TEK VE ÇOK EKLEMLİ GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRELERİNİN İKİ BOYUTLU MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Tahir KARADAĞ
161405201

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik – Elektronik Mühendisliği
Danışman: Doç. Dr. Nevin Taşaltın

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mayıs, 2019

TEK VE ÇOK EKLEMLİ GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRELERİNİN İKİ BOYUTLU MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Tahir KARADAĞ
161405201

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü
Danışman: Doç. Dr. Nevin Taşaltın

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mayıs, 2019

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Tahir KARADAĞ'ın Tek Ve Çok Eklemli Gaas/Si Güneş Hücrelerinin İki Boyutlu Modellenmesi Ve Optimizasyonu başlıklı tezi 23/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans olarak oy birliğiyle / oy çokluğuyla başarılı/başarısız olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı. Adı ve Soyadı	İmza
Tez Danışmanı	: Doç. Dr. Nevin TAŞALTIN	.....
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Burhan Demir ÖNER	.....
Üye	: Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN	.....

.....

Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI

24/05/2019

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarından bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilmeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; çalışmanın Maltepe Üniversitesinde kullanılan "bilimsel intihal tespit programı" ile tarandığını ve öngörülen standartları karşıladığını beyan ederim.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Tahir KARADAĞ

İNTİHAL RAPORU

Üniversitenin öngördüğü intihal programıyla yapılan taramanın alıntı oranını belirten kapak sayfası, danışmanın imzasıyla eklenir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, bir yıl boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygı değer danışman hocam; Doç. Dr. Nevin TAŞALTIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tahir KARADAĞ

Mayıs 2019

ÖZ

TEK VE ÇOK EKLEMLİ GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRELERİNİN İKİ BOYUTLU OLARAK MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Tahir KARADAĞ
Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı
Danışman: Doç. Dr. Nevin TAŞALTIN
Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019

GaAs/Si güneş hücresi üretilmesine yönelik gelecekte yapılması planlanan deneysel araştırmalarda malzeme kaybını önlemesi ve zaman kazanımı sağlanması ümit edilen, deneysel çalışmalara ışık tutması beklenen bu tezin amacı, Si alttaban üzerine heteroepitaksiyel olarak büyütülecek tek eklemli ve çok eklemli GaAs güneş hücrelerinin iki boyutlu modellenmesi ve optimizasyonudur. GaAs güneş hücrelerinin Si alttaban üzerine entegrasyonu, III-V malzemelerin yüksek verimli özelliklerini, düşük maliyetle gösterebilme imkanı sağlamaktadır. Tezin hedefi, GaAs esaslı malzemelerin özelliklerini araştırarak daha iyi anlayabilmek ve malzemelerin özelliklerini katıhal aygıt fiziğiyle bütünleştirerek ürünün performansını artırabilecek etkileri açıklayabilmektir. Yapılan simülasyonlar, daha verimli hücre tasarımlarını öngörmeye önemli katkılar sağlayacak, malzeme kalitesini ve dolayısıyla cihaz performansını iyileştirmek için yol gösterici olacaktır. Bu araştırma, tek eklemli ve iki eklemli GaAs güneş hücrelerinin iki boyutlu modellenmesini ve optimizasyonunu kapsamaktadır. Malzeme parametreleriyle birlikte kapsamlı bir modelleme kullanarak, Si alttaban üzerine heteroeklemsel olarak büyütülecek olan tek eklemli ve iki eklemli GaAs güneş hücrelerinin azami performansları, kristal örgü uyumsuzluğu yoğunluğu dikkate alınarak araştırılmıştır. Heteroepitaksiyel üretim yöntemiyle elde edilecek iki eklemli InGaAs/GaAs/Si güneş hücresinin kristal örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna bağlı olarak veriminin değişimi ülkemizde ilk kez bu tez kapsamında araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: GaAs, Si, Güneş Hücreleri, Modellenme, Optimizasyon, Kristal Örgü Uyumsuzluğu Yoğunluğu.

ABSTRACT

2-DIMENSIONAL MODELING AND OPTIMIZATION OF SINGLE JUNCTION AND MULTIJUNCTION GAAS/SI SOLAR CELLS

Tahir KARADAĞ
Master Thesis
Electrical-Electronical Engineering Department
Electrical -Electronics Engineering Programme Graduate Program With Thesis
Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr., Nevin TAŞALTIN
Maltepe University Natural Sciences Graduate School, 2019

The main goal of this thesis is to provide experimental data for the production of GaAs/Si solar cells, which is hoped to prevent material loss and provide time saving, and aim to shed light on experimental researches on two-dimensional modeling and optimization of single-junction and multijunction GaAs solar cells. The integration of GaAs solar cells on Si substrate provides the high efficiency properties of III-V materials at low cost. The aim of the thesis is to investigate the properties of GaAs based materials and to explain the effects that can improve the device performance by integrating the properties of the materials with solid state device physics. Simulations will make a significant contribution to predicting more efficient cell modeling, and will guide us to improve material quality and thus device performance. This research involves two-dimensional modeling and optimization of single-junction and multijunction GaAs solar cells. Using an extensive modeling with material parameters, the maximum performances of single single-junction and multijunction GaAs solar cells to be grown on a heteroepitaxial method on the Si substrate were investigated taking into account the crystal lattice dislocation density.

Keywords: GaAs, Si, Solar Cell, Modelling, Optimization, Crystal Lattice Dislocation Density.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI i
ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI ii
TEŞEKKÜR iv
ÖZ v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLER LİSTESİ viii
TABLOLAR LİSTESİ ix
KISALTMALAR x
ÖZGEÇMİŞ xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1. GaAs Güneş Hücresi Teknolojileri 2
1.2. GaAs/Si Güneş Hücresi Modelleme Kriterleri 4
1.3. GaAs/Si Güneş Hücresinin Üretim Teknolojileri 7
1.3.1.Si Alttaban Üzerine Büyütülen GaAs Esaslı Malzemelerle Örgü Uyumsuzluğu Oluşması 8
1.3.2. Polar Olmayan Si Alttaban Üzerinde Heteroepitaksi Tekniğiyle Polar GaAs Film Büyütülmesi 9
1.3.3. Si Alttaban İle Üzerine Büyütülen GaAs Film Arasında Isıl Uyumsuzluk Oluşması 9
1.3.4. Tünel Tabakasının Tasarımı (Kalınlık, Optik Geçirgenlik, Elektriksel İletkenlik Ve Yüzey Pasivasyonu) 9
BÖLÜM 2. GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ 16
2.1. Tek Eklemli GaAs/Si Güneş Hücresinin Modellenmesi ve Optimizasyonu 21
2.2. İki Eklemli InGaP/GaAs/Si Güneş Hücresinin Modellenmesi ve Optimizasyonu 24
BÖLÜM 3. SONUÇLAR VE BULGULAR 29
KAYNAKÇA 32

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Son 40 yıl içinde güneş hücresi teknolojilerinin gelişimi……..3
Şekil 2. Yıllara göre güneş enerjisi maliyetinde planlanan değişim grafiği……....3
Şekil 3. Çok eklemli güneş hücrelerinin artan eklem sayısıyla performansının artışı…….....4
Şekil 4. Si alttaban üzerinde iki eklemli InGaP/GaAs güneş hücresinin şematik gösterimi……18
Şekil 5. Tek eklemli GaAs hücre performansı parametrelerine bozuk dislokasyon yoğunluğu değişiminin etkisi…….22
Şekil 6. 2 Eklemli InGaP/GaAs hücre parametrelerinin dislokasyona bağlı değişimi..25
Şekil 7. InGaP alt-hücrenin baz kalınlığının fonsiyonu olarak J_{SC} değişimi…….27
Şekil 8. İki eklemli InGaP / GaAs hücresinde arayüzey rekombinasyonlarına bağlı olarak verimin değişimi…….27

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. GaAs ve InGaP malzeme ve iletim parametreleri……20

Tablo 2. İki eklemli InGaP/GaAs hücrenin simülasyon ve deneysel dataları……21

KISALTMALAR

Al :Alüminyum

Ar :Argon

As :Arsenit

eV :Elektro volt

FEM :Sonlu elemanlar yöntemi

FF :Dolgunluk faktörü

Ga :Galyum

Ge :Germanyum

In :İndiyum

IRV :Arayüz tarama hızı

J_{sc} :Kısa devre akımı

N :Azot

P :Fosfor

Si :Silisyum

TJ :Terminal bağlantısı

V_{oc} :Açık devre gerilimi

W_{oc} :Kayma gerilimi

III-V :Periyodik cetvelin 3. Ve 5. grup elementleri

SRH :Shockley-Reed-Hall rekombinasyonu

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	: Tahir KARADAĞ
Doğum Yeri ve Tarihi	: Nizip / 15.09.1986

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi	:Marmara Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Öğretmenliği
Bildiği Yabancı Diller	: İngilizce, Almanca

İş Tecrübesi

Projeler	: Desibel metre, servo kontrollü cnc makine, sesli komutla çalışan akıllı ev sistemleri, Wifi tabanlı sayaç okuma
Çalıştığı Kurumlar	: ADS Mühendislik Elektrik Elektronik
Görev	: Servis Müdürü

İletişim Bilgileri

Adres	: Sultan Çiftliği Mh. Filiz Sk. No: 8/13 Taşdelen/İstanbul
Tel	: 0 546 877 01 45
E-Posta Adresi	: tkaradag86@gmail.com

BÖLÜM 1. GİRİŞ

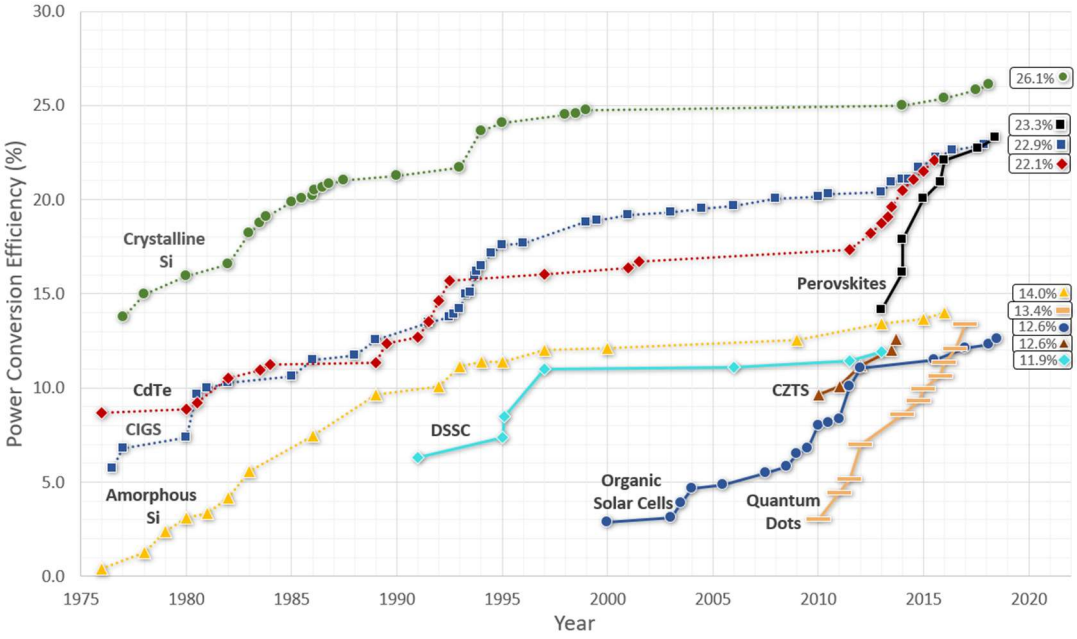
Yüksek verimli güneş hücreleri elde etmek ve aynı zamanda bu güneş hücrelerini düşük maliyetle elde etmek güneş hücresi teknolojileri alanında araştırmalar yapmakta olan araştırmacılar için kilit hedeflerdir. Silisyum (Si) tabanlı güneş hücrelerinin verimi yaklaşık % 25 iken, çok eklemli Galyum Arsenit (GaAs) tabanlı güneş hücrelerinin verimi her yıl % 1 artış göstererek %46'ya ulaşmıştır. GaAs güneş hücrelerinin yüksek verim sağlamalarının yanısıra yüksek maliyetli olmaları, Si tabanlı güneş hücreleriyle rekabet etmesini ve ticarileştirilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, bu tez kapsamında, GaAs alttaban üzerine GaAs güneş hücresi tasarımı yapılması yerine daha düşük maliyetli olan Si alttaban üzerine ince film kaplamalar yapılarak gelecek çalışmalarda üretilecek olan GaAs/Si güneş hücrelerini modellemesinin ve simülasyonunun yapılmasına odaklanılmıştır. Düşük maliyetli üretim teknolojisiyle yüksek verim sağlamakta olan GaAs/Si güneş hücresi üretim teknolojisinde halen çözülememiş birçok zorluk ve kısıtlayıcı faktör bulunmaktadır. Bunlardan biri, Si alttaban üzerine GaAs ince filmlerin büyütülmesi sırasında gerçekleşen ısıl farklılıklardan ve genleşmelerden kaynaklanan kristal örgü kaymalarıdır. Bu tez kapsamında, GaAs/Si güneş hücresinin performansını sınırlayan temel faktörler tanımlanmış ve güneş hücrelerinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun en aza indirgenebildiği yeni yaklaşımlar önerilmiştir. Si alttaban üzerine GaAs ince filmlerin büyütülmesi sırasında gerçekleşen ısıl farklılıklardan ve genleşmelerden kaynaklanan kristal örgü uyumsuzluklarının önlenebilmesi ve optimum performans elde edilebilmesi için modellemeler ve simülasyonlar yapılmıştır. Malzeme parametreleriyle birlikte kapsamlı bir modelleme kullanarak, Si alttaban üzerine heteroeklemsel olarak büyütülecek olan tek eklemli ve iki eklemli GaAs güneş hücrelerinin azami performansları, kristal örgü uyumsuzluğu yoğunluğu dikkate alınarak araştırılmıştır. Heteroepitaksiyel yöntemle üretimle elde edilecek iki eklemli InGaAs/GaAs/Si güneş hücresinin kristal örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna bağlı olarak veriminin değişimi ülkemizde ilk kez bu tez kapsamında araştırılmıştır.

Tezin ilk bölümünde, tek eklemli ve çok eklemli GaAs güneş hücrelerinin Si alttabana entegrasyonuyla GaAs/Si yapılı güneş hücrelerinin elde edilmesi için geliştirilmekte olan teknolojilerdeki mevcut durum ele alınmıştır. Daha sonra, GaAs güneş hücrelerinin Si alttabana entegrasyonu için farklı teknikler kullanılan tasarım

kriterleri ve teknik zorluklar ele alınmıştır. GaAs/Si üretimine yönelik mevcut teknolojilerin avantajları ve teknik zorluklar özetlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, tezin diğer bölümlerinde, GaAs/Si güneş hücresinin performansını sınırlayan temel faktörler tanımlanıp, modelleme ve simülasyon sonucunda tek eklemli ve iki eklemli GaAs güneş hücrelerinde bu faktörlere bağlı olarak hücrelerin performansını iyileştirecek öneriler sunulmuştur. Si alttaban üzerine GaAs ince filmlerin büyütülmesi sırasında gerçekleşen ısıl farklılıklardan ve genleşmelerden kaynaklanan kristal örgü uyumsuzluklarının önlenebilmesi ve optimum performans elde edilebilmesi için modellemeler ve simülasyonlar yapılmıştır.

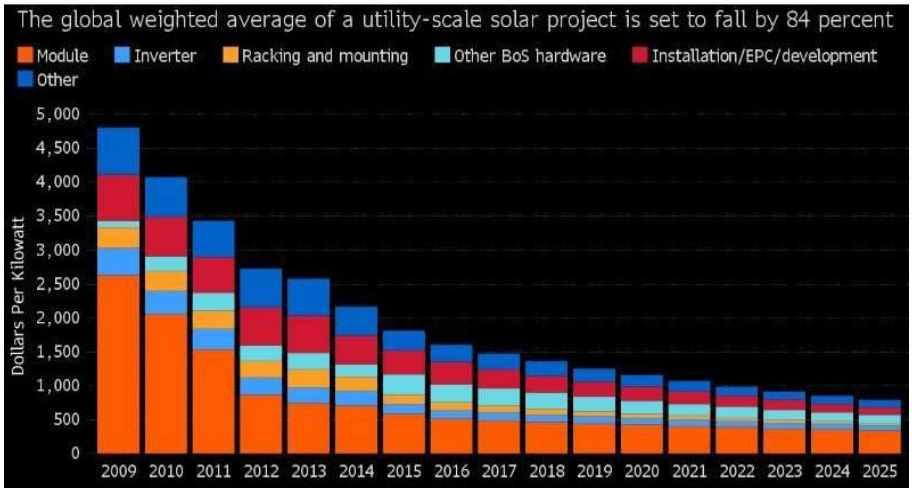
1.1. GaAs Güneş Hücresi Teknolojileri

Yüksek verimli güneş hücreleri elde etmek ve ayı zamanda bu güneş hücrelerini düşük maliyetle elde etmek güneş hücresi teknolojileri alanında araştırmalar yapmakta olan araştırmacılar için kilit hedeflerdir. Silisyum (Si) tabanlı güneş hücrelerinin verimi yaklaşık % 25 iken, çok eklemli Galyum Arsenit (GaAs) tabanlı güneş hücrelerinin verimi her yıl % 1 artış göstererek %46'ya ulaşmıştır. Çok eklemli GaAs güneş hücreleri, mevcut diğer güneş hücresi teknolojilerinden daha yüksek performansa sahip güneş hücresi teknolojisidir (Şekil.1). GaAs güneş hücrelerinin yüksek verim sağlamalarının yanısıra yüksek maliyetli olmaları, Si tabanlı güneş hücreleriyle rekabet etmesini ve ticarileştirilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Güneş hücresi teknolojisinde, verimin artırılmasına yönelik yapılmakta olan çalışmaların yanısıra maliyetin düşürülmesine yönelik yapılan çalışmalar da oldukça artmıştır. Güneş hücresi teknolojilerinde maliyette son 4-5 yılda yaklaşık % 40-50 düşüş sağlanarak, güneş hücresi teknolojisi uygulamaları artırılmıştır (Şekil.2).



Şekil 1. Son 40 yıl içinde güneş hücresi teknolojilerinin gelişimi [1].

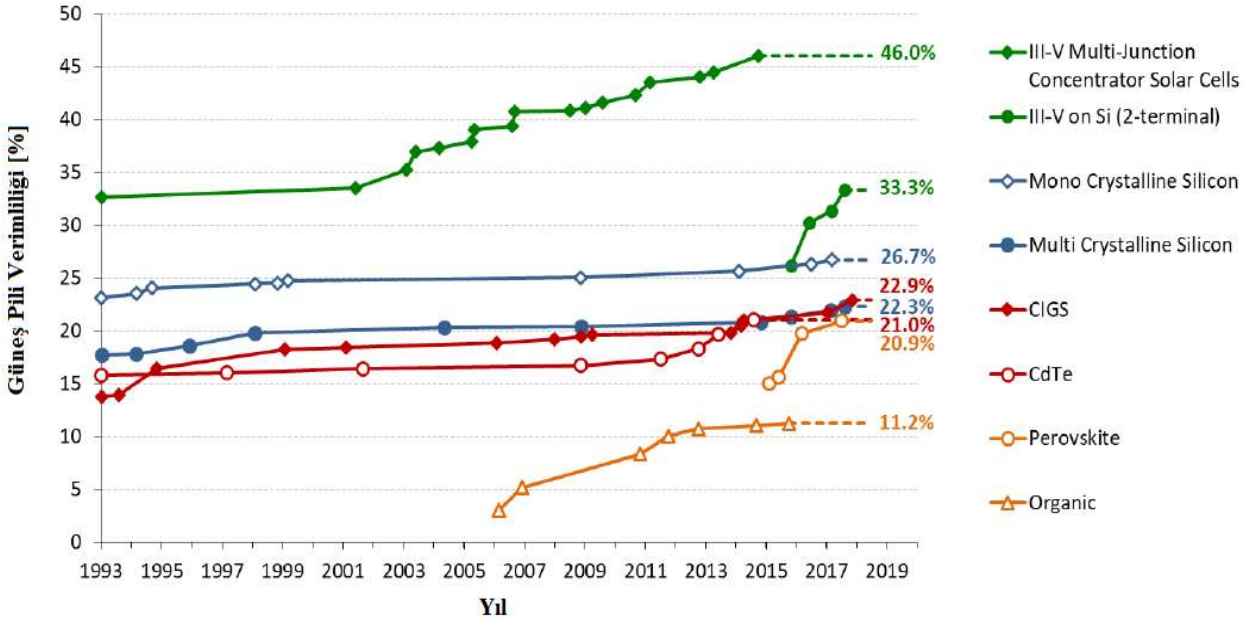
Şekil.1'den görüldüğü üzere, kristal Si güneş hücresi teknolojisi ve Perovskite güneş hücresi teknolojisi daha yüksek verim sağlamakla birlikte %23-27 arasında verim sağlayabilmiştir. Bu durum, yüksek verim sağlayan GaAs güneş hücresi teknolojisine olan ihtiyacı açıkça göstermektedir.



Şekil 2. Yıllara göre güneş enerjisi maliyetinde planlanan değişim grafiği [2].

Silisyumun aksine GaAs esaslı malzemeler, aynı kristal genleşmeyi takip ederek birbiri üzerine büyütülebildikleri için çok eklemli güneş hücresi yapısında kullanılarak yüksek verimli güneş hücresi üretilebilmesini sağlarlar. III-V malzemelerin çeşitli enerji

band aralıklarına sahip olabilmeleri, güneş hücrelerinin metamorfik veya çapraz uyumlu tasarımlar sayesinde daha kolay üretilebilmelerini ve böylelikle yüksek verim elde edilebilmesini sağlar [1-7]. Çok eklemli GaAs esaslı güneş hücrelerinin üretim teknolojileri hakkında farklı yaklaşımlar mevcuttur (Şekil.3) göstermektedir. Yüksek performanslı GaAs güneş hücresi elde edebilmek için üretim teknolojisinin üç eklemli ve dört eklemli hücrelere kaydığı sonucuna varılabilir. Şekil 3, artan eklem sayısıyla GaAs güneş hücrelerinin performans artışını göstermektedir.



Şekil 3. Çok eklemli güneş hücrelerinin artan eklem sayısıyla performansının artışı [7].

1.2. GaAs/Si Güneş Hücresi Modelleme Kriterleri

Dolaylı band aralığına sahip Si üzerine üç eklemli iki terminalli InGaP/GaAs güneş hücreleri entegre edildiğinde genel akım sınırlanmış olur [4, 5, 27, 28]. Si alttaban üzerine entegre edilen GaAs güneş hücresinin tasarımında akım uyumunun elde edilmesi en kritik tasarım kriterlerinden biridir. Si alttaban üzerindeki ilk GaAs ekleminin yeterli yüzey pasivasyonu, çoğunluk taşıyıcı iletkenliği ve azınlık taşıyıcı yansımasına izin veren etkili pencere katmanı olarak görev yapması son derece önemlidir. Si alttabandaki emitör oluşumu zor olabilir ve epitaksiyal fosfor difüzyonu [28], Si-emitör [29] içsel epitaksiyal büyümesi ve dışsal alışılmış difüzyon gibi farklı yaklaşımlar araştırılmaktadır. Her ne kadar Si/GaAs arayüzey pasivasyonu sonraki GaAs esaslı filmin epitaksiyel büyümesi için zorunlu olsa da, üst yüzey tekrar oluşum

etkisi GaAs içeren tasarımlar için kritik değildir, çünkü üst yüzey alt hücrelerinin dalga boyu aralığındaki fotonların çoğunu absorbe eder. Si/GaAs arayüzünden etkilenir ve sadece yüksek dalga boylu fotonlar, Si alttabana ulaşır, bu nedenle Si güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) üzerinde daha az bir etki oluşturur. Arayüzey Rekombinasyon Hızı (IRV) düşük olduğunda hem açık devre voltajını (V_{oc}) hem de J_{SC}'nı maksimize etmek için daha ince Si emitörler tercih edilir, ancak arayüzey rekombinasyon hızı yüksekken V_{oc} ve J_{SC}'nı optimize etmek arasında güçlü bir denge vardır [31]. Emitördeki en uygun yükselticiyi seçmek için, az katkılı Si emitör, arayüzey rekombinasyon hızı düşükken Voc'i en üst düzeye çıkarırken, yoğun katkılı emitör tasarımları arayüzey rekombinasyon hızı yüksekken daha yüksek V_{oc}'e dönüşür [26]. Si alttaban üzerine GaAs güneş hücresi tasarımları açısından, en önemli zorluklar örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun azaltılması ve yüksek kaliteli güneş hücresi malzemelerinin band aralığı-voltaj kaymasının (W_{oc}) ile 0.3-0.4 eV ışınım sınırına yakın bir değerde gerçekleşmesidir. Azınlık yük taşıyıcıları için örgü uyumsuzlukları rekombinasyon merkezleri olarak davranır ve bundan dolayı azınlık taşıyıcıların ömrü azalır. Yüksek dislokasyon yoğunluğu, J_{SC}'ye kıyasla esasen daha çok V_{oc}'yi olumsuz etkilemektedir. Örgü uyumsuzluğundan dolayı ortaya çıkan yüzey bozukluklarının V_{oc} ve doldurma faktörü (FF) üzerine asıl etkisi, azınlık taşıyıcı ömrünün azalmasına bağlı olarak uzay-yük rekombinasyonuyla ilişkili olarak artan n=2 ters doyma akımıyla ilgilidir [33,37]. Örgü uyumsuzluklarının neden olduğu kusurların ve dislokasyonların en aza indirilmesiyle, azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu artar ve dolayısıyla güneş hücresinin performansı iyileştirilebilir. Tüm bu tasarım zorluklarının dikkatlice değerlendirilmesi, Si alttaban üzerine GaAs güneş hücrelerinin başarılı bir şekilde üretilebilmesini sağlayacaktır.

Si alttabanlı GaAs güneş hücrelerinin tasarımı ve üretimi konusunda hem heteroepitaksiyel teknikle hem de mekanik istifleme tekniğiyle entegrasyon yaklaşımlarındaki son gelişmeler sonucunda, üç eklemli GaInP/GaAs/Si güneş hücreleriyle konsantre ışık altında % 27'den fazla verim elde edilmiştir [2]. 1988 yılında dört terminalli iki eklemli GaAs/Si güneş hücresiyle 347 kat konsantre güneş ışığı altında % 31 verim elde edilmiştir [34]. Si alttaban üzerine entegre edilen 3 eklemli GaAs güneş hücrelerinin % 40'ı aşan verim değerlerine sahip olabileceği tahmin edilse de, yapılan analizlerde tipik olarak Silisyumun dolaylı band aralığı, dislokasyona bağlı akım uyumu, dislokasyona bağı azınlık taşıyıcı ömürleri, yüzey rekombinasyon hızları

ve tünel tabakasının tasarımı gibi parametreler hesaba katılmadığı için gerçekçi bir yaklaşım olamamaktadır. Jain ve arkadaşları, Si tabanlı GaAs güneş hücrelerinin tasarımını yaparken, dislokasyonların ve yüzey rekombinasyon hızlarının da etkisini dikkate alarak daha gerçekçi bir tasarım yapmışlardır. Sonlu elemanlar analizini kullanarak 10^6 cm^{-2}'lik gerçekçi bir örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun varlığında, iki eklemli InGaP/GaAs/Si güneş hücresinin konsantre olmayan güneş ışığı altında veriminin %29, 600 kat konsantre güneş ışığı altında ise veriminin % 33 olarak elde edilebileceğini teorik hesaplamalar sonucunda bildirmişlerdir [38]. Benzer bir sonlu elemanlar analiz modelleme yaklaşımı kullanarak iki eklemli InGaN/Si hücresinin konsantre olmayan güneş ışığı altında % 28.9 verime sahip olabileceği hesaplanmıştır [21]. 3 eklemli InGaP/GaAs/Si güneş hücrelerinin verimi, konsantre olmayan güneş ışığı altında [5, 26, 27] ve konsantre güneş ışığı altında [38] örgü uyumsuzluğu konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak numerik analizlerle araştırılmıştır**.** 10^6 cm^{-2}**'** lik örgü uyumsuzluğu konsantrasyonuna sahip GaAs güneş hücrelerinin 200 kat konsantre güneş ışığı altında % 33'ü aşan verimlere sahip olabileceği bildirilmiştir [38]. Son birkaç yıldır, GaAs güneş hücrelerinin üretiminde Silisyumun alttaban olarak kullanılmayıp alt-hücre olarak kullanıldığı yeni tasarımlar mevcuttur fakat bu tasarımlarda optik kayıplar çok yüksek olduğu için deneysel olarak yüksek verimlere ulaşılması son derece zordur. 3 eklemli GaAs/Si/$In_{0.74}Ga_{0.26}As$ ve 3 eklemli $GaAs_{0.77}P_{0.23}$/Si/$In_{0.74}Ga_{0.26}As$ güneş hücrelerinin konsantre olmayan güneş ışığı altında sırasıyla % 32.9 ve % 36.5 verime sahip olabileceğini yaptıkları hesaplamalar ve modellemeler sonucunda bildirmişlerdir [39]. Ayrıca, Silisyum esaslı bir güneş hücresinin ara-hücre olarak kullanıldığı bir 4 eklemli AlGaAs/GaAs/Si/InGaAs tandem güneş hücresinin % 45'in üzerinde verime sahip olabileceği yapılan hesaplamalar ve modellemeler sonucunda bildirilmiştir [40]. Bu kilometre taşlarının elde edilmesi deneysel olarak çok zor olacak olsa da, yapılan hesaplamalar ve modellemeler, GaAs güneş hücrelerinin güneş hücresi teknolojileri arasında oldukça umut verici bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

1.3. GaAs/Si Güneş Hücresinin Üretim Teknolojileri

GaAs güneş hücreleri, uzay uygulamaları için en yüksek verim sağlayan güneş hücreleridir. Diğer güneş hücresi teknolojileri arasında en yüksek verim elde edilebilmesinin yanısıra yüksek maliyetleri uygulama alanlarının yaygınlaşmasını kısıtlamaktadır. Araştırmacılar bu durumun önüne geçebilmek için maliyeti düşürücü yeni üretim teknolojileri geliştirmektedir. Tek eklemli Si güneş hücrelerinin performansının son yıllarda % 20-22'ye ulaşmıştır [1, 2]. Bu durum son derece ümit vericidir. Son 5 yıl içinde 4 eklemli GaAs güneş hücreleriyle 297 kat konsantre güneş ışığı altında % 44.7 verim elde edilmiştir [1].

GaAs esaslı güneş hücrelerinde maliyeti asıl artıran malzeme, alttaban malzemedir. Aynı çaptaki GaAs alttabanların fiyatı Si alttabandan daha yüksektir. GaAs güneş hücrelerinin Si alttaban üzerine entegrasyonu sayesinde maliyet sorunu aşılabilmektedir. Diğer yandan GaAs alttaban, Si alttabana kıyasla daha yüksek termal iletkenlik ve üstün mekanik dayanım sağlar. Si alttaban üzerine GaAs esaslı güneş hücrelerinin üretilme teknolojileri 1980'li yıllardan bu yana araştırılmaktadır ve halen bu teknolojilerde birçok kısıt ve zorluk bulunmaktadır. 1.12 eV band aralıklı Si alttaban, iletkenlik uyumuna göre iki eklemli InGaP/GaAs esaslı GaAs güneş hücrelerinin üretiminde kullanılabilmektedir [4]. InGaP/GaAs/Si güneş hücreleri, konsantre güneş ışığı altında teorik olarak %40'dan fazla verim sağlayabilmektedir [3]. Son yıllarda yapılan çalışmalar, Si alttaban kullanılarak GaAs güneş hücresi üretilmesiyle maliyette %60'lık bir düşüş olduğunu göstermektedir [6-8].

Si alttaban üzerine GaAs güneş hücrelerinin entegrasyonu için heteroepitaksiyel büyütme tekniği ve mekanik istifleme tekniği kullanılabilmektedir. Son dönemde, Si alttaban üzerine GaAsP, SiGe GaAsPN veya InGaN ince filmler içeren GaAs güneş hücrelerinin tasarımı ve üretimi üzerine birçok çalışma mevcuttur [12- 22]. Si alttaban üzerine GaAs güneş hücrelerinin mekanik istifleme tekniğiyle üretilmesi, çok fazla örgü uyumsuzluğu barındırabilme dezavantajının yanısıra ideal band aralıklı malzemelerin birbirine entegre edilebilmesi avantajını sağlar. Si alttaban üzerine GaAs güneş hücrelerinin mekanik istifleme tekniğiyle üretilmesi konusunda son 20 yıldır üzerinde araştırmalar yapılmakta olan ve aşılması gereken birçok kritik zorluk mevcuttur [6]. GaAs esaslı malzemelerinin Si alttaban üzerine heteroepitaksiyel büyütme tekniğiyle entegrasyonu en yaygın kullanılan yöntemdir. Ancak, GaAs esaslı malzemelerinin Si alttaban üzerine heteroepitaksiyel büyütme tekniğiyle entegrasyonunda, güneş

hücresinin performansını önemli ölçüde etkileyen ve mutlaka aşılması gereken kritik zorlukları vardır. Bu nedenle, GaAs güneş hücresi tasarımı ve üretimi konusunda araştırmalar yapan araştırmacılar son 10 yıldır öncelikle bu kritik zorluklara çözüm getirecek yaklaşımlar geliştirerek yenilikçi tasarımlar yapmaya odaklanmışlardır. GaAs esaslı malzemelerinin Si alttaban üzerine heteroepitaksiyel büyütme tekniğiyle entegrasyonunda, güneş hücresinin performansını önemli ölçüde etkileyen ve mutlaka aşılması gereken kritik zorluklar aşağıda verilmiştir.

1.3.1.Si Alttaban Üzerine Büyütülen GaAs Esaslı Malzemelerle Örgü Uyumsuzluğu Oluşması

Üretim esnasında, Si alttaban ve GaAs arasındaki % 4'lük genleşme uyuşmazlığı, GaAs'ın Si üzerindeki doğrudan epitaksiyel büyümesini son derece zorlaştırır, bu durum örgü uyumsuzluğu oluşmasına ve arayüzeyde kusurların oluşmasına sebep olur. Bu tür kusurlar, foton ışınlarının ömrünü ve dolayısıyla güneş hücresinin performansını olumsuz etkiler [9,22-25]. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğunu azaltmak için ısıl çevrim tavlama işleminin yapılması [23,24] ve/veya Si alttaban üzerine GaAs filmin ilk çekirdeklenmesinin düşük sıcaklıkta ve düşük büyüme hızıyla yapılması [9,22-25] gerekir. Ayrıca, güneş hücresinin yapısında yer alan GaAs tünel tabakalar, aktif tabakalardaki dislokasyonların en aza indirgenmesini ve örgü uyumsuzluğunun mümkün olduğunca olmamasını sağlar. Bu yaklaşım, heteroepitaksiyel tek eklemli GaAs güneş hücresinin en yüksek verimle çalışmasını sağlayabilmektedir [42,47]. Si alttaban ile GaAs esaslı ince filmler arasında örgü sabitini dengeleyebilmek yani örgü uyumsuzluklarını en aza indirgeyebilmek için SiGe veya GaAsP gibi tünel tabakaların kullanıldığı yaklaşımlar da yapılmaktadır [12-16]. Dislokasyonları azaltmak için geliştirilen en başarılı yöntem SiGe tünel tabakaların güneş hücresi yapısına eklenmesi olmuştur, fakat eklenen SiGe tünel tabakalarının kalınlığı fazla olduğunda düşük band aralığına sahip olmaları bu tünel tabakaların Si alttabanı bir alt-hücre olarak kullanmalarını engeller. Bu sebepten, bu problemi aşabilmek için Si alttaban üzerine üretilecek GaAs esaslı güneş hücrelerindeki SiGe tünel tabakalarının ince olması gerekmektedir veya tünel tabakası olarak daha geniş band aralığına sahip olan GaAsP malzemenin kullanılması gerekmektedir. GaAs filmin Si alttaban üzerine epitaksisi için kullanılan çeşitli yaklaşımlar arasında, Si alttaban üzerine doğrudan GaAs filmin epitaksiyel teknik ile büyütülmesiyle [23] ve SiGe tünel tabaka büyütülmesiyle [13]

güneş hücresi yapısındaki örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun yaklaşık $1x10^6$ cm^{-2} olduğu bildirilmiştir [13, 23].

1.3.2. Polar Olmayan Si Alttaban Üzerinde Heteroepitaksi Tekniğiyle Polar GaAs Film Büyütülmesi

Si gibi tek atomlu polar olmayan bir yarıiletken malzeme üzerinde GaAs gibi iki atomlu polar olan bir malzemenin heteroepitaksiyel olarak büyütülmesi sonucunda arayüzeyde zıt kutup alanlarının oluşmasından dolayı yapısal kusurlar oluşabilir. Si alttaban üzerinde GaAs büyütülmesinin ilk aşamasında, Arsenit molekülleri alttaban olan Si ekleminin moleküler yönelimini aynen takip eder, As-As veya Ga-Ga bağları oluşur. Zıt kutup alanlarının en aza indirgenebilmesi ve dolayısıyla yapısal kusurların en aza indirgenebilmesi için çeşitli yaklaşımların yapıldığı çalışmalar mevcuttur [25].

1.3.3. Si Alttaban İle Üzerine Büyütülen GaAs Film Arasında Isıl Uyumsuzluk Oluşması

Si alttabanın ısıl genleşme katsayısı $2.6x10^{-6}$ $^0C^{-1}$ iken, GaAs malzemenin ısıl genleşme katsayısı $5.73x10^{-6}$ $^0C^{-1}$'dır. Si alttaban ile bu alttaban üzerine büyütülen GaAs ince film arasında ısıl uyumsuzluk olması GaAs ince filmde mekanik gerginliğe sebep olur, mekanik gerginlik ise yüzey kusurlarının ve dislokasyonların oluşmasına sebep olur. Kusurlar ve örgü uyumsuzlukları öncelikle, ışıma bölgelerinde kaymalar, eklemler arası uyumsuzluk ve arayüzeylerde dislokasyonlar olarak sınıflandırılabilir. Isıl uyumsuzluğa ilişkin en büyük endişelerden biri, GaAs ince filmde, güneş hücresi alanını ve performansını sınırlamanın yanısıra güneş pili güvenilirliği ile ilgili ciddi problemler oluşturabilen mikro çatlakların oluşmasıdır. İnce film kaplama sonrasında prosesin sona erdirilmesindeki soğutma hızının hızlı olması, mikro çatlak oluşumunu arttırır, bu nedenle mikro çatlak yoğunluğunu en aza indirebilmek için soğutma hızını kontrol etmek son derece önemlidir.

1.3.4. Tünel Tabakasının Tasarımı (Kalınlık, Optik Geçirgenlik, Elektriksel İletkenlik Ve Yüzey Pasivasyonu)

Si alttabanlı GaAs güneş hücresi yapısında yer alacak uygun tünel tabakasının tasarımında, kalınlık, optik geçirgenlik, elektriksel iletkenlik ve yüzey pasivasyonu parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi güneş hücresinin performansı için son derece önemlidir. Tünel tabakasının elektriksel iletkenliği, konsantre fotovoltaikler

(CPV) için seri direnci en aza indirmesi yönünden çok önemlidir. Si alttaban ile GaAs malzemelerin genleşme sabitlerini dengeleyebilmek için tünel tabakalarının kalın olması tercih edilmektedir. Si alttaban üzerinde örgü uyumlu nitrit tünel tabakalar (GaAsPN) ve doğrudan GaAs tünel tabakalar gibi diğer tünel tabakalara kıyasla daha ince heteroepitaksiyal filmler olduğu için tünel tabaka olarak daha iyi performans sergilemektedirler. Si alttaban üzerine geniş band aralıklı olan GaAsP tünel tabakası, daha dar band aralıklı olan SiGe tünel tabakasına kıyasla daha iyi performans sergilemektedir [15]. Diğer bir önemli film seçim kriteri, Si alttaban için iyi bir yüzey pasivasyonu sağlayacak ve hücrede bir pencere işlevi görecek bir tabaka kullanmaktır. Bu nedenle, Si alttabanı aktif bir güneş hücresi olarak kullanmak için ince ve optik olarak geçirgen filmler uygunken, örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun en aza indirilmesine ilişkin film seçimleri arasında önemli tasarım değişiklikleri vardır.

Si alttabanlı GaAs güneş hücresi üretiminde, Si alttaban üzerine GaAs filmin doğrudan epitaksiyel olarak büyütülmesi en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Si alttaban üzerinden doğrudan epitaksiyel GaAs film büyütebilmek için ısıl çevrim tavlama sürecinin uygulanması, dislokasyonları azaltmak için oldukça kullanışlıdır [48,49]. Si alttaban üzerinde tünel tabakası işlevi de gören kalın bir epitaksiyel GaAs tabakası moleküler buhar depozisyon tekniğiyle ve ısıl çevrim büyümesi yöntemiyle kaplanarak üretilen GaAs güneş hücresinin konsantre olmayan güneş ışığı altında ölçümleri yapılmıştır [9,33,43,46]. Epitaksiyel GaAs filmin Si alttaban üzerinde büyütülebilmesi için öncelikle 400˚C sıcaklıkta Si alttaban üzerinde GaAs çekirdeklenmesi sağlanmış ve ardından 700˚C sıcaklıkta GaAs ince film büyütülmüştür. Yapısal analizlerde, Silisyumun tavlanması sırasında Arsenit varlığının Oksijen oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir [9]. Si alttaban üzerinde n tip GaAs tünel tabakasına sahip bir tek eklemli GaAs güneş hücresinin, $8x10^6$ cm^{-2} örgü uyumsuzluğu konsantrasyonuna sahip olduğu ve bu durumda hücre veriminin konsantre olmayan güneş ışığı altında %17.6 verime ulaştığı bildirilmiştir [46]. Bunun yanısıra, aynı yapıda GaAs güneş hücresinin bu kez daha ince bir GaAs tünel tabakasıyla ve 200 kat konsantre güneş ışığı altında veriminin %21.3'e ulaştığı bildirilmiştir [43]. Si alttaban üzerine AlGaAs (1.7 eV band aralığı) büyütülerek de GaAs güneş hücresi üretilmiştir [50]. Ancak, AlGaAs film içinde Al bulunmasından dolayı film büyütme işlemi kompleks hale gelir, bu film yüksek seviyede kusurlar, dislokasyonlar içerebilir, dolayısıyla azınlık taşıyıcıların ömrü kısalabilir. Yönelimli Si alttaban üzerine moleküler buhar depozisyon tekniğiyle 5 kez 950 ^{0}C sıcaklıkta $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ (1.61 eV band aralığı) ve

$Al_{0.22}Ga_{0.78}As$ (1.7 eV band aralığı) güneş hücrelerinin iyi kuantum verimi (QE) ve iyi akım eşleşmesi sergilediği bildirilmiştir [41,50,72]. Heteroepitaksiyel büyütmeyle hazırlanmış ve literatürde halen en yüksek verimi sağlayan AlGaAs filmle iki terminalli iki eklemli $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$/Si güneş hücresinin verimi % 21.2 olarak belirlenmiştir [41]. İki eklemli AlGaAs/Si hücrelerin verimini daha da iyileştirebilmek için daha kaliteli ve daha yüksek band aralığına (yaklaşık 1.7-1.8 eV band aralığı) sahip yeni malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, yönelimli Si alttaban üzerine moleküler buhar depozisyon tekniğiyle ve ısıl çevrim tavlama yöntemiyle epitaksiyel $In_{0.1}Ga_{0.9}As$/GaAs film büyütülerek örgü uyumsuzluk yoğunluğu yaklaşık 1-2x10^6 cm^{-2} değerlerine düşürülebilmiştir [23]. Si alttaban üzerine önce 400 ^{0}C sıcaklıkta 10-15 nm kalınlıklı ve ardından 700 ^{0}C sıcaklıkta yaklaşık 2 μm kalınlıklı GaAs film büyütülüp 900˚C sıcaklıkta 5 kez ısıl çevrim tavlamayla elde edilen $In_{0.1}Ga_{0.9}As$/GaAs ve $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$/GaAs filmleriyle tek eklemli GaAs güneş hücresi üretildiğinde konsantre olmayan güneş ışığı altında % 20 verime ulaşıldığı bildirilmiştir [42, 47]. Örgü uyumsuzluğu konsantrasyonunun 1x10^6 cm^{-2}'den az olması, azınlık taşıyıcı iletiminde iyileşme olması, ısıl uyumsuzluğun en aza indirilmesi, Si alttaban üzerine doğrudan epitaksiyel GaAs film büyütülerek yapılan GaAs güneş hücresinin performansının örgü uyumlu olan GaAs alttaban üzerine doğrudan epitaksiyel GaAs film büyütülerek yapılan GaAs güneş hücresinin performansıylanın rekabet edebilmesi için son derece gereklidir.

Si alttaban üzerine üretilen GaAs güneş hücresinin yapısında kademeli Si_xGe_{1-x} tünel tabakasının kullanılması, örgü uyumsuzluğu yoğunluğunu azaltır [51]. Ultra yüksek vakumda kimyasal buhar depozisyon tekniğiyle yönelimli Si alttaban üzerine kademeli olarak 12 μm kalınlıkta büyütülen SiGe tünel tabakalarının örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun yaklaşık 2.1x10^6 cm^{-2} olduğu bildirilmiştir [13,43]. Öncelikle moleküler ışın epitaksi tekniğiyle epitaksiyel Ge tabakası büyütüldükten sonra Ge üzerinde düşük sıcaklıkta GaAs film oluşturulan araştırmalar mevcuttur [13,52]. Bu işlemin GaAs/Ge arayüzeyindeki kontrollü çekirdeklenmeye bağlı olarak anti faz bölgelerini azalttığı bildirilmiştir [52]. Örgü uyumsuzluklarının, azınlık taşıyıcı ömürleri üzerindeki etkisine ilişkin detaylı bir araştırmada, n-tip GaAs içindeki holler için dislokasyon tolerasının (τ_p ~ 10 ns), p-tip GaAs içindeki elektronlar için olan dislokasyon toleransına (τ_n ~ 1.5 ns) kıyasla çok daha yüksek olduğu bildirilmiştir [53,54]. Elektron ömrünün kısalmasının, SiGe tünel tabakası üzerine büyütülen GaAs film içindeki dislokasyonlara artan hassasiyete sahip elektronların yüksek mobilitesinden kaynaklandığı bildirilmiştir [54]. Ge/SiGe/Si alttaban üzerine büyütülen

GaAs filmdeki azınlık taşıyıcı ömrü arttıkça güneş hücresinin V_{OC} değeri artar [55,56]. Si alttaban üzerinde kademeli SixGe1-x tünel tabakasının kullanılmasıyla bir eklemli GaAs güneş hücresinin verimi konsantre olmayan güneş ışığı altında % 18.1'e ulaşmıştır [13]. Ge/SiGe/Si alttaban üzerine 2 eklemli GaInP/GaAs güneş hücresi hazırlanıp konsantre olmayan güneş ışığı altında ölçüldüğünde % 16.8 verim elde edilmiştir [45]. 2 Terminalli iki eklemli GaAsP/SiGe güneş hücresiyle ise 1.73/1.13 eV'luk band aralığının biraraya gelmesi konsantre olmayan güneş ışığı altında % 41.7 verim elde edilmiştir [57]. Ayrıca, yönelimli Si alttaban üzerine hazırlanan iki eklemli $GaAs_{0.84}P_{0.16}$ /$Si_{0.18}Ge_{0.82}$ (1.67/0.86 eV) tandem güneş hücresiyle konsantre olmayan güneş ışığı altında % 18.9 verim (J_{sc}=18.1mA/cm^2, V_{oc}=1.45V and FF=0.72) elde edilmiştir [15].

Diğer yandan, Si alttaban üzerinde iki eklemli $GaAs_{0.7}P_{0.3}$ güneş hücresi yapısıyla konsantre olmayan güneş ışığı altında verimin %40'ı geçeceği tahmin edilmiştir [59]. Ayrıca 3 eklemli InGaP/GaAsP/Si (2.0/1.5/1.1 eV band aralığı) güneş hücresi yapısıyla konsantre olmayan güneş ışığı altında verimin %45'i geçeceği tahmin edilmiştir [59]. Si alttaban üzerine moleküler buhar depozisyon tekniğiyle ince GaP çekirdeklenmesinden sonra üzerine örgü uyumlu $GaN_{0.02}P_{0.98}$ tünel tabakasının hazırlanmasıyla ve ardından $GaAs_{0.7}P_{0.3}$ (1.71 eV band aralığı) filmin hazırlanmasıyla oluşan güneş hücresinin antiyansıtıcı tabaka olmaksızın konsantre olmayan güneş ışığı altında % 9.8 verim ile çalıştığı bildirilmiştir [60]. Araştırmacılar, moleküler ışın epitaksi tekniğiyle ve moleküler buhar depozisyon tekniğiyle Si alttaban üzerinde GaP büyütülmesiyle GaP/Si arayüzeyinde çekirdeklenmeden kaynaklanan kusurların azaltılmasına ve arayüzey kalitesinin artırılmasına yönelik araştırmalar yapmaktadır [29,62]. 2 Eklemli $GaAs_{0.75}P_{0.25}$/Si güneş hücresinin anti-yansıtıcı kaplama olmaksızın konsantre olmayan güneş ışığı altında yaklaşık % 10.65 verimle (J_{sc}=11.2 mA/cm^2, V_{oc}=1.56 V and FF=0.61) çalıştığı bildirilmiştir [63].

Son yıllarda, GaAsP büyütme sıcaklığı 600-700 ^{0}C sıcaklık aralığında değiştirilerek örgü uyumsuzluğu yoğunluğu azaltılmaya çalışılmaktadır ve en optimum iyileştirilmiş büyümenin 600- 640 ^{0}C arasında olabildiğini bildirilmiştir [16]. Fakat bu çalışmada, örgü uyumsuzluğu yoğunluğu 10^8 cm^{-2} değerinin üzerine çıktığı için araştırmacılar film büyütme işleminin çok düşük hızlarda yapılması gerektiğini ve film büyütme hızı-sıcaklık parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir. Diğer bir çalışmada ise, Si alttaban üzerindeki iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücrelerinde örgü sabitinin Si ile GaAs arasında dengelenebilmesi için $GaAs_xP_{1-x}$ tünel

tabaka kullanılmıştır, bu güneş hücresi yapısıyla konsantre olmayan güneş ışığı altında %16.4 verim (J_{sc}=11.20 mA/cm$_2$, V_{oc}=1.94 V and FF=0.75) elde edilmiştir. Aynı güneş hücresi yapısı aynı şekilde bu kez GaAs alttaban üzerine üretildiğinde ise verim değeri %27.1'e ulaşmıştır [14]. 1-2 μm kalınlıklı absorban GaAs filmde taşıyıcı toplanmasının iyi olmaması sonucunda, yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluğuyla azınlık taşıyıcı ömürlerinin azalması nedeniyle GaAs alt-hücreler akım sınırlayıcıdırlar. GaInP alt-hücre iki sebepten dolayı dislokasyonlardan daha az etkilenir. Si alttaban üzerinde üretilen 2 eklemli InGaP/GaAs güneş hücresindeki GaInP alt-hücrenin kalınlığının az olması akım sınırlayıcı olan alt-hücre GaAs'a doğru olan foton akış penetrasyonunda artış sağladığı bildirilmiştir [37].

Bunların yanısıra, Si alttaban üzerine büyütülen seyreltik nitrik III-V-N alaşımlarının Si alttaban ile örgü uyumlu olması, bu malzemeler kullanıarak üretilen güneş hücrelerinin performanslarını olumlu şekilde etkilemektedir. GaAs güneş hücrelerinde $GaAs_xP_{1-x-y}N_y$ ve $In_xGa_{1-x}P_yN_{1-y}$ bileşiklerinin kullanımı, bu malzemelerin Si ile örgü uyumlu olmalarından dolayı son derece ilgi çekici olmuştur [18]. $GaP_{0.98}N_{0.02}$ (2 eV)/ $GaAs_{0.20}P_{0.73}N_{0.07}$ (1.5 eV) / Si (1.1 eV) yapılı güneş hücreleri araştırılmıştır [18]. Ayrıca, Si alttaban üzerine $GaAs_{0.09}P_{0.87}N_{0.04}$ alaşımının (1.81 eV band aralığı) kullanılmasıyla üretilen örgü uyumlu iki eklemli güneş hücresi oldukça ilgi çekici olmuştur [18]. Ayrıca, büyüme perspektifinden bakıldığında, InN ve GaN katı-faz karışabilirliği ile ilişkili zorluklar nedeniyle GaAsPN alaşımlarının InGaPN ile karşılaştırıldığında büyütülmesi daha kolaydır [64,66].

İlk 2 eklemli $GaAs_{0.10}P_{0.86}N_{0.04}$ (1.80 eV)/Si tandem güneş hücresi, GaP film çekirdeklenmesi üzerine moleküler buhar depozisyon tekniği kullanılarak örgü uyumlu $GaN_{0.02}P_{0.98}$ film hazırlanarak üretilip anti-yansıtıcı tabaka olmaksızın konsantre olmayan güneş ışığı altında ölçüldüğünde veriminin % 5.2 olduğu ve $GaN_{0.02}P_{0.98}$ filmin örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun 10^6 cm^{-2}'den az olduğu bildirilmiştir. GaP film çekirdeklenmesi esnasındaki Fosfor difüzyonunun p-Si alttaban için n-emitör oluşturduğu bildirilmiştir. defects at the GaP/Si arayüzeyindeki kusurların, ön emitör bölgesinin yakınındaki Si hücreyi etkilediği, fakat mavi ışığın çoğunun üst hücre tarafından absorbe edildiği, bu sebepten ön yüzdeki iyi olmayan pasivasyonun Si alt-hücrenin Jsc akımını çok da düşürmediği bildirilmiştir [17]. Üstteki GaAsPN al-hücrenin 2-terminal akımını (GaAsPN alt-hücre için 5.7 mA/cm^2 ve Si alt-hücre için 14.5 mA/cm^2) sınırladığı anlaşılmıştır. Ayrıca, istenmeyen Karbon ve Hidrojen safsızlıkları GaAsPN'deki azınlık taşıyıcı ömürleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip

olduğu, bunun da üstteki Nitrit alt-hücrenin yapısal kalitesinin düşmesine ve dolayısıyla tandem hücre veriminin düşmesine neden olduğu anlaşılmıştır. Seyreltik Nitritteki difüzyon uzunluklarının artırılmasının, kuvantum verimini artıracağı ve böylece tandem güneş hücresinin genel perforansının iyileştirilebileceği bildirilmiştir. Si üzerindeki kafesle uyumlu GaAs güneş hücreleriyle ilgili bir başka önemli bulgu ise, tünel tabakalarının geliştirilmesidir. Seyreltik Nitrit malzemelerindeki son gelişmelerde, GaAsPN/GaPN çoklu kuvantum kuyusu yapılarının, Si epitaksi üzerindeki GaP araştırmalarının ve Si uyumlu GaNAsP esaslı lazerler [67] hakkındaki araştırmaların daha da ilerlemesiyle III-VN esaslı örgü uyumlu malzemeler güneş hücresi üretilmesi için heyecan verici fırsatlar sunmaktadır.

InGaN, ayarlanabilir ve doğrudan band aralıklı yapısı sayesinde çok eklemli güneş hücrelerin performansını artırabilecek etkiye sahiptir. Yaklaşık 1.8 eV band aralıklı InGaN güneş hücreleri, 1.1 eV Si alt-hücre ile birlikte 2 eklemli güneş hücresi yapısında kullanılabilmektedir. Üstte InGaN alt-hücrenin ve altta Si alt-hücrenin kullanılması, vakuma kıyasla aynı enerjiye sahip p-Si valans bandlı n-InGaN malzemenin iletim bandının ayarlanabilmesi avantajını sağlar [20]. Gerçekçi difüzyon uzunluklarının hesaba katıldığı basit analitik simülasyonlar kullanılarak, 2 eklemli InGaN/Si p/n güneş hücresinin konsantre olmayan güneş ışığı altında veriminin % 30 olabileceği ve 3 eklemli InGaN (1.9 eV)/InGaN (1.5 eV)/Si güneş hücresinin veriminin ise aynı şartlar altında yaklaşık % 35 olabileceği bulunmuştur [65]. P/n InGaN/Si tandem güneş hücresi yapısındaki InGaN absorban tabakanın üstteki p-GaN/n-InGaN arayüzeyine yakın olması sayesinde, hole iletimi için bariyerin kalkarak performansın iyileşmesini sağladığı bildirilmiştir [21]. Tandem GaN/Si güneş hücresi yapısı olarak GaN/AlN-tünel tabaka/Si iki eklemli p/n güneş hücresi araştırılmıştır [68]. Son çalışmalarda, yönelimli Si alttaban üzerinde büyütülen GaN/AlN filmler üzerinde iyi kaliteli $In_{0.4}Ga_{0.6}N$ filmlerin büyütülmesi AlN tünel tabakasının moleküler buhar depozisyon tekniğiyle hazırlanmasında yüksek-düşük-yüksek sıcaklık prosesinin uygulanması sonucunda faz ayrımları önemsenmeyecek düzeyde kalmıştır [22]. Benzer büyütme prosesi uygulanarak, tek eklemli n-$In_{0.4}Ga_{0.6}N$/p-Si güneş hücrelerinin Jsc akımının üst n-tip kontakta indium tin oxide kullanılmasıy sayesinde artırılabileceği ve Si alttaban üzerinde InGaN kullanılması sayesinde verimin konsantre olmayan güneş ışığı altında % 7.12 ulaşabildiği bildirilmiştir [22]. Nitrit malzemelerin düşük yapısal kalitesi (özellikle InGaN malzemede %30 oranında indium bulunması) ve p-tip katkılamadaki zorluklar, InGaN güneş hücreleriyle yüksek verim elde edilebilmesi için

araştırılması ve geliştirilmesi gereken konulardır. InN ile GaN arasındaki örgü uyumsuzluğunun yüksek olması, bu iki malzeme arasında yasak aralık oluşmasına sebep olur [65,66]. InN malzemeyi p-tip katkı ile katkılamadaki zorluklar doğal kusurların oluşmasına sebep olmaktadır. P katkılı $In_xGa_{1-x}N$ mazlemenin yerine p-GaN/n-$In_xGa_{1-x}N$ heteroeklemm kullanılabilmekte, GaN tabakaları pencere tabaka işlevi de görebilmekte ve yüzey rekombinasyonları azaltılabilmektedir [21]. GaN/InGaN heteroekleminin tek eklemli güneş hücresi üretiminde kullanılmasıyla taşıyıcıların toplanmasını engelleyen kutuplanma etkileri gibi olumsuz etkilerden dolayı hücrenin teorik verim limiti %11 olabilmektedir [69]. Bundan dolayı, olumsuz kutuplanma etkilerinin aşılabilmesi için p-i-n yapısında benzer malzemelerin eklenmesi sonucunda yüksek verimlere ulaşılabileceği bildirilmiştir. Bu doğrultuda, $In_{0.60}Ga_{0.40}N$ p-n eklemleriyle konsantre olmayan güneş ışığı altında % 21.5 verim elde edilebileceği hesaplanmıştır [74]. GaN ile %50'ye varan İndiyum'un kompozisyonuyla oluşturulan InGaN esaslı p-i-n güneş hücrelerinin konsantre olmayan güneş ışığı altında teorik veriminin % 18.53'e ulaşabileceği hesaplanmıştır [70]. İndiyum oranı artırıldığında, p-katkı oranı artırıldığında ve kalın kaplandığında InGaN ekleminin InGaN güneş hücrelerinde faz ayrımına sebep olmayacağı bildirilmiştir [69].

BÖLÜM 2. GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ

Tezin amacı, Si alttaban üzerinde iki eklemli InGaP/GaAs güneş hücrelerinin ve üç eklemli InGaP/GaAs güneş hücrelerinin düşük maliyetle yüksek verim elde edilmesi için iki boyutlu modellemesinin yapılmasıdır. Tezin başlıca hedefleri:

- Si alttaban ile genleşme katsayıları uyumsuz GaAs güneş hücrelerinin ve genleşme katsayıları uyumlu GaAs güneş hücrelerinin performansı arasında performans farkını en aza indirgeyebilecek hücre modelinin elde edilmesi.
- Si alttaban üzerinde iki eklemli GaAs güneş hücrelerinin mümkün olabilecek en düşük örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna sahip olacak şekilde modellenmesi.
- Yüksek band aralığına sahip alt-hücreler yerine düşük bant aralığına sahip alt-hücreler kullanılmasının kristal örgü uyumsuzluğu oluşumuna etkisinin araştırılması.
- Örgü uyumsuzluklarının, akıma etkisinin araştırılması.

Güneş hücresi modellemede, taşıyıcı ömrü, yüzey rekombinasyon yoğunluğu, band aralıkları, eklem kalınlıkları, vb birçok parametrenin aynı anda değiştirilebilmesini ve bu parametrelerin her birinin araştırılabilmesini sağladığı için Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method - FEM) yaygın şekilde tercih edilen kullanışlı bir modelleme metodudur. Bu nümerik modelleme, ayrı ayrı parametrelerin yanısıra her bir parametrenin analitik çözümlere kıyasla daha hızlı bir ortamda incelenmesini sağlamaktadır. Tezde, Si alttaban üzerinde iki eklemli InGaP/GaAs güneş hücrelerinin ve üç eklemli InGaP/GaAs güneş hücrelerinin modellemesi, Sonlu Elemanlar Metodu ve yarıiletken aygıtların modellenmesinde kullanışlı yazılımı olan APSYS Simülatörü birlikte kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar Metodu, sınır değer problemlerine yaklaşık çözümleri bulmak için kullanılan sayısal bir tekniktir. Bir daire oluşturmak için birçok küçük düz çizgiyi birbirine bağlama fikrine benzer bir şekilde Sonlu Elemanlar Metodu, daha büyük bir alan üzerinde daha karmaşık bir denklemi elde etmek için sonlu elemanlar adı verilen birçok küçük alt alan üzerindeki birçok basit eleman denklemini birleştirir. Güneş hücresi modellemesi için yapılan en yaygın durum, Poisson denklemi ve Sonlu Elemanlar Metodu kullanan elektron ve holler için Sürüklenme-Difüzyon Denklemi dahil olmak üzere birkaç ilgili denklemi çözen APSYS Simülatörü kullanılarak 2 boyutlu simülasyonlarının yapılmasıdır. Bu sonlu elemanlar, aygıt yapılarında mesh tasarımı ile temsil edilir, burada mesh noktalarının yoğunluğu ve

çeşitli mesh noktaları arasındaki boşluk düzenlemesi tanımlanabilir. Örneğin, bir aygıttaki aygıt performansına daha hassas olan bölgeler, mesh noktaları yakından yerleştirilmiş olan daha yoğun mesh tasarımı ile atanabilir. Bir güneş hücresinde, bu yüksek yoğunluklu mesh bölgeleri arayüzlerin çoğunu, taban katmanı ve tünel bağlantılarını içerir. Bir güneş hücresindeki, gelen ışıktan kaynaklanan elektron-hole oluşumu ile ilgili optik yayılımlar, arayüzeylerdeki yansımalar dikkate alarak transfer matris yöntemi ve/veya ışın izleme ile modellenmiştir. Tünel eklem modelleri, karmaşık Zener tipi tünel şeklindedir. Shockley-Reed-Hall rekombinasyonu (SRH) ve Auger rekombinasyonu gibi tüm önemli üretim ve rekombinasyon mekanizmaları dikkate alınmıştır. Sonlu Elemanlar Metodu kullanarak simülatör tarafından çözülen en önemli denklemler, Poisson denklemi ve elektronlar ve holler için süreklilik denklemidir. Poisson'ın denklemi aşağıdaki gibidir:

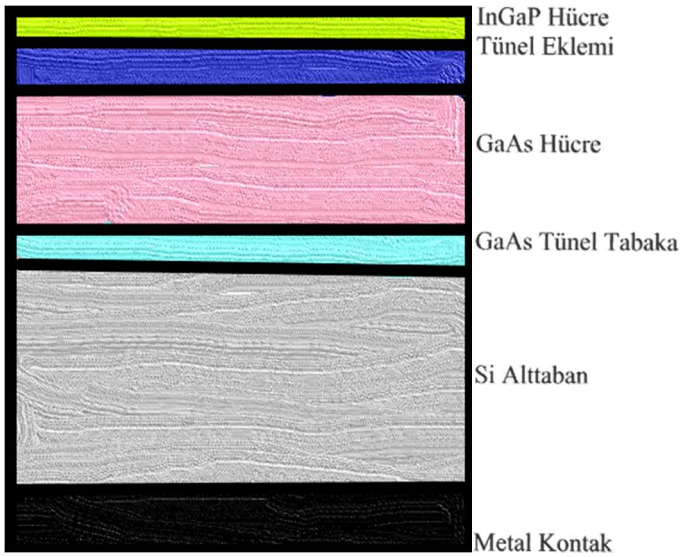
$$-\nabla.(\varepsilon_0\, \varepsilon_{dc} q\, \nabla V) = -n + p + N_D(1-f_D) - N_A f_A + \Sigma N_{tj}\, (\delta_{jj} - f_{tj}) \tag{2.1}$$

V elektrik potansiyeli, ε_0 vakum dielektrik sabiti, ε_{dc} bağıl DC veya düşük frekanslı dielektrik sabiti, q elektron yükü, n elektron yoğunluğu, p hol yoğunluğu, N_D donör seviyesi yoğunluğu, N_A akseptör seviyesi yoğunluğu, f_D donörün doluluk seviyesi, f_A akseptörün doluluk seviyesi, N_{tj} jth derin tuzağın yoğunluğu, ftj derin tuzağın doluluk seviyesi, δ_j donör benzeri tuzaklar için 1 ve akseptör benzeri tuzaklar için 0'dır. Elektronlar ve holler için mevcut süreklilik denklemi sırasıyla şöyledir:

$$\nabla.J_n - \Sigma R_n^{tj} - R_{sp} - R_{st} + R_{au} + G_{opt}(t) = (\partial n/\partial t) + N_D\, (\partial f_D/\partial t) \tag{2.2}$$

$$\nabla.J_p + \Sigma R_p^{tj} + R_{sp} + R_{st} + R_{au} - G_{opt}(t) = -(\partial p/\partial t) + N_A\, (\partial f_A/\partial t) \tag{2.3}$$

J_n ve J_p, sırasıyla elektron ve hol akım akı yoğunluğudur. R_n^{tj} ve R_p^{tj}, sırasıyla j_{th} derin tuzak boyunca birim hacim başına elektron ve hol birleşme oranlarıdır. G_{opt}, optik jenerasyon hızı, R_{sp}, R_{st} ve R_{au}, sırasıyla tahmini rekombinasyon hızı, uyarılmış rekombinasyon hızı ve Auger birim hacim başına rekombinasyon hızıdır. İki eklemli InGaP/GaAs/Si güneş hücresi yapısının şematik görünümü Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Si alttaban üzerinde iki eklemli InGaP/GaAs güneş hücresinin şematik gösterimi.

Modellemede bir başlangıç noktası olarak, GaAs ve InGaP hücresindeki taban kalınlıkları, sırasıyla 2.5 μm ve 0.9 μm olarak alınmıştır. Daha sonra, 10^6 cm^2'lik örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna sahip bir InGaP/GaAs hücre yapısında althücreler arasında akım uyumu (akım eşleşmesi) elde edebilmek için tasarım metodolojileri üzerinde durulmuştur. GaAs ve InGaP malzeme ve iletim parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun hücre performansı üzerine etkisi daha önce Si üzerinde sadece tek GaAs hücresi için araştırılmıştır. Tez kapsamında, iki ve üç eklemli InGaP/GaAs hücre yapısında örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun hücre performansı üzerine etkisi de araştırılmıştır. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun V_{oc} üzerindeki etkisini modellemek için J_{sc}'nin örgü uyumsuzluğu yoğunluğundan bağımsız olduğu varsayılmıştır. Gerçekte Jsc, örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun artmasıyla azalır ve verimin artması üzerine etkilir. Son yıllarda, azınlık taşıyıcı ömrünün hücre performansı üzerindeki etkisi, Si üzerindeki InGaN hücreleri için araştırılmıştır. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun etkisini içeren tandem güneş hücrelerinin modelleme destekli tasarımı konusunda önemli bir çalışma yapılmamıştır. Sabit bir J_{sc} varsayımı olmadan Sonlu Elemanlar Metodu kullanarak, iki eklemli n+/p InGaP/GaAs güneş hücresinin konsantre olan ve olmayan güneş ışığı altında modellenmesi ve optimizasyonu üzerine hazırlanan bu tez GaAs güneş hücresi literatürü için son derece önemlidir.

Azınlık taşıyıcı ömrü, güneş hücresi modellemede en önemli kriterlerden biridir. GaAs/Si gibi farklı film yapılarının arayüzeyinde oluşan kusurlar ve dislokasyonlar rekombinasyon merkezi olarak görev yapabilir, azınlık taşıyıcı ömrünü ve dolayısıyla difüzyon uzunluklarını kısaltabilir. Genleşme katsayıları uyumsuz durumdaki azınlık taşıyıcısı ömrü (τ_n veya τ_p) örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun bir fonksiyonu (τ_{TDD}) olarak değişir [12, 24].

$$\frac{1}{\tau_{n,p}} = \frac{1}{\tau^{0}_{n,p}} + \frac{1}{\tau_{TDD}} \tag{2.4}$$

τ°_p ve τ°_n, dislokasyon olmayan bir malzeme için öngörülen taşıyıcı ömrüdür. τ_{TDD}, dislokasyondaki rekombinasyona bağlı azınlık taşıyıcı ömrüdür ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\tau_{TDD} = \frac{4}{\pi^{3}(TDD)D} \tag{2.5}$$

Tablo 3. GaAs ve InGaP malzeme ve iletim parametreleri [26].

Parametreler	GaAs	InGaP
Bant aralığı (E_g, eV)	1	1,85
Azınlık elektron mobilitesi (μ_e, cm^2Vs)	3089	1075
Azınlık hol mobilitesi (μ_h, cm^2/Vs)	101	41
Elektron difüzyon katsayısı (D_n, cm^2/s)	81	27
Hol difüzyon katsayısı (D_p, cm^2/s)	2,61	1,05
Azınlık elektron ömrü (τ_n, ns)	20	10
Azınlık hol ömrü (τ_p, ns)	25	1

GaAs ve InGaP malzeme ve iletim parametreleri ve azınlık taşıyıcı ömrü modeli kullanılarak p-GaAs ve p-InGaP için örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun elektron ömrüne etkisi simüle edilmiştir. GaAs alt-hücrede 10^4 cm^{-2}'den büyük örgü uyumsuzluğu yoğunluğundan dolayı elektron ömrü kısalmıştır. Elektron ömrünün kısalması, p-InGaP malzemede düşük elektron difüzyon katsayısı nedeniyle 10^5 cm^{-2} örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda meydana gelmiştir.

Bir güneş hücresinde, ışığın çoğu kalın bazda absorbe edilir ve kavşaktan uzakta üretilen azınlık taşıyıcıları, rekombinasyondan ekleme ulaşmak için yeterli bir ömre sahip olmalıdır. Bu nedenle, bazdaki azınlık elektron ömrünün değişmesinin hücre performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur. İnce emitördeki azınlık hol ömrünün (τ_p) sabit olduğu kabul edilmiştir. Yüzey rekombinasyon hızı (SRV), InGaP baz/ arka yansıtıcı arayüzey ve emitör/ pencere arayüzeyinde hem holler (S_p) hem de elektronlar (S_n) için 10^4 cm/s'ye ayarlanmıştır. S_n ve S_p değerleri, GaAs alt-hücredeki her iki arayüzeyde 10^6 cm/s'ye ayarlanmıştır. Modellemede, azınlık taşıyıcılarının hareketliliğinin örgü uyumsuzluğu yoğunluğundan bağımsız olduğu varsayılmıştır ve bant aralığı daralması ve metal kontakların gölgelemesinin etkisi dahil edilmemiştir. Modellemede, p-InGaP için τ_n = 5.2 ns alınmıştır. Bu τ_n = 5.2 ns değeri, $4x10^5$ cm^{-2}'lik bir örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna karşılık gelmektedir. p-GaAs için τ_n =3.3 ns alınmıştır. Yapılan simülasyon sonuçları, Tablo II'deki deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Genel olarak, Tablo II'de sunulan simülasyon ve deneysel değerler

uyumludur, bu nedenle yapılan modellemede ve simülasyonda kullanılan parametrelerin doğru olduğu sonucuna ulaşılabilmiştir.

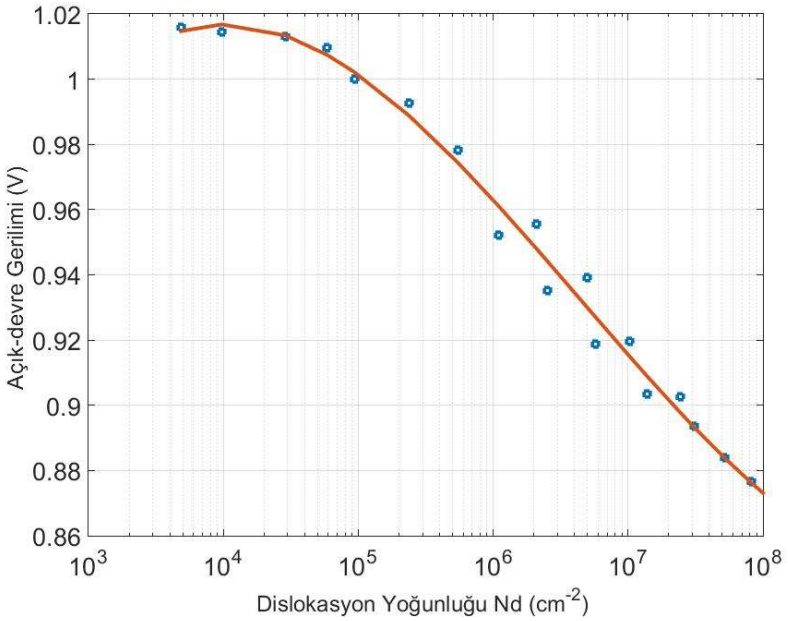
Tablo 2. İki eklemli InGaP/GaAs hücrenin yapılan simülasyon sonuçları ile literatürdeki deneysel sonuçlar [26].

	Voc (V)	Jsc (mA/cm^2)	FF (%)	Verimlilik (%)
Deneysel [26]	2,58	14,22	85,6	30,28
Simülasyon	2,42	13,90	84,05	29,90
Deneysel [26]	2,52	12,70	85,00	27,20
Simülasyon	2,52	12,50	85,30	27,60

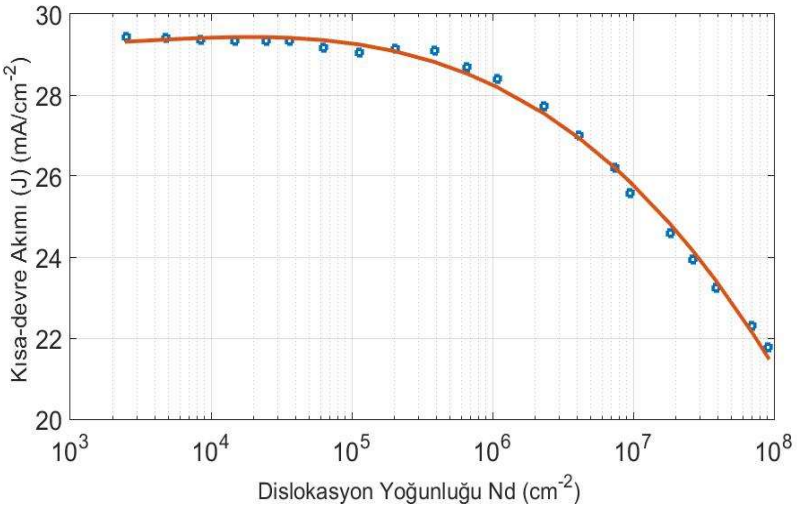
2.1. Tek Eklemli GaAs/Si Güneş Hücresinin Modellenmesi ve Optimizasyonu

Tek eklemli GaAs/Si güneş hücresi yapısında bulunan p-GaAs baz kalınlığı literatürdeki örneklere uygun şekilde 2.5 μm olarak ayarlanmıştır. Hücrenin örgü uyumsuzluğu yoğunluğu, 10^4-10^8 cm^{-2} arasında değişmiştir. 10^6 cm^{-2}'lik örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda, p-GaAs'lardaki teorik azınlık elektron ömrü 1.49 ns olarak hesaplanmıştır. Maksimum güç noktasındaki voltaj, V_m ve V_{oc}, tek eklemli GaAs/Si hücrelerinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğunu artırmıştır (Şekil 5a). Düşük örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda, hem V_{oc} ve V_m'nin daha yüksek olmasına, p-GaAs bazındaki yüksek azınlık elektron ömrünün neden olduğu düşünülmektedir. 10^5 cm^{-2}'nin altındaki örgü uyumsuzluğu yoğunluğu, V_{oc}'yi olumsuz etkilemiştir. V_{oc}, azınlık taşıyıcı ömrüyle ters orantılı olan ters doygunluk akım yoğunluğuna logaritmik olarak bağlıdır. Bu nedenle, yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda, V_{oc} ve V_m'nin düşüşünün, azınlık elektron ömrüne bağlı olarak daha yüksek ters doyma akımı yoğunluğuna sebep olduğu düşünülmektedir. Maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu, J_m ve J_{sc}, tek eklemli GaAs/Si hücresinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak belirtilmiştir (Şekil 5b). 4x10^5 cm^{-2}'nin altındaki bir örgü uyumsuzluğu yoğunluğu için, azınlık elektronlarının rekombinasyondan önce rekombinasyon noktasına ulaşması için yeterli enerjiye sahip olduğu ve bu nedenle 4x10^5 cm^{-2}'nin altındaki örgü uyumsuzluğu yoğunluklarının, J_{sc} üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Modellenen tek eklemli GaAs hücresinin kısa bir diyot olarak işlev görmesi için 2x10^6 cm^{-2} örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda τ_n değeri 0.78 ns alınmıştır. Bu örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun 2x10^6 cm^{-2}'den yüksek olduğu durumda güneş hücresi, elektron difüzyon uzunluğu GaAs kalınlığından daha kısa olacak şekilde uzun bir diyot gibi davranmıştır. Bu nedenle, Bu örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun 2x10^6 cm^{-2}'den

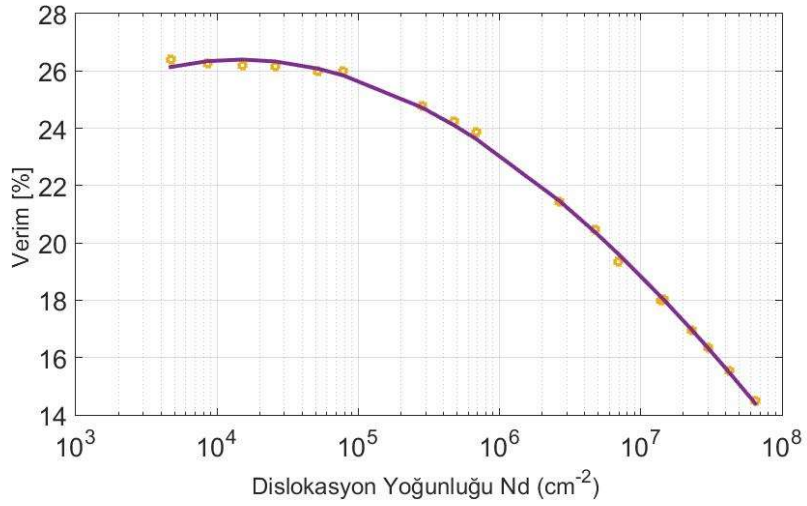
yüksek olduğu durumda, J_{sc}'deki ve J_m'deki bozulmanın azınlık elektronu ömründe kısalmaya neden olduğu düşünülmektedir.



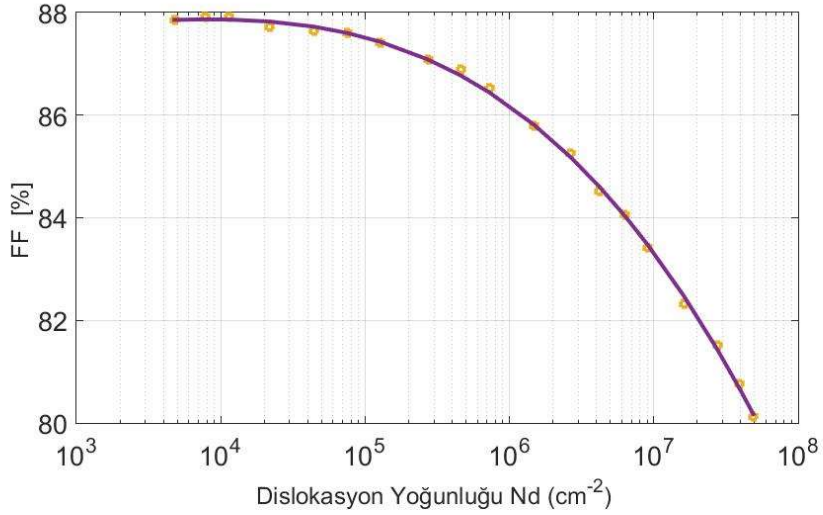
Şekil 5. (a)



Şekil 5. (b)



Şekil 5. (c)



Şekil 5. (d)

Şekil 5. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğu değişiminin tek eklemli GaAs hücre performans parametreleri üzerindeki etkisi: **(a)** V_{oc} , **(b)** J_{sc} , **(c)** verim ve **(d)** FF.

Örgü uyumsuzluğu yoğunluklarının artmasının, tek eklemli GaAs/Si güneş hücresinin verimini azalttığı ve $2x10^5$ cm^{-2}'den daha az örgü uyumsuzluğu yoğunluklarında hücre veriminin %25'in üzerine çıkabileceği sonucu elde edilmiştir (Şekil 5c). Örgü uyumsuzluğu yoğunluklarının 10^6 cm^{-2} olduğunda hücre veriminin % 23.54, 10^7 cm^{-2} olduğunda ise azınlık elektron ömründeki azalmadan dolayı % 19.61'e düşeceği sonucu elde edilmiştir. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun artmasının doldurma faktörüne (FF) etkisi de araştırılmıştır. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğu 10^5 cm^{-2}'den az olduğunda doldurma faktörünün düşeceği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 5d).

2.2. İki Eklemli InGaP/GaAs/Si Güneş Hücresinin Modellenmesi ve Optimizasyonu

İki eklemli n + / p InGaP/GaAs/Si hücresinin analizi için, GaAs ve InGaP alt-hücrelerin base kalınlıkları sırasıyla 2.5 μm ve 0.9 μm olarak ayarlanmıştır. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğu 10^5- ila 10^8 cm^{-2} arasında değişmiştir. GaAs alt-hücresindeki dislokasyonların üstteki InGaP alt-hücreye yayıldığı varsayılmıştır. InGaP/GaAs/Si hücresinin V_{oc}'sinin and V_m'sinin düşüşünün, örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna bağlı olduğu belirlenmiştir. V_{oc} aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

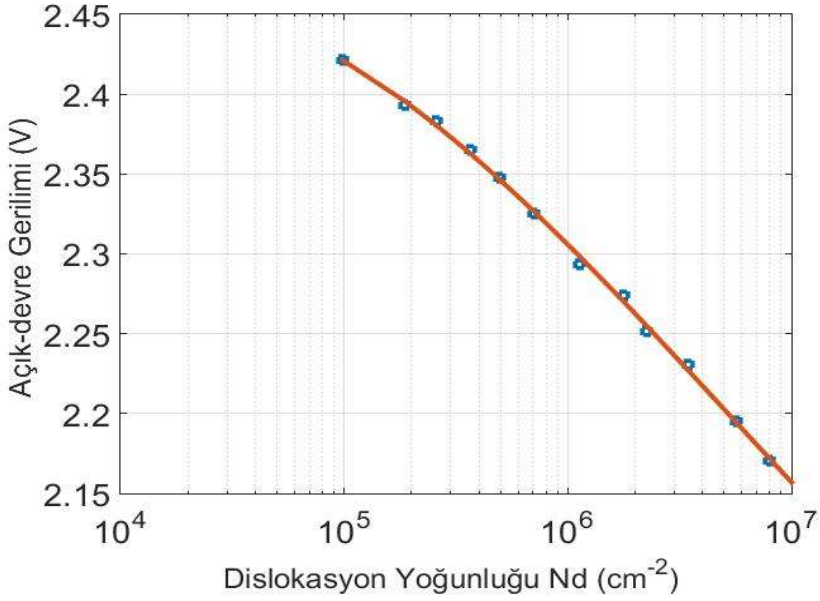
$$V_{oc} = \left(\frac{n_2 kT}{q}\right) \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_{02}}\right) \tag{2.6}$$

Burada J_{02}, azınlık taşıyıcı ömrüne bağlıdır. τ_{baz} aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

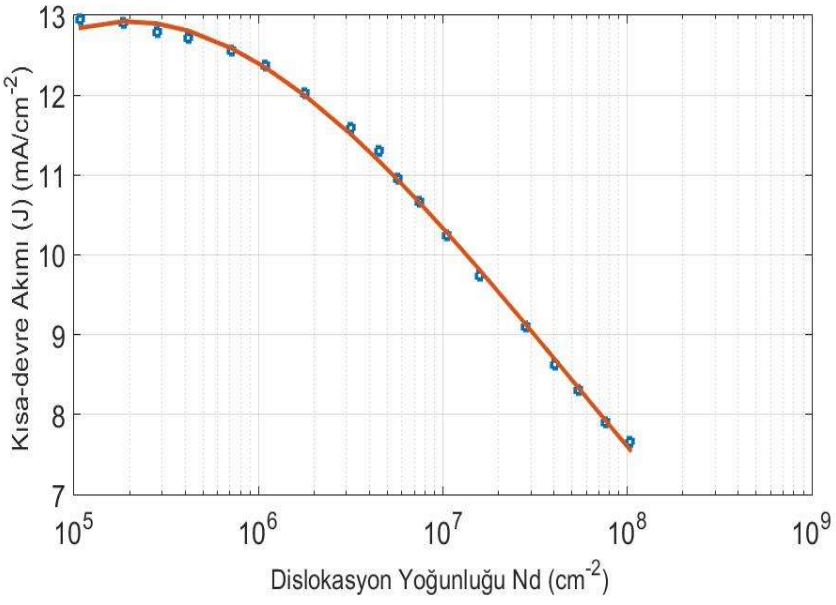
$$J_{02} = \frac{q n_i W_D}{2}\left(\frac{1}{\tau_{base}}\right) \tag{2.7}$$

Burada n_i, katkısız taşıyıcı yoğunluğunu ve W_D ise tükenim tabakasının genişliğini ifade eder. Daha yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluklarında J_{02}'nin değeri, azınlık elektron ömründeki azalma nedeniyle artmıştır. Böylece, J_0'daki artış, artan örgü uyumsuzluğu yoğunluğuyla birlikte azalan V_{oc}'ye ve V_m'ye neden olmuştur (Şekil 6). İki eklemli n+/p InGaP/GaAs/Si hücresinde, daha yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluklarında J_{SC}'nin ve J_m'nin azalmasının, GaAs ve InGaP bazdaki azınlık elektron ömrünün eşzamanlı şekilde azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İki eklemli n+/p InGaP/GaAs/Si hücresinde, J_{sc} azalmasının, tek eklemli hücredeki duruma benzer şekilde yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluklarında olduğu belirlenmiştir. İki eklemli n+/p InGaP/GaAs/Si hücresinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğu 10^6 cm^{-2} olduğunda hücre veriminin % 26 olacağı belirlenmiştir. İki eklemli n + / p InGaP/GaAs/Si hücresinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğu 10^7 cm^{-2}'nin üzerinde olduğu durumda yani

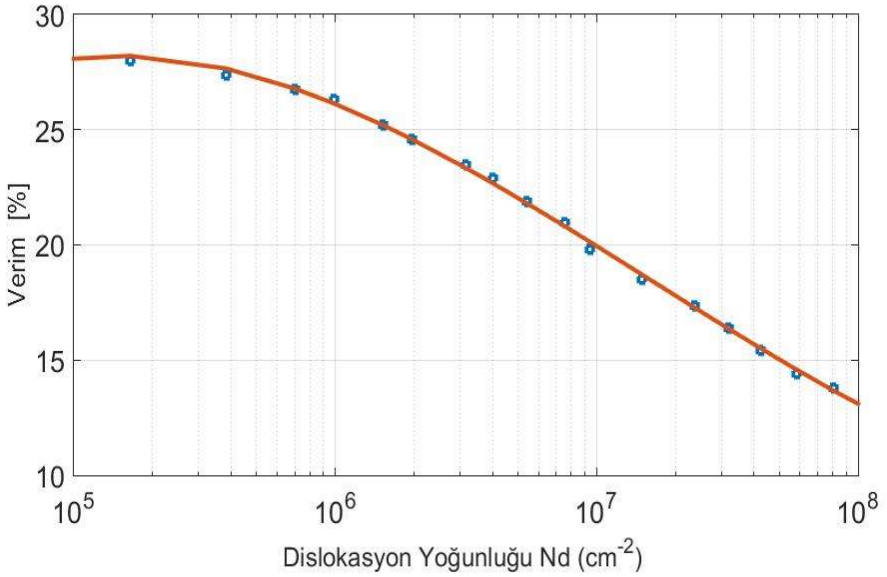
örgü uyumsuzluğu yoğunluğu arttığında hücre veriminin tek eklemli hücre verimiyle hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir, bu durumda üstteki InGaP alt-hücresinin tandem hücreye bir katkısı olmamış gibi olur (Şekil 6). İki eklemli n+/ p InGaP/GaAs/Si hücresinde alt-hücre akımlarının eşleşmediği ve GaAs alt- hücrenin tandem hücrenin Jsc'sini sınırladığı belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. (a)



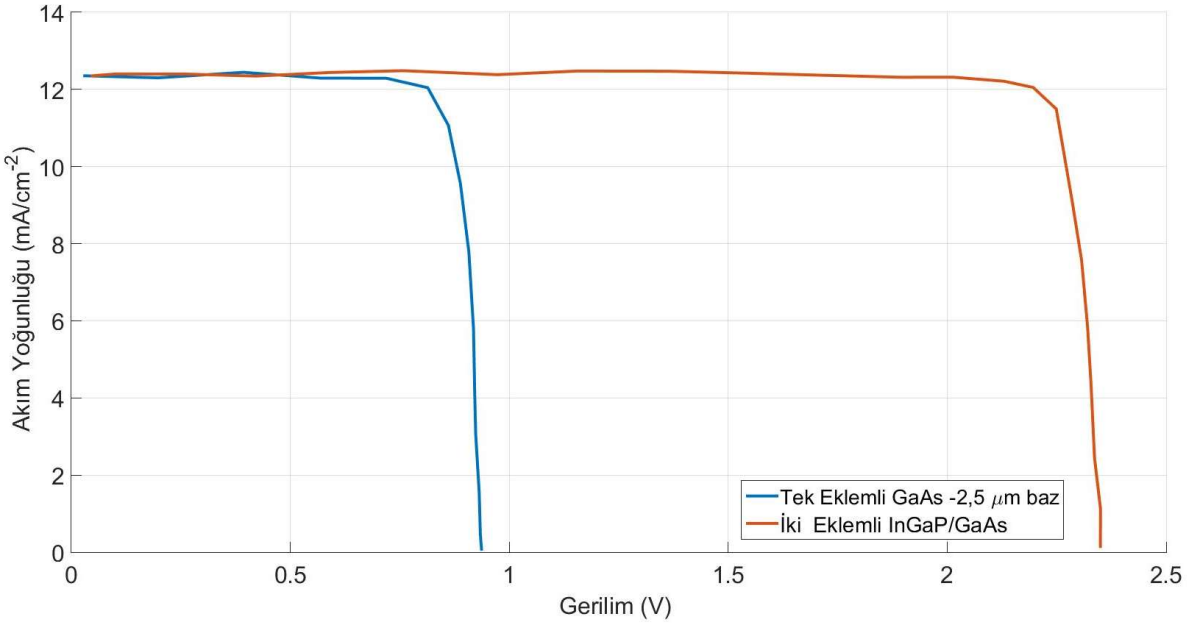
Şekil 6. (b)



Şekil 6. (c)

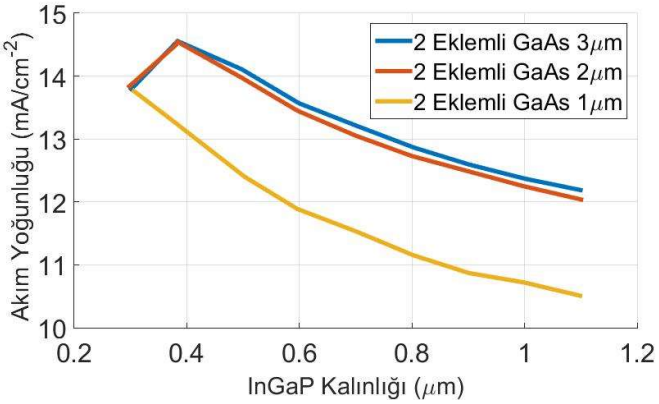
Şekil 6. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğu değişiminin iki eklemli InGaP/GaAs hücre performans parametreleri üzerindeki etkisi: **(a)** V_{oc} , **(b)** J_{sc} ve **(c)** verim.

Tandem güneş hücresinin önemli tasarım kriterlerinden biri, alt-hücreler arasındaki akım eşleşmesini sağlamaktır. Band aralığı daha yüksek olan hücre, daha yüksek bir V_{oc} ve daha düşük J_{SC} sağlar. Akım eşleştirme için, her bir alt-hücre arasındaki J_m eşleştirilmelidir. J_{SC}, hücre eşleştirmesi sırasında doğrudan ölçülebilir bir parametre olduğundan ve akım eşleştirme analizi için yaygın olarak kullanıldığından, bu tezde de akım eşleştirme için J_{SC} kullanılmıştır. Güneş hücresinde, güneş ışığının çoğu, kalın baz tabakada absorbe edilir, böylelikle, akım yoğunluğunun belirlenmesinde bazdaki azınlık taşıyıcı ömrü kritik rol oynar. Bu tezde, akım eşleştirmesi yapabilmek için ilk önce tek eklemli InGaP hücresinde p-InGaP bazının kalınlığını 1,1-0,3 µm arasında değiştirilmiştir. Ardından, iki eklemli hücrede p-InGaP bazının kalınlığı, GaAs baz kalınlığı ile aynı olacak şekilde 1 µm'ye, 2 µm'ye ve 3 µm'ye ayarlanmıştır. Baz kalınlığının tek eklemli hücrede inceltilmesinin, p-InGaP bazında absorbe edilecek fotonların absorbe edilebilirlik derinliğini azltmasından dolayı Jsc'yi düşürdüğü belirlenmiştir. Aynı durumun iki eklemli hücrede, GaAs alt-hücresine daha fazla foton gönderilmesini sağladığı, böylece GaAs alt-hücresindeki J_{sc}'nin azalmasına, InGaP alt-hücresindeki Jsc'nin armasına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, üstteki hücrenin bazının inceltilmesi ve alttaki GaAs alt-hücrenin bazının kalınlığının artırılması GaAs alt-hücreden fotonların geçişini kolaylaştıracağı belirlenmiştir (Şekil 7). Böylece, iki eklemli hücrenin Jsc değeri artırılabilir. Fakat, GaAs baz kalınlığının 2 µm ve üzerinde olması durumunda Jsc değerinde önemli bir artış sağlanamayacağı belirlenmiştir.

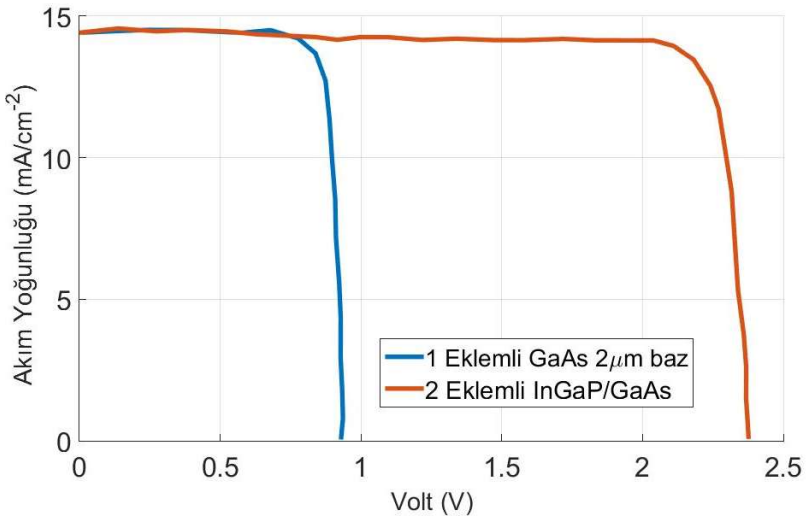


Şekil 7. 10^6 cm^{-2} Örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda hücrelerin gerilime bağlı akım yoğunluğu.

Arayüz rekombinasyonu, tandem hücrenin performansını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Tezde, GaAs alt-hücrede ve InGaP alt-hücrede arayüz rekombinasyonları 100 cm/sn olarak ayarlandığında hücre veriminin % 27'ye düştüğü bulunmuştur. Yani, arayüzey rekombinasyonları tandem hücre verimini sınırlamıştır, iki eklemli tandem hücrede verimin düşmemesi için arayüzey rekombinasyonlarının en fazla 100 cm/sn olması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 8. (a)



Şekil 8. (b)

Şekil 8. Akım eşleştirmesi için **(a)** InGaP taban kalınlığı değişimin bir fonksiyonu olarak kısa devre akım yoğunluğu ve **(b)** 2 Eklemli InGaP/GaAs/Si J-V karakteristiği.

BÖLÜM 3. SONUÇLAR VE BULGULAR

1) Tek eklemli GaAs/Si güneş hücresi yapısında bulunan p-GaAs baz kalınlığı 2.5 μm'ye ayarlandığında, hücrenin örgü uyumsuzluğu yoğunluğu, 10^4-10^8 cm^{-2} arasında değişmiştir. 10^6 cm^{-2}'lik örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda, p-GaAs'lardaki teorik azınlık elektron ömrü 1.49 ns olarak hesaplanmıştır.

2) Maksimum güç noktasındaki voltaj, V_m ve V_{oc}, tek eklemli GaAs/Si hücrelerinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğunu artırmıştır. Düşük örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda, hem V_{oc} ve V_m'nin daha yüksek olmasına, p-GaAs bazındaki yüksek azınlık elektron ömrünün neden olduğu düşünülmektedir. 10^5 cm^{-2}'nin altındaki örgü uyumsuzluğu yoğunluğu, V_{oc}'yi olumsuz etkilemiştir. V_{oc}, azınlık taşıyıcı ömrüyle ters orantılı olan ters doygunluk akım yoğunluğuna logaritmik olarak bağlıdır. Bu nedenle, yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda, V_{oc} ve V_m'nin düşüşünün, azınlık elektron ömrüne bağlı olarak daha yüksek ters doyma akımı yoğunluğuna sebep olduğu düşünülmektedir.

3) Maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu, J_m ve J_{sc}, tek eklemli GaAs/Si hücresinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak belirtilmiştir. $4x10^5$ cm^{-2}'nin altındaki örgü uyumsuzluğu yoğunluğu için, azınlık elektronlarının rekombinasyondan önce rekombinasyon noktasına ulaşması için yeterli enerjiye sahip olduğu ve bu nedenle $4x10^5$ cm^{-2}'nin altındaki örgü uyumsuzluğu yoğunluklarının, J_{sc} üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir.

4) Modellenen tek eklemli GaAs hücresinin kısa bir diyot olarak işlev görmesi için $2x10^6$ cm^{-2} örgü uyumsuzluğu yoğunluğunda τ_n değeri 0.78 ns alınmıştır. Bu örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun $2x10^6$ cm^{-2}'den yüksek olduğu durumda güneş hücresi, elektron difüzyon uzunluğu GaAs kalınlığından daha kısa olacak şekilde uzun bir diyot gibi davranmıştır. Bu nedenle, Bu örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun $2x10^6$ cm^{-2}'den yüksek olduğu durumda, J_{sc}'deki ve J_m'deki azalmanın azınlık elektronu ömründe kısalmaya neden olduğu düşünülmektedir.

5) İki eklemli n + / p InGaP/GaAs/Si hücresinin analizi için, GaAs ve InGaP alt-hücrelerin base kalınlıkları sırasıyla 2.5 μm ve 0.9 μm olarak ayarlanmıştır. Örgü uyumsuzluğu yoğunluğu 10^5- ila 10^8 cm^{-2} arasında değişmiştir. GaAs alt-hücresindeki dislokasyonların üstteki InGaP alt-hücreye yayıldığı varsayılmıştır. InGaP/GaAs/Si hücresinin V_{oc}'sinin and V_m'sinin düşüşünün, örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna bağlı olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluklarında J_{02}'nin değeri, azınlık elektron ömründeki azalma nedeniyle artmıştır. Böylece, J_0'daki artış, artan örgü uyumsuzluğu yoğunluğuyla birlikte azalan V_{oc}'ye ve V_m'ye neden olmuştur. İki eklemli n+/p InGaP/GaAs/Si hücresinde, daha yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluklarında J_{SC}'nin ve J_m'nin azalmasının, GaAs ve InGaP bazdaki azınlık elektron ömrünün eşzamanlı şekilde azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İki eklemli n+/p InGaP/GaAs/Si hücresinde, J_{sc} azalmasının, tek eklemli hücredeki duruma benzer şekilde yüksek örgü uyumsuzluğu yoğunluklarında olduğu belirlenmiştir.

6) İki eklemli n+/p InGaP/GaAs/Si hücresinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğu 10^6 cm^{-2} olduğunda hücre veriminin % 26 olacağı belirlenmiştir. İki eklemli n + / p InGaP/GaAs/Si hücresinde örgü uyumsuzluğu yoğunluğu 10^7 cm^{-2}'nin üzerinde olduğu durumda yani örgü uyumsuzluğu yoğunluğu arrtığında hücre veriminin tek eklemli hücre verimiyle hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir, bu durumda üstteki InGaP alt-hücresinin tandem hücreye bir katkısı olmamış gibi olur.

7) İki eklemli n+/ p InGaP/GaAs/Si hücresinde alt-hücre akımlarının eşleşmediği ve GaAs alt- hücrenin tandem hücrenin Jsc'sini sınırladığı belirlenmiştir.

8) Bu tezde, akım eşleştirmesi yapabilmek için ilk önce tek eklemli InGaP hücresinde p-InGaP bazının kalınlığını 1,1-0,3 μm arasında değiştirilmiştir. Ardından, iki eklemli hücrede p-InGaP bazının kalınlığı, GaAs baz kalınlığı ile aynı olacak şekilde 1 μm'ye, 2 μm'ye ve 3 μm'ye ayarlanmıştır. Baz kalınlığının tek eklemli hücrede inceltilmesinin, p-InGaP bazında absorbe edilecek fotonların absorblanma derinliğini azltmasından dolayı Jsc'yi düşürdüğü belirlenmiştir. Aynı durumun iki eklemli hücrede, GaAs alt-hücresine daha fazla foton gönderilmesini sağladığı, böylece GaAs alt-hücresindeki J_{sc}'nin azalmasına, InGaP alt-hücresindeki Jsc'nin armasına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, üstteki hücrenin bazının inceltilmesi ve alttaki GaAs alt-hücrenin bazının kalınlığının artırılması GaAs alt-hücreden

fotonların geçişini kolaylaştıracağı belirlenmiştir. Böylece, iki eklemli hücrenin Jsc değeri artırılabilir. Fakat, GaAs baz kalınlığının 2 μm ve üzerinde olması durumunda Jsc değerinde önemli bir artış sağlanamayacağı belirlenmiştir.

9) Tezde, GaAs alt-hücrede ve InGaP alt-hücrede arayüz rekombinasyonları 100 cm/sn olarak ayarlandığında hücre veriminin % 27'ye düştüğü bulunmuştur. Yani, arayüzey rekombinasyonları tandem hücre verimini sınırlamıştır, iki eklemli tandem hücrede verimin düşmemesi için arayüzey rekombinasyonlarının en fazla 100 cm/sn olması gerektiği belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

[1] Shahrjerdi. D., Bedell. S. W., Ebert. C., C., Bayram. B. Hekmatshoar, K. Fogel, "High-efficiency thin-film InGaP/InGaAs/Ge III-V solarcells enabled by controlled spalling technology," Appl. Phys. Lett, 320-348,2012.

[2] Yamaguchi. A., Yamamoto. M., Tachikawa. Y., "Defect reduction effects in GaAs on Si alt tabakaes by thermal annealing," Appl. Phys. Lett. 19-45, 1988.

[3] Gren. M. A., "Silicon wafer-based III-V cells: The ultimate photovoltaic solution ?" Proc. SPIE, Physics, Simulation, and Photonic Enginering of Photovoltaic DeVices III, 113-120, 2014.

[4] Derendorf. K., Essig. S., Oliva. E., Klinger. V., Roesener. T., Philipps. S. P., "Fabrication of GaInP/GaAs/Si solarcells by Surface Activated Direct Wafer Bonding," IEE J. Photovoltaics, 26-40, 2013.

[5] Andre. C. L., Carlin. J. J., Boeckl. D., Smith. A., J. ve arkadaşları, "Investigations of high-performance GaAs solarcells grown on Ge-Si1-x-Gex-Si subcells," IEE Trans. Electron DeVices, 45-63, 2005.

[6] Souza. J,. Haysom. H., and Hinzer. K., "The down-to-earth future of Si alt tabakae multi-junction concentrator photovoltaics," in IEE Electrical Power and Energy Conf., 11-50, 2011.

[7] Gren. M. A., Emery. K., Hishikawa. Y., Warta W., and Dunlop. E. D., "solarcell efficiency tables " Prog. Photovoltaics: 95-96, 2015.

[8] Tatavarti. A., Wibowo. G., Martin. F., Tuminello. C., Youtsey. G., 26-29, 2010.

[9] Vernon. S. M., Haven. V. E., Tobin. S. P., and Wolfson R. G., "Metalorganic chemical vapor deposition of GaAs on Si for solarcell applications," J. Crystal Growth, 1986.

[10] Bett. A. W., Philipps S. P., Essig. S., Heckelmann. S., Kellenbenz. Niemeyer M., Lackner D., 56-71, 2013.

[11] Soga. T., Kato. M., Yang. M., Umeno.T., "High efficiency AlGaAs/Si monolithic III-V solarcell grown by metalorganic chemical vapor deposition," J. Appl. Phys. 116-125, 1995.

[12] Grassman. T. J., Carlin. A. M., and Ringel. S. A., "Metamorphic GaAsP and InGaP photovoltaic materials on Si for high-efficiency III-V/Si multijunction solarcells," in Proc. 35th IEE Photovoltaic Spec. Conf, 144-156, 2010.

[13] Yang. Z., Peng. R., "Fabrication of High-Efficiency III-V on Silicon Multijunction Solarcells by Direct Metal Interconnect," IEE J. Photovoltaics, 94-102, 2014.

[14] Dimroth. F., Roesener. T., Essig. S., Weuffen. C., Wekkeli. A., Oliva. E., et al. "Comparison of Direct Growth and Wafer Bonding for the Fabrication of GaInP/GaAs Dual-Junction Solarcells on Silicon," IEE J. Photovoltaics, 27-35, 2014.

[15] Diaz. A., Gerger. A., Lochtefeld. C., Ebert. R., "Dual-Junction GaAsP/SiGe on Silicon III-V solarcells," in Proc. 40th IEE Photovoltaic Spec. Conf.39-50, 2014.

[16] Lang. J. R., Le. M. L., "Towards high efficiency GaAsP solarcells on (001) GaP/Si," in Proc. 40th IEE Photovoltaic Spec. Conf. 213-225, 2014.

[17] Geisz. J. F., Olson. J. M., Friedman. D. J., Jones M., Redy. R. C., ve Romero. M. J., "Lattice-matched GaNPAs-on-silicon III-V solarcells," in Proc. 31st IEE Photovoltaic Spec. Conf. 189-195, 2005.

[18] Lundstrom. M. S., "Minority carrier transport in III-V semiconductors," Minority Carrier in III-V Semiconductors: Physics and Applications, Semiconductors and Semimetals, Academic Press Inc. 312-322, 1993

[19] Andre. C. L., "Impact of dislocations on minority carrier electron and hole lifetimes in GaAs grown on metamorphic SiGe alt tabakaes," Appl. Phys. Lett. May 122-130, 2004.

[20] Poortmans. J., Ghannam. M. Y., Nijs J. F., and Mertens R. P., "Theoretical study of the impact of bulk and interface recombination on the performance of GaInP/GaAs/Ge triple junction III-V solarcells," in Proc. 3rd World Conf Photovoltaic Energy Convers,108-121, 2003

[21] Takamoto., T. "Radiation resistance of high-efficiency InGaP GaAs III-V solar cells," SolarEnergy Mater.303-3012, 1999.

[22] Ohmori. M., Takamoto. T., E. Ikeda and, Kurita. H., "Structural optimzation for single junction InGaP solar cell," solar Energy Mater. solarCells, Sep. 196-207,1994.

[23] Sadana. D. D., Shahrjerdi. S. W., Bedell. C., Ebert. C., Bayram. B., Hekmatshoar. K., Fogel. P., Lauro. M., Gaynes. T., Gokmen. J., “High-efficiency thin-film InGaP/InGaAs/Ge III-V solarcells enabled by controlled spalling technology,” Appl. Phys. Lett. 210-219, 2012.

[24] Yamaguchi. M. and Amano C., "Efficiency calcuations of thin-film GaAs solar-cells on Si alt tabakaes," J. Appl. Phys. 356-370, 1985.

[25] Yang. M. J. "Photoluminescence analysis of InGaP top cells for high-efficiency multi-junction solar cells," Solar Energy Mater. Solar Cells, 111-130, 1997.

[26] Ikeda. E., Kurita. T., Takamoto ve Ohmori. M., "Over 30% efficient InGaP/GaAs III-V solar cells," Appl. Phys. Lett. Jan. 38-40, 1997.

[27] Algora. C. "Lattice-Matched III-V Dual-Junction Solar Cells for Concentrations Around 1000 Suns," J. Sol Energ, 44-60, 2007.

[28] Takano. Y., "Reduction of threading dislocations by InGaAs interlayer in GaAs layers grown on Si substances," Appl. Phys. Lett. 18-22, 1998.

[29] Kurtz. S. R., Faine. P., and Olson. J.M., "Modeling of two-junction, series-connected III-Vs solarcells using top-cell thickness as an adjustable parameter," J. Appl. Phys.80-92, 2011.

[30] Kinsey. G. S., Hebert P., Barbour. K. E., "Concentrator multijunction suncell characteristics under variable intensity and temperature," Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 20-32, 2008.

[31] Ebert. C., Shahrjerdi. D, Bedell. S., Bayram. C., "High-efficiency thin-film InGaP/InGaAs/Ge III-V solarcells enabled by controlled spalling technology," Appl. Phys. Lett. 30-32, 2012.

[32] Burroughs. S., Conner. R., Furman. B., Menard. E., Gray. A., "A New Approach For A Low Cost CPV Module Design Utilizing Micro-Transfer Printing Technology," AIP Conf. Proc. 60-71, 2010.

[33] Tatavarti. R., Wibowo. A., Martin. C., Tuminello. F., Youtsey. C., Hillier.G., "InGaP/GaAs/InGaAs inverted metamorphic (IMM) solar cells on 4" epitaxial lifted off (ELO) wafers," in Proc. 35th IEE Photovoltaic Spec. Conf. 99-110, 2010.

[34] Mulder.P., Haverkamp. E. J., Bauhuis. G. J., Schermer. "Wafer reuse for repeated growth of III–V suncells," Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 118-130, 2010.

[35] Wiemer. M., Sabnis. V., "High-efficiency multijunction solarcells employing dilute nitrides," AIP Conf. Proc. 55-59, 2012.

[36] Geisz. J. F., Kurtz. S., Wanlass. M. W., Ward. J. S., "High-efficiency GaInP/GaAs/InGaAs triple-junction solarcells grown inverted with a metamorphic bottom junction," Appl. Phys. Lett. 90-92, 2007.

[37] Ahrenkiel, R. K., Dunlavy, D. J. ve Hamaker,H. C. X. “High speed characterization of photovoltaic devices”. Solar cells, 353–369, 1987.

[38] Andre, C. L., Carlin J. A., Boeckl, J. J. Boeckl, Wilt, D.M., M. A. Smith, A. J. Pitera, Lee ,M. L., Eugene A. F., ve Steven A. R. “Investigations of high-performance GaAs solar cells grown on Ge-Si/sub 1-x/Ge/sub x/-Si substrates”. IEEE Transactions on Electron Devices, 1055–1060, 2005.

[39] Archer, M. J., Law D.C., Shoghig M., Haddad, M. Fetzer,C. M., Ackerman, A. C., Corinne L., King, R. R., ve Atwater,H. A. “Ga In P/ Ga As dual junction solar cells on Ge/ Si epitaxial templates”. Applied Physics Letters, 103-503, 2008.

[40] Ahrenkiel, R. K., Dunlavy, D. J. ve Hamaker,H. C. X. “High speed characterization of photovoltaic devices”. Solar cells, 353–369, 1987.

[41] Andre, C. L., Carlin J. A., Boeckl, J. J. Boeckl, Wilt, D.M., M. A. Smith, A. J. Pitera, Lee ,M. L., Eugene A. F., ve Steven A. R. “Investigations of high-performance GaAs solar cells grown on Ge-Si/sub 1-x/Ge/sub x/-Si substrates”. IEEE Transactions on Electron Devices, 1055–1060, 2005.

[42] Archer, M. J., Law D.C., Shoghig M., Haddad, M. Fetzer,C. M., Ackerman, A. C., Corinne L., King, R. R., ve Atwater,H. A. “Ga In P/ Ga As dual junction solar cells on Ge/ Si epitaxial templates”. Applied Physics Letters, 103-503, 2008.

[43] Arora, N. D., ve Hauser J. R.. “Temperature dependence of silicon solar cell characteristics”. Solar Energy Materials, 151–158, 1982.

[44] Cariou, R., Benick, J., Feldmann, F., Höhn, O., Hauser, H., Beutel, P., Nasser Razek., Wimplinger, M., Bläsi, B. ve Lackner, D. “III–V-on-silicon solar cells reaching 33% photoconversion efficiency in two-terminal configuration”. Nature Energy, 326, 2018.

[45] Diaz, M., Li W., Gerger A., Lochtefeld, A., Chris E., Opila, R., Perez I.,-Wurfl, ve Allen B. “Dual-junction GaAsP/SiGe on silicon tandem solar cells”. Içinde 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 827–830, 2014.

[46] Dimroth, F., Roesener, T., Essig, P., Weuffen, C., Wekkeli, A., Oliva, E., Gerald S., Volz, K., Hannappel, T., ve Häussler, T. “Comparison of direct growth and wafer bonding for the fabrication of GaInP/GaAs dual-junction solar cells on silicon”. IEEE Journal of Photovoltaics, 620–625, 2014.

[47] Geisz, J. F., Olson,J. M., Friedman, D. J., Jones, K. M., Reedy,R. C., ve Romero,M. J. “Lattice-matched GaNPAs-on-silicon tandem solar cells”. Içinde

Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 695–698, 2005.

[48] Itoh, Y., Takashi N., Akio, Y., ve Masafumi, Y. "14.5% conversion efficiency GaAs solar cell fabricated on Si substrates". Applied physics letters, 1614–1616, 1986.

[49] Jain, N., ve Mantu, K. "III–V multijunction solar cell integration with silicon: Present status, challenges and future outlook". Energy Harvesting and Systems, 121–145, 2014.

[50] Lundstrom, M.S., ve Schuelke R. J."Numerical analysis of heterostructure semiconductor devices". IEEE Transactions on Electron Devices, 1151–1159, 1983.

[51] Öztürk, H. H."Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi Ve Etkili Etmenler". Içinde V. Elektrik tesisat ulusal kongre ve sergisibildirileri,14. http://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf, 2007.

[52] Sarıkaya, S. "Güneş Enerjisi Sektörel Analiz Raporu". Doğu Anadolu Kalkınma Ajansı. http://www.daka.org.tr/panel/files/files/yayinlar/gunes_sektorel.pdf,2019.

[53] Tanabe, K., Katsuyuki W., ve Arakawa, Y. "III-V/Si hybrid photonic devices by direct fusion bonding". Scientific reports, 349, 2012.

[54] Tran, B., Yi, C., Hai, D. T., Lee, T. C, Kartika C. S., Kung,L. L., Man-C. H., Hung,W. Y., Luong, T.T ve Chung, C.C. "Fabrication and characterization of n-In0. 4Ga0. 6N/p-Si solar cell". Solar Energy Materials and Solar Cells, 208–211, 2012.

[55] Yamaguchi, T., Takeshi T., Shiro N., Akira, F.i, Yasutsugu N., Kenta M.i. Efficacy of Left Atrial Voltage-Based Catheter Ablation of Persistent Atrial Fibrillation. C. https://doi.org/10.1111/jce.13019, 2016.

[56] Yang, J., Zhilin P., Dan C."Fabrication of high-efficiency III–V on silicon multijunction solar cells by direct metal interconnect". IEEE Journal of Photovoltaics,1149–1155, 2014.

[57] Hudait. M. K., Jain. N., "Design of metamorphic dual-junction InGaP/GaAs solarcell on Si with efficiency greater than 29% using finite element analysis," in Proc. 38th IEE Photovoltaic Spec. Conf. 80-86, 2012.

[58] Wonsak. S., Affolder. A., Casse G., Dervan P., Tsurin I., Measurements of the reverse current of highly irradiated silicon sensors, Nucl. Instrum. Methods. 112-122, 2015

[59] King. R. R., Law. D. C., Edmondson. K. M. E, Fetzer. C. M., G. S. Kinsey, Yoon. H., R. Sherif A., Karam. N. H., "40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solarcells," Appl. Phys. Lett. 44-49, 2007.

[60] Guter. W., Schone. J., Philipps. S., Steiner. M., G., Siefer. A., Wekkeli. E., Welser. E., Oliva. A., Bett. F. D., "Current-matched triple-junction solarcell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight," Appl. Phys. Lett. 56-58, 2009.

[61] Lueck. M. R., Andre. C. L., Pitera. A. J., Le. M. L., E. Fitzgerald .A., Ringel S. A., "Dual junction GaInP/GaAs solarcells grown on metamorphic SiGe/Si alt tabakaes with high open circuit voltage," IEE Electron DeVice Lett. 98-104, 2006.

[62] Boeckl. J. J., "APSYS, Advanced Physical Models of Semiconductor DeVices," Crosslight Software Inc., Burnaby, BC, Canada. 55-59, 1998.

[63] Friedman. D. J., "Modelling of III-V cell temperature coefficients," in Proc. 25th IEE Photovoltaic Spec. Conf. 113-140, 1996.

[64] Yamaguchi, T., Takeshi T., Shiro N., Akira, F.i, Yasutsugu N., Kenta M.i. Efficacy of Left Atrial Voltage-Based Catheter Ablation of Persistent Atrial Fibrillation. 145-152, 2016.

[65] Yamaguchi. M., Amano. C., ve Itoh. Y., "Numerical-analysis for high-efficiency GaAs solar-cells fabricated on Si alt tabakae," J. Appl. Phys. 65-69, 1989.

[66] Andre. C. L., Wilt .D. M., A. J. Pitera, Le. M. L., Fitzgerald. E. A., Keyes. B. M., ve Ringel.S. A., "Impact of dislocations on minority carrier electron and hole lifetimes in GaAs grown on metamorphic SiGe alt tabakaes," Appl. Phys. Lett. 140-145, 2004.

[67] Lovejoy. M. L., Melloch. M. R.,ve Lundstrom. M. S., "Minority hole mobility in GaAs," in Properties of Gallium Arsenide. Brozel. M. R., ve Stillman. G. E., London, 45-54, 1996.

[68] Ahrenkiel. R. K., ve Lundstrom. M. S., "Minority carrier transport in III-V semiconductors," in Minority Carrier in III-V Semiconductors: Physics and Applications Willardson. R. K,. Ber. A. C., ve Weber. E. R., Eds., New York: Academic, 26-33, 1993.

[69] Ghannam. M. Y., Poortmans. J., Nijs. J. F., ve Mertens. R. P., "Theoretical study of the impact of bulk and interface recombination on the performance of GaInP/GaAs/Ge triple junction III-V solarcells," in Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Convers. 45-49, 2003.

[70] Takamoto. T., Yamaguchi. M., Taylor. S. J., Yang. M.J., Ikeda. E., ve Kurita. H., "Radiation resistance of high efficiency InGaP GaAs III-V suncells," Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 201-203, 1999.

[71] Garcia. I., Rey. S., Galiana. B., ve Algora. C., "A 32.6% efficient lattice-matched dual-junction solarcell working at 1000 suns," Appl. Phys. Lett. 87-88, 2009.

[72] Steiner. M., Philipps. S. P., Hermle. M., Bett. A. W., Dimroth. F., "Validated front contact grid simulation for GaAs solarcells under concentrated sunlight," Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 55-63, 2011.

[73] Araujo. G. L., Sanchez. E., "A New Method for Experimental Determination of the Series Resistance of a Solarcell," IEE Trans. Electron DeVices. 86-95, 1982.

[74] Wagner. H., Ohrdes. T., Dastgheib. A., Puthen. B., Veettil. D., ve Altermatt. P. P., Altermatt, "A numerical simulation study of galliumphosphide/ silicon heterojunction passivated emitter and rear solar cells," Journal of Applied Physics. 150-162, 2014.