FARKLI KONSANTRASYONLARDAKİ GÜNEŞ IŞIĞI ALTINDA VE FARKLI SICAKLIKLARDA YÜKSEK VERİME SAHİP TEK EKLEMLİ GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ

Çağlar Duran
151405102

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

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

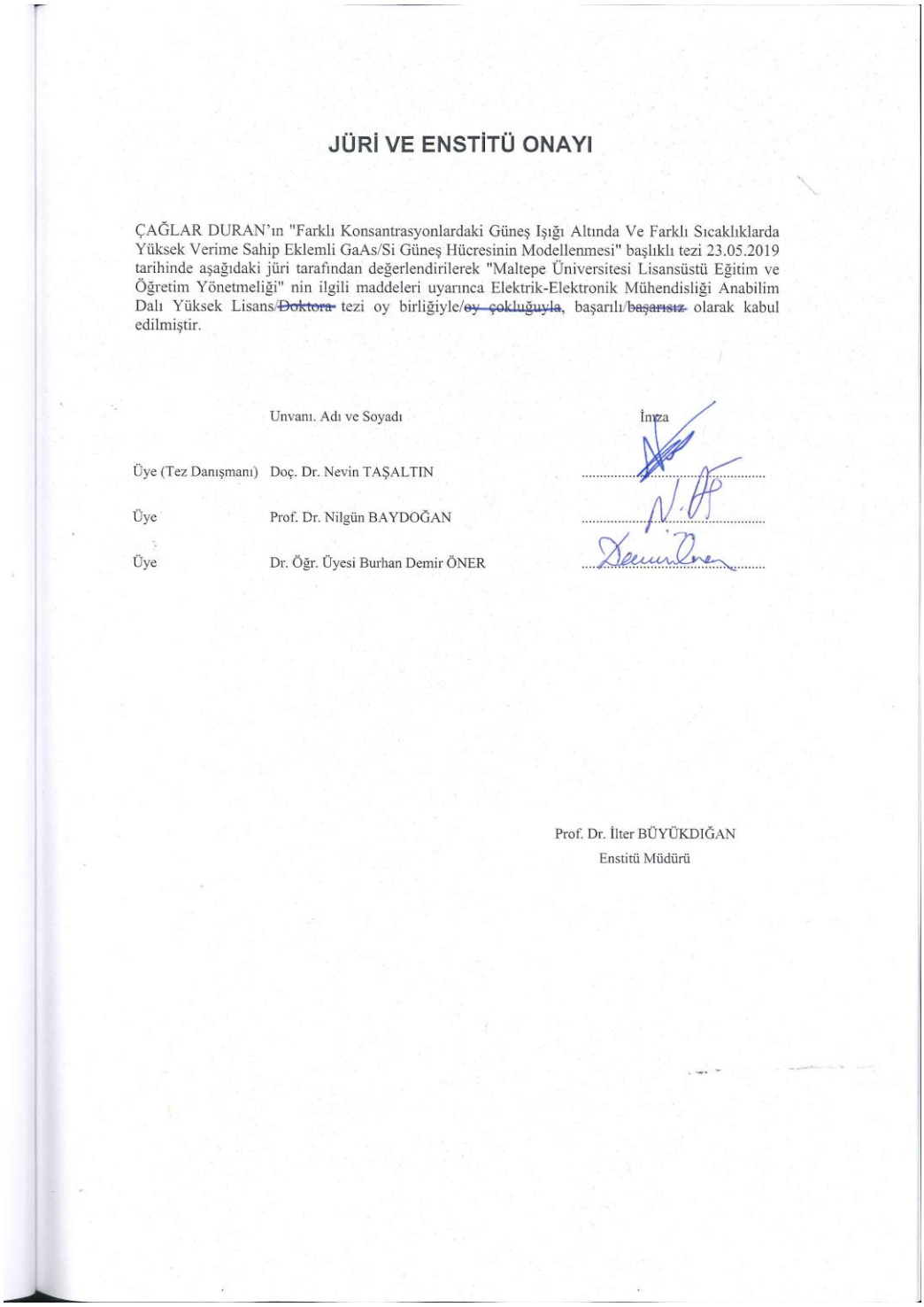
FARKLI KONSANTRASYONLARDAKİ GÜNEŞ IŞIĞI ALTINDA VE FARKLI SICAKLIKLARDA YÜKSEK VERİME SAHİP TEK EKLEMLİ GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ

Çağlar Duran
151405102

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

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

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI



JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

ÇAĞLAR DURAN'ın "Farklı Konsantrasyonlardaki Güneş Işığı Altında Ve Farklı Sıcaklıklarda Yüksek Verime Sahip Eklemli GaAs/Si Güneş Hücresinin Modellenmesi" 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 Dalı Yüksek Lisans/~~Doktora~~ tezi oy birliğiyle/~~oy çokluğuyla~~, başarılı/~~başarısız~~ olarak kabul edilmiştir.

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

Prof. Dr. İlter BÜYÜKDIĞAN
Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI

maltepe üniversitesi	ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI	Doküman No	FR-178
		İlk Yayın Tarihi	01.03.2018
		Revizyon Tarihi	
		Revizyon No	00
		Sayfa	1/1

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.

Çağlar DURAN

Hazırlayan	Kalite Koordinatörü	Kurumsal Yetkili
İlgili Birim	Dr. Öğr. Üyesi Şafak GÜNDÜZ	Prof. Dr. Belma AKŞİT

(Doküman No: FR-178; Yayın Tarihi: 01.03.2018; Revizyon Tarihi: ; Revizyon No:00)

İNTİHAL RAPORU

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

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bana sürekli yol gösteren ve bilgilerini benimle paylaşan değerli tez danışmanı hocam Doç. Dr. Nevin TAŞALTIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çağlar Duran

Nisan 2019

ÖZ

FARKLI KONSANTRASYONLARDAKİ GÜNEŞ IŞIĞI ALTINDA VE FARKLI SICAKLIKLARDA YÜKSEK VERİME SAHİP TEK EKLEMLİ GAAS/Si GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ

Çağlar Duran
Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı Adı
Elektrik-Elektronik Programı
Danışman: Doç. Dr. Nevin TAŞALTIN
Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019

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 veriminin son yıllarda % 20-22'ye ulaşması son derece ümit vericidir. 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. Si alttaban üzerine GaAs esaslı güneş hücrelerinin üretilme teknolojileri 1980'li yıllardan bu yana araştırılmaktadır ve halen bu teknolojilerde birçok kısıt ve zorluk bulunmaktadır. Daha yüksek verimli güneş hücresi üretebilmek için Si üzerine GaAs güneş hücrelerinin üretimi öncesinde, GaAs güneş hücresinin Si üzerine entegrasyonu ile ilgili anahtar modelleme kriterleri ve teknik zorluklar mutlaka araştırılmalı, modellemesi ve optimizasyonu yapılmalıdır. Tezde, tek eklemli GaAs/Si güneş hücrelerinin farklı sıcaklıklar ve farklı güneş ışığı konsantrasyonları için geçerli, dislokasyonlara bağlı açık devre gerilimleri, kısa devre akım yoğunlukları ve verim değerleri nümerik analiz ile modellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 1. GaAs güneş hücresi; 2. verim; 3. açık devre gerilimi, 4. kısa devre akımı

ABSTRACT

MODELING OF HIGH EFFICIENCY SINGLE-JUNCTION GAAS/SI SOLAR CELL UNDER DIFFERENT CONCENTRATED SUNLIGHT AND TEMPERATURE

Çağlar Duran
Master Thesis
Electrical-Electronical Engineering Department
Electrical-Electronical Engineering
Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr., Nevin TAŞALTIN
Maltepe University Natural Sciences Graduate School, 2019

GaAs solar cells are the most efficient solar cells for space applications. Among other solar cell technologies, the highest efficiency is achieved and the high costs limit the spread of the application areas. Researchers are developing new production technologies to reduce costs. It is highly promising that the yield of single jointed Si solar cells reaches 20-22% in recent years. In GaAs based solar cells, the material that increases the cost is the substrate. The price of GaAs substrate of the same diameter is higher than Si substrate. Thanks to the integration of GaAs solar cells on the Si substrate, the cost problem can be overcome. The technologies for the production of GaAs based solar cells on Si subbands have been investigated since the 1980s and there are still many constraints and difficulties in these technologies. Prior to the production of GaAs solar cells on Si, the key modeling criteria and technical difficulties associated with the integration of GaAs solar cell on the Si must be investigated, modeled and optimized. In the thesis, single jointed GaAs/Si solar cells are modeled for different temperatures and different sunlight concentrations, open circuit voltages due to dislocations, short circuit current densities and yield values are modeled by numerical analysis.

Keywords: 1. GaAs solar cell, 2. efficiency, 3. open circuit voltage, 4. short circuit current

İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI iii
TEŞEKKÜR v
ÖZ vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
TABLOLAR LİSTESİ ix
ŞEKİLLER LİSTESİ x
KISALTMALAR xi
ÖZGEÇMİŞ xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1. Güneş Enerjisi 1
1.2. Güneş Hücresi Teknolojileri 3
1.3. GaAs/Si Güneş Hücreleri 10
BÖLÜM 2. GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ 12
2.1. Güneş Hücresinin Performansına İlişkin Hesaplama Esasları 12
2.2. GaAs/Si Güneş Hücresinin Teorik Hesaplamaları-Modellenmesi 15
BÖLÜM 3. SONUÇ VE BULGULAR 21
KAYNAKÇA 24

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. GaAs/Si güneş hücrelerinin üretimi için uygulanan yöntemlerde yaşanan deneysel zorluklar ve en yüksek verim değerleri 11

Tablo 2.1. Literatürden edinilen GaAs ve InGaP malzeme ve iletim parametreleri 16

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Güneş enerji spektrumu 5

Şekil 1.2. Güneş hücresinin, güneş ışığı gelmeden önceki durumu 6

Şekil 1.3. Güneş hücresinin üzerine güneş ışığı geldiği durum 6

Şekil 2.1. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı hesaplanan azınlık taşıyıcı ömrü değişimi 18

Şekil 2.2. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı GaAs/Si hücresinin hesaplanan verim değişimi 19

Şekil 2.3. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı GaAs/Si hücresinin hesaplanan JSC akım yoğunluğu değişimi 19

Şekil 2.4. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı GaAs/Si hücresinin hesaplanan VOC gerilim değişimi 20

Şekil 2.5. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı GaAs/Si hücresinin hesaplanan verim değişimi 20

KISALTMALAR

V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı
J_{sc}	: Kısa Devre Akımı Yoğunluğu
MPP	: Maksimum Güç Noktası
GaAs	: Galyum Arsanüs
Si	: Silisyum
PV	: Fotovoltaik hücre

ÖZGEÇMİŞ

Çağlar Duran

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eğitim

Derece	*Yıl*	*Üniversite, Enstitü, Anabilim/Anasanat Dalı*
Ls.	2008-2013	Tunceli Üniversitesi
Y.Ls.	2015-	Maltepe Üniversitesi

İş/İstihdam

Yıl	*Görev*
2014	Makelsan-Satış Destek Mühendisi

Mesleki Birlik/Dernek Üyelikleri

Yıl	*Kurum*

Alınan Burs ve Ödüller

Yıl	*Burs/Ödül*

Yayınlar ve Diğer Bilimsel/Sanatsal Faaliyetler

.

Kişisel Bilgiler

1990 yılı İstanbul doğumludur. Habire Yahşi Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2008'de Tunceli Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başlayıp 2013 yılında mezun olmuştur. 2015 yılında Maltepe Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Ağustos 2013 tarihinden bugüne Kesintisiz Güç Kaynağı (UPS) firmasında Satış Destek Mühendisi olarak çalışmaktadır.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Tezin 1. Bölümü'nde, güneş enerjisi, güneş hücresi teknolojileri, güneş hücresinin karakterizasyonu, GaAs/Si güneş hücreleri, GaAs/Si güneş hücrelerinin üretimi için uygulanan yöntemlerde yaşanan deneysel zorluklar ve kısıtlar üzerinde durulmuştur. Tezin 2. Bölümü'nde, GaAs/Si güneş hücrelerinin katıhal fiziğine ve elektroniğine uygun şekilde nümerik analizler yapılarak hesaplamaları yapmıştır. Güneş hücresinin performansına ilişkin hesaplama esasları ve yapılan hesaplama-modelleme sonuçları sunulmuştur. Tezin 3. Bölümünde ise, önceki bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanarak bulgular sunulmuştur.

1.1. Güneş Enerjisi

Güneş sistemi içerisinde yer alan güneş hem dünya için vazgeçilmez bir yaşam kaynağı hem de yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde temel bir enerji kaynağıdır. Genel olarak bakıldığında enerji kaynakları içerisinde güneş, birincil enerji kaynağıdır. Güneş bir gaz kütlesi olup ısı ve ışık yayar. Sıcaklığı oldukça yüksektir. Güneş, dünyamızdan yaklaşık olarak 150 milyon km uzaklıktadır (Sarıkaya 2019). Yaklaşık olarak 4.6 trilyon yıl önce ışımaya başlamıştır. Güneş, galakside bir yıldız olup hidrojen ve helyum gazlarından oluşur, çapı yaklaşık 1 trilyon m, kütlesi 5.97×10^{24} kg civarındadır. Yüzey sıcaklığı yaklaşık 6000 °K'dir. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde meydana gelen hidrojeni helyum gazına dönüştürücü füzyon reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan bir enerji türüdür. Güneş yüzeyinde H atomu He atomlarına dönüşmektedir. Bu dönüşüm sırasındaki fark; uzaya ısı ve ışık enerjisi olarak yayılmaktadır. Bu enerjinin büyüklüğü 386 milyon EJ (1 exajoule=1018 J) kadardır (Sarıkaya 2019). Dünyaya, bu enerjinin milyarda biri ulaşmaktadır. Yeryüzüne gelen güneş enerjisi, gün boyunca ve yıl içerisinde değişiklik göstermektedir. Dünyanın farklı bölgelerine düşen güneş enerjisi, dünyanın hem kendi çevresinde hem de güneşin çevresinde dönmesi nedeniyle farklılık göstermektedir. Güneş enerjisinin büyüklüğü; atmosferin dışında yaklaşık 1370 W/m² şiddetinde olup, dünya atmosferinde 0–1100 W/m^2 arasında değişmektedir. Dünyaya gelen güneş enerjisinin yaklaşık %30'u

yansıyarak yada saçılarak geri dönmekte, yaklaşık %20'si ise atmosfer ve bulutlarda tutulmaktadır. Geriye kalan %50'lik kısım yeryüzünde soğurulur. Yeryüzünde ekvatorun kuzeyinde ve güneyinde 35 derecelik enlemler arasındaki bölge "Dünya Güneş Kuşağı" olarak adlandırılmaktadır. Bu bölge güneş enerjisi açısından en elverişli bölgedir. Bu bölge yıllık 2000-3500 saatlik güneşlenme süresine sahiptir ve günlük güneş potansiyeli 3.5-7 kWh/m^2 olmaktadır (Sarıkaya 2019). Fazla ışınım alan ve güneş kuşağı olarak adlandırılan bölgede İspanya, İtalya, Yunanistan, Türkiye, İsrail, Suriye, Mısır, Suudi Arabistan, Libya, Cezayir, Fas, Iran, Pakistan, Çin, Japonya, Amerika, Meksika, Güney Afrika ve Avustralya bulunmaktadır. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli açısından en zengin bölgeleri Akdeniz Bölgesi ve Van Gölü çevresidir. Güneş enerjisi, son derece çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisi kullanımı, diğer fosil yakıtların özellikle sera etkisi oluşturan gaz emisyonlarının ve diğer kimyasal atıkların önüne geçerek, çevrenin korunmasına yardımcı olmaktadır. Güneş enerji teknolojileri, diğer enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında şu avantajları sağlar (Sarıkaya 2019):

- Güneş enerjisi panellerinin veya santrallerinin çalıştırılması esnasında atık bulunmamaktadır.
- Teknolojiye ait sera gazı emisyonlarının değeri düşüktür.
- Çevreye zararlı emisyonlar bulunmamaktadır.
- Elektrik iletim ve dağıtım hatlarında azalma sağlanmaktadır.
- Önemli ölçüde istihdama katkıda bulunarak sosyal ve ekonomik yönden kazanç sağlamaktadır.
- Güneş hücrelerinin en büyük avantajı; elektrik şebekesinin bulunmadığı yerlerde ekonomik olarak kullanılabilmeleridir.
- Bu sistemlerde, ilk yatırım masraflarından sonra işletim masrafı bulunmamaktadır.
- Konutlar enerjisini kendi tesisleri ile karşılayabilmektedir, bu nedeniyle iletim-dağıtım masrafları olmamaktadır.

Güneş enerjisi kullanımını gerekli kılan birçok sebep bulunmaktadır. Bunlardan bazıları (Sarıkaya 2019);

- Dünyanın birçok yerinde bol miktarda bulunması
- Dışa bağımlı olmaması
- Güneş enerjisi sistemleri güvenilir olması, az veya hiç bakım gerektirmemesi
- Tükenmeyen ve temiz bir enerji kaynağı olması
- İlk yatırım maliyeti göz önüne alınmaz ise ucuz bir kaynak olması

Güneş enerjisi kullanımının birçok avantajlı yönü olmasına karşı bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Kullanımı sıvı ve gaz yakıtlara göre kolay değildir. Örneğin; otomobillerde kullanılan güneş hücrelerinin oluşturduğu güç, fosil yakıt kullanılan araçlara oranla çok düşük durumdadır. Güneşin olmadığı durumlarda güneş enerjisi ile çalışan araçların çalışmaması da diğer bir sorundur. Güneş enerjisinden yararlanmanın önündeki engellerden biri de güneş enerjisinin yayınık olmasıdır. Bu enerjinin toplanması için geniş yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca gece ve bulutlu günlerde bu kaynaktan enerji üretmek mümkün olmadığından kesintili bir enerji kaynağı olmaktadır. Bu durum elde edilen güneş enerjisinin depo edilmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Genel olarak güneş enerjisi kullanımında karşılaşılan olumsuzluklar şu şekildedir (Sarıkaya 2019):

- İlk yatırım masrafları yüksektir.
- Gün boyunca ışık oranına göre ve hava şartlarına bağlı olarak enerji miktarında değişiklikler olabilmektedir.
- Güneş santralleri görüntü kirliliği oluşturabilmekte, çevrim verimlerinin düşüklüğü nedeniyle büyük alan gerektirmektedirler.
- Şebekeye bağlantılı değilse, gece elektrik kullanımı için enerji depolanmalıdır.
- Güneş hücrelerinin her 10 yılda bir değiştirilmesi gerekir.

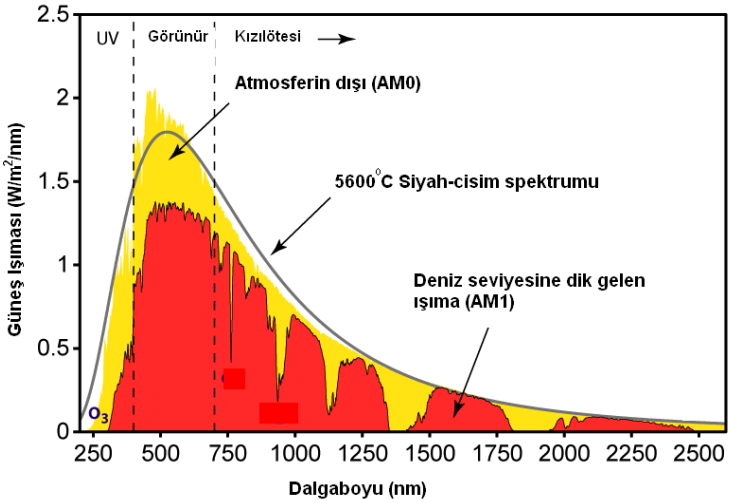
1.2. Güneş Hücresi Teknolojileri

Einstein ışığın sadece dalga yapısında olmadığını tanecik ya da parçacık olarak da hareket ettiğini göstermiştir. Işık bu karakteristiği içindeki foton adı verilen enerji

paketçikleri sayesinde yapar. Diğer bir deyişle, güneş ışınımı elektromanyetik parçacıkların yani fotonların bir akışı olarak da görülebilir. Fotonlar elektromanyetik radyasyonun parçacık temsilidir. Elektromanyetik radyasyon enerjisini foton adı verilen bu parçacıklar aracılığıyla iletir. Elektromanyetik radyasyon enerjisini fotonlar taşır ve iletir. Fotonlar, oldukça enerjik parçacıklar olup, fotosentez sürecinde olduğu gibi, foto reaksiyonları tetikleyebilirler veya yarıiletkenlerdeki elektronların iletkenliğini tetikleyerek güneş ışığının elektriğe dönüşmesini sağlayabilirler.

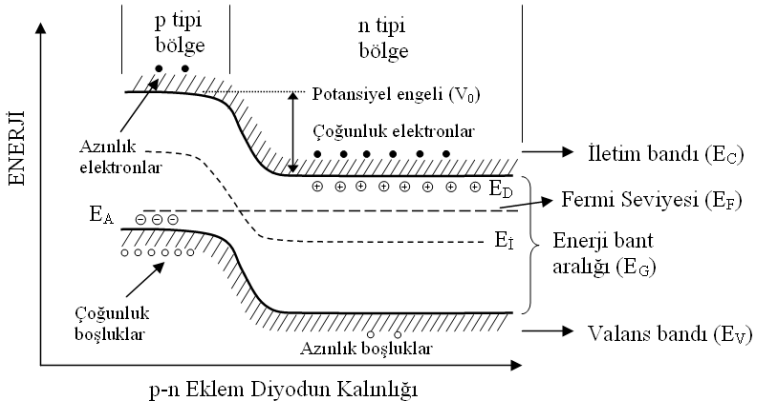
Güneşten gelen ışınım, enerji taşıyan fotonların birleşiminden oluşur. Bu fotonlar, güneş ışınım spektrumundaki farklı dalga boylarına bağlı olarak, farklı miktarlarda enerji içerirler. Fotonlar, fotovoltaik (PV) bir hücre üzerine geldiğinde; bir kısmı hücre tarafından soğurulur, bir kısmı yansıtılır, kalan kısmı da hücre içerisinden geçer. Fotovoltaik hücre tarafından soğurulan fotonlar elektrik üretir. Fotonun enerjisi, yarı iletken bir malzemenin atomundaki elektrona transfer edilir. PV hücreden elektriksel güç elde edilebilmesi için, güneşten gelen fotonların fotovoltaik malzeme tarafından soğurularak foto akımın ve gerilimin üretilmesi gerekmektedir. Fotovoltaik hücre yapımında kullanılan yarı-iletken malzemenin band aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar, fotovoltaik hücrede, elektron boşluk çiftleri üreterek, fotoakımı oluştururlar. Fotovoltaik hücrelerde verimi sınırlayan en önemli etken, güneş spektrumunun tam olarak soğurulamamasıdır. Fotovoltaik hücre malzemesinin yasak band aralığından daha küçük enerjiye sahip fotonlar soğurulamazken, yüksek enerjili fotonların da enerjilerinin bir kısmı termalizasyonla yok olur. Son nesil güneş hücrelerinde verimi artırmak için hedef güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünü soğurabilecek yapılar geliştirmektir. Bu amaçla önerilen çok eklemli, çoklu spektrum, çoklu soğurma, araband yapılı ve termofotovoltaik güneş hücreleri yapılarından sadece çok eklemli güneş hücreleri ticarileşebilmiştir. Fotovoltaik hücreler vasıtası ile en verimli şekilde soğurulup, elektrik enerjisine dönüştürülmesi hedeflenen güneş ışığı, gama ve x ışınlarının bulunduğu nanometrik dalgaboylarından radyo dalgalarının bulunduğu metrik dalgaboylarına kadar çok geniş bir spektruma sahiptir. Güneş ışığının spektrumu üç büyük spektral kategoriye ayrılmaktadır. Morötesi (ultraviolet) (UV) ışık ($\lambda<400nm$), toplam spektrumun %9'dan daha azını; görünür ışık (VIS) ($400nm<\lambda<700nm$), %39'unu ve kızılötesi (infrared) (IR) ışık yaklaşık %52'sini oluşturmaktadır. Güneş enerji spektrumu, 5600 ^{0}C'deki siyah-cisim ışımasının

spektrumuna çok benzemektedir (Şekil 1.1.). Hava-Kütle (Air Mass: AM) atmosferden geçen ışığın yol uzunluğunu tarif eder ve yaklaşık olarak 1/cosθ'dır. Burada θ, düşeyle güneşin yaptığı açıdır. AM0, güneş ışığının atmosfer dışındaki spektral dağılımıdır ve 1366.1 W/m^2 değerine sahiptir. Bazı dalga boylarındaki ışık atmosfer içerisinde ozon O_2, H_2O ve CO_2 gibi atmosferik gazlar tarafından yutulur. Enerjisinin bir kısmı ise, toz parçacıkları ve bazı moleküllerle Rayleigh saçılması ile azalır. Soğrulma bantları Şekil.1.1.'de verilmiştir. Böylece yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarının enerji yoğunluğu AM1.5 için 970 W/m^2 olur. Bununla birlikte, fotovoltaik kapsamında AM1.5 için 1000 W/m^2 olarak standart haline getirilmiştir.



Şekil 1.1. Güneş enerji spektrumu

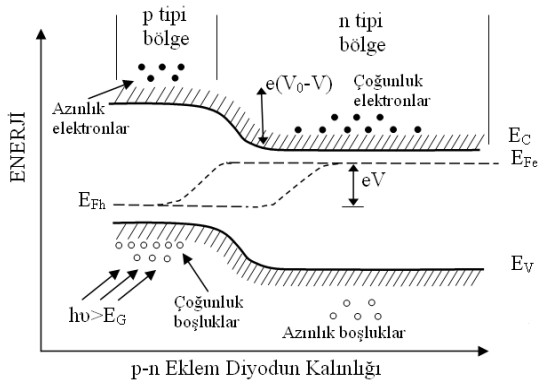
Alışılmış güneş hücreleri, tipik olarak bir p-n eklemden oluşur. Bu yapıda, emitter ve baz katmanlarının birleşim yerindeki p-n eklemi, taşıyıcı toplama olasılığını arttırmak için yüzeye çok yakın yapılmıştır. Baz üzerindeki emitter tabakası çok incedir ve akımı iletmek için yüzeyde iyi tasarlanmış kontak ızgara gerekmektedir. Bazı fotovoltaik pillerde arka yüzeye yerleştirilen bir yansıtıcı ile geri dönen fotonların yeni elektron-boşluk çiftleri üretmesi sağlanmaktadır. P tipi ve n tipi yarıiletkenler Şekil 1.2.'deki gibi bir araya getirilirlerse bu eklemde, p ve n taraflarının Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar çoğunluk elektronlar p tarafına ve çoğunluk boşluklar n tarafına geçmeye devam ederler. Denge durumunda, Fermi seviyeleri her iki bölgede aynı seviyeye gelir ve V_o potansiyel engeline sahip bir p-n eklemi oluşmuş olur.



Şekil 1.2. Güneş hücresinin, güneş ışığı gelmeden önceki durumu

Güneşten gelen fotonlar fotovoltaik malzeme tarafından soğurulduğunda, kovalent bağ kırılarak valans bandındaki elektronlar iletkenlik bandına çıkmakta ve serbest elektron boşluk çiftleri oluşmaktadır. Eğer bu elektron ve boşluklar bir elektrik alan ile ayrıldıkları eklem bölgesine rekombinasyona uğramadan ulaşabilirlerse eklemdeki potansiyel engelini düşürmekte ve potansiyel engelindeki azalma miktarı kadarlık açık devre gerilimi sağlamaktadırlar. Eklemdeki elektrik alan etkisi ile birbirinden ayrılan elektronlar p-bölgesinde, boşluklar n-bölgesinde yollarına devam ederek uç noktalarda fotoakıma katkıda bulunurlar.

Güneş hücresine ışık uygulandığında üretilen azınlık taşıyıcılar enerjilerini azaltma eğilimindedirler. Denge durumunun korunması için elektron ve boşluk Fermi seviyeleri ayrılarak kuasi-Fermi (quasi-Fermi) seviyeleri meydana getirilir ve çıkışta kuasi-Fermi seviyelerindeki ayrılma miktarı kadarlık bir açık devre gerilimi ortaya çıkar (Şekil 1.3.).



Şekil 1.3. Güneş hücresinin üzerine güneş ışığı geldiği durum

P-N eklem diyotun eklem bölgesindeki elektrik alan nedeniyle, p-tipi yarıiletkende üzerine ışık düşmesi sonucu iletkenlik bandına çıkarılmış ve eklem bölgesi sınırına ulaşmış azınlık taşıyıcıları elektronlar, hızla n-tipi bölgeye çekilirler. Aynı yaklaşımla, ntipi bölgede elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile değerlik bandında kalan azınlık taşıyıcıları boşluklar eklem bölgesinin kıyısına ulaştıklarında p-tipi bölgeye geçerler. Özet olarak, eklem bölgesi kıyısına ulaşmış azınlık taşıyıcıları, çoğunluk taşıyıcısı olarak tanımlandıkları bölgeye geçerler. Bunun sonucu olarak fotonların diyot üzerine düşmesi sonucu üretilen elektronlar, diyotun bir tarafına; boşluklar da diğer tarafa itilirler. Bu şekilde birbirlerinden ayrılmış elektronlar ve boşluklar, bir dış devre üzerinden birleştirildiğinde, dış devre elemanlarından akan elektriksel yükler, doğrudan güneş enerjisinden elde edilen foto akımın kaynağıdır. Hücre bir devreye bağlandığında elektrik akımı meydana gelir (Öztürk 2007).

Bir PV hücrenin açık devre gerilimi (V_{OC}), hücreden geçen akımın sıfır olması durumunda hücre uçlarından ölçülen gerilimdir. V_{OC}, hücreden geçen akımın sıfır olması durumunda, hücre uçlarında görülen gerilimdir (Arora ve Hauser 1982).

PV hücrenin kısa devre akımı (I_{SC}), sıfır gerilimde ve aydınlatma altında hücreden geçen akımdır. Paralel direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda ışıkla oluşan akıma eşit olup, ışınım şiddetine bağlıdır (Öztürk 2007).

Bir PV hücrenin maksimum güç noktasını (MPP), açık devre gerilimi ve kısa devre akımına bağlı olarak tanımlamak için kullanılan bir değişkendir. Bir PV hücre, geniş bir gerilim (V) ve akım (I) aralığında çalışabilir. Maksimum güç noktası, sürekli olarak ışınım alan bir PV hücredeki direnç yükünü sıfırdan (kısa devre) çok yüksek bir değere (açık devreye) kadar sürekli arttırarak belirlenebilir. Maksimum güç noktasında $V \times I$ değeri yüksektir. Bu noktada, PV hücre bulunduğu ışınım seviyesinde en yüksek elektrik üretir. Çıkış gücü, hem kısa devre hem de açık devre sınır değerlerinin her ikisinde de sıfırdır. PV hücrenin üretebileceği en yüksek çıkış gücü, hücrenin I-V eğrisi içine çizilebilecek maksimum alanlı dikdörtgenin alanına eşittir (Öztürk 2007).

Yüksek kaliteli tek kristal Silisyum bir PV hücre, 25 ° C hücre sıcaklığında 0.60 V açık devre gerilim (V_{OC}) üretebilir. Bir PV hücreden gelen I_{SC}, aydınlanma ile yaklaşık olarak orantılı olmasına karşın V_{OC} aydınlatmanın % 80 düzeyinde azalması

durumunda sadece % 10 düzeyinde azalabilir. Düşük kaliteli PV hücrelerde, gerilim değeri artan akımla birlikte daha hızlı bir şekilde azalır. PV hücrelerin gücü sadece Voc×Isc çarpımı olarak değil, yük eğrileri ile birlikte verilmelidir. Bir PV hücrenin maksimum güç noktası gelen ışınıma bağlı olarak değişir. Örneğin, PV modüller üzerinde toz birikmesi, maksimum güç noktasını azaltır (Öztürk 2007).

PV sistemler için Shockley ve Queisser tarafından verim sınırı belirlenmiştir. Soğurucu malzemenin bant aralığının altında bir enerjiye sahip olan fotonlar, bir elektron-boşluk çifti oluşturamazlar. Bu nedenle, bu fotonların enerjileri yararlı bir çıktıya dönüştürülmez. Bu özellikteki fotonlar soğurulursa, sadece ısı enerjisi üretilir. Bant aralığı enerjisinin üzerinde bir enerjiye sahip olan fotonlar için, bant aralığının üzerindeki enerjinin sadece bir kısmı yararlı bir çıktıya dönüştürülebilir. Daha fazla enerjiye sahip bir foton soğurulduğunda, bant aralığının üzerindeki fazla enerji, taşıyıcı kombinasyonunun kinetik enerjisine dönüştürülür. Taşıyıcıların kinetik enerjisi denge hızını azalttığından, fazla kinetik enerji ısı enerjisine dönüştürülür. Çoklu bant aralığına sahip soğurucu materyalleri olan PV hücrelerin termodinamik verim sınırı arttırılabilir (Öztürk 2007).

Bir foton bir PV hücre tarafından soğurulduğunda, bir elektron-boşluk çifti üretebilir. Taşıyıcılardan biri p-n eklemine erişebilir ve PV hücre tarafından üretilen akıma katkıda bulunur. Taşıyıcılar, hücre akımına hiçbir net katkıda bulunmadan bir araya gelebilirler. Kuantum verimi, PV hücre kısa devre koşullarında çalıştırıldığında, elektrik akımına dönüştürülen fotonların yüzdesini belirtir. Silisyum bir PV hücrenin dış kuantum verimi, iletim ve yansıma gibi optik kayıplara bağlıdır. Özellikle, bu kayıpları azaltmak için bazı ölçümler yapılabilir. Gelen toplam enerjinin % 10'una kadar ulaşabilen yansıma kayıpları, ortalama ışık yolunu değiştiren ışık yakalama yöntemi kullanılarak önemli düzeyde azaltılabilir. Kuantum veriminin, foton dalga boyunun veya enerjinin bir fonksiyonu olarak spektral bir ölçüm olarak tanımlanması çok yararlıdır. Bazı dalga boyları diğerlerinden daha etkili bir şekilde soğurulduğundan, kuantum veriminin spektral ölçümleri, yarı iletken yığını ve yüzeylerinin kalitesi hakkında önemli bilgiler verebilir. PV hücre tarafından dönüştürülen enerji bölümü hakkında bilgi vermediğinden, kuantum verimi genel enerji dönüşüm verimi ile aynı anlamda değildir. Bir PV hücrenin enerji dönüşüm etkinliğini; yansıtma özellikleri,

termodinamik verimlilik, yük taşıyıcı ayırma etkinliği ve iletim etkinliği değerleri gibi çeşitli faktörler etkiler. Verimi etkileyen bu değişkenlerin doğrudan ölçülmesi zor olabileceğinden, bunun yerine kuantum verimi, Voc değeri gibi diğer değişkenler ölçülür. Yansıma kayıpları, dış kuantum verimini etkilediğinden, kuantum verimi değerine bağlı olarak hesaplanır. Toplam kayıp, kuantum verimi, Voc değeri ve dolum faktörü değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Direnç kayıpları, çoğunlukla dolum faktörü değerine bağlı olarak hesaplanır. Direnç kayıpları, kuantum verimi ve Voc değerlerini de etkiler (Öztürk 2007).

PV hücrelerin enerji dönüşüm verimleri, uzun yıllardan bu yana araştırılmaktadır. Güneş hücrelerinin verimliliği, amorf Silisyum esaslı güneş hücreleri için % 6'dan çok eklemli PV hücrelerde % 44'e ulaşmıştır. Piyasada bulunan çok kristal Silisyum PV hücreler için enerji dönüşüm verimi yaklaşık % 14 -20 arasındadır. Bununla birlikte, güneş enerjisini artırmak için güneş ışınlarının odaklanarak yoğunlaştırılması gerekir. Işık yoğunluğunun arttırılması durumunda, ışık tarafından üretilen taşıyıcılar artar ve verim % 15'e kadar yükselir. Yoğunlaştırıcı sistemler olarak adlandırılan bu sistemler, yüksek verimli GaAs hücrelerinin geliştirilmesinin sonucunda, maliyet rekabetine girmeye başlamışlardır. Yoğunlaştırma işlemi tipik olarak yoğunlaştırıcı optikler kullanılarak gerçekleştirilir (Öztürk 2007).

Güneş hücre veriminin artırılması amacıyla uygulanan önemli stratejilerden biri farklı band-aralığına sahip güneş hücrelerinin üstüste üretilmesidir. Bu yapıda, her alt hücre güneş spektrumunun farklı bir bölümünü soğurmaktadır. Çok eklemli güneş hücresi olarak adlandırılan bu yaklaşımda, küçük band-aralığına sahip bir malzeme tarafından soğurulan yüksek enerjili fotonun fazlalık enerjisinin termalizayonla yok olması engellenirken, yüksek band-aralığına sahip malzemelerin soğuramadığı alt-band fotonların küçük band-aralığına sahip hücreler tarafından soğurulması sağlanır. Güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünün soğurulması sayesinde yüksek verim elde edilir. İki eklemli bir güneş hücresinde detaylı denge yaklaşımı ile yapılan analizlerde verim sınırı % 45.71 olarak hesaplanmıştır. Maksimum ışıma altında (X=46000), sonsuz sayıda eklem bulunduğunda verim sınırı % 86.8 olarak hesaplanmıştır (Öztürk 2007).

1.3. GaAs/Si Güneş Hücreleri

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 Arsenür (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.

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 verimi son yıllarda % 20-22'ye ulaşmıştır. Bu durum son derece ümit vericidir.

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. Daha yüksek verimli güneş hücresi üretebilmek için Si üzerine GaAs güneş hücrelerinin üretimi öncesinde, GaAs güneş hücresinin Si üzerine entegrasyonu ile ilgili anahtar modelleme kriterleri ve teknik zorluklar mutlaka araştırılmalı, modellemesi ve optimizasyonu yapılmalıdır. Si alttaban üzerinde III-V çok eklemli güneş hücrelerinin entegrasyonu için iki yaklaşım vardır: a) heteroepitaksiyal büyütme (veya monolitik) yaklaşımı ve b) mekanik istifleme (ve wafer bonding) yaklaşımı. Tek ve çok eklemli GaAs/Si güneş hücrelerinin üretimi için heteroepitaksiyal büyütme (veya monolitik) yaklaşımı ve mekanik istifleme (ve wafer bonding) yaklaşımı doğrultusunda uygulanan yöntemlerde yaşanan deneysel zorluklar ve en yüksek verim değerleri Tablo 1.1.'de verilmiştir.

Tablo 1.1. GaAs/Si güneş hücrelerinin üretimi için uygulanan yöntemlerde yaşanan deneysel zorluklar ve en yüksek verim değerleri

Yöntem	**Yöntemin Avantajı**	**Zorluklar**	**En Yüksek Verim**
GaAsP tünel tabaka oluşturulması	GaP tünel tabakası, Si alt- hücre için bir pencere katmanı olarak kullanılabilir. Si alt-hücre için yarı saydam tünel tabaka işlevi görebilir.	Karışık anyon As-P kompleks bir büyüme sürecine sahiptir. Kalın bir tünel tabaka oluşur.	2 eklemli GaInP / GaAs güneş hücresinin verimi 16.4% (AM1.5g) (Dimroth vd. 2014)
SiGe tünel tabaka oluşturulması	Dislokasyonlar azdır. Ge veya SiGe alt-hücre olarak kullanılabilir.	Tünel tabaka saydam olmayabilir. Kalın bir tünel tabaka oluşur. Ge, ciddi termal uyumsuzluk sorunu oluşturur.	Tek GaAs güneş hücresinin verimi % 18.1 (AM1.5g) (Andre vd. 2005) ve 2 eklemli GaAsP / SiGe güneş hücresinin verimi % 18.9 (AM1.5g) (Diaz vd. 2014).
		InGaN ve Si arasında örgü uyumsuzluğu yüksektir. InGaN büyütme prosesi zordur.	Tek InGaN // Si güneş hücresinin verimi % 7.12 (AM1.5g) (Tran vd. 2012).
Silisyum üzerinde InGaN tabaka oluşturulması	InGaN, güneş spektrumunun tümünü kapsayabilir. Si alt-hücre için yarı saydam tünel tabaka oluşur.	Seyreltik nitrit malzemede difüzyon uzunlukları kısadır. Alaşım kompozisyonunu kontrol etmek zordur.	2 eklemli GaAsPN // Si güneş hücresinin verimi % 5.2 (AM1.5g) (Geisz vd. 2005)
İyon implantasyon kaynaklı tabaka transferi	Metal içermeyen bağlama, epitaksiyal büyümenin post-bonding yapılmasına izin verir. Post-bonding büyüme, yüksek maliyetli GaAs veya Ge alttaban kullanımını engellemektedir.	Hidrojen iyonu implantasyonu gerektirir ve süreç implantasyon hasarları ile sonuçlanabilir. İşlem esnasında yüksek sıcaklık artışı, mikro çatlakların oluşumuna neden olabilir. Transfer edilen tabakanın rijitliği yüksektir. Ge tabakası, Si alt-hücrenin kullanımını zorlaştırır.	2 eklemli GaInP / GaAs güneş hücresinin verimi % 15.7 AM1.5d) (Archer vd. 2008)
Doğrudan füzyon bağ oluşturulması	Bağ tabakası elektriksel olarak iletkendir. Bağ tabakası optik saydamlığa sahiptir.	Bağlanma arayüzeyinde, spesifik polaritelerle dejenere yarıiletkenler gerektirir. Nispeten yüksek bağlanma sıcaklıkları gerektirir. Bağlanma arayüzeyinde ince şekilsiz katman oluşumu olabilir.	2 eklemli AlGaAs // Si güneş hücresinin verimi % 25,2 (100 mW/cm2) (Tanabe, Watanabe, ve Arakawa 2012)
Wafer bonding	Wafer bonding, ısıl gerilmeyi en aza indirir. Bağlanma arayüzü saydam olur.	Argon hızlı atom ışını nedeniyle bağlanma arayüzünde ince şekilsiz tabakanın oluşumu olabilir. Bağ-katman direnci, konsantre güneş ışığı altında performansı sınırlar.	2 terminalli GaInP/GaAs//Si güneş hücresinin konsantre olmayan güneş ışığı altında verimi % 33.3 (Cariou vd. 2018)
Metal arakontak oluşturulması	Metal arakontak oluşturulması, daha kolay akım eşleşmesine olanak sağlar. Ara bağlantı direnci düşük olabilir. İletken olmak için epoksi yapıştırma gereksinimini ortadan kaldırır.	Si alt-hücrenin gölgelenmesine neden olabilir bu da foton soğurulma oranını düşürür.	3 eklemli GaInP / GaAs // Si güneş hücresinin verimi % 25.5 (AM1.5g) (Yang vd. 2014)

BÖLÜM 2. GAAS/Sİ GÜNEŞ HÜCRESİNİN MODELLENMESİ

Tezde, tek eklemli GaAs/Si güneş hücrelerinin farklı sıcaklıklar ve farklı güneş ışığı konsantrasyonları için geçerli, dislokasyonlara bağlı açık devre gerilimleri, kısa devre akım yoğunlukları ve verim değerleri nümerik analiz ile modellenmiştir.

2.1. Güneş Hücresinin Performansına İlişkin Hesaplama Esasları

Sürüklenme difüzyon modeli, yarıiletkenlerde kullanılan temel süreklilik eşitliklerinin sürüklenme-difüzyon akım eşitlikleri ile birleştirilerek ve Poisson denklemiyle birlikte çözümlenmesi esasına dayanır.

İletkenlik bandındaki elektronlar ve valans bandındaki boşluklar için süreklilik denklemleri,

$$\frac{\nabla J_e}{e} = -g_{eh} + r_{rad,eh} - g_{eh,th} + u_{nr,e} \quad (1)$$

$$\frac{\nabla J_h}{e} = -g_{eh} + r_{rad,eh} - g_{eh,th} + u_{nr,h} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada Je iletkenlik bandında elektronların sağladığı elektron akım yoğunluğunu, J_h ise valans bandında boşlukların sağladığı boşluk akım yoğunluğunu temsil etmektedir. geh terimleri, foton soğurulması neticesinde, valans banttan iletkenlik bandına elektron geçişi ile oluşan taşıyıcı üretim hızıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$g_{eh}(x) = \int (1 - R(\varepsilon))\alpha_{CV}(\varepsilon) Nph(\varepsilon)\, exp(-\alpha_{CV}(\varepsilon)x)\, d\varepsilon \quad (3)$$

Burada R hücre malzemesinin yansıtıcılığını, Nph AM1.5 ışıması için birim sürede birim alana gelen foton sayısını ve ε enerjiyi temsil etmektedir. α_{CV} malzemenin soğurma katsayısıdır ve x ışığın malzeme içerisinde aldığı yoldur.

Süreklilik denklemlerinde, $g_{eh,th}$ ısıl üretim hızlarını temsil etmektedir:

$$g_{eh,th} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \alpha_{cv} \frac{\varepsilon^2}{e^{\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right)-1}} e^{-(\alpha_{cv} x) d\varepsilon} \quad (4)$$

Burada h Planck sabiti, c foton hızı, k_B Boltmann sabiti ve T_C malzemenin sıcaklığıdır. Süreklilik denklemlerinde $rrad, eh$ terimleri, ışımalı rekombinasyon sonucu ortaya çıkan ifadelerdir ve

$$r_{rade,eh} = -\frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} (\alpha_{CV})\, exp[-\alpha_{CV} x]\, \upsilon_{CV} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (5)$$

denklemleriyle verilir. Burada υ_{CV} Boose-Einstein katsayısıdır:

$$\upsilon_{CV} = \frac{1}{exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{CV}}{k_B T_C}\right)-1} \quad \varepsilon_{CV} = E_{FC} - E_{FV} \quad (6)$$

Burada, εCV quasi-fermi seviyelerindeki ayrılma miktarıdır. Süreklilik denklemlerindeki u_{nre} ve u_{nrh} terimleri ışımasız SRH rekombinasyonu temsil etmektedir:

$$u_{nre} = \frac{\delta_n}{\delta_t}(nonrad) = -\frac{n - n_{eq}}{\tau_c} = -\frac{\Delta n}{\tau_c} \quad (7)$$

$$u_{nrh} = \frac{\delta_h}{\delta_t}(nonrad) = -\frac{p - p_{eq}}{\tau_v} = -\frac{\Delta p}{\tau_v} \quad (8)$$

Burada Δn ve Δp, fotonla üretilen fazlalık elektron ve boşluk yoğunluklarıdır. τ_C ve τ_V ise elektron ve boşlukların SRH rekombinasyon ömür süreleridir. SRH rekombinasyonu, ışımalı rekombinasyon ve ısıl üretim hızları kullanılarak elde edilen terimler Süreklilik denklemlerinde yerine konularak;

$$\frac{\nabla J_e}{e} = -g_{eh} + rg \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} + \frac{\Delta n}{\tau_c} \quad (9)$$

$$\frac{\nabla J_h}{e} = -g_{eh} + rg\frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq}p_{eq}} + \frac{\Delta p}{\tau_v} \quad (10)$$

$$rg = \frac{2\pi}{h^3c^2}\int_0^\infty \alpha_{CV}(\varepsilon)\varepsilon^2\, exp(-\frac{\varepsilon}{k_B T_C})d\varepsilon \quad (11)$$

şeklinde ifadeler elde edilir. Yukarıdaki eşitliklerde foton konsantrasyonu düşük olduğunda, $\Delta n \Delta p / n_{eq} p_{eq}$ ifadesi yerine elektron akım yoğunluğu denkleminde $\Delta n / n_{eq}$ ve boşluk akım yoğunluğu denkleminde $\Delta p / p_{eq}$ ifadeleri konulur. Böylece denklem doğrusal hale gelir. Foton konsantrasyonu arttığında doğrusallaştırma hataya sebep olacaktır.

Alışılmış p-n eklemlerde olduğu gibi güneş hücrelerinde de akımın, sürüklenme ve difüzyon akımları olmak üzere iki bileşenden oluştuğu kabul edilmiştir. Sürüklenme akımı, elektrik alan etkisi altında hareket eden elektronların ve boşlukların ürettiği akım iken, difüzyon akımı elektronların ve boşlukların çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru hareketi ile üretilen akımdır. Aşağıda elektron ve boşluk akım yoğunlukları verilmiştir:

$$J_e = e\mu_e(n_{eq} + \Delta n)E + eD_e\frac{d\Delta n}{dx} \quad (12)$$

$$J_{\square} = e\mu_{\square}(p_{eq} + \Delta p)E - eD_{\square}\frac{d\Delta p}{dx} \quad (13)$$

Burada μ_e ve $\mu_{\square}$ elektron ve boşluklara ait taşıyıcı mobiliteleridir. D_e ve $D_{\square}$ ise elektron ve boşluklara ait difüzyon katsayılarıdır. Mobilite ve difüzyon katsayıları arasında Einstein bağıntısı mevcuttur ($D/\mu = kT/q$). E elektrik alanı temsil etmektedir. Elektrik alan için;

$$\rho = \varepsilon_S\frac{dE}{dx} = e(-n_{eq} - \Delta n + p_{eq} + \Delta p) \quad (14)$$

Poisson denklemi kullanılmaktadır. Burada ε_S, yarı iletkenin dielektrik katsayısıdır. Akımın sadece *x* yönündeki değişimi hesaba katılarak, Eş. (12) ve (13), Eş. (9) ve (10)'da yerine konulduğunda, Poisson denklemi ile birlikte çözümlenmesi gereken ve üç eşitlikten oluşan nonlineer bir sistem elde edilmektedir. P-N eklem modellenirken uzay yük bölgesi dışında elektrik alanın sıfır olduğu kabul edilir. Bu yüzden p ve n bölgelerinde difüzyon akımı ve uzay yük bölgesinde sürüklenme akımı baskındır.

Türetilen eşitlikler doğrusal olmayan bir denklem sistemidir ve analitik çözümü mümkün değildir. Bu tür doğrusal olmayan sistemlerin çözümü için geliştirilen pek çok nümerik metot mevcuttur. Sonlu elemanlar metodu, özellikle yarıiletkenlerde sıklıkla kullanılan bir metod olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.2. GaAs/Si Güneş Hücresinin Teorik Hesaplamaları-Modellenmesi

Si alttaban üzerine yüksek kaliteli GaAs güneş hücresi üretmek, yüksek performansın yanısıra düşük maliyet avantajını beraberinde getirmektedir. Bu amaçla, GaAs/Si güneş hücrelerinin modellenmesi için örgü uyumsuzluklarının ve taşıyıcı ömürleri gibi parametrelerin modellemeye dahil edilebilmesi için hesaplanması son derece önemlidir. Son 15 yıldır bu konuya odaklanılmasına rağmen, GaAs/Si arayüzeyinde %4'lük örgü uyumsuzluğunun ve polar olmayan–polar olan arayüzey oluşumunun aşılamıyor olması, bu konuda daha pek çok araştırmanın yapılmakta olmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Azınlık taşıyıcıların ömürleri, örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna ve azınlık taşıyıcıların difüzyon katsayısına bağlıdır, aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$\frac{1}{\tau_{n,p}} = \frac{1}{\tau_{n,p}^{0}} + \frac{1}{\tau_{DD}} \qquad (15)$$

$\tau_{n,p}$ ve $\tau_{n,p}^{0}$ işaretlerinin olduğu yerler, kaymasız veya çıkıksız bir malzeme için azınlık taşıyıcı ömrünü gösterir. τ_{DD} rekombinasyon ile ilişkili olan taşıyıcı ömrünü gösterir ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\tau_{DD} = \frac{4}{\pi^3 (TDD) D} \quad (16)$$

D, azınlık taşıyıcı difüzyon katsayısıdır. TDD ise santimetre kare cinsinden dislokasyon yoğunludur.

Literatürden edinilen GaAs ve InGaP malzeme ve iletim parametreleri (Tablo 2.1.) ve azınlık taşıyıcı ömrü modeli kullanılarak p-GaAs ve p-InGaP için örgü uyumsuzluğu yoğunluğunun elektron ömrüne etkisi hesaplanmıştır. 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.

Tablo 2.1. Literatürden edinilen GaAs ve InGaP malzeme ve iletim parametreleri

Parametreler	GaAs	InGaP
Bant aralığı (Eg, eV)	1	1,85
Azınlık elektron mobilitesi (μe, cm2Vs)	3089	1075
Azınlık hol mobilitesi (μh, cm2/Vs)	101	41
Elektron difüzyon katsayısı (Dn, cm2/s)	81	27
Hol difüzyon katsayısı (Dp, cm2/s)	2,61	1,05
Azınlık elektron ömrü (Ƭ°n, ns)	20	10
Azınlık hol ömrü (Ƭ°p, ns)	25	1

GaAs tabakadaki azınlık taşıyıcıların ömrünün uzun olması, GaAs tabakanın yüksek kalitede olduğunu, dolayısıyla GaAs/Si güneş hücresinin performansının yüksek olacağını gösterir. Bu tezde, azınlık taşıyıcılarının ömürleri, örgü uyumsuzluğu yoğunluklarına bağlı olarak araştırılıp hesaplanmıştır, bu etkilerin GaAs güneş hücresinin verimine etkisi açıklanmıştır. Tez kapsamında öncelikle temel bir GaAs/Si güneş hücresi modeli üzerinde çalışılmıştır. (100) yönelimli Si alttaban üzerinde sırasıyla p-SiGe tabakasının ve üzerine 3mm kalınlıklı bir Ge tabakasının ultra yüksek vakumda düşük basınçlı kimyasal buhar depozisyonu tekniğiyle kaplanacağı varsayılmıştır. Örgü uyumsuzluğu yoğunlukları, Ge tabakadaki dağlama çukurları sayılarak ölçülmüştür ve $1x10^6$ cm^{-2} olduğu belirlenmiştir. GaAs tabakasının ise Ge/SiGe/Si üzerine düşük basınçlı metalorganik kimyasal buhar depozisyonu tekniğiyle

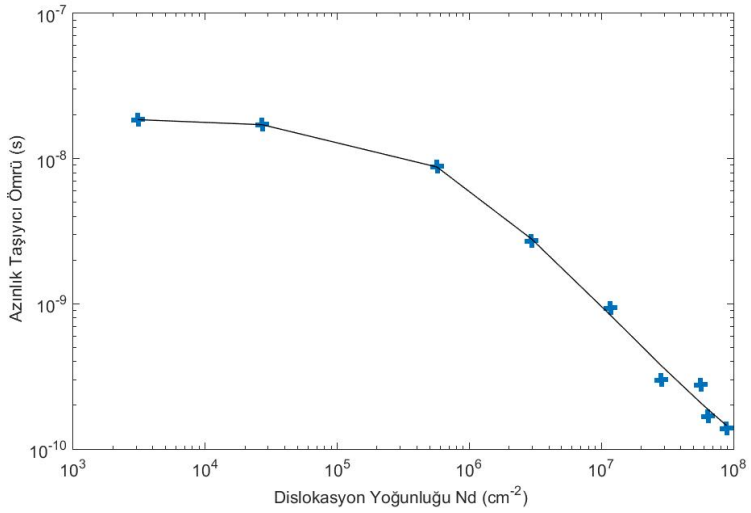
katı-kaynaklı moleküler ışınım epitaksi büyütmeyle 0.1 mm kalınlıkta tünel tabaka olarak toplamda ise 0.2 mm kalınlıklı olarak oluşturulduğu varsayılmıştır.

Dislokasyonların düzenli dağılımı, rekombinasyon merkezleri olarak işlev görür, GaAs heteroepitaksiyel filmde azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğunun azalır, uzay-yükü tabakası rekombinasyon akımı artar (Yamaguchi vd. 2016).. GaAs/Si güneş hücrelerinde literatürden edinilen deneysel kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}), bu konuda yapılan hesaplamalarla oldukça uyumlu olsa da açık devre gerilimi hakkındaki (V_{OC}) literatürden edinilen deneysel verilerle literatürdeki teorik hesaplamalar tam bir uyum içinde değildir. Bu nedenle bu tezde, GaAs/Si güneş hücresinde dislokasyon yoğunluğu dağılımı hesaplanarak V_{OC}'ye etkisi araştırılmıştır.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_1} \quad (17)$$

$$\frac{1}{\tau} = \pi^3 D N_d / 4 \quad (18)$$

Burada, t_o, t_d ve $t_ı$ sırasıyla bilinmeyen kusurlar, dislokasyon ve safsızlık durumundaki azınlık taşıyıcı ömrüdür. Bir dislokasyondaki rekombinasyon için difüzyon-sınırlı azınlık taşıyıcı ömrü, azınlk taşıyıcıların dislokasyonlara geçişi için bir boyutlu süreklilik denkleminin çözülmesiyle elde edilebilir. Azınlık taşıyıcı difüzyon katsayısı D ve dislokasyon yoğunluğu N_d ile ifade edilmektedir. GaAs/Si filmlerdeki dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak azınlık taşıyıcı ömrüne ilişkin literatürden edinilen deneysel veriler ve hesaplama sonuçları Şekil 2.1.'de verilmiştir. Azınlık taşıyıcı ömrü, fotolüminesans bozulma metoduyla belirlenmiştir (Ahrenkiel, Dunlavy, ve Hamaker 1987). GaAs/Si hücre üretimi için Si alttaban üzerine heteroepitaksiyel olarak büyütülecek GaAs filmde dislokasyon yoğunluğunun $7x10^6$ cm^{-2} olması durumunda azınlık taşıyıcı ömrü 1.5 ns hesaplanmıştır. Dislokasyon yoğunluğunun 10^4 - 10^8 cm^{-2} arasında değişmesiyle azınlık taşıyıcı ömrü giderek azalmıştır. Bu veriler, literatürdeki deneysel verilerle uyumludur.



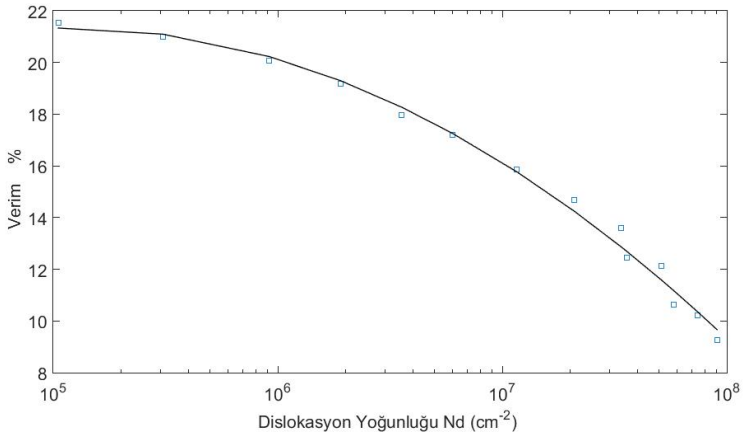
Şekil 2.1. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı hesaplanan azınlık taşıyıcı ömrü değişimi

Dislokasyon yoğunluğu N_d, GaAs film kalınlığı d olmak üzere 1/d oranında azalır. Ayrıca, film tavlama işleminden kaynaklanabilecek dislokasyonlarda dikkate alınarak, GaAs film kalınlığı olan d'ye bağlı olarak dislokasyon yoğunluğunun,

$$N_d(\mathrm{x}) = 10^9 e^{\{-2.5d(\mu m)\}} + N_{ds} V(cm^{-2}) \qquad (19)$$

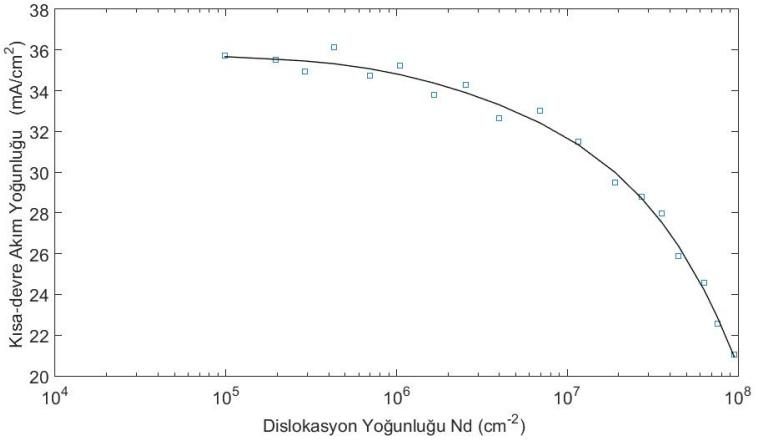
Eşitliği ile ifade edilebileceği varsayılmıştır (Ahrenkiel, Dunlavy, ve Hamaker 1987). Bu eşitlik, literatürdeki deneysel verilerle uyumludur.

Hesaplamalarda, akım eşitlikleri, korunum eşitlikleri ve Poisson eşitliği kullanılmıştır (Lundstrom ve Schuelke 1983). Dislokasyonlardan kaynaklanan azınlık tazıyıcılarının tuzaklanması dikkate alınmayarak homojen olan ve homojen olmayan kusur modelleri kullanılarak GaAs/Si güneş hücresinin verimi hesaplanmıştır. Literatürden edinilen deneysel veriler ile hesaplamalar tam olarak uyumlu değildir (Şekil 2.2.) (Itoh vd. 1986; Jain ve Hudait 2014). Bunun sebebi, homojen olmayan kusur modeliyle açıklanamamaktadır, dislokasyonlar nedeniyle çoğunluk taşıyıcıların tuzaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



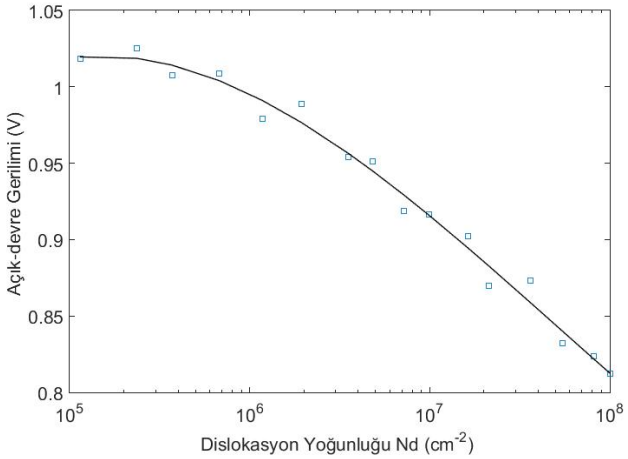
Şekil 2.2. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı GaAs/Si hücresinin hesaplanan verim değişimi

Dislokasyonlardan kaynaklanan azınlık tazıyıcılarının tuzaklanması dikkate alınmayarak homojen olan ve homojen olmayan kusur modelleri kullanılarak GaAs/Si güneş hücresinin J_{SC} akım yoğunluğu hesaplanmıştır. Literatürden edinilen deneysel veriler ile hesaplamalar uyumludur (Şekil 2.3.).



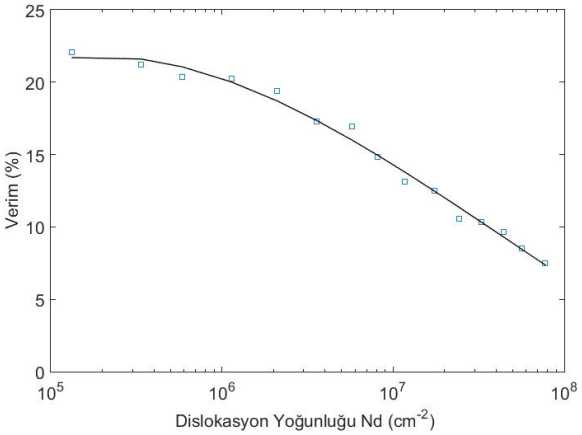
Şekil 2.3. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı GaAs/Si hücresinin hesaplanan JSC akım yoğunluğu değişimi

Dislokasyonlardan kaynaklanan azınlık tazıyıcılarının tuzaklanması dikkate alınmayarak homojen olan ve homojen olmayan kusur modelleri kullanılarak GaAs/Si güneş hücresinin V_{OC} gerilimi hesaplanmıştır. Literatürden edinilen deneysel veriler ile hesaplamalar tam olarak uyumlu değildir (Şekil 2.4.). Hesaplamalarda elde edilen V_{OC} gerilim değerleri daha yüksektir, çünkü artar. Dislokasyonlar nedeniyle çoğunluk taşıyıcı tuzaklanması artar, uzay-yükü tabakası rekombinasyon akımı artar, GaAs/Si güneş hücresinin V_{OC} gerilimi azalır, J_{SC} akım yoğunluğu artar.



Şekil 2.4. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı GaAs/Si hücresinin hesaplanan VOC gerilim değişimi

GaAs filmdeki dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak taşıyıcı konsantrasyon değişimi, homojen olmayan kusur dağılımına, dislokasyonlardan kaynaklanan çoğunluk taşıyıcı tuzaklanması ve rekombinasyon dikkate alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen parametreler kullanılarak, GaAs/Si güneş hücresinin dislokasyona bağlı olarak verim değişimi elde edilmiştir (Şekil 2.5.). Literatürden edinilen deneysel veriler ile hesaplamalar uyumludur. Dislokasyon yoğunluğunun $1x10^5 cm^{-2}$'den düşük olması durumunda GaAs/Si güneş hücresinin veriminin %22'ye ulaşacağı belirlenmiştir.



Şekil 2.5. Dislokasyon yoğunluğuna bağlı GaAs/Si hücresinin hesaplanan verim değişimi

BÖLÜM 3. SONUÇ VE BULGULAR

Si alttaban üzerine yüksek kaliteli GaAs güneş hücresi üretmek, yüksek performansın yanısıra düşük maliyet avantajını beraberinde getirmektedir. Bu amaçla, GaAs/Si güneş hücrelerinin modellenmesi için örgü uyumsuzluklarının ve taşıyıcı ömürleri gibi parametrelerin modellemeye dahil edilebilmesi için hesaplanması son derece önemlidir. Son 15 yıldır bu konuya odaklanılmasına rağmen, GaAs/Si arayüzeyinde %4'lük örgü uyumsuzluğunun ve polar olmayan–polar olan arayüzey oluşumunun aşılamıyor olması, bu konuda daha pek çok araştırmanın yapılmakta olmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Azınlık taşıyıcıların ömürleri, örgü uyumsuzluğu yoğunluğuna ve azınlık taşıyıcıların difüzyon katsayısına bağlıdır. Literatürden edinilen 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 hesaplanmıştır. 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. GaAs tabakadaki azınlık taşıyıcıların ömrünün uzun olması, GaAs tabakanın yüksek kalitede olduğunu, dolayısıyla GaAs/Si güneş hücresinin performansının yüksek olacağını gösterir. Tez kapsamında öncelikle temel bir GaAs/Si güneş hücresi modeli üzerinde çalışılmıştır. (100) yönelimli Si alttaban üzerinde sırasıyla p-SiGe tabakasının ve üzerine 3mm kalınlıklı bir Ge tabakasının ultra yüksek vakumda düşük basınçlı kimyasal buhar depozisyonu tekniğiyle kaplanacağı varsayılmıştır. Örgü uyumsuzluğu yoğunlukları, Ge tabakadaki dağlama çukurları sayılarak ölçülmüştür ve $1x10^6$ cm^{-2} olduğu belirlenmiştir. GaAs tabakasının ise Ge/SiGe/Si üzerine düşük basınçlı metalorganik kimyasal buhar depozisyonu tekniğiyle katı-kaynaklı moleküler ışınım epitaksi büyütmeyle 0.1 mm kalınlıkta tünel tabaka olarak toplamda ise 0.2 mm kalınlıklı olarak oluşturulduğu varsayılmıştır. Tüm hesaplamalar, farklı sıcaklıklar ve farklı güneş ışığı konsantrasyonları için geçerlidir.

Dislokasyonların düzenli dağılımı, rekombinasyon merkezleri olarak işlev görür, GaAs heteroepitaksiyel filmde azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğunun azalır, uzay-yükü tabakası rekombinasyon akımı artar. GaAs/Si güneş hücrelerinde literatürden edinilen deneysel kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}), bu konuda yapılan hesaplamalarla oldukça uyumlu olsa da açık devre gerilimi hakkındaki (V_{OC}) literatürden edinilen deneysel verilerle literatürdeki teorik hesaplamalar tam bir uyum içinde değildir. Bu nedenle bu tezde, GaAs/Si güneş hücresinde dislokasyon yoğunluğu dağılımı hesaplanarak V_{OC}'ye etkisi araştırılmıştır.

- Bir dislokasyondaki rekombinasyon için difüzyon-sınırlı azınlık taşıyıcı ömrü, azınlk taşıyıcıların dislokasyonlara geçişi için bir boyutlu süreklilik denkleminin çözülmesiyle elde edilebilir. GaAs/Si filmlerdeki dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak azınlık taşıyıcı ömrüne ilişkin literatürden edinilen deneysel veriler ve hesaplama sonuçları tezde verilmiştir. Azınlık taşıyıcı ömrü, fotolüminesans bozulma metoduyla belirlenmiştir. GaAs/Si hücre üretimi için Si alttaban üzerine heteroepitaksiyel olarak büyütülecek GaAs filmde dislokasyon yoğunluğunun 7x106 cm-2 olması durumunda azınlık taşıyıcı ömrü 1.5 ns hesaplanmıştır. Dislokasyon yoğunluğunun 104 - 108 cm-2 arasında değişmesiyle azınlık taşıyıcı ömrü giderek azalmıştır. Bu veriler, literatürdeki deneysel verilerle uyumludur.
- Hesaplamalarda, akım eşitlikleri, korunum eşitlikleri ve Poisson eşitliği kullanılmıştır. Dislokasyonlardan kaynaklanan azınlık tazıyıcılarının tuzaklanması dikkate alınmayarak homojen olan ve homojen olmayan kusur modelleri kullanılarak GaAs/Si güneş hücresinin verimi hesaplanmıştır. Literatürden edinilen deneysel veriler ile hesaplamalar tam olarak uyumlu değildir. Bunun sebebi, homojen olmayan kusur modeliyle açıklanamamaktadır, dislokasyonlar nedeniyle çoğunluk taşıyıcıların tuzaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Dislokasyonlardan kaynaklanan azınlık tazıyıcılarının tuzaklanması dikkate alınmayarak homojen olan ve homojen olmayan kusur modelleri kullanılarak GaAs/Si güneş hücresinin JSC akım yoğunluğu hesaplanmıştır. Literatürden edinilen deneysel veriler ile hesaplamalar uyumludur.

- Dislokasyonlardan kaynaklanan azınlık tazıyıcılarının tuzaklanması dikkate alınmayarak homojen olan ve homojen olmayan kusur modelleri kullanılarak GaAs/Si güneş hücresinin VOC gerilimi hesaplanmıştır. Literatürden edinilen deneysel veriler ile hesaplamalar tam olarak uyumlu değildir. Hesaplamalarda elde edilen VOC gerilim değerleri daha yüksektir, çünkü artar. Dislokasyonlar nedeniyle çoğunluk taşıyıcı tuzaklanması artar, uzay-yükü tabakası rekombinasyon akımı artar, GaAs/Si güneş hücresinin VOC gerilimi azalır, JSC akım yoğunluğu artar.
- GaAs filmdeki dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak taşıyıcı konsantrasyon değişimi, homojen olmayan kusur dağılımına, dislokasyonlardan kaynaklanan çoğunluk taşıyıcı tuzaklanması ve rekombinasyon dikkate alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen parametreler kullanılarak, GaAs/Si güneş hücresinin dislokasyona bağlı olarak verim değişimi elde edilmiştir. Literatürden edinilen deneysel veriler ile hesaplamalar uyumludur. Dislokasyon yoğunluğunun 1x105cm-2'den düşük olması durumunda GaAs/Si güneş hücresinin veriminin %22'ye ulaşacağı belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

Ahrenkiel, R. K., D. J. Dunlavy, ve H. C. Hamaker. 1987. "High speed characterization of photovoltaic devices". *Solar cells* 21 (1-4): 353–369.

Andre, Carrie L., John A. Carlin, John J. Boeckl, David M. Wilt, M. A. Smith, A. J. Pitera, M. L. Lee, Eugene A. Fitzgerald, ve Steven A. Ringel. 2005. "Investigations of high-performance GaAs solar cells grown on Ge-Si/sub 1-x/Ge/sub x/-Si substrates". *IEEE Transactions on Electron Devices* 52 (6): 1055–1060.

Archer, Melissa J., Daniel C. Law, Shoghig Mesropian, Moran Haddad, Christopher M. Fetzer, Arthur C. Ackerman, Corinne Ladous, Richard R. King, ve Harry A. Atwater. 2008. "Ga In P/ Ga As dual junction solar cells on Ge/ Si epitaxial templates". *Applied Physics Letters* 92 (10): 103503.

Arora, N. D., ve J. R. Hauser. 1982. "Temperature dependence of silicon solar cell characteristics". *Solar Energy Materials* 6 (2): 151–158.

Cariou, Romain, Jan Benick, Frank Feldmann, Oliver Höhn, Hubert Hauser, Paul Beutel, Nasser Razek, Markus Wimplinger, Benedikt Bläsi, ve David Lackner. 2018. "III–V-on-silicon solar cells reaching 33% photoconversion efficiency in two-terminal configuration". *Nature Energy* 3 (4): 326.

Diaz, Martin, Li Wang, Andrew Gerger, Anthony Lochtefeld, Chris Ebert, Robert Opila, Ivan Perez-Wurfl, ve Allen Barnett. 2014. "Dual-junction GaAsP/SiGe on silicon tandem solar cells". Içinde *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 0827–0830. IEEE.

Dimroth, Frank, Tobias Roesener, Stephanie Essig, Christoph Weuffen, Alexander Wekkeli, Eduard Oliva, Gerald Siefer, Kerstin Volz, Thomas Hannappel, ve Dietrich Häussler. 2014. "Comparison of direct growth and wafer bonding for the fabrication of GaInP/GaAs dual-junction solar cells on silicon". *IEEE Journal of Photovoltaics* 4 (2): 620–625.

Geisz, J. F., J. M. Olson, D. J. Friedman, K. M. Jones, R. C. Reedy, ve M. J. Romero. 2005. "Lattice-matched GaNPAs-on-silicon tandem solar cells". Içinde *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.*, 695–698. IEEE.

Itoh, Yoshio, Takashi Nishioka, Akio Yamamoto, ve Masafumi Yamaguchi. 1986. "14.5% conversion efficiency GaAs solar cell fabricated on Si substrates". *Applied physics letters* 49 (23): 1614–1616.

Jain, Nikhil, ve Mantu K. Hudait. 2014. "III–V multijunction solar cell integration with silicon: Present status, challenges and future outlook". *Energy Harvesting and Systems* 1 (3-4): 121–145.

Lundstrom, Mark S., ve Robert J. Schuelke. 1983. "Numerical analysis of heterostructure semiconductor devices". *IEEE Transactions on Electron Devices* 30 (9): 1151–1159.

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

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

Tanabe, Katsuaki, Katsuyuki Watanabe, ve Yasuhiko Arakawa. 2012. "III-V/Si hybrid photonic devices by direct fusion bonding". *Scientific reports* 2: 349.

Tran, Binh-Tinh, Edward-Yi Chang, Hai-Dang Trinh, Ching-Ting Lee, Kartika Chandra Sahoo, Kung-Liang Lin, Man-Chi Huang, Hung-Wei Yu, Tien-Tung Luong, ve Chen-Chen Chung. 2012. "Fabrication and characterization of n-In0. 4Ga0. 6N/p-Si solar cell". *Solar Energy Materials and Solar Cells* 102: 208–211.

Yamaguchi, Takanori, Takeshi Tsuchiya, Shiro Nakahara, Akira Fukui, Yasutsugu Nagamoto, Kenta Murotani, Kenichi Eshima, ve Naohiko Takahashi. 2016. *Efficacy of Left Atrial Voltage-Based Catheter Ablation of Persistent Atrial Fibrillation*. C. 27. 9. https://doi.org/10.1111/jce.13019.

Yang, Jingfeng, Zhilin Peng, Dan Cheong, ve Rafael Kleiman. 2014. "Fabrication of high-efficiency III–V on silicon multijunction solar cells by direct metal interconnect". *IEEE Journal of Photovoltaics* 4 (4): 1149–1155.