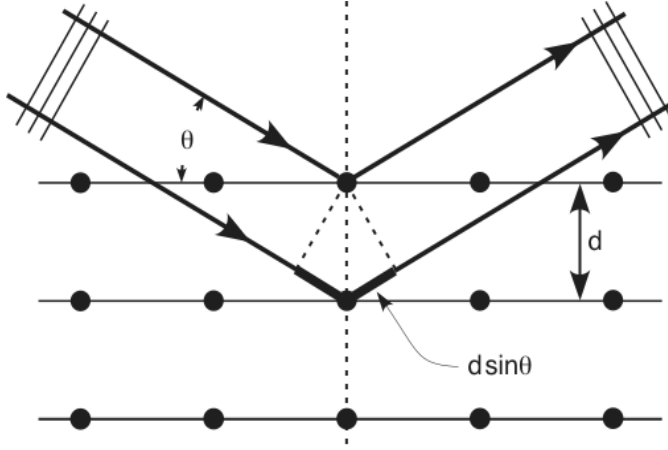
4.5 GaInP ve InGaAs Güneş Pili Yapılarının Tavlanması

Tavlama işlemine başlamadan önce; MBE yöntemiyle 3” GaAs alttaşlar üzerine büyütülen, GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapılarının her birinden, güneş pili oluşturmak üzere beşer adet 1cm x 1cm ’lik parçalar kesildi. Bu parçalardan her yapı için dörder adedi hızlı ısı tavlama (RTA-Rapid Thermal Annealing) sisteminde, azot (N₂) ortamında tavlandı. Birer parçaları ise tavlandı. Tavlama işlemi, arsenik kaybını azaltmak amacıyla iki parça GaAs yarıiletken arasına konularak, 555, 610, 665 ve 720 °C için ayrı ayrı 40 saniye süreyle gerçekleştirildi. Tavlanan ve tavlınmayan güneş pili yapılarının, yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HRXRD) ile yapısal analizleri incelendi [69]. Yapısal analiz sonuçlarına göre seçilen GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapılarının fabrikasyonu yapıldı.

4.6. Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Difraksiyonu (HRXRD)

Kırınım deneyleri kristalleşmiş materyallerin yapısal kalitesini göstermek için kullanılan tekniklerdir [70]. 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.

Alttaş üzerine büyütülen katmanların örgü sabitleri eğer alttaşın örgü sabitinden farklıysa örgü uyumsuzluğu ortaya çıkar. Bu durum Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Eğer ince film örgüyü gevşetmişse, kırınım deseninde alttaş'a göre bir $\Delta\theta$ kayması oluşturur. Eğer a_f ve a_s sırasıyla ince filmin ve alttaşın örgü sabitlerini göstermek üzere;

$$m = \frac{a_f - a_s}{a_s} = \frac{\Delta a}{a_s} \quad (4.2)$$

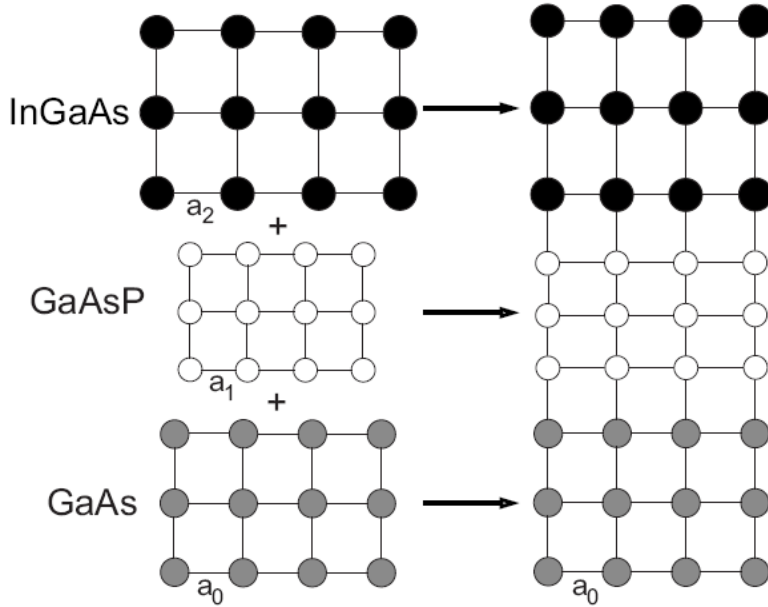
ise

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta a}{a_s} \quad (4.3)$$

Elde edilir. Eğer film gerilmişse, filmin düzlem içi örgü sabiti altına eşitlenir, fakat düzlem dışı örgü sabiti farklı olur. Bu farklılığa misfit denir. Eğer bu farklılık m^* ise

$$m^* = \frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta a_{\parallel}}{a_s} \quad (4.4)$$

olur.



Şekil 4.6. GaAs, GaAsP ve InGaAs arasındaki örgü uyumsuzluğu

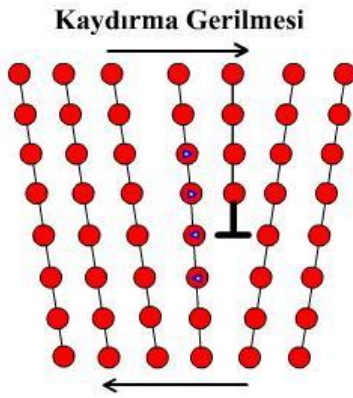
Bazı büyütülen filmlerde altına göre bir eğime sahip olacak şekilde büyümeler olabilir. Bu altına gelen pike göre kırınım deseni meydana gelir. Bu $\Delta\theta$ kaymasının misfit etkisiyle hiçbir ilgisi yoktur. O zaman eğim ile misfit etkilerini nasıl ayırt edebileceğiz? Bunun çözümü oldukça basittir ve o da örneği düzlemi boyunca 180° döndürmektir. Ortalama değer;

$$\Delta\theta = \left(\frac{\Delta\theta_o + \Delta\theta_{180}}{2} \right) \quad (4.5)$$

misfit etkileri nedeniyle olan etkileri ayırmayı sağlar. Eğim açısını bulmak için 90° döndürme ile bir ölçüm alınır. O zaman

$$\begin{aligned}\Delta\theta_o &= \beta \cos \omega \\ \Delta\theta_{90} &= \beta \cos(\omega + 90) = -\beta \sin \omega\end{aligned}\quad (4.6)$$

elde edilir. Burada β doğru eğim açısıdır ve ω eğim açısı sıfır olduğundaki şiddettir. Bu ölçümlerden β elde edilebilir.



Şekil 4.7. Yönelim bozukluğu

Gerginlik oluşmuş ince filmler içinde dislokasyon ve ya kusurlar oluşur. Bunlar genellikle iki bölge içinde oluşurlar; ya film ve alttaş arasındaki ara yüzeyde ya da filmin içinde. Ara yüzey kusurları kırınım ölçümlerinde piklerin pozisyonlarında ölçülebilir bir kayma meydana getirirler. Bu takdirde, arayüzeydeki net gerginlikten kusur yoğunluğunu tahmin etmek mümkün olur. Şekil 4.7'de bu durum gösterilmiştir.

Filmin içinde oluşan kusurlar kırınım deseninde genişlemeye veya yayılmaya yol açarlar. Bu genişleme kusurlar ile kristalleşmiş bölgeler arasındaki boyutlardan kaynaklanır ve kusur yoğunluğunu belirtmek için kullanılabilir.

Büyütülen film küçük bölgeler boyunca uzanmış(mozaik formu) veya filmin tamamı boyunca uzanmış şekilde bir bükülmeye sahip olabilir. Bu bükülmenin veya

eğrilmenin bir sonucu olarak kırınım açıları demetin yarıçapına göre bir $\Delta\theta$ kaymasını oluşturur.

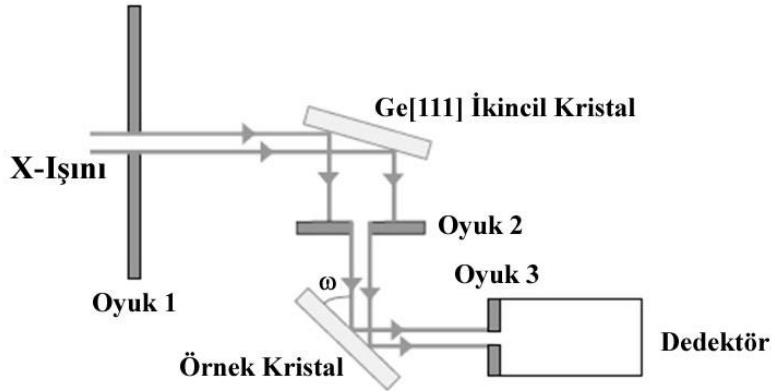
Eğer D demetin çapı ve R bükülmenin veya eğrilmenin yarıçapı ise

$$\Delta\theta = \frac{D}{R} \quad (4.7)$$

olur.

Çift veya paralelinde dört kristal kırınımı kristalleşmiş materyallerin yapısal bilgilerini elde etmek için kullanılan oldukça güçlü bir ölçüm tekniğidir. Bu ölçüm tekniğinin hassaslığı nedeniyle çokluyapılarda oldukça sık kullanılır ki bu yapılarda teknik küçük gerginlik bölgelerini, ince katman oluşturmamış bölgeleri ve çokluyapılardaki kalınlık farklılıklarını algılayabilir.

Bu teknik için tipik bir ölçüm düzeneği Şekil 4.8'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.



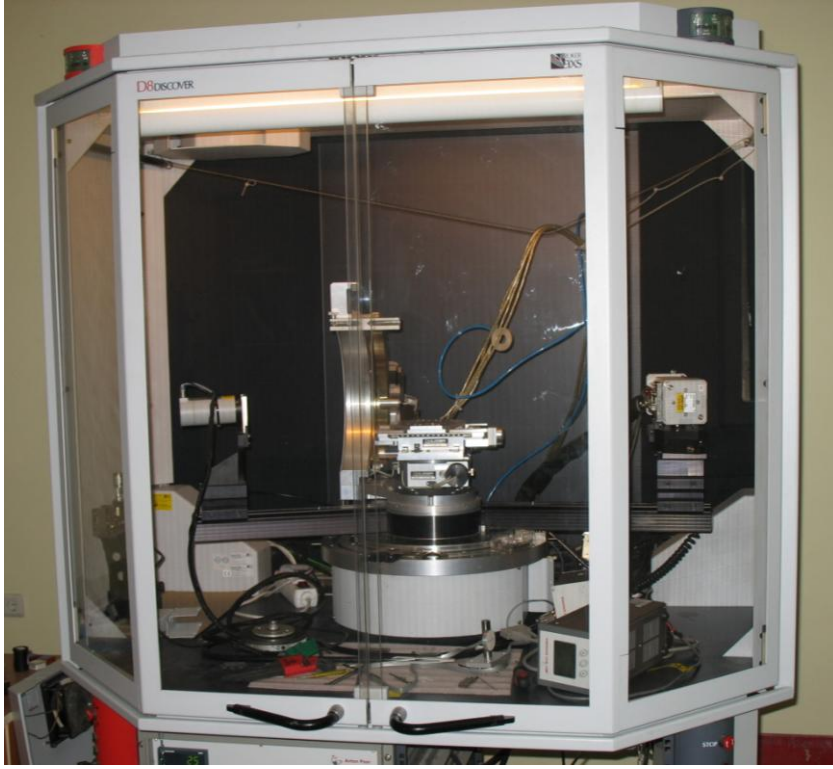
Şekil 4.8. Çift kristal x-ışını kırınım düzeneği [71]

4.6.1. Kullanılan x-ışınları difraktometresinin bazı özellikleri

Bu tez çalışmasında yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınımı deneyinde ölçüm için Bruker D8 Discover XRD cihazı kullanıldı. Bu cihaz Ge(022) yönelimli dört kristal monokromatöre ve x-ışını kaynağı olarak $K\text{PLCu}2\alpha'$ ya sahiptir. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 4.3'de ve cihazın resmi de Resim 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. X-ışınları difraktometresinin teknik özellikleri

Difraktometre çemberi	Bruker axs D8
Jeneratör gerilimi	40 kV
Jeneratör akımı	40 mA
Radyasyon	$\text{CuK}\alpha 1$
Monokromatör tipi	Jhannson
Monokromatör malzemesi	Ge(022)
Odak	Line odak
$\alpha 1$ dalga boyu	1.54 Å



Resim 4.2. Bruker D8 discover cihazının genel görünümü

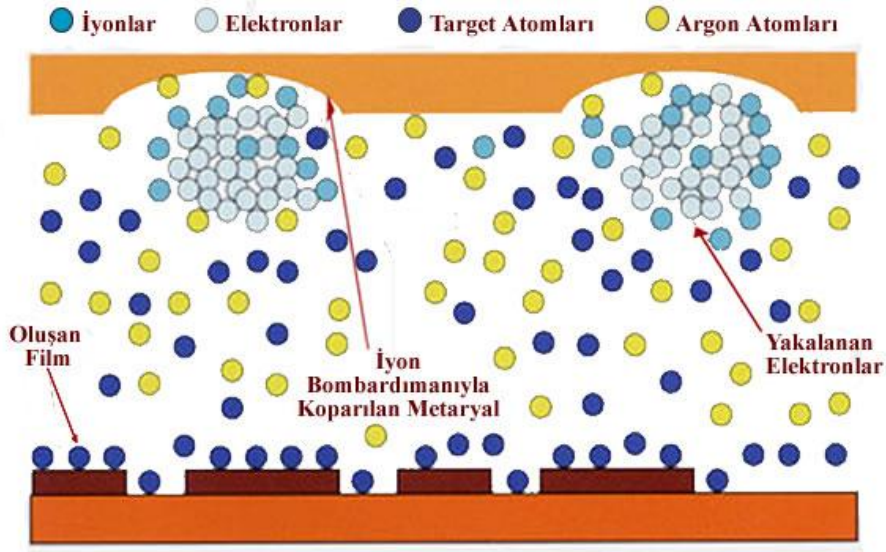
4.7. Güneş Pili Yapılarının Fabrikasyonu

4.7.1. Güneş pili yapılarının temizliği

İyi bir temizleme işlemi, bir yarıiletken kristalde birçok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırabilir. Yapıların yüzeyindeki organik ve diğer kirlilikleri temizlemek için kimyasal temizleme ve durulama işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Güneş pili yapıları standart yarıiletken örnek temizleme teknikleri kullanılarak temizlendi. Önce asetonla bekletilen örneklerin yüzeyi daha sonra ılık aseton içerisinde q-tip yardımıyla mekanik olarak da temizlendi ve hemen izopropil alkol içerisine bırakıldı. İzopropil alkol içerisinden alınıp, azotla kurutulan örnekler oksitleşmenin oluşmaması için ivedilikle püskürtme sistemine yerleştirildi.

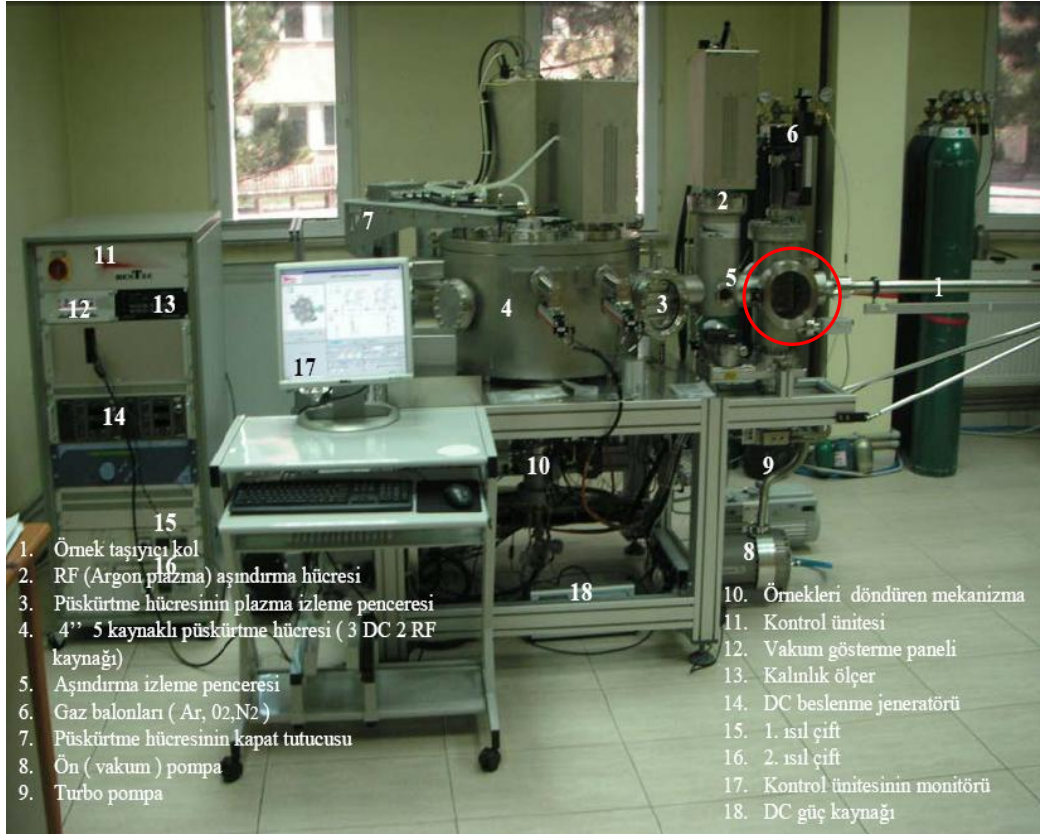
4.7.2. Kopartma (Sputtering) yöntemi

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 4.9'da hedef malzemedan bir molekülün kopması ve alltaş yüzeyine yerleşmesi gösterilmiştir. Burada sarı renkte gösterilen Ar^+ iyonlarından oluşturulan plazma ortamıdır.



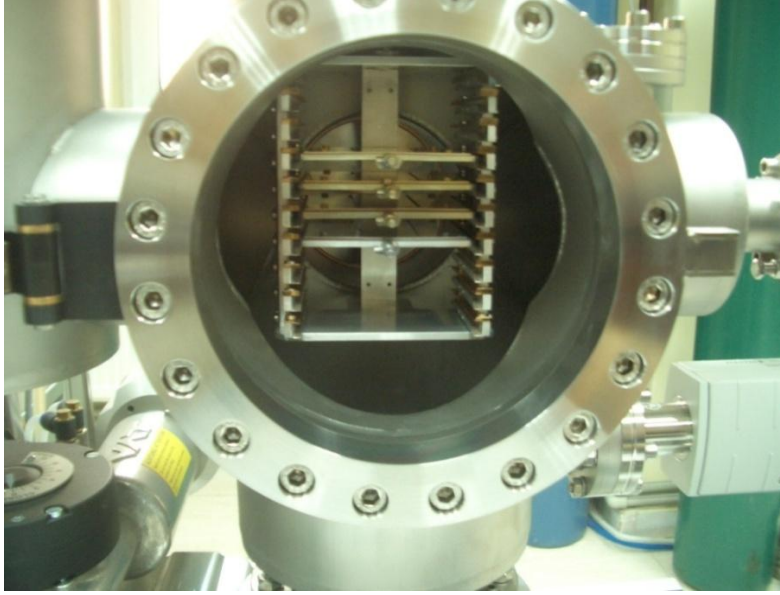
Şekil 4.9. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi

Püskürtme yöntemi çok çeşitli iletken, yarıiletken ve ya yalıtkan malzeme biriktirilmesine imkân tanır. İletken olan malzemeler DC Magnetron Püskürtme, yalıtkan olan malzemeler ise RF Magnetron Püskürtme yöntemiyle biriktirilir. Gazi Üniversitesi Yarıiletken Fiziği İleri Araştırma Laboratuvarı (STARLAB)'nda bulunan Püskürtme (Sputtering) sisteminde; Resim 4.3'de görüldüğü üzere 2 RF kaynağı ve 3 tane DC güç kaynağı vardır.



Resim 4.3. BESTEC Püskürtme sistemi

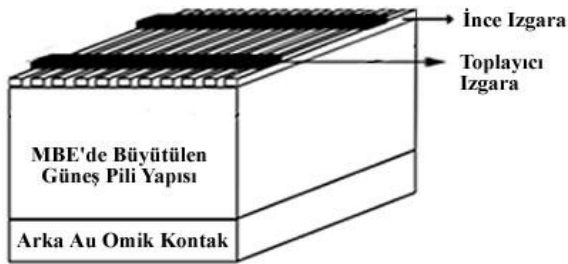
Resim 4.4 'de açıkça görüldüğü gibi yükleme raflarına 10 adet numune yerleştirilebilmekte ve asansör sistemi ve taşıyıcı kol yardımıyla istenilen numune biriktirme odasına taşınabilmektedir. Bu durum yükleme odasının vakumunu bozmadan 10 tane numunenin işlenebilmesine imkân vermektedir.



Resim 4.4. Püskürtme sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları

4.7.3. Güneş pillerinin fabrikasyonu

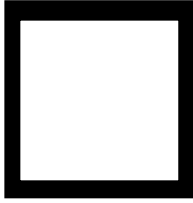
Temizlik işlemi tamamlanan 1cm x 1cm 'lik GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapılarının, güneş pili olabilmeleri için arka ve ön yüzlerine altın (Au) omik kontaklar Gazi Üniversitesi Yarıiletken Fiziği İleri Araştırma Laboratuvarı (STARLAB)'nda bulunan Püskürtme sisteminde alınarak pil fabrikasyonu tamamlandı. Kontaklar, ilerleyen kısımlarda ayrıntılı olarak anlatıldığı üzere; arka yüzde neredeyse tüm yüzeyi kaplayacak şekilde, ön yüzde ise ızgaralar şeklinde alındı(Şekil 4.10). Bu kontaklar için, özel olarak dizayn edilen numune tutucuları ve yine özel olarak dizayn edilmiş maskeler kullanıldı (Şekil 4.11 ve Şekil 4.13).



Şekil 4.10. Güneş pilinin şematik gösterimi

Arka Omik Kontağın Oluşturulması

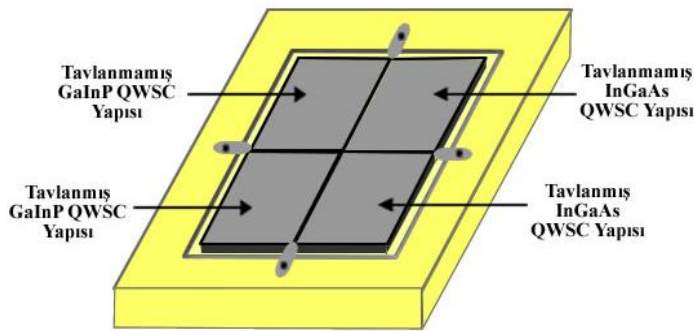
Arka omik kontaklar için Şekil 4.11’de gösterilen $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alana sahip ve $\approx 500 \mu\text{m}$ kalınlıklı özel olarak tasarlanmış paslanmaz çelik maskeler kullanıldı. Maskeler ultrasonik banyoda kimyasal olarak iyice temizlenip durulandıktan sonra azot (N_2) gazı ile kurulandı.



Şekil 4.11. Yapının arka yüzeyine omik kontak oluşturulmasında kullanılan maske

Arka omik kontağın alınmasındaki şartlar ve adımlar sırasıyla şu şekilde açıklanabilir:

- a) Birer adet tavllanmış ve tavlınmamış GaInP ve yine birer adet tavllanmış ve tavlınmamış InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapıları, Şekil 4.12’de görüldüğü üzere numune tutucuya yerleştirildi. Bu işlem, büyütme yapılmış ön yüzey numune tutucuya degecek şekildeyken yapıların arka yüzeyine maske yerleştirilerek gerçekleştirildi.



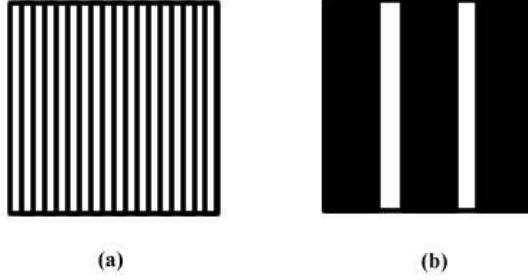
Şekil 4.12. QWSC yapılarının numune tutucuya yerleştirilmesi

- b) Daha sonra hemen püskürtme (sputtering) sisteminin yükleme odana yerleştirilerek, vakum ortamına alındı ve vakum 10^{-6} mbar değerine kadar düşürüldü.
- c) Numune tutucu üzerindeki QWSC yapıları vakum $\approx 10^{-6}$ mbar'a ulaştığında, arka metalizasyon yapılabilmesi için püskürtme odasına transfer edildi.
- d) Püskürtme odasına transfer edilen yapılar, altın (Au) kaynak malzeme (target) altına getirildi.
- e) Püskürtme sisteminin bilgisayar programına argon akış miktarı, plazmanın ne kadar sürede kesileceği, plazma ile yapılar arasındaki kesicilerin ne kadar süreyle açık kalacağı gibi bilgiler girildi.
- f) Kontrol ünitesinde bulunan sıcaklık kontrolörüne 200°C girildi.
- g) Metalizasyon tabakasının kalınlığını ölçmeye yarayan kalınlıkölçer (thickness metre) sıfırlandı.
- h) Daha sonra da sisteme plazma ortamının oluşabilmesi için argon (Ar) verildi.
- i) Plazmanın oluşmasıyla 200°C , $4,0 \times 10^{-3}$ mbar argon (Ar) basıncında altın (Au), tabaka kalınlığı 2000 \AA olacak şekilde kaplandı.
- j) Omik kontakın oluşabilmesi için yapılan metalizasyon, $6,4 \times 10^{-2}$ mbar basınçlı azot (N_2) ortamında, 180°C 'de 10 dakika tavlandı.

Ön Omik Kontakın Oluşturulması

Ön omik kontakın oluşturulması için Şekil 4.13(a) ve Şekil 4.13(b)'de gösterilen $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alana sahip ve $\approx 500 \text{ \mu m}$ kalınlıklı özel olarak tasarlanmış paslanmaz çelik ince

ve toplayıcı ızgara maskeler kullanıldı. Maskeler ultrasonik banyoda kimyasal olarak iyice temizlenip durulandıktan sonra azot (N_2) gazı ile kurulandı.

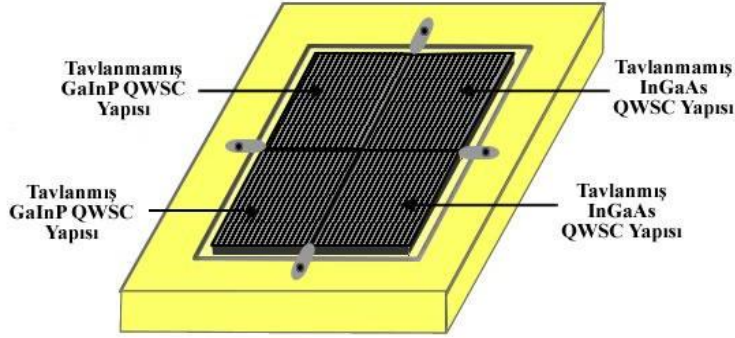


Şekil 4.13. Ön omik kontakların oluşturulmasında kullanılan paslanmaz çelik maskeler: (a) İnce ızgara maske, (b) Toplayıcı ızgara maske

Ön omik kontağın metalizasyonu iki tabakadan meydana getirildi. Bunun için püskürtme (sputtering) sisteminde önce ince ızgara maske kullanılarak, daha sonra toplayıcı ızgara maske kullanarak birer tabaka kaplandı. Omik kontağın oluşturulması için ise metalizasyonu tamamlanan yapılar $4,8 \times 10^{-2}$ mbar basınçlı azot (N_2) ortamında, $180^\circ C$ 'de 10 dakika tavlandı.

İnce ızgara maske kullanılarak yapılan metalizasyonun şartları ve adımları sırasıyla şu şekilde açıklanabilir:

- a) Arka omik kontağı alınan birer adet tavllanmış ve tavlınmamış GaInP ve yine birer adet tavllanmış ve tavlınmamış InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapıları, Şekil 4.14'de görüldüğü üzere numune tutucuya yerleştirildi. Bu işlem, omik kontağı alınmış arka yüzey numune tutucuya degecek şekildeyken yapıların ön yüzeyine ince ızgara maske yerleştirilerek gerçekleştirildi.



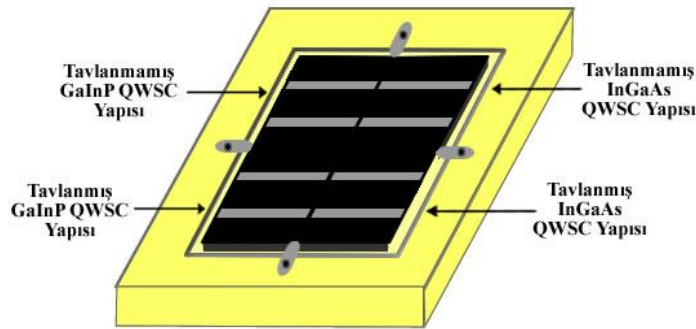
Şekil 4.14. Arka omik kontaktları alınmış QWSC yapılarının numune tutucuya yerleştirilmesi

- b) Daha sonra hemen püskürtme (sputtering) sisteminin yükleme odana yerleştirilerek, vakum ortamına alındı ve vakum 10^{-6} mbar değerine kadar düşürüldü.
- c) Numune tutucu üzerindeki QWSC yapıları vakum $\approx 10^{-6}$ mbar'a ulaştığında, ince ızgara metalizasyonu yapılabilmesi için püskürtme odasına transfer edildi.
- d) Püskürtme odasına transfer edilen yapılar, altın (Au) hedef malzeme (target) altına getirildi.
- e) Püskürtme sisteminin bilgisayar programına argon akış miktarı, plazmanın ne kadar sürede kesileceği, plazma ile yapılar arasındaki kesicilerin ne kadar süreyle açık kalacağı gibi bilgiler girildi.
- f) Kontrol ünitesinde bulunan sıcaklık kontrolörüne 200°C girildi.
- g) Metalizasyon tabakasının kalınlığını ölçmeye yarayan kalınlıkölçer (thickness metre) sıfırlandı.
- h) Daha sonra da sisteme plazma ortamının oluşabilmesi için argon (Ar) verildi.

- i) Plazmanın oluşmasıyla 200 °C, $4,0 \times 10^{-3}$ mbar argon (Ar) basıncında altın (Au), tabaka kalınlığı 2000 Å olacak şekilde kaplandı.

Toplayıcı ızgara maske kullanılarak yapılan metalizasyonun şartları ve adımları sırasıyla şu şekilde açıklanabilir:

- a) İnce ızgara metalizasyonu yapılan birer adet tavllanmış ve tavlınmamış GaInP ve yine birer adet tavllanmış ve tavlınmamış InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapıları, Şekil 4.15’de görüldüğü üzere numune tutucuya yerleştirildi. Bu işlem, omik kontağı alınmış arka yüzey numune tutucuya degecek şekilde yapıların ön yüzeyine toplayıcı ızgara maske yerleştirilerek gerçekleştirildi. (Bu durumdayken yapılara bakıldığında ince ızgara metalizasyonu görülmektedir.)



Şekil 4.15. Arka omik kontaktları alınmış QWSC yapılarının numune tutucuya yerleştirilmesi

- b) Daha sonra hemen püskürtme (sputtering) sisteminin yükleme odana yerleştirilerek, vakum ortamına alındı ve vakum 10^{-6} mbar değerine kadar düşürüldü.
- c) Numune tutucu üzerindeki QWSC yapıları vakum $\approx 10^{-6}$ mbar'a ulaştığında, toplayıcı ızgara metalizasyonu yapılabilmesi için püskürtme odasına transfer edildi.
- d) Püskürtme odasına tranfer edilen yapılar, altın (Au) hedef malzeme (target) altına getirildi.

- e) Püskürtme sisteminin bilgisayar programına argon akış miktarı, plazmanın ne kadar sürede kesileceği, plazma ile yapılar arasındaki kesicilerin ne kadar süreyle açık kalacağı gibi bilgiler girildi.
- f) Kontrol ünitesinde bulunan sıcaklık kontrolörüne 200 °C girildi.
- g) Metalizasyon tabakasının kalınlığını ölçmeye yarayan kalınlıkölçer (thickness metre) sıfırlandı.
- h) Daha sonra da sisteme plazma ortamının oluşabilmesi için argon (Ar) verildi.
- i) Plazmanın oluşmasıyla 200 °C, $4,0 \times 10^{-3}$ mbar argon (Ar) basıncında altın (Au), tabaka kalınlığı 2000 Å olacak şekilde kaplandı.

4.8. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri

Bir güneş pili için önemli parametrelerden biri olan verimlilik hesabı için akım-gerilim (I-V) ölçümlerinin alınması gerekir. Bu tez çalışması kapsamında, fabrikasyonu tamamlanmış, GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerinin karanlıkta ve aydınlatma altındaki akım-gerilim (I-V) karakteristiklerine bakıldı.

Akım-gerilim (I-V) ölçümleri, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken İleri Araştırmalar Laboratuvarı (STARLAB)'nda bulunan ve Resim 4.5'de görülen akım-gerilim (I-V) ölçüm sisteminde alındı. Bu sistemde, Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı, Janis VPF-475 kriyostat ve Keithley 614 elektrometre bulunmaktadır. Tüm bu ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.5. Akım-gerilim (I-V) ölçüm düzeneği

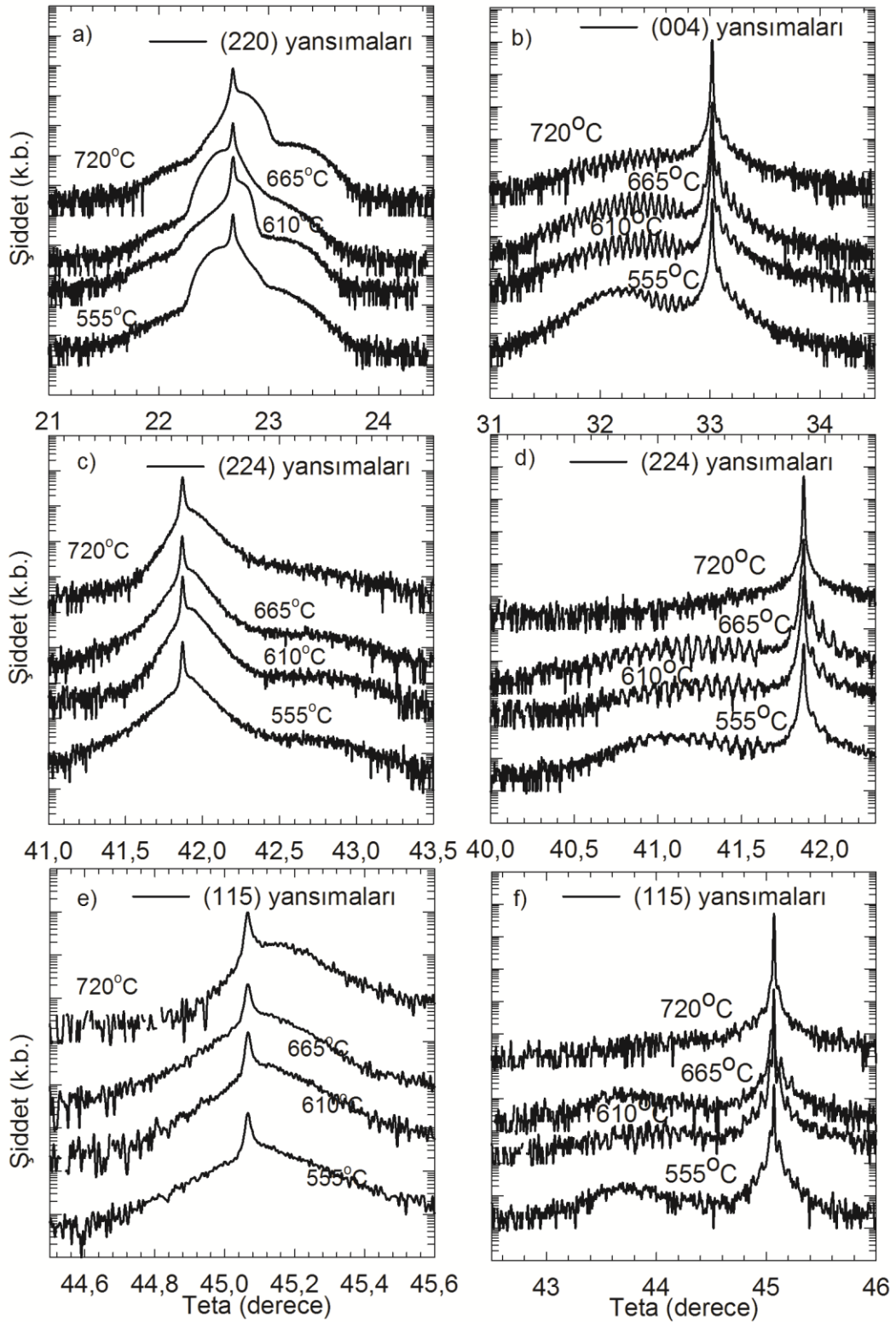
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

MBE yöntemi ile büyütülen GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerinin (QWSC) omik kontaktları alınmadan önce yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı (HRXRD) analizleri, fabrikasyonu tamamlandıktan sonra akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı. Güneş pilleri için oldukça önemli bir parametre olan verimlilik akım-gerilim (I-V) ölçümleri sonucu elde edilen verilerden hesaplandı ve tartışıldı.

5.1. Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Kırınımı

5.1.1. GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerine (QWSC) tavlamanın etkileri

GaAs alttaş üzerine MBE yöntemi ile büyütülen InGaAs ve InGaP kuantum kuyulu güneş pillerinin (QWSC) yapısal özellikleri HRXRD yöntemi ile belirlendi. Bütün simetrik ve simetrik olmayan taramalar z-yükseklik ayarı, eğim açısı optimizasyonundan sonra $\omega/2\theta$ taramalarıyla kaydedildi. $\omega/2\theta$ piklerinin boyut ve konumlarından; nokta kusurları, dislokasyonlar ve etkileşimleri gibi kristal kusurları, örgü uyumsuzluğundaki gerilim gevşemesinin sebep olduğu örgü parametrelerinin değişimi hakkında bilgi elde edildi [69].



Şekil 5.1. GaInP/GaAs (ilk sütun) ve InGaAs/GaAs (ikinci sütun) QWSC'lerin çeşitli yansımalarındaki $\omega/2\theta$ taraması

Şekil 5.1'in ilk iki sütunda, her taramada GaInP ve InGaAs tabakalar için iki pik ve/veya onların karışımı gözlemlendi. Yüksek şiddetli pikler GaAs alttaştan, diğer pikler ise GaInP ve InGaAs tabakalarından gelmektedir. Bütün taramalar yapıdaki bozuklukları belirlemek, küçük değişiklikleri gözlemek amacıyla yapıldı. GaInP yapısı için (220) düzleminin $\omega/2\theta$ taramalarında, artan sıcaklıkla sola ve sağa kayan GaAs pikinden sonra, GaInP en yüksek şiddetlerde pik verdi. Bu durum (220) düzleminin ileri veya geri hareketi sonucunda örgü parametrelerinin artışı veya azalışının bir sonucudur. (224) düzlemindeki $\omega/2\theta$ taramalarında, artan sıcaklıkla GaInP piklerinin şiddetinin, GaAs pikinin şiddetine yaklaştığı görüldü. (115) düzlemindeki $\omega/2\theta$ taramalarında ise, GaInP kübik yapısının kristal özelliği yüksek sıcaklıklarda değiştiği ve onların FWHM değerlerinin, tavlama sıcaklığının artmasıyla beraber azaldığı görüldü.

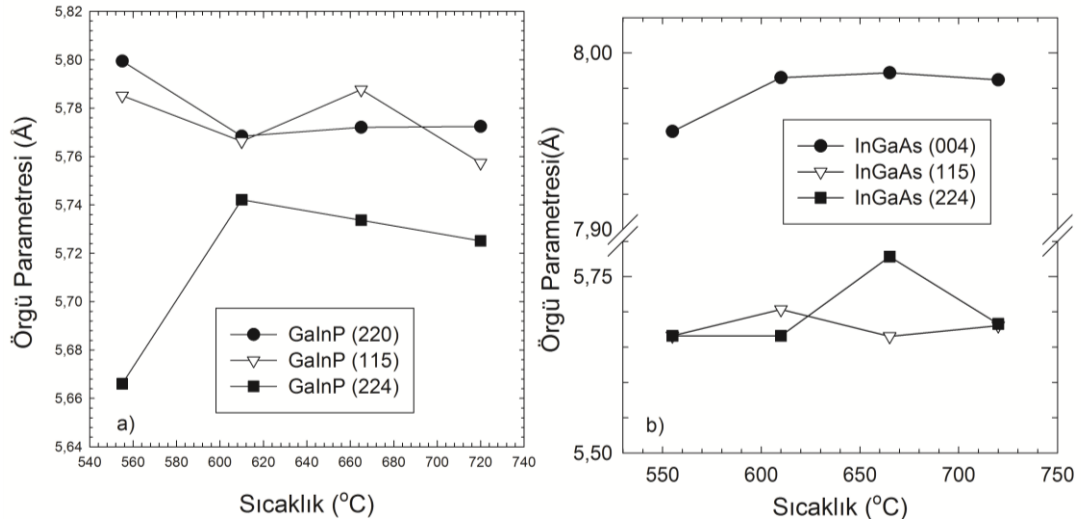
Şekil 5.1'in ikinci sütunundaki InGaAs yapısı için, bütün $\omega/2\theta$ taramalarındaki ikinci en yüksek InGaAs piki artan sıcaklıkla genişlemiştir. Gerilim etkisinden oldukça etkilenen pik konumu kaydıığında, uydu genlikleri ilk olarak artmış, daha sonra yüksek sıcaklıklarda azalmış veya kaybolmuştur. Bu duruma bağlı olarak numunenin kristal doğası bozulmuştur [72]. Bu durumda yüzey ve arayüzeydeki pürüzlülük artmış, kümelerin termal enerjisinin artmasıyla birlikte, kristal yüzeyindeki kusurlar oluşmuştur. Tanecik boyutları, yansıyan piklerin FWHM değerlerinin artışına uygun olarak küçülmektedir. Artan sıcaklıkla, simetrik olmayan düzlemler bozulur ve mozaik kusurlara yol açar. Bu numunemizdeki interdifüzyon için yaygın bir HRXRD sonucudur [73]. Aynı zamanda uydu piklerinin şiddetlerinin ilk azalışı interdifüzyon sonucunda arayüzeydeki keskinliğin kaybına atfedilir [74]. GaInP ve InGaAs yapıları için tabaka düzlemine dik (a_{\perp}) ve paralel (a_{\parallel}) olan örgü parametreleri yansıma pozisyonları dikkate alınarak Bragg yasasından hesaplandı [75, 76].

$$2 \sin \theta_B \cos \varphi = \frac{l\lambda}{a_{\perp}} \quad (5.1)$$

ve

$$2 \sin \theta_B \sin \phi = \frac{\sqrt{h^2 + k^2} \lambda}{a_{11}} \quad (5.2)$$

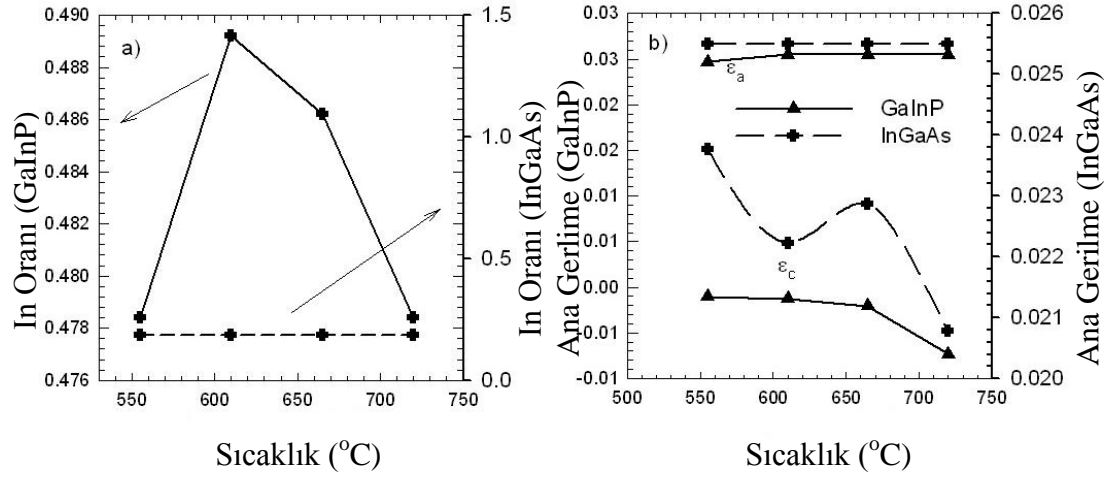
Burada; θ_B Bragg açısı, ϕ kırılma düzlemi ve numune yüzeyi arasındaki açı, λ da X ışınlarının dalga boyudur.



Şekil 5.2. (a) GaInP and (b) InGaAs QWSC yapılarında (004), (115) ve (224) yansımaları için hesaplanan örgü sabitleri

Dört farklı azimuth (genlik) konumu için temel örgü parametreleri tavlama sıcaklıklarındaki yansıma konumundan hesaplandı ve kusur analizinde kullanıldı. GaInP ve InGaAs tabakalarındaki farklı düzlemlerde hesaplanan örgü parametreleri için grafikler Şekil 5.2 (a) ve (b) de görülmektedir. Simetrik olmayan düzlemlerdeki örgü parametreleri simetrik düzlemlerden daha fazla değişmektedir. InGaAs güneş pili yapısındaki değişim $\omega/2\theta$ taramalarındaki uydu pikiyle tanımlanan kuantum kuyulu yapıya sahip olduğu için tavlamayla beraber hızlı bir şekilde meydana gelir.

İndiyum kompozisyon oranı (x) genellikle Vegard yasasından hesaplanır. Kompozisyon oranı (x) için bulunan değerler Şekil 5.3'de tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak çizilmiştir.



Şekil 5.3. GaInP ve InGaAs yapıları için a) In oranı ve b) ortalama paralel ve dik gerilmeler

$\omega/2\theta$ taramaları kullanılarak elde edilen veriler, düzlemin dışında (ε_{\perp}) ve içindeki gerilmeler (ε_{\parallel}) için elde edildi. Dik (düzlemin dışındaki) (ε_{\perp}) ve paralel (düzlemin içindeki) (ε_{\parallel}) gerilmeler alttaş esas alınarak tanımlandı.

$$\varepsilon_c = \frac{(a_c - a_{sub})}{a_{sub}} \quad (5.3)$$

ve

$$\varepsilon_a = \frac{(a_a - a_{sub})}{a_{sub}} \quad (5.4)$$

ε_c ve ε_a gerilmeleri Şekil 5.3 (b)'de tanımlandı. Düzlem içindeki gerilmeler yüksek değerlere sahip olup, yapıdaki kusurları gösterir. Düzlemin dışındaki gerilmeler yüksek sıcaklıklarda dalgalanma gösterir.

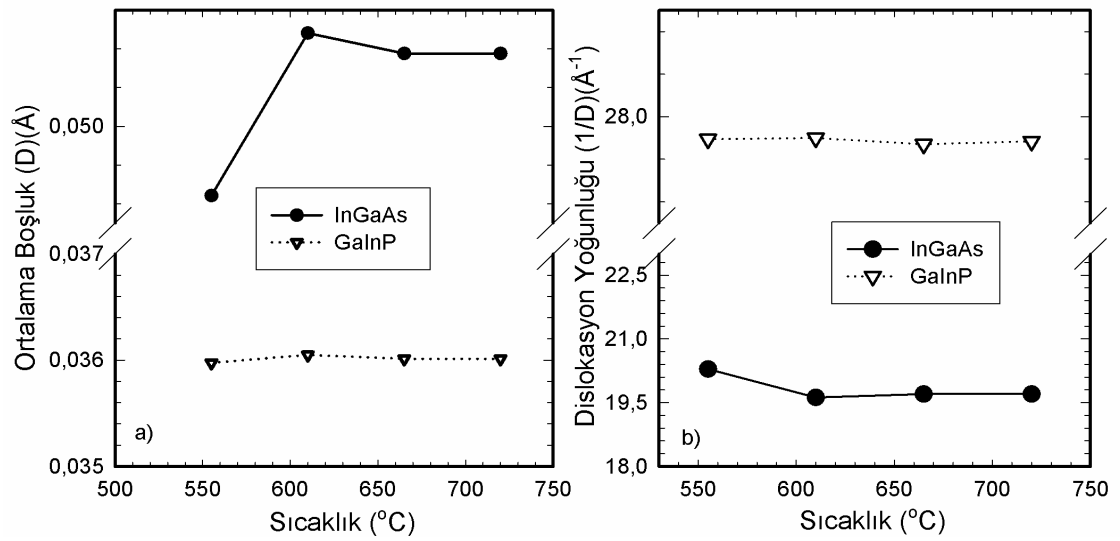
GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapıları için eğim açıları düzlemler boyunca hesaplandı ve beklenen sonuçlar olan $0,1^\circ$ 'den daha az bulundu [77, 78]. Simetrik olmayan düzlemler gerilimden çok fazla etkilendikleri için, bu düzlemlerin eğim değerleri en düşük değerlerdir ve simetrik düzlemlere kıyasla daha

fazla değişmektedir. InGaAs yapısının düzlem eğimleri artan sıcaklıkla birlikte GaInP yapısından daha fazla etkilenirler.

60° 'lik uyumsuzluk dislokasyonun ortalama alanı D ;

$$D = \frac{a_s}{\sqrt{2\varepsilon_{it}}} \quad (5.5)$$

kullanılarak hesaplandı. Her iki numune için 60° 'lik uyumsuzluk dislokasyonun ortalama alanı (D) hesaplandı ve değerleri Şekil 5.4 (a) ve (b)'de verildi. Bu değerlerin örgüdeki iki atom arası uzaklıkla kıyaslandığında çok büyük olduğu anlaşılır.



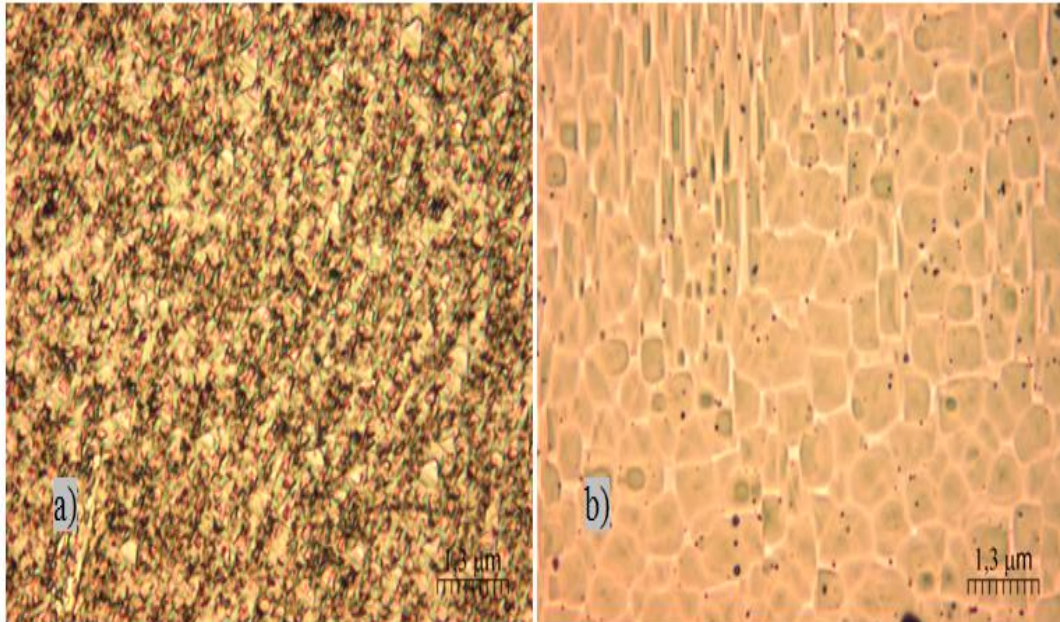
Şekil 5.4. (a) Uyumsuzluk dislokasyonları arası ortalama uzaklık ve (b) GaInP ve InGaAs yapılarının (004), (115) ve (224) yansımaları için farklı sıcaklıklardaki kusur yoğunluğu.

Aynı zamanda bunun tersi olan dislokasyon yoğunluğu (ρ);

$$\rho = \frac{1}{D} \quad (5.6)$$

olarak verilir. Her iki yapı için hesaplanan dislokasyon yoğunlukları Şekil 5.4 (b) 'de verilmiştir. Bu büyük değerler çapraz taramaları, morfolojik kusur yapısını harekete geçirir [79]. Şekil 5.4 (b)'de GaInP tabakalarındaki dislokasyon yoğunluğunun InGaAs tabakaninkinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum GaInP ve GaAs yapısındaki örgü uyumsuzluğundan kaynaklanır.

Termal tavlama, örgü gevşemesi ve kusur yoğunluğunun azaltılmasında etkilidir. Termal enerji etkisinden dislokasyon hareketinin artışı beklenir. GaAs alttaş üzerindeki örgü uyumsuzluğuna sahip GaInP ve InGaAs tabakalarındaki kusur hareketinin, Si alttaş üzerindeki GaAs tabakalarındaki dislokasyon hareketiyle benzer olduğunu varsayılır [80]. Şekil 5.5 (a) ve (b)'de 720 °C tavlama sıcaklığından sonra GaInP ve InGaAs yapılarının her ikisi içinde optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.5 (a)'da, bu tavlama sıcaklığında GaInP QWSC yapısının yüzeyinin oldukça pürüzlü olduğu gözlenmiştir. InGaAs QWSC yapısında ise, kusurlar mozaik desen olarak oluşmuştur.



Şekil 5.5. (a) GaInP ve (b) InGaAs QWSC yapılarının optik mikroskoptaki yüzey görüntüleri

5.2. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri

5.2.1. Metal-Yarıiletken (MS) kontaklar

Metal malzeme ile yarıiletken malzeme kontak edildiğinde, metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri arasındaki farkın dengelenebilmesi için bantlarda bir miktar bükülme, yani yük taşıyıcı geçişi (difüzyon) meydana gelir [81]. Gerçekte, Fermi enerjileri arasındaki bu fark malzemelerden birindeki elektronların daha yüksek enerjiye sahip oldukları anlamına gelmektedir. Elektronların metal-yarıiletken eklem boyunca akışı, p-n eklemlerde meydana gelen yük transferine benzerdir. Bu tipteki eklemler, *metal kontak* olarak adlandırılırlar [82].

Metal ve yarıiletken malzemelerin Fermi seviyelerinin aynı hizada olmasından ve tüketim bölgesinin ortaya çıkmasından dolayı bantlarda bükülme meydana gelir ve bu bükülme potansiyel engeli V_i ile ilişkilidir. Schottky-Mott modeline göre potansiyel engel (kontak potansiyeli), iki malzemenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşmaktadır [83] ve şu şekilde verilir:

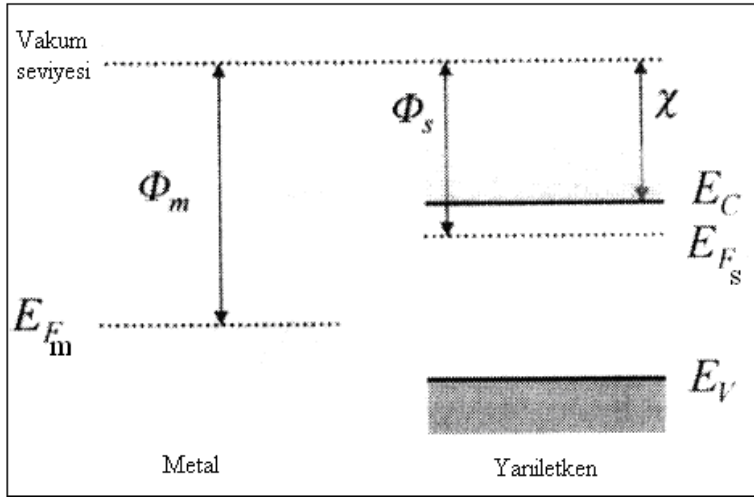
$$qV_i = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (5.7)$$

Burada qV_i yarıiletkenden metale akan elektronların sahip olması gereken enerji yani elektronların geçmesi gereken engel yüksekliğidir. İş fonksiyonu bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerjidir. Yada daha basit bir tanımla, vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Metal için iş fonksiyonu $q\Phi_m$ (eV) ile verilir ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna,

$$q\Phi_s = q(\chi_s + \Phi_n) \quad (5.8)$$

eşittir [12]. $q\chi_s$ terimi elektron ilgisidir ve iletkenlik bandının tabanındaki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanır. Vakum seviyesi ise, metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir

elektronun enerji seviyesi ya da başka bir söyleyişle katının dışında durgun olan bir elektronun enerjisini temsil eden uzay seviyesidir ve referans seviyesi olarak kabul edilir. $q\Phi_n$ ise iletkenlik bandı kenarı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Şekil 5.6’de metal ve yarıiletken malzemeler kontak edilmeden önceki enerji-bant diyagramları gösterilmiştir.



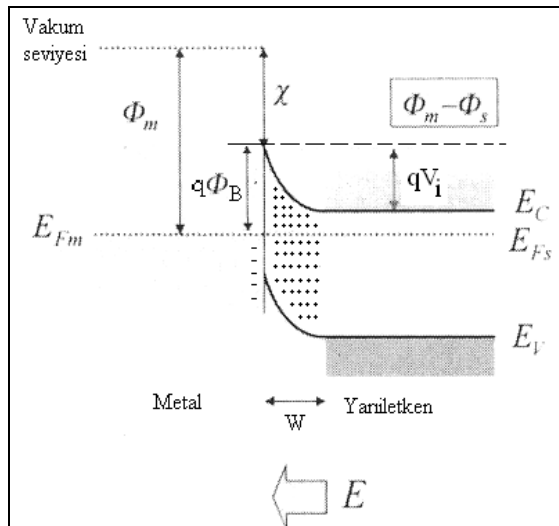
Şekil 5.6 Metal ve yarıiletken malzemeler kontak yapılmadan önce, metal ve yarıiletken için Fermi enerjileri ve iş fonksiyonları. Her iki malzeme içinde vakum seviyesi aynıdır, fakat Fermi seviyeleri farklıdır.

Metal/yarıiletken (MS) kontak yapıldığında, malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontaklar doğrultucu kontak veya ohmik kontak olmak üzere ikiye ayrılır. Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s 'de yarıiletkenin iş fonksiyonu olarak düşünülürse, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\Phi_s < \Phi_m$ olması halinde doğrultucu kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ olması halinde de ohmik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için ise $\Phi_s < \Phi_m$ olması halinde ohmik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ olması halinde de doğrultucu kontak oluşur. Çizelge 5.1’de metal ve yarıiletken malzemeler kontak edildiklerinde, bu malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontakların yapısı özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 Metal-yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontaktarın yapısı.

	Yarıiletken	Eklemler
$\Phi_m > \Phi_s$	n-tipi	Schottky (Doğrultucu)
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Schottky (Doğrultucu)
$\Phi_m > \Phi_s$	p-tipi	Ohmik
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Ohmik

Metal/n-tipi yarıiletken kontak yapıldığını varsayalım. Eğer $\Phi_m > \Phi_s$ durumu söz konusu ise yani iletkenlik bandındaki elektronlar metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahiplerse, elektron akışı, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesine eşit olana kadar devam eder. Metale geçen elektronlar yarıiletkende pozitif yüklü donör safsızlık atomları bırakırlar ve böylece yarıiletkenin arayüzeye yakın bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu (hareketli yükler) azalır. İletkenlik bant kenarı E_c ile Fermi seviyesi E_{Fs} arasındaki fark, azalan elektron konsantrasyonu ile arttığı ve termal dengede E_{Fs} tamamen serbest kaldığı için iletkenlik ve valans bant kenarları yukarıya doğru bükülür (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Metal/n-tipi yarıiletken kontak için termal denge enerji –bant diyagramı

Yarıiletkenin iletkenlik bandından metale geçen elektronlar nedeniyle, yarıiletkende metale yakın arayüzeyde elektronlardan arınmış pozitif yüklü uzay yükü bölgesi meydana gelir. Bu tüketim bölgesinin (arınmış bölge) genişliği W 'dır [84]. Tükenmiş yüklerin büyüklüğüne eşit miktardaki elektron yükü metal-yarıiletken arayüzeyinde metal tarafında görülür. Bu yük çok ince bir tabakada yer alır. Bu şekildeki bir dağılım “yük tabakası” olarak adlandırılır.

Engel genişliği yani tüketim tabakası genişliği azaldıkça, metal yüzeyindeki negatif yükte artar. Eşit miktarda pozitif yükte yarıiletken yüzeyinde yer almalıdır. Düşük taşıyıcı yoğunluğu nedeniyle, bu pozitif yük yarıiletken yüzeyi kenarında tüm engel bölgesine yayılır. Eğer bu engel genişliği, atomlar arası uzaklık mertebesinde ise, engel elektronlar için şeffaf olur [12]. Böylece engel yüksekliği için limit koşul elde edilir:

$$q\Phi_{Bn} = q(\Phi_m - \chi_s) \quad (5.8)$$

Kısaca engel yüksekliği, yarıiletkenin iş fonksiyonu ile elektron ilgisi arasındaki farktır. n-tipi yarıiletken ve p-tipi yarıiletken malzeme ile metal malzeme kontak edildiğinde, kısaca engel yüksekliği sırasıyla şu şekilde verilir:

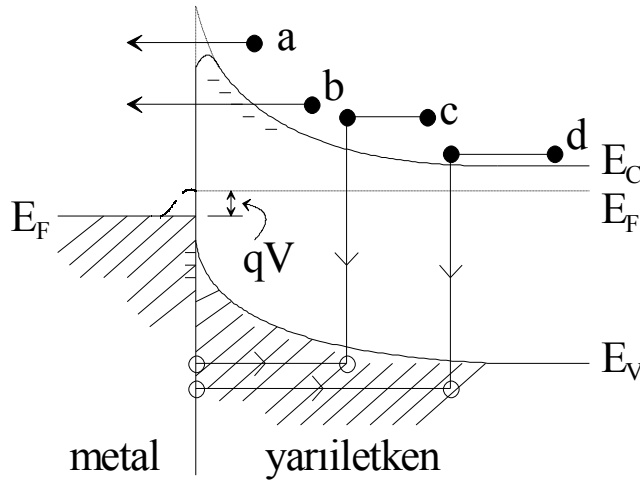
$$q\Phi_{Bn} = q(\Phi_m - \chi_s) \quad (5.9)$$

$$q\Phi_{Bp} = E_g - q(\Phi_m - \chi_s) \quad (5.10)$$

Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletimi, azınlık taşıyıcıların iletimi sağladığı p-n eklemlerin aksine, çoğunluk taşıyıcılar ile sağlanır [12]. Doğru beslem altında MS kontaklarda kullanılan temel akım-iletim mekanizmaları (Şekil 5.8) şunlardır [12, 81, 83]:

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi

- Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme (Alan Emisyonu (AE))
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Yüksüz bölgede rekombinasyon
- Deşik enjeksiyonu



Şekil 5.8. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizması: (a) potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) Elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c) Uzay yük bölgesinde birleşme, (d) Doğal bölgede deşik enjeksiyonu

Ohmik Kontak :

Ohmik kontak, yarıiletkenin bulk direncine göre ya da yarıiletkenin dağılık direncine göre ihmal edilebilir derecede küçük dirence sahip olan kontak. Yarıiletkenlerde ohmik kontak kullanılmasının asıl amacı, elektrik akımının her iki yönde (yarıiletkene doğru ya da dışarıya doğru) akmasına izin vermektir. Kontak şu özelliklere sahip olmalıdır [16]:

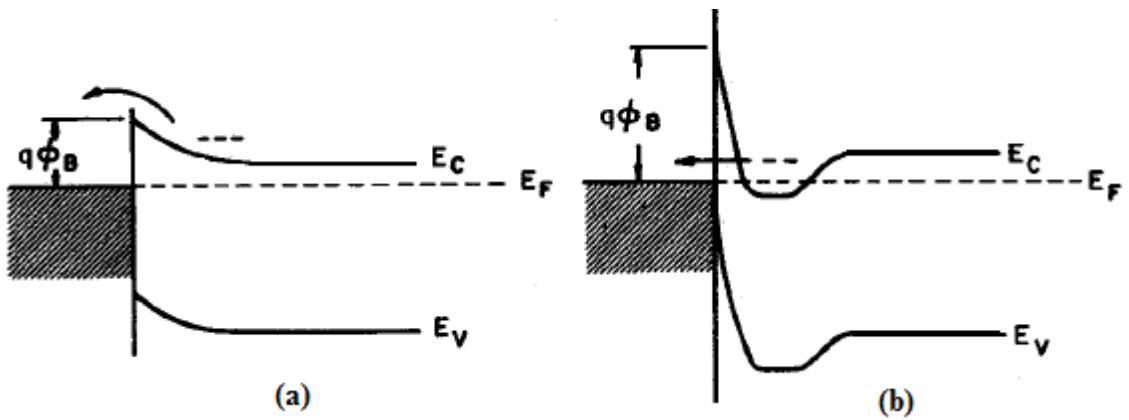
- Lineer akım-gerilim karakteristiği,
- Zaman ve sıcaklık kararlılığı,
- Mümkün olduğunca küçük direnç

Kontak direncini karakterize eden en önemli parametre spesifik kontak direncidir ve r_c ile sembolize edilir. r_c , kontakta dik olarak akan akım için birim alan başına kontak direncidir (R_c). Birimi $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir ve kısaca şu şekilde verilir:

$$r_c = R_c A \quad (5.11)$$

Günümüzde oldukça geniş uygulama alanları olan optik ve elektronik aygıtların üretiminde ohmik kontaktların önemi oldukça fazladır. Üretilen aygıtın yüksek güçte ve frekanslarda çalışması, yaşam süresi gibi aygıt parametrelerini etkileyen en önemli parametrelerden biride kontak özellikleri yani diğer bir deyişle spesifik kontak direncidir. Günümüzde, üretilen cihazlarda spesifik kontak direncinin $1 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ değerinden daha düşük olması amaçlanmaktadır [85].

MS kontaktlarda katkı konsantrasyonu düşük ise baskın olan akım-iletim mekanizması Termiyonik Emisyon (TE) (Şekil 5.9a), yüksek ise Termiyonik Alan Emisyonu (TAE), kuantum mekaniksel tünellemedir (Şekil 5.9b). Termiyonik emisyon, doğrultucu kontaktlarda, termiyonik alan emisyonu ise ohmik kontaktlarda baskın olan bir mekanizmadır. Şekil 5.9'te düşük spesifik kontak direnci (r_c) elde edilmesi için gerekli olan düşük engel yüksekliği ve yüksek katkı yoğunluğu durumları için enerji band diagramı verilmektedir.



Şekil 5.9. Ohmik kontaktlar için: (a) Düşük engel yüksekliği ve (b) Yüksek katkı yoğunluğu

Ohmik kontaklarda Termiyonik Alan Emisyonu mekanizmasının baskın olabilmesi için yarıiletken yüksek katkılı olmalıdır, diğer bir deyişle yarıiletkendeki katkı konsantrasyonu artırılmalıdır. Yarıiletkendeki katkı miktarı arttıkça, engel yüksekliği azalır ve tünelleme meydana gelmeye başlar [12, 85]. Tünelleme mekanizması için akım yoğunluğu şu şekilde verilir [12, 85, 86]:

$$J \approx \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{E_{oo}}\right) \quad (5.12)$$

$$E_{oo} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N}{\epsilon m^*}} \quad (5.13)$$

Burada E_{oo} tünelleme enerjisi, N katkı konsantrasyonu, m^* etkin elektron kütlesi ve ϵ ise yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

Termiyonik emisyon (düşük katkı yoğunluğu) ve termiyonik alan emisyonu (yüksek katkı yoğunluğu) için formüller kontak direncini içerecek şekilde düzenlenirse, sırasıyla şu şekilde verilir:

Düşük katkı yoğunluğu:

$$R_c \approx \frac{k}{qA^*T} \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (5.13)$$

Yüksek katkı yoğunluğu:

$$R_c \approx \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{E_{oo}}\right) = \exp\left[\frac{2\sqrt{\epsilon m^*}}{\hbar} \left(\frac{\Phi_{Bn}}{\sqrt{N}}\right)\right] \quad (5.14)$$

Eş. 5.14'den de görüldüğü üzere, kontak direnci R_c , katkı konsantrasyonunun kareköküyle doğru orantılı olarak azalmaktadır.

O halde, ohmik kontak elde etmek için yapılması gereken yarıiletken yüzeyinin yüksek yoğunlukta katkılanmasıdır. Bu amaca ulaşabilmek için, yarıiletken yüzey metal ile kaplanır ve ısı tavlama yöntemi sayesinde taşıyıcıların difüzyonu (yarıiletkenin metal ile kontak edildiği yüzeyde, yarıiletkene doğru alarım oluşumu) gerçekleştirilir. Taşıyıcı difüzyonu sayesinde yarıiletken yüzeyinin yüksek yoğunlukta katkılanmasını sağlar.

5.2.2. Güneş pili parametreleri

Bir güneş pilini anlatmak için genellikle dört parametre kullanılmaktadır.

a) Kısa Devre Akımı (I_{sc}) :

İdeal olarak kısa devre akımının maksimum akıma eşit olması beklenir. ($I_{sc}=I_{max}$)

b) Açık Devre Gerilimi (V_{oc}):

$$I = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1 \right) - I_L \quad (5.7)$$

Eş. 5.7'de $I=0$ alınarak, V_{oc} 'nin ideal değeri;

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (5.8)$$

olur. V_{oc} , I_0 'a bağlı olduğundan, yarıiletkenin özelliklerince belirlenir.

c) Dolum Çarpanı (FF) :

Bu parametre;

$$FF = \frac{V_{\max} \cdot I_{\max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (5.9)$$

olarak tanımlanır [87]. V_m , I_m sırasıyla maksimum güç çıkışına karşılık gelen gerilim ve akım değerleridir.

$$V_{oc} = V_{oc} / (kT / q) \quad (5.10)$$

d) *Enerji Dönüşüm Verimi (η):*

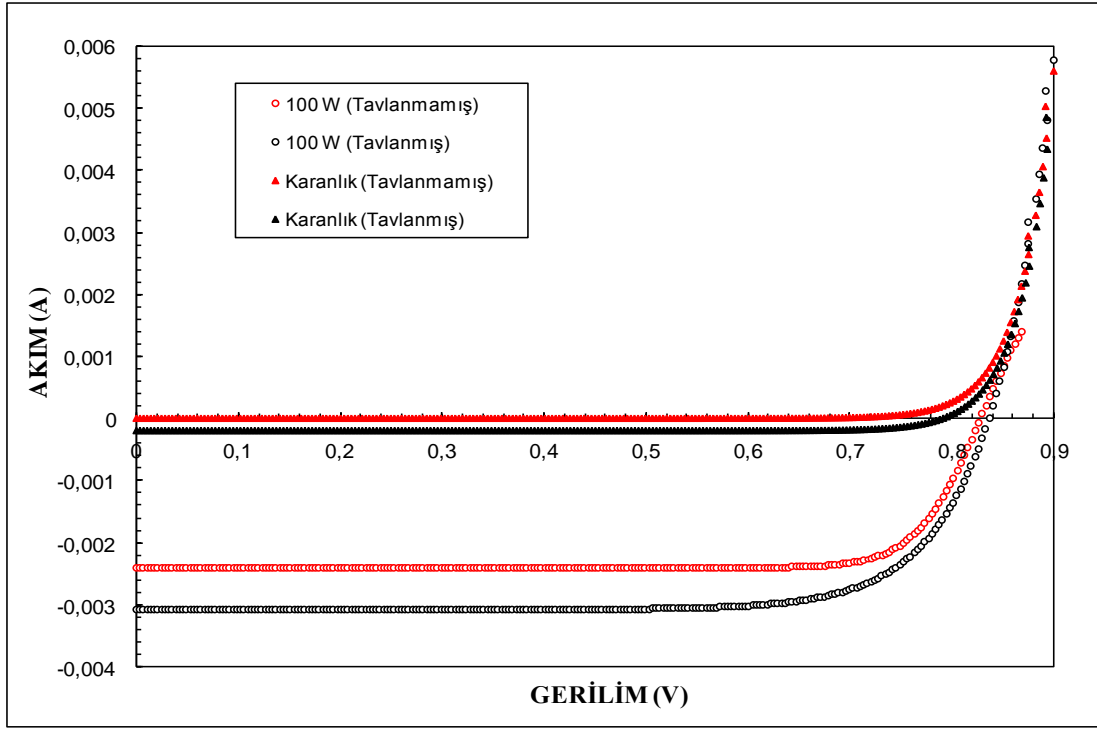
Bir güneş pilinin enerji dönüşüm verimi(η) Eş.5.9 da göz önüne alınarak;

$$\eta = FF \frac{V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{P_{in}} \times 100 \quad (5.11)$$

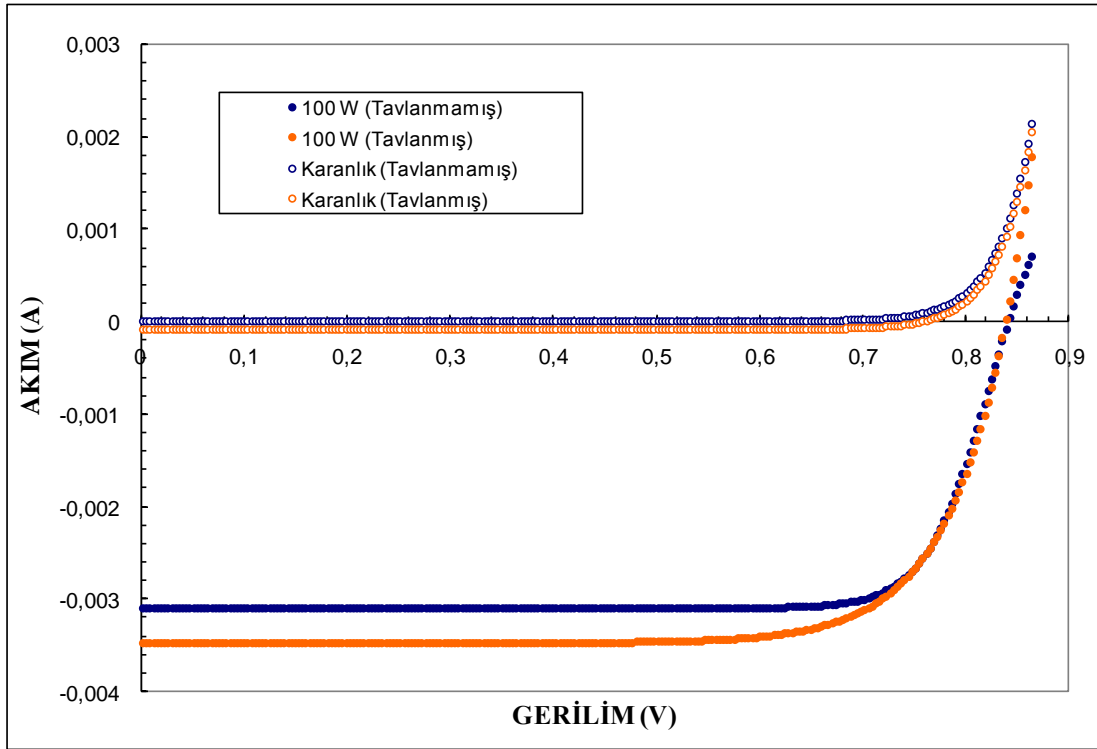
olur [88]. Burada P_{in} güneş pili üzerine gelen toplam güneş enerjisi gücüdür.

5.2.3. GaInP ve InGaAs güneş pili parametrelerinin bulunması

Bir güneş pili için önemli parametrelerden biri olan verimlilik hesabı için akım-gerilim (I-V) ölçümlerinin alınması gerekir. Bu çalışma kapsamında, fabrikasyonu tamamlanmış, tavlanmamış ve 720°C'de tavlanmış birer adet GaInP ve InGaAs olmak üzere dört adet kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) incelendi. Bu pillere ileri beslem karanlık ve AM1.5G standart ışık şiddeti altındaki akım-gerilim (I-V) karakteristiklerini incelemek için gerekli olan gümüş kontaklar yapıldı. Ardından bu pillerin akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı ve grafikleri çizildi (Şekil 5.10 ve Şekil 5.11).



Şekil 5.10. GaInP kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) akım-gerilim (I-V) grafiği



Şekil 5.11. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) akım-gerilim (I-V) grafiği

Çizilen grafiklerdeki verilerden güneş pillerinin elektriksel analizinde önemli parametrelerin (*kısa devre akımı* (I_{sc}), *açık devre gerilimi* (V_{oc}), *maksimum akımı* (I_{max}), *maksimum gerilimi* (V_{max}), *dolum çarpanı* (FF), *enerji dönüşüm verimi* (η)) hesabı yapıldı.

Güneş pillerinin FF ve η değerleri sırasıyla, Eş. 5.9 ve Eş. 5.11 yardımıyla hesaplandı.

GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerinin (QWSC) *kısa devre akımı* (I_{sc}), *açık devre gerilimi* (V_{oc}), *maksimum akımı* (I_{max}), *maksimum gerilimi* (V_{max}), *dolum çarpanı* (FF), *enerji dönüşüm verimi* (η) sırasıyla; Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verildi.

Çizelge 5.2. GaInP kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) için bazı parametreler

GaInP Güneş Pili	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{max} (A)	V_{max} (V)	FF	η
Tavlanmamış	2,41	0,82	2,31	0,71	0,83	0,14
Tavlanmış	3,07	0,83	2,82	0,68	0,75	0,16

Çizelge 5.3. InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) için bazı parametreler

InGaAs Güneş Pili	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{max} (A)	V_{max} (V)	FF	η
Tavlanmamış	3,47	0,84	2,96	0,72	0,73	0,14
Tavlanmış	3,11	0,84	3,17	0,69	0,83	0,15

Tavlanmış GaInP kuantum kuyulu güneş pilinde (QWSC) V_{oc} ve η artarken FF 'in azaldığı gözlenmiştir. Düşük dolum faktörünün nedeni kontaklardaki yüksek seri dirençten kaynaklı kabul edilebilir ve kontakın farklı metal grubu ile yapılması ile azaltılabilir [89]. Tavlanan ve tavlanmayan pillerin V_{oc} değerleri sırasıyla 0,83 V ve 0,82 V olarak bulunmuştur. Tavlama işlemi GaInP kuantum kuyulu güneş pillerinin

(QWSC) V_{oc} değerlerini değiştirmediği gözlendi. [90, 91]. Ancak, izelge 5.2’de görüldüğü üzere; I_{sc} , I_{max} ve FF değerlerindeki değişimler, GaInP kuantum kuyulu güneş pillerinin (QWSC), verimleri arasında farklar meydana getirmiştir. Tavlama işleminden önce GaInP kuantum kuyulu güneş pilinin (QWSC) verimi $0,14$ iken, tavlamadan sonra verimi $0,16$ olmuştur.

Çizelge 5.3’te görüldüğü üzere; tavlannış ve tavlannmamış InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerinde (QWSC) V_{oc} ’nin değişmediği, I_{sc} ’nin ve V_{max} ’ın azaldığı, ancak bu duruma karşın I_{max} ’ın arttığı gözlenmiştir. I_{max} ve V_{max} ’ın bu değişimi FF değerlerinde farklılık oluşturmuştur. Bütün bu değişimler ise, InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerinin (QWSC) verimleri arasında farklar meydana getirmiştir. Tavlama işleminden önce InGaAs kuantum kuyulu güneş pilinin (QWSC) verimi $0,14$ iken, tavlamadan sonra verimi $0,15$ olmuştur.

Bütün bu sonuçlar ışığında açıkça söyleyebiliriz ki; tavlama işlemi hem GaInP, hem de InGaAs kuantum kuyulu güneş pilinin (QWSC) verimini attirmiştir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapıları 3" GaAs alttaşlar üzerine, Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yöntemi kullanılarak büyütüldü. 3" 'lik QWSC yapılarının her birinden, güneş pili oluşturmak üzere beşer adet 1cm x 1cm 'lik parçalar kesildi. Bu parçalardan her yapı için dörder adeti hızlı tavlama (RTA) sisteminde, azot (N₂) ortamında tavlandı. Birer parçaları ise tavlansız. Tavlama işlemi, arsenik kaybını azaltmak amacıyla iki parça GaAs yarıiletken arasına konularak, 555, 610, 665 ve 720 °C için ayrı ayrı 40 saniye süreyle gerçekleştirildi. Tavlanan ve tavlansız güneş pili yapılarının, yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HRXRD) ile yapısal analizleri incelendi [69]. Yapısal analiz sonuçlarına göre seçilen GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapılarının fabrikasyonu püskürtme sisteminde özel tasarlanmış maskeler kullanılarak yapıldı. Fabrikasyon işlemi tamamlanan kuantum kuyulu güneş pillerinin (QWSC) elektriksel analizinin yapılabilmesi için gümüş pasta ile kontakları alınarak akım-gerilim (I-V) ölçümlerine hazır hale getirildi. Akım-gerilim ölçümleri alınarak, elde edilen verilerden akım-gerilim (I-V) grafiği çizildi. Çizilen bu grafik yardımıyla güneş pilleri (SC) için önemli parametreler olan *kısa devre akımı* (I_{sc}), *açık devre gerilimi* (V_{oc}), *maksimum akımı* (I_{max}), *maksimum gerilimi* (V_{max}), *dolum çarpanı* (FF), *enerji dönüşüm verimi* (η) bulundu.

Çoklu epitaksiyel tabakaların X-ışını kırınım metodu ile incelenmesi, MBE tabanlı örneklerde tabaka kalınlıklarının ve örgü yapısının anlaşılmasında, gerekli kimyasal bileşenlerin belirlenmesinde oldukça yararlıdır. Yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HRXRD) ile yapısal analizleri incelenen GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapılarının tavlansızdan sonra ilginç sonuçlar elde edildi. Tavlamanın bir sonucu olarak, aynı sıcaklıklarda GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) yapılarında farklı kusurlar gözlemlendi. Kusurların nedeni, bu yapıların büyüme koşulları, kalınlıkları, indiyum oranları gibi farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu yüksek sıcaklıklarda numunenin kararlılığı açısından önemlidir. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalar tavlama sıcaklıklarından farklı şekilde etkilenmektedir.

$\omega/2\theta$ taramaları üzerinde pik konumlarının kaymasına göre, örgü parametreleri üzerinde artma ve ya azalma olduğu görüldü. GaInP'daki gerilme, InP ve InAs'in GaAs örgü uyumsuzluklarındaki farklılık nedeniyle, InGaAs 'takine kıyasla daha düşüktür. InGaAs için dislokasyon yoğunluğu daha düşük değerlere sahiptir. Yüzey görüntülerine bakıldığında ise, GaInP yüzeyi pürüzlüdür ama InGaAs yapısı için kusurlar mozaik yapı gibi görünmektedir.

Bir güneş pili için önemli parametrelerden biri olan verimlilik hesabı için akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı. Bu çalışma kapsamında, fabrikasyonu tamamlanmış, tavlamanmamış ve 720°C'de tavllanmış birer adet GaInP ve InGaAs olmak üzere dört adet kuantum kuyulu güneş pili (QWSC) incelendi. Bu pillere ileri beslem karanlık ve AM1.5G standart ışık şiddeti altındaki akım-gerilim (I-V) karakteristiklerini incelemek için gerekli olan gümüş kontaklar yapıldı. Ardından bu pillerin akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı ve grafikleri çizildi (Şekil 5.10 ve Şekil 5.11). I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} ve FF değerlerindeki değişimler, GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerinin (QWSC) verimleri (η) arasında farklar meydana getirmiştir. Tavlama işleminden önce GaInP ve InGaAs kuantum kuyulu güneş pillerinin (QWSC) verimleri 0,14 iken; tavlama sonrası GaInP kuantum kuyulu güneş pilinin (QWSC) verimi 0,16; InGaAs kuantum kuyulu güneş pilinin (QWSC) verimi ise 0,15 olmuştur. Bütün bu sonuçlar ışığında açıkça söyleyebiliriz ki; tavlama işlemi hem GaInP, hem de InGaAs kuantum kuyulu güneş pilinin (QWSC) verimini artırmıştır.

Günümüzde güneş pillerinde (SC) yüksek verimlere ulaşılabilmektedir [92-95]. Bunun için sadece güneş pillerini (SC) üretmek yetmemektedir. Çeşitli toplayıcılar ve ya odaklayıcılar içeren güneş pili sistemleri tasarlanmaktadır. Bu sistemlerde güneş ışığı 500 katlara kadar artırılabilir [96]. Yoğunlaştırılan güneş ışığıyla birlikte güneş pili verimleri de artmaktadır. Gerek Si bazlı, gerekse GaInP ve InGaAs bazlı güneş pillerinde Türkiye genelinde ileri bir araştırma-geliştirme tecrübesine sahip olan Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarı (STARLAB) araştırmacıları güneş ışınlarını toplayıcı-odaklayıcı

sistemler üzerinde yoğun olarak çalışmaktadır. Bunun sonucu olarak güneş pili verimlerinin de artırılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Çetin, E., Ükte, A. ve Sazak, B. S., ELECO 2000 Bildiriler Kitabı, *Elektrik*, 176-180 (2000).
2. Yang, M-J., Yamaguchi, M., “Properties of GaAs/InGaAs quantum well solar cells under low concentration operation”, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 60, 19-25 (2000).
3. Yamaguchi, M., “III–V compound multi-junction solar cells: present and future”, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 75: 261-269 (2003).
4. Kiravittaya, S., Manmontri, U., Sopitpan, S., Ratanathamaphan, S., Antarasen, C., Sawadsaringkarn, M., Panyakeow, S., “AlGaAs/GaAs/InGaAs composite MQW structures for photovoltaic applications”, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 68: 89-95 (2001).
5. Takamoto, T., Agui, T., Ikeda, E. and Kurita, H., “High-efficiency InGaP/In_{0.01}Ga_{0.99}As tandem solar cells lattice-matched to Ge substrates”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 66: 511–516 (2001).
6. Dharmarasu, N., Yamaguchi, M., Khan, A., Yamada, T., Tanabe, T., Takagishi, S., Takamoto, T., Ohshima, T., Itoh, H., Imaizumi, M., Matsuda, S., “High-radiation-resistant InGaP, InGaAsP, and InGaAs solar cells for multijunction solar cells”, *Appl. Phys. Lett.*, 79: 2399-2401(2001).
7. Zahler, J. M., Tanabe, K., Ladous, C., Pinnington, T., Newman, F. D., Atwater, H. A., “High efficiency InGaAs solar cells on Si by InP layer transfer”, *Appl. Phys. Lett.*, 91: 012108-012110 (2007).
8. Seeger, K., “Semiconductor Physics: An Introduction 8th edition”, *Springer-Verlag*, Berlin, 10-32 (2002).
9. Yu, P., Cardona, Y., “Fundamentals of Semiconductors”, *Sipringer-Verlag Berlin Heidelberg*, Berlin, 2-11 (1996).
10. Abukay, D., Aral E., “Modern Fizik”, *Anadolu Üniversitesi Yayınları*, Eskişehir, 122-125 (1991).
11. Conny, H., Krishna K. R., “Comparative Study of Infrared Photodetectors Based on Quantum Wells(QWIPS) and Quantum Dots(QDIPS)”, *School of Information Science, Computer and Electrical Engineering Halmstad University*, Sweden, 11-12 (2006).
12. Sze, S. M., “Semiconductor Devices Physics and Technology”, John Wiley&Sons, *Newyork*, 85-127 (2002).

13. Frosch C. J. and Drrick L., "Surface Protection and Selective Masking during Diffusion in Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, 104: 547-552 (1957).
14. Bengi, A., "Al_xGa_{1-x}As/GaAs Nanoyapılarının MBE Yöntemi ile Büyütülmesi ve Elektrofiziksel Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 20-30 (2005).
15. Floyd T. L., "Electronics Fundamentals Circuits, Devices and Applications", *Prentice Hall*, 744-747 (2001).
16. Fox M., "Optical Properties Of Solids", *Oxford*, 280-281 (2001).
17. Mimura, T., Hiyamizu, S., Fuzi, T. and Nanbu, K., "Extremely High Mobility of Two-Dimensional Electron Gas in Selectively Doped GaAs/N-AlGaAs Heterojunction Structures Grown by MBE", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 19: L245-L248 (1981).
18. Van der Ziel, J. P., Dingle, R., Miller, R. C., Weigmann, W. and Nordland, W. A., "Laser oscillation from quantum states in very thin GaAs-Al_{0.2}Ga_{0.8}As multilayer structures", *Appl. Phys. Lett.*, 26: 463-465 (1975).
19. Dupuis, R. D., Dapkus, P. D., Chin, R., Holonyak, N., Kirchoefer, S. W., "Continuous 300 K Laser Operation of Single-Quantum-Well Al_xGa_{1-x}As-GaAs Heterostructure Diodes Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition", *Appl. Phys. Lett.*, 34: 265-267 (1979).
20. Dupuis, R. D., Dapkus, P. D., Holonyak, N. and Kolbas, R. M., "Continuous room-temperature multiple-quantum-well $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs injection lasers grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, 35: 487-489 (1979).
21. Manasreh, M. O., "Semiconductor Quantum Wells and Superlattices for Long-Wavelength Infrared Detectors", *Artech House*, Boston, (1993).
22. Levine, B. F., "Quantum-well infrared photodetectors", *J. Appl. Phys.* 74:R1-R81 (1993).
23. Park, J. S., Karunasiri R. P. G. and Wang, K. L., "Observation of large Stark shift in Ge_xSi_{1-x}/Si multiple quantum wells", *J. Vac. Sci. Technol B*, 8: 217-220 (1990).
24. Miyatake, T., Horihata, S., Ezaki, T., Kubo, H., Mori, N., Taniguchi, K., Hamaguchi, C., "GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors" *Solid-State Electronics*, 37 (4-6): 1187-1190 (1994).

25. Barnham, K. W. J., Ballard, I., Connolly, J. P., Ekins-Daukes, N. J., Klufftinger, B. G., Nelson, J., Rohr, C., "Quantum well solar cells", *Physica E*, 14: 27 – 36 (2002).
26. Bamham, K. W. J., Ballard, I., Barnes, J., Connolly, J., Griffin, P., Klufftinger, B., Nelson, J., Tsui, E., Zachariou, A., "Quantum well solar cells", *Applied Surface Science*, 113/1 14: 722-733 (1997).
27. Fritts, C., "On a New Form of Selenium Photocell", *Proc. Am. Assoc. Adv. Sci.*, 33: 97 (1883).
28. Chapin, D., Fuller C., Pearson G., "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power", *J. Appl. Phys.*, 25: 676-677 (1954).
29. Reynolds, D., Leies G, Antes L, Marburger R, "Photovoltaic effect in Cadmium Sulfide", *Phys. Rev.*, 96: 533-534 (1954).
30. Jenny, D., Loferski J., Rappaport P., "Photovoltaic effect in GaAs p-n junctions and solar energy conversion", *Phys. Rev.*, 101: 1208-1209 (1956).
31. Prince, M., "Silicon solar energy converters", *J. Appl. Phys.*, 26: 534-540 (1955).
32. Loferski, J., "Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion", *J. Appl. Phys.*, 27: 777-784 (1956).
33. Wysocki, J., Rappaport P., "Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion", *J. Appl. Phys.*, 31: 571-578 (1960).
34. Shockley, W., Queisser H, "Detailed balance limit of efficiency of *p-n* junction solar cells", *J. Appl. Phys.*, 32: 510-519 (1961).
35. Cusano, D., "CdTe Solar Cells and Photovoltaic Heterojunctions in II-VI compounds", *Solid State Electron.*, 6: 217-232 (1963).
36. Wysocki, J., Rappaport, P., Davison, E., Hand, R., Loferski, J. J., "Lithium-Doped Radiation-Resistant Silicon Solar Cells", *Appl. Phys. Lett.*, 9: 44-46 (1966).
37. Alferov, Z. I., Andreev, V. M., Kagan, M. B., Protasov, I. I., Trofim, V. G., "Solar-energy converters based on p-n $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$ heterojunctions", *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, 4: 2378-2379 (1970).
38. Lindmayer, J. and Allison J. F., "The Violet Cell: An Improved Silicon Solar Cell", *COMSAT Tech. Rev.*, 3: 1-21 (1973).

39. Sze S. M., "Semiconductor Devices Physics and Technology", John Wiley & Sons, *Newyork*, 110-127 (2002).
40. Frosch, C. J. and Derick L., "Surface Protection and Selective Masking during Diffusion in Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, 104: 547-552 (1957).
41. Chaffin R, Osbourn G., Dawson L. and Biefeld R., "Strained superlattice, quantum well, multi-junction photovoltaic cells", *Proc. 17th IEEE PV Specialists Conf.*, New York, 743 (1984).
42. Barnham, K. W. J. and Duggan G., "A new approach to high-efficiency multi-bandgap solar cells", *J. Appl. Phys.*, 67: 3490-3493 (1990).
43. Nelson, J., Paxman M., Barnham, K. W. J., Roberts J. S. and Button, C., "Steady state carrier escape from single quantum wells", *IEEE J. Quantum Electron.* 29: 1460-1467 (1993).
44. Barnes J., Tsui E. S. M., Barnham, K. W. J., McFarlane S. C, Button, C. and 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).
45. Zachariou, A., Barnes, J., Barnham, K. W. J., Nelson, J., Tsui, E. S. M., Epler, J., and Pate, M., "A carrier escape study from InP/InGaAs single quantum well solar cells", *J. Appl. Phys.*, 83: 877-881 (1998).
46. 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. and Foxon, T., "Voltage enhancement in quantum well solar cells", *J. Appl. Phys.*, 80: 1201-1206 (1996).
47. Barnham, K. W. J., Ballard, I., Barnes, J., Connolly, J., Griffin, P., Kluftinger, B., Nelson, J., Tsui, E. and Zachariou, A., "Quantum well solar cells", *Appl. Surf. Sci.*, 113/114: 722-733 (1997).
48. Barnham, K. W. J., Braun, B., Nelson, J., Paxman, M., Button, C., Roberts, J. S. and Foxon, C. T., "Short-circuit current and energy efficiency enhancement in a lowdimensional structure photovoltaic device", *Appl. Phys. Lett.*, 59: 135-137 (1991).
49. Fox, A., Ispasoiu, R., Foxon, C., Cunningham, J. and Jan, W., "Carrier escape mechanisms from GaAs/AlGaAs multiple quantum wells in an electric field", *Appl. Phys. Lett.*, 63: 2917-2919 (1993).
50. Paxman, M., Nelson, J., Braun, B., Connolly, J., Barnham, K. W. J., Foxon, C. T. and Roberts, J. S., "Modeling the spectral response of the quantum well solar cell", *J. Appl. Phys.*, 74: 614-621 (1993).

51. Aperathitis, E., Scott, C. G., Sands, D., Foukaraki, V., Hatzopoulos, Z. and Panayotatos, P., "Effect of temperature on GaAs/AlGaAs multiple quantum well solar cells", *Mater. Sci. Eng. B*, 51: 85-89 (1998).
52. Connolly, J. P., Barnham, K. W. J., Nelson, J., Roberts, C., Pate, M. and 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).
53. Barnes, J., Ali, T., Barnham, K. W. J., Nelson, J. and 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).
54. Ragay, F., Wolter, J., Mart'ı, A. And Ara'ujo, G., "Experimental analysis of the efficiency of MQW solar cells", *12th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Amsterdam, 1429-1433 (1994).
55. Barnes, J., Nelson, J., Barnham, K., Roberts, J., Pate, M., Grey, R., Dosanjh, S., Mazzer, M. and Ghirardo, F., "Characterization of GaAs/InGaAs quantum wells using photocurrent spectroscopy", *J. Appl. Phys.*, 79: 7775-7779 (1996).
56. 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. and 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).
57. Freundlich, A. and 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).
58. Ekins-Daukes, N., Barnes, J., Barnham, K. W. J., Connolly, J., Mazzer, M., Clark, J., Grey, R., Hill, G., Pate, M. and Roberts, J., "Strained and strain-balanced quantum well devices for high efficiency tandem solar cells", *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 68: 71-87 (2001).
59. Günther, K. G., "Evaporated layers of semiconducting III-V compounds InAs and InSb", *Z. Naturforsch*, 13a:1081-1089 (1958).
60. Müller, E. K., "Structure of oriented, vapor deposited GaAs films, studied by electron diffraction", *J. Appl. Phys.*, 35: 580-585 (1964).
61. Schoolar, R. B., Zemel, J. N., "Preparation of single-crystal films of PbS", *J. Appl. Phys.*, 35: 1848-1851 (1964).

62. Steinberg, R. F., Scruggs, D. M., "Preparation of epitaxial GaAs films by vacuum evaporation of the elements", *J. Appl. Phys.*, 37: 4586-4587 (1966).
63. Davey J. E., Pankey, T., "Epitaxial GaAs films deposited by vacuum evaporation", *J. Appl. Phys.*, 39: 1941-1948 (1968).
64. Parker, E. H. C., "The technology and physics of molecular beam epitaxy", *Plenum*, New York, 32-55 (1985).
65. Herman, M. A., Sitter, H., "Molecular beam epitaxy-fundamentals and current status", *Springer Verlag*, 43-65 (1989).
66. 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).
67. 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).
68. 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).
69. Asar, T., Sarıkavak, B., Öztürk, M. K., Mammadov, T., Özçelik, S., "Effects of annealing on the structural properties of GaAs-based quantum well solar cells", *Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials*, 11(11): 1627-1631 (2009)
70. Singh, J., "Electronic and optoelectronic properties of semiconductor structures", Cambridge University Press, *New York*, 156-178 (2003).
71. 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).
72. Picraux, S. T., Doyle, B. L., Tsao, J. Y., Pearsall, T. P., "Semiconductors and semimetals, Strained-layer Superlattices", Materials Science and Technology 33, Academic Press, *New York*, 100-120 (1991).
73. Lisesivdin, S. B., Ozbay, E., "Effect of Various Pseudomorphic AlN Layer Insertions on the Electron Densities of Two-Dimensional Electron Gas in Lattice-Matched In_{0.18}Al_{0.82}N/GaN Based Heterostructures", *Optoelectron. Adv. Mater.-Rapid Comm.*, 3(9): 904-909 (2009).
74. Osbourn, G. C., "Strained-layer superlattices from lattice mismatched materials", *J. Appl. Phys.*, 53: 1586-1589 (1982).

75. Ulhaqbouillet, C., Lefebvre, A., “Physics Of Condensed Matter Structure Defects And Mechanical Properties”, *Philo. Mag. A*, 68: 1273-1277 (1993).
76. Takano, Y., Masuda, M., Kobayashi, K., Kuwahara, K., Fuke, S., Shirakata, S. J., “Epitaxial growth of InGaAs on misoriented GaAs(100) substrate by metal-organic vapor phase epitaxy”, *J. Crystal Growth*, 236: 31-36 (2002).
77. Yuan, K., Radhakrishnan, K. H., Zheng, Q., Zhuang, Q. D., Ing, G. I., “Characterization of linearly graded metamorphic InGaP buffer layers on GaAs using high-resolution X-ray diffraction”, *Thin Solid Films*, 391: 36-41 (2001).
78. Moram, M. A., Vickers, M. E., Kappers, M. J., Humphreys, C. J., “The effect of wafer curvature on x-ray rocking curves from gallium nitride films”, *J. Appl. Phys.*, 103 93528: 1-6 (2008).
79. Cunningham, J. E., Chiu, T. H., Ourmazd, A., Shah, J., Tsang, W. T., “The occurrence of cross hatch during GaAs homoepitaxy”, *J. Appl. Phys.*, 60: 4165-4168 (1986).
80. Yamaguchi, M., “Dislocation density reduction in heteroepitaxial III-V compound films on Si substrates for optical devices”, *J. Mater. Res.*, 6: 376-384 (1991).
81. Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., “Metal-Semiconductor Contacts”, *Oxford*, 89-97 (1988).
82. Razeghi, M., “Fundamentals of Solid State Engineering”, *Kluwer Academic Publishers*, Norwell, MA, 338-344 (2002).
83. Sharma, B. L., “Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junction and Their Application”, *Plenum*, New York, 67-88 (1984).
84. Colinge, J. P., Colinge, C. A., “Physics Of Semiconductor Devices”, *Kluwer Academic Publishers*, Norwell, MA, 139-150 (2002).
85. Williams, R., “Modern GaAs Processing Methods”, *Artech House*, Norwood, MA, 211-238 (1990).
86. Bengi, A., Altındal, S., Özçelik, S., Agaliyeva, S.T., Mammadov, T.S., “Analysis of temperature dependent electrical characteristics of Au/n-GaAs/GaAs structures in a wide temperature range”, *Vacuum*, 83(2): 276-281 (2008).
87. Ebong, A. U., Lee, S. H., Warta, W., Honsberg, C. B., Wenham S. R., “Characterization of high open-circuit voltage double sided buried contact (DSBC) silicon solar cells”, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 45: 283-299 (1997).

88. Aberle, A. G., Robinson, S. C., Wang, A., Zhao, J., Wenham, S. R., Green, M. A., "High Efficiency Silicon Solar Cells: Fill Factor Limitations and Non-Ideal Diode Behaviour Due to Voltage-Dependent Rear Surface Recombination Velocity", *Proc. Photovoltaics I*, 133: 143 (1993).
89. Özdemir, S., Altındal, Ş., "Temperature-Dependent Electrical Characteristics Of Al-SiO_x-Psi Solar-Cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 32: 115-127 (1994).
90. Tuzun, O., Oktik, S., Altındal, S., Mammadov, T.S., "Electrical characterization of novel Si solar cells", *Thin Solid Films*, 258: 511-512 (2006).
91. Sasaki, T., Arafune, K., Lee, H.S., Ekins-Daukes, N.J., Tanaka, S., Ohshita, Y., Yamaguchi, M., "Effects of thermal cycle annealing on reduction of defect density in lattice-mismatched InGaAs solar cells", *Physica B*, 376-377: 626-629 (2006).
92. Bertness, K. A., Kurtz, S. R., Friedman, D. J., Kibbler, A. E., Kramer, C., Olson, J. M., "29.5%-efficient GaInP/GaAs tandem solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 65: 989-991 (1994).
93. Kurtz, S. R., Bertness, K. A., Friedman, D. J., Kibbler, A. E., Kramer, C., Olson, J. M., "19.6% electron-irradiated GaInP/GaAs cells", *1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, IEEE, New York, 2108-2111 (1994).
94. Friedman, D. J., Kurtz, S. R., Bertness, K. A., Kibbler, A. E., Kramer, C., Olson, J.M., "30.2% efficient GaInP/GaAs monolithic two-terminal tandem concentrator cell", *Progr. Photovolt.*, 3: 47-50 (1995).
95. Takamoto, T., Ikeda, E., Kurita, H., Ohmori, M., "Over 30% efficient InGaP/GaAs tandem solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 70: 381-383 (1997).
96. Kurtz, S. R., Myers, D., Olson, J. M., "Projected performance of three- and four-junction devices using GaAs and GaInP", *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, IEEE, New York, 875-878 (1997).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ASAR, Tarık
 Uyuğu : T.C
 Medeni hali : Bekâr
 Doğum tarihi ve yeri : 25.08.1983 Aydın
 Telefon : 0(532) 575 08 40
 e-mail : trkasar@gmail.com, trkasar@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2007
Lise	Yavuz Selim Lisesi SÖKE	2001

Yabancı Dil

İngilizce

Tezle İlgili Yayınlar

SCI-indexli makaleler

1. Asar, T., Sarıkavak, B., Öztürk, M. K., Mammadov, T., Özçelik, S., “Effects of annealing on the structural properties of GaAs-based quantum well solar cells”, *Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials*, 11(11): 1627-1631 (2009).

Uluslararası seminerlerde sunulmuş ve tam metin olarak basılmış yayınlar

2. Kınacı, B., Asar, T., Çetin, S. Ş., Mammadov, T. S. and Özçelik, S., “Epitaxial growth and characterization of GaAs_{1-x}P_x/GaAs structures”, *Turkish Physical Society 25th International Physical Congress Pressed in Book Of Abstracts*, Turkey, 2008.

3. Kınacı, B., Asar, T., Çetin, S. Ş., Mammaodv, T. S., Özçelik, S., “Epitaxial Growth And Characterization of GaAs_{1-x}P_x/GaAs Structures”, *Balkan Physics Letters*, 16: 114-118 (2009).

Tez Dışı Yayınlar

SCI-indexli makaleler

4. Altuntas, H., Bengi, A., Aydemir, U., Asar, T., Cetin, S. S., Kars, I., Altindal, S., Ozcelik, S., “Electrical characterization of current conduction in Au/TiO₂/n-Si at wide temperature range”, *Mat. Sci. Semicond. Process*, Baskıda.
5. Cetin, S. S., Kinaci, B., Asar, T., Kars, I., Ozturk, M. K., Mammadov, T., Ozcelik, S., “Effect of Different P/As Ratio on the Optical and Structural Properties of GaAs_{1-x}P_x/GaAs”, *Surface and Interface Analysis*, kabul edildi.

Uluslararası seminerlerde sunulmuş ve tam metin olarak basılmış yayınlar

6. Korucu, D., Asar, T., Kınacı, B., Aydemir, U., Mammadov, T. S., Özçelik, S., “Series resistance effect on I-V characteristics of Au/n-InP Schottky barrier diodes (SBDs) in the temperature range of 80-400 K”, *Journal Fizika*, Cild XV, No:2, 195-198 (2009).
7. Çetin, S. Ş., Kinaci, B., Asar, T., Altuntaş, H., Mammadov, T.S., Özçelik, S., “Temperature dependence photoluminescence study of GaAs_{1-x}P_x/GaAs structures”, *Proceeding fifth International Conference on Actual Physical Problems*, Baku, 263-265 (2008).

Uluslararası seminerlerde sunulmuş bildiriler

8. D. Korucu, T. Asar, B. Kınacı, U. Aydemir, T.S. Mammadov, S. Özçelik, “Series resistance effect on I-V characteristics of Au/n-InP Schottky barrier diodes

(SBDs) in the temperature range of 80-400 K”, *Physics, Technics and Technology International Conference*, Baku (10-12 June 2009).

Hobiler

Dalgıçlık, seyahat, yüzücülük