

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SPEKTRAL AYRIŞTIRMA İÇİN NANOFOTONİK YAPILARIN
TASARLANMASI**



DOKTORA TEZİ

Muhammed Necip ERİM

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT

TEMMUZ 2019

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilim Dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131217009 numaralı Doktora Öğrencisi **Muhammed Necip ERİM**'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SPEKTRAL AYRIŞTIRMA İÇİN NANOFOTONİK YAPILARIN TASARLANMASI**” başlıklı tezi **24.07.2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hamza KURT**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Bülent TAVLI**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Mirbek TURDUEV
TED Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Harun Taha HAYVACI
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Serdar KOCAMAN
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Muhammed Necip Erim

ÖZET

Doktora Tezi

SPEKTRAL AYRIŞTIRMA İÇİN NANOFOTONİK YAPILARIN TASARLANMASI

Muhammed Necip Erim

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza Kurt

Tarih: Temmuz 2019

Bu tez çalışmasında paralel eklemli güneş hücreleri için spektral ayırıştırma yapmak adına bir yapı tasarlanmıştır. Bu yapının performansının değerlendirilmesi için ise paralel eklemli InGaP/GaAs güneş hücresi tasarımı da yapılmıştır. Bu çerçevede spektral ayırıştırma yöntemleri ve literatürde yer alan çalışmalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ayrıca güneş hücresi tasarlamak için gerekli olan altyapının sağlanması adına güneş hücreleri ve yarıiletkenler üzerinde de durulmuştur. Tasarlanan spektral ayırıştırıcı yapısı kırınım ızgaraları kullanılarak oluşturulduğu için kırınım ızgaraları da detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Bu kapsamda, güneş spektrumunu lateral dizilmiş InGaP/GaAs güneş hücresi için iki ayrı parçaya ayırıştırıcı kırınım özellikli bir optik elemanın tasarımı sunulmaktadır. Optik simülasyonlar, üç boyutlu zaman alanında sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılmış olup sonuçlar, tasarlanan yapının optik performansını değerlendirmek için detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Tasarlanmış ayırıcı için geri yansımayı önleyici katman tasarımı da yapılmış ve etkileri ortaya konmuştur. Optik analize ek olarak, tasarlanan spektrum ayırıcıyı InGaP/GaAs güneş hücresine entegre ederek elektriksel

performansını göstermek adına elektriksel simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup akım yoğunluğunun ve güç yoğunluğunun voltaja göre eğrileri ayrı ayrı sunulmuştur. Elektriksel simülasyonların sonuçları, tasarlanan paralel eklemlili InGaP/GaAs güneş hücresinin, konsantre olmayan güneş ışığı altında en iyi % 16,8 verime sahip olduğunu göstermektedir. Spektral ayrıştırma yapısının parametreleri sezgisel olmayan optimizasyon algoritmalarının dahil edilmesiyle optimize edilirse daha fazla gelişme sağlanabilir. Ayrıca, tasarlanan güneş hücresinin verimliliğini arttırmak için ışık tuzaklama yöntemleri de düşünülebilir.

Spektral ayrıştırıcı tasarımına ek olarak Si güneş hücreleri için ışık tuzaklama amaçlı bir nano ızgara tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle ışık tuzaklama yöntemleri de detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Yapılan çalışmada fotovoltaik uygulamalarda ışık yakalama ve soğurma verimliliğini artırmak için azaltılmış yansıma kayıpları ve odaklanma özelliğine sahip yeni bir geri yansımayı önleyici katman tasarımı önerilmektedir. Gerçekleştirilen tasarım, tek bir yapıda geri yansımayı önleyici katman ve ızgara lensinin etkin bir kombinasyonunu sunmaktadır. Önerilen yapı, güneş hücrelerinin verimliliğini artırmak için iyi bir aday olabilir.

Anahtar Kelimeler: Spektral ayrıştırma, Güneş hücreleri, Fotovoltaik, Paralel eklemlili güneş hücreleri, Çok katmanlı güneş hücreleri, Geri yansımayı önleyici katman, Kırınım ızgaraları, Yüksek karşıtlıklı ızgaralar, Işık tuzaklama, Zaman- alanında sonlu-farklar.

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

DESIGN OF NANOPHOTONIC STRUCTURES FOR SPECTRAL SPLITTING

Muhammed Necip Erim

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hamza Kurt

Date: July 2019

In this thesis, a structure is designed to make spectral splitting for parallel junction solar cells. Parallel junction InGaP/GaAs solar cell design was also proposed in order to evaluate the performance of the spectral splitting device. In this context, spectral splitting methods and the studies in the literature are explained in detail. In addition, solar cells and semiconductors have been emphasized in order to provide the necessary knowledge for designing solar cells. Since the designed spectral splitting structure was formed using diffraction gratings, the diffraction gratings were also analyzed in detail.

In this context, the design of an optical element with diffraction property, which divides the solar spectrum into two separate parts for a laterally aligned InGaP/GaAs solar cell is presented. Optical simulations were performed using the three-dimensional finite difference time domain method and the results were shown in detail to evaluate the optical performance of the designed structure. An anti-reflection coating design was also proposed for the designed splitter and its effects were demonstrated. In addition to optical analysis, electrical simulations were performed to demonstrate the electrical performance by integrating the designed spectrum splitter onto the InGaP/GaAs solar cell and the curves of current density and power density

versus voltage are presented separately. The results of electrical simulations show that the designed parallel junction InGaP/GaAs solar cell has the best efficiency of 16.8% under unconcentrated sunlight. Further improvements can be achieved if the parameters of the spectral splitting device are optimized by the inclusion of non-heuristic optimization algorithms. In addition, light trapping methods may be considered to increase the efficiency of the designed solar cell.

In addition to the spectral splitting design, a nano grating design for light trapping for Si solar cells was realized. Therefore, light trapping methods are also described in detail. In this study, a new anti-reflection coating design with reduced reflection losses and focusing is proposed to increase the light capture and absorption efficiency in photovoltaic applications. The design offers an effective combination of anti-reflection coating and grating lens in a single structure. The proposed structure can be a good candidate to increase the efficiency of solar cells.

Keywords: Spectral splitting, Solar cells, Photovoltaics, Parallel junction solar cells, Multi-junction solar cells, Anti-reflection coatings, Diffraction gratings, High-contrast gratings, Light trapping, Finite-difference time-domain.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım boyunca bilgilerimi ve engin deneyimlerini her zaman benimle paylaşan, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve ayrıca hayata yaklaşımıyla bana örnek olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Hamza KURT'a, değerli görüş ve önerileri için Tez İzleme Komite Üyeleri'ne, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca öğrenim süresi boyunca sağladığı burs için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde bana destek olan sevgili eşim Nur ERİM ile canım oğullarım Osman Said ERİM ve Ahmet Yağız ERİM'e teşekkür ederim.

Ayrıca, beni bugünlere getiren ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen kıymetli annem Yüstra ERİM'e ve kıymetli babam Abdulkadir ERİM'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doktora eğitimim boyunca sağladığı maddi desteğinden dolayı TÜBİTAK BİDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvii
SEMBOL LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Güneş Hücreleri için Spektral Ayırıştırma.....	1
1.2 Güneş Hücreleri için Işık Tuzaklama.....	9
2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ HÜCRELERİ	15
2.1 Giriş.....	15
2.2 Solar Spektrum.....	16
2.3 Yarıiletkenler ve pn Eklemler.....	18
2.4 Güneş Hücreleri.....	22
2.5 InGaP/GaAs Paralel Eklemlerli Güneş Hücresi Tasarımı.....	30
3. KIRINIM IZGARALARI VE SPEKTRAL AYRIŞTIRICI TASARIMI ..	35
3.1 Giriş.....	35
3.2 Kırınım Olayı.....	36
3.3 Kırınım Izgaraları ile Spektral Ayırıştırıcının Tasarımı.....	39
4. InGaP / GaAs PARALEL EKLEMLİ GÜNEŞ HÜCRESİ İÇİN SPEKTRAL AYRIŞTIRICI TASARIMI	45
4.1 Giriş.....	45
4.2 Spektral Ayırıştırıcının Tasarımı ve Optik Analizler.....	47
4.3 Paralel Eklemlerli Güneş Hücresinin Elektriksel Analizi.....	54
5. FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN GERİ YANSIMAYI ÖNLEYİCİ DERECELENDİRİLMİŞ NANO-IZGARALARIN TASARIMI ..	61
5.1 Giriş.....	61
5.2 Tasarım Parametreleri ve Optik-Elektrik Simülasyon Sonuçları.....	62
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Birden fazla bant boşluklu malzemeler kullanılarak tasarlanan güneş hücreleri için verimlilik limitleri [3].	2
Şekil 1.2: Spektral ayrıştırma yöntemi için hazırlanan şematik gösterim. Gelen güneş ışığı alt bantlara ayrılarak farklı malzemelerden oluşan güneş hücrelerine yönlendirilmektedir.	4
Şekil 1.3: (a) Dikroik aynadan geçen ışığın Si hücreye, yansıtılan ışığın ise GaInP güneş hücresine yönlendirildiği deneysel kurulum [9], (b) 45°'lik açılarla yerleştirilen iki dikroik ayna ile yönlendirilen ışık ile 4 eklemli güneş hücresi için tasarlanan deneysel kurulum [11].	5
Şekil 1.4: Sekiz eklemli güneş hücresini yer aldığı holografik filtre kullanılarak tasarlanan spektral ayrıştırıcı sistemi[17].	6
Şekil 1.5: Prizma kullanılarak tasarlanmış olan spektral ayrıştırma yöntemi. Gelen güneş ışığı alt bantlara ayrılarak üç farklı malzemelerden oluşan güneş hücrelerine yönlendirilmektedir [18].	7
Şekil 1.6: Polikromat kullanılarak oluşturulmuş spektral ayrıştırıcının şematik gösterimi. (b) Polikromat uzunluklarının dağılımları. (c) Tasarlanmış yapının 100 um uzunluğundaki bir kısmının yatay dağılımı [19].	8
Şekil 1.7: Üç tane muhtemel Lambertian (rasgele) pürüzlendirmeye ait şematik gösterim. (a) Güneş hücresinin yüzeyinde ve arkasında yapılan pürüzlülük, (b) Sadece güneş hücresinin ön yüzünde yapılan pürüzleştirme, (c) Sadece güneş hücresinin arka yüzünde yapılan pürüzleştirme [25].	10
Şekil 1.8: (a) Geri yansıtıcı olarak kullanılan Bragg ızgaraları, (b) ARC katmanı ya da ışık tuzaklama amaçlı kullanılabilen iki boyutlu kırınım ızgaraları, (c) Tandem güneş hücrelerinde ışık tuzaklama amaçlı kullanılan üç boyutlu periyodik yapılar, (d) Tek yönlü yansıtıcı ya da ışık tuzaklama amaçlı tasarlanmış olan üç boyutlu güneş hücresi tasarımı [27].	11
Şekil 1.9: Işık tuzaklama amaçlı kare tabanlı piramitlerden oluşan TiO ₂ katman ile kaplanmış Si güneş hücresi tasarımı. Alttaş olarak SiO ₂ kullanılmıştır.	12
Şekil 1.10: Si güneş hücresinin kare tabanlı piramit şeklindeki TiO ₂ ile kaplanmasıyla elde edilen emilimlerin dalgaboyuna göre dağılımları. Kırmızı çizgi sadece Si güneş hücresine ait emilim eğrisi iken mavi çizgi TiO ₂ katmanın eklenmesiyle elde edilen emilim eğrisidir.	12
Şekil 1.11: (a) Sadece Si güneş hücresine ait e-h çiftinin xz düzlemindeki dağılımları (b) Kare tabanlı piramitlerden oluşan TiO ₂ katman varken elde edilen e-h çiftinin xz düzlemindeki dağılımları.	13
Şekil 2.1: Güneş enerjisinde gelen radyasyonun dağılımı. Gelen ışımın büyük bir kısmı görünür bölgede yer almaktadır. Her dalgaboyu bir frekans ve bir enerji değerine karşılık gelmektedir.	16

Şekil 2.2: Güneş spektrumunun radyasyona göre grafiği (AM1.5G, AM1.5D ve AM0).....	17
Şekil 2.3: Ayrı ayrı Bor ve Fosfor ile katkılanmış Silikon malzemesi	21
Şekil 2.4: p-tipi ve n-tipi malzemelerin birleştirilmesiyle oluşan pn eklemide difüzyon sonucu elektrik alan oluşumu.....	21
Şekil 2.5: Radyasyon rekombinasyonunun şematize edilmesi. İletim bandında uyarılmış haldeki elektron valans bandına indirgenirken enerjisini foton olarak yaymaktadır.....	24
Şekil 2.6: SRH rekombinasyonunun şematize edilmesi. İletim bandında uyarılmış haldeki elektron valans bandına indirgenirken yasaklı bant aralığında oluşan bir enerji seviyesinde belli bir süre durduktan sonra valans bandına indirgenirken enerjisini foton veya ısı olarak yaymaktadır.....	24
Şekil 2.7: Auger rekombinasyonunun şematize edilmesi. İletim bandında uyarılmış haldeki elektron valans bandına indirgenirken enerjisini iletim bandındaki bir başka elektrona verir ve bu elektron iletim bandının yukarılarına yükseltgenir. Bir süre sonra bu enerjisi ısı olarak kaybederek eski konumuna döner.	25
Şekil 2.8: Örnek bir akım-voltaj eğrisi. Kısa devre akımı ve açık devre voltajı eğrinin eksenleri kestiği noktalar olarak gösterilmiştir. Açık yeşil alan ise eğrinin doluluk oranını göstermektedir.	29
Şekil 2.9: Örnek bir güç-voltaj eğrisi. Maksimum güce karşılık gelen nokta PMP olarak gösterilmektedir. Bu değer verimlilik hesabında kullanılmaktadır.	30
Şekil 2.10: InGaP/GaAs/Ge paralel eklemli güneş hücreinin dış kuantum verim grafiği [44]. InGaP 400-680 nm aralığında çalışırken GaAs 680-900 nm aralığında çalışmaktadır.	31
Şekil 2.11: InGaP malzemesine ait sönümlenme katsayısının dalgaboyuna göre grafiği.	32
Şekil 2.12: GaAs malzemesine ait sönümlenme katsayısının dalgaboyuna göre grafiği.	32
Şekil 2.13: Optik simülasyon için tasarlanan InGaP/GaAs paralel çift eklemli güneş hücresi. Hücre kalınlığı 3 µm iken geri yansıtıcı Al levha kalınlığı 300 nm olarak alınmıştır.	33
Şekil 2.14: Optik simülasyonlarda güneş ışığı kaynağı olarak kullanılan AM1.5G spektral dağılımına sahip kaynağın dalgaboyuna göre dağılımı.....	33
Şekil 2.15: Elektriksel simülasyon için tasarlanmış olan InGaP/GaAs güneş hücresi yapısı. Elektriksel olarak birbirinden izole edilen iki malzeme için alt ve üst bağlantı noktası olarak Ag elektrot kullanılmıştır.	34
Şekil 3.1: Aralarında d kadar mesafe bulunan çift yarıkli bir düzeneğe gelen ışığın perdeye düşerken gösterdiği girişim desenlerinin şematik gösterimi. (a) İki yarıkta gelen ışığın perdenin tam ortasında oluşturduğu yapıcı girişim. (b) Birinci yarıkta gelen ışık ile ikinci yarıkta gelen ışık arasındaki dalgaboyunun yarısı kadar faz farkından dolayı perdede oluşan sönümleyici girişim. (c) Birinci yarıkta gelen ışık ile ikinci yarıkta gelen ışık arasındaki bir dalgaboyu kadar faz farkından dolayı perdede oluşan yapıcı girişim.	37
Şekil 3.2: Krımın ızgarası kullanılarak gelen bir düzlem dalğanın farklı dalga boylarını belli bir mesafede yer alan perdenin farklı noktalarına	

yönlendirmesi. Her dalgaboyu için dalgaboyunun tam katlarında aydınlık bölgeler oluşmuştur.....	38
Şekil 3.3: Kırınım ızgaraları kullanılarak tasarlanan ve optimize edilen spektral ayrıştırıcının tasarım parametreleri ile hem iki boyutlu hem de üç boyutlu gösterimi. Karelerin boyutları ve aradaki mesafe detayları gösterilmektedir.	39
Şekil 3.4: Yapılan optimizasyon sonuçlarına ait dört farklı sonuç eğrileri. Mavi çizgi birinci ölçü sonuçlarına ait iken kırmızı çizgi ikinci ölçüme ait sonuçlardır. (a) İlk karenin ölçüsü 0,98a, son karenin ölçüsü 1,21a. (b) İlk karenin ölçüsü 0,95a, son karenin ölçüsü 1,18a. (c) İlk karenin ölçüsü 0,90a, son karenin ölçüsü 1,13a. (d) İlk karenin ölçüsü 0,85a, son karenin ölçüsü 1,08a. Dört durum için de aradaki mesafe 1,06a'dan 1,28a'ya ayarlanmıştır.....	40
Şekil 3.5: Optimize edilmiş spektral ayrıştırıcıya ait normalize iletilen akının normalize frekansa göre iki ayrı ölçüm yüzeyinden elde edilen sonuçlar.	41
Şekil 3.6: (a) 690 nm dalga boyuna sahip monokromatik kaynak ile aydınlatılan spektral ayrıştırıcının elektrik alan dağılımı. (b) 615 nm dalga boyuna sahip monokromatik kaynak ile aydınlatılan spektral ayrıştırıcının elektrik alan dağılımı.	42
Şekil 4.1: Spektral ayrıştırıcının tasarım parametreleri ve optik simülasyon için kullanılan düzenek.	48
Şekil 4.2: Her güneş hücresinin iletim spektrumları için spektral ayırıcı optik simülasyon sonuçları. Kırmızı çizgi YBG güneş hücresine ait iken mavi çizgi ile gösterilen iletim DBG güneş hücresine aittir.	48
Şekil 4.3: (a) 620 nm dalboyuna sahip kaynak kullanılarak elde edilen manyetik alan dağılımı. (b) 700 nm dalboyuna sahip kaynak kullanılarak elde edilen manyetik alan dağılımı.	49
Şekil 4.4: Optik simülasyon için tasarlanan InGaP/GaAs paralel eklemli güneş hücresi ve spektral ayrıştırıcının güneş hücresine entegre edilmesi. Geri yansıtıcı olarak Al levha kullanılmıştır.	50
Şekil 4.5: (a) Farklı koşullar için InGaP malzemesinin absorpsiyon spektrumları. (b) Farklı koşullar için GaAs malzemesinin absorpsiyon spektrumları. (c) InGaP/GaAs güneş hücresinin ayırıcı ve ARC katmanı entegre edilerek elde edilen absorpsiyon spektrumları.	51
Şekil 4.6: Spektral ayırıcı için Si ₃ N ₄ kullanılarak tasarlanan ARC katmanları. İki farklı malzemeden dolayı iki farklı kalınlıkta ARC tasarlanmıştır. Bu iki kalınlığın ortalaması alınarak fabrikasyon kolaylığı sağlamak adına analizlerde aşağıda yer alan 90 nm'lik ARC katmanı kullanılmıştır.	52
Şekil 4.7: e-h çifti sayılarının mekansal dağılımları (a) InGaP güneş hücresi içerisindeki dağılım, (b) GaAs güneş hücresi içerisindeki dağılım.	54
Şekil 4.8: Elektriksel simülasyon için tasarlanan paralel eklemli InGaP/GaAs güneş hücresi yapısı.	55
Şekil 4.9: Dört farklı kombinasyon için: (a) InGaP için Akım yoğunluğu - voltaj eğrisi ve (b) InGaP için güç yoğunluğu - voltaj eğrisi - (c) GaAs için Akım yoğunluğu - voltaj eğrisi ve (d) GaAs için güç yoğunluğu-voltaj eğrisi.	58
Şekil 4.10: Paralel eklemli InGaP/GaAs güneş hücresinin emilimleri ile sadece GaAs'den oluşturulan güneş hücresinin emilim grafikleri.	59

Şekil 5.1: Tasarlanan güneş hücresi yapısının üç boyutlu (a) geleneksel ızgara ve (b) tasarlanan GHNG katmanları.....	62
Şekil 5.2: Farklı yapısal katman bileşimlerine sahip güneş hücreleri için ön yüzey yansıtma spektrumları.....	63
Şekil 5.3: (a) Geleneksel ızgara ve (b) GHNG yapısına sahip güneş hücrelerinin 775 nm'de elektrik alanı dağılımı.....	64
Şekil 5.4: Farklı yapısal katman bileşimleri için Si güneş hücresinin J-V eğrileri	65
Şekil 5.5: Farklı yapısal katman bileşimleri için Si güneş hücresinin P-V eğrileri	65



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Si, GaAs ve Ge malzemelerine ait 300 K sıcaklık için genel olarak kabul edilen n_i değerleri	19
Çizelge 4.1: InGaP ve GaAs yarıiletken malzemelerine ait elektriksel simülasyonda kullanılan önemli parametreler ve bu parametrelerin elde edildiği referans tablosu.	56
Çizelge 4.2: Birbiri ile elektriksel olarak izole edilmiş InGaP ve GaAs güneş hücrelerine ait elektriksel simülasyon sonuçlarının ayrı ayrı gösterildiği tablo.....	57
Çizelge 4.3: InGaP/GaAs paralel eklemli güneş hücresi tasarımı ile GaAs güneş hücresi tasarımına ayrıştırıcının eklenmesiyle elde edilen elektrik simülasyon sonuçları.....	59

KISALTMALAR

PV	: Fotovoltaik (Photovoltaics)
AM	: Hava Kütlesi (Air Mass)
K	: Kelvin
FDTD	: Zaman-Alanında Sonlu-Farklar (Finite-Difference Time-Domain)
TM	: Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
TE	: Enine Elektrik (Transverse Electric)
CIGS	: CuInGaS ₂
ARC	: Geri Yansımayı Önleyici Katman (Anti-Reflection Coating)
e-h	: Elektron-Delik (electron-hole)
MTEP	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
SRH	: Shockley-Read-Hall
FF	: Doluluk Oranı (Fill Factor)
YBG	: Yüksek Bant Genişliği
DBG	: Düşük Bant Genişliği
GHNG	: Derecelendirilmiş Yükseklikli Nano Izgara (Graded Height Nano Grating)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E_g	Boşluk Enerjisi
n	Kompleks kırılma indisinin reel kısmı
k	Kompleks kırılma indisinin sanal kısmı
λ	Dalgaboyu
n_{ph}	Emilen foton akısı
ϵ	Elektrik geçirgenlik sabiti
α	Soğurma katsayısı
W	Emilen foton başına yapılan iş
Si	Silisyum
$InGaP$	İndiyum Galyum Fosfat
$GaAs$	Galyum Arsenik
Ge	Germanyum
SiO_2	Silisyum Dioksit
TiO_2	Titanyum Dioksit
$GaSb$	Galyum Antimoni
$CuInGaSe_2$	Bakır İndiyum Galyum Diselenit
h	Planck Sabiti
c	Işığın Boşluktaki Hızı
ν	Frekans
λ	Periyot
eV	Elektron Volt
G	Üretim Oranı
D	Yayılganlık
L	Difüzyon Uzunluğu
τ	Taşıyıcı Ömrü
I_{sc}	Kısa Devre Akımı
V_{oc}	Açık Devre Voltajı
η	Verimlilik
Al	Alüminyum
Ag	Gümüş
Si_3N_4	Silisyum Nitrat
n_0	Elektron Konsantrasyonu
p_0	Delik Konsantrasyonu
N_C	İletim Bandındaki Etkin Durum Yoğunluğu
N_V	Valans Bandındaki Etkin Durum Yoğunluğu
E_C	İletim Bandı Enerji Seviyesi
	Fermi Enerji Seviyesi

E_F	Valans Bandı Enerji Seviyesi
E_V	Elektronun Etkin Kütlesi
m_n^*	Deliklerin Etkin Kütlesi
m_p^*	Elektron Kütlesi
m_0	Elektronların Özgün Yoğunluğu
n_i	Deliklerin Özgün Yoğunluğu
p_i	Yerleşik Voltaj
V_{bi}	Alıcı Atomların Katkılama Miktarı
N_a	Donör Atomların Katkılama Miktarı
N_d	Geçiş Bölgesi Genişliği
w	



1. GİRİŞ

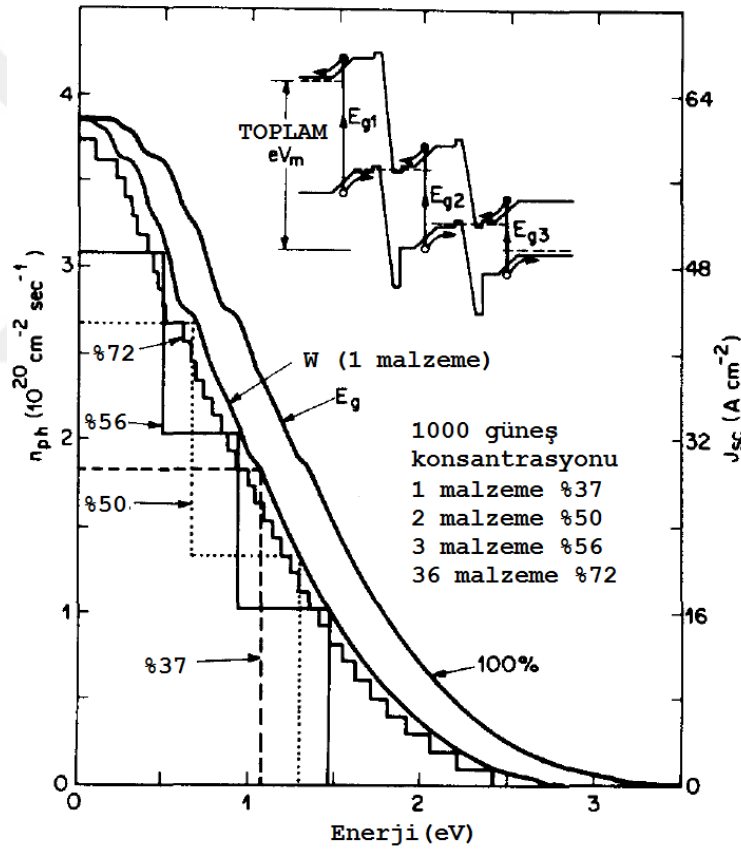
1.1 Güneş Hücreleri için Spektral Ayırıştırma

Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları içerisindeki en büyük miktarda enerjiye sahip bir kaynak türüdür. Son yıllarda tüm dünyada kullanımı giderek artan güneş enerjisi özellikle elektrik üretiminde artan kullanım oranıyla diğer kaynakları geride bırakmaya başlamıştır. Bunun en büyük nedenlerinden biri güneşten üretilen elektriğin maliyetinin fosil kaynaklar kullanılarak üretilen elektrik ile aynı seviyelere ulaşmasıdır. Bu maliyet düşüşündeki nedenler ise PV panel üretimindeki artış ve yapılan araştırmalar sonucu panel verimliliğinde yaşanan artışlar olarak sıralanabilir. Maliyeti düşürmenin bir diğer yolu ise güneş hücresi kalınlığının azaltılması ve böylelikle malzeme sarfiyatının düşürülmesi olarak belirtilebilir. Bu tezde yatay dizilimli güneş hücresi tasarımı ve spektral ayırıştırıcı tasarımı ile hem güneş hücresinin kalınlığının azaltılması ve verimliliğin artırılması hedeflenmektedir.

Tek eklemlili bir güneş hücresinin verimliliği gelen spektrumdaki örtüşmeler ve eklemin spektral cevabı ile sınırlanmıştır. Daha geniş bir bant boşluğuna sahip bir malzemede gelen güneş ışığındaki az miktarda fotonun uyaracağı taşıyıcı miktarı düşük olacağından bu tek eklemlili güneş hücresinin akım değeri düşük olacaktır. Fakat bu geniş bant boşluğunda uyarılan elektronların enerji seviyeleri daha yüksek olacağından bu durum daha yüksek voltaj oluşmasına neden olacaktır. Shockley ve Queisser tarafından 6000 K kara cisim aydınlatmada sadece radyasyon rekombinasyonun dikkate alınmasıyla yapılan çalışmaya göre tek eklemlili güneş hücrelerinin tek güneş konsantrasyonu altındaki verimlilik değeri %30 ile sınırlıdır [1]. Fakat başka bir çalışmada ise AM1 koşulları altındaki verimlilik için bu limit değerinin %31 olduğunda bahsedilmektedir [2]. Eğer ki gelen güneş ışığı yüksek oranlarda yoğunlaştırılırsa tek eklemlili güneş hücrelerinin verimliliğindeki bu üst limit değeri %40,8'e ulaşmaktadır [3]. Ayrıca tek eklemlili bir güneş hücresinde gelen fotonun sahip olduğu enerjinin bant boşluğu enerjisini aşan kısmı ısıya dönüşmektedir. Bu nedenle

tek eklemli güneş hücrelerinde yaşanan temel kayıp ısıya dönüşen enerjiden kaynaklanan kayıptır [4].

Tüm bu durumları aşmak adına farklı bant boşluklarına sahip malzemeler kullanılarak çok eklemli güneş hücreleri oluşturulmaya başlanmıştır. Sonsuz sayıda eklemden oluşan bir güneş hücresinin verimlilik değeri konsantre ışık altında %86,3 olarak hesaplanmıştır [3]. Şekil 1.1’de yer alan grafikte ise yapılan bir çalışmada 1000 güneş ışığı konsantrasyonu altında malzeme sayısına göre elde edilebilecek verimlilik üst limit değerleri gösterilmektedir [3].

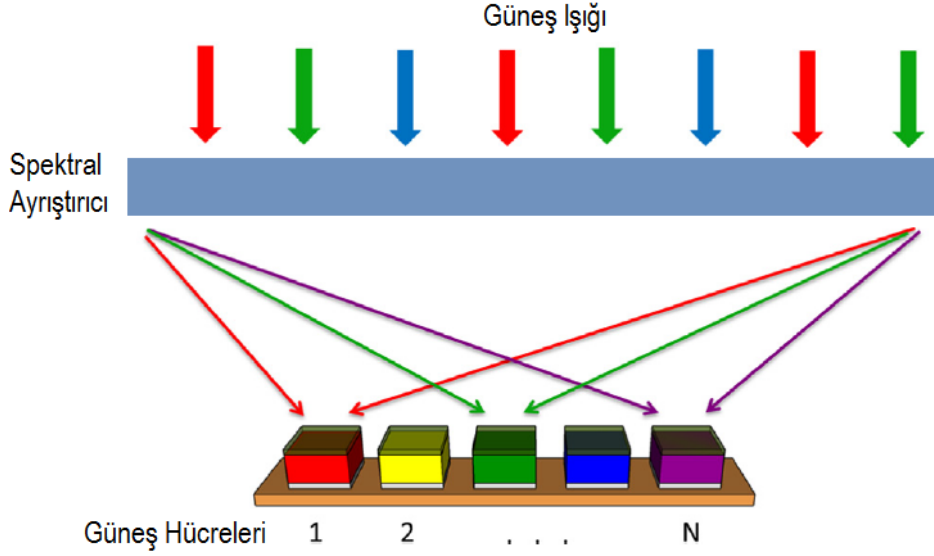


Şekil 1.1: Birden fazla bant boşluklu malzemeler kullanılarak tasarlanan güneş hücreleri için verimlilik limitleri [3].

Şekil 1.1’de yer alan grafikteki dışta yer alan eğri bant boşluğu enerjisinin (E_g) emilen foton akısına (n_{ph}) göre grafiği iken içte yer alan eğri ise W ile gösterilmiş olup emilen her foton başına yapılan işin n_{ph} değerine göre grafiğidir. Ayrıca, merdiven yapısının boyu her enerji boşluğu tarafından emilen foton akısını, orijinden itibaren genişliği ise

her emilen foton başına düşen maksimum enerjiyi göstermektedir. Her bir hücrenin verimi, basamaklarla çevrelenen alanın ve dış eğrinin altındaki alanın oranı ile hesaplanmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar bakıldığında 508 güneş ışığı konsantrasyonu altında dört eklemli olarak tasarlanan güneş hücresinin verimi % 46'ya ulaşmıştır [5]. Fakat bu tasarımlar farklı malzemelerin üst üste eklenmesiyle gerçekleştirilmelerinden dolayı örgü ve akım eşleşmesi gibi kısıtlara sahiptirler [6]. Düşey eksenli çok eklemli güneş hücrelerinin akım çıkışı, gelen spektrumunun değişkenliğine duyarlıdır. Akım uyumsuzluğunu azaltmak için üst hücrenin inceltmesi gerekmekte olup bu nedenle yaşanan eksik emilim sonucu bir miktar verimlilik kaybı oluşmaktadır [7]. Yüksek malzeme kalitesi gereksinimi ve karmaşık düşey eksenli çok eklemli tasarım nedeniyle tandem PV hücrelerinin düşük maliyetle üretilmesi mümkün değildir.

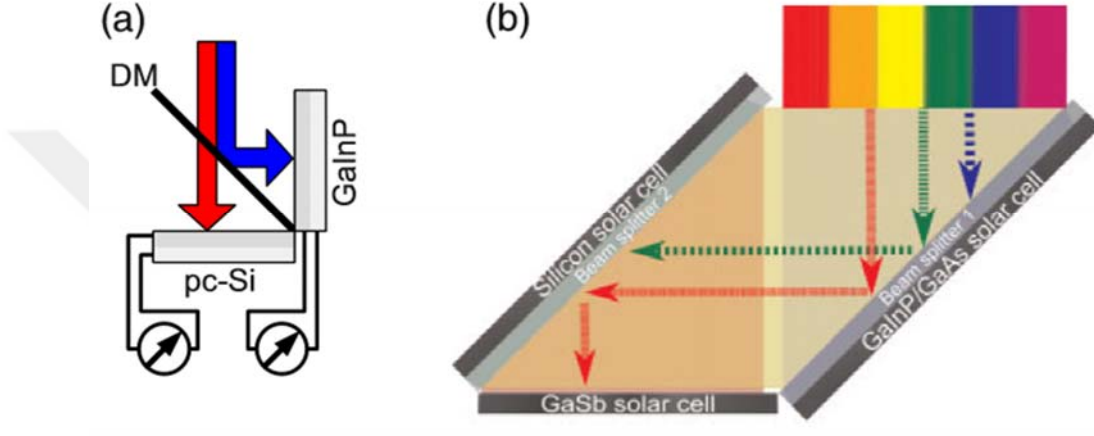
Şekil 1.2'de gösterilen spektral ayrıştırma yöntemi ise optik elemanlar yardımıyla gelen güneş ışığının farklı spektral bölgelere ayrıştırılarak yatay olarak dizilmiş farklı malzemelere gönderilmesi olarak tanımlanmaktadır ve bu konuda yapılan birçok çalışma mevcuttur [6, 8-16]. Örgü uyumluluğu, spektral ayrıştırma yönteminde bir kısıtlama değildir ve hücre verimliliği bir dalga boyu bandında optimum olduğu sürece PV eklemleri farklı teknolojilerle birleştirmek mümkündür. Ayrıca, yüksek kalitede ince film PV malzemeleri üreten ucuz imalat yöntemlerinden yararlanmak da mümkündür. Bunun yanı sıra, hücrelerin seri olarak bağlanması, spektral ayrıştırma yönteminde gerekli değildir ve her bir PV hücresi, optimum ışık tuzaklama etkisi için özel olarak tasarlanmış farklı ışık tuzaklama tasarımlarıyla bir spektral bandın tamamen emilmesine yönelik olarak optimize edilebilir. Spektral ayrıştırma için kullanılan optik tasarımlar için birkaç yöntem mevcuttur. Bunlar dikroik aynalar, holografik filmler ve kırınım etkisine sahip optik elemanlar olarak sıralanabilir. Dikroik aynalar farklı spektral ayrıştırıcı sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [6, 9, 12-16]. Dikroik aynalarla yapılan bir çalışmada [9] tasarlanan ayna, polikristal Si güneş hücresi için optimize edilmiştir. Bu çalışmada, dikroik ayna ile %11,1 verimliğe sahip hazır Si güneş hücresi kullanılmış olup %12,3 verimlilik değerine sahip bir diğer malzeme olan yüksek bant aralıklı GaInP hücrenin eşzamanlı uyarılarak spektral ayrıştırma için bir sistem tasarlanmıştır. Tek bir sistemde yer alan bu iki güneş hücresinin toplam verimi %16,8 olarak elde edilmiştir.



Şekil 1.2: Spektral ayırıştırma yöntemi için hazırlanan şematik gösterim. Gelen güneş ışığı alt bantlara ayrılarak farklı malzemelerden oluşan güneş hücrelerine yönlendirilmektedir.

Çalışma sonucunda, Si solar hücre verimliliğinin bu şekilde basit ve düşük maliyetli olarak geliştirmesi için düşük maliyetli ve yüksek bant aralıklı malzemeler kullanılmasının yeterli olacağı anlaşılmıştır. Bir diğer dikroik ayna çalışmasında ise [11] dört eklemli PV güneş hücresi kullanılarak iki ayrı dikroik aynadan oluşan spektral ayırıştırıcı mimarisi ile birlikte gösterdiği performans ortaya konulmuştur. Spektral bölge seçici aynalarla 45° 'lik açılarda gelen ışık tuzaklanarak PV alıcıya gönderilmiştir. Bu ayırıştırıcı aynaların optik verimleri %90 mertebelerinde olduğu belirtilmiştir. Si ile birlikte III-V grubu yarıiletken malzemelerden (GaInP, GaAs ve GaSb) tasarlanan güneş hücresi kullanıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada deneysel olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda konsantre olmayan ışık altında %34 verimlilik elde edildiği rapor edilmektedir. Her iki çalışmada [9, 11] tasarlanan yapılar Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Şekil 1.3 (a)'daki sistemde gelen ışık 45° açıyla yerleştirilen dikroik ayna vasıtasıyla gelen güneş ışığı iki farklı spektruma ayrıştırılarak iki farklı malzemeye yönlendirilmiştir. Şekil 1.3 (b)'de ise gelen güneş ışığı iki farklı dikroik ayna ile 4 farklı malzemeye yönlendirilmiştir. İlk önce gelen ışığın bir kısmı dikroik aynadan geçtikten sonra GaInP/GaAs güneş hücresi tarafından soğurulurken bu ilk aynadan yansıya ışık ikinci aynaya yönlendirilmiştir. İkinci aynadan bir kısmı Si güneş hücresine iletilirken bir kısmı ise GaSb güneş hücresine

yansıtılmıştır. Dikroik aynalar kullanılarak yapılan başka bir çalışmada ise [13], üç grup halinde yapılan tasarımda 5 eklemlili güneş hücresi sistemi oluşturulmuş ve toplamda %43 verim elde edilmiştir. Bu çalışmadaki tasarımda, GaInP/GaAs grubu 208-890 nm bant aralığını kullanırken, Si hücresi 890-1100 nm bant aralığını kullanmış ve son grup olan GaInAsP/GaInAs tandem hücresi ise 1100-4000 nm dalga boyu aralığını kullanmıştır [13].

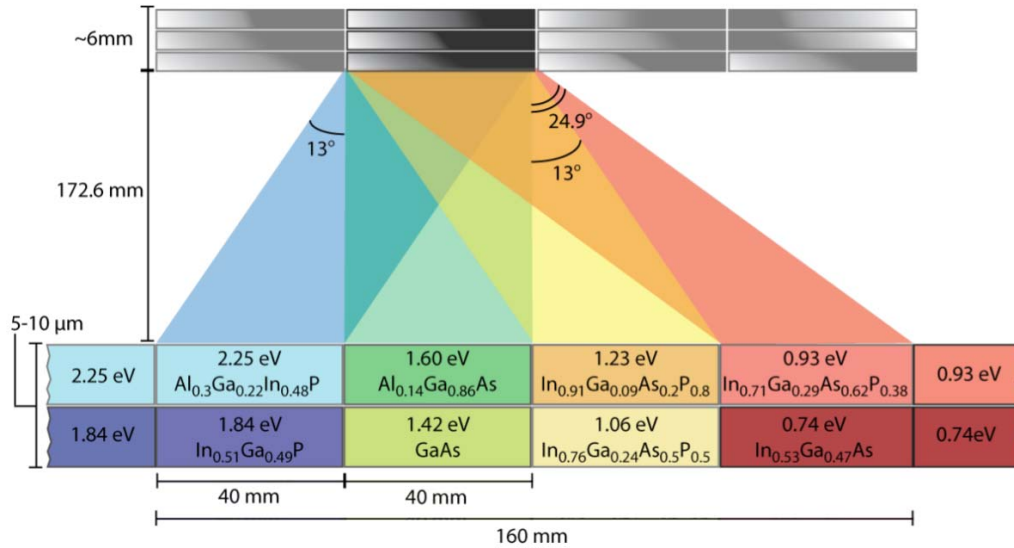


Şekil 1.3: (a) Dikroik aynadan geçen ışığın Si hücreye, yansıtılan ışığın ise GaInP güneş hücresine yönlendirildiği deneysel kurulum [9], (b) 45°'lik açılarla yerleştirilen iki dikroik ayna ile yönlendirilen ışık ile 4 eklemlili güneş hücresi için tasarlanan deneysel kurulum [11].

Dikroik aynalar, yüksek optik verim, iyi tanımlanmış bir yansıtma bandı ve düşük polarizasyon bağımlılığı gibi avantajlara sahip olan optik elemanlardır. Bununla birlikte, yalnızca kolime edilmiş ışık için optimize edilmiştir ve konik bir ışık demeti yansıtma açısından spektral hatalarla karşılaşmaktadır. Ayrıca bu tip sistemler için her bir hücre ayrı bir alt taş üzerinde büyütülerek üretilmesi gerekmektedir. Bu durum karmaşık ve pahalı bir üretim işlemi gerektirmektedir. Bu nedenle maliyet olarak daha ucuz olabilecek yöntemlerin araştırılması elzemdir.

Holografik filtreler de bir diğer spektral ayrıştırma yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bu filtreler birkaç mikron kalınlığında çok yüksek kırınım verimliliğine sahiptirler. Gelen ışık büyük açılarda kırınıma uğratabilmeleri bu yapıların spektral ayrıştırıcı olarak yüksek optik verimliliğe sahip olmalarını sağlamaktadır. Tasarlanan hologramlar bazı avantaj ve dezavantajlara göre yansıtma ve iletim modunda çalıştırılabilirler. Yansıtma modundaki holografik filtreler, iki karşıt-yayılan optik

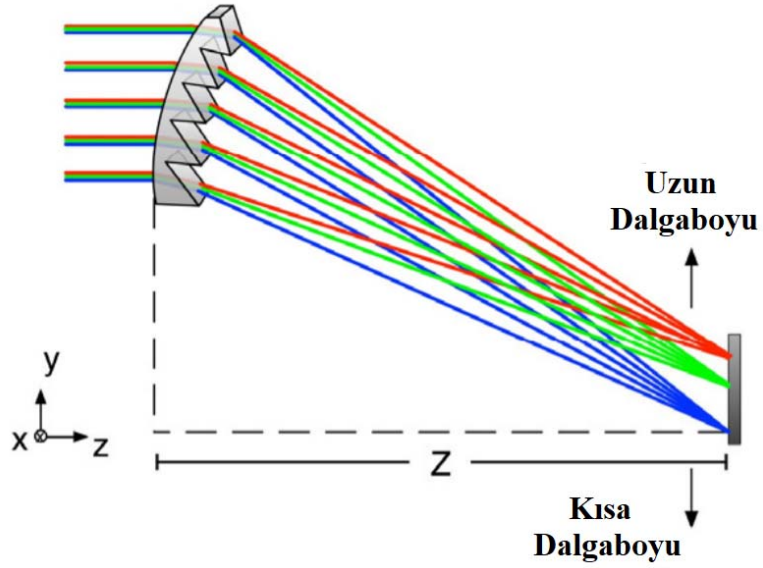
hüzmenin girişim deseninin kaydedilmesi ile üretilmektedir. Yansıma hologramı, hüzmeler alt taşa paralel bir girişim saçığı oluşturduğunda geniş bant yansımasına sahip olmaktadır. Bu tür hologram dikroik aynalara düşük maliyetli bir ikame olarak kullanılabilir. Ek olarak, ışın açıları açıklık pozisyonunun bir fonksiyonu olarak kontrol edilebilir. Bu özellik, üzerinde spektral seçicilik elde edilen açıları kontrol etmek için kullanışlıdır. Fakat hologramların kırınım verimliliği, düşük ortalama kırılma indisi dağılımına sahip olmalarından dolayı geniş açısındaki değişimlere duyarlıdır. Daha geniş bant genişliğine sahip olarak işlenen yansıma hologramları genellikle yüksek sıcaklıktaki üretim işlemi nedeniyle daha yüksek Rayleigh saçılımı sergilemektedir. İletim modundaki holografik filtreler ise dikroik aynalara ve yansıma hologramlarına göre çok farklı konfigürasyonlarda kullanılmaktadır. Bu filtreler kolime edilmiş hüzmeye ve odaklanmış hüzmelerin girişimleri yoluyla üretilmektedir. İletim modundaki spektral ayırıcılar gelen ışık spektral olarak dispersiyona uğrar ve istenilen bant genişliğindeki güneş hücresine odaklanır. İletim hologramının yansıma hologramına göre en belirgin özelliği spektral olarak ayırırken aynı zamanda odaklama yapmasıdır. Klasik odaklayıcı tasarımlar yerine iletim hologramlarının kullanılması ile daha basit tasarımlar ve daha ucuz üretim maliyetleri elde edilmektedir. Şekil 1.4'te holografik filtre kullanılarak yapılan bir çalışmada [17] tasarlanmış olan spektral ayırıcı yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.4: Sekiz eklemlili güneş hücresini yer aldığı holografik filtre kullanılarak tasarlanan spektral ayırıcı sistemi[17].

Bu çalışmada [17] sekiz adet farklı malzeme kullanılarak oluşturulan tandem hücelere tasarlanan holografik filtreden gelen dört parçaya ayrılmış ışık gönderilmiştir. Buna ek olarak iki eksenli konsantre ışık kullanılmış ve 672 güneş ışığı konsantrasyonu altında çalışılmıştır [17]. Bu çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, ticari olarak temin edilebilen 12 adet hologramdan oluşan bu holografik spektrum ayırıcı sayesinde %76,1 optik verim ve % 37,1 modül verimi elde edildiği görülmektedir [17].

Kırınım etkisine sahip optik elemanlar spektral ayırıştırma için başka bir alternatiftir. Spektral ayırıştırmayı sağlamak için prizmalar gibi basit kırılma elemanlarının dağılma özelliklerinden faydalanılabilmektedir. Prizmalar gibi optik elemanlar PV uygulamalar için uygun şekilde yüksek verimlilik ve geniş bant elde etmek için kullanılabilirler. Fakat daha küçük prizma dizilerinde artan kenar etkileri nedeniyle sistemin verimliliği ve kütlesi arasında bir denge vardır. Kırınım etkisine sahip optik elemanla kullanılarak yapılan bir çalışmada [18] Şekil 1.5'te gösterilen prizmalar kullanılmış ve gelen ışık üç ayrı spektral bölgeye ayrılarak üç ayrı güneş hücresine yönlendirilmiştir.

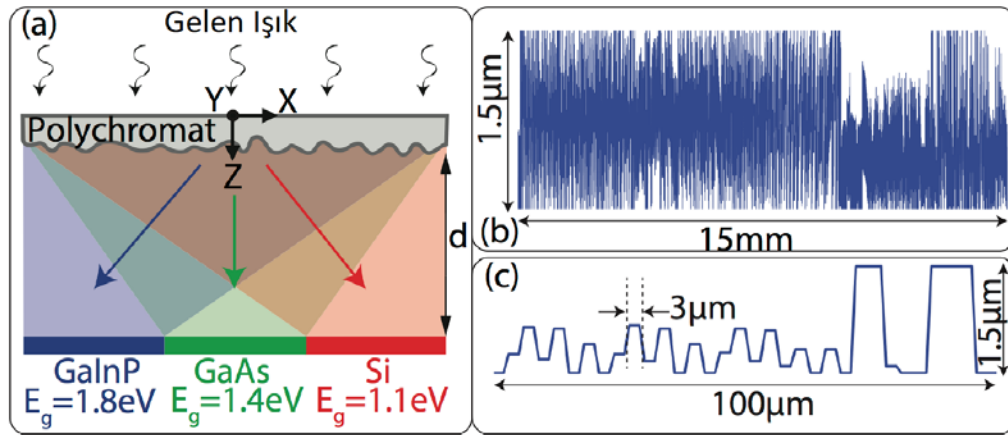


Şekil 1.5: Prizma kullanılarak tasarlanmış olan spektral ayırıştırma yöntemi. Gelen güneş ışığı alt bantlara ayrılarak üç farklı malzemelerden oluşan güneş hücrelerine yönlendirilmektedir [18].

Şekil 1.5'te tasarlanan sistem, geleneksel konsantre PV optik ekipman üretimi için kullanılan aynı yöntemler kullanılarak üretilen prizmatik bir mercek ve farklı

kompozisyona ve dolayısıyla bant boşluklarına sahip iki ucuz CuInGaSe₂ (CIGS) güneş hücresinden oluşturulmuştur [18]. Tasarlanan spektral ayrıştırıcı altında hücre verimliliğinde büyük bir gelişme olduğunu gösterilmiş ve bunun mevcut teknolojiler kullanılarak rekabetçi maliyetle sistem üretiminde önemli gelişmelere yol açacağı ifade edilmiştir [18].

Şekil 1.6'da yer alan sistemin yer aldığı çalışmada [19] ise güneş spektrumunu üç gruba ayırıp bu bantları üç farklı fotovoltaik hücre üzerinde yoğunlaştırarak PV çıkış gücünün arttığını rapor edilmektedir. Spektrum ayrıştırma ve konsantrasyon, ilgilenilen tüm spektrum boyunca yüksek optik verim sergileyen ince, düzlemsel bir mikro-optik eleman ile elde edilmiştir [19]. Optik eleman polikromat diye tabir edilen, doğrudan ikili arama algoritmasının değiştirilmiş bir versiyonu kullanılarak tasarlanmıştır [19]. GaInP, GaAs ve Si'den yapılan güneş hücresinin elektriksel karakterizasyonu, polikromatsız normal çalışmaya kıyasla maksimum çıkış gücü yoğunluğunda sırasıyla %43.63, %30.84 ve %30.86 artış göstermekte olup toplam artış %35,52 olarak belirtilmektedir [19].



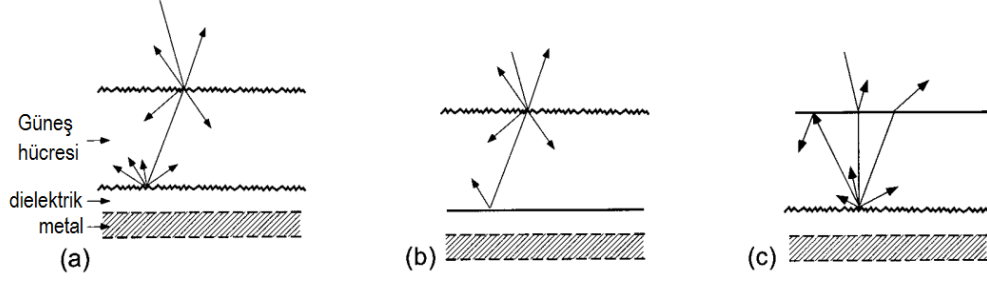
Şekil 1.6: Polikromat kullanılarak oluşturulmuş spektral ayrıştırıcının şematik gösterimi. (b) Polikromat uzunluklarının dağılımları. (c) Tasarlanmış yapının 100 um uzunluğundaki bir kısmının yatay dağılımı [19].

Bu tez çalışması kapsamında ise kırınım etkisine sahip optik bir eleman olan kırınım ızgaralarından faydalanılmıştır. Tasarım parametreleri ve detaylı analizler sonraki bölümlerde ele alınacaktır.

1.2 Güneş Hücreleri için Işık Tuzaklama

Işık tutma ya da tuzaklama teorisi üzerine yapılan en eski çalışmalardan başlıcaları Yablonovitch ve Cody [20] tarafından yapılan çalışma ile yönden bağımsız olarak saçılan (veya Lambertian) bir yüzey tarafından elde edilebilen ışık tuzağının yer aldığı Göetzberger [21] tarafından yapılan çalışmalar olarak sıralanabilir. Bir güneş hücresinde geri yansımının azaltılması ve fotonların yarıiletken içerisindeki geçirdikleri sürenin ve mesafenin artırılması gelen fotonların emilimini arttırmak için önemli hususlardır. Bunların gerçekleştirilmesi için geri yansımaya önleyici katmanlar ve malzeme kalınlığının artırılması gibi yollar mevcut iken diğer bir yol ise gelen ışığın tuzaklanmasıdır. Gelen fotonun yapıya girdikten sonra yansımaya uğraması halinde ikinci kez yapıya girme ihtimalinin artırılması ışık tuzaklaması için bir örnek sayılabilir. Bu nedenle güneş hücrelerinin yüzeyleri düz bir şekilde değil de pürüzlü olarak imal edilmektedir.

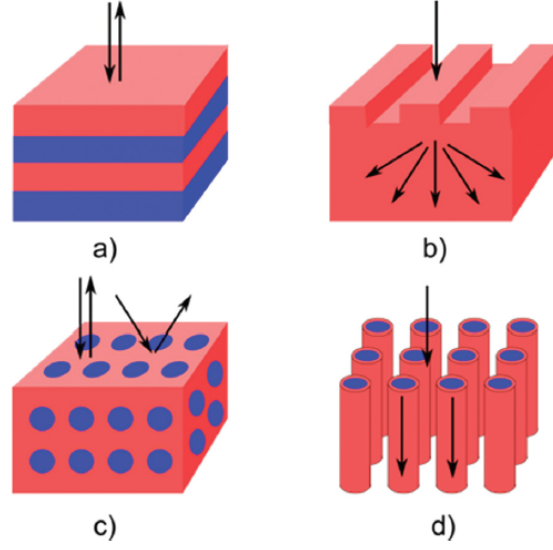
PV bir güneş hücresinin kalınlığını olabildiğince azaltmak birçok yönden önem arz etmektedir. Bunlardan biri Auger rekombinasyonunu [22] minimize edip açık devre voltajını maksimize etmektir [23]. Bununla birlikte eş zamanlı olarak kısa devre akımını da maksimize etmek için de bazı ışık tuzaklama yöntemleri geliştirmek gerekmektedir. Işık tuzaklama için genelde iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan biri yüzeyi rasgele (Lambertian) pürüzleştirmedir. Bu sayede gelen ışığın çok az bir kısmı yansıma açısının kaçış konisinde kalmaktadır. Geri kalan ışık tam yansıma olayı nedeniyle ışığın tuzaklanması adına çok etkili olmaktadır. Diğer yöntem ise belirli geometrik şekiller kullanılarak gelen ışığın tuzaklanması şeklinde özetlenebilir. Daha çok kare tabanlı piramit şekillerin kullanıldığı bu yöntemde ışığın nereye gideceği kontrol edilmekte ve ışığın kat edeceği maksimum mesafe ayarlanabilmektedir [24]. Lambertian pürüzleştirmeye [25] ait şematik gösterim Şekil 1.7’de yer almaktadır. Şekil 1.7’de görüleceği üzere (a)’daki gösterimde hem malzemenin üst kısmı hem de alt yüzeyi pürüzlü hale getirilerek ışığın tuzaklanması sağlanırken, (b)’de yer alan şekilde ise malzemenin sadece üst yüzeyi pürüzlü hale getirilmiştir. Aynı gösterimde yer alan (c)’deki şekilde ise malzemenin sadece alt yüzeyi pürüzlü hale getirilmiş ve alt yüzeye ulaşan ışık birden fazla geri yansımaya uğratılarak malzemenin içerisinde daha fazla vakit geçirmesi sağlanmıştır. Uygulama alanına göre bu üç durumdan bir tercih edilebilmektedir.



Şekil 1.7: Üç tane muhtemel Lambertian (rasgele) pürüzlendirmeye ait şematik gösterim. (a) Güneş hücresinin yüzeyinde ve arkasında yapılan pürüzlülük, (b) Sadece güneş hücresinin ön yüzünde yapılan pürüzleştirme, (c) Sadece güneş hücresinin arka yüzünde yapılan pürüzleştirme [25].

Işık tuzaklama için farklı yapılar kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bir ters çevrilmiş piramitlerin kullanılması ile ışık tuzaklamanın yapılmasıdır [26]. İkili piramit olarak adlandırılan bu yapı değişken sırayla ortaya konan benzer ebatlardaki iki ters piramitten oluşturulmuştur [26]. Neredeyse tamamen malzemeden geçen ışığın ilk altı geçişi için tamamen ışığı tuzaklayan bu yapıların, özellikle dar bant uygulamalarında standart ters piramit dokusundan daha iyi optik performans sağladığı ifade edilmektedir [26].

Bu tip klasik yöntemlerin yanı sıra son zamanlarda nanofotonik yapıların kullanılmasıyla değişik ışık tuzaklama yapıları da tasarlanmıştır [27]. Güneş hücresinin verimini arttırmak için bir, iki ve üç boyutlu periyodik dielektrik yapılar veya ızgaralar birçok yönden önemli bir potansiyele sahiptirler. Bir boyutlu dielektrik ızgaralar ya da Bragg ızgaraları güneş hücresi yapısında geri yansıtıcı olarak kullanılabilir ve ışığın yol aldığı mesafeyi ikiye katlayabilmektedir. Ayrıca tek periyotlu dielektrik yapılar da güneş hücresinin yüzeyinde büyütülerek gelen ışığın tuzaklanmasında kullanılabilir. Üç boyutlu periyodik yapılar ise tandem güneş hücrelerinde ışık tuzaklama amaçlı kullanılmaktadır. Bir diğer metot ise güneş hücresinin kendisinin üç boyutlu periyodik bir yapı halinde tasarlanmasıyla gelen ışığın tuzaklanmasıdır [27]. Bu durumların anlatıldığı çalışmaya [27] ait görsel Şekil 1.8'de yer almaktadır.



Şekil 1.8: (a) Geri yansıtıcı olarak kullanılan Bragg ızgaraları, (b) ARC katmanı ya da ışık tuzaklama amaçlı kullanılabilen iki boyutlu kırınım ızgaraları, (c) Tandem güneş hücrelerinde ışık tuzaklama amaçlı kullanılan üç boyutlu periyodik yapılar, (d) Tek yönlü yansıtıcı ya da ışık tuzaklama amaçlı tasarlanmış olan üç boyutlu güneş hücresi tasarımı [27].

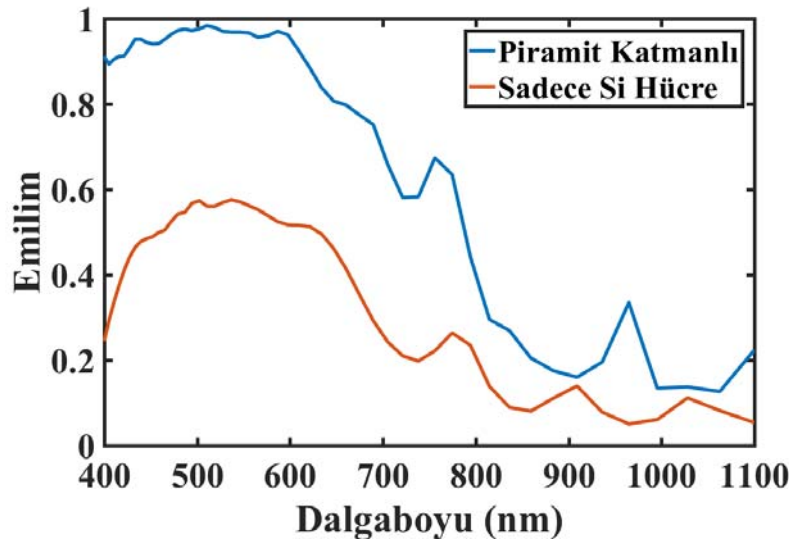
Nano-fotonik ince film güneş hücrelerinde emilimini artırmak için ışık tuzaklama yapılması esastır. Verimli tasarımlar geliştirmek için, önce optik ve elektriksel kayıpların etkileri de dahil olmak üzere güçlü ya da zayıf emilime sahip malzemelerde, emilim artışı sağlamak adına ışık tuzaklama potansiyelinin anlaşılması önemlidir. Periyodik fotonik yapılar kendi başlarına önemlidir ve aynı zamanda nanofotonik ışık tuzaklamada yer alan fiziksel mekanizmalar hakkında fikir edinmek için en iyi geliştirilen başlangıç noktasını sağlar.

Şekil 1.9’da Lumerical FDTD kullanılarak oluşturduğumuz kare tabanlı piramitlerden oluşan bir katman ile kaplanmış olan Si güneş hücresine ait görsel yer almaktadır. Şekil 1.9’da yer alan 3 μm kalınlığa sahip Si güneş hücresi kare tabanlı piramit şeklindeki titanyum dioksit (TiO_2) malzemesiyle kaplanmıştır. Piramit gelen ışığı ilk yansımadan sonra tekrardan malzeme içerisine yönlendirerek gelen güneş ışığının tuzaklanmasını sağlamaktadır.



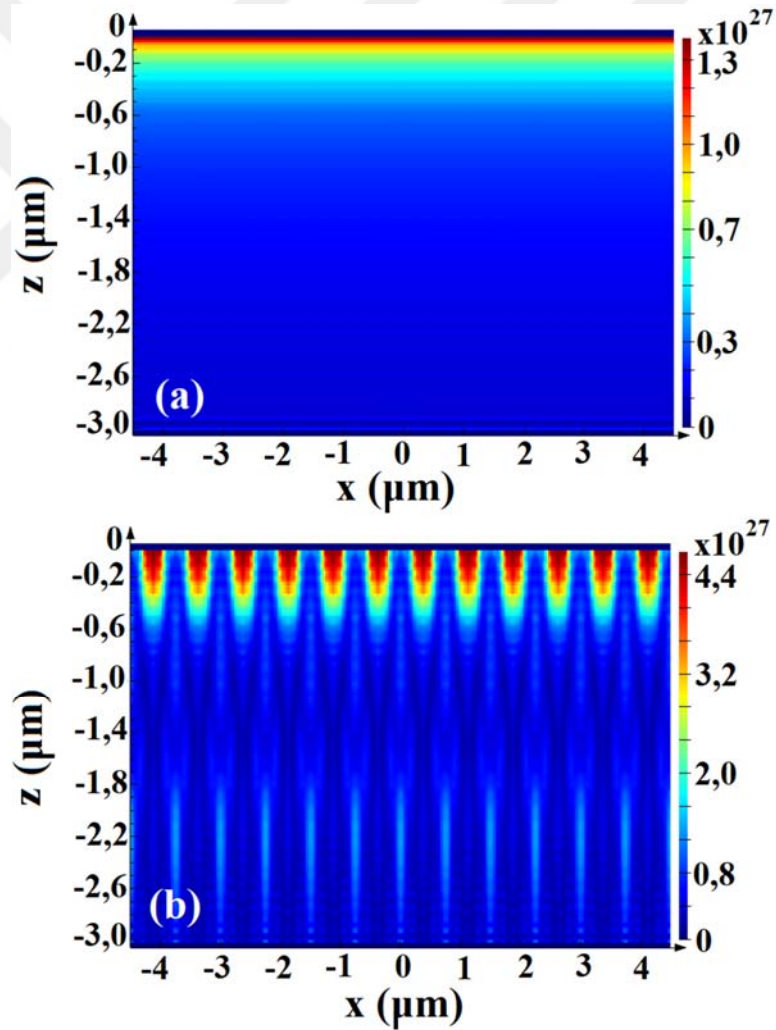
Şekil 1.9: Işık tuzaklama amaçlı kare tabanlı piramitlerden oluşan TiO₂ katman ile kaplanmış Si güneş hücresi tasarımı. Altaş olarak SiO₂ kullanılmıştır.

Bu tasarımda altaş olarak ise Silika (SiO₂) kullanılmıştır. Kare tabanlı piramitlerin tabanındaki karenin bir kenarı 750 nm iken yükseklikleri 900 nm olarak ayarlanmıştır. Yapılan simülasyonda piramit kaplama varken ve yokken oluşan emilim ölçülerek yapının performansına bakılmış olup her iki durumda oluşan emilim sonuçları Şekil 1.10'da çizdirilmiştir.



Şekil 1.10: Si güneş hücresininin kare tabanlı piramit şeklindeki TiO₂ ile kaplanmasıyla elde edilen emilimlerin dalga boyuna göre dağılımları. Kırmızı çizgi sadece Si güneş hücresine ait emilim eğrisi iken mavi çizgi TiO₂ katmanın eklenmesiyle elde edilen emilim eğrisidir.

Şekil 1.10'a bakıldığında TiO₂ piramitlerin Si güneş hücresine eklenmesiyle emilim miktarında önemli bir artış gözlemlenmektedir. Maksimum emilim TiO₂ katman yokken %60 civarında iken TiO₂ katmanın tanımlanması sayesinde %98'lere yaklaşmaktadır. Ayrıca yüksek dalga boylarındaki emilim miktarları da artmaktadır. Buna ek olarak kısa devre akımı TiO₂ ızgara yokken 15 mA/cm² iken yapı tanımlandığında bu akım 32 mA/cm² seviyesine yükselmektedir. Emilim miktarı ve kısa devre akımı ölçümlerine ilaveten Si güneş hücresinde oluşan e-h çiftlerinin sayılarının dağılımlarına da bakılmış olup bu dağılım xz düzleminde çizdirilerek Şekil 1.11'de verilmektedir.



Şekil 1.11: (a) Sadece Si güneş hücresine ait e-h çiftinin xz düzlemindeki dağılımları (b) Kare tabanlı piramitlerden oluşan TiO₂ katman varken elde edilen e-h çiftinin xz düzlemindeki dağılımları.

Şekil 1.11(a)'ya bakıldığında sadece Si güneş hücresine ait e-h çiftinin xz düzlemindeki dağılımları yer almaktadır. Bu durumda yüzeyden itibaren azalan bir şekilde oluşan e-h çiftleri sayısı yüzeyde $1,4 \times 10^{27}$ mertebelerinde iken yüzeyden aşağı doğru inildikçe 600 nm derinlikten sonra $0,4 \times 10^{27}$ sayılarına düşmektedir. Şekil 1.11(b)'de ise TiO₂ katman varken elde edilen e-h çiftinin sayısının xz düzlemindeki dağılımları gösterilmiştir. Bu katman sayesinde içeriye giren foton sayısı arttığından oluşan e-h çifti sayısı da artmıştır. Yüzeyden itibaren $4,5 \times 10^{27}$ mertebelerinden 600 nm derinliğe kadar yavaş bir azalma yaşanırken sonrasında $0,8 \times 10^{27}$ sayılarında e-h çifti oluşmuştur. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere gelen ışığın kare tabanlı TiO₂ piramitleri tarafından tuzaklanması sonucu içeriye giren foton sayısı artmış olup buna paralel olarak kısa devre akımı, emilim ve e-h çifti sayısında da büyük oranda artış yaşanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında ise Si güneş hücresinin verimliliğindeki artışı sağlamak için sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanan ve analiz edilen kırınım ızgaraları kullanılarak özgün bir tasarım yapılmıştır. Yapılan çalışmada geleneksel bir nano-ızgara yapıyı modifiye ederek güneş hücresinin ışığa duyarlı katmanında daha verimli emilim için ek odaklanma özelliğine sahip bir ARC tasarımı önerilmektedir.

2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ HÜCRELERİ

2.1 Giriş

Güneş, yaydığı yaklaşık $3,9 \times 10^{26}$ W güç ile dünyadaki tüm enerji ihtiyacını (2017 yılı için 13.730 MTEP) karşılayacak düzeyde, temiz ve tükenmez bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Her saniyede güneş çok büyük miktarda enerjiyi güneş sistemine yaymaktadır. Dünyaya bu enerjinin çok az bir miktarı ulaşmaktadır. Atmosferin dış yüzeyindeki her metrekareye ortalama 1367 W'lık güç düşmektedir [28]. Atmosfer gelen bu ışımının genellikle X ışınlarından ve ultraviyole ışıklardan oluşan bir kısmını emerken bir kısmını ise yansıtmaktadır. Güneş ışığından dünyanın yüzeyine ulaşan bir dakikalık enerji miktarı dünya genelinde bir yılda kullanılan enerjiden daha fazladır. Bu derece büyük ve yenilenebilir enerji kaynağının değerlendirilmesi adına son zamanlarda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Ülkeler fosil kaynakların çevreye verdiği zararlardan kaçınmak için yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmıştır. Bu sayede güneş enerjisinden ısı ve elektrik üretimi ile ilgili birçok araştırma yapılmakta ve kullanım yıllar geçtikçe artmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi için birden fazla metot olmasına rağmen genel olarak eğilim güneşten gelen ışığın doğrudan elektrığe çevrildiği fotovoltaik sistemlere yoğunlaşmıştır.

Fotovoltaik olay temel olarak bir güneş hücresinin güneşten gelen fotonları doğrudan elektrığe çevirmesi olarak açıklanabilmektedir [28]. 1839 yılında ilk defa Fransız bilim adamı Edmond Becquerel [29] tarafından ortaya konan fotovoltaik olay, iletken bir sıvıdaki elektrotun ışık yayması ile keşfedilmiş ve bu yüzyılın kalan yıllarında büyük bir merak uyandırmıştır. Nitekim 1877 yılında W. G. Adams ve R.E. Day tarafından katılaştırılmış selenyumda fotovoltaik etki gözlemlenmiştir [30]. Bu gelişmeyi 1883 yılından C. Fritts tarafından geliştirilen ve %1'in altın bir verimliliğe sahip ince bir altın tabakası üzerinde yer alan selenyum güneş hücresi takip etmiştir [31]. Bu gelişmelerin akabinde ise W. Hallwachs bakır ve bakır oksit kullanarak yarıiletken eklemlenmiş bir güneş hücresi tasarlamıştır. 1904 yılında A. Einstein tarafından kuantum

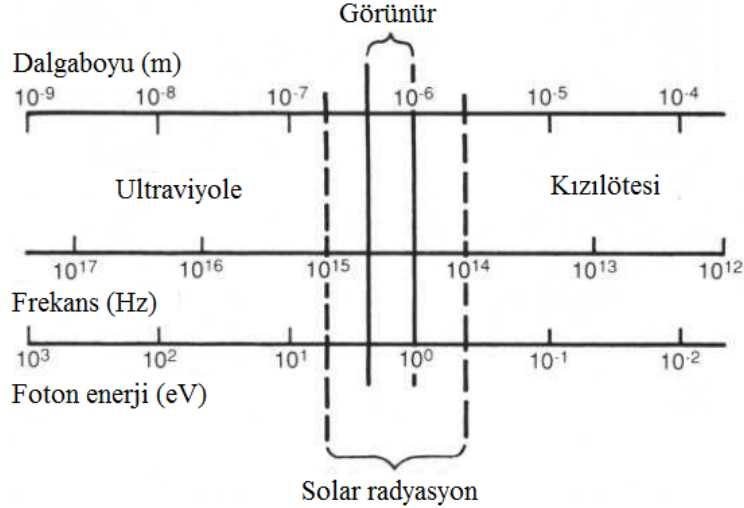
açısından ele alınan fotoelektrik olay makalesi [32] ile bu etki daha iyi anlaşılmaya başlanmıştır. 1954 yılında Bell laboratuvarları tarafından üretilen ilk Si p-n eklemli güneş hücresi [33] ile başlayan güneşten elektrik üretimi günümüze kadar ulaşarak büyük gelişmelere ve yapılan birçok çalışmaya konu olmuştur.

2.2 Solar Spektrum

Güneş ışığı belli bir enerji aralığına sahip fotonlardan oluşur. Bu fotonlar solar spektrumdaki farklı dalga boylarına karşılık gelen farklı miktarlarda enerji taşımaktadırlar. Bir fotonun taşıdığı enerji aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır [28].

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda (\mu\text{m})} \quad (2.1)$$

Bu denklemde E fotonun taşıdığı enerjiyi ifade etmekte olup birimi eV'tur. 1 eV'luk enerji, bir elektronun vakumda 1 V'luk bir potansiyelden geçtiğinde kazandığı enerjiye karşılık gelmektedir. Öte yandan h Planck sabiti, ν fotonun frekansı, c ışık hızı ve λ ise fotonun dalga boyudur. Güneş enerjisinden gelen radyasyonun sahip olduğu dalga boyu, frekans ve enerji aralığı Şekil 2.1'de gösterilmektedir.

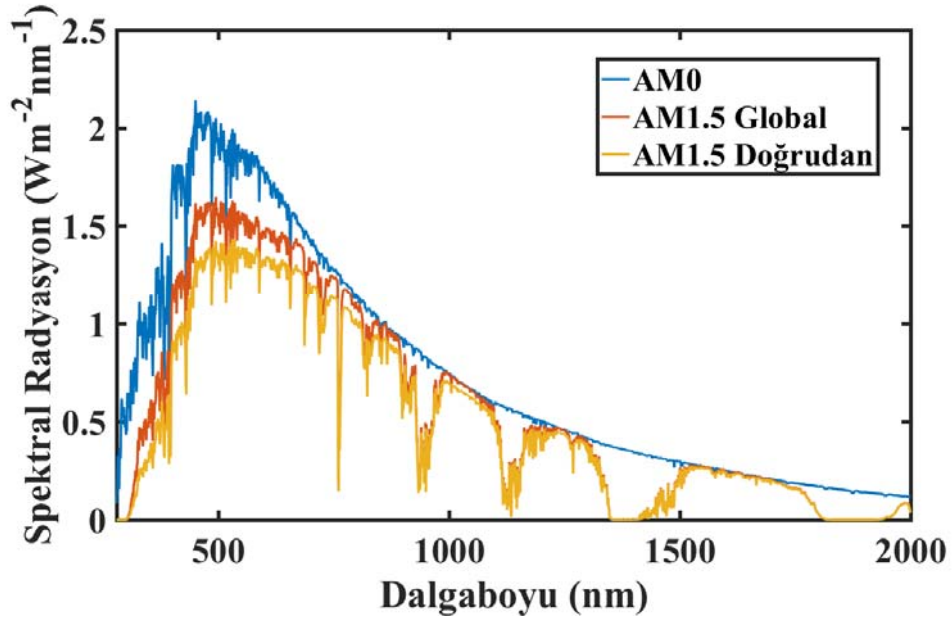


Şekil 2.1: Güneş enerjisinde gelen radyasyonun dağılımı. Gelen ışımının büyük bir kısmı görünür bölgede yer almaktadır. Her dalga boyu bir frekans ve bir enerji değerine karşılık gelmektedir.

Şekil 2.1'den de görüleceği üzere Güneşten gelen ışıma 2×10^{-7} ile 4×10^{-6} m aralığındaki dalga boyuna sahip fotonlardan oluşmakta olup büyük bir kısmı görünür bölgeye karşılık gelmektedir [28]. Dalga boyu kısaldıkça frekans ve enerji artmaktadır. Hava Kütlesi ise, normalize edilmiş atmosferden geçen ışığın, mümkün olan en kısa yol uzunluğuna (yani güneş doğrudan tepedeyken) giden yol uzunluğudur. Hava Kütlesi, ışığın atmosferden geçerken hava ve toz tarafından emilmesi sonucu gücündeki azalmayı ölçmektedir ve aşağıdaki formüldeki gibi tanımlanmaktadır [34].

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.2)$$

Burada θ açısı düşey eksenle yapılan açıdır. Güneş tam tepedeyken hava kütlesi $AM0$ olarak ifade edilmektedir. Hava kütlesi standart olarak $AM1.5G$ olarak kabul edilmekte ve güneş panellerinin testinde kullanılmaktadır. Buradaki G sembolü global radyasyonu temsil etmektedir. Global radyasyon güneşten gelen doğrudan ve dağınık ışımının toplamı olarak tanımlanabilir. Güneş spektrumunun güneş radyasyonuna ve dalga boyuna göre grafiği Şekil 2.2'deki gibidir [35-38].



Şekil 2.2: Güneş spektrumunun radyasyona göre grafiği (AM1.5G, AM1.5D ve AM0)
Şekil 1.2'ye bakıldığında güneş tam tepedeyken elde edilen güç en yüksek iken AM1.5G ve AM1.5D için azalma meydana gelmektedir. AM0 için ortalama güç 1366

W/m² iken AM1.5G için 1000 W/m² ve AM1.5D için ise 900 W/m² olmaktadır. AM1.5G fotovoltaik güneş panelleri testinde kullanılırken AM1.5D yoğunlaştırılmış güneş enerjisi uygulamalarının testinde kullanılmaktadır [35-38].

2.3 Yarıiletkenler ve pn Eklemler

Güneşten gelen ışığın elektriğe çevrilmesi için yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Günümüzde güneş hücresi yapmak için genellikle yaygın olarak Silikon malzemesi kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemeler belli oranlarda katkılanarak güneş hücreleri oluşturulur. Basitçe yarıiletkenler, iletim bandı ve valans bandı arasında belli bir enerji boşluğu bulunduran ve güneşten gelen fotonların valans bandındaki elektronların enerji seviyesini yükselterek iletim bandına taşınması yoluyla iletme geçen malzemelerdir. Termal denge anında elektronların iletim bandındaki konsantrasyonu aşağıdaki formüldeki gibidir [39].

$$n_0 = N_C \exp \left[\frac{-(E_C - E_F)}{kT} \right] \quad (2.3)$$

Burada N_C iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu olarak tanımlanmakta olup aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [39].

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.4)$$

Bu denklemdeki m_n^* ifadesi elektronların etkin kütlesi olarak tanımlanmaktadır. Eğer $m_n^* = m_0$ yani elektronların etkin kütlesi elektronların kütlesine eşit olduğu varsayılırsa, 300 K sıcaklıkta $N_C = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmakta olup bu değer birçok yarıiletken malzeme için aynı mertebelindedir. Deliklerin valans bandında termal dengedeki konsantrasyonu ise elektronlarınkine benzer bir şekilde aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [39].

$$p_0 = N_V \exp \left[\frac{-(E_F - E_V)}{kT} \right] \quad (2.5)$$

Burada bulunan N_V ise aşağıdaki formüldeki gibi ifade edilmekte olup birçok yarıiletken malzeme için 300 K sıcaklıkta 10^{19} cm^{-3} mertebelerindedir [39].

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.6)$$

Bu denklemdeki m_p^* ifadesi ise deliklerin etkin kütlesi olarak tanımlanmaktadır.

Özgün bir yarı iletken için iletim bandında yer alan elektronların yoğunluğu valans bandındaki deliklerin yoğunluğuna eşittir. Elektronların özgün yoğunluğu n_i ve deliklerin özgün yoğunluğu ise p_i olarak ifade edildiğinde [39];

$$n_0 = n_i = N_C \exp \left[\frac{-(E_C - E_{Fi})}{kT} \right] \quad (2.7)$$

$$p_0 = p_i = n_i = N_V \exp \left[\frac{-(E_{Fi} - E_V)}{kT} \right] \quad (2.8)$$

olarak tanımlanabilmektedir. Burada E_{Fi} ifadesi özgün Fermi enerjisidir. Eğer 1.7 ve 1.8 denklemleri birbirleriyle çarpıldığında;

$$n_i^2 = N_C N_V \exp \left[\frac{-(E_C - E_V)}{kT} \right] = N_C N_V \exp \left[\frac{-E_g}{kT} \right] \quad (2.9)$$

olarak hesaplanır ki bu da bir yarı iletken için n_i değerinin bir sabit olduğu ve Fermi enerjisinden bağımsız olduğunu göstermektedir. Bazı yarıiletken malzemeler için 300 K sıcaklıkta elektronların özgün yoğunluk değerleri Çizelge 1.1'de yer almaktadır [39].

Çizelge 2.1: Si, GaAs ve Ge malzemelerine ait 300 K sıcaklık için genel olarak kabul edilen n_i değerleri

Malzeme Adı	n_i (cm ⁻³)
Silikon	1.5x10 ¹⁰
Galyum Arsenik	1.8x10 ⁶
Germanyum	2.4x10 ¹³

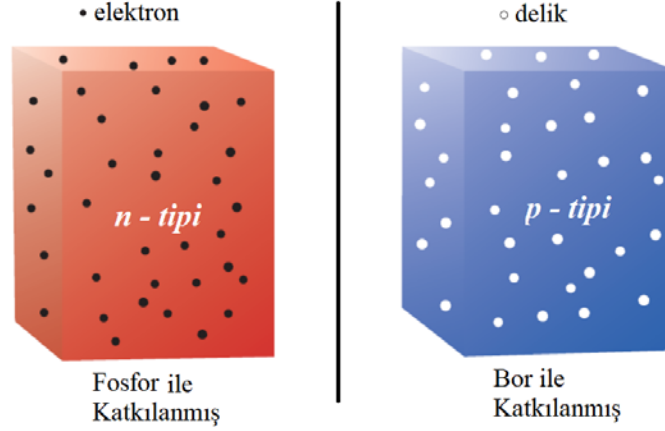
Yarıiletken aygıtlar p-tipi ve n-tipi yarıiletken bölgeler arasında eklem bulundurmaktadırlar. Yarı iletken aygıtın karakteristiği ve çalışması, bu pn eklemlerine yakından bağlıdır. Ayrıca, pn eklem analizi, diğer yarı iletken cihazların tartışılmasında kullanılan bazı temel terminoloji ve kavramları oluşturmakta olup bu temel analiz teknikleri diğer cihazlara da uygulanmaktadır. Bu nedenle, pn

bağlantısının fiziğini anlamak, yarı iletken cihazların çalışmasını anlamak adına önemli bir adımdır.

Yarıiletken teknolojisinde en çok kullanılan malzeme Silikon'dur. Tek bir silikon atomu, on dört pozitif yüklü proton ve on dört elektriksel olarak nötr olan nötrondan oluşan bir çekirdeği çevreleyen negatif yüklü on dört elektrondan oluşur. Eşit sayıda pozitif ve negatif yük bulunduğundan, silikon atomunun net elektrik yükü yoktur. On dört elektrondan sadece dört dış elektron kimyasal bağ için kullanılabilir. Kalan on elektron çekirdeğe sıkıca bağlanır ve diğer atomlara bağ oluşturmaz. Bir silikon kristalinde, her bir silikon atomu diğer dört silikon atomuna bağlanır. Her bir bağ, bağda yer alan silikon atomlarının her birinden bir elektron olmak üzere iki elektrondan oluşur. Elektronların atomlar tarafından eşit olarak paylaşıldığı bu tip bağa kovalent bağ denir [39].

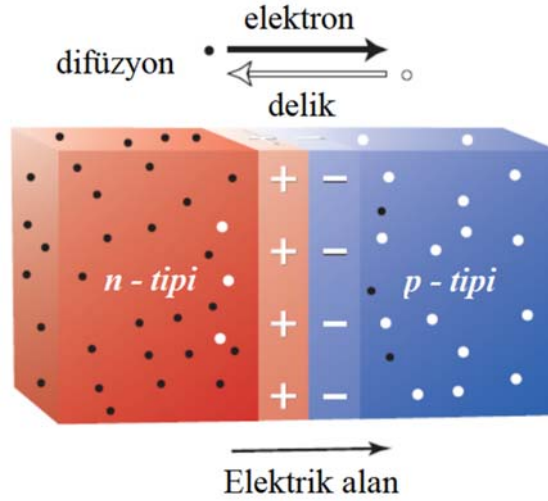
Katkılama olarak adlandırılan yöntemle, farklı bir malzemenin atomları kristalin elektriksel özelliklerini değiştirmek için saf silikona katkılanır. Mesela, Fosfor atomu, kristal içindeki bazı silikon atomlarının yerini almasıyla fosfor atomuna dopant atomu denir. Katkı olarak kullanılan fosfor atomlarının her biri, bir silikon atomunun komşularıyla yaptığı gibi dört kovalent bağ oluşturur. Kovalent bağda kullanılmayan Fosfor içeren bağ elektronlarının beşincisi sadece fosfor atomuna zayıf bir şekilde bağlanmıştır. Bu bağ o kadar zayıftır ki normal sıcaklıklarda kristal içindeki termal enerji fosfor atomundan elektronu serbest bırakmak için yeterlidir. Bu sayede, ortaya çıkan bağlanmamış elektron kristalin etrafında dolaşmakta serbesttir. dopant atomlarından elde edilen bağlanmamış elektronların her birinin negatif bir elektrik yüküne sahip olması nedeniyle bu tip bir katkılama yapılan malzemeye n-tipi yarıiletken malzeme adı verilir [39].

Benzer şekilde Bor atomları ile katkılanan Silikon malzemesinde yer alan bağlarda bu sefer Bor atomlarından dolayı boşluklar oluşmaktadır. Çünkü Bor atomunun en dışında bağ yapmak için üç elektron bulunmaktadır. Bu nedenle Bor ile katkılanan Silikon pozitif olarak yükleneceğinden bu tür malzemelere p-tipi yarıiletken malzeme denilmektedir [39]. Bu durumlar Şekil 2.3'te görsel olarak şematize edilmiştir.



Şekil 2.3: Ayrı ayrı Bor ve Fosfor ile katkılanmış Silikon malzemesi

Şekil 2.3'te görüleceği üzere n-tipi ve p-tipi malzemeler birbirinden ayrı olarak bakıldığında n-tipi malzemede negatif yükler yani elektronlar çoğunlukta iken, p-tipi malzemede ise pozitif yükler yani delikler çoğunlukta bulunmaktadır. Bu iki tip malzeme Şekil 2.4'teki gibi birleştirildiğinde n-tipi malzemede yer alan elektron p-tipi malzemeye, p-tipi malzemede yer alan delikler ise n-tipi malzemeye difüzyon marifetiyle geçmeye başlarlar.



Şekil 2.4: p-tipi ve n-tipi malzemelerin birleştirilmesiyle oluşan pn eklemide difüzyon sonucu elektrik alan oluşumu

Bir süre sonra bu geçiş dengeye ulaştığında Şekil 2.4'te de gösterilen birleşme yerinde bir elektrik alan oluşmaktadır. Bu sayede pn eklem oluşturulmuş olur. Bu elektrik alanın yönü, n-tipi malzemedeki pozitif yüklü iyonlardan p-tipi malzemedeki negatif

yüklü iyonlara doğrudur. Serbest elektronlar ve delikler, bu yerleşik elektrik alandan etkilenmesi sonucu; elektronlar pozitif fosfor iyonlarına doğru delikler ise negatif bor iyonlarına doğru çekilir. Bu nedenle, yerleşik elektrik alan, bazı elektronların ve deliklerin difüzyonun neden olduğu akışın ters yönünde akmasına neden olur [39].

Güneş hücreleri de temelde p-n eklemlerden oluşan aygıtlardır. Işık üzerlerine geldiğinde akım ve gerilim üretmektedirler. Bunun olmasının nedeni, p-tipi ve n-tipi malzemenin birleşme yerindeki yerleşik elektrik alanıdır. Eğer bu yerleşik elektrik alan olmazsa güneş hücresinde serbest kalan elektronlar hareket edemez ve akım oluşmazdı. Bu nedenle, güneş hücresi üzerinde ışık düştüğünde, akım oluşur ve p-tipi taraftan n-tipi tarafa akar.

Bununla birlikte, yerleşik elektrik alan sayesinde yerleşik bir voltaj oluşmaktadır. Bu voltaj aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [39].

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (2.10)$$

Burada V_{bi} yerleşik voltajı ifade etmekte iken, N_a ve N_d sırasıyla alıcı ve donör atomların katkılama miktarlarını göstermektedir. V_t ise termal voltaj olup 26 mV değerindedir. Bu yerleşik voltaj ve katkılama miktarları ile pn eklemnin geçiş bölgesinin genişliği hesaplanmaktadır. Bu parametrelerin kullanılıp genişliğin hesaplandığı denklem aşağıda verilmektedir [39].

$$w = \left[\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

Geçiş bölgesi genişliği yukarıdaki denklemden de görüleceği üzere katkılama miktarlarına büyük oranda bağlıdır. Güneş hücresi tasarımı yaparken katkılama miktarları bu genişlik düşünülerek ayarlanmalı aşırı ya da düşük dozlu katkılama yapmaktan kaçınılmalıdır.

2.4 Güneş Hücreleri

Güneşten gelen ışık, silikon kristalinin bazı kimyasal bağlarını koparacak kadar enerjiye sahiptir. Bunun anlamı normalde bir silikon bağında yer alan elektronların

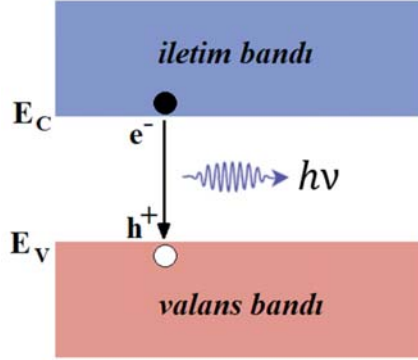
güneş ışığı tarafından daha yüksek bir enerji durumuna yükseltilmesi ve bağ kopmasıdır. Güneşin dünyadaki ışık yoğunluğu, güneş hücresindeki her 100 milyon silikon atomu için ancak bir bağ koparacak kadar güçlüdür. Tüm bağların kopması halinde silikon malzemesi eriyecek ve kullanılamaz hale gelecektir [28].

Güneşten gelen fotonlar tarafından uyarılmış elektronlar fosforlu dopant atomlarından gelen elektronlar benzer bir şekilde malzemede dolaşmakta serbesttirler. Benzer şekilde, gelen fotonların oluşturduğu kırık bağlar, silikon ve bor atomları arasındaki bağlardaki eksik elektronlar yani delikler gibi davranır ve bu delikler de malzeme boyunca hareket etmekte serbesttir. Bu şekilde oluşan elektron ve delik çiftleri fiziksel olarak birbirine yakındır. Güneşten gelen fotonlar tarafından uyarılmış her elektron için, karşılık gelen bir delik vardır. Bu elektronlar ve delikler sadece kısa bir süre için uyarılmış halde kalabilir [28].

Rekombinasyon adı verilen olay sonucu, uyarılmış elektronlar deliklere çok yaklaşır ve ikisi tekrar bağlanmış pozisyonlara döner. Bu olay sonucu e-h çiftinin sahip olduğu elektrik enerjisi ısı veya ışık olarak kaybolur. Rekombinasyonun çok fazla olması durumunda, güneş pili çok iyi çalışmaz ve bu durumu önlemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Üç çeşit rekombinasyon durumu bulunmaktadır. Bunlar; radyasyon [28], Shockley-Read-Hall (SRH) [40, 41], ve Auger [22] rekombinasyonu olarak sıralanabilir. Silikon tabanlı güneş hücrelerinde Auger ve Shockley-Read-Hall rekombinasyon daha baskın bir şekilde görülmektedir. Diğer faktörler arasında rekombinasyon, malzemenin ve dolayısıyla güneş pilinin kullanım ömrü ile ilişkilidir.

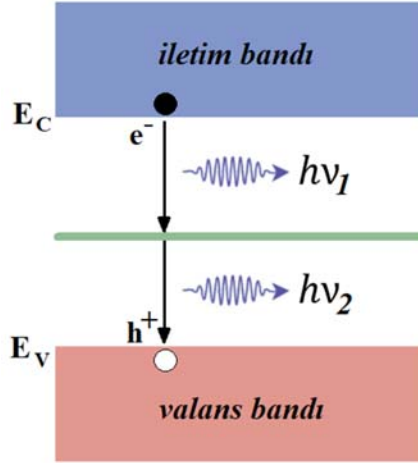
Şekil 2.5'te şematize edilen radyasyon rekombinasyonunda, iletim bandından bir elektron, valans bandındaki bir delik ile doğrudan birleşir ve sonuç olarak bir foton yayılır. Bu tip rekombinasyon, doğrudan bant boşluğu yarı iletkenlerinde baskın olan bir rekombinasyon mekanizmasıdır. Örnek olarak, bir LED tarafından üretilen ışık, yarı iletken bir aygıttaki en belirgin radyasyon rekombinasyonudur. Yoğunlaştırıcı ve uzayda kullanılan güneş hücreleri tipik olarak doğrudan bant boşluğu malzemelerinden (GaAs vb.) yapıldığı için radyasyon rekombinasyon bu tip güneş hücrelerinde daha baskındır. Bununla birlikte, yaygın olarak kullanılan güneş hücrelerinin çoğu, doğrudan olmayan bant boşluğu yarı iletken olan silikon

malzemesinden üretildiğinden ve radyasyon rekombinasyonu aşırı derecede düşüktür ve genellikle ihmal edilir [28].



Şekil 2.5: Radyasyon rekombinasyonunun şematize edilmesi. İletim bandında uyarılmış haldeki elektron valans bandına indirgenirken enerjisini foton olarak yaymaktadır.

Şekil 2.6'da gösterilen SRH rekombinasyonu bir malzemenin örneğin katkılanırken çeşitli kusurlara sahip olması sonucu, yasaklı bant aralığında ekstra bir enerji seviyesinin bulunmasından kaynaklanmaktadır. SRH rekombinasyonu ise iki aşamalı bir yapıya sahiptir.

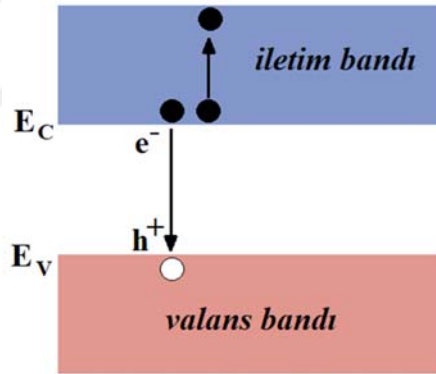


Şekil 2.6: SRH rekombinasyonunun şematize edilmesi. İletim bandında uyarılmış haldeki elektron valans bandına indirgenirken yasaklı bant aralığında oluşan bir enerji seviyesinde belli bir süre durduktan sonra valans bandına indirgenirken enerjisini foton veya ısı olarak yaymaktadır.

Bu aşamalardan ilki bir elektronun iletim bandından yasaklı bant aralığında oluşan yeni enerji seviyesine inmesi ve sahip olduğu enerjisini foton veya ısı olarak

yaymasıdır. İkincisi ise yasaklı bant aralığındaki enerji seviyesinde yer alan elektronun valans bandına inmesi sonucu valans bandındaki delikle birleşmesi ve sahip olduğu enerjiyi yine foton veya ısı olarak yaymasıdır [40, 41].

Auger rekombinasyonu ise üç taşıyıcının etkileşiminden kaynaklanmakta olup Şekil 2.7’de şematize edilmiştir. Bir elektron ve bir delik çifti yeniden birleşmekte olup bu sefer enerjiyi ısı ya da foton olarak yaymak yerine, enerji iletim bandında yer alan bir elektrona yani üçüncü bir taşıyıcıya verilir. Bu elektron daha sonra iletim bant kenarına doğru yükseltgenmiş olur. Bir süre sonra bu elektron enerjisini aşama aşama kaybederek eski konumuna indirgenir. Auger rekombinasyonu, yoğun katkılama veya konsantre güneş ışığı altında yüksek seviye enjeksiyonunun neden olduğu yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında daha baskındır. Silikon tabanlı güneş pillerinde, Auger rekombinasyonu kullanım ömrünü ve nihai verimliliği sınırlar. Malzeme ne kadar yoğun katkılanırsa, Auger rekombinasyon ömrü o kadar kısa olur [22].



Şekil 2.7: Auger rekombinasyonunun şematize edilmesi. İletim bandında uyarılmış haldeki elektron valans bandına indirgenirken enerjisini iletim bandındaki bir başka elektrona verir ve bu elektron iletim bandının yukarılarına yükseltgenir. Bir süre sonra bu enerjisi ısı olarak kaybederek eski konumuna döner.

Güneş hücreleri için bir diğer önemli parametre azınlık taşıyıcılarının ömrüdür ve τ_n ve τ_p ile sembolize edilmektedir. Bu süreler, azınlık taşıyıcıların konsantrasyonuna bağlı olan rekombinasyon hızına bağlıdır. Başka bir deyişle bir malzemenin azınlık taşıyıcı ömrü, bir taşıyıcının yeniden birleşmeden önce elektron-delik çifti oluşturulduktan sonra uyarılmış durumda geçirilen ortalama süredir. Genellikle sadece ömür olarak adlandırılır ve malzemenin kararlılığı ile ilgisi yoktur. Yapıya bağlı olarak, uzun azınlık taşıyıcı ömürleri olan malzemeden yapılan güneş hücreleri,

genellikle kısa azınlık taşıyıcı ömürleri olan malzemeden yapılan hücelere göre daha verimli olacaktır [28].

Rekombinasyon oranıyla ilgili ikinci parametre olan azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu ise, bir taşıyıcının yeniden oluşmasına kadar oluşum noktasından hareket edebileceği ortalama mesafeyi ifade etmektedir. Yani bir taşıyıcının üretim ve rekombinasyon arasında hareket ettiği ortalama uzunluk olarak tanımlanabilir. Yüksek oranlarda katılanmış yarı iletken malzemeler daha yüksek rekombinasyon oranlarına sahip olduklarından daha kısa difüzyon uzunluklarına sahiptir. Daha yüksek difüzyon uzunlukları ise, daha uzun ömürlü malzemelerin göstergesidir. Difüzyon uzunluğu, aşağıdaki formülde görüleceği üzere yayılma ve taşıyıcı ömrü ile ilgilidir [28].

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.12)$$

Burada, L difüzyon uzunluğunu, D yayılma ve τ ise taşıyıcı ömrünü ifade etmektedir.

Güneş hücresi üzerine gelen fotonlar tarafından uyarılan elektron-delik çiftleri, güneş hücresinin tümünde, yani p-tipi bölgede, n-tipi bölgede ve içinde yerleşik elektrik alanı barındıran eklem bölgesinde meydana gelir. Akım akışını anlamak için ilk önce eklem bölgesindeki fotonlar tarafından uyarılan elektron-delik çiftlerini dikkate almak gerekmektedir. Yerleşik elektrik alanı nedeniyle, elektronlar n-tipi malzeme tarafında pozitif yüke doğru çekilir. Benzer şekilde, delikler p-tipi malzeme tarafındaki negatif yüke çekilir. Yüklerin bu şekilde ayrılması bir akımın eklem noktasından akmasına neden olur. Konvansiyonel akımın yönü deliklerin hareket yönüyle aynı olduğundan akım, n-tipi taraftan p-tipi tarafa geçişte eklemden akmaktadır.

Benzer şekilde, eklem bölgesinden uzakta olan elektron-delik çiftleri, yeniden birleşmeden önce eklem bölgesine doğru bir yol bulabilirlerse yerleşik elektrik alan sayesinde ayrılabilirler. Bu durum e-h çiftlerinin malzeme boyunca rastgele yayılması nedeniyle gerçekleşmektedir. Rastgele bir şekilde yerleşik elektrik alan bölgesine girmeyi başarırlarsa, yeniden birleştirmeden önce, eklemden geçen akıma katkıda bulunmaktadır. Bu yükler, elektronların harici telden akışına da neden olmaktadır. Elektrik akımı, bir güneş hücresiyle seri halde bir akımölçer takılarak ölçülebilir. Kablo ve akımölçer üzerindeki direnç çok düşük olduğundan, güneş pili boyunca

esasen voltaj olmaz, ancak akım akabilir. Buna kısa devre akımı denir ve I_{SC} olarak sembolize edilir. I_{SC} birkaç faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bunlardan ilki güneş hücresinin alanıdır. Alan bağımlılığını elimine etmek için kısa devre akım yoğunluğu (mA/cm^2) kullanılmaktadır. Bir diğeri ise gelen fotonların sayısı yani gelen ışığın yoğunluğuna bağlı olarak kısa devre akımı değişmektedir. Gelen ışığın spektrumu da I_{SC} değerini etkileyen bir diğere değişken olup standart test koşullarında AM1.5 spektrumu kullanılmaktadır. Güneş hücresinin optik özellikler yani soğurma ve yansıtma özellikleri de I_{SC} değerini etkilemekte olan bir başka parametredir. Son olarak, temelde yüzey pasifleştirmeye ve azınlık taşıyıcısının ömrüne bağlı olan güneş hücresinin toplama olasılığı da yine I_{SC} değerini etkilemektedir. Yüzeyi mükemmel olarak pasifleştirilmiş ve homojen üretime sahip bir güneş hücresinde, kısa devre akımı için denklem aşağıdaki gibidir [28].

$$I_{SC} = qG(L_n + L_p) \quad (2.13)$$

Burada G üretim oranı, L_n ve L_p ise sırasıyla elektron ve delik difüzyon uzunluklarını ifade etmektedir.

Bir güneş hücresinden güç elde edebilmek için akımın yanında voltaja da ihtiyaç vardır. Güneş hücresinin herhangi bir kablo ile dışa bağlantısı olmadığı durumda yani açık devre olduğu zaman, gelen ışık tarafından üretilen herhangi bir akımın güneş hücresinin dışına akması için bir yol yoktur. Bununla birlikte, ışık geldiği sürece elektronların ve deliklerin ayrılması güneş hücresinin içinde olmaya devam etmektedir. İlk rekombinasyon olmadan eklem yanarda dolaşmayı başarırlarsa, elektronlar n-tipi tarafa doğru itilirken delikler p-tipi tarafa doğru itilir. Açık devre durumunda, bu yüklerin akması için harici bir devre yoktur. Bunun yerine, elektronların n-tipi tarafa akışı ve deliklerin p-tipi tarafa akışı, güneş hücresi boyunca bir voltaj oluşmasına neden olur. Güneş pili üzerindeki voltaj oluşmaya başlayınca, ileri besleme akımı gelen ışığın ürettiği akım ile tam olarak dengelediği bir noktaya ulaşır. Bu iki iç akım, güneş hücresinin içine akarak birbirini iptal eder. Böylelikle güneş hücresinden herhangi bir akım geçmezken bir voltaj oluşmuştur ve bu voltaj V_{OC} olarak sembolize edilen açık devre voltajıdır. Net akım sıfır olarak kabul edildiğinde V_{OC} aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanabilir [28].

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.14)$$

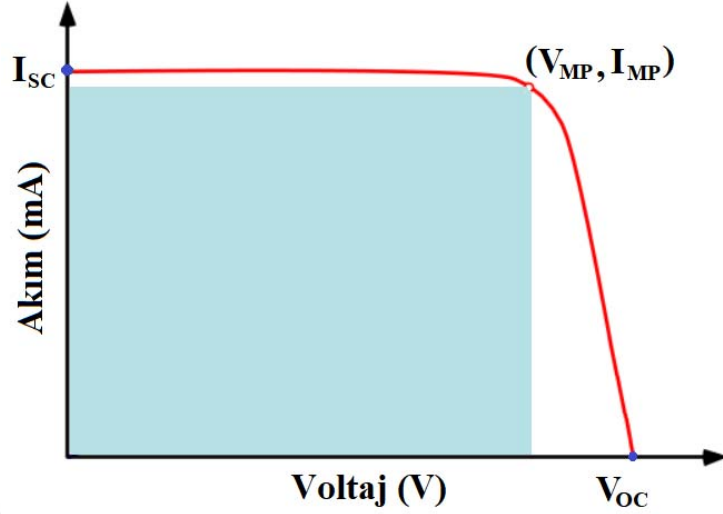
Yukarıdaki denklem incelendiğinde, V_{OC} 'nin sıcaklıkla doğrusal olarak arttığı görülmekte olup, esasen sıcaklığın elektronların özgün yoğunluğunu (n_i) da etkilemesinden dolayı I_0 değerinin de değiştiği göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca yine yukarıdaki denklem, V_{OC} 'nin güneş hücresinin doyum akımına (I_0) ve ışık tarafından üretilen akıma (I_L) bağlı olduğunu göstermektedir. I_L tipik olarak küçük bir değişkenliğe sahipken, ana etki I_0 akımından kaynaklanmaktadır. I_0 ise, güneş hücresindeki rekombinasyona bağlı olarak değiştiğinden V_{OC} , güneş hücresindeki rekombinasyon miktarının bir ölçüsüdür.

Güneş hücrelerinin elektriksel analizi yapılırken akım-voltaj ($I-V$) eğrilerine bakılarak önemli parametreler elde edilebilmektedir. Bu eğriye bakılarak bir güneş hücresine ait I_{SC} , V_{OC} , doluluk faktörü (FF) ve verimlilik (η) elde edilebilmektedir. $I-V$ eğrisinin hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılmaktadır [28].

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

Bu denklemde yer alan -1 terimi genellikle ihmal edilmektedir. Çünkü eksponansiyel terimi genellikle 1'den çok daha büyüktür. Ayrıca I_L akımı gelen ışığın oluşturduğu akımı ifade etmekte olup güneş ışığı altındaki bir güneş hücresinde I_L akımı I_0 akımından daha baskın hale gelmekte olduğundan yine (-1) terimine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Bu terimin ihmal edilmesiyle elde edilen $I-V$ eğrisi Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Şekil 2.8'de görüleceği üzere $I-V$ eğrisinin akım eksenini kestiği nokta I_{SC} değerine, voltaj eksenini kestiği nokta ise V_{OC} değerine karşılık gelmektedir. Bu eğriden maksimum güç elde edilmesi için $I \times V$ çarpımını maksimize eden akım ve voltaj değerini bulmak gerekmektedir. Şekil 2.8'de bu değerler V_{MP} ve I_{MP} olarak gösterilmektedir. Bir güneş hücresinden azami düzeyde bir güç elde etmek için, iki kontak arasında doğru değere sahip bir direnç olması gerekir. Direnç değeri çok düşükse, güneş pilinden gelen akım yüksek ve üretilen voltaj çok az olacaktır.

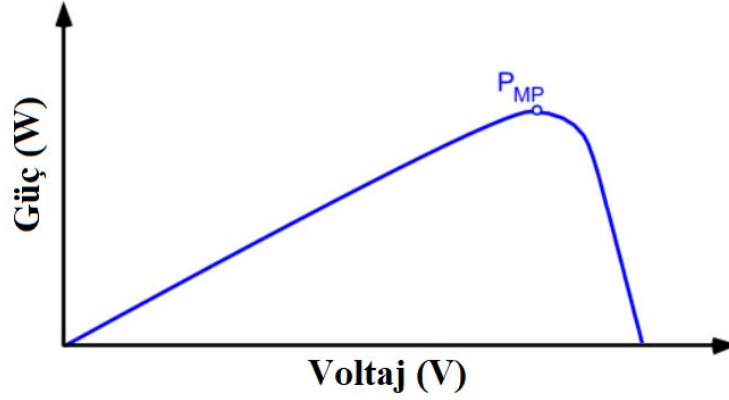


Şekil 2.8: Örnek bir akım-voltaj eğrisi. Kısa devre akımı ve açık devre voltajı eğrinin eksenleri kestiği noktalar olarak gösterilmiştir. Açık yeşil alan ise eğrinin doluluk oranını göstermektedir.

Kontaklar arasında çok yüksek bir direnç bağlanırsa, voltaj yüksek akım düşük olacaktır. Eğer güneş hücresine doğru direnç bağlanırsa, optimum akım akışı ile üretilen optimum voltaj olacaktır. Güneş hücresi üzerindeki bu seçim sayesinde güneş hücresi tarafından sağlanan maksimum enerji dirence iletilir. Bu şartlar altında, güneş pilinin maksimum güç noktasında çalışması sağlanmaktadır. Şekil 2.8’de yer alan açık yeşil bölge ise FF değerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Çünkü bu bölgenin alanının I_{sc} ve V_{oc} ’nin kenar uzunluklarına sahip olan dikdörtgenin alanına oranı FF değerine karşılık gelmektedir. Buna göre FF değeri için aşağıdaki formül kullanılmaktadır [28].

$$FF = \frac{P_{MP}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (2.16)$$

Burada P_{MP} değeri güneş hücresinin maksimum gücünü ifade etmektedir. $I-V$ eğrisinin hesaplanması sonrasında gücün voltaja ($P-V$) göre grafiğine bakılmalıdır. $P-V$ eğrisi şekil 2.9’da gösterildiği gibi olup bu eğriden maksimum verim değeri (η) hesaplanmaktadır. Şekil 2.9’da yer alan $P-V$ eğrisindeki maksimum güç yani PMP değerinin giriş gücüne bölünmesiyle η değeri hesaplanmaktadır. Yukarıda izah edildiği üzere $I-V$ eğrisinden bir güneş hücresine ait tüm önemli parametreler çıkarılabilmektedir.



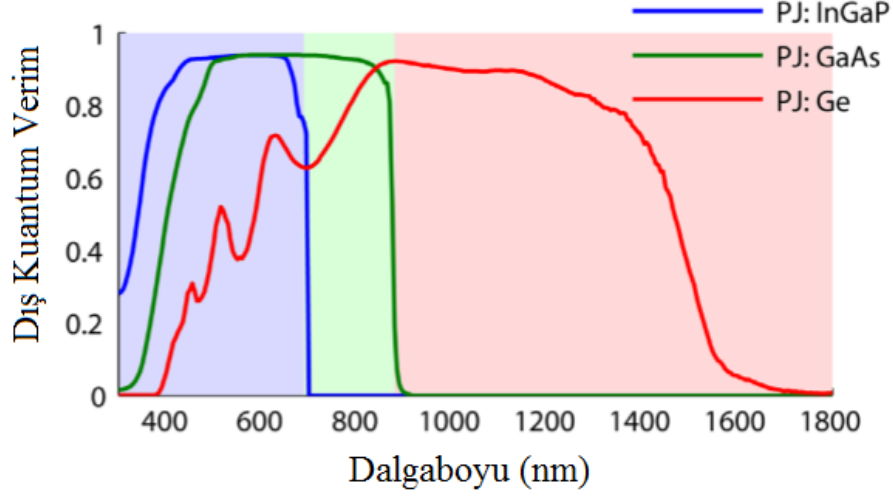
Şekil 2.9: Örnek bir güç-voltaj eğrisi. Maksimum güce karşılık gelen nokta P_{MP} olarak gösterilmektedir. Bu değer verimlilik hesabında kullanılmaktadır.

2.5 InGaP/GaAs Paralel Eklemlı Güneş Hücresi Tasarımı

Bu tez çalışması kapsamında gelen güneş ışığının ayrıştırılarak tasarlanacak olan paralel eklemlı güneş hücreğine yönlendirilmesi hedeflendiğinden optik tasarımın yanında paralel eklemlı güneş hücresi tasarımı da yapılmıştır. Yapılan tasarımda çok eklemlı güneş hücrelerinde yaygın bir şekilde kullanılan InGaP ve GaAs yarıiletken malzemeleri kullanılmıştır. Tasarımın basitleştirilmesi adına iki malzeme kullanılmış olup verimliliğın daha da artırılması adına üç malzeme de kullanılabilir. Optik analizler için Lumerical FDTD [42] kullanılırken elektriksel analizde ise Lumerical DEVICE [43] programı kullanılmıştır.

Bu tasarımda kullanılan InGaP malzemesi %49 oranında InP içerirken %51 oranında GaP içermektedir. Bu malzemelerin seçilmesinin nedeni gelen spektrumun 400-680 nm ve 680-900 nm olarak iki ayrı spektral bölgeye ayrıştırılacak olması ve bu bölgelere karşılık gelen en uygun malzemelerin bu yarıiletkenler olmasıdır. Paralel eklemlı güneş hücresi tasarımıyla tandem güneş hücresi tasarımı karşılaştıran bir çalışmada [44] yer alan Şekil 2.10'daki dış kuantum verim grafiğı bu malzemelerin seçilmesinin uygun olduğunu gösterir niteliktedir.

Şekil 2.10'daki grafikte yer alan bölgelerde emilim yapmak için seçilen InGaP ve GaAs malzemelerin sönümlenme katsayılarına bakılmıştır. Seçilen yarıiletkenlerin emiliminin artırılması için spektral ayrıştırma yapılacaktır. Bu nedenle malzemenin kompleks kırılma indisinde yer alan sönümlenme katsayısına bakılmıştır.



Şekil 2.10: InGaP/GaAs/Ge paralel eklemli güneş hücresinin dış kuantum verim grafiği [44]. InGaP 400-680 nm aralığında çalışırken GaAs 680-900 nm aralığında çalışmaktadır.

Bir malzemenin kompleks kırılma indisi aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir [39].

$$N = n + ik \quad (2.17)$$

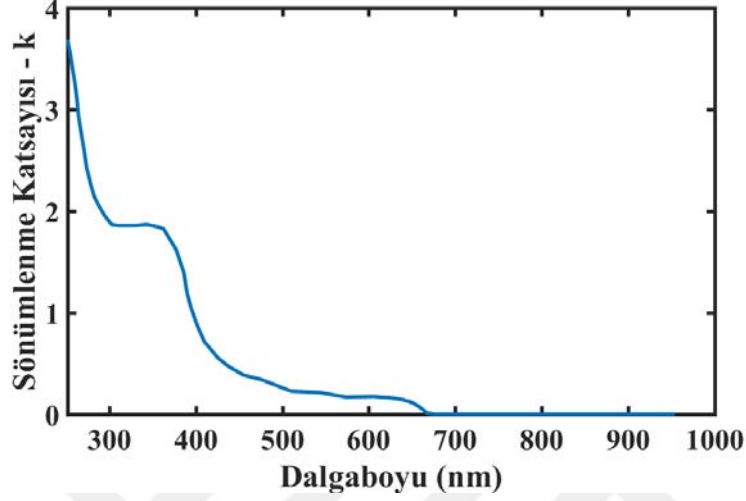
Burada N kompleks kırılma indisini ifade ederken n gerçek kırılma indisi, k ise sönümlenme katsayısını ifade etmektedir. n malzemedeki hıza etki ederken k ise malzemedeki sönümlenmeyi belirlemektedir. Bir elektrik alan katı bir malzemedden geçerken kompleks kırılma indisinin sanal kısmı olan k katsayısından dolayı sönümlenme yaşanır. k katsayısı ise emilim katsayısını etkilemektedir. Emilim katsayısı ise aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır [39].

$$\alpha = \frac{4\pi fk}{c} \quad (2.18)$$

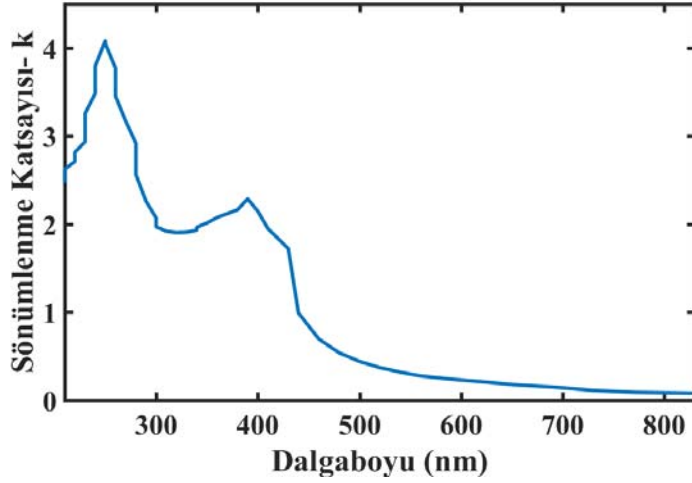
Burada α malzemenin emilim katsayısı iken f gelen ışığın frekansı ve c ise ışığın boşluktaki hızını ifade etmektedir. Yapılan simülasyonlarda kullanılan sönümlenme katsayılarının dalga boyuna göre grafikleri Şekil 2.11’de InGaP malzemesi için [45], Şekil 2.12’de ise GaAs malzemesi için [46] gösterilmektedir.

InGaP için Şekil 2.11’de yer alan sönümlenme katsayısının dağılımına bakıldığında 680 nm dalga boyu sonrasında sönümlenme katsayısı dolayısıyla emilimin neredeyse

sıfıra eşit olduğu görülmektedir. Şekil 2.12’de ise GaAs malzemesinin 680 nm’den sonrasında da emilim yapabildiği anlaşılmaktadır.



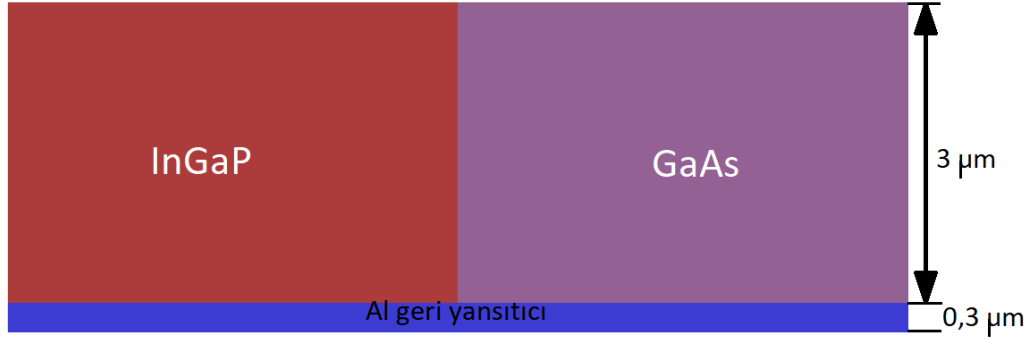
Şekil 2.11: InGaP malzemesine ait sönümlenme katsayısının dalga boyuna göre grafiği.



Şekil 2.12: GaAs malzemesine ait sönümlenme katsayısının dalga boyuna göre grafiği.

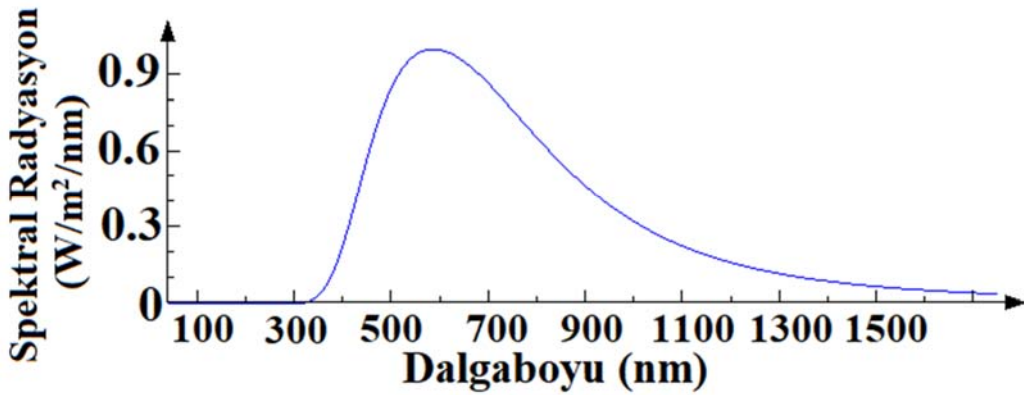
Bu malzemeler Lumerical FDTD programına tanıtarak emilim ve e-h çifti üretim miktarı hesabı için gerekli olan simülasyonlar yapılmıştır. Optik analizler için tasarlanan InGaP/GaAs güneş hücresi Şekil 2.13’te yer almaktadır. Bu tasarımda InGaP ile GaAs yarıiletken malzemeleri yan yana dizilerek spektral ayrıştırıcıdan gelecek olan güneş ışığını ayrı ayrı emmeleri hedeflenmekte olup malzeme kalınlıkları

3 μm olarak alınmıştır. Geri yansıtıcı levha olarak Al levha kullanılmış olup bu levhanın kalınlığı 300 nm olarak alınmıştır.



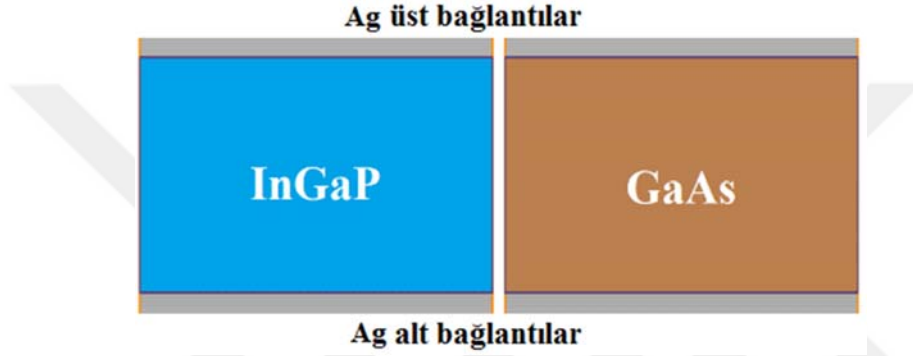
Şekil 2.13: Optik simülasyon için tasarlanan InGaP/GaAs paralel çift eklemli güneş hücresi. Hücre kalınlığı 3 μm iken geri yansıtıcı Al levha kalınlığı 300 nm olarak alınmıştır.

Güneş ışığı kaynağı olarak ise AM1.5G spektrum dağılımına sahip olan bir kaynak kullanılarak yapı birkaç mikrometre yukarıdan uyarılmıştır. Kullanılan güneş ışığı kaynağının spektrum dağılımı Şekil 2.14'te yer almaktadır. Yapılan simülasyonlarda gelen güneş ışığının polarizasyonsuz olması için hem enine elektrik (TE) hem de enine manyetik (TM) polarize ışık kullanılmıştır. Tüm simülasyonlar bu iki polarizasyonda yapılarak etkileri yarı yarıya paylaştırılmış ve sonuçlar buna göre elde edilmiştir. Bu sayede yapıya gelen AM1.5 spektrum dağılımına sahip ışık her iki polarizasyonun etkisini içererek sonuçların daha doğru bir şekilde elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 2.14: Optik simülasyonlarda güneş ışığı kaynağı olarak kullanılan AM1.5G spektral dağılımına sahip kaynağın dalgaboyuna göre dağılımı.

Tasarlanan bu güneş hücresi yapısının üzerine bir sonraki bölümde ayrıntılı bir şekilde nasıl tasarlandığı anlatılacak olan spektral ayrıştırıcı yerleştirilerek emilimindeki ve e-h çifti sayısındaki artışa bakılmıştır. Bu e-h çifti sayısı elektriksel simülasyona aktarılarak yapının J-V ve P-V eğrileri hesaplanmıştır. Bu eğrilerden ise yapının verimliliği hesaplanmış olup tasarlanan spektral ayrıştırıcının etkisi ortaya konulmuştur. Elektriksel simülasyon için ise Şekil 2.15'te yer alan güneş hücresi tasarlanmıştır.



Şekil 2.15: Elektriksel simülasyon için tasarlanmış olan InGaP/GaAs güneş hücresi yapısı. Elektriksel olarak birbirinden izole edilen iki malzeme için alt ve üst bağlantı noktası olarak Ag elektrot kullanılmıştır.

Elektriksel simülasyon için Lumerical DEVICE yazılımı kullanılmış olup yapı gerekli şekilde katılarak p ve n bölgeleri oluşturulmuştur. İki farklı malzemenin eşit geçiş bölgesi kalınlığına sahip olmaları için gerekli katkılar yapılmış olup N_a ve N_d değerleri Denklem 2.11 kullanılarak her iki malzeme için de sırasıyla 10^{17} ve 2×10^{17} olarak hesaplanmıştır. Detaylı analizlerin sonraki bölümlerde anlatılacağı bu güneş hücresi tasarımı ile optik simülasyondan gelecek olan e-h çifti sayısı bilgisinin birlikte kullanılması sayesinde verimlilik hesabı için gerekli olan J-V ve P-V eğrileri çizdirilmiş ve spektral ayrıştırıcının performansı ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3. KIRINIM IZGARALARI VE SPEKTRAL AYRIŞTIRICI TASARIMI

3.1 Giriş

Kırınım ızgarası, ışığı farklı yönlere giden birkaç ışına ayırıştıran ve kırınımına uğratan periyodik bir yapıya sahip optik bir bileşendir [47]. Başka bir deyişle kırınım ızgaraları, yansıtıcı ya da ileten özellikteki optik elemanların çalışılan ışığın sahip olduğu dalga boyu ile aynı mertebelerdeki belirli aralıklarla bir araya gelmesiyle oluşturulan optik aygıtlardır. Bu yapılar kalınlıkları periyodik olarak değişen ya da derecelendirilmiş kırılma indisi dağılımına sahip geçirgen plakalardan yapılmaktadır [47]. Birçok kullanım alanı olan bu optik elemanlar birçok bilim dalında deneysel uygulamalar için kullanılan çok önemli aygıtlardır [48-56]. Yansıtıcı ızgaralar yansıtıcı bir yüzey üzerine yerleştirilen ızgaralardan oluşturulurken iletim ızgaraları ise geçirgen yüzeylerin üzerine yerleştirilen ızgaralar olarak basitçe açıklanabilir. Kırınım ızgaraları gelen ışığı farklı dalga boylarına yüksek çözünürlükte ayırıştırabildiklerinden genelde spektroskopi alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [48, 49, 56]. Bunun yanı sıra lazerler, filtreler ve dalga boyu ayırıştıricılar gibi birçok optik bileşende yaygın olarak kullanılmaktadır [48, 49].

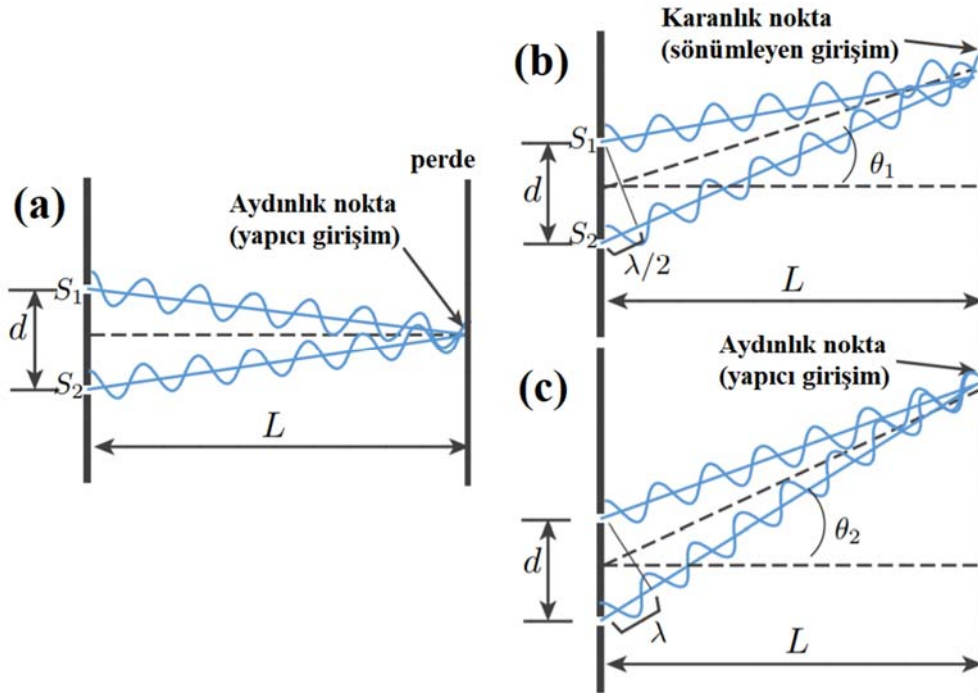
Bu ızgaraların uygulama alanlarından biri de gelen güneş ışığının farklı yönlerde ayırıştırılmasıyla farklı malzemelere iletilerek spektral ayırıştırma yapılmasıdır. Kırınım özellikli optik elemanlar olarak tanımlanan bu aygıtlar paralel eklemli güneş hücreleri için spektral ayırıştıricı olarak kullanılmaktadır [19, 57-59]. Yüksek karışıklı ızgaralar ise yine gelen ışığın ayırıştırılmasında kullanılan elemanlardan biridir. Birçok uygulama alanı olan bu yapılar [60-68], kırılma indisi kendisini çevreleyen malzemedenden daha yüksek olan nano yapıdaki malzemedenden oluşmaktadır. Kırınım ızgaraları, optik alanındaki en temel yapı taşları arasında yer almaktadır. Bu ızgaraların anlaşılması için iki farklı yaklaşım mevcuttur. Bunlardan ilki ızgara periyodunun (A) dalga boyundan (λ) daha büyük olduğu kırınım durumu [69] iken diğeri ızgara periyodunun dalga boyundan çok daha az olduğu derin alt dalga boyu yaklaşımıdır

[70]. Bununla birlikte, bu iki iyi bilinen yaklaşım arasında üçüncü olarak nispeten keşfedilmemiş bir yaklaşım yer almaktadır. Bu üçüncü durum ise, periyodu ızgara malzemesinin içindeki dalga boyları ile etrafındaki ortam arasında bir değer olan, yakın dalgaboyu yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, kırınım ızgaraları radikal biçimde farklı davranır ve genellikle ızgaralara atfedilmeyen özellikler gösterir [71-78]. Yüksek endeksli ortamı, düşük endeksli materyallerle tamamen çevreleyerek, birçok beklenmeyen, olağanüstü özellik elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında tasarlanan paralel eklemli güneş hücresi için spektral ayrıştırıcı olarak kırınım ızgaralarına benzer bir yapı modifiye edilmiş ve tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapı yüksek karışıklı ızgaralar olarak tanımlanan kırınım ızgaraları kategorisine girmektedir.

3.2 Kırınım Olayı

Kırınım olayı yansıma ve kırılma olaylarından farklı olarak ele alınmalıdır. Işığın parçacık mı yoksa dalga mı olduğu tartışmalarının olduğu dönemde Young Deneyi [79] olarak adlandırılan çift yarık girişim deneyinden sonra ışığın sadece fotonların akımından oluşmadığı aynı zamanda bir dalga gibi girişime uğradığı anlaşılmıştır. Bunun üzerine Huygen's prensibi [79] olarak adlandırılan bir kabule göre ışık parçacıkların akımından ziyade bir dalga hareketi olduğu kabul edilmektedir. Bu prensibe göre her dalga ön yüzü, bir önceki dalga önyüzünde yer alan ve noktasal ışık kaynağı gibi davranan noktalardan kaynaklanmaktadır. Bu noktasal kaynakların oluşturduğu her bir dalgaya ise dalgacık adı verilmiştir. Kısaca belirli bir dalga ön yüzündeki tüm noktalar, bulunduğu ortamdaki dalgaların karakteristik hızları ile ileri yönde ilerleyen dalgacık adı verilen küresel ikincil dalgaların üretimi için noktasal kaynak olarak davranmaktadır.

Işığın kırınım özelliğinden dolayı tasarlanan kırınım ızgaraları gelen ışığın kırınım ızgarasıyla etkileşiminden sonra farklı noktalara farklı frekansların odaklanmasına imkan tanımaktadır. Kırınım ızgaralarında geçen bir ışık belirli bir mesafe sonrası belirli noktalarda yapıcı girişimden dolayı belirli aydınlık noktalar oluştururken, belirli noktalarda ise sönmüleyici girişimden dolayı karanlık noktalar oluşturmaktadır. Şekil 3.1'de bu durumlar şematize edilmiştir.



Şekil 3.1: Aralarında d kadar mesafe bulunan çift yarık bir düzeneğe gelen ışığın perdeye düşerken gösterdiği girişim desenlerinin şematik gösterimi. (a) İki yarıkta gelen ışığın perdenin tam ortasında oluşturduğu yapıcı girişim. (b) Birinci yarıkta gelen ışık ile ikinci yarıkta gelen ışık arasındaki dalga boyunun yarısı kadar faz farkından dolayı perdede oluşan sönümleyici girişim. (c) Birinci yarıkta gelen ışık ile ikinci yarıkta gelen ışık arasındaki bir dalga boyu kadar faz farkından dolayı perdede oluşan yapıcı girişim.

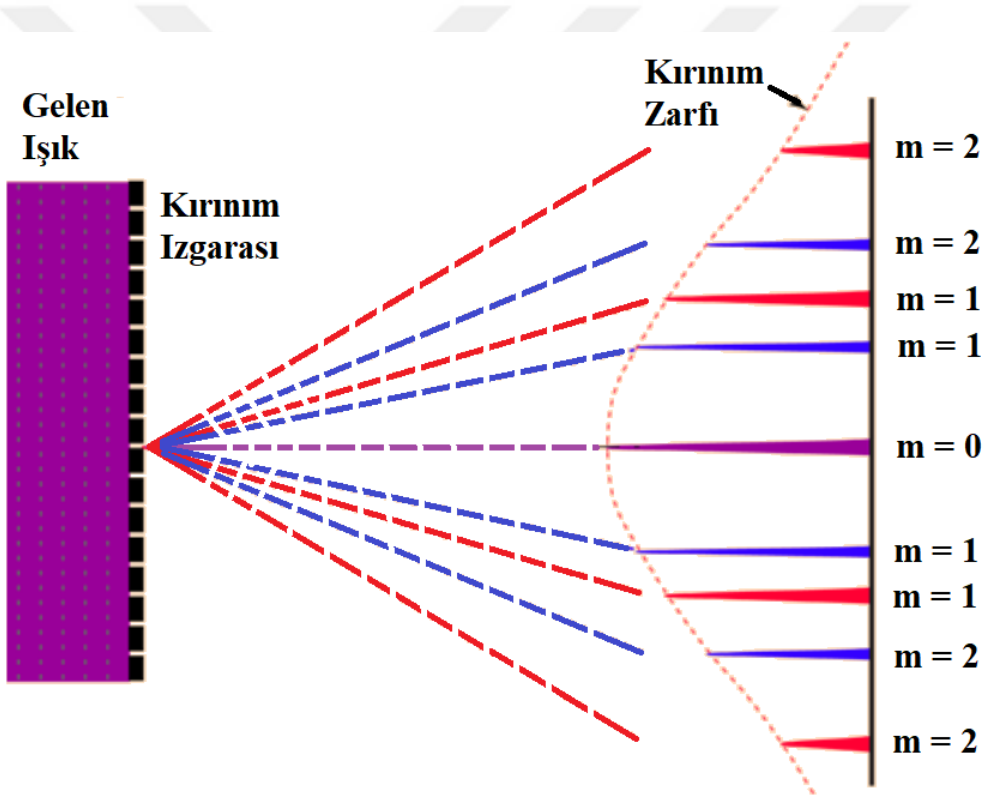
Şekil 3.1'de şematize edilen çift yarık düzeneğe görüleceği üzere üç farklı durum üzerinde durulması gerekmektedir. Bunlardan ilki Şekil 3.1 (a) ile şematize edilen ışığın iki yarıkta gelip L mesafesindeki arka perdeye sıfır açıyla düşen yani iki yarığın tam ortasına denk gelen noktada herhangi bir faz farkı olmadığından oluşan yapıcı girişim sonucu elde edilen aydınlık bölgedir. İkincisi Şekil 3.1 (b)'de yer alan, gelen ışığın yarım dalga boyu faz farkından dolayı θ_1 açısıyla L mesafede yer alan perdede sönümleyici girişimden ötürü oluşan karanlık noktadır. Şekil 3.1 (c)'de gösterilen son durumda ise bir dalga boyu faz farkından dolayı L mesafede yer alan perdede θ_2 açısıyla gelen ışığın oluşturduğu aydınlık bölgedir.

Bu yarıkların sayısının artırılmasıyla elde edilen kırınım ızgaralarında ise bu girişimler iyice belirginleşip ayırık noktalar halinde belirli bölgelere odaklanırlar. Bu sayede farklı renkler yani dalga boyları farklı yerlerde ayrıştırılabilmektedir. Gelen

ışığın dalga boyuna göre hangi açıda kırınıma uğradığı aşağıda yer alan formüldeki gibi hesaplanmaktadır [79].

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (3.1)$$

Burada d iki yarık arasındaki mesafe iken θ ise arka perdeye dik eksenle yapılan açıdır. Bu denkleme göre belirli açılarda belirli dalga boylarında gelen ışık dalga boyunun tam katlarında yapıcı girişimde dolayı aydınlık bölgeler oluşturmaktadır. Birden fazla yarıkla oluşturulan kırınım ızgarası kullanılarak şematize edilen kırınım olayı Şekil 3.2’de yer almaktadır.



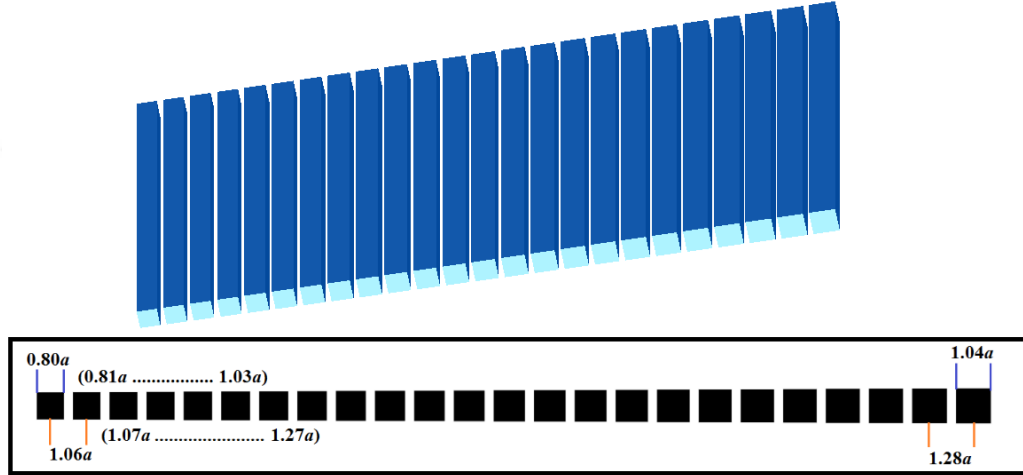
Şekil 3.2: Kırınım ızgarası kullanılarak gelen bir düzlem dalganın farklı dalga boylarını belli bir mesafede yer alan perdenin farklı noktalarına yönlendirmesi. Her dalgaboyu için dalgaboyunun tam katlarında aydınlık bölgeler oluşmuştur.

Şekil 3.2’de görüleceği üzere belirli sayıda yarıklardan oluşan bir kırınım ızgarasına gelen tüm renklerden oluşan bir düzlem dalganın kırınım ızgarasından sonra belirli bir mesafede renklerine ayrışması gözlemlenmektedir. Her renk kendi dalga boyunun tam katına denk gelen bir θ açısında yapıcı girişimden dolayı aydınlık bölge

oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında bu yapıdan hareketle çeşitli modifikasyonlar ve optimizasyonlar sonucu spektral ayrıştırıcı tasarımı gerçekleştirilmiştir.

3.3 Kırınım Iızgaraları ile Spektral Ayrıştırıcının Tasarımı

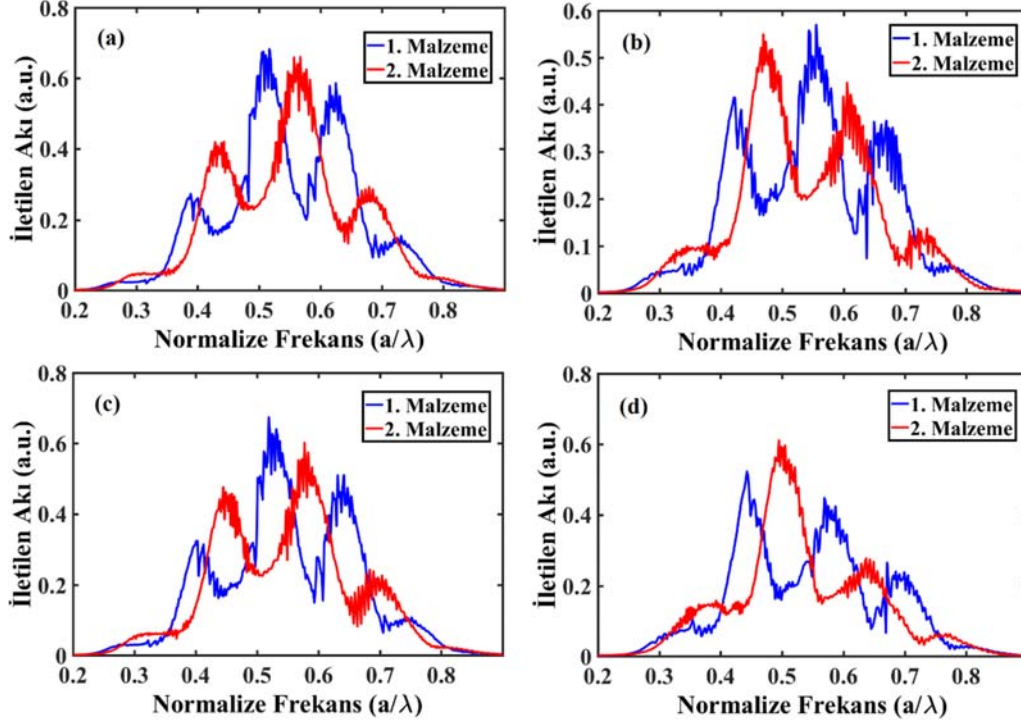
Bu tez çalışmasında paralel eklemli güneş hücreleri için spektral ayrıştırıcı tasarlanması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda ışığın kırınımından faydalanılmıştır. Kırınım olayı için ise kırınım ızgaralarına benzer bir yapı ortaya konmuştur. Kırınım ızgaraları genelde Şekil 3.2'de de görüleceği üzere kare şeklindeki ızgaraların belirli sabit bir mesafede yan yana dizilmesiyle elde edilmektedir. Bu çalışmada ise temel farklılık hem ızgaralar arası mesafe hem de karelerin boyutu gittikçe arttırılmaktadır. Bu sayede yüksek frekanslı güneş ışığı bileşenleri bir tarafa düşük frekanslı güneş ışığı bileşenleri ise diğer tarafa yönlendirilebilecektir. Bu amaçla tasarlanan ve optimize edilen yapı Şekil 3.3'te yer almaktadır.



Şekil 3.3: Kırınım ızgaraları kullanılarak tasarlanan ve optimize edilen spektral ayrıştırıcının tasarım parametreleri ile hem iki boyutlu hem de üç boyutlu gösterimi. Karelerin boyutları ve aradaki mesafe detayları gösterilmektedir.

Şekil 3.3'te yer alan kırınım ızgarası yapısının ilk karesinin kenar ölçüsü $0,80a$ olarak belirlenmiş ve her karede $0,01a$ miktarınca arttırılarak son karede $1,04a$ boyuta ulaşmıştır. Her bir karenin merkezleri arasındaki mesafe ise ilk iki karede $1,06a$ olarak belirlenmiş olup yine $0,01a$ arttırılarak son iki kareler arası mesafe $1,28a$ değerine sabitlenmiştir. Bu değerlerde yer alan a değeri bir sabit olup normalize frekans ile analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan zaman alanındaki analizler için açık erişimli bir yazılım olan MEEP yazılımı [80] kullanılmış olup FDTD metodu [81, 82]

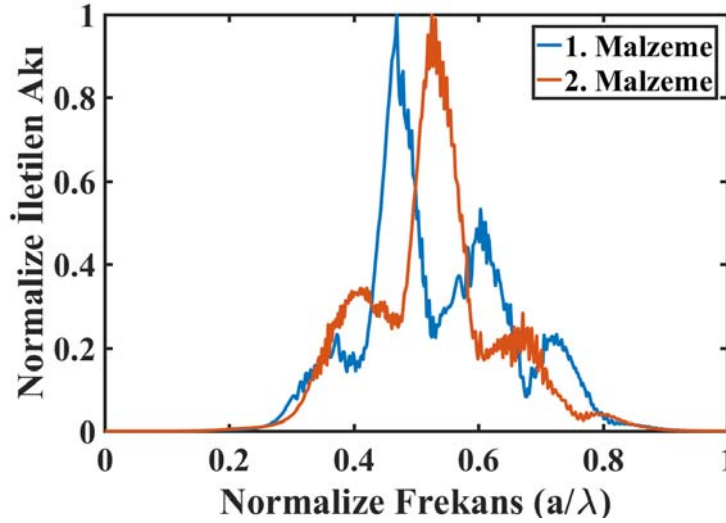
kullanılmıştır. Tüm bu değerler yoğun simülasyonlarla yapılan optimizasyon sonucu elde edilmiştir. Yapının optimize edilirken esas alınan hususlar gelen ışığı iki farklı banda bölmesi ve bu bantların olabildiğince ayrık olmasıdır. Bunun sonucunda yapı üstten bir kaynak ile uyarılmış ve yapının altından iki farklı ölçüm ile gelen ışığın iletilen akısı ölçülmüştür. Yapı optimize edilirken elde edilen iletilen akıların normalize frekansa göre dağılım eğrileri Şekil 3.4'te yer almaktadır.



Şekil 3.4: Yapılan optimizasyon sonuçlarına ait dört farklı sonuç eğrileri. Mavi çizgi birinci ölçü sonuçlarına ait iken kırmızı çizgi ikinci ölçüme ait sonuçlardır. (a) İlk karenin ölçüsü $0,98a$, son karenin ölçüsü $1,21a$. (b) İlk karenin ölçüsü $0,95a$, son karenin ölçüsü $1,18a$. (c) İlk karenin ölçüsü $0,90a$, son karenin ölçüsü $1,13a$. (d) İlk karenin ölçüsü $0,85a$, son karenin ölçüsü $1,08a$. Dört durum için de aradaki mesafe $1,06a$ 'dan $1,28a$ 'ya ayarlanmıştır.

Şekil 3.4'te tasarlanan yapının alt tarafına yerleştirilen ölçüm yüzeylerinden elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Şekil 3.4 (a)'da yer alan sonuç ilk karenin kenar ölçüsü $0,98a$, son karenin kenar ölçüsü $1,21a$ olan ve aradaki mesafeleri $1,06a$ 'dan $1,28a$ 'ya değiştirilen kırınım ızgarasına ait olan İletilen akının normalize frekansa göre dağılımıdır. Bu sonuca bakıldığında gelen ışığın iyi bir şekilde ayrıştırılmadığı gözlemlenmektedir. Eğriler ikiden fazla tepe noktasına sahip olup birbirlerinden de yeterince ayrık olmadıkları aşikârdır. Şekil 3.4 (b)'de yer alan sonuç ise ilk karenin

kenar ölçüsü $0,95a$, son karenin kenar ölçüsü $1,18a$ olan ve aradaki mesafeleri $1,06a$ 'dan $1,28a$ 'ya değiştirilen kırınım ızgarasına ait olan İletilen akının normalize frekansa göre dağılımıdır. Bu sonuca bakıldığında yine gelen ışığın iyi bir şekilde ayrıştırılmadığı gözlemlenmektedir. Şekil 3.4 (c)'de yer alan sonuç ilk karenin kenar ölçüsü $0,90a$, son karenin kenar ölçüsü $1,13a$ olan ve aradaki mesafeleri $1,06a$ 'dan $1,28a$ 'ya değiştirilen kırınım ızgarasına ait olan İletilen akının normalize frekansa göre dağılımıdır. Bu tasarımında yine gelen ışığı iyi bir şekilde ayrıştırılmadığı anlaşılmaktadır. Son olarak, Şekil 3.4 (d)'de yer alan sonuç ilk karenin kenar ölçüsü $0,85a$, son karenin kenar ölçüsü $1,08a$ olan ve aradaki mesafeleri $1,06a$ 'dan $1,28a$ 'ya değiştirilen kırınım ızgarasına ait olan İletilen akının normalize frekansa göre dağılımıdır. Bu sonuca bakıldığında diğerlerine nazaran daha iyi bir sonuç elde edildiği gözlemlenmektedir. Çünkü kırınımı çizgi ile gösterilen ikinci ölçüm yüzeyine düşen akı tek bir tepe noktasına sahiptir. Şekil 3.3'te yer alan optimize edilmiş nihai yapıya ait sonuçlar ise Şekil 3.5'te yer almaktadır.



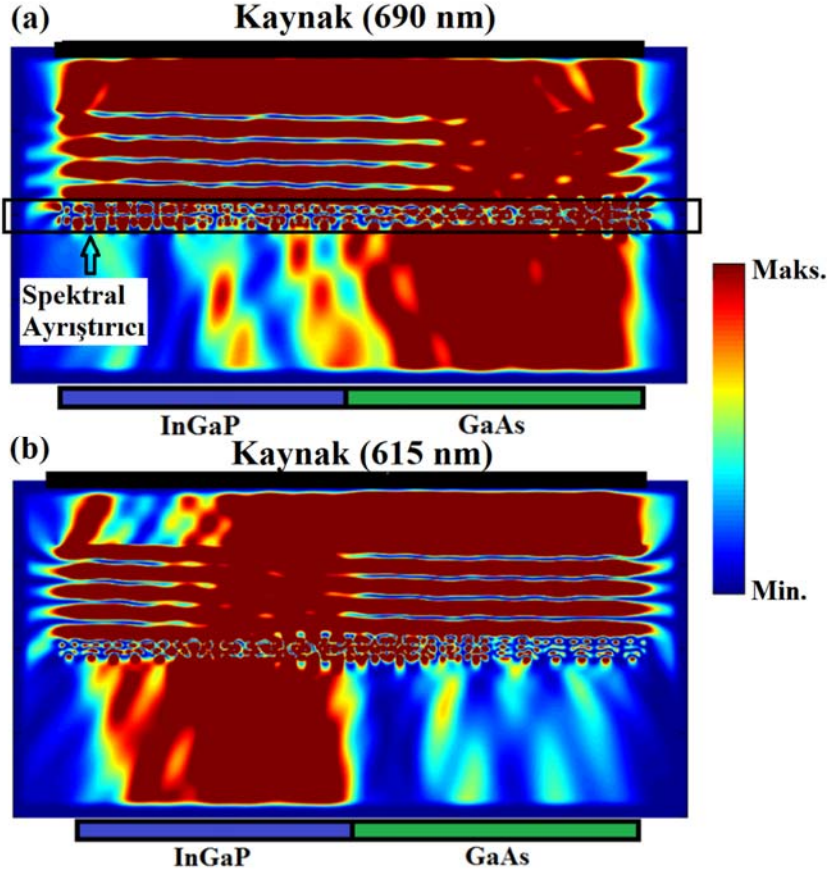
Şekil 3.5: Optimize edilmiş spektral ayrıştırıcıya ait normalize iletilen akının normalize frekansa göre iki ayrı ölçüm yüzeyinden elde edilen sonuçlar.

Şekil 3.5'te yer alan sonuçlar analiz edildiğinde her iki ölçümden de iki ayrı tepe noktası elde edilmiş ve bu tepelerin yeterince ayrık olduğu gözlemlenmiştir.

Tüm bu optimizasyon denemelerine ilaveten kırınım ızgarası yapısı tek katman iken iki katman olarak tasarlanarak elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Fakat yapılan çeşitli denemeler sonucu tek katmanlı spektral ayırıcı ile elde edilen sonuçlardan daha

iyi bir sonuç elde edilememiştir. Katman sayısı arttırılmış fakat Şekil 3.3'te yer alan optimize edilmiş tek katmanlı yapıdan daha iyi bir performansa rastlanılmamıştır.

Tasarlanan yapının belirli dalga boyuna sahip ışık altındaki ayrıştırma performansına bakmak adına yapının üst kısmından 690 nm ve 615 nm dalga boyuna sahip kaynak ayrı ayrı denenerek Şekil 3.6'da yer alan elektrik alan dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 3.6: (a) 690 nm dalga boyuna sahip monokromatik kaynak ile aydınlatılan spektral ayrıştırıcının elektrik alan dağılımı. (b) 615 nm dalga boyuna sahip monokromatik kaynak ile aydınlatılan spektral ayrıştırıcının elektrik alan dağılımı.

Şekil 3.6 (a) incelendiğinde 690 nm dalga boyuna sahip kaynak ile aydınlatılan spektral ayrıştırıcı yapısının sol tarafı bu dalga boyundaki ışığı geçirirken sağ tarafı ise geçirmemektedir. Şekil 3.6 (b)'de ise 615 nm dalga boyuna sahip kaynak ile aydınlatılan spektral ayrıştırıcı yapısının sağ tarafı bu dalga boyundaki ışığı geçirirken sol tarafı ise geçirmemektedir. Tasarlanan spektral ayrıştırıcı InGaP/GaAs güneş hücrelerinin en iyi emilim yapabildiği dalga boyuna karşılık gelmesi için a değeri 325

nm olarak seçilmiştir. Bir sonraki bölümde tasarlanan yapının InGaP/GaAs paralel eklemlili güneş hücresi tasarımına entegre edilerek elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde ele alınmıştır.





4. InGaP / GaAs PARALEL EKLEMLİ GÜNEŞ HÜCRESİ İÇİN SPEKTRAL AYRIŞTIRICI TASARIMI

4.1 Giriş

Güneş enerjisi, küresel enerji ihtiyaçlarını teorik olarak karşılayabilen sonsuz ve tükenmez bir enerji kaynağıdır. Bu tür sonsuz bir enerji kaynağı, özellikle dünya genelinde elektrik üretimi ve ısınma amaçlı kullanılmaktadır. Geçtiğimiz on yılda, güneş fotovoltaik (PV) modüllerin fiyatlarındaki düşüş nedeniyle, kullanım oranları gün geçtikçe artmaktadır. Güneş pilleri hakkındaki teknolojik gelişmelere bakıldığında, tek hücreli silikon (Si) güneş pilleri, diğer hücre tiplerine göre kolay üretilmeleri nedeniyle piyasada yaygındır. Öte yandan, solar PV modülleri ile güneş enerjisinin daha verimli bir şekilde üretilmesi için, araştırmacılar solar PV hücrelerinin verimliliğini artırmaya çalışmakta ve çok eklemli güneş pilleri, perovskite güneş pilleri vb. birçok araştırma yapılmıştır [83-91].

Son yıllarda PV modülünün verimliliğini arttırmak için güneş enerjisinden daha küçük alanlarda daha fazla enerji elde edilebilmesi adına önemli çalışmalar yapılmıştır [92-94]. Hücreden güç toplamak için tek bir p-n eklemi kullanan bir güneş hücresinin maksimum teorik verimi, esasen Shockley-Queisser limiti ile sınırlıdır [1]. Bir güneş pilinin enerji dönüşüm verimliliği, standart test koşullarında güneş ışığından elektrik enerjisine dönüştürülen gücün yüzdesidir. Dünya yüzeyine ulaşan güneş spektrumu 350 nm ile 2000 nm arasında yer alan bir dağılıma sahiptir. Bu nedenle, tek bir bant boşluğuna sahip olan emici, verimli bir şekilde yük taşıyıcılara dönüştürülmüş tüm fotonları dönüştürmez. Bant boşluğunun enerjisine karşılık gelen seviyenin altındaki fotonlar absorbe edilemezken, bant boşluğunda aşırı enerjiye sahip olanlar, fazla enerjinin hızla ısıya dönüşmesine neden olan termalleşme fenomenini tetiklemektedir [4]. Etkili bir yaklaşım, güneş spektrumunu daha küçük alt bantlara ayırmak ve bu bantlara karşılık gelen fotonları uygun malzemelerle emmektir. Bununla birlikte, spektrumun geleneksel optik cihazlarla bölünmesine izin vermek için güneş ışığını

manipüle etmenin etkisiz olduğu kanıtlanmıştır. Örneğin, bazı spektral ayırıştırma yöntemleri, di-kronik aynaların [9, 10], ışın bölünmesinin [11] ve prizma elemanlarının [12] kullanımını içerir. Bu yaklaşımların ana dezavantajları; yüksek maliyetler, geniş alanlara ölçeklenme yetersizliği, hacimli konfigürasyonlar ve pratik güneş enerjisi uygulamaları için uygun olmamalarıdır. Ek olarak, çoklu ara yüzlerden gelen Fresnel yansıma kayıpları gibi diğer faktörler, ölçeklenebilirliği, kronik ayna bazlı tasarımlar için çok sayıda spektral bantla sınırlamaktadır. Bir başka yöntem olan holografik spektral bölünme ise, sadece güneş spektrumunun geniş bandında yetersizdir, aynı zamanda uzun süre güneş ışığına maruz kaldığında zarar görmektedir.

Öte yandan, PV hücrelerinde spektrum ayrılmasının faydaları dikey olarak hizalanmış çok katmanlı güneş pilleri ile gösterilmiştir [95]. Son zamanlarda, dört katmanlı güneş pillerinin verimliliğinin 508 güneş ışığı seviyesinde % 46'ya ulaşmasına rağmen [5], yüksek epitaksiyel büyüme maliyeti ve metamorfik büyüme karmaşıklığı gibi bazı dezavantajlara sahiptirler. Ayrıca, bu tür tasarımlarda, farklı malzemeler seri olarak bağlanır ve bu nedenle aynı akımı üretmek için sınırlıdır. Güneş ışınının karşılık gelen bantlarındaki foton yoğunluğu farklı malzemeler için aynı olamayacağından, bu durum sıkıntı yaratır ve böylesine katı bir kısıtlama nedeniyle, net enerji verimliliği güneş spektrumundaki geçici değişiklikler nedeniyle azalır [96]. Ek olarak, % 50 verimlilik değerinin aşılması şüphesiz daha da gelişmiş hücre mimarileri ve daha yüksek aydınlatma seviyeleri gerektirecektir. Yüksek aydınlatmada hücre verimliliğini sınırlayan temel mekanizmalardan biri seri direnç kaybı olup, ilgili malzemelerin elektriksel iletkenliğinin azalmasına neden olur [17]. Ayrıca, paralel bağlantı güneş pilinin bir başka avantajı, verimliliği azaltan paralel bağlantı güneş pilinden daha yüksek olan tandem güneş pillerinin ortam sıcaklığına bağımlılığı olarak bahsedilebilir [44].

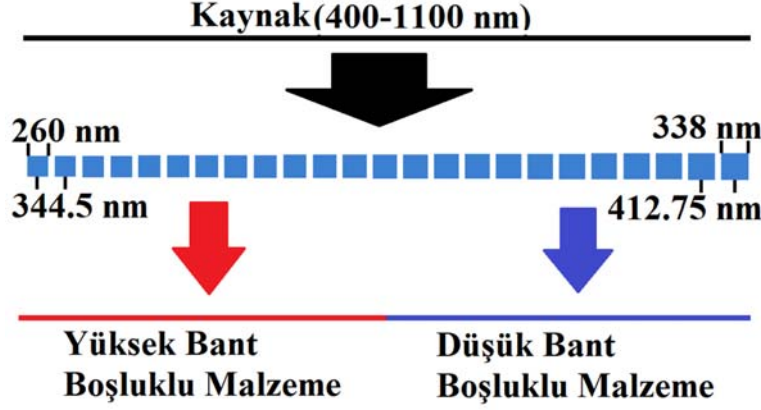
Bu tez çalışmasında InGaP/GaAs çift eklemlili güneş hücresi için yüksek verim değerlerine ulaşmak adına spektral bir bölme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, dikey olarak üst üste istiflenmiş katmanlardan oluşan çok katmanlı (çok eklemlili) fotovoltaiik hücre tasarımından farklı olarak, buradaki fotovoltaiik hücre tasarımı, malzemeleri paralel olarak düzenleyerek elde edilmektedir. Geleneksel yöntemden farklı olarak, mevcut eşleme nedeniyle bir sınırlama yoktur ve farklı alt hücreler için yarı iletken malzeme seçiminde tam esneklik sağlanmaktadır. Tasarlanan spektral

ayırıcıyı tasarlanan InGaP/GaAs paralel bağlantı güneş hücresine dahil ederek maksimum % 16,8 verim elde edilmiş olup çift eklemli güneş pilleri için literatürde [5] belirtilen seviyeler göz önüne alındığında yapılacak olan geliştirmeler ile birlikte verimlilik değerinin arttırılabileceği değerlendirilmektedir. Tasarlanan spektrum ayırıştırıcının literatüre getirdiği yenilik ise, kademeli olarak boyutlarının değiştiği ızgara yapıları ilk kez paralel eklemli InGaP/GaAs güneş hücresi için kullanılmış olmasıdır.

4.2 Spektral Ayırıştırıcının Tasarımı ve Optik Analizler

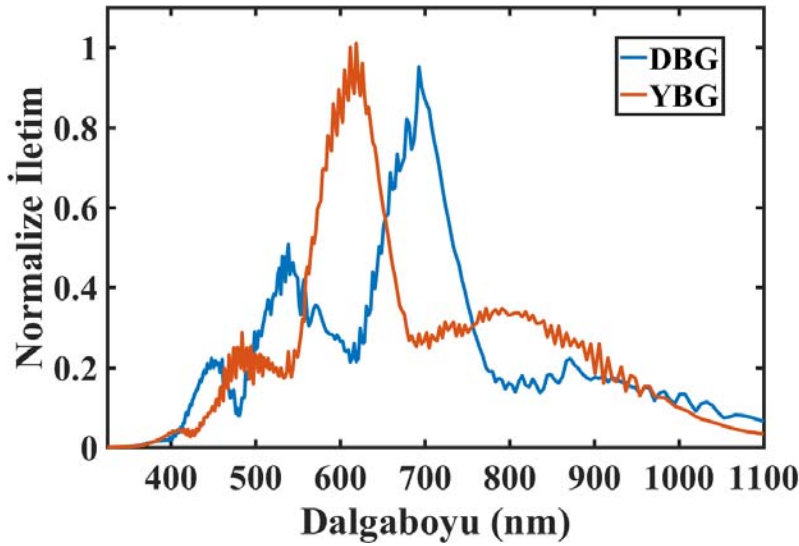
Tasarlanan yapıda teorik olarak kırınım ızgara yaklaşımından esinlenilmiştir. Çoklu yarıklar veya ızgaralar vasıtasıyla ışığın kırınımı, her bir koherent dalga radyasyonu bileşeninin üst üste bindirilmiş süper pozisyonunun farklı yarıklardan nasıl ortaya çıktığını dikkate alarak tanımlanabilir. Bu farklı yarıkların her biri tek aydınlatma noktalarından biri olarak kabul edildiğinden, dalgalar Huygens ilkesine göre üst üste gelecektir. Bir ışın çiftinin ötesindeki bir boşluktaki belirli bir görüş açısında ışığın yoğunluğu, aynı dalga bileşeni aynı zamanda ikinci bölmeden geldiğinde ve bu ikisi yapısal olarak müdahale edildiğinde, ilk bölmeden gelen her dalga bileşeni için en büyüktür. Kısacası, ızgaralardan gelen ışık, yüksek çözünürlüklü farklı dalga boylarına ayrılabilir. Bu ilke, önerilen çalışmanın amacı ile tutarlıdır.

Öte yandan, optik simülasyonlarda üç boyutlu FDTD metodu kullanılmıştır [81, 82]. Spektrum ayırıcı için tasarlanan yapı ve optik simülasyon kurulumu Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, spektral ayırıştırıcı için tasarlanan ızgara yapısındaki ilk karenin boyutu 260 nm olarak alınmış ve her karede belirli bir miktarda arttırılmış ve sonda 338 nm'ye ayarlanmıştır. Kareler arasındaki mesafe ise 344,5 nm olarak başlatılmış ve sabit bir değerle arttırılmış ve son kareler arasındaki mesafe 412,75 nm olarak ayarlanmıştır. Tüm bu değerler birçok parametrenin yer aldığı optimizasyonların sonucu olarak elde edilmiştir. Spektral ayırıcı için Si malzemesi kullanılmış olup ve Si'nin kırılma indisi değeri, malzeme dispersiyonu gibi dağıtıcı etkiler göz ardı edilerek, ilgili frekans bölgesinde 3,46'ya sabitlemiştir.



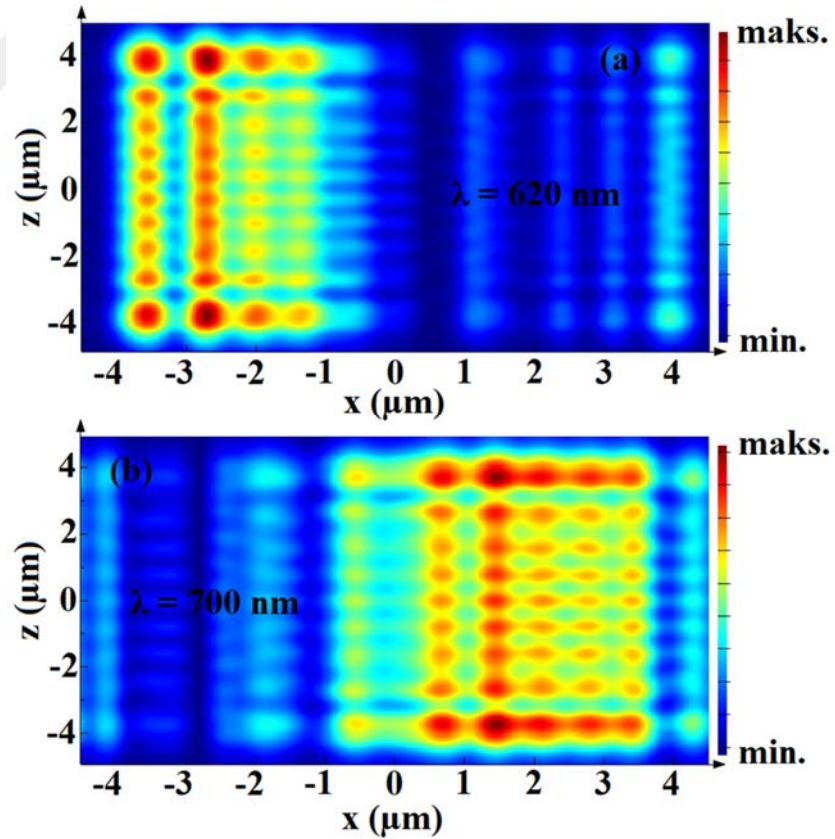
Şekil 4.1: Spektral ayırıcının tasarım parametreleri ve optik simülasyon için kullanılan düzenek.

Optimize edilmiş spektral ayırıcının performansını göstermek için, güneş spektrumu (400-1100 nm), Şekil 4.1'deki gibi yapının tepesinden bir kaynak ile gönderilmiş ve ayırıcıdan geçen sinyal iki iletim penceresi ile ayrı ayrı ölçülmüş ve Şekil 4.2'deki sonuçlar elde edilmiştir. Buradaki iletim pencereleri ayırıcıdan gelen güneş ışığının iletimini ölçerken, aynı zamanda iki farklı güneş hücresi malzemesini de temsil etmektedirler. Şekil 4.1'de görüleceği üzere sol tarafta yüksek bant genişliğine sahip hücre (YBG) yer alırken sağ tarafta düşük bant genişliğine sahip güneş hücresinin (DBG) yerleştirileceği varsayılmaktadır.



Şekil 4.2: Her güneş hücresinin iletim spektrumları için spektral ayırıcın optik simülasyon sonuçları. Kırmızı çizgi YBG güneş hücresine ait iken mavi çizgi ile gösterilen iletim DBG güneş hücresine aittir.

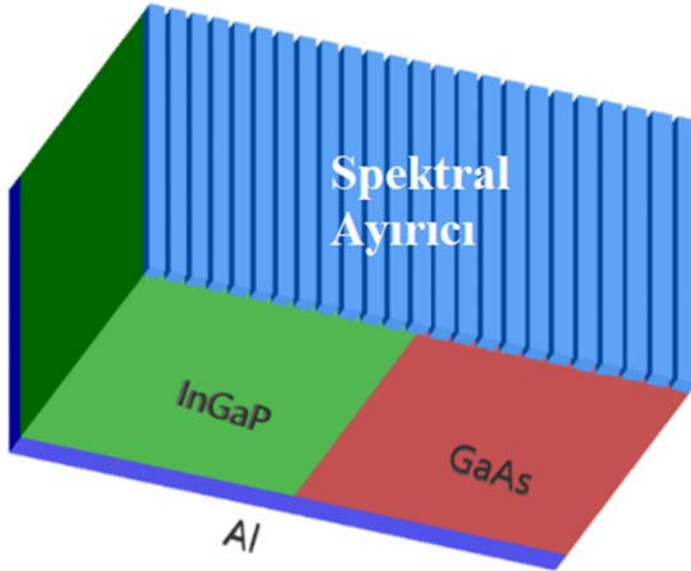
Şekil 4.2'deki eğriler analiz edildiğinde, gelen ışık dalgası, tasarlanmış kırınım ızgara yapısı ile başarıyla iki farklı spektral parçaya bölünür. Bölünmüş kısmın bant genişliği 550 nm ile 800 nm arasını kapsar, yani 250 nm-bant genişliği elde edilmiştir. Daha yüksek ve daha düşük bant boşluklu malzemeler, bu çalışmada İndiyum Galyum Fosfat (InGaP) ve Galyum Arsenik (GaAs), Şekil 4.2'de gösterildiği gibi bölünmüş iletim spektrumlarını absorbe edeceklerdir. Bu malzemelerin kullanılmasının nedeni, InGaP materyalinin 400 nm - 670 nm aralığında çalışması, GaAs materyalinin ise 400 nm - 900 nm'de çalışmasıdır [44, 98]. Tasarlanan yapı, bu iki materyali kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Tasarlanan spektral ayrıştırıcının ayrıştırma performansının değerlendirmek adına Şekil 4.2'de yer alan spektral dağılımda yer alan tepe dalga boylarına karşılık gelen dalga boyuna sahip bir kaynak ile aydınlatılması sağlanmıştır. Kaynak dalga boyu 620 nm ve 700 nm olarak ayarlanmış ve sırasıyla Şekil 4.3 (a) ve (b)'de yer alan xz düzlemindeki manyetik alan dağılımları elde edilmiştir.



Şekil 4.3: (a) 620 nm dalga boyuna sahip kaynak kullanılarak elde edilen manyetik alan dağılımı. (b) 700 nm dalga boyuna sahip kaynak kullanılarak elde edilen manyetik alan dağılımı.

Şekil 4.3'te görüleceği üzere 620 nm ve 700 nm dalga boyuna sahip kaynaktan gelen ışık farklı noktalara yönlendirilmiştir. Şekil 4.3 (a)'ya göre 620 nm dalga boyuna sahip ışık spektral ayırıcıdan geçtikten sonra sol tarafa yönlendirilmişken Şekil 4.3 (b)'den görüleceği üzere 700 nm dalga boyuna sahip ışık ise sağ tarafa yönlendirilmiştir. Bu görsellerden spektral ayırıcının başarılı bir şekilde ayırma yapabildiği gözlemlenmektedir.

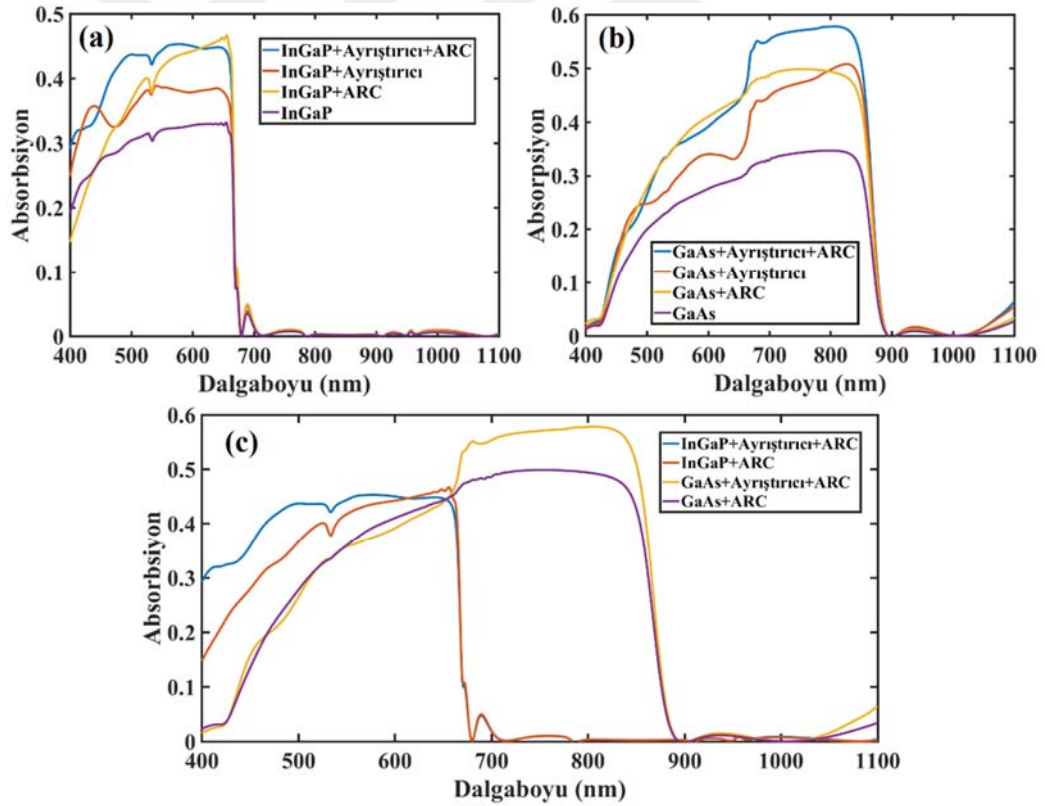
Spektral ayırıcının tasarımı için optik simülasyonlardan sonra, fotonların güneş hücresi tarafından emilimini hesaplamak adına paralel eklemli InGaP/GaAs güneş hücresi kullanılarak optik simülasyon yapılmıştır. Sayısal hesaplamaları yapmak için FDTD'ye dayalı bir program olan Lumerical FDTD programı kullanılmıştır [42]. Güneş hücresi malzemeleri, paralel çok eklemli bir güneş hücresi yapısı oluşturmak için yanal düzende yerleştirilmiş ve ayırıcı, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi güneş hücresinin üstüne yerleştirilmiştir.



Şekil 4.4: Optik simülasyon için tasarlanan InGaP/GaAs paralel eklemli güneş hücresi ve spektral ayırıcının güneş hücresine entegre edilmesi. Geri yansıtıcı olarak Al levha kullanılmıştır.

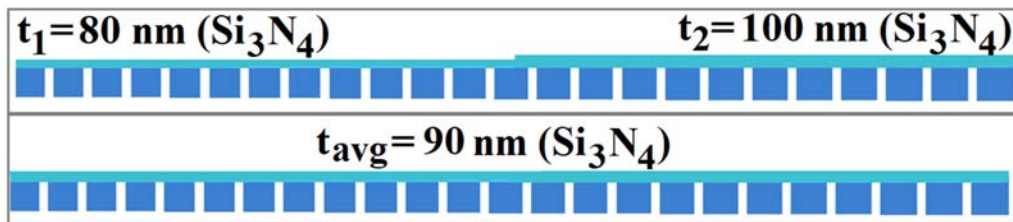
Şekil 4.4'teki görsel, tasarımın üç boyutlu görselleştirmesini göstermektedir ve fotonların absorpsiyonunu maksimuma çıkarmak için geri yansıtıcı olarak Alüminyum (Al) levha kullanılmıştır. Güneş hücresi ve Al tabakasının kalınlığı sırasıyla 3 μm ve 0.3 μm olarak ayarlanmıştır. Bunların yanı sıra, pratikte Si malzemedeki yapılmış

spektrum ayırıcının uygulanması için; bu katman, Si malzemesi ve InGaP/GaAs güneş hücresi arasında başka bir malzemeyle örgü eşleştirmesi ile büyütülebilir. Ancak, bu malzemenin ayrıştırmanın üzerine etkisi araştırılmalıdır ve bu çalışma kapsamında bu durum incelenmemiştir. Çünkü bu çalışma, tasarlanmış ayırıcının simülasyon yoluyla sayısal analizine dayanmaktadır. Şekil 4.4'teki gösterim, güneş pilinin soğurma spektrumlarını hesaplamak için optik simülasyonlarda kullanılmıştır. Kaynağın dalga boyu 400-1100 nm aralığına ayarlanmış olup her iki malzemenin absorpsiyon spektrumları dört farklı koşul için hesaplanmıştır. Bunlar: InGaP/GaAs hücre, geri yansımayı önleyici katman (ARC) entegre edilmiş InGaP/GaAs hücre, ayrıştırıcı entegre edilmiş InGaP/GaAs hücre ve ayrıştırıcı ile ARC entegre edilmiş InGaP/GaAs hücre şeklinde sıralanmaktadır. ARC katmanının detaylı bir şekilde tasarımı daha sonra tartışılacaktır. Bu dört durumun sonuçları, Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5: (a) Farklı koşullar için InGaP malzemesinin absorpsiyon spektrumları. (b) Farklı koşullar için GaAs malzemesinin absorpsiyon spektrumları. (c) InGaP/GaAs güneş hücresinin ayırıcı ve ARC katmanı entegre edilerek elde edilen absorpsiyon spektrumları.

Şekil 4.5 (a) 'da, InGaP için soğurma spektrumu yukarıda belirtilen koşullar için gösterilmiş olup mor çizgi ile belirtilen eğride, sadece InGaP hücrenin soğurma spektrumu 400 nm ile 680 nm arasında %30 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte kırmızı çizgili eğriye bakıldığında ise, tasarlanan ayırıcı kullanıldığı için, InGaP hücrenin absorpsiyon spektrumu %38 seviyesinin üzerine çıktığı gözlemlenmektedir. Karşılaştırma yapmak adına sadece InGaP hücrene 90 nm kalınlığında ARC katman eklendiğinde ise sarı çizgi ile gösterilen soğurma değeri %40 seviyelerine ulaşmaktadır. Son olarak, ARC katmanının ayırıcı üzerine uygulanması sayesinde, mavi çizgili eğride görülen soğurma seviyesi %45 seviyelerine yükseltilmektedir. Soğurma eğrisinin %30'dan %38'e yükselmesi, InGaP için güneş spektrumunun ayrıştırılan bölümünün, güneş hücresinin InGaP bölümü tarafından başarıyla absorbe edildiğini göstermektedir. Ayrıca, %38'den %45'e kadar olan ikinci gelişme ise, yansıma kayıplarını azaltan ARC katmanının başarılı bir şekilde uygulandığını göstermektedir. Benzer durumlar, Şekil 4.5 (b) 'de görüleceği üzere güneş hücresinin GaAs kısmı için de geçerlidir. Spektral ayırıcı ve ARC katmanının uygulanması ile elde edilen soğurma spektrumlarının her iki InGaP ve GaAs malzemelerinin karşılaştırılması için, Şekil 4.5 (c) hazırlanmış olup bu şekil spektrumunun bölünmesini iyi bir şekilde göstermektedir. Ayrıca yine bu şekle bakıldığında ayırıcı yapısının sadece ARC katmanı yapısına göre daha yüksek emilim değerlerine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Tasarlanan ayırıcıdan gelen yansımayı azaltmak için, ARC tabakası tasarlanmış olup Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Spektral ayırıcı için Si₃N₄ kullanılarak tasarlanan ARC katmanları. İki farklı malzemeden dolayı iki farklı kalınlıkta ARC tasarlanmıştır. Bu iki kalınlığın ortalaması alınarak fabrikasyon kolaylığı sağlamak adına analizlerde aşağıda yer alan 90 nm'lik ARC katmanı kullanılmıştır.

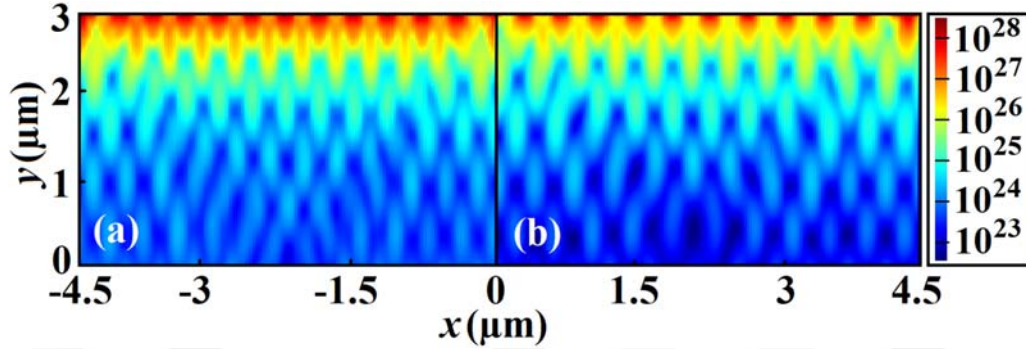
Şekil 4.2'de görüldüğü gibi iletim spektrumundaki iki farklı tepe noktası nedeniyle, silikon nitrat (Si₃N₄) malzemesi kullanılarak iki farklı ARC katmanı tasarlanmıştır. Bu iki farklı kalınlıktaki katmanlar için Si₃N₄ kullanılmış, ancak Şekil 4.2'de gösterilen

tepe dalga boylarının $\lambda/4$ 'üne karşılık gelen farklı kalınlıklar elde edilmiştir. Tasarlanan ARC katmanını çevreleyen hava ve spektral ayrıştırıcı yapısının kırılma indisleri sırasıyla $n_0 = 1$ ve $n_2 = 3,46$ olarak alınmış olup dalga boyu 400 nm ile 1100 nm arasında değişmektedir. Si_3N_4 'ün kırılma ise bu dalga boyu değerleri aralığı için 1.86 olarak sabit alınmıştır. Bu değerler kullanılarak $d_1 = \lambda_0/4n_1$ denklemi çözüldüğünde, d_1 (ARC katmanının kalınlığı), gelen güneş ışığının dalga boyu 400-1100 nm aralığını kapladığı için 54 - 148 nm arasında değişmektedir. d_1 kalınlığı tek bir dalga boyuna tekabül etmediğinden, 54-148 nm arasındaki tüm değerleri alabilir. d_1 kalınlığını belirlemek adına, iki farklı güneş hücresi malzemesi için soğurma spektrumundaki tepe noktalar baz alınarak iki ayrı değer seçilmiş olup ARC katmanı, aynı kırılma indisine sahip iki farklı kalınlık tabakası olarak tasarlanmıştır. Bu iki değer, yüksek radyasyon değerine sahip dalga boyuna göre seçilmiştir. InGaP ve GaAs için en yüksek radyasyon dalga boyu değerleri, sırasıyla 600 nm ve 750 nm olarak seçilmiştir. Bu nedenle, d_1 değerleri InGaP ve GaAs için, sırasıyla 80 nm ve 100 nm olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, imalat aşaması göz önüne alındığında, bu iki kalınlığın ortalama değeri, tek bir ARC katmanı, yani 90 nm olarak alınabilir. Şekil 4.6, spektral ayrıştırıcı yapısının üstüne yerleştirilmiş farklı ARC katmanlarına sahip iki durumu göstermektedir. Ayrıca, ARC katmanı spektral ayrıştırıcı üzerinde düz bir katman olarak kabul edilmiş olup üretim aşamasında ızgara yapısının boşluklarına dolması ihmal edilmiştir.

Spektral ayırıcı ve güneş hücresinin tasarlanmasından ve değerlendirilmesinden sonra, daha sonra metinde de ayrıntılı olarak açıklanacak olan elektriksel simülasyon için kullanılacak elektron-delik (e-h) çiftlerinin oluşma hızı hesaplanmıştır. E-h çiftlerinin oluşma hızı, kısaca e-h çiftlerinin sayısının malzeme içerisindeki mekânsal dağılımını gösteren bir fonksiyondur. E-h çiftinin mekânsal dağılımı, Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

Şekil 4.7 (a), InGaP güneş hücresindeki e-h çifti sayısının dağılımını gösterirken, Şekil 4.7 (b) ise GaAs güneş hücresindeki e-h çifti sayısının dağılımını göstermektedir. Şekil 4.7 (a)'ya bakıldığında, InGaP malzemesi yüzeyden itibaren gelen fotonları emdiğini ve yüzey bölgesinin hemen altında yaklaşık 10^{28} adet e-h çiftinin oluştuğu gözlemlenmektedir. Yine aynı şekilde InGaP güneş hücresine nüfuz eden ışık dalgası yüzeyden 1 μm derinliğe ulaştığında, e-h çifti sayıları aniden 10^{28} 'den 10^{25} 'e kadar

değişmektedir. Malzemenin geri kalanı, 10^{24} - 10^{25} aralığında e-h çiftlerinin dağılımına sahiptir.



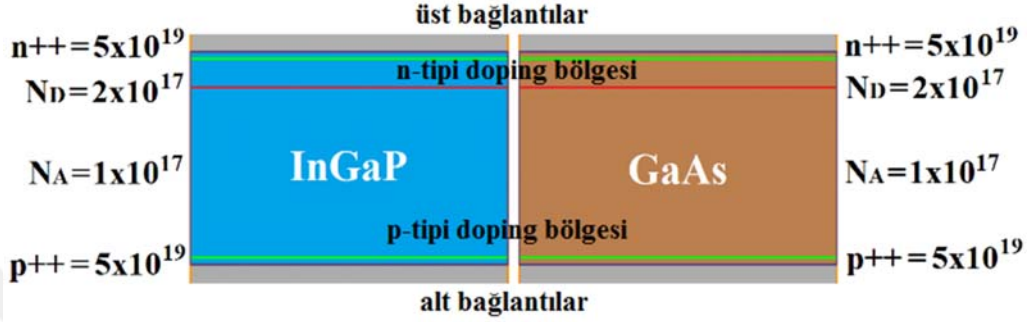
Şekil 4.7: e-h çifti sayılarının mekânsal dağılımları (a) InGaP güneş hücresi içerisindeki dağılım, (b) GaAs güneş hücresi içerisindeki dağılım.

Şekil 4.7 (b)'de ise InGaP malzemesine benzer şekilde GaAs malzemesinin fotonları absorbe ettiğini ve yüzey bölgesinin hemen altında 10^{26} - 10^{28} aralığında e-h çiftlerinin oluştuğu görülmektedir. Gelen ışık dalgası yüzeyden $1 \mu\text{m}$ derinliğe gittiğinde ise, e-h çifti sayısı 10^{28} 'den 10^{26} 'ya değişmektedir. $2 \mu\text{m}$ ile $1 \mu\text{m}$ arasında, e-h çiftinin sayısı 10^{26} 'dan 10^{24} 'e değişmekte olup malzemenin geri kalanında ise e-h çiftlerinin sayısı 10^{23} - 10^{25} aralığında bir dağılıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.7, InGaP malzemesinin, optik simülasyon sonuçlarına göre GaAs malzemesinden daha fazla e-h çiftine sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen üretim hızı sonucu, açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve bir sonraki bölümde detaylı olarak tartışıldığı gibi tasarlanan güneş pilinin verimliliği gibi önemli parametreleri hesaplamak için elektrik simülasyonuna aktarılmaktadır.

4.3 Paralel Eklemlili Güneş Hücresinin Elektriksel Analizi

Tasarlanan güneş hücresinin yük taşıma hesaplamaları için Poisson ve sürüklenme difüzyon denklemlerini kendiliğinden tutarlı bir şekilde çözen Lumerical Device programı kullanılmıştır [43]. Solar hücrenin tasarlanan spektral ayırıcı ve ARC katmanı ile verimliliğini hesaplamak için, Şekil 4.8'de verilen güneş hücresi yapısı kullanılarak bazı elektriksel analizler yapılmıştır. InGaP güneş hücresi ve GaAs güneş hücresi bağımsız olarak analiz edilmiş olup elektriksel olarak izole edilmiştir [44]. Tasarlanmış güneş hücresi, güneş hücresinin üstünde ve altında yer alan iki kontağa

sahiptir ve Şekil 4.8'de gösterilen Gümüş (Ag) malzemenen yapılmıştır. N-tipi katkılama bölgesindeki Ag bağlantılarının hemen altındaki alanlar, metal Ag katmanını ile güneş hücresi arasındaki arayüzde meydana gelen temas direnci kayıplarını azaltmak için n-tip malzeme ile yoğun bir şekilde katkılanmıştır.



Şekil 4.8: Elektriksel simülasyon için tasarlanan paralel eklemlili InGaP/GaAs güneş hücresi yapısı.

Güneş hücresinin alt yüzeyi de, yüksek dalga boylarının emilimini artıran ve arka yüzey rekombinasyon hızını azaltan bir arka yüzey elektrik alanı oluşturmak için p-tipi malzeme ile yine yoğun bir miktarda katkılanmıştır. Yeşil çizgiler, Şekil 4.8'deki ağır katkılanmış n ve p bölgelerinin sınırlarını göstermektedir. Hem InGaP hem de GaAs malzemelerinin (N_a ve N_d) doping konsantrasyon seviyeleri, aynı eklem bölgesi (geçiş bölgesi) genişliğine (w) sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.8'deki kırmızı çizgiler ise, p-katkılanmış ve n-katkılanmış bölgelerin sınırlarını temsil etmektedir. w 'nin hesaplanması için ilgili formül aşağıda yer almaktadır.

$$w = \left[\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

Burada ε_s , malzemenin geçirgenliği, e ise, elektron yükü ve V_{bi} yerleşik voltaj ise aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [39].

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (4.2)$$

Bu denklemde n_i , malzemenin iç taşıyıcı konsantrasyonu olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$n_i = N_C N_V \exp \left[\frac{-E_g}{kT} \right] \quad (4.3)$$

N_C ve N_V , sırasıyla iletim ve valans bantlarının durumlarının etkin yoğunluğu iken ve E_g , malzemenin bant boşluğu enerjisidir [39]. N_C ve N_V sırasıyla aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır.

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4.4)$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4.5)$$

m_n^* ve m_p^* sırasıyla elektron ve delik kütleleridir [39]. Yukarıdaki denklemler ve ayarlanmış doping konsantrasyonları kullanılarak W 'nin hesaplanmasında kullanılan anahtar parametreler Çizelge 4.1'de listelenmiştir.

Çizelge 4.1: InGaP ve GaAs yarıiletken malzemelerine ait elektriksel simülasyonda kullanılan önemli parametreler ve bu parametrelerin elde edildiği referans tablosu.

Parameterler	In ₄₉ Ga ₅₁ P	Referans	GaAs	Referans
ϵ	11.8	[99]	13.1	[101]
n_i (cm ⁻³)	6.43x10 ³	-	4.56x10 ⁵	-
N_a (cm ⁻³)	10 ¹⁷	-	10 ¹⁷	-
N_d (cm ⁻³)	2x10 ¹⁷	-	2x10 ¹⁷	-
E_g (eV)	1.85	[100]	1.424	[101]
N_C (cm ⁻³)	1.9x10 ¹⁸	-	4.7x10 ¹⁷	[101]
N_V (cm ⁻³)	2.3x10 ²⁰	-	7x10 ¹⁷	[101]
m_n^* (g)	2.59x10 ⁻³⁵	[99]	-	-
m_p^* (g)	6.34x10 ⁻³⁴	[99]	-	-

Tasarlanan güneş hücresinin W değeri, yukarıda belirtilen denklemler kullanılarak hesaplanmış olup InGaP/GaAs güneş hücresinin N_a ve N_d değerleri, aynı W değeri için elde edilmiştir. Elektriksel simülasyon için paralel eklemli InGaP/GaAs güneş hücresi tasarımından sonra, optik simülasyonda hesaplanan oluşma hızı, giriş kaynağı olarak elektriksel simülasyona aktarılmıştır. Elektrik simülasyonun önemli sonuçlarının detayları Çizelge 4.2'de listelenmiştir.

Tasarlanan güneş hücresi için bu çalışmada hesaplanan en iyi verimlilik, gelen güneş ışığına herhangi bir yoğunlaştırma yapılmadan ve AM1.5 standart test koşulları altında

% 16,8 olarak elde edilmiştir. InGaP solar hücre için kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi ve doluluk faktörü, en iyi durum için sırasıyla 11,99 mA/cm², 1,41 V ve 0,90 olarak hesaplanmıştır.

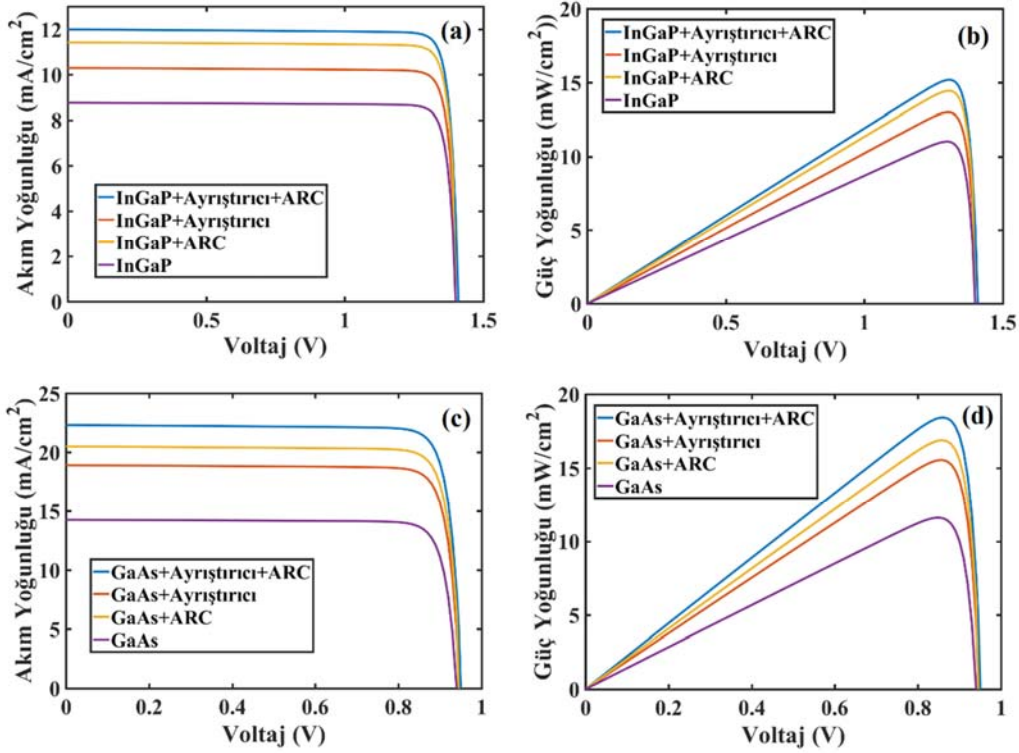
Çizelge 4.2: Birbiri ile elektriksel olarak izole edilmiş InGaP ve GaAs güneş hücrelerine ait elektriksel simülasyon sonuçlarının ayrı ayrı gösterildiği tablo.

Parameterler	InGaP Güneş Hücresi + Ayrıştırıcı + ARC Katmanı	GaAs Güneş Hücresi + Ayrıştırıcı + ARC Katmanı
V _{oc} (V)	1,41	0,95
J _{sc} (mA/cm ²)	11,99	22,31
P _{max} (mW/cm ²)	15,18	18,42
FF	0,90	0,87
Verimlilik (%)	15,18	18,42
Toplam Verimlilik (%)	16,80	

Benzer şekilde, GaAs güneş pili için sırasıyla 22,31 mA/cm², 0,95 V ve 0,87 olarak hesaplanmıştır. Verimlilik, 3-eklemlili tasarım (örneğin üçüncü malzeme olarak Ge kullanılması) ile daha yüksek seviyelere çıkarılabilir. Bu fikir, daha fazla iyileştirme için bu çalışmada bir sonraki adım olarak planlanmıştır.

Bu kapsamda, Şekil 4.9 (a) InGaP solar hücre için hesaplanan akım yoğunluğu-voltaj (J-V) eğrisini gösterirken, Şekil 4.9 (b) ise hesaplanan güç yoğunluğu-voltaj (P-V) eğrisini göstermektedir. Bu grafiklerde mor çizgi sadece InGaP güneş hücresini, kırmızı çizgi tasarlanan ayırıcının InGaP güneş hücresine entegre edilmiş haldeki sonucu, sarı çizgi InGaP hücresine ARC katman eklenmiş durumu ve mavi çizgi ise ayırıcının üzerine ARC katmanının entegre edilerek InGaP güneş hücresine entegre edilmesiyle hesaplanan sonucu ifade etmektedir. GaAs güneş hücresi için de benzer şekilde Şekil 4.9 (c) ve (d) 'de yer alan grafikler hazırlanmıştır.

Şekil 4.9 (b) 'ye bakıldığında, 90 nm kalınlığındaki ARC tabakasının InGaP güneş hücresine entegre edilmesiyle maksimum güç yoğunluğunun, 11,02 mW/cm²'den 14,44 mW/cm²'ye arttırıldığı gözlemlenirken tasarlanan ayırıcılı eklendiğinde ise 12,99 mW/cm²'ye ulaştığı görülmektedir. Ayırıcının üzerine ARC katmanının eklendiğinde ise maksimum güç yoğunluğunun 15,18 mW/cm²'ye ulaştığı sonucuna varılmaktadır.

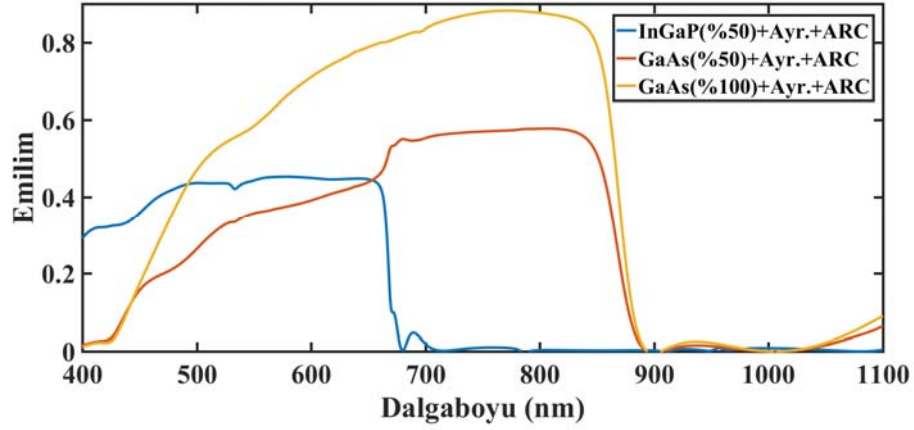


Şekil 4.9: Dört farklı kombinasyon için: (a) InGaP için Akım yoğunluğu - voltaj eğrisi ve (b) InGaP için güç yoğunluğu - voltaj eğrisi - (c) GaAs için Akım yoğunluğu - voltaj eğrisi ve (d) GaAs için güç yoğunluğu-voltaj eğrisi.

Bu sonuçlara göre spektral ayırıcı ve ARC katmanının eklenmesiyle toplam güneş hücresi veriminde % 38 iyileşme sağlandığı gözlemlenmektedir. Benzer şekilde, GaAs güneş hücresine bakıldığında ise, verimdeki iyileşmenin % 59 olduğu görülmektedir (11,61 mW/cm²'den 18,42 mW/cm²'ye). Verimlilikteki bu iyileşmeler dikkate alınarak, InGaP/GaAs paralel eklemli güneş hücresinin genel verimliliği, InGaP ve GaAs güneş hücrelerinin en iyi verimlerinin ayrı ayrı toplanıp ikiye bölünmesiyle % 16,8 olarak hesaplanmıştır.

Tasarlanan InGaP/GaAs paralel eklemli güneş hücresi ile elde edilen verimlilik değerinin sadece GaAs kullanılarak elde edilen bir güneş hücresi ile karşılaştırılması yapılarak InGaP malzemesinin kullanılmasının getirdiği fayda da ayrıca analiz edilmiş olup emilim sonuçları Şekil 4.10'da yer aldığı gibi hesaplanmıştır. Şekil 4.10'da görüleceği üzere sadece GaAs kullanıldığında 400-680 nm aralığındaki dalga boyuna sahip ışık yeterince emilememektedir. InGaP malzemesinin eklenmesiyle 400-680 nm

bandı daha fazla emilerek InGaP/GaAs güneş hücresinin emilim yapılan bant genişliği arttırılmış olmaktadır.



Şekil 4.10: Paralel eklemli InGaP/GaAs güneş hücresinin emilimleri ile sadece GaAs'den oluşturulan güneş hücresinin emilim grafikleri.

Optik analizler sonucu elde edilen bu bulgular kullanılarak yapının elektriksel analizi de yapılarak verimlilik değerlerinde elde edilen artış hesaplanmıştır. Yapılan elektriksel analizler sonucu elde edilen sonuç parametreleri Çizelge 4.3'te yer almaktadır. Ayrıca, 680-900 nm aralığında sadece GaAs malzemesinin kullanıldığı Şekil 4.10'daki sarı renkli eğrinin emiliminin tasarlanan paralel eklemli yapıdan daha iyi olmasının sebebi tasarlanan ayırıştırıcının tamamıyla gelen dalga boylarını ayırıştırıramaması olarak düşünülmektedir.

Çizelge 4.3: InGaP/GaAs paralel eklemli güneş hücresi tasarımı ile GaAs güneş hücresi tasarımına ayırıştırıcının eklenmesiyle elde edilen elektrik simülasyon sonuçları

Parametreler	InGaP (%50) +Splitter+ARC	GaAs (%50) +Splitter+ARC	GaAs (%100) +Splitter+ARC
V_{oc} (V)	1,41	0,95	0,95
J_{sc} (mA/cm²)	11,99	22,31	18,10
P_{max} (mW/cm²)	15,18	18,42	14,83
FF	0,90	0,87	0,87
Verimlilik (%)	15,18	18,42	14,83
Toplam Verimlilik (%)	16,80		14,83
Gelişim (%)	13		

Çizelge 4.3'te yer alan sonuçlara bakıldığında sadece GaAs güneş hücresine ayırıştırıcı

eklenmesiyle elde edilen değerlerin InGaP/GaAs güneş hücresine göre dah düşük olduğu görülmektedir. Bu durum InGaP malzemesinin 400-680 nm bant aralığını GaAs malzemesine göre daha iyi soğurmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 4.10'da yer alan emilim grafiklerinden de açıkça görülmektedir. Tasarlanan ayırıtıcı sayesinde GaAs güneş hücresine oranla InGaP/GaAs paralel eklemli güneş hücresi yapısının %13 daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, ayırıtıcı tasarımının InGaP/GaAs paralel eklemli güneş hücresi için etkileri bu çalışmada yapılan detaylı analizler ile gösterilmiş ve optik ve elektriksel simülasyonlarla desteklenmiştir. Ayırıcı yapıya ek olarak, verimliliği daha da artırmak için bir ARC katmanı tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Bu yöntemle, yan yana yerleştirilen malzemelerin düzenlenmesiyle elde edilen bir fotovoltatik hücre tasarımı, üst üste dikey olarak düzenlenmiş katmanlardan oluşan seri çok katmanlı fotovoltatik hücre tasarımından farklı olarak elde edilmiştir. Tasarlanan güneş pilinin genel verimliliği %16,8'dir ve daha da arttırılabileceği değerlendirilmektedir. Sunulan alışma, daha verimli bir güneş hücresine sahip olmak için  eklemli yaklaşımın uygulanmasında üçüncü malzeme olarak Germanyum (Ge) gibi başka bir yarı iletken malzeme eklenerek geliştirilecektir. Ayrıca tasarlanan spektral ayırıtıcının daha da geliştirilmesiyle daha yüksek verimlilik değerlerine ulaşılması hedeflenmektedir.

5. FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN GERİ YANSIMAYI ÖNLEYİCİ DERECELENDİRİLMİŞ NANO-IZGARALARIN TASARIMI

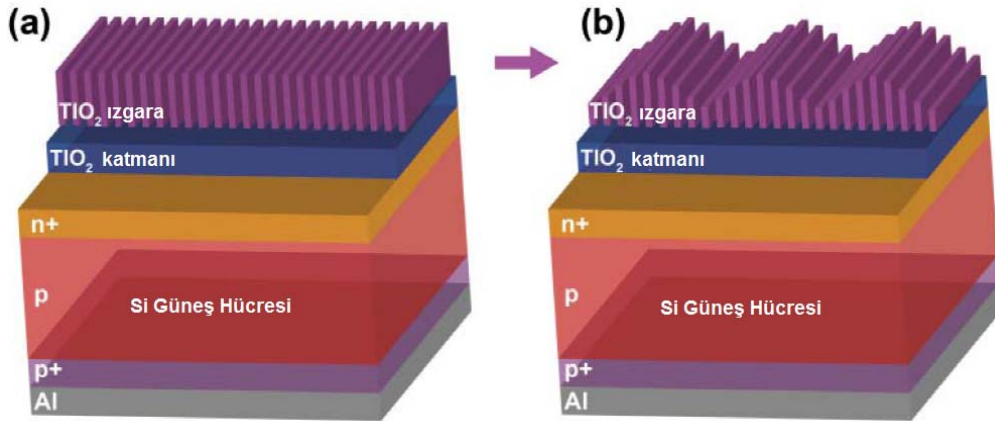
5.1 Giriş

Güneş enerjisi, temiz, tükenmez ve bitmeyen bir enerji kaynağıdır. Son yıllarda, artan enerji talepleri ve fosil yakıt kullanımındaki dünya çapındaki azalma, güneş enerjisine olan ilginin artmasına neden olmaktadır. Hücre ve modül verimlerini artırmak için birçok çalışma yapılmış ve önemli adımlar kaydedilmiştir. Yansımaya önleyici kaplamalar (ARC'ler) olarak bilinen yapay yapılar kullanılarak güneş hücresine düşen ışığın yansımalarını azaltmak için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [102-108]. Örneğin, yapılan bir çalışmada [102] sayısal ve deneysel olarak çok eklemlili güneş hücreleri için tek katmanlı, iki katmanlı ve üç katmanlı ARC tasarımları gerçekleştirilmiştir. Yine aynı çalışmada, açısız ışık dağılımının ve geniş spektral bant genişliğinin önemi ARC'lerin optimizasyonu için de vurgulanmış olup doğrudan spektral ve açısız performansın elde edilmesi için iki deneysel yöntem kullanılmıştır. Bir başka çalışmada [103] ise eğik açılı biriktirme ile üretilen nano-yapılı düşük kırılma indisli bir Silisyum dioksit (SiO_2) malzemesine dayanan geniş bantlı, çok yönlü, derecelendirilmiş kırılma indisli bir ARC tasarımı kullanılmıştır. Aynı çalışmada, üç katmanlı ARC tasarlanarak yansımaya yüzdesinin, 400 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında % 5,9'a düştüğü bildirilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise, geleneksel bir nano-ızgara yapıyı modifiye ederek güneş hücresinin ışığa duyarlı katmanında daha verimli emilim için ek odaklanma özelliğine sahip bir ARC tasarımı önerilmektedir. Bu nedenle, bu tasarımın getirdiği ana yenilik yansımaya önleyici özellik ve derecelendirilmiş yükseklikli nano ızgara (GHNG) yapısına dayanan optik odaklanma prensibinin bir araya gelmesi olarak ifade edilebilir.

5.2 Tasarım Parametreleri ve Optik-Elektrik Simülasyon Sonuçları

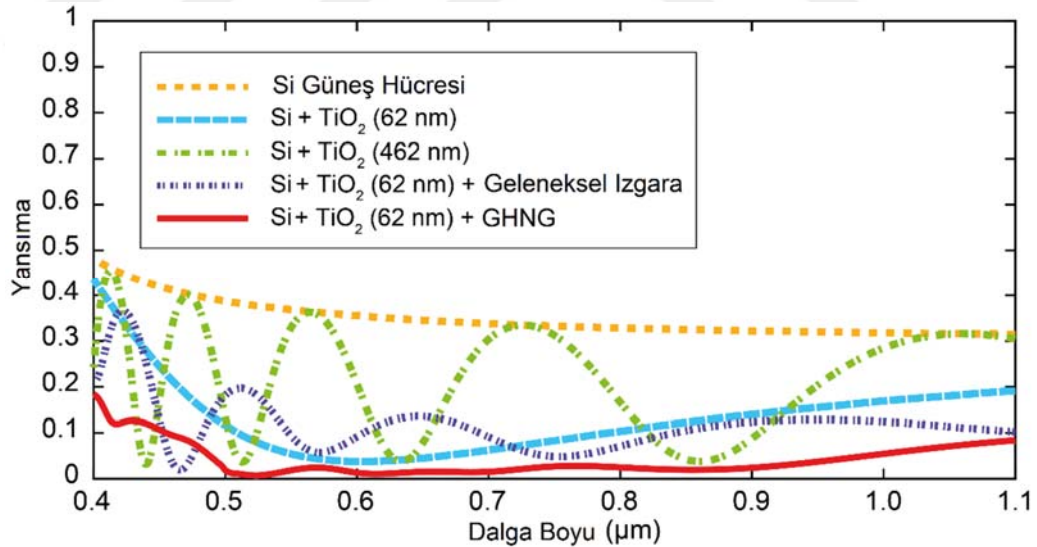
Geleneksel ve bu çalışmada önerilen GHNG yapılarının üç boyutlu gösterimleri, sırasıyla Şekil 5.1 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. ARC özelliğine sahip olmak için, 50 nm'lik periyotlarla düzenli Titanyum dioksit (TiO_2) ızgarası, Şekil 5.1 (a) 'da gösterildiği gibi Al geri yansıtıcı katman ile dökme bir TiO_2 katmanı ve Si güneş hücresi üzerine inşa edilmiştir. Bu geleneksel ızgara konfigürasyonunun yapılmasının nedeni, ızgara yapısının kırılma indisıyla eşleşen ARC etkisi sayesinde daha fazla güneş enerjisinin toplanması hedeflenmekte ve bu sayede Fresnel yansımaları bastırılmaktadır. Si, dökme TiO_2 ve TiO_2 ızgara katmanlarının kalınlıkları sırasıyla $t_{\text{Si}} = 3 \mu\text{m}$, $t_{\text{TiO}_2}(\text{dökme}) = 62 \text{ nm}$ ve $t_{\text{TiO}_2}(\text{ızgara}) = 400 \text{ nm}$ olarak ayarlanmıştır. Ayrıca 500 nm dalga boyu için TiO_2 ve Si kırılma indisleri sırasıyla $n_{\text{TiO}_2} = 2,48$ ve $n_{\text{SiO}_2} = 4,30$ olarak seçilmiştir. Bu çalışmanın amacına göre, Şekil 5.1(a)'daki düzenli ızgara katmanı referans yapı olarak alınmakta ve her bir ızgara elemanının yükseklikleri değiştirilmektedir ve bu nedenle ARC ve odaklama etkisine sahip olmak için bir GHNG katmanı tanımlanmaktadır. Aynı yapıda, her bir ızgara elemanının yüksekliği, Si tabakası içinde etkili odaklanma özelliği elde etmek için her bir ızgara periyodunda 82 nm adımlarla $t_{\text{TiO}_2}(\text{ızgara}) = 400 \text{ nm}$ 'den başlayarak azaltılmıştır.



Şekil 5.1: Tasarlanan güneş hücresi yapısının üç boyutlu (a) geleneksel ızgara ve (b) tasarlanan GHNG katmanları.

Gerekli hesaplamalar için FDTD yöntemine dayanan Lumerical FDTD yazılımı kullanılmıştır [42]. Geri yansımaya performansını değerlendirmek için farklı katman bileşimlerinin etkinliği, çeşitli güneş hücresi durumlarının yansımaya spektrumları, Şekil

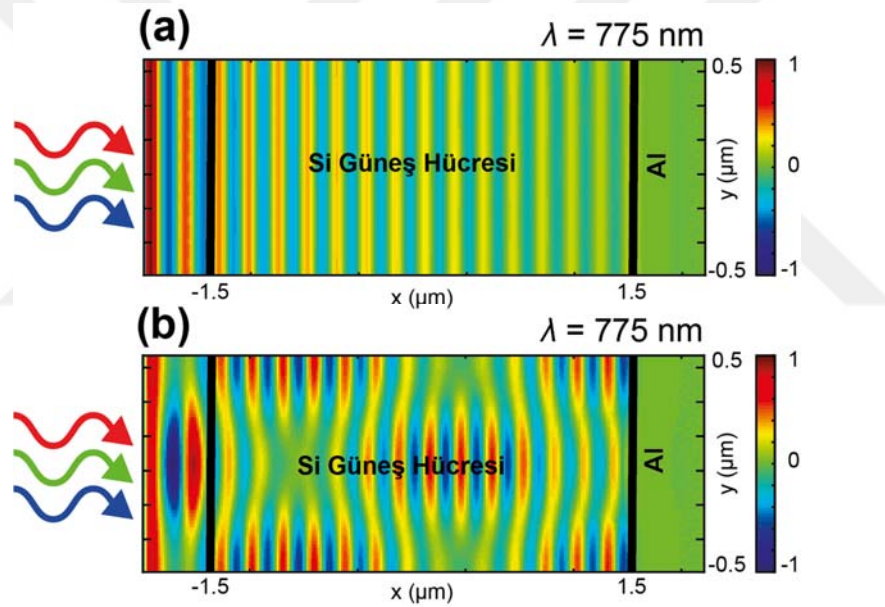
5.2'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Bu şekilde, 5 farklı kalınlıkta çeşitli katman bileşimleri için yansımaya sonuçları yer almaktadır. Bu bileşimler sırasıyla, Si güneş hücresi, Si + TiO₂ (62 nm), Si + TiO₂ (462 nm), Si + TiO₂ (62 nm) + Geleneksel Izgara ve Si + TiO₂ + GHNG olarak ifade edilebilir. Burada, ızgara özelliğine sahip olmayan diğer katman konfigürasyonları, tüm durumlar arasında detaylı bir karşılaştırma yapılması gerekliliği nedeniyle yansımaya açısından da analiz edilmektedir. Yansımaya kayıplarını karşılaştırmak için her yansımaya eğrisi için ortalama yansımaya değerleri 400 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığı arasında hesaplanır. Hesaplanan sonuçlar, GHNG yapısı için en düşük ortalama yansımaya oranının % 9,68 olarak elde edildiğini göstermektedir; ancak, geleneksel ızgara durumundaki ortalama yansıtma oranı yalnızca % 18'e düşürülebilmektedir. Dahası, ızgara olmayan durumlara kıyasla, Şekil 5.2'da önerilen GHNG yapısının yansımaya kayıpları açısından hâlâ daha iyi olduğu görülebilir. Bu FDTD sonuçları, GHNG yapısına sahip bir güneş hücresinin geleneksel ızgaralar dahil diğer durumlardan daha az yansımaya kaybına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.2: Farklı yapısal katman bileşimlerine sahip güneş hücreleri için ön yüzey yansıtma spektrumları

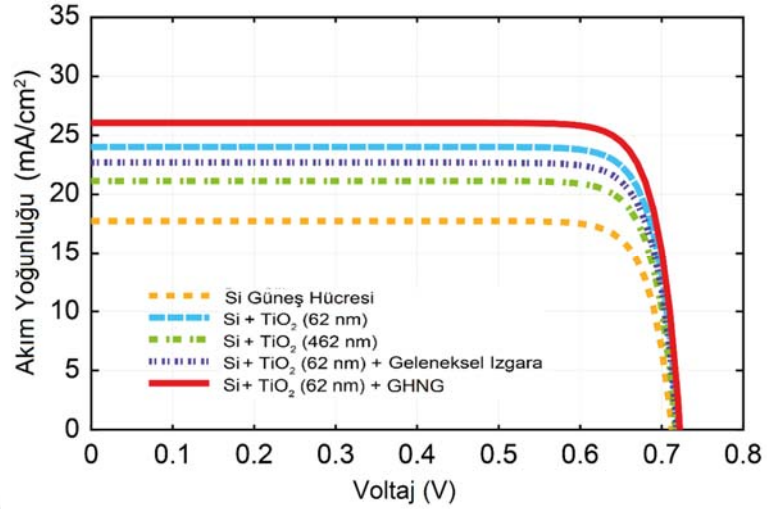
Geleneksel ızgara ve GHNG'nin enine-manyetik polarizasyon elektrik alan dağılımları, sırasıyla Şekil 5.3 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Bu şekillerden görülebileceği gibi, elektrik alanı, gradyan endeks dağılımına bağlı olarak ortaya çıkan odaklanma özelliği nedeniyle, GHNG bazlı güneş hücresi içinde farklı konumlarda

konumlandırılmıştır. Verilen şekilde, olağan odaklanma karakteristiğinin olmayışının nedeni, foto-yanıt katmanındaki belirli yerlerde yapıcı etkileşime neden olan periyodik sınır koşullarından kaynaklanmaktadır. Işık ile üretilen taşıyıcıların toplama verimliliği, gelen radyasyonun özellikle GHNG bazlı güneş pilinin geçiş bölgesine odaklanmasından dolayı etkili bir şekilde artmaktadır [104]. Dahası, odaklanma özelliği sayesinde, Al tabakasının güçlü yansıtıcılığından dolayı ışık tutma performansı (dolayısıyla emme verimliliği) artmaktadır. Gelen dalgalar eğik açıda foto-aktif katmana girerler. Ayrıca, lokalize alanların derinliği (odak noktaları), GHNG'nin ızgara öğelerinin dolun oranı, yüksekliği ve eğim derecesi gibi parametrelerini kontrol ederek ayarlanabilir.



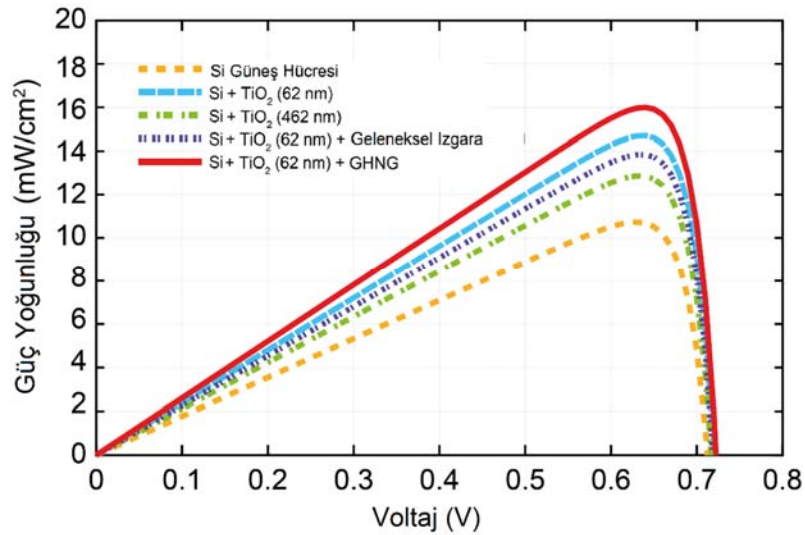
Şekil 5.3: (a) Geleneksel ızgara ve (b) GHNG yapısına sahip güneş hücrelerinin 775 nm'de elektrik alanı dağılımı.

Poisson ve drift difüzyon denklemlerini kendiliğinden tutarlı bir şekilde çözebilen bir program olan Lumerical Device tasarlanan solar hücrenin yük taşıma hesaplarını yapmak için kullanılmıştır [43]. Her yapı durumu için geçerli J-V eğrileri, güneş hücresinin mevcut akım yoğunluğundaki artışı göstermek için Şekil 5.4'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.



Şekil 5.4: Farklı yapısal katman bileşimleri için Si güneş hücresinin J-V eğrileri

GHNG bazlı güneş hücresi yapısının $J_{SC} = 26,1 \text{ mA/cm}^2$ değeri ile analiz edilen diğer yapılar arasında en yüksek kısa devre akım yoğunluğuna sahip olduğu gözlenirken, geleneksel ızgara yapısının $J_{SC} = 22,7 \text{ mA/cm}^2$ değeri ile daha düşük bir değere sahip olduğu gözlenmiştir. $J-V$ eğrisine ilaveten, Şekil 5.5'deki $P-V$ eğrileri güneş hücresinin verimliliğindeki artışı göstermek için çizdirilmiştir. Şekil 1.21'deki $J-V$ eğrilerine göre, GHNG yapısı sayesinde $\eta = \%16$ değerinde maksimum verim elde edilirken, geleneksel ızgaralı güneş hücresi, AM1.5 koşullarında $\eta = \%13,84$ verimlilik değerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.5: Farklı yapısal katman bileşimleri için Si güneş hücresinin P-V eğrileri

Özetle, bu çalışmada fotovoltaik uygulamalarda ışık yakalama ve soğurma verimliliğini artırmak için azaltılmış yansıma kayıpları ve odaklanma özelliğine sahip yeni bir ARC tasarımı önerilmektedir. Gerçekleştirilen tasarım, tek bir yapıda ARC ve ızgara lensinin etkin bir kombinasyonunu sunmaktadır. Önerilen yapı, güneş hücrelerinin verimliliğini artırmak için iyi bir aday olabilir. Ayrıca, geri yansıtıcı katman için ek ışık yakalama senaryosu, düz Al arka reflektörün yerini alırsa güneş hücresinin performansını daha da arttırabileceği değerlendirilmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında spektral ayrıştırıcı tasarlamak için yüksek karşıtlıklı kırınım ızgaraları kullanılmıştır. Oluşturulan yapıyı elde etmek için öncelikle kırınım ızgaraları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kırınım ızgaraları genelde bir ışık hüzmesinin hangi spektral bileşenlerden oluştuğunu belirlemek adına spektroskopi uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Gelen ışık farklı frekanslara ayrılarak bir ekranın farklı noktalarına yönlendirilebilmektedir. Bu yolla tasarlanan spektral ayrıştırıcının da farklı dalga boyu içeren bantları farklı yönlere göndermesi hedeflenmiş ve istenen sonuçlar elde edilmiştir. Tasarlanan yapının performansını arttırmak için FDTD analizleri ile yapı optimize edilmiştir. Optimize edilen yapı tek dalga boyuna sahip kaynak ile uyarılarak yapının bir kısmının belli dalga boylarını geçirirken diğer kısmı ise farklı dalga boylarını geçirmiş ve altta yer alan ölçüm alanlarına yönlendirmiştir.

Spektral ayrıştırma için farklı yöntemler olmasına karşın bu tezde kırınım ızgaraları kullanılarak farklı ve yeni bir tasarım yapılmıştır. Diğer yöntemlerden olan holografik filmler ve dikroik aynalar da detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Fakat bu yöntemlerde yaşana bir takım zorluklardan ötürü kırınım ızgaraları kullanılması kararlaştırılmıştır.

Elde edilen spektral ayrıştırıcı yapısının bir güneş hücresi ile denenerek performansını gözlemlemek adına bu yapının entegre edileceği bir güneş hücresi tasarlanmıştır. Güneş hücresi spektral ayrıştırıcının lateral ekseninde ayrıştırma yapmasından ötürü paralel eklemli bir yapıda tasarlanmıştır. Tasarlanan spektral ayrıştırıcının ayrıştırma yapacağı dalga boyu 680 nm olarak belirlenerek normalize frekansta yer alan a değeri 325 nm olarak ayarlanmıştır. Bu sayede gelen güneş ışığı 400-680 nm dalga boyu aralığındaki bandı bir tarafa yönlendirirken 680-900 nm arası bandı ise diğer tarafa yönlendirmesi hedeflenmiş ve bu durum kısmen başarılmıştır. Bu dalga boyu aralıklarında emilim yapan malzemeler için detaylı bir literatür taraması yapılarak 400-680 nm bandı için InGaP malzemesi, 680-900 nm arası emilim yapması için ise GaAs yarı iletkeni kullanılmıştır. Bu iki malzeme yan yana dizilerek paralel eklemli bir

güneş hücresi yapısı elde edilmiştir. Bu malzemelere ait gerekli tüm parametreler hesaplanmış ve iki malzemenin eşit geçiş bölgesine sahip olması için gerekli olan katkılama değerleri belirlenmiştir.

Paralel eklemli güneş hücreleri yatay olarak dizildiklerinden malzeme seçimi ve birbirine uyumu açısından pek çok avantaja sahiptirler. Dikey oryantasyonda üst üste dizilen çok katmanlı güneş hücrelerinde büyük sıkıntılara yol açan akım ve örgü eşleştirme gibi problemler yatay dizimli versiyonda bulunmamaktadır.

Tasarlanan paralel eklemli InGaP/GaAs güneş hücresine tasarlanan spektral ayrıştırıcı entegre edilerek gelen güneş ışığının bir kısmı InGaP tarafına iletilmiş diğer kısmı ise GaAs tarafına iletilmiştir. Bu malzemelerin ayrı ayrı emilim değerleri ölçülerek tasarlanan spektral ayrıştırıcı varken ve yokken oluşan sonuçlar irdelenmiştir. Tasarlanan spektral ayrıştırıcı sayesinde her iki yarıiletken malzemenin emiliminde önemli artışlar elde edilmiştir.

Gelen güneş ışığı spektral ayrıştırıcıya ulaştığında geri yansımayı önlemek adına geri yansımayı önleyici katman da tasarlanmıştır. Silisyum nitrat kullanılarak tasarlanan bu ARC katmanı ile gelen güneş ışığındaki geri yansıma miktarı azaltılmış ve yine her iki malzemenin de emiliminde önemli artışlar elde edilmiştir. Tasarlanan bu ARC katmanı her iki güneş hücresi için ayrı noktaların geri yansımalarını azalttığından iki ayrı kalınlıkta olarak tasarlanmıştır. Fakat üretim kolaylığı sağlamak adına bu iki kalınlığın ortalaması bir kalınlık kullanılmış ve bu sayede her iki güneş hücresi için de tek bir katman olarak tasarlanmıştır.

Tasarlanan spektral ayrıştırıcı için iki eklemli güneş hücresi tasarlanmış olup Ge malzemesinin üçüncü bir güneş hücresi olarak InGaP/GaAs güneş hücresine eklenmesi de ayrıca araştırılmıştır. Bir sonraki aşamada yapının bu üç malzeme kullanılarak nasıl bir performans ortaya koyacağı araştırılacaktır.

Tasarlanan spektral ayrıştırıcı InGaP/GaAs güneş hücresine entegre edilerek optik simülasyonlarla emilim ve e-h çifti sayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan e-h çifti sayısı elektriksel simülasyona girdi olarak eklenmiş ve yapının elektriksel simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Yapılan optik simülasyonlarda kullanılan kaynak güneş ışığını temsil etmesi adına 400-1100 nm aralığında bir kaynak kullanılmıştır.

Kullanılan bu kaynak güneşten gelen ışığın her iki polarizasyonu içermesinden ötürü hem TE hem de TM moda göre ayrı ayrı iki simülasyon sonucu birleştirilmiştir. Kullanılan kaynak AM1.5 standart spektrum dağılımına sahip olup bir güneş aydınlatmasına sahiptir.

Paralel eklemli güneş hücresi tasarımında alt tarafa geri yansıtıcı olarak belirli bir kalınlıkta Al levha yerleştirilmiştir. Güneş hücresinin kalınlığı ise emilimin maksimum olacağı şekilde ayarlanmıştır. Bağlantı noktaları için ise Ag metal kontaklar kullanılmıştır.

Elektriksel simülasyonda $InGaP$ ve $GaAs$ yarıiletkenlerinin aynı geçiş bölgesi kalınlığında tasarlamak için gerekli olan tüm parametrelere göre W genişliği hesaplanarak katkılama miktarları (N_a ve N_d) belirlenmiştir. Her iki malzemede de p-n eklem oluşturulmuş ve kontak noktaları ise rekombinasyonun azaltılması adına ağır bir şekilde katkılanmıştır.

Tasarlanan güneş hücresinin toplam verimliliği bir güneş aydınlatması altında % 16,8 olarak hesaplanmış olup daha da arttırılabileceği değerlendirilmektedir. Hesaplanan verimlilik, iki eklemli güneş pilleri için literatürdeki diğer çalışmalar kadar yüksek olması için ayırıştırıcının daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Sunulan çalışma, daha verimli bir güneş hücresine sahip olmak için üç eklemli yaklaşımın uygulanmasında üçüncü malzeme olarak Germanyum (Ge) gibi başka bir yarı iletken malzeme eklenerek geliştirilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan bir diğer çalışma ise ışık tuzaklama metotlarının kullanılarak Si bir güneş hücresinin emilimini ve dolayısıyla verimini arttırmak olmuştur. Bu çalışmada TiO_2 malzemesi kullanılarak düz bir yüzeye sahip bir Si güneş hücresi üzerinde ayrı bir katman oluşturulmuştur. Bu katman nano ızgara yapısına sahip olup ızgaraların boyu belli bir seviyeye kadar azaltılıp belli bir seviyeden sonra arttırılarak periyodik bir tasarım yapılmıştır.

Bu tasarım ile birkaç farklı ARC kombinasyonu karşılaştırılarak elde edilen yapının en iyi performansı gösterdiği anlaşılmıştır. Tasarlanan nano ızgara yapı gelen ışığı hem tuzaklamakta hem de Si hücrenin belli noktalarına odaklayarak emilimi arttırmaktadır. Tasarlanan yapı ayrıca geleneksel ızgara yapısı ile de karşılaştırılmış olup elde edilen

verim değerinde iki puanlık bir artış sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu yapının hem basit olması hem de iyi sonuçlar elde edilmesi sayesinde Si tabanlı güneş hcreti uygulamaları için önemli bir potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında iki malzeme kullanılarak elde edilen paralel eklemler güneş hcreti yapısı ek olarak Ge malzemesinin de kullanılmasıyla  eklemler bir tasarıma dönüştürülmesiyle daha yüksek verim değerlerinin elde edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca InGaP/GaAs malzemelerinin yerine yatay dizilimin sağladığı malzeme seçimini konusunda esneklik nedeniyle Si/Ge ile farklı bir güneş hcreti tasarımında yapılabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, tasarlanan spektral ayrıştırıcının farklı optimizasyon yöntemleriyle daha hassas bir şekilde optimize edilmesi ile daha geniş bir bant aralığında ayrıştırma yaparak daha verimli güneş hcreti tasarımlarına katkı sağlayacağı aşıkrdır.

Ayrıca tez kapsamında sunulan ışık tuzaklama teknikleri dikkate alındığında tasarlanan derecelendirilmiş uzunluklu nano ızgara yapısının hem odaklama hem de geri yansımayı önleyici etkiye sahip olması PV güneş hcretlerinin gelişimine önemli bir katkı sunacağı ve bu yapının da geliştirilerek daha iyi sonuçlar elde edileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Shockley, W., Queisser, H. J.**, (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J. Appl. Phys.*, 32, 510-519.
- [2] **Mathers, C. D.**, (1977). Upper limit of efficiency for photovoltaic solar cells. *J. Appl. Phys.*, 48, 3181-3182.
- [3] **Araújo, G. L., Martí, A.**, (1994). Absolute limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 33, 213-240.
- [4] **Polman, A., Atwater, H. A.**, (2012). Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics. *Nat. Mater.*, 11, 134-137.
- [5] **Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Ho-Baillie, A. W. Y.**, (2018). Solar cell efficiency tables (Version 52). *Prog. Photovoltaics*, 26, 427-436.
- [6] **Barnett, A., Kirkpatrick, D., Honsberg, C., Moore, D., Wanlass, M., Emery, K., Schwartz, R., Carlson, D., Bowden, S., Aiken, D., Gray, A., Kurtz, S., Kazmerski, L., Steiner, M., Gray, J., Davenport, T., Buelow, R., Takacs, L., Shatz, N., Bortz, J., Jani, O., Goossen, K., Kiamilev, F., Doolittle, A., Ferguson, I., Unger, B., Schmidt, G., Christensen, E., Salzman, D.**, (2009). Very high efficiency solar cell modules. *Prog. Photovoltaics*, 17, 75-83.
- [7] **Friedman, D. J., Kurtz, S. R., Bertness, K. A., Kibbler, A. E., Kramer, C., Olson, J. M., King, D. L., Hansen, B. R., Snyder, J. K.**, (1995). Accelerated publication 30.2% efficient GaInP/GaAs monolithic two-terminal tandem concentrator cell. *Prog. Photovoltaics*, 3, 47-50.
- [8] **Polman, A., Atwater, H. A.**, (2012). Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics. *Nat. Mater.*, 11, 134-137.
- [9] **Ruhle, S., Segal, A., Vilan, A., Kurtz, S. R., Grinis, L., Zaban, A., Lubomirsky, I., Cahen, D.**, (2009). A two junction, four terminal photovoltaic device for enhanced light to electric power conversion using a low-cost dichroic mirror. *J. Renew. Sustain. Energy*, 1, 013106.
- [10] **Kim, S., Kasashima, S., Sichanugrist, P., Kobayashi, T., Nakada, T., Konagai, M.**, (2013). Development of thin-film solar cells using solar spectrum splitting technique. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 119, 214-218.

- [11] **Mitchell, B., Peharz, G., Siefer, G., Peters, M., Gandy, T., Goldschmidt, J. C., Benick, J., Glunz, S. W., Bett, A. W., Dimroth, F.,** (2010). Four-junction spectral beam-splitting photovoltaic receiver with high optical efficiency. *Prog. Photovoltaics*, 19, 61-72.
- [12] **Stefancich, M., Zayan, A., Chiesa, M., Rampino, S., Roncati, D., Kimerling, L., Michel, J.,** (2012). Single element spectral splitting solar concentrator for multiple cells CPV system. *Opt. Express*, 20, 9004-9018.
- [13] **Green, M. A., Ho-Baillie, A.,** (2010). Forty three per cent composite split-spectrum concentrator solar cell efficiency. *Prog. Photovoltaics*, 18, 42-47.
- [14] **Mokri, A., Emziane, M.,** (2011). A photovoltaic system with three solar cells and a band-stop optical filter. *J. Renew. Sustain. Ener.*, 3, 023113.
- [15] **Wang, X., Waite, N., Murcia, P., Emery, K., Steiner, M., Kiamilev, F., Goossen, K., Honsberg, C., Barnett, A.,** (2012). Lateral spectrum splitting concentrator photovoltaics: direct measurement of component and submodule efficiency. *Prog. Photovoltaics*, 20, 149-165.
- [16] **Xiong, K., Lu, S., Dong, J., Zhou, T., Jiang, D., Wang, R., Yang, H.,** (2010). Light-splitting photovoltaic system utilizing two dual-junction solar cells. *Solar Energy*, 84, 1975-1978.
- [17] **Escarra, M. D., Darbe, S., Warmann E. C., Atwater, H. A.,** (2013) Spectrum-splitting photovoltaics: Holographic spectrum splitting in eight-junction, ultra-high efficiency module, 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, FL, USA, June 16-21.
- [18] **Maragliano, C., Apostoleris, H., Bronzoni, M., Rampino, S., Stefancich, M., Chiesa, M.,** (2016). Efficiency enhancement in two-cell CIGS photovoltaic system with low-cost optical spectral splitter. *Opt. Express*, 24, A222-A233.
- [19] **Mohammad, N., Wang, P., Friedman, D. J., Menon, R.,** (2014). Enhancing photovoltaic output power by 3-band spectrum-splitting and concentration using a diffractive micro-optic. *Opt. Express*, 22, A1519-A1525.
- [20] **Yablonovitch, E., Cody, G. D.,** (1982). Intensity enhancement in textured optical sheets for solar cells. *IEEE Trans. Electron Devices*, 29, 300.
- [21] **Götzberger, A.,** (1981) Optical confinement in thin Si-solar cells by diffuse back reflectors, 5th Photovoltaic Specialists Conference, Kissimmee, FL, USA, May 12-15.
- [22] **Auger, P.,** (1923). Sur les rayons β secondaires produits dans un gaz par des rayons X. *C.R.A.S.*, 177, 169-171.
- [23] **Campbell, P.,** (1990). Light trapping in textured solar cells. *Solar Energy Materials*, 21, 165-172.

- [24] **Campbell, P., Green, M. A.,** (1987). Light trapping properties of pyramidally textured surfaces. *J. Appl. Phys.*, 62, 243.
- [25] **Green, M. A.,** (2002). Lambertian Light Trapping in Textured Solar Cells and Light-Emitting Diodes: Analytical Solutions. *Prog. Photovoltaics*, 10, 235–241.
- [26] **Campbell, P., Green, M. A.,** (2001). High performance light trapping textures for monocrystalline silicon solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 65, 369–375
- [27] **Mokkapatil, S., Catchpole, K. R.,** (2012). Nanophotonic light trapping in solar cells. *J. Appl. Phys.*, 112, 101101.
- [28] **Wenham, S. R., Green, M. A., Watt, M. E., Corkish, R.,** *Applied Photovoltaics*, Earthscan, London, (2007).
- [29] **Becquerel, E.,** (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires". *Comptes Rendus*, 9, 561–567.
- [30] **Adams, W. G., Day, R. E.,** (1876). The Action of light in Selenium. *Proceedings of the Royal Society of London*, 25, 113–117.
- [31] **Fritts, C.,** (1885). On the Fritts selenium cell and batteries. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, 32, 388–395.
- [32] **Einstein, A.,** (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik*, 17, 132–148.
- [33] **Chapin, D. M., Fuller, C. S., Pearson, G. L.,** (1954). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*, 25, 676–677.
- [34] **Kasten, F., Young, A. T.,** (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28, 4735–4738.
- [35] **Collins, D.G., Blattner, W.G., Wells, M.B., Horak, H.G.,** (1972). Backward Monte Carlo Calculations of Polarization Characteristics of the Radiation Emerging from Spherical Shell Atmospheres. *Appl. Opt.*, 11, 2684–2696.
- [36] **Gueymard, C.,** (2001). Parameterized Transmittance Model for Direct Beam and Circumsolar Spectral Irradiance. *Solar Energy*, 71, 325–346.
- [37] **Gueymard, C., Myers, D., Emery, K.,** (2002). Proposed Reference Irradiance Spectra for Solar Energy Systems Testing. *Solar Energy*, 73, 443–467.
- [38] **Gueymard, C.,** (2004). The Sun's Total and Spectral Irradiance for Solar Energy Applications and Solar Radiation Models. *Solar Energy*, 76, 423–453.
- [39] **Neamen, D. A.,** *Semiconductor Physics and Devices*, McGraw-Hill Education, New York, (2003).

- [40] **Shockley, W., Read, W. T.**, (1952). Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons. *Phys. Rev.*, 87, 835.
- [41] **Hall, R. N.**, (1952). Electron-Hole Recombination in Germanium. *Phys. Rev.*, 87, 387.
- [42] **Lumerical Solutions**, Inc. <http://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>
- [43] **Lumerical Solutions**, Inc. <http://www.lumerical.com/tcadproducts/device/>
- [44] **Broderick, L. Z., Albert, B. R., Pearson, B. S., Kimerling, L. C., Michel, J.**, (2015). Design for energy: Modeling of spectrum, temperature and device structure dependences of solar cell energy production. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 136, 48-63.
- [45] **Schubert, M., Gottschalch, V., Herzinger, C. M., Yao, H., Snyder, P. G., Woollam, J. A.**, (1994). Optical constants of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ lattice matched to GaAs. *J. Appl. Phys.*, 77, 3416.
- [46] **Aspnes, D. E., Kelso, S. M., Logan R. A., Bhat. R.**, (1986). Optical properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. *J. Appl. Phys.*, 60, 754-767.
- [47] **Born M. and Wolf E.**, *Principles of Optics*, Pergamon, (1980).
- [48] **Wood, R. W.**, (1902). On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum. *Proc. R. Soc. London*, 18, 269–275.
- [49] **Nevière, M., Popov, E.**, *Light Propagation in Periodic Media: Differential Theory and Design*, CRC Press, (2002).
- [50] **McPhedran, R., Maystre, D.**, (1974). A detailed theoretical study of the anomalies of a sinusoidal diffraction grating. *J. Mod. Opt.*, 21, 413–421.
- [51] **Maystre, D. and Petit, R.**, (1976). Brewster incidence for metallic gratings. *Opt. Commun.*, 17, 196–200.
- [52] **Hutley, M., Maystre, D.**, (1976). The total absorption of light by a diffraction grating. *Opt. Commun.*, 19, 431–436.
- [53] **Hutley, M. C.**, *Diffraction Gratings*, Academic Press, New York, (1982).
- [54] **Bonod, N., Neauport J.**, (2016). Diffraction gratings: from principles to applications in high-intensity lasers, *Adv. Opt. Photon.* 8, 156-199.
- [55] **Wang S. S., Magnusson, R.**, (1995). Multilayer waveguide-grating filters, *Appl. Opt.* 34, 2414-2420.
- [56] **McPhedran, R., Maystre, D.**, (1974). A detailed theoretical study of the anomalies of a sinusoidal diffraction grating. *J. Mod. Opt.*, 21, 413–421.
- [57] **Ye, J.-S., Wang, J.-Z., Huang, Q.-L., Dong, B.-Z., Zhang, Y., Yang, G.-Z.**, (2013). A single diffractive optical element implementing spectrum-splitting and

beam-concentration functions simultaneously with high diffraction efficiency. *Chinese Physics B*, 22, 034201.

- [58] **Lin, D.-F., Quan, B.-G., Zhang, Q.-L., Zhang, D.-X., Xu, X., Ye, J.-S., Zhang, Y., Li, D.-M., Meng, Q.-B., Pan, L., Yang, G.-Z.,** (2016). Spectrum-Splitting Diffractive Optical Element of High Concentration Factor and High Optical Efficiency for Three-Junction Photovoltaics. *Chinese Phys. Lett.*, 33, 094207.
- [59] **Xiao, T. P., Cifci, O. S., Bhargava, S., Chen, H, Gissibl, T., Zhou, W., Giessen, H., Toussaint, K. C., Yablonovitch, E., Braun, P. V.,** (2016). Diffractive Spectral-Splitting Optical Element Designed by Adjoint-Based Electromagnetic Optimization and Fabricated by Femtosecond 3D Direct Laser Writing. *ACS Photonics*, 3, 886-894.
- [60] **Lalanne, P., Astilean, S., Chavel, P., Cambri, E., Launois, H.,** (1998). Blazed binary subwavelength gratings with efficiencies larger than those of conventional échelette gratings. *Opt. Lett.*, 23, 1081–1083.
- [61] **Lalanne, P.,** (1999). Waveguiding in blazed-binary diffractive elements. *J. Opt. Soc. Am. A*, 16, 2517–2520.
- [62] **Lalanne, P., Astilean, S., Chavel, P., Cambri, E., Launois, H.,** (1999). Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff. *J. Opt. Soc. Am. A*, 16, 1143–1156.
- [63] **Biener, G., Niv, A., Kleiner, V., Hasman, E.,** (2002). Formation of helical beams by use of Pancharatnam-Berry phase optical elements. *Opt. Lett.*, 27, 1875–1877.
- [64] **Bomzon, Z., Biener, G., Kleiner, V., Hasman, E.,** (2002). Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings. *Opt. Lett.*, 27, 1141–1143.
- [65] **Gaylord T. K., Moharam, M. G.,** (1981). Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction. *J. Opt. Soc. Am.*, 71, 811–818.
- [66] **Lalanne, P., Hugonin, J. P., Chavel, P.,** (2006). Optical properties of deep lamellar gratings: a coupled Bloch-mode insight. *J. Lightwave Technol.*, 24, 2442–2449.
- [67] **Chang-Hasnain, C. J., Yang, W.,** (2012). High-contrast gratings for integrated optoelectronics. *Adv. Opt. Photon.*, 4, 379–440.
- [68] **Collin, S.,** (2014). Nanostructure arrays in free-space: optical properties and applications. *Rep. Prog. Phys.*, 77, 126402.
- [69] **Loewen, E. G., Popov, E.,** *Diffraction Gratings and Applications*, CRC Press, (1997).

- [70] **Kress, B. C., Meyrueis, P.,** *Applied Digital Optics: from Micro-optics to Nanophotonics*, Wiley, (2009).
- [71] **Mateus, C. F. R., Huang, M. C. Y., Deng, Y., Neureuther, A. R., Chang-Hasnain, C. J.,** (2004). Ultra-broadband mirror using low index cladded subwavelength grating. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16, 518–520.
- [72] **Astilean, S., Lalanne, P., Chavel, P., Cambriil, E., Launois, H.,** (1998). High-efficiency subwavelength diffractive element patterned in a high-refractive-index material for 633 nm. *Opt. Lett.*, 23, 552–554.
- [73] **Goeman, S., Boons, S., Dhoedt, B., Vandeputte, K., Caekebeke, K., Van Daele, P., Baets, R.,** (1998). First demonstration of highly reflective and highly polarization selective diffraction gratings (GIRO-gratings) for long-wavelength VCSELs. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10, 1205–1207.
- [74] **Glaser, T., Schroter, S., Bartelt, H., Fuchs, H.-J., Kley, E.-B.,** (2002). Diffractive optical isolator made of high-efficiency dielectric gratings only. *Appl. Opt.*, 41, 3558–3566.
- [75] **Rosenblatt, D., Sharon, A., Friesem, A. A.,** (1997). Resonant grating waveguide structures. *IEEE J. Quantum Electron.*, 33, 2038–2059.
- [76] **Magnusson, R., Wang, S. S.,** (1992). New principle for optical filters. *Appl. Phys. Lett.*, 61, 1022–1024.
- [77] **Haglund, A., Gustavsson, S. J., Vukusic, J., Jedrasik, P., Larsson, A.,** (2005). High-power fundamental-mode and polarisation stabilised VCSELs using sub-wavelength surface grating. *Electron. Lett.*, 41, 805–807.
- [78] **Zhuang, L., Schablitsky, S., Shi, R. C., Chou, S. Y.,** (1996). Fabrication and performance of thin amorphous Si subwavelength transmission grating for controlling vertical cavity surface emitting laser polarization. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 14, 4055–4057.
- [79] **Goodman, J. W.,** *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Company, Colorado, (2005).
- [80] **Oskooi, A. F., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G.,** (2010). Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Comput. Phys. Commun.*, 181, 687–702.
- [81] **Taflove, A., Hagness, S. C.,** *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech, Norwood, (2005).
- [82] **Taflove, A., Oskooi, A., Johnson, S. G.,** *Advances in FDTD Computational Electrodynamics: Photonics and Nanotechnology*, Artech, Norwood, (2013).

- [83] **King, R. R., Law, D. C., Edmondson, K. M., Fetzer, C. M., Kinsey, G. S., Yoon, H., Sherif, R. A., Karam, N. H.,** (2007). 40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells. *Appl. Phys. Lett.*, 90, 183516.
- [84] **Snaith, H. J.,** (2018). Present status and future prospects of perovskite photovoltaics. *Nat. Mater.*, 17, 372–376.
- [85] **Albrecht, S., Rech, B.,** (2017). Perovskite solar cells: On top of commercial photovoltaics. *Nat. Energy*, 2, 16196..
- [86] **Song, Z., Wathage, S. C., Phillips, A. B., Heben, M. J.,** (2016). Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications. *J. of Photonics for Energy*, 6, 022001.
- [87] **Cotal, H., Fetzer, C., Boisvert, J., Kinsey, G., King, R., Hebert, P., Yoon, H., Karam, N.,** (2009). III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. *Energy Environ. Sci.*, 2, 174-192.
- [88] **Dimroth, F., Kurtz, S.,** (2007). High-Efficiency Multijunction Solar Cells. *Advanced Inorganic Materials for Photovoltaics*, 32, 230-235.
- [89] **Takamoto, T., Kaneiwa, M., Imaizumi, M., Yamaguchi, M.,** (2005). InGaP/GaAs-based Multijunction Solar Cells. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 13, 495–511.
- [90] **Liu, M., Johnston, M. B., Snaith, H. J.,** (2013). Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature*, 501, 395–398.
- [91] **Zhou, H., Chen, Q., Li, G., Luo, S., Song, T.-B., Duan, H.-S., Hong, Z., You, J., Liu, Y., Yang, Y.,** (2014). Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells. *Science*, 345, 542-546.
- [92] **Kwak, G. Y., Kim, T. G., Hong, S., Kim, A., Ha, M. H., Kim, K. J.,** (2018). Efficiency improvement of Si quantum dot solar cells by activation with boron implantation. *Sol. Energy*, 164, 89-93.
- [93] **Essig, S., Allebé, C., Remo, T., Geisz, J. F., Steiner, M. A., Horowitz, K., Barraud, L., Ward, J. S., Schnabel, M., Descoedres, A., Young, D. L., Woodhouse, M., Despeisse, M., Ballif, C., Tamboli, A.,** (2017). Raising the one-sun conversion efficiency of III–V/Si solar cells to 32.8% for two junctions and 35.9% for three junctions. *Nat. Energy*, 2, 17144.
- [94] **Lee, H. S., Suk, J., Kim, H., Kim, J., Song, J., Jeong, D. S., Park, J. –K., Kim, W. M., Lee, D. –K., Choi, K. J., Ju, B. –K., Lee, T. S., Kim, I.,** (2018). Enhanced efficiency of crystalline Si solar cells based on kerfless-thin wafers with nanohole arrays. *Sci. Rep.*, 8, 3504.
- [95] **Geisz, J. F., Friedman, D. J., Ward, J. S., Duda, A., Olavarria, W. J., Moriarty, T. E., Kiehl, J. T., Romero, M. J., Norman, A. G., Jones, K. M.,** (2008).

40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 93, 123505.

- [96] **Philipps, S. P., Peharz, G., Hoheisel, R., Hornung, T., Al-Abbadi, N. M., Dimroth, F., Bett, A. W.**, (2010). Energy harvesting efficiency of III-V triple-junction concentrator cells under realistic spectral conditions. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94, 869-877.
- [97] **Algora, C., Díaz, V.**, (2000). Influence of series resistance on guidelines for manufacture of concentrator p-on-n GaAs solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 8, 211–225.
- [98] **Nishioka, K., Takamoto, T., Agui, T., Kaneiwa, M., Uraoka, Y., Fuyuki, T.**, (2006). Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 90, 1308–1321.
- [99] **Levinshtein, M., Rumyantsev S., Shur, M.**, *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, World Scientific, London, (1996).
- [100] **Schubert, M., Gottschalch, V., Herzinger, C. M., Yao, H., Snyder, P. G., Woollam, J. A.**, (1994). Optical constants of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ lattice matched to GaAs. *J. Appl. Phys.*, 77, 3416.
- [101] **Sze, S. M.**, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley-Interscience, New York, (1981).
- [102] **Victoria, M., Domínguez, C., Antón, I., Sala, G.**, (2012). Antireflective coatings for multijunction solar cells under wide-angle ray bundles. *Opt. Express*, 20, 8136-8147.
- [103] **Chhajed, S., Schubert, M. F., Kim, J. K., Schubert, E. F.**, (2008). Nanostructured multilayer graded-index antireflection coating for Si solar cells with broadband and omnidirectional characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 93, 251108.
- [104] **Yun, J.-H., Lee, E., Park, H.-H., Kim, D.-W., Anderson, W. A., Kim, J., Litchinitser, N. M., Zeng, J., Yi, J., Kumar M. M. D., Sun, J.**, (2014). Incident light adjustable solar cell by periodic nanolens architecture. *Sci. Rep.*, 4, 1-8.
- [105] **Yan, X., Poxson, D. J., Cho, J., Welser, R. E., Sood, A. K., Kim, J. K., Schubert, E. F.**, (2012). Enhanced Omnidirectional Photovoltaic Performance of Solar Cells Using Multiple-Discrete-Layer Tailored- and Low-Refractive Index Anti-Reflection Coatings. *Advanced Functional Materials*, 23, 583-590.

- [106] **Han, K.-S., Shin, J.-H., Yoon, W.-Y., Lee, H.** (2011). Enhanced performance of solar cells with anti-reflection layer fabricated by nano-imprint lithography. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 95, 288-291.
- [107] **Aziz, W. J., Ramizy, A., Ibrahim, K., Hassan, Z., Omar, K.**, (2011). The effect of anti-reflection coating of porous silicon on solar cells efficiency. *Optik*, 122, 1462-1465.
- [108] **Tsui, K.-H., Lin, Q., Chou, H., Zhang, Q., Fu, H., Qi, P., Fan, Z.**, (2014). Low-Cost, Flexible, and Self-Cleaning 3D Nanocone Anti-Reflection Films for High-Efficiency Photovoltaics. *Adv. Mater.*, 26, 2805-2811.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Muhammed Necip ERİM

Uyruğu : T.C.

Doğum Tarihi ve Yeri : 26.03.1989 - AĞRI

E-posta : mnerim@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans :2011, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Yüksek Lisans :2013, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

Yıl	Yer	Görev
2011-2012	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Burslu YL Öğrencisi
2012-2016	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı	ETK Uzm. Yrd.
2016-	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı	ETK Uzmanı

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Erim, M. N.,** Erim, N., Kurt, H., (2019). Spectral splitting for InGaP/GaAs parallel junction solar cell. *Appl. Opt.*, 58, 4265-4270.
- **Erim, M. N.,** Erim, N., Kurt, H., (2019). Spectral Splitting for Parallel Junction Solar Cells. ICEEE, April 16-17, İstanbul, Turkey.

- Yasa, U. G., **Erim, M. N.**, Erim, N., Girgin, M. O., Kurt, H., (2017). Design of anti-reflective graded height nanogratings for photovoltaic applications. NUSOD, July 24-28, Copenhagen, Denmark.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Kurt, H., **Erim, M. N.**, Erim, N., (2012). Various photonic crystal bio-sensor configurations based on optical surface modes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 165, 68-75.
- **Erim, M. N.**, Erim, N., Kurt, H., (2013). Optical surface modes of photonic crystals for dual-polarization waveguide. *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 11, 123–131.
- Erim, N., **Erim, M. N.**, Yılmaz, D., Kurt, H., (2016). Biosensing With Asymmetric High Refractive Index Contrast Gratings. *IEEE Sensors Journal*, 16, 7494-7499.
- Erim, N., **Erim, M. N.**, Kurt, H., (2019). An Optical Sensor Design Using Surface Modes of Low-Symmetric Photonic Crystals. *IEEE Sensors Journal*, 19, 5566-5571.
- Erim, N., **Erim, M. N.**, Kurt, H., (2017). Slow light with surface modes of photonic quasi-crystals. ICTON, July 2-6, Girona, Spain.
- Erim, N., **Erim, M. N.**, Kurt, H., (2018). Biyosensör Uygulamaları İçin Düşük Simetrikli Fotonik Kristaller. SİU, May 2-5, İzmir, Turkey.
- Erim, N., **Erim, M. N.**, Kurt, H., (2012). Polarization-Insensitive Waveguide with Optical Surface States. MMS, September 2-5, İstanbul, Turkey.
- Kurt, H., **Erim, M. N.**, Erim, N., (2011). A novel surface mode photonic crystal bio-sensor. NanoTR 7, June 27-July 1, İstanbul, Turkey.