T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

GaInNAs *nipi* GÜNEŞ HÜCRE YAPISININ TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU

Fatima HUSEYNZADE

Fizik Anabilim Dalı

Genel Fizik Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Barış KINACI

Kasım, 2019

İSTANBUL

Bu çalışma, 4.11.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Genel Fizik Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Barış KINACI(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Feyza GÜZELÇİMEN
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Resit ERCETİN
İstanbul Aydın Üniversitesi
Anadolu BİL Meslek Yüksekokulu

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, 115F419 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, her koşulda destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Barış KINACI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca yürütücüsü sayın danışman hocam Doç. Dr. Barış KINACI olan TÜBİTAK-1001 proje kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Nano ve Optoelektronik Laboratuvarı çalışanlarına ve Prof. Dr. Ayşe EROL'a değerli desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Kasım 2019 Fatima HUSEYNZADE

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vi**
TABLO LİSTESİ ..... **vii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **viii**
ÖZET ..... **xi**
SUMMARY ..... **xiii**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **4**
2.1 P-N EKLEMİ 4
2.1.1 Dış Elektrik Alanın p-n Eklemi Üzerine Etkisi 5
2.1.2 Işığın p-n Eklemi Üzerindeki Etkisi 6
2.2 *nipi* YAPISI 8
2.3 GaInNAs TABANLI GÜNEŞ HÜCRELERİ 9
3. MALZEME VE YÖNTEM **10**
3.1 GÜNEŞ HÜCRELERİNİN TEORİK ALTYAPISI 10
3.2 YARİİLETKEN EKLEMDE TRANSPORT MODELİ 10
3.1 *nipi* GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ 13
3.2 FOTOLÜMİNESANS 16
4. BULGULAR **19**
4.1 MODELLEME SONUÇLARI 19
4.1.1 Akım-Voltaj Karakteristiği 19
4.1.2 Spektral Duyarlılık 24
4.2 DENEYSEL SONUÇLAR 27
4.2.1 Fotolüminesans 27
5. TARTIŞMA VE SONUÇ **28**
KAYNAKLAR **29**
EKLER **32**
ÖZGEÇMİŞ **33**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Termal dengedeki p-n ekleminin bant profili [10].....5

Şekil 2.2: a) Denge durumunda ve b) Işık altında p-n eklemi [11].....7

Şekil 2.3: Çok eklemli GaInNAs tabanlı *nipi* güneş hücresi [14].....9

Şekil 3.1: p-n ekleminin tabaka yapısı [10]. 12

Şekil 3.2: Çok eklemli GaInNAs tabanlı *nipi* güneş hücresi [12].....14

Şekil 3.3: Bazı yarıiletkenlerin soğurma katsayılarının fotonun dalgaboyuna (enerjisine) bağlı olarak değişimi [10]. Gri renk çizgili grafik güneş spektrumunu göstermektedir. 16

Şekil 3.4: Fotolüminesans deney düzeneğinin temsili şeması [10].....17

Şekil 4.1: Farklı kalınlıklarda ve farklı katkılama oranlarında 8 periotlu *nipi* güneş hücresinin akım yoğunluğunun periot sayısına göre değişimi. 20

Şekil 4.2: Üç farklı kalınlığa ve her bir kalınlıkta iki farklı katkılama oranlarıyla toplamda 6 farklı *nipi* güneş hücresinin açık devre voltaj değerinin periyot sayısına göre değişimi. 21

Şekil 4.3: *nipi* güneş hücresinin verimliliğinin periyot sayısına göre, her bir katmanın kalınlığı ve katkılama oranına bağlı olarak değişimi. 22

Şekil 4.4: En yüksek verimliliğe sahip tabaka kalınlığı 200nm ve katkılama oranı yani $N_D = N_A = 1 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} yoğunluğunda olan *nipi* güneş hücresinin eklem periyoduna göre J-V karakteristiğinin değişimi. 23

Şekil 4.5: *nipi* güneş hücresinde en yüksek verimin elde edildiği 5 periyotlu yapısının farklı tabaka kalınlıkları ve farklı katkılama oranlarına göre spektral duyarlılık spektrumunun değişimi. 25

Şekil 4.6: En yüksek verimliliğe sahip tabaka kalınlığı 200nm ve katkılama oranı yani $N_D = N_A = 1 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} yoğunluğunda olan *nipi* güneş hücresinin eklem periyoduna göre spektral duyarlılık spektrumunun değişimi. 26

Şekil 4.7: Beş periyotlu GaInNAs *nipi* güneş hücre yapısının PL spektrumu ve örnek yüzey haritalaması 27

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Bu tez kapsamında incelenen örneklerin hesaplamalarında kullanılan parametreler ve referansları. 15

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\boldsymbol{A}$	: Kesit Alan
$\boldsymbol{A_p}$	: Auger Rekombinasyon Katsayısı
$\boldsymbol{\alpha}$	: Soğurma Katsayısı
$\boldsymbol{B_{ışımalı}}$	: Işımalı Rekombinasyon Katsayısı
$\boldsymbol{b}$	: Foton Akısı
$\boldsymbol{b_g}$	: Işıma Şiddeti
c	: Işığın Vakumdaki Hızı
$\boldsymbol{\chi}$	: Elektron Afinitesi
$\boldsymbol{D_n}$	: Elektron Difüzyon Katsayısı
$\boldsymbol{D_p}$	: Boşluk Difüzyon Katsayısı
$\vec{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{dış}}$	: Dış Elektrik Alan
$\boldsymbol{E}$	: Enerji Seviyesi
$\boldsymbol{E_n}$	: İletkenlik Bandında Elektronun Enerjisi
$\boldsymbol{E_h}$	: Valans Bandında Boşluğun Enerjisi
$\boldsymbol{E_F}$	: Fermi Seviyesi
$\boldsymbol{E_{F_n}}$	: n-tipi Yarıiletkende Fermi Seviyesi
$\boldsymbol{E_{F_p}}$	: p-tipi Yarıiletkende Fermi Seviyesi
$\boldsymbol{E_C}$	: İletkenlik Bandı Kenarı
$\boldsymbol{E_V}$	: Valans Bandı Kenarı
$\boldsymbol{E_g}$	: Yarıiletkenin Bant Aralığı
$\boldsymbol{E_N}$	: Azotun Lokalize Enerji Seviyesi
$\vec{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{iç}}$	: İç Elektrik Alan
$\boldsymbol{e}$	: Elektron Yükü
$\boldsymbol{\eta}$	: Güç Dönüşüm Verimi
$\boldsymbol{G(x)}$	: Fotoüretim Hızı
$\boldsymbol{G_n}$	: Elektron Üretim Hızı
$\boldsymbol{G_p}$	: Boşluk Üretim Hızı
$\boldsymbol{h}$	: Planck Sabiti

$\hbar$	: İndirgenmiş Planck Sabiti
$\boldsymbol{I_0}$	: Saturasyon Akımı
$\boldsymbol{I_m}$	: Maksimum Fotoakım
$\boldsymbol{J_{SC}}$	: Kısa Devre Akımı
$\boldsymbol{J_n}$	: p-Tipinde Azınlık Elektron Akım Yoğunluğu
$\boldsymbol{J_p}$	: n-Tipinde Azınlık Boşluk Akım Yoğunluğu
$\boldsymbol{J_W}$	: Arınmış Bölgede Oluşan Fotoakım Yoğunluğu
$\boldsymbol{J_{foto}}$	: Fotoakım Yoğunluğu
$\boldsymbol{k_B}$	: Boltzmann Sabiti
$\boldsymbol{k_e}$	: Elektronun Dalgasayısı
$\boldsymbol{L_n}$	: Elektron Difüzyon Uzunluğu
$\boldsymbol{L_p}$	: Boşluk Difüzyon Uzunluğu
$\boldsymbol{\lambda}$	: Elektromanyetin Dalganın Dalgaboyu
$\boldsymbol{\lambda_{maks}}$	: Spektrumun Maksimum Dalgaboyu
$\boldsymbol{m_e^*}$	: Elektronun Etkin Kütlesi
$\boldsymbol{m_h^*}$	: Boşluğun Etkin Kütlesi
$\boldsymbol{m_{lh}^*}$	: Hafif Boşluğun Etkin Kütlesi
$\boldsymbol{m_{hh}^*}$	: Ağır Boşluğun Etkin Kütlesi
$\boldsymbol{m_r^*}$	: İndirgenmiş Kütle
$\boldsymbol{\mu_n}$	: Elektronun Mobilitesi
$\boldsymbol{\mu_p}$	: Boşluğun Mobilitesi
$\boldsymbol{N_A}$	: Akseptör Yoğunluğu
$\boldsymbol{N_D}$	: Donor Yoğunluğu
$\boldsymbol{N(E)}$	: Durum Yoğunluğu
$\boldsymbol{N_{CB}}$	: İletkenlik Bandında Durum Yoğunluğu
$\boldsymbol{N_{VB}}$	: Valans Bandında Durum Yoğunluğu
$\boldsymbol{N_C}$	: İletkenlik Bandındaki Etkin Seviye Yoğunluğu
$\boldsymbol{N_V}$	: Valans Bandındaki Etkin Seviye Yoğunluğu
$\boldsymbol{N_t}$	: Tuzak Yoğunluğu
$\mathbf{n}$	: İdealite Faktörü
$\boldsymbol{n}$	: Elektron Yoğunluğu
$\mathbf{n_0}$	: Havanın Kırılma İndisi
$\boldsymbol{n_0}$	: Yarıiletken Termal Dengedeyken Elektron Yoğunluğu
$\boldsymbol{n_i}$	: Asal Elektron Yoğunluğu

$\mathbf{n_s}$: Yarıiletkenin Kırılma İndisi

$\boldsymbol{\nu}$: Fotonun Frekansı

$\boldsymbol{P_m}$: Maksimum Güç

$\boldsymbol{P_{optik}}$: Optik Güç

$\boldsymbol{p}$: Boşluk Yoğunluğu

$\boldsymbol{p_i}$: Asal Boşluk Yoğunluğu

$\boldsymbol{p_0}$: Yarıiletken Termal Dengedeyken Boşluk Yoğunluğu

$\boldsymbol{R}$: Yansıtma Katsayısı

$\boldsymbol{S_n}$: p-Tipi Yarıiletkende Yüzey Rekombinasyon Hızı

$\boldsymbol{S_p}$: n-Tipi Yarıiletkende Yüzey Rekombinasyon Hızı

$\boldsymbol{T}$: Sıcaklık

$\boldsymbol{t}$: Zaman

$\boldsymbol{V_{bi}}$: Eklem Potansiyeli

$\boldsymbol{V}$: Uygulanan Voltaj

$\boldsymbol{V_{OC}}$: Açık Devre Voltajı

$\boldsymbol{V_m}$: Maksimum Voltaj

$\boldsymbol{W}$: p-n Ekleminin Arınmış Bölgesinin Genişliği

$\boldsymbol{W_n}$: Arınmış Bölgenin n-Tipi Bölgesinin Genişliği

$\boldsymbol{W_p}$: Arınmış Bölgenin p-Tipi Bölgesinin Genişliği

Kısaltmalar	**Açıklama**
AM 0	: Air Mass 0 (Hava Kütlesi 0)
AM 1.5G	: Air Mass 1.5 Global (Hava Kütlesi 1.5 Toplam)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyal Topluluğu)
EL	: Electroluminescence (Elektrolüminesans)
FF	: Fill Factor (Dolum Faktörü)
LIA	: Lock-in Amplifier
MBE	: Molecular Beam Epitaxy (Moleküler Demet Epitaksi)
SR	: Spectral Response (Spektral Duyarlılık)
PL	: Photoluminescence (Fotolüminesans)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GaInNAs *nipi* GÜNEŞ HÜCRE YAPISININ TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU

Fatima HUSEYNZADE

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Barış KINACI

GaInNAs seyreltik azotlu alaşım yarıiletkeninin en büyük özelliği bant aralığının 1 eV civarında ve daha küçük veya büyük olarak ayarlanabilmesi ve GaAs ile örgü uyumlu olmasıdır. Bu sayede, yüksek verimli güneş hücre uygulamasında kullanılabilecek en uygun yarıiletken adayındandır.

Bu tez çalışmasında, *nipi* yapıda 1 eV GaInNAs güneş hücre yapısının farklı kalınlık ve katkılama yoğunluğu kombinasyonlarında fotovoltaik performansının teorik olarak incelemesi (simülasyonu) yapılmıştır. Teorik modelleme sürecinde hem fotoakım hem de karanlık akım hesabı için sürüklenme-difüzyon modeli kullanılmıştır. GaInNAs *nipi* güneş hücresinin simülasyonunda gerekli temel parametreler literatürde 1 eV bant aralıklı GaInNAs yarıiletkeni için yapılan çalışmalardan alınmıştır. Bu temel parametrelerden soğurma katsayısı ve kırılma indisi gibi GaInNAs yarıiletkenin ışığın dalgaboyuna bağlı değişen optik özellik parametreleri ise eğri olarak kullanılmıştır. Teorik hesaplamalarda GaInNAs *nipi* güneş hücresinin foto – akım yoğunluğunun, açık devre voltajının ve verimliliğinin *nipi* eklem periyot sayısına göre değişimi sonuçlandırarak yorumlanmıştır. Ayrıca *nipi* güneş hücresinin spektral duyarlılık grafiklerine de yer verilerek *nipi* katmanların kalınlığı ve katkılama yoğunluklarının etkileri incelenmiştir.

Yapılan simülasyon sonucunda en yüksek verimli GaInNAs *nipi* güneş hücre yapısı oluşturulmuş ve ona göre Tampere Teknik Üniversitesinde örnek büyüttürülmüştür. Büyütülen

örneğin fotolüminesans (Photoluminescence – PL) ölçümleri ve PL pik değerlerinin örnek boyunca dağılımları örneğin kaliteli büyütüldüğünü göstermekte.

Kasım 2019, 47 sayfa.

Anahtar kelimeler: *nipi* yapılar, GaInNAs, seyreltik azotlu alaşımlar, GaInNAs güneş hücreleri

SUMMARY

M.Sc. THESIS

DESIGN and CHARACTERIZATION of GaInNAs *nipi* SOLAR CELL STRUCTURE

Fatima HUSEYNZADE

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Barış KINACI

The important characteristics of GaInNAs dilute nitride alloy semiconductor that its bandgap can tune around the 1 eV and can be grow lattice matching to GaAs. These properties make it the most suitable semiconductor candidate for high efficiency solar cell applications.

In this thesis work, GaInNAs 1 eV *nipi* solar cell structure is theoretically (simulation) investigated with different combination of layer thicknesses and doping profiles. The drift-diffusion theory is used to calculate photocurrent and dark current during the simulation. The parameters necessary for simulation of GaInNAs *nipi* solar cell are taken from research reports on the 1 eV GaInNAs in the literature. The optical properties of GaInNAs semiconductor as absorption coefficient and refractive index are used as curve. In the theoretical calculation, changing of photocurrent density, open circuit voltage and efficiency of GaInNAs *nipi* solar cells by *nipi* period is explained. Also, the effects of *nipi* layer thicknesses and doping profiles on the spectral response of the solar cell are investigated.

As a result of simulation, high efficiency GaInNAs *nipi* solar cell structure is selected and is grown at the Tampere University of Technology. The PL spectrum and PL peak mapping of the sample wafer show that the sample is grown with good quality.

November 2019, 47 pages.

Keywords: *nipi* structures, GaInNAs, dilute nitride alloys, GaInNAs solar cells

1. GİRİŞ

Güneş hücreleri yarıiletken malzemelerin fotovoltaik özelliklerine dayalı olarak ışık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu özelliğinden dolayı güneş hücreleri yeryüzü ve uzay uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır. Dönüşüm verimi güneş hücrelerinin en önemli parametresidir ve verimi sınırlayan birçok etken bulunmaktadır. Hücre sıcaklığı, ışığın yarıiletkende soğurulması ve oluşan foto taşıyıcıların rekombinasyonu, verimi sınırlayan etkenlerden sadece birkaçıdır. Yeryüzü uygulamalarında en çok silisyum tabanlı güneş hücreleri kullanılmaktadır ve dünyada güneş hücre pazarının %90 payına sahiptir. Silisyum bant aralığı 1.12 eV olan indirek bant aralıklı yarıiletkendir ve güneş spektrumunun önemli kısmı olan görünür bölgesinde güneş hücresi olarak çalışmaya çok uygundur. Ancak silisyumunun indirek bant aralıklı olması nedeniyle bant aralığından büyük enerjideki fotonların tamamının soğurulması için silisyumun kalınlığı >1mm olmalıdır. Tek eklemli hücreler söz konusu olduğunda, güneş hücrelerindeki en verimli yarıiletken GaAs ile elde edilmiş olup, üretim teknolojisinin maliyeti yüksektir. Bu nedenle GaAs tabanlı güneş hücreleri yüksek teknoloji ürünlerinde (uzay aracı, uydu vb.) tercih edilmektedir. Güneş hücresinin verimliliğini sınırlayan en temel etken güneş hücresinin yapıldığı yarıiletkenin bant aralığıdır. Bant aralığından daha düşük enerjiye sahip fotonlar, soğurulmadan yarıiletkenden geçerken, bant aralığından çok daha yüksek enerjiye sahip fotonların soğurulmasıyla oluşan elektron ve boşlukların fazla enerjisi sıcaklık olarak tüketilmektedir. Güneş hücresinin tek yarıiletkenden yapıldığı durumda maksimum teorik verim %33'e ulaşırken [1], uygulamada ulaşılabilen en yüksek verim %28.8 civarındadır [2]. Verim, farklı bant aralıklarına sahip yarıiletkenlerden oluşan p-n eklemlerinin sayısının arttırılmasıyla tasarlanan çok eklemli güneş hücresi tasarımıyla yükseltilebilir. Çok eklemli güneş hücresi yapısında, güneş ışınların mercek ya da aynalarla toplanmasıyla farklı yarıiletkenler güneşten gelen farklı enerjili fotonları soğuracağı için teorik olarak %80 civarında verimlere ulaşılabileceği öngörülmektedir [3]. Şu ana kadar çok eklemli güneş hücrelerinde erişilen verim 508 güneşte %46'dır ve ticari iki eklem ile 1 güneşte %32.6 verimliliğe ulaşılabilmektedir [4].

GaAs ile örgü uyumlu büyütülen ve bant aralığı içindeki azot konsantrasyonu ve indiyum konsantrasyonunun değiştirilmesiyle 1eV olarak ayarlanabilen GaInNAs alaşımının kullanılmasının güneş hücresinin verimini oldukça arttıracağı NREL tarafından öne

sürülmüştür [5]. GaInNAs, seyreltik azotlu alaşımlar olarak bilinen yarıiletken sınıfının bir üyesidir. GaInNAs ilk kez Kondow ve diğ. [6] tarafından, optik haberleşmede kullanılan GaInAsP yarıiletkenine alternatif olarak önerilmiştir. GaInAs içerisine seyreltik miktarda (yüzde birkaç) azot katılarak büyütülen GaInNAs alaşımının bilindik alaşımlardan çok farklı optik özelliklere sahip olduğu ortaya koyulmuştur [7]. III-V grubu örgüsüne eklenen yalnızca %1 azot, bant aralığını 150 meV kadar azaltmaktadır. GaInNAs alaşımının bant aralığının 1eV olarak ayarlanabilmesi, GaAs ile örgü uyumlu büyütülmesinin yanı sıra etkin elektron kütlesinin büyük olması nedeniyle soğurma katsayısının yüksek olması dikkati çeken özellikleridir.

Her ne kadar teorik olarak GaInNAs-tabanlı güneş hücrelerinde öngörülen verim değeri yüksek olsa da, yapılan çalışmalarda bu teorik değerden oldukça düşük verim değerleri elde edilmiştir [8]. Çünkü GaInNAs alaşımında artan N konsantrasyonu i) azınlık taşıyıcıların ömürlerini kısaltmakta ii) difüzyon uzunluğunu kısaltmakta ve iii) elektron mobilitesini düşürmektedir. Tüm bu sorunlar malzemenin kalitesi ile ilgili olup, bu nedenle büyütme tekniğine ve büyütme sonrası ısıl işlem süreçlerine bağlıdır. Malzeme kalitesinin iyileştirilmesi yapının büyütme kinetiğinin daha iyi anlaşılması ve büyütme sırasında oluşan nokta kusurların giderilmesi büyük ölçüde aşılabilmiş olmakla birlikte, GaInNAs türü alaşımlarda büyütme sonrası ısıl işlem uygulanması standart bir yöntem haline gelmiştir. Isıl işlem sonrasında malzemenin hem optik hem de elektriksel özelliklerinde iyileşme elde edilebilmektedir. Ancak etkin kütlenin azota bağlı artışı halen elektron mobilitesinin düşük olmasındaki temel etkendir [9]. Mobilitenin düşük olması her ne kadar GaInNAs'ın bant aralığı 2 ya da 3 eklemli güneş hücrelerinde 1eV bant civarında bant aralığına sahip malzeme gereksinimini giderse de taşıyıcıların difüzyon uzunluğunun kısa olmasına ve bu nedenle de GaInNAs tabanlı güneş hücrelerinin verimlerinin düşük olmasına neden olmaktadır. Bu sorun farklı bir güneş hücresi yapısı tasarımıyla giderilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında, GaInNAs yarıiletkenin malzeme kalitesiyle ilgili sınırlamaları aşmak için farklı bir tasarıma sahip güneş hücre yapısı geliştirilmiştir. Proje kapsamında önerilen tasarım *nipi* yapı oluşturacak şekilde bir yapı tasarlanıp, oluşan foto taşıyıcıların paralel yük taşınımıyla kontaklara toplanacağı yapıdır. *nipi* yapısı n-tipi, asal, p-tipi ve asal olarak değişen katkılamaya sahip tabakalardan oluşur. Bu katkı profili sinüssel değişime sahip bant diyagramının oluşmasına neden olmaktadır. Tez çalışması kapsamında ilk aşamada tek

hücreli *nipi* GaInNAs yapısı en yüksek verime sahip olacak şekilde tasarlanmış ve MBE tekniğiyle büyüttürülmüştür. Büyütülen örneğin bant aralığının belirlenmesi için fotolüminesans (Photoluminescence – PL) ölçümü gerçekleştirilmiş ve yorumlanmıştır.

Bu tez çalışmasının Genel Kısımlar bölümünde yarıiletken p-n eklemlerin karanlıkta ve ışık altındaki davranışları kısaca incelendikten sonra *nipi* yapıların tanıtımına geçilmiştir. Bu kısımda kuramsal simülasyon için gerekli olan temel formüller açıklanmakla birlikte seyreltik azotlu alaşım olan GaInNAs yarıiletkenin temel karakteristiğine değinilmiştir.

Malzeme ve Yöntem kısmında *nipi* GaInNAs yapıların tasarımı teorik olarak ayrıntılı açıklandıktan sonra PL ölçüm sisteminin detaylı şeması verilmiştir.

Bulgular kısmında GaInNAs *nipi* güneş hücresinin teorik olarak belirlenmiş fotovoltaik karakteristiği verilmiştir. Ayrıca PL ölçüm sonuçlarına da yorumlarla yer verilmiştir. Tez çalışmasının genel olarak yorumlarla yapılmış özeti Tartışma ve Sonuç kısmında yer almaktadır.

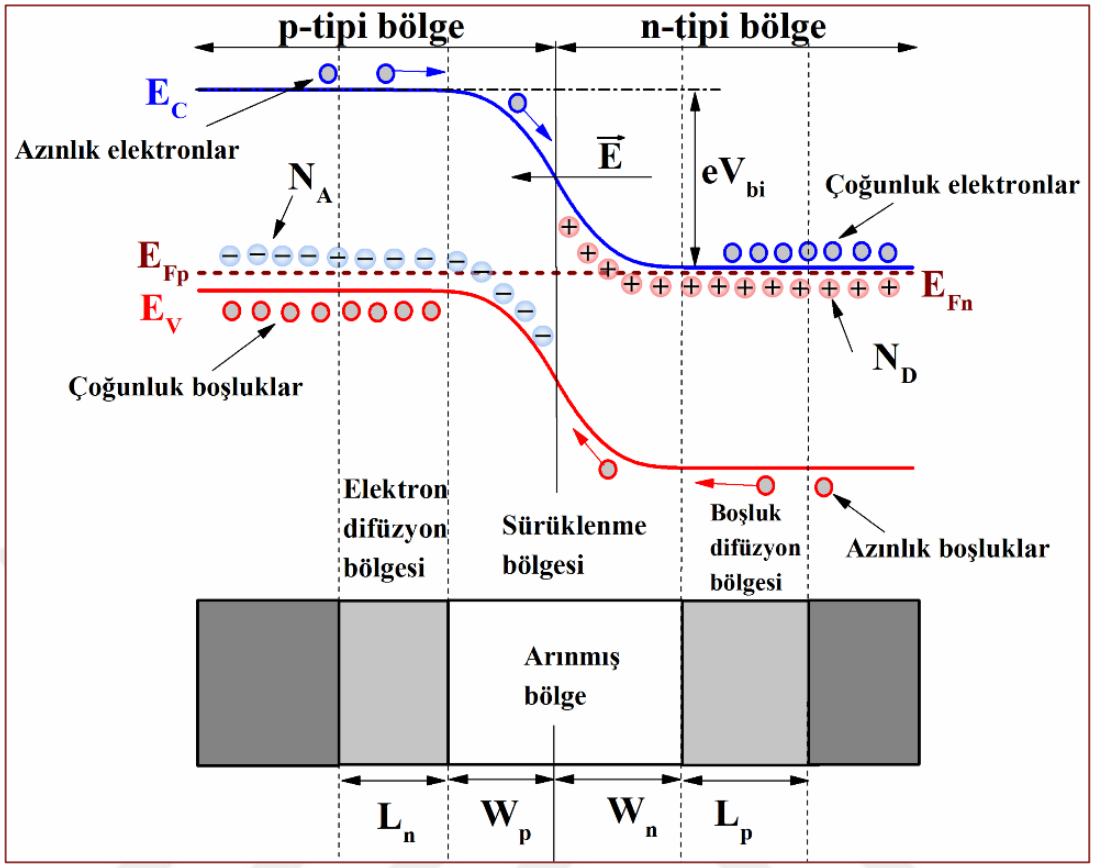
2. GENEL KISIMLAR

2.1 P-N EKLEMİ

Bir p-n eklemi basit olarak p- tipi ve n- tipi yarıiletkenlerin bir araya getirilmesiyle elde edilir. Bu iki farklı taşıyıcı yoğunluğuna sahip yarıiletkenler bir araya getirildiğinde difüzyon süreci başlar. İki yarıiletkenin birleştiği arayüzey civarındaki çoğunluk taşıyıcılar (p-tipi yarıiletkende boşluklar ve n-tipi yarıiletkende elektronlar) eklemin diğer tarafına arkalarında iyonize katkı atomlarını (negatif akseptör ve pozitif donor) bırakarak difüzyon yoluyla geçerler. p- tarafına difüze olan elektronların çoğu boşluklarla ve n-tarafına difüze olan boşlukların çoğu da elektronlarla rekombine olurlar. Sonuç olarak eklem bölgesi civarı serbest taşıyıcılardan arınmış olur ve bu bölgeye *arınmış bölge* denir. Arınmış bölgenin p- tipi tarafında (W_p) hareketsiz olan negatif iyonize akseptörler ve n- tipi tarafında da (W_n) pozitif iyonize olan donorlar vardır. Eklem bölgesindeki bu negatif ve pozitif iyonlardan dolayı *iç elektrik* ($\vec{E}$) alan oluşur. Bu iç elektrik alanla n-tipi taraftan boşluklar p-tipi tarafa ve p-tipi taraftan elektronlar n-tipi tarafa doğru sürüklenirler. Şekil 2.1'de bir p-n ekleminin denge durumunda bant profili çizilmiştir. N_A ve N_D sırasıyla akseptör ve donor katkı atomların yoğunluğudur. Eklem dengeye geldiğinde iki farklı yarıiletkenin de Fermi seviyeleri eşit olurlar ve eklemden geçen toplam akım sıfırdır. İç elektrik alandan dolayı arınmış bölgenin genişliğine göre değişen bir (V_{bi}) *eklem potansiyeli* (Kontak potansiyeli de denir) denge durumunda çoğunluk taşıyıcıların eklemin diğer tarafına geçmesini engelleyen bariyerdir. V_{bi} şu şekilde ifade edilir:

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{\mathrm{N_A N_D}}{\mathrm{n_i^2}}\right) \tag{2.1}$$

Burada e elektronun yüküdür. İfadeden görüldüğü gibi kontak potansiyeli T sıcaklığa ve katkı yoğunluğuna göre değişmektedir.



Şekil 2.1: Termal dengedeki p-n ekleminin bant profili [10].

Elektronların difüzyon uzunluğu L_n ve boşluklarınki ise L_p ile gösterilir. Elektronlar için şu şekilde yazabiliriz:

$$L_n = \sqrt{\tau_n D_n} \tag{2.2}$$

burada τ_n elektronun rekombinasyon zamanı, D_n elektronun difüzyon katsayıdır.

2.1.1 Dış Elektrik Alanın p-n Eklemi Üzerine Etkisi

Ekleme bir dış elektrik alan uygulandığında eklem artık dengede değildir. Denge durumu bozulduğundan yarıiletkenlerin Fermi seviyeleri eşit değildirler. p- tipi bölgede elektron yoğunluğu arttığı için bu bölgede Fermi seviyesi de iletkenlik bandına yaklaşır. Aynı durum n-tipi bölgesi için de geçerlidir. Bu bölgedeki Fermi seviyesi ise valans bandına yaklaşır.

İleri yönde besleme durumunda dış elektrik alan iç elektrik alana ters yöndedir. Bu nedenle kontak potansiyeli uygulanan dış potansiyel kadar azalır. Geri yönde beslendiğinde dış elektrik alan iç elektrik alan ile aynı yönde olduğundan kontak potansiyeli uygulanan dış potansiyel

kadar artar. Bunların sonucu olarak, p-n eklemi ileri ve geri yönde besleme durumunda taşıyıcı yoğunluğu eklem derinliğine göre değişir. İleri yönde beslemede taşıyıcı enjeksiyonunun artması nedeniyle arınmış bölge küçülür. Fakat geri yönde besleme durumunda iç elektrik alanın artmasından dolayı arınmış bölge genişler.

Bir p-n eklemin direnci uygulanan potansiyele göre değişmektedir. Uygulanan potansiyelin ileri veya geri yönde olması yukarıda bahsettiğimiz gibi p-n ekleminde akım mekanizmasını önemli oranda değiştirmektedir. Dolayısıyla dış potansiyel altında p-n eklemin akım-voltaj (I-V) karakteristiği şu şekilde verilir:

$$I(V) = I_0\left(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1\right) \tag{2.3}$$

burada $I(V)$ uygulanan V potansiyeline bağlı olarak değişen diyot akımıdır. I_0 satürasyon akımı olup, şu şekilde ifade edilir:

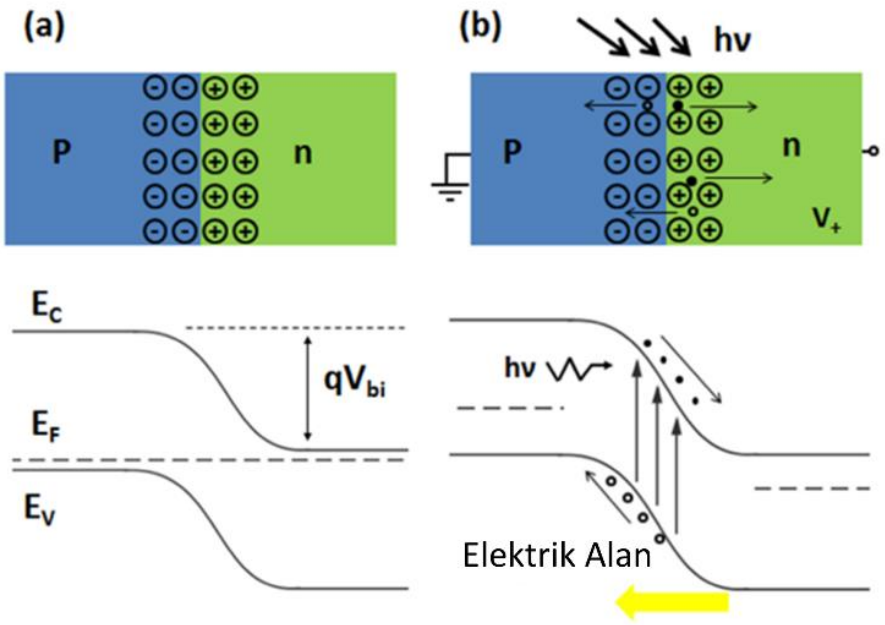
$$I_0 = eA\left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n}\right) \tag{2.4}$$

burada A p-n eklemin kesit alanıdır, p_n n-tipi bölgesinde azınlık boşluk yoğunluğudur. Aynı şekilde n_p ise p-tipi bölgesinde azınlık elektron yoğunluğudur. Diyot akımı ileri yönde beslemede eksponansiyel olarak artarken geri yönde beslemede küçük bir değere sahiptir. Denklem (2.3)'e *ideal diyot* denklemi denir. Çünkü denklem yazılırken p-n ekleminde herhangi bir rekombinasyon mekanizması göz önüne alınmamıştır ve arınmış bölge sınırları dışında iç elektrik alanın sıfır olduğu düşünülmüştür.

2.1.2 Işığın p-n Eklemi Üzerindeki Etkisi

Bir p-n ekleminin üzerine eklemi oluşturan yarıiletkenin bant aralığından büyük enerjideki fotonlar düştüğünde eklemin p-tipi, arınmış ve n-tipi bölgelerinde elektron-boşluk çiftleri üretilir. Arınmış bölgede oluşan elektronlar ve boşluklar iç elektrik alan etkisiyle sürüklenerek boşluklar, p-tipi bölgesine doğru elektronlar da n-tipi bölgesine doğru hareket ederler. p-n ekleminde fotoakıma katkı en fazla p-tipi ve n-tipi bölgelerden gelir. Çünkü bu bölgeler arınmış bölgeye göre daha kalın olduğundan bu bölgelerde daha fazla foton soğurulur. Arınmış bölge dışında oluşan elektronlar ve boşluklar difüzyon uzunluğu kadar mesafeden arınmış bölgeye ulaşır ve iç elektrik alan etkisinde sürüklenerek fotoakıma katkıda bulunurlar. Şekil 2.2'de ışık

altındaki basit bir p-n eklemin farklı bölgelerinde üretilen serbest taşıyıcıların akım mekanizması gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bant aralığından yüksek enerjili fotonlar hemen yüzeyde soğrulur ve bant aralığından düşük enerjisi olan fotonlar ise soğurulmadan geçip giderler.



Şekil 2.2: a) Denge durumunda ve b) Işık altında p-n eklemi [11].

p-tipi bölgesinde üretilen azınlık elektronların yoğunluğu ile n-tipi bölgesinde üretilen azınlık boşlukların yoğunluğu eşittir. Böyle bir durumda p-n eklem için diyot denklemi şu şekilde yazılır:

$$I(V) = A\left(I_{foto} - I_0\left(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1\right)\right) \tag{2.5}$$

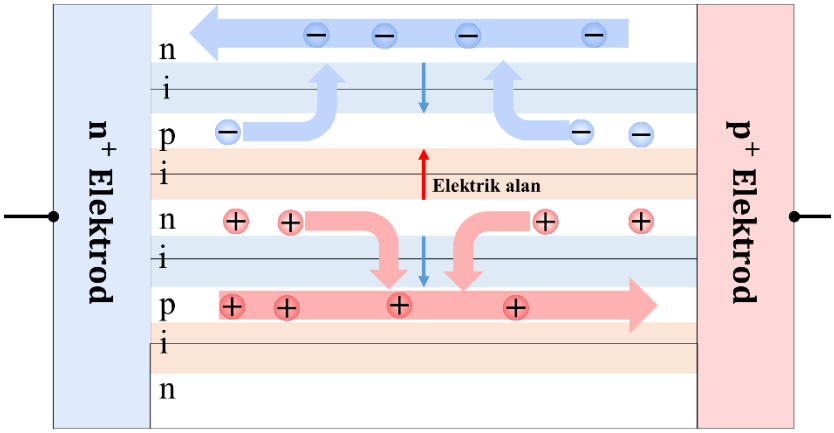
burada A p-n ekleminin yüzey alanıdır. Fotoakımı ifade ederken ışığın düştüğü alan çok önemlidir. Çünkü ne kadar geniş alana ışık düşerse o kadar fazla taşıyıcı üretilir dolayısıyla fotoakım artar. Bu yüzden güneş hücrelerinde üst kontak yapılırken mümkün oldukça geniş alan bırakılmaya çalışılır. Fotoakım ile diyot akımı zıt yöndedir. Dolayısıyla ileri yönde besleme akımının fotoakıma eşit olduğu durumdaki voltaj değerine p-n eklemin ışık altındayken çalışma voltajı yani *açık devre voltajı* (V_{OC}) denir. Açık devre voltajı güneş hücresinin ışık altındayken uçlarında oluşan potansiyel farkıdır. Bu potansiyel farkı elektronların ve boşlukların sanki-Fermi seviyelerinin farkına eşittir. Bu yüzden güneş

hücrelerinin performansını belirlemek için ışık altındayken ileri yönde besleme altında I-V eğrisinden yararlanılır.

2.2 *nipi* YAPISI

nipi yapılar iletkenlik bandındaki elektron durumları ve valans bandındaki boşluk durumları arasında bant aralığının olduğu süperlatis yapılarıdır. Fotonların soğurulmasıyla üretilen elektron ve boşlukların rekombine olmadan uzaysal olarak ayrılmaları *nipi* yapısını güneş hücresi uygulamaları için uygun hale getirir.

Bir *nipi* yapısı n-tipi, asal, p-tipi ve asal olarak değişen katkılamaya sahip tabakalardan oluşur [12,13]. Eğer bir tabakanın kalınlığı taşıyıcıların difüzyon uzunluğundan küçükse, tabakalarda üretilen elektron boşluk çiftleri rekombinasyona uğrayamadan hızla ayrılır ve bir sonraki tabakaya ilerlerler. Bu tabakada çoğunluk taşıyıcı olurlar. Çoğunluk taşıyıcıların ömürleri azınlık taşıyıcılardan çok daha uzundur. Bu taşıyıcılar, *nipi* yapıdaki güneş hücresinin seçici kontakları (n^+ ve p^+) arasındaki tabakalar boyunca olan iç elektrik alanla kontaklara doğru sürüklenirler. Çünkü ’den görüleceği gibi soldan n^+ ve sağdan p^+ kontakları *nipi* yapının her bir n^+-p-p^+ ya da n^+-n-p^+ eklemini oluşturacaklardır. Bu eklemlerde n^+ ve p^+ kontaklara göre p ve n katkısının daha az olduğu dikkate alındığında, sanki bu tabakalar asalmış gibi düşünülebilir. Soldan sağa oluşan ve çok sayıda ardışık olarak büyütülmüş GaInNAs tabakadan oluşan bu eklemlerin varlığı tabakalara paralel bir iç elektrik alan oluşmasını sağlar. Böylece difüzyon süreci ile eklemin iç elektrik alanıyla dikeyde tabakalara ayrılan elektron ve boşluklar yatay iç elektrik alan altında sürüklenerek kontaklara ulaşır. Kontak bölgeleri (n^+ ve p^+ bölgeler) birbirine yakın yapılırsa iç elektrik alan da büyük olacak ve taşıyıcılar saturasyon hızlarında kontaklara doğru sürüklenir.



Şekil 2.3: Çok eklemli GaInNAs tabanlı *nipi* güneş hücresi [14].

Bir örnek üzerinde birbirine paralel ve belli aralıklarla dizilmiş n^+ ve p^+ bölgeleri yaratılabilir. Üst üste tabaka sayılarının çok olması da sorun yaratmayacaktır, çünkü taşıyıcılar dikey olarak kontaklara gitmeyecek her yatay tabakadaki yan kontaklara ulaşacaktır.

2.3 GaInNAs TABANLI GÜNEŞ HÜCRELERİ

Yüksek verimli güneş hücresi tasarımlarında 1eV bant aralıklı yarıiletkenin büyük önemine dikkat çeken ilk teorik çalışma Friedman ve diğ. [5] tarafından yapılmıştır. Teorik hesaplara göre $Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs/Ga_{0.93}In_{0.07}N_{0.02}As_{0.98}$ üç eklemli güneş hücrelerinden AM 1.5G spektrumda ve 1 güneşte ~%43.4 yoğunlaştırılmış 500 güneşte ise ~%50 verim elde edilir [8,15]. Son çalışmalarda yoğunlaştırılmış AM1.5G güneş spektrumunda deneysel olarak %44 verim elde edilmiştir [16].

GaInNAs yarıiletkeni hem GaAs ile örgü uyumludur hem de bant aralığı In ve N oranına göre kontrol edilebilir [12,15]. Ayrıca bu yarıiletken alaşım direk bant aralıklı olup güneş hücre uygulamalarında büyük kullanım potansiyeline sahiptir. Literatürde yer alan çalışmalarda GaInNAs tabanlı güneş hücre yapıları çoğunlukla *pin* [17], çok eklem (n-p ya da p-n) [18,19] ve *nipi* [13,14,20,21] olarak karşımıza çıkmaktadır ve başarılı bir şekilde bu güneş hücrelerinin verimleri artmaktadır. GaInNAs yarıiletken alaşımına dayalı olarak geliştirilen çoklu kuantum kuyulu güneş hücresi [22–24] ve kuantum nokta [25] ve nano-tel güneş hücreleri de [26] yoğun araştırma konularıdır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasının amacı III-V grubu yarıiletkeni GaAs ile örgü uyumlu olan bant aralığını modifiye edilebilen azotlu alaşım GaInNAs yarıiletkenine dayalı güneş hücrelerin modellenmesidir. Dolayısıyla bu kısımda önce p-n eklem güneş hücre yapısının aşamalı olarak teorik modellenmesine sonrasında ise GaInNAs *nipi* güneş hücre yapılarının tasarımına yer verilmiştir.

3.1 GÜNEŞ HÜCRELERİNİN TEORİK ALTYAPISI

Yarıiletkenlerde serbest taşıyıcıların üretimi için dışarıdan yarıiletkenin bant aralığı kadar veya daha yüksek enerjinin sürekli olarak verilmesi yeterlidir. Güneş hücrelerinde ışık enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde elektrik yüklü serbest taşıyıcı (iletkenlik bandında elektronlar, valans bandında boşluklar) üretimi ışık enerjisiyle gerçekleşmektedir. Eğer bir yarıiletkenin, gelen bütün fotonları yüzeyden x kadar derinlikte soğurduğunu ve her fotonun bir serbest elektron-boşluk çiftini oluşturduğu varsayılırsa oluşan serbest taşıyıcıların birim hacimdeki üretim oranını Denklem (3.1)'de verildiği gibi genel bir ifadeyle hesaplayabiliriz:

$$g(E,x) = b(E,x)\alpha(E,x) \tag{3.1}$$

Burada, b, x'e bağlı olarak foton akısının değişimidir. Fakat gerçekte gelen ışığın belirli bir miktarı yarıiletkenin yüzeyinden yansıtma katsayısına bağlı olarak yansıtılmaktadır. Dolayısıyla yansıtmanın da hesaba katılması gerekir.

$$g(E,x) = \big(1 - R(E)\big)b_g(E)\alpha(E)e^{-\alpha(E)x} \tag{3.2}$$

Burada, b_g yansımadan sonra yarıiletkene giren ışık akısıdır ve $R(E)$ ise yansıma katsayısıdır. Denklem (3.2) her enerjideki fotonların yarattığı elektron-boşluk çiftinin yoğunluğunu göstermektedir.

3.2 YARIİLETKEN EKLEMDE TRANSPORT MODELİ

Işık altındaki bir p-n ekleminin akım yoğunluğu cinsinden Denklem (3.3)'de verildiği gibi ifade edilir. Akım yoğunluğunun kullanılmasının sebebi, ışığın düştüğü alan ile kontakların da bulunduğu alan arasında az da olsa fark vardır. Bu yüzden fotoakım ölçümlerinde sadece p-n

eklem yüzeyinin aydınlatılan alanı göz önünde tutulurken, karanlık akım ölçümünde ise toplam alan göz önünde tutulur.

$$J = J_{foto} - J_0\left(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1\right) \tag{3.3}$$

Fotonların soğurulması yarıiletkenin derinliğine göre değiştiğinden üretilen taşıyıcıların yoğunluk dağılımı da konuma göre değişir. Bu durumda p-tipinde azınlık elektron yoğunluğunun derinliğe göre değişimi süreklilik denklemiyle şu şekilde ifade edilir:

$$-\frac{1}{e}\frac{dJ_n}{dx} - G_n + \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0 \tag{3.4}$$

Burada J_n eklemin p-tipi bölgesinde elektron akım yoğunluğu, n_{p0} ise denge durumundayken azınlık elektron yoğunluğudur. Denklem (3.4)'te ilk terim konuma göre akım yoğunluğunun değişimi, ikinci terim olan G_n üretim hızı ve üçüncü terim rekombinasyon hızını ifade eder. Aynı şekilde süreklilik denklemi n-tipindeki azınlık boşluklar için şu şekilde yazılır:

$$\frac{1}{e}\frac{dJ_p}{dx} - G_p + \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \tag{3.5}$$

Eklemin p-tipi bölgesinde ve n-tipi bölgesindeki elektron ve boşlukların akımını şu şekilde yazabiliriz:

$$J_n = e\mu_n n_p E + eD_n\frac{dn_p}{dx} \tag{3.6}$$

$$J_p = e\mu_p p_n E - eD_p\frac{dp_n}{dx} \tag{3.7}$$

Burada μ_n ve μ_p sırasıyla azınlık elektron ve boşlukların mobiliteleri, E dışardan uygulanan elektrik alandır. Her iki denklemin de ilk terimi elektrik alan uygulandığında sürüklenme akımı ve ikinci terimi ise difüzyon akımıdır.

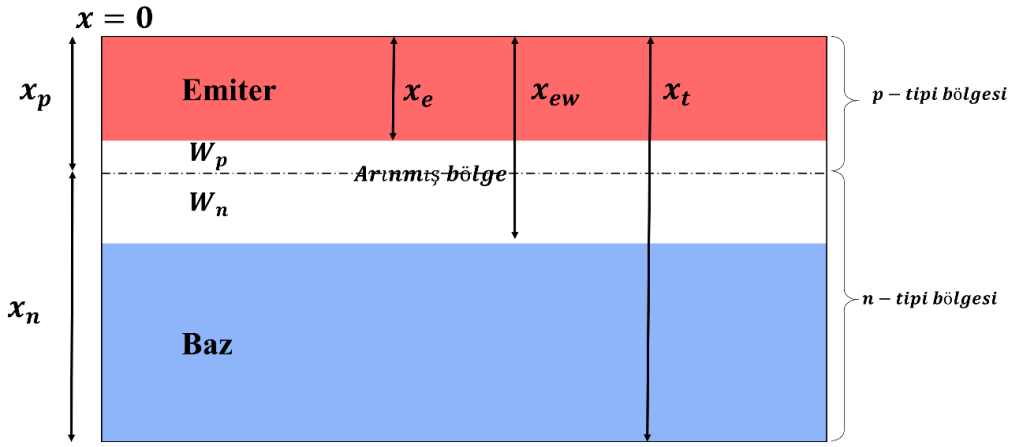
Şekil 3.1'de basit p-n eklemin tabaka yapısı gösterilmiştir. Burada *emiter* p-tipi yarıiletken *baz* ise n-tipi yarıiletkendir. Emiter bölgesindeki J_n fotoakım yoğunluğunu bulabilmek için Denklem (3.4)'te verilen süreklilik denklemini, ve ifadelerini aşağıda belirttiğimiz sınır şartları altında kullanarak hesaplayabiliriz. Bu sınır şartları emiter bölgesi için şöyledir:

$$-D_n \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} = S_n(n_p - n_{p0}) \qquad [x = 0]'\text{da} \tag{3.8}$$

$$n_p - n_{p0} = 0 \qquad [x = x_e]'\text{de} \tag{3.9}$$

Burada S_n emiter yarıiletkeninin yüzey rekombinasyon hızıdır. Bu sınır şartlarından ilki bize şunu söyler: $x = 0$'da yani yüzeyde ve yüzeye difüzyon uzunluğu kadar derinde üretilen serbest taşıyıcıların yüzeye ulaşmaları sonucunda yüzeyde rekombinasyona uğrarlar. İkinci sınır şartı ise $x = x_e$'de yani arınmış bölge kenarında iç elektrik alandan dolayı herhangi bir serbest taşıyıcı bulunmadığını ifade eder. Dolayısıyla denklem bu şartlar altında çözüldüğünde emiter bölgesindeki fotoakım yoğunluğu şu şekli alır:

$$J_n = \left[\frac{eb_g(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1}\right] \left[\frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} + \alpha L_n\right) - \exp(-\alpha x_e)\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\cosh\left(\frac{x_e}{L_n}\right) + \sinh\left(\frac{x_e}{L_n}\right)\right)}{\frac{S_n L_n}{D_n}\sinh\left(\frac{x_e}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{x_e}{L_n}\right)} - \alpha L_n \exp(-\alpha x_e)\right] \tag{3.10}$$



Şekil 3.1: p-n ekleminin tabaka yapısı [10].

Baz bölgesi için sınır şartlarını şu şekilde yazabiliriz.

$$p_n - p_{n0} = 0 \qquad x = x_e + W = x_{ew} \tag{3.11}$$

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p(p_n - p_{n0}) \qquad x = x_t \tag{3.12}$$

Burada S_p bazı oluşturan n-tipi yarıiletkenin yüzey rekombinasyon hızıdır. Bu şartlar altında (3.11) ve (3.12) denklemlerini kullanarak Denklem (3.7)'yi çözersek bazdaki fotoakım yoğunluğu şu şekilde elde edilir:

$$J_p = \left[\frac{eb_g(1-R)\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1}\right] \exp(-\alpha x_{ew})$$

$$\left[\alpha L_p - \frac{\frac{S_p L_p}{D_p}\left(\cosh\left(\frac{x_b}{L_p}\right) - \exp(-\alpha x_b)\right) + \sinh\left(\frac{x_b}{L_p}\right) + \alpha L_p \exp(-\alpha x_b)}{\frac{S_p L_p}{D_p}\sinh\left(\frac{x_b}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_b}{L_p}\right)}\right] \tag{3.13}$$

Arınmış bölgede oluşan fotoakımı sadece fotonların uyarılmasıyla üretilen taşıyıcılar oluşturur. Uyarılan taşıyıcılar rekombine olmadan iç elektrik alan etkisiyle ayrılırlar. Dolayısıyla bu bölgedeki fotoakım şu şekilde yazılabilir.

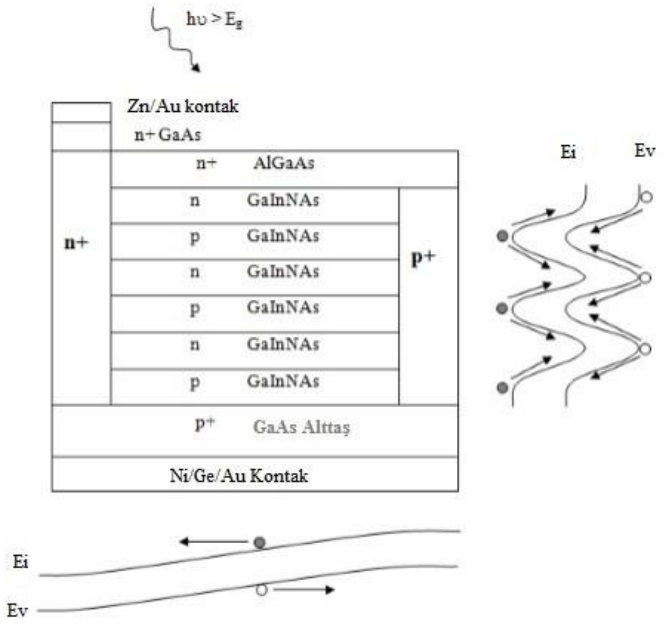
$$J_w = eb_g \exp(-\alpha x_e)\,(1 - \exp(-\alpha W)) \tag{3.14}$$

Sonuç olarak ışık altındaki bir p-n eklemin her bölgesinde oluşan fotoakım, taşıyıcıların sürüklenmesi ve difüzyon mekanizmaları göz önüne alınarak modellendiği için Denklem (3.10), (3.13) ve (3.14) *sürüklenme-difüzyon modeli* olarak bilinir [27].

3.1 *nipi* GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ

Bir *nipi* yapısı n-tipi, asal, p-tipi ve asal olarak değişen katkılamaya sahip tabakalardan oluşur [12,13]. Bu katkı profili Şekil 3.2'de gösterilen sinüssel değişime sahip bant diyagramının oluşmasına neden olur [12]. Eğer bir tabakanın kalınlığı taşıyıcıların difüzyon uzunluğundan küçükse, tabakalarda üretilen elektron boşluk çiftleri rekombinasyona uğrayamadan hızla ayrılır ve bir sonraki tabakaya ilerlerler. Bu tabakada çoğunluk taşıyıcı olurlar. Çoğunluk taşıyıcıların ömürleri azınlık taşıyıcılardan çok daha uzundur. Bu taşıyıcılar, *nipi* yapıdaki güneş hücresinin seçici kontakları (n^+ ve p^+) arasındaki tabakalar boyunca olan iç elektrik alanla kontaklara doğru sürüklenirler. Çünkü Şekil 3.2'den görüleceği gibi soldan n^+ ve sağdan p^+

kontakları *nipi* yapının her bir n^+-p-p^+ ya da n^+-n-p^+ eklemini oluşturacaklardır. Bu eklemlerde n^+ ve p^+ kontaklara göre p ve n katkısının daha az olduğu dikkate alındığında, sanki bu tabakalar asalmış gibi düşünülebilir.



Şekil 3.2: Çok eklemli GaInNAs tabanlı *nipi* güneş hücresi [12].

Soldan sağa oluşan ve çok sayıda ardışık olarak büyütülmüş GaInNAs tabakadan oluşan bu eklemlerin varlığı tabakalara paralel bir iç elektrik alan oluşmasını sağlar. Böylece difüzyon süreci ile eklemin iç elektrik alanıyla dikeyde tabakalara ayrılan elektron ve boşluklar yatay iç elektrik alan altında sürüklenerek kontaklara ulaşır. Kontak bölgeleri (n^+ ve p^+ bölgeler) birbirine yakın yapılırsa iç elektrik alan da büyük olacak ve taşıyıcılar saturasyon hızlarında kontaklara sürükleneceklerdir. Bir örnek üzerinde birbirine paralel ve belli aralıklarla dizilmiş n^+ ve p^+ bölgeleri yaratılabilir. Üst üste tabaka sayılarının çok olması da sorun yaratmayacaktır, çünkü taşıyıcılar dikey olarak kontaklara gitmeyecek her yatay tabakadaki yan kontaklara ulaşacaktır. Şekil 3.2'de gösterilen yapı bu çalışma kapsamında kuramsal olarak modellenen ve yalnızca *nipi* olarak tanımlanan GaInNAs tabanlı güneş hücresi yapısıdır.

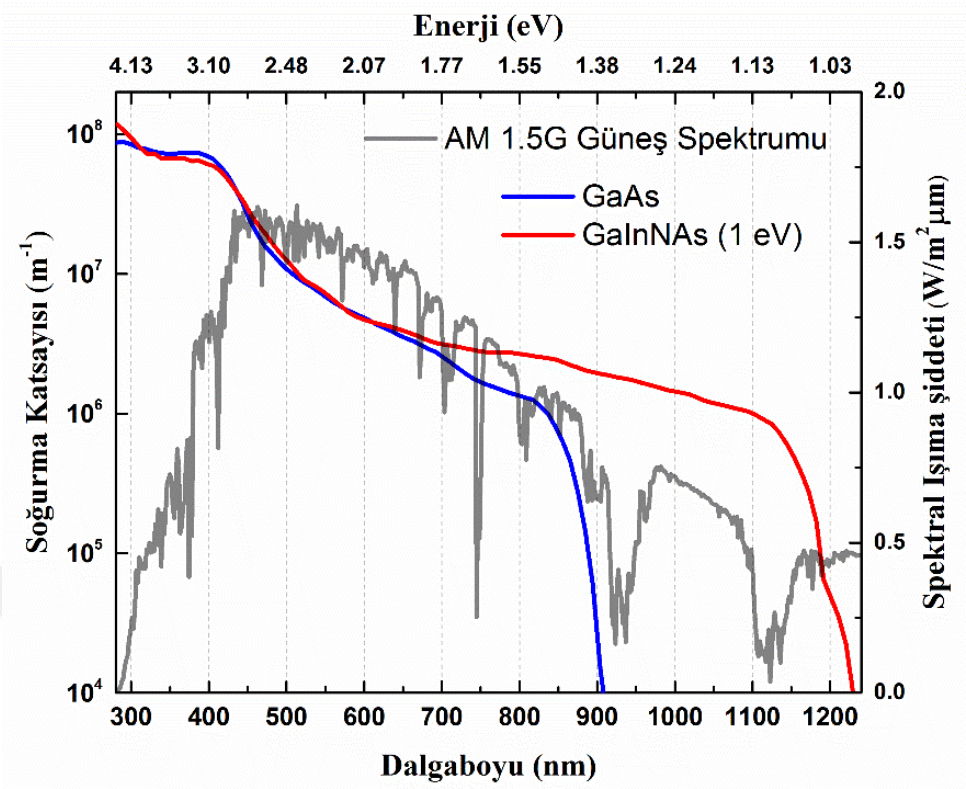
İdeal bir güneş hücresi tasarlanırken önemli parametrelerden güneş hücresi yapıları için her bir eklemi oluşturan yarıiletkenlerin örgü uyumlu olmasıdır. Bu nedenle bant aralığı daha düşük

olmasına rağmen, GaAs ile örgü uyumlu olan yarıiletkenlerin güneş hücresi uygulamalarında kullanılması daha yüksek verimli güneş hücrelerini yapmak için olanak sağlar.

Tablo 3.1: Bu tez kapsamında incelenen örneklerin hesaplamalarında kullanılan parametreler ve referansları.

Parametre	Sembol	[Birim]	GaAs	[Referans]	GaInNAs	[Referans]
Bant aralığı (300 K)	$\boldsymbol{E_g}$	$[eV]$	1.42	[28]	1.07	[29]
Azınlık elektron ömrü	$\boldsymbol{\tau_n}$	$[ns]$	10	[28]	0.5	[12]
Azınlık boşluk ömrü	$\boldsymbol{\tau_p}$	$[ns]$	10	[28]	0.5	[12]
Azınlık elektron mobilitesi	$\boldsymbol{\mu_n}$	$[\frac{cm^2}{s \cdot V}]$	8800	[28]	150	[12]
Azınlık boşluk mobilitesi	$\boldsymbol{\mu_p}$	$[\frac{cm^2}{s \cdot V}]$	400	[28]	150	[12]
n-tipi yüzey	$\boldsymbol{S_p}$	$[cm/s]$	1.9×10^6	[30]	1×10^6	[12]
p-tipi yüzey	$\boldsymbol{S_n}$	$[cm/s]$	4.2×10^6	[30]	1×10^6	[12]
Boşluğun etkin kütlesi	$\boldsymbol{m_h^*/m_0}$	-	0.5	[28]	0.52	[29]
Elektronun etkin kütlesi	$\boldsymbol{m_e^*/m_0}$	-	0.063	[28]	0.081	[29]

Şekil 3.3’te tez çalışmasında incelenen güneş hücrelerini oluşturan yarıiletkenlerin soğurma katsayıları verilmiştir. GaInNAs alaşımı direk bant aralıklı yarıiletkenler olup soğurma katsayıları bant aralığından büyük enerjideki fotonlar için GaAs’inki ile aynıdır. GaInNAs için soğurma katsayısı referans [15]’den alınmıştır.



Şekil 3.3: Bazı yarıiletkenlerin soğurma katsayılarının fotonun dalgaboyuna (enerjisine) bağlı olarak değişimi [10]. Gri renk çizgili grafik güneş spektrumunu göstermektedir.

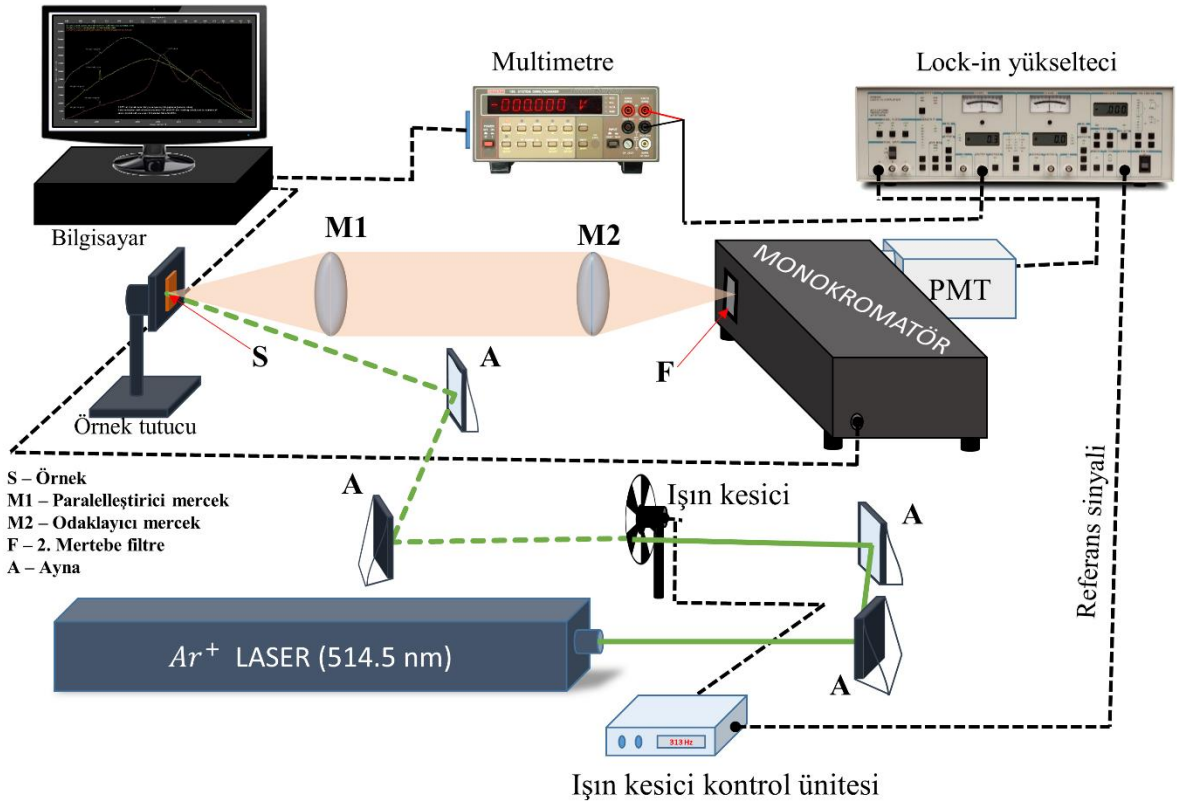
nipi yapılar iletkenlik bandındaki elektron durumları ve valans bandındaki boşluk durumları arasında bant aralığının olduğu süperlatis yapılarıdır. Fotonların soğurulmasıyla üretilen elektron ve boşlukların rekombine olmadan uzaysal olarak ayrılmaları *nipi* yapısını güneş hücresi uygulamaları için uygun hale getirir.

3.2 FOTOLÜMİNESANS

Fotolüminesans tekniği, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi yarıiletkenin bant aralığından daha yüksek foton enerjisi olan monokromatik ışığın, yarıiletken tarafından soğurulması sonucunda valans bandından iletkenlik bandına uyarılan elektronlar ile valans bandındaki boşlukların ışımalı rekombinasyonundan kaynaklanan ışıma, yarıiletkenin bant aralığı hakkında bilgi verir. Ayrıca düşük sıcaklıklarda fotolüminesans, yapıdaki kusurlar ve katkılar hakkında da bilgi verir. Bu çalışma kapsamında, fotolüminesans deneyi oda sıcaklığında yapıldığından sıcaklığa bağlılık incelenmemiştir.

Bu çalışma kapsamında güneş hücresi yapıların optik karakterizasyonu için kullanılan PL deney düzeneği Şekil 3.4'de verilmektedir. Uyarıcı ışın kaynağı olarak 514.5 nm'de ışıma yapan Ar^+

laser (Coherent Inova 70) kullanılmıştır. Laserden çıkan ışın **A** aynalar yardımıyla ışın kesiciden (Stanford Research System SR540) geçerek belirli bir frekansta modüle edilir. Modüle edilen laser ışını **S** örnek üzerine gelecek şekilde gönderilir. Örnekten farklı yönlerde ve farklı dalgaboylarında çıkan ışınlar, örnekten odak uzaklığı kadar mesafedeki **M1** ince kenarlı mercek yardımı ile paralel olarak aynı yönde ilerlerler. Paralel ışınlar **M2** mercek yardımıyla monokromatörün (Acton 2500i) girişine odaklanır. Ortamdaki herhangi bir yerden yansıyan laser ışığının monokromatöre girmesi **F** filtresi tarafından engellenir.



Şekil 3.4: Fotolüminesans deney düzeneğinin temsili şeması [10].

Monokromatör yardımı ile ışıma dalgaboyları taranır ve monokromatörün çıkışından dedektöre, yani fotoçoğaltıcı tüpe (GaInAs fotokatotlu Hamamatsu R955 PMT) gönderilir. Dedektörde elde edilen elektrik sinyali, ışın kesicinin frekansına kilitlenen Lock-in yükseltecine (Lock-in amplifier, LIA) (Stanford Research Systems SR530) gönderilerek sadece referans frekansındaki sinyal yükseltilerek multimetreye (Keithley 199) gönderilir. Monokromatörde

her bir adıma karşılık multimetrede elde edilen sinyal, bilgisayarda Labview programı yardımı ile eşzamanlı kaydedilir.

4. BULGULAR

Güneş hücreleri yarıiletkenlerin bant aralığından büyük enerjisi olan güneş spektrumunda verimli çalıştığı için bant aralığından küçük enerjisi olan fotonlar verimli kullanılmamaktadır. Dolayısıyla güneş spektrumunun mümkün olan tüm bölgesini kullanabilmek için farklı bant aralıklı yarıiletkenlerden faydalanmak gerekir. İdeal bir güneş hücresi tasarlanırken bütün fotonların aygıtın aktif bölgesinde soğurulması istenir. Bir güneş hücresinde aktif bölge azınlık elektron ve boşlukların difüzyon uzunluğu ile belirlenir. Bu durum aygıtın yüzeyinden itibaren aktif bölgenin derinliğine ve aktif bölgenin kalınlığına bir sınırlama getirir. Aynı zamanda elektromanyetik spektrumun elektrik enerjisi yaratımında yararlı olabilecek bölgesini belirler. Eğer foton enerjisi yarıiletkenin bant aralığından çok daha büyükse soğurma katsayısı (α) büyük olup, fotonların çoğu yüzeye yakın bölgede soğurulur ve elektron boşluk çiftlerinin çoğu yüzeye yakın bölgede yaratılır. Bu durumda eğer aktif bölge yarıiletkenin yüzeyinden uzaksa, fotonlar aktif bölge içine ilerleyemez, soğurma ve sonrasında elektron boşluk çiftlerinin üretimi gerçekleşmez. Aynı zamanda foton enerjisi yarıiletkenin bant aralığından çok daha büyükse elektron boşluk çiftleri iletkenlik ve valans bandı kenarları arasındaki enerjiden çok daha büyük enerjilerde yaratılır ve bu fazla enerjilerini fonon emisyonu ile kaybederler. Bu nedenle elektromanyetik enerji ısı olarak kaybedilir.

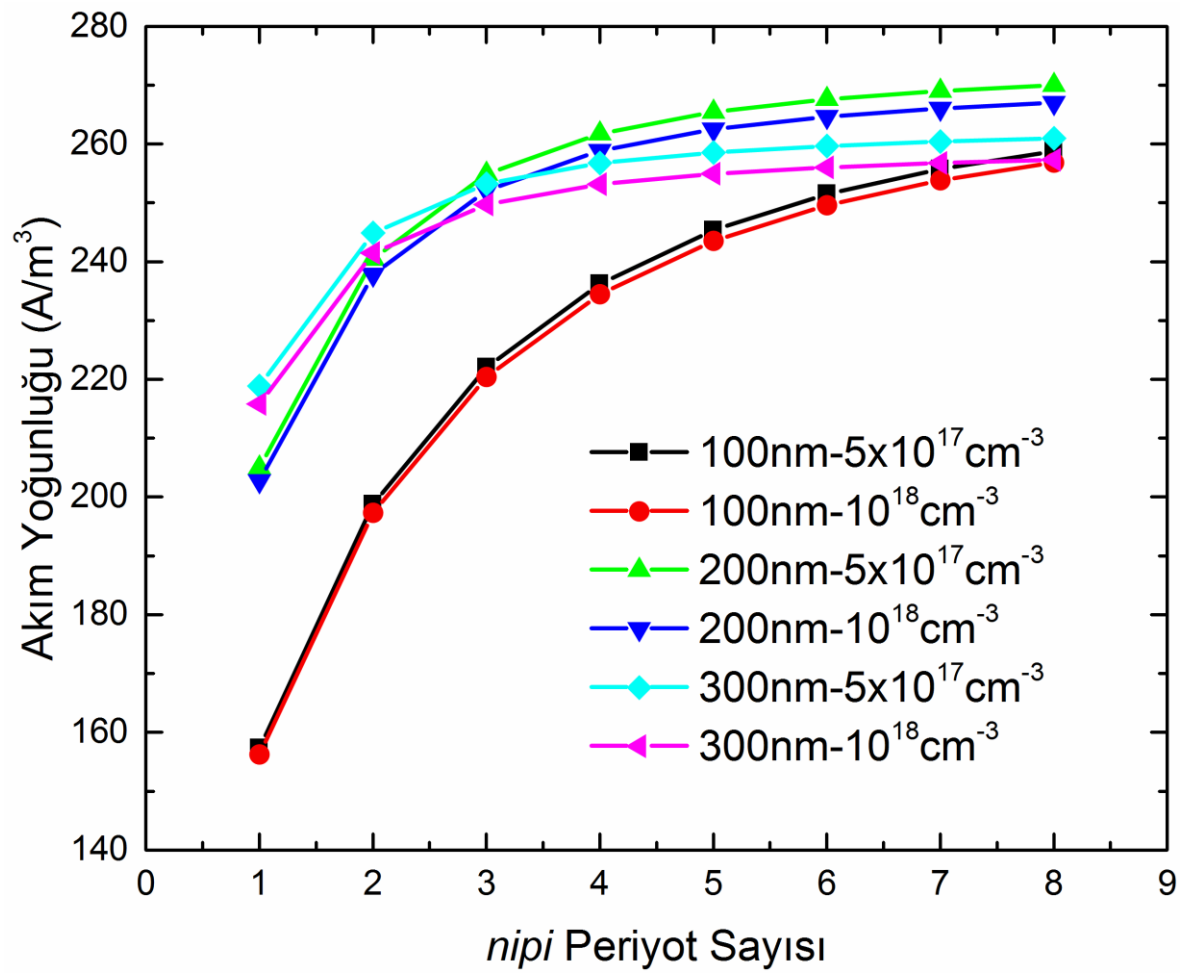
4.1 MODELLEME SONUÇLARI

Bu çalışma kapsamında incelenen 6 farklı *nipi* güneş hücre yapısının kendi aralarında fotovoltaik parametrelerinin karşılaştırılması ayrıntılı olarak bu kısımda verilmiştir. Akım-voltaj karakteristiğinden hesaplanan fotovoltaik parametrelerin *nipi* güneş hücresinin periyot sayısına göre değişimi önce açıklanarak daha sonra en yüksek verimli *nipi* güneş hücresinin J-V ve spektral duyarlılık grafikleri verilmiştir. Bu modelleme sonuçlarına göre daha iyi verimde çalışacak *nipi* tabanlı GaInNAs güneş hücresi önerilmiş olacaktır.

4.1.1 Akım-Voltaj Karakteristiği

Şekil 4.1'de *nipi* güneş hücrelerinin akım yoğunluklarının periyot sayısına göre değişiminin kendi aralarındaki karşılaştırılması verilmiştir. Hesaplamalarda GaInNAs yarıiletkenin bant aralığı yaklaşık 1 eV ve bu yarıiletkenin direk bant aralıklı olma özelliğini de göz önünde bulundurursak güneş spektrumunun 1 eV'den büyük bütün fotonların bu yarıiletkende

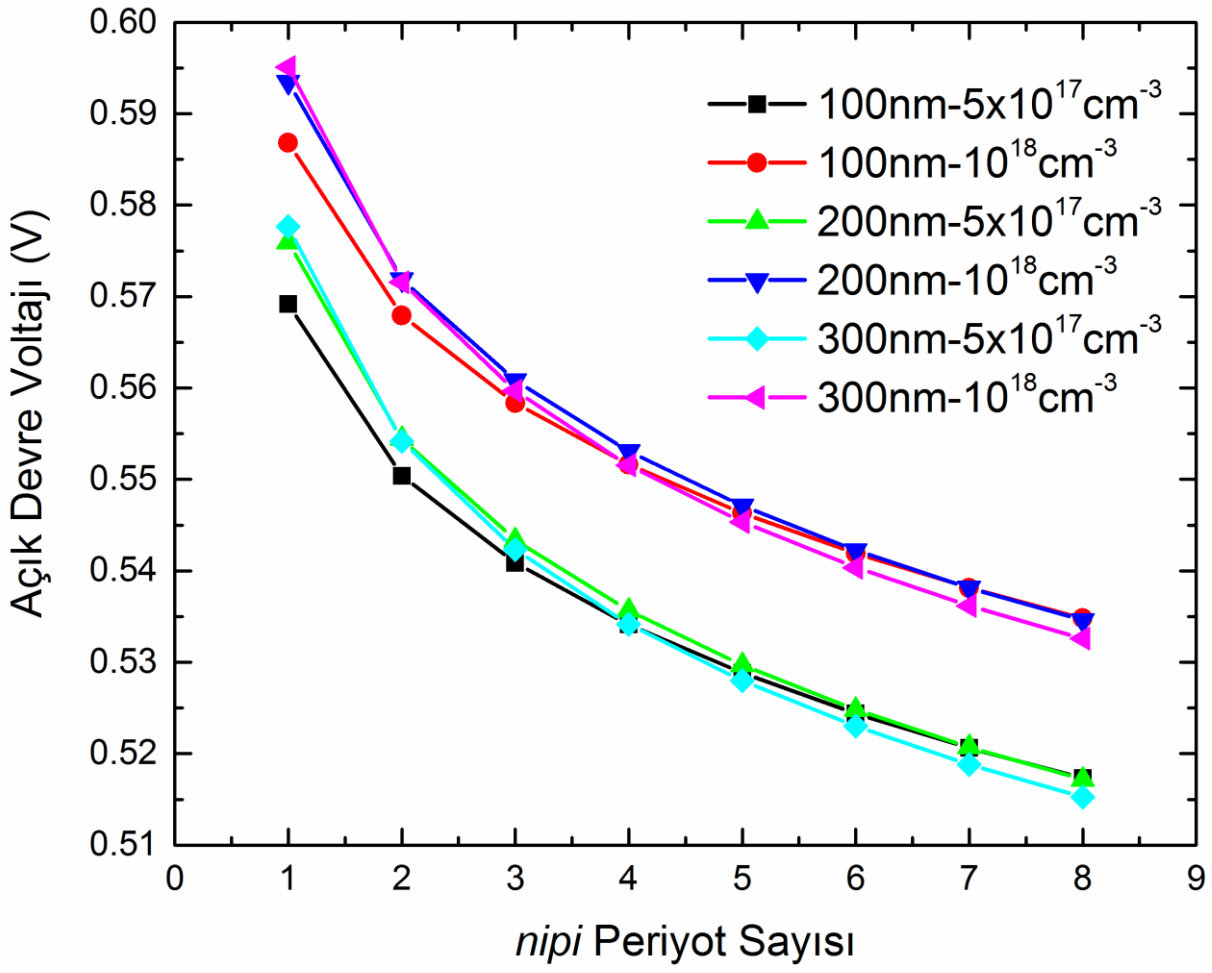
soğurulması için 2 ila 3 µm kalınlıkta olmasının yeterli olacağı dikkate alınarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Buna göre şekilden de görüldüğü gibi her bir katmanın kalınlığı 100nm olduğu durum için eklemlerin katkılama yoğunluklarına göre kısa devre akım yoğunluğu ya da başka bir deyişle fotoakım yoğunluğu diğerlerine göre çok daha düşüktür. Şekil 4.1'in analizi sonucunda en iyi değerler *nipi* eklemlerin kalınlığı 200nm olduğu *nipi* yapı için geçerlidir. Ancak bu iki yapı da kendi arasında katkılama yoğunluğuna göre ikiye ayrılmaktadır ve burada da en iyi değer fotoakım açısından bakıldığında katkılama yoğunluğu $5 \cdot 10^{17}\ cm^{-3}$ olan *nipi* yapı için geçerlidir. Katkılama yoğunluklarının bir birine yakın olması fotoakıma çok büyük etki olarak yansımadığı da açıkça görülebilir.



Şekil 4.1: Farklı kalınlıklarda ve farklı katkılama oranlarında 8 periotlu *nipi* güneş hücresinin akım yoğunluğunun periot sayısına göre değişimi.

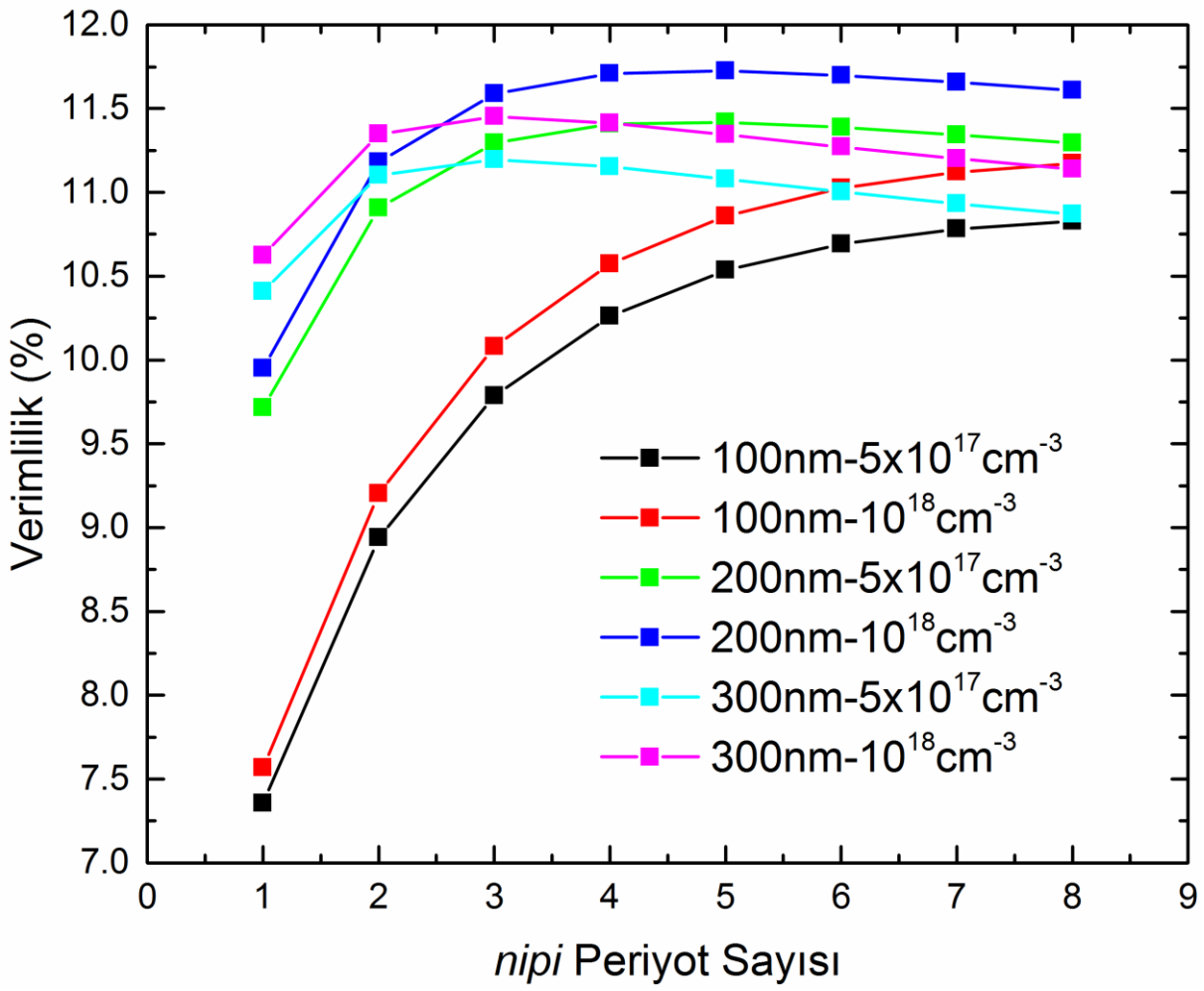
Güneş hücrelerinin üzerine ışık düştüğünde uçlarında okuduğumuz voltaj değerine açık devre voltajı denir. Kısaca Voc olarak gösterilen açık devre voltaj değeri güneş hücresini oluşturan yarıiletkenin n ve p tipi bölgelerinde oluşan Fermi seviyelerinin farkına eşdeğerdir. Güneş

hücrelerinde katkılama yoğunluğu yukarıda bahsettiğimiz gibi fotoakımı pek de etkilemezken açık devre voltajını önemli derecede etkisi altına almaktadır. Çünkü katkılama yoğunluğu arrtıkça yarıiletkenin Fermi seviyesi n tipinde iletkenlik bandına, p tipinde ise valans bandına yaklaşarak Fermi seviyelerinin arasındaki farkı oldukça büyütmektedir. Bu durum doğrudan açık devre voltajını etkilemektedir. Şekil 4.2'de verilen grafik bu durumu açıkça gözler önüne sermektedir. Bu şekil *nipi* güneş hücresinin açık devre voltajının periyot sayısına göre değişiminin farklı tasarımdaki *nipi* yapılar arasındaki karşılaştırmasını içermektedir. Şekilden görüldüğü gibi 6 farklı *nipi* yapıya ait Voc değişimi iki ana hatta ayrılmış durumda. Düşük voltaj değerindeki hat $5 \cdot 10^{17}\ cm^{-3}$ katkılama yoğunluğuna sahip *nipi* yapılara, yüksek voltaj değerindeki hat ise $1 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}$ katkılama yoğunluğuna sahip *nipi* yapılara aittir.



Şekil 4.2: Üç farklı kalınlığa ve her bir kalınlıkta iki farklı katkılama oranlarıyla toplamda 6 farklı *nipi* güneş hücresinin açık devre voltaj değerinin periyot sayısına göre değişimi.

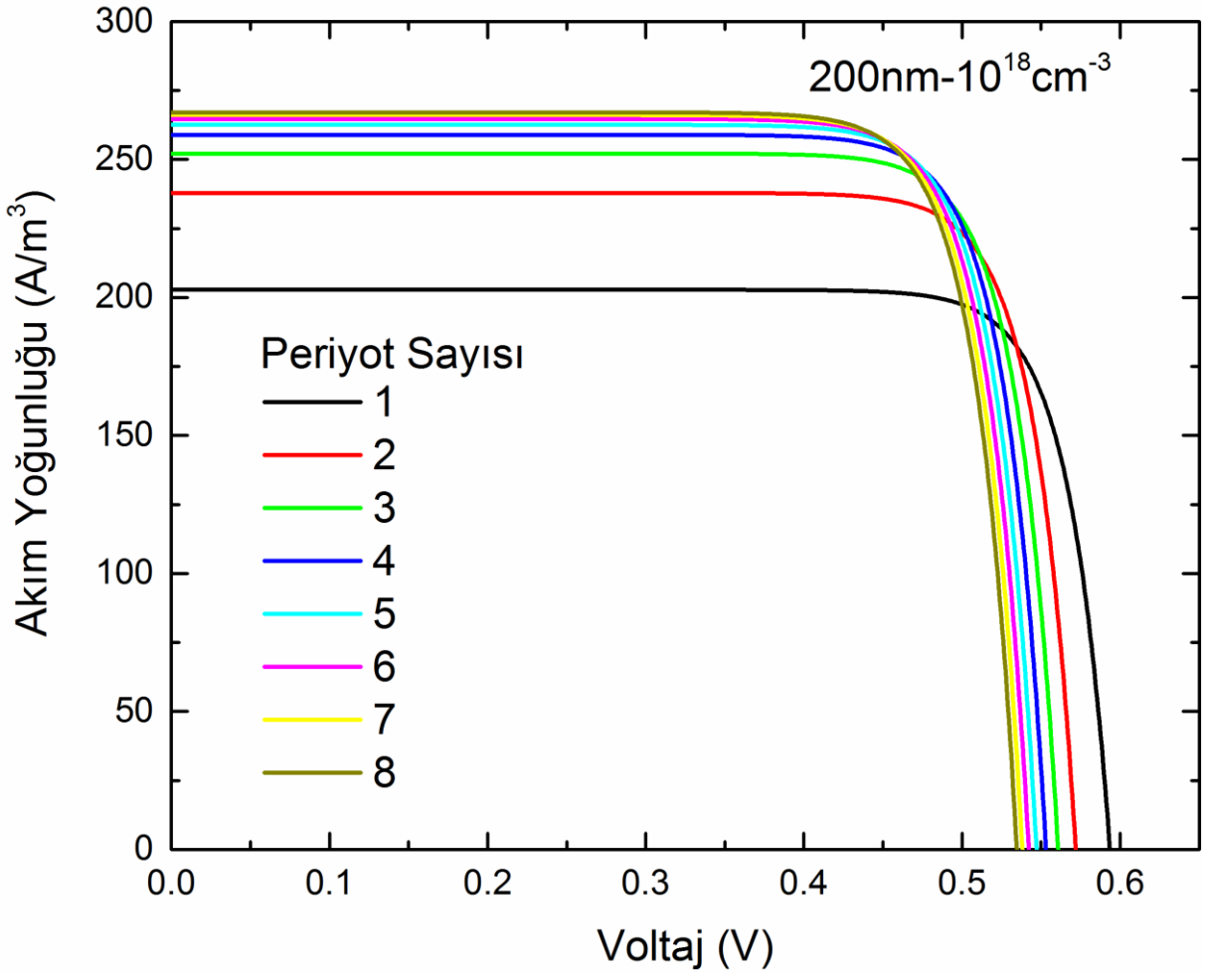
Her bir periyot için grafik değerlendirildiğinde kalınlığın artması Voc değerinin düşmesine sebep olduğunu görebiliriz. Çünkü kalınlık arttıkça p-n eklemdeki difüzyon akımı artmaktadır, dolayısıyla güneş hücresinin açık devre voltajı azalmaktadır. Difüzyon akımının küçük olması güneş hücresinden elde edilen fotoakımını pek etkilemezken açık devre voltajını doğrudan etkileyerek güneş hücresinin verimliliğini ve kalitesini belirleyici parametre konumunu almaktadır. Şekil 4.3'te GaInNAs *nipi* güneş hücrelerinin veriminin periyot sayısına göre değişimi ve bir birileriyle karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4.3: *nipi* güneş hücresinin verimliliğinin periyot sayısına göre, her bir katmanın kalınlığı ve katkılama oranına bağlı olarak değişimi.

Şekil 4.3'ten de açıkça görüldüğü gibi 100nm, 200nm ve 300nm kalınlıklar için katkılama yoğunluğu yüksek olan *nipi* güneş hücresinin veriminde artış sağlanmaktadır. Her bir katmanın kalınlığı ince olduğundan 100nm kalınlıktaki *nipi* güneş hücresinde 8 periyotta toplam kalınlık güneş spektrumunun 1 eV enerjiden büyük fotonlarını tamamen soğurmaya yetmediği için

verimin kalınlığa göre değişimi 8.periyota kadar artmaya devam etmiştir. Ancak 300nm kalınlıklı *nipi* güneş hücre yapısında verimin hızlı bir şekilde 3. Periyotta maksimum değerine ulaşarak daha sonraki periyotlarda bu değer azalmaya başlamıştır. Bu durum fotonların oluşturduğu elektron ve boşluk çiftinin eklemdeki iç elektrik alan altında farklı hızlarda hareket etmelerinden kaynaklanmaktadır. Yani elektron ve boşluk farklı etkin kütlelere sahiptir, dolayısıyla elektrik alan altında üzerlerine farklı büyüklükte kuvvet etki etmektedir. Bu yüzden genellikle güneş hücreleri tasarlanırken azınlık boşlukların daha kısa yol kat ederek kontaklara ulaşmasının sağlanması için emiter tabakaları daha ince yapılmaktadır.



Şekil 4.4: En yüksek verimliliğe sahip tabaka kalınlığı 200nm ve katkılama oranı yani $N_D = N_A = 1 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}$ yoğunluğunda olan *nipi* güneş hücresinin eklem periyoduna göre J-V karakteristiğinin değişimi.

Bu çalışmada incelenen p-n eklemlerinden oluşan *nipi* yapısında p-n eklemleri hem kalınlık açısından hem de katkılama yoğunluğu açısından homojen bir yapıya sahiptirler. Bu homojenite durumu 200 nm kalınlığındaki tabakalara sahip *nipi* güneş hücresinin diğerlerine göre daha yüksek verime sahip olmasına neden olmaktadır. Şekil 4.4'te eklem tabaka kalınlıkları 200nm ve katkılama yoğunlukları $N_D = N_A = 2 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}$ olan *nipi* güneş hücre yapısının her bir eklemi için J-V karakteristiği verilmiştir. J-V karakteristiği hesaplanırken güneş hücresinin üzerine gelen ışık spektrumunun AM 1.5G olduğu göz önüne alınmıştır. Grafikten de görüldüğü gibi ilk eklem en düşük fotoakıma ve en yüksek açık devre voltajına sahip eklemdir. Eklem sayısı arttıkça yani güneş hücresinin kalınlığı arttıkça karanlık akımın da miktarı artacağı için açık devre voltajında azalma ancak fotoakım değerinde önemli derecede artma gözlenmektedir.

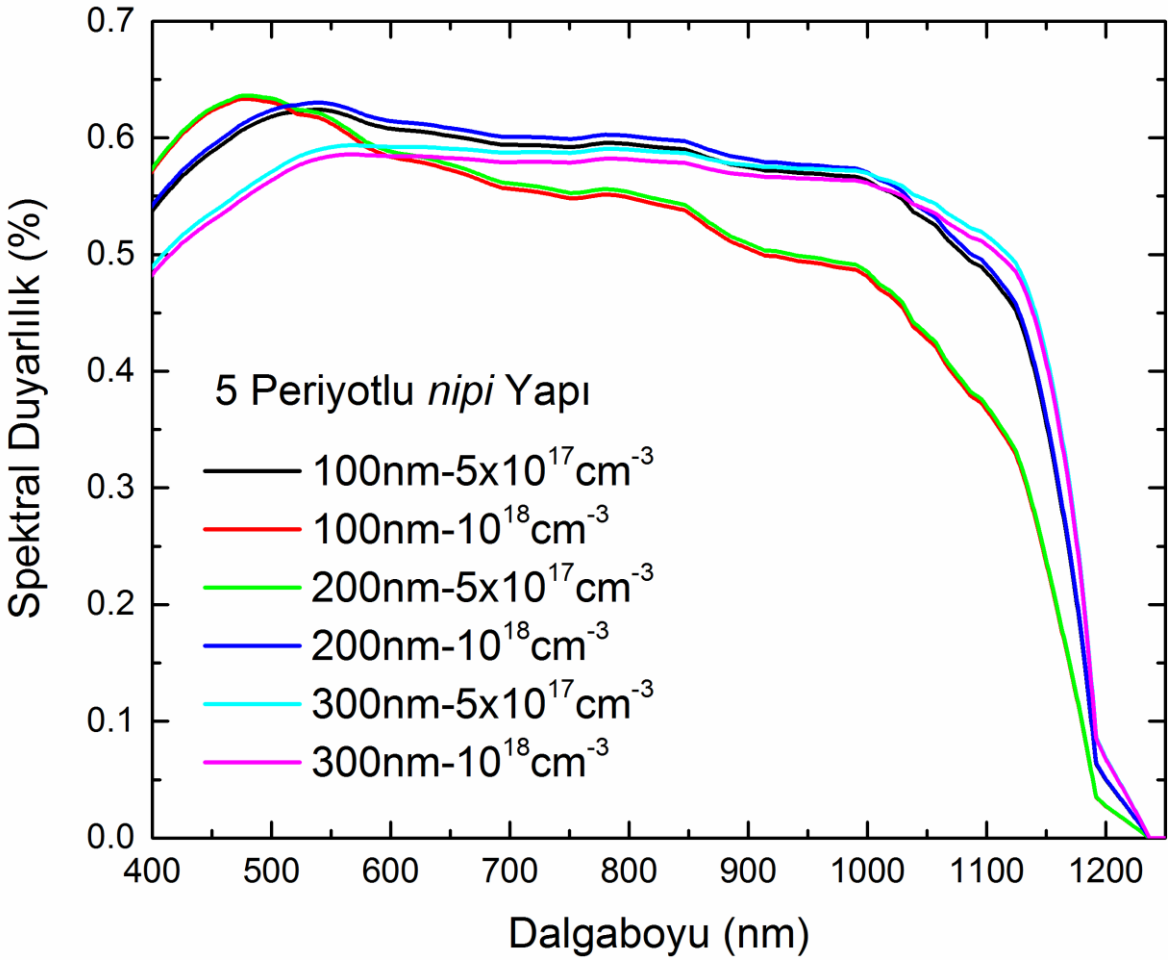
4.1.2 Spektral Duyarlılık

Güneş hücrelerinin spektral duyarlılığı başka bir deyişle dış kuantum verimi, üzerine ışık düştüğünde kontaklarda oluşan elektriksel gücün güneş hücresine giren ışık gücüne olan oranıdır. Spektral duyarlılık ölçümü monokromatik ışık altında güneş hücresinin uçlarında oluşan fotoakım her bir dalgaboyu için kaydedilerek yapılır. Simülasyon sürecin de ise güneş hücresinin emiter, baz ve arınmış bölgelerinde oluşan fotoakım simülasyonda kullanılan AM 1.5G güneş spektrumunun her bir dalgaboyundaki şiddetine bölünerek çizdirilir.

$$SR(\lambda) = \frac{J_{SC}(\lambda)}{b_g(\lambda)} \tag{4.1}$$

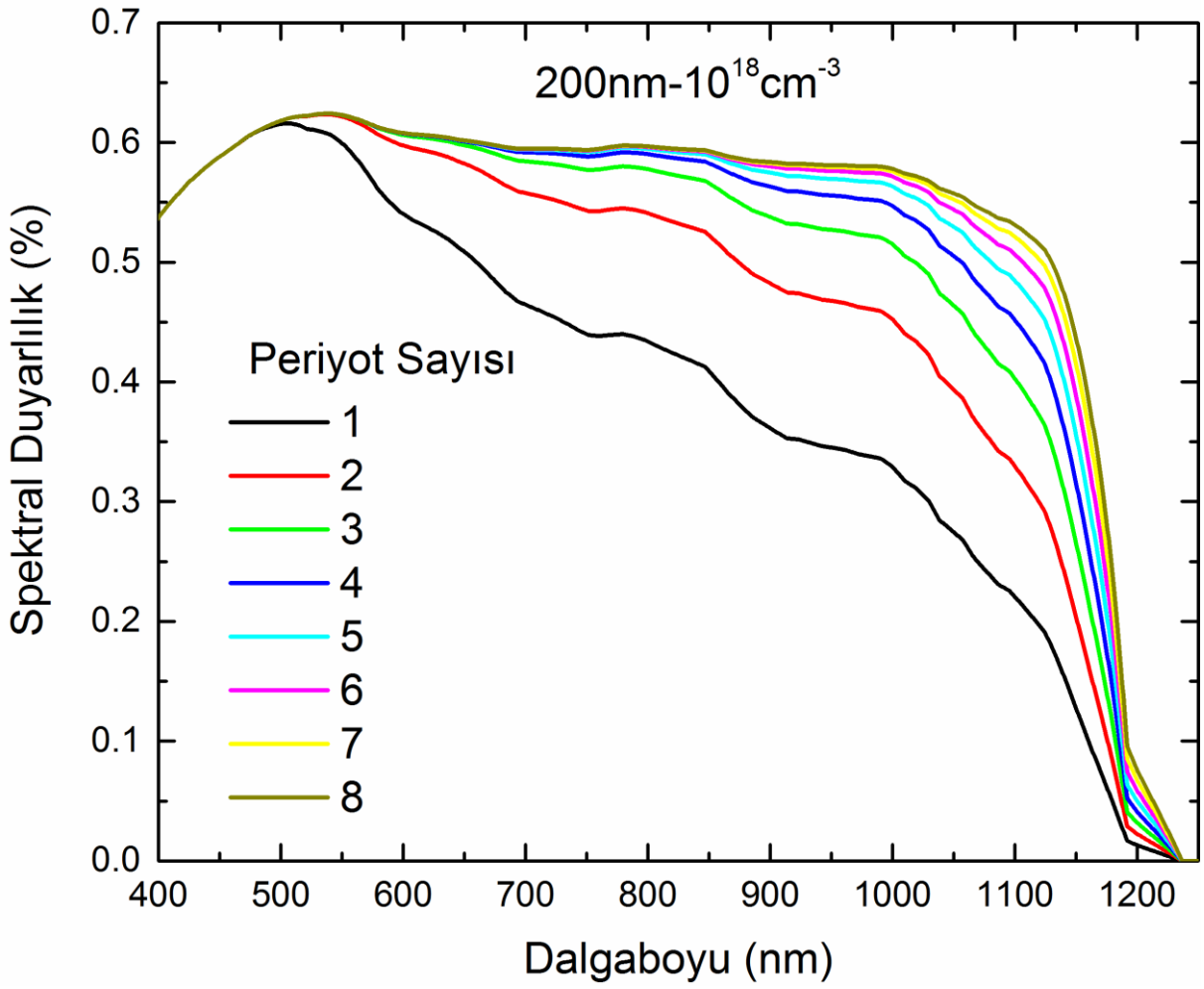
Burada $SR(\lambda)$ – her bir dalgaboyu için güneş hücresinin spektral duyarlılığı, birimsizdir ve 0 ila 1 arasında değer almaktadır. Günümüzde en yüksek spektral duyarlılık III-V grubu yarıiletkenlere (GaAs tabanlı) dayalı çok eklemli güneş hücrelerinden elde edilmektedir [31]. Ayrıca spektral duyarlılık (SR) spektrumu güneş hücresinin kalitesi ile ilgili de bilgi vermektedir. Örnek olarak: direk bant aralıklı yarıiletkenlerde bant aralığından yüksek enerjideki fotonların verimli elektrik enerjisine dönüştürülmesinde eksiklikler vardır. Bu doğrudan SR spektrumunda azalma olarak gözlenmektedir. İndirek bant aralıklı yarıiletkenlerde ise yüksek enerjideki fotonların verimli kullanamaması dışında bant aralığına yakın enerjideki fotonların da verimli dönüşümü sağlanamamaktadır. Bu durum da yine SR spektrumunda düşüş olarak gözlenir ve günümüzdeki araştırmalar spektrumun yukarıda bahsi geçen kısımların verimli dönüştürülmesi yönünde iyi bir gelişme olması için yürütülmektedir.

Şekil 4.5'te bu tez kapsamında incelenen 6 farklı GaInNAs *nipi* güneş hücrelerinin spektral duyarlılık grafikleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi katkı yoğunluğunun GaInNAs *nipi* güneş hücresinin performansı üzerindeki etkisi dikkate değer büyüklüktedir. Ancak *nipi* yapısını oluşturan p – ve n – tipi katmanların kalınlığı önemli derecede rol oynamaktadır. 100nm kalınlıklı katmanlardan oluşan *nipi* yapısının spektral duyarlılığı güneş spektrumunun yüksek enerji bölgesine yani ultraviyole bölgesine daha çok duyarlı iken kalınlığın artması bu bölgedeki duyarlılığın azalmasına neden olmuştur. Ayrıca 100nm kalınlıklı katmanlardan oluşan *nipi* güneş hücresinin güneş spektrumunun 500nm ila 1200nm arasındaki duyarlılığı diğerlerine göre çok daha düşüktür. Çünkü güneş hücresinin toplam kalınlığı yeterince kalın olmadığı için bu bölgedeki fotonların birçoğu soğurulmadan geçmektedir.



Şekil 4.5: *nipi* güneş hücresinde en yüksek verimin elde edildiği 5 periyotlu yapısının farklı tabaka kalınlıkları ve farklı katkılama oranlarına göre spektral duyarlılık spektrumunun değişimi.

300nm *nipi* güneş hücresine bakıldığında bant aralığına yakın enerjideki fotonların soğurulmasında verimli olmuştur.



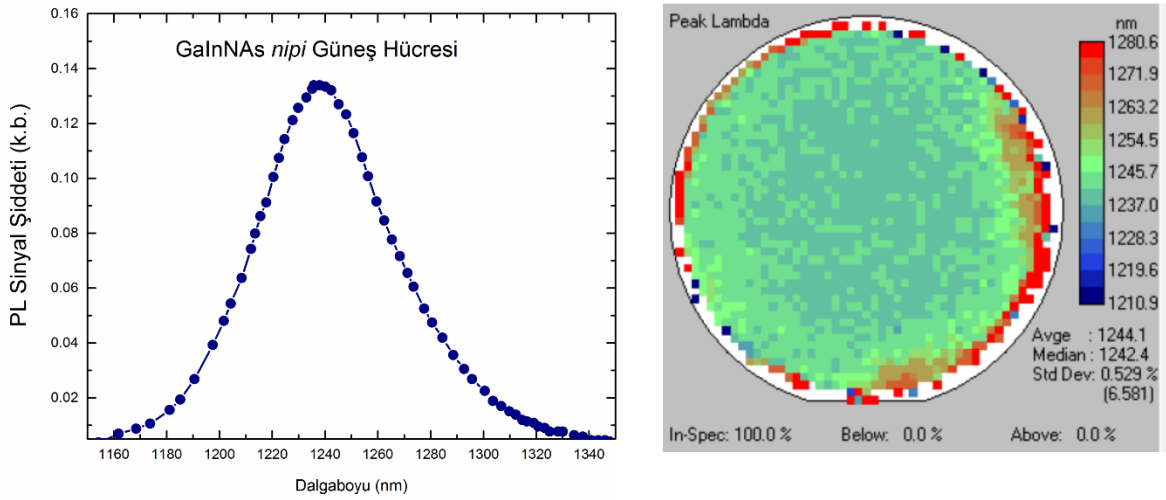
Şekil 4.6: En yüksek verimliliğe sahip tabaka kalınlığı 200nm ve katkılama oranı yani $N_D = N_A = 1 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}$ yoğunluğunda olan *nipi* güneş hücresinin eklem periyoduna göre spektral duyarlılık spektrumunun değişimi.

Şekil 4.5'den 200nm kalınlıklı katmanlardan ve her bir katmanın katkılama yoğunluğu $N_D = N_A = 2 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}$ *nipi* güneş hücresinin optimum değerde daha verimli olduğu açıkça görülebilir. Şekil 4.6'da yukarıda bahsi geçen optimum değerdeki güneş hücresinin her bir katmanı için spektral duyarlılık grafiği verilmiştir. Burada da açıkça kalınlığın etkisi bant aralığına yakın bölgelerdeki duyarlılığın büyüklüğüne göre değiştiği görülebilir. Bu yüzden 5 periyotlu olarak tasarlandığı durumda bu *nipi* güneş hücresi en yüksek ve en optimum değerde çalışacağı öngörülmüştür. Bu öngörüler sonucunda da Tampere Teknoloji Üniversitesine bu tasarıma göre örnek MBE sisteminde büyüttürülmüştür. Bir sonraki bölümde deneysel sonuçlara yer verilmiştir.

4.2 DENEYSEL SONUÇLAR

4.2.1 Fotolüminesans

Bu tez kapsamında ilk tasarım olarak GaInNAs güneş hücre yapısının oda sıcaklığında bant aralığı değeri 1.1 eV olarak bulunmuştur. Planlana GaInNAs *nipi* güneş hücre yapısının bant aralığı 1 eV olacak şekilde tasarımı modifiye edilmiş ve yapı Tampere Teknik Üniversitesi'nde büyüttürülmüştür. 5 periyotlu GaInNAs *nipi* güneş hücre yapısının bant aralığının belirlenmesi için oda sıcaklığında PL ölçümleri örneği büyüten merkez tarafından yapılmıştır. Güneş hücre yapısının PL spektrumu ve büyütülmüş olan 2 inç'lik wafer boyunca PL pik değerinin genel haritalaması



Şekil 4.7: Beş periyotlu GaInNAs *nipi* güneş hücre yapısının PL spektrumu ve örnek yüzey haritalaması

Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi GaInNAs yapısının oda sıcaklığında bant aralığı değeri yaklaşık 1 eV olarak bulunmuştur. Ayrıca, büyütme kalitesinin belirlenmesi için yapılmış olan PL haritalamasında örneğin oldukça iyi bir homojen dağılıma sahip olduğu görülmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışma kapsamında, klasik çok eklemli güneş hücreleri ile kıyaslandığında daha yüksek verime sahip *nipi* GaInNAs güneş hücresinin teorik olarak modellenmesi yapılmıştır. GaInNAs tabanlı güneş hücresinde taşıyıcı mobilitelerinin düşük olmasından kaynaklı, rekombinasyon zamanının kısa olmasından dolayı eklemde oluşan taşıyıcılar azınlık taşıyıcı oldukları bölgede fazla ilerleyemeden rekombine olup, güneş hücresinin akım ve voltajına katkıda bulunamamaktadır. Önerilen yeni nesil *nipi* GaInNAs güneş hücresinde ise bu kayıpların, *nipi* yapı ve paralel kontaklar kullanılarak giderilmesi hedeflenmiştir. *nipi* yapıdaki GaInNAs tabanlı hücrede tabaka kalınlıkları GaInNAs'da taşıyıcıların difüzyon uzunluğundan daha ince tasarlanacak ve soğurmanın fazla olması için de bu eklem çok tabakalı olarak geliştirilecektir. Ayrıca bu tasarımla klasik GaInP/GaAs/Ge çok eklemli güneş hücresinde elde edilen verimden daha yüksek verime ulaşılması amaçlanmaktadır. Çünkü bu çok eklemli klasik güneş hücresinde Ge yarıiletkeni GaAs ile örgü uyumlu olmayıp, arayüzey pürüzlülükleri nedeniyle güneş hücresinin kısa devre akımı sınırlanmaktadır. Ayrıca indirek bant aralıklı olmasından dolayı Ge yarıiletkeninin soğurma katsayısı ve Ge'da taşıyıcıların mobilitesi GaAs'den daha düşüktür. Bunlar da güneş hücresinde Ge-tabanlı eklemde verimin düşük olmasına neden olmaktadır.

Güneş hücrelerinin oda sıcaklığında fotolüminesans ölçümleri yapılarak güneş hücresini oluşturan malzemelerin bant aralığı enerjileri belirlendi. Fotolüminesans ölçümlerinden elde edilen ışıma karakteristikleri baz alınarak gerçekleştirildi ve güneş hücrelerinin spektrumdaki duyarlılık bölgesi kuramsal olarak belirlendi.

KAYNAKLAR

[1]. Shockley, W., and Queisser, H. J., 1961, Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells, *J. Appl. Phys.* 32 (3), 510–519.

[2]. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., and Dunlop, E. D., 2012, Solar cell efficiency tables (version 40), *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 20 (5), 606–614.

[3]. Vos, A. De, 1980, Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 13 (5), 839–846.

[4]. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E. D., Levi, D. H., and Ho-Baillie, A. W. Y., 2017, Solar cell efficiency tables (version 49), *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 25 (1), 3–13.

[5]. Friedman, D. J., Geisz, J. F., Kurtz, S. R., and Olson, J. M., 1998, 1-eV GaInNAs Solar Cells for Ultrahigh- Efficiency Multijunction Devices, *2nd World Conf. Exhib. Photovolt. Sol. Energy Convers.* 3–7.

[6]. Kondow, M., Uomi, K., Niwa, A., Kitatani, T., Watahiki, S., and Yazawa, Y., 1996, GaInNAs: A Novel Material for Long-Wavelength-Range Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance, *Jpn. J. Appl. Phys.* 35 (Part 1, No. 2B), 1273–1275.

[7]. Erol, A., 2008, *Dilute III-V Nitride Semiconductor and Material Systems*, Berlin, Springer-Verlag, ISBN: 978-3-540-74528-0.

[8]. Kurtz, S., Allerman, A. A., Jones, E. D., Gee, J. M., Banas, J. J., and Hammons, B. E., 1999, InGaAsN solar cells with 1.0 eV band gap, lattice matched to GaAs, *Appl. Phys. Lett.* 74 (1999), 729–731.

[9]. Donmez, O., Sarcan, F., Lisesivdin, S. B., Vaughan, M. P., Erol, A., Gunes, M., Arikan, M. C., Puustinen, J., and Guina, M., 2014, Analytic modeling of temperature dependence of 2D carrier mobility in as-grown and annealed GaInNAs/GaAs quantum well structures, *Semicond. Sci. Technol.* IOP Publishing. 29 (12), 125009.

[10]. Muhammetgulyyev, A., 2017, I*II-V Grubu Yarıiletkenlere Dayalı Güneş Hücrelerinin Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Istanbul Üniversitesi.

[11]. Hou, Y., Mei, Z., and Du, X., 2014, Semiconductor ultraviolet photodetectors based on ZnO and Mg x Zn 1− x O, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 47 (28), 283001.

[12]. Royall, B., 2011, *GaInNAs / GaAs Multiple Quantum Well and n-i-p-i Solar Cells*, Thesis (PhD), University of Essex.

[13]. Mazzucato, S., Royall, B., Ketlhwaafetse, R., Balkan, N., Salmi, J., Puustinen, J., Guina, M., Smith, A., and Gwilliam, R., 2012, Dilute nitride and GaAs n-i-p-i solar cells., *Nanoscale Res. Lett.* Nanoscale Research Letters. 7 (1), 631.

[14]. Muhammetgulyyev, A., Kinaci, B., Aho, A., Yalcin, Y., Cetinkaya, C., Kuruoglu, F.,

Guina, M., and Erol, A., 2019, V-groove etched 1-eV-GaInNAs nipi solar cell, *Appl. Phys. A.* Springer Berlin Heidelberg. 125 (1), 27.

[15]. Geisz, J. F., and Friedman, D. J., 2002, III N V semiconductors for solar photovoltaic applications, *Semicond. Sci. Technol.* 17 (8), 769–777.

[16]. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., and Dunlop, E. D., 2013, Solar cell efficiency tables (version 41), *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 21 (1), 1–11.

[17]. Aho, A., Tukiainen, A., Korpijärvi, V. M., Polojärvi, V., Salmi, J., and Guina, M., 2012, Comparison of GaInNAs and GaInNAsSb solar cells grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy, 49–52.

[18]. Aho, A., Isoaho, R., Tukiainen, A., Gori, G., Campesato, R., and Guina, M., 2018, Dilute nitride triple junction solar cells for space applications: Progress towards highest AM0 efficiency, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* (February), 6–10.

[19]. Tukiainen, A., Aho, A., Gori, G., Polojärvi, V., Casale, M., Greco, E., Isoaho, R., Aho, T., Raappana, M., Campesato, R., and Guina, M., 2016, High-efficiency GaInP/GaAs/GaInNAs solar cells grown by combined MBE-MOCVD technique, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 24 (7), 914–919.

[20]. Royall, B., and Balkan, N., 2009, Dilute nitride n-i-p-i solar cells, *Microelectronics J.* 40 (3), 396–398.

[21]. Royall, B., and Balkan, N., 2011, Modelling of multijunction solar cells with dilute nitride n-i-p-i junctions, *Phys. Status Solidi Basic Res.* 248 (5), 1203–1206.

[22]. Freundlich, A., Fotkatzikis, A., Bhusal, L., Williams, L., Alemu, A., Zhu, W., Coaquira, J. A. H., Feltrin, A., and Radhakrishnan, G., 2007, III-V dilute nitride-based multi-quantum well solar cell, *J. Cryst. Growth*. 301–302 (SPEC. ISS.), 993–996.

[23]. Courel, M., Rimada, J. C., and Hernández, L., 2012, GaAs/GaInNAs quantum well and superlattice solar cell, *Appl. Phys. Lett.* 100 (7).

[24]. Royall, B., Balkan, N., Mazzucato, S., Khalil, H., Hugues, M., and Roberts, J. S., 2011, Comparative study of GaAs and GaInNAs/GaAs multi-quantum well solar cells, *Phys. Status Solidi Basic Res.* 248 (5), 1191–1194.

[25]. Polojärvi, V., Pavelescu, E. M., Schramm, A., Tukiainen, A., Aho, A., Puustinen, J., and Guina, M., 2015, Optical properties and thermionic emission in solar cells with InAs quantum dots embedded within GaNAs and GaInNAs, *Scr. Mater.* 108 , 122–125.

[26]. Yukimune, M., Fujiwara, R., Mita, T., Tsuda, N., Natsui, J., Shimizu, Y., Jansson, M., Balagula, R., Chen, W. M., Buyanova, I. A., and Ishikawa, F., 2019, Molecular beam epitaxial growth of dilute nitride GaNAs and GaInNAs nanowires, *Nanotechnology*. 30 (24), 244002.

[27]. Hovel, H. J., 1975, *Semiconductors and Semimetals Volume 11: Solar Cells*, Academic Press, ISBN: 0-12-752111-9.

[28]. Nayak, P. P., Dutta, J. P., and Mishra, G. P., 2015, Efficient InGaP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* Elsevier Ltd. 18 (3), 325–335.

[29]. Richard, K. M., 2016, *Comparative Study of Dilute Nitride and Bismide Sub-Junctions for Tandem Solar Cells*, Thesis (PhD), University of Essex.

[30]. Ito, H., and Ishibashi, T., 1994, Surface Recombination Velocity in p-Type GaAs, *Jpn. J. Appl. Phys.* 33 (Part 1, No.1A), 88–89.

[31]. Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., and Ho-Baillie, A. W. Y., 2019, Solar cell efficiency tables (Version 53), *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 27 (1), 3–12.

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Fatima Huseynzade
Doğum Yeri	Sabirabad
Doğum Tarihi	29.08.1994
Uyruğu	❒ T.C. ☑ Diğer: Azerbaycan
Telefon	+905424943987
E-Posta Adresi	fatimahuseynzadeh@gmail.com
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Bakü Devlet Üniversitesi
Fakülte	Fizik
Bölümü	Fizik-İngilizce
Mezuniyet Yılı	30.06.2017

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Genel Fizik

Makale ve Bildiriler