

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPAKT FOTONİK ENTEGRE BAĞDAŞTIRICILARIN GÜNEŞ
HÜCRESİ VE YONGA ÜSTÜ UYGULAMALAR İÇİN EVRİMSEL
ALGORİTMALAR İLE TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan Alper GÜNEŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT

MAYIS 2023







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.

Hasan Alper GÜNEŞ



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOMPAKT FOTONİK ENTEGRE BAĞDAŞTIRICILARIN GÜNEŞ HÜCRESİ VE YONGA ÜSTÜ UYGULAMALAR İÇİN EVRİMSEL ALGORİTMALAR İLE TASARIMI

Hasan Alper GÜNEŞ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Eş Danışman: Prof. Dr. Mehmet ÜNLÜ

Tarih: Mayıs 2023

Bağdaşım, elektromanyetik alanlar yoluyla iki veya daha fazla sistem arasında enerji transferini içerdiğinden, elektromanyetik dalgaları manipüle etmenin önemli bir yönüdür. Yıllar geçtikçe insanlık, dalga kılavuzları, antenler ve lensler gibi cihazların geliştirilmesi yoluyla elektromanyetik dalgaları kontrol etmeyi öğrendi. Bu, çeşitli uygulamalar için daha verimli ve çok yönlü sistemler oluşturulmasını sağladı.

Daha iyi güneş hücrelerine, fiberden çipe bağdaştırıcılara ve dalga kılavuzundan dalga kılavuzuna bağdaştırıcılara olan ihtiyaç, sürdürülebilir enerji kaynaklarına, daha hızlı ve daha güvenilir iletişim ağlarına ve entegre fotonik sistemlere yönelik sürekli artan talepten kaynaklanmaktadır. Geliştirilmiş güneş hücreleri, daha temiz bir enerji geleceğine katkıda bulunabilirken, gelişmiş bağdaştırıcılar, fiber optiklerin ve fotonik entegre devrelerin sorunsuz entegrasyonunu sağlayarak daha verimli veri iletimi ve güçlü bilgisayarları ortaya çıkarabilir. Dalga kılavuzundan altaşa bağdaştırıcılar günümüze kadar üzerinde fazla durulmamış cihazlardır. Bu bağdaştırıcıları optimize etmek, THz anten dizilerinin, lenssiz görüntüleme sistemlerinin ve çip üstü laboratuvarların verimliliğini ve kompaktlığını önemli ölçüde artırabilir.

THz anten dizileri, kablosuz iletişim ve algılama uygulamalarında devrim yaratabilirken, lenssiz görüntüleme, tıbbi teşhis ve malzeme karakterizasyonunu dönüştürme potansiyeline sahiptir. Öte yandan, çip üstü laboratuvarlar, karmaşık laboratuvar süreçlerini küçültmeyi ve kolaylaştırmayı vaat ederek, taşınabilir ve son derece entegre teşhis araçlarının yolunu açacaktır.

Özetle, çeşitli cihazlarda elektromanyetik dalgaların bağdaşımını sağlayan cihazlar kritiktir ve bu cihazların tasarımında son yıllarda algoritmalar öne çıkmaktadır. Evrimsel algoritmalar olan parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritma geleneksel tasarım yöntemlerine kıyasla pek çok avantaj sağlamaktadır. İlk olarak, fotonik cihazlar genellikle çok boyutlu parametre uzaylarına sahiptir. Evrimsel algoritmalar, çok çeşitli olası çözümleri etkili bir şekilde araştırabildikleri için bu karmaşık alanlarda gezinmek için çok uygundur. İkincisi, yerel minimumlara kolayca takılabilen gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinin aksine, evrimsel algoritmaların genel optimumu bulma olasılığı daha yüksektir. Üçüncüsü, bu algoritmalar, belirli tasarım kısıtlamalarına göre kolayca uyarlanabilir. Son olarak evrimsel algoritmalar, tasarım sürecindeki gürültüye ve belirsizliklere karşı doğal olarak dayanıklıdır. Parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritmaların güçlü yönlerinden yararlanan bu tez, ilk kısımda fotonik bağdaştırıcıların önemini ve kullanılan algoritmaları anlatmaktadır. İkinci kısımda güneş hücreleri için yüzey şekillendirme ve fiberden çipe bağdaştırıcı tasarımı verilmiştir. Üçüncü kısımda ışığın çip içinde bağdaştırılmasını sağlayan cihazlar tasarlanmıştır. Son kısımda ise tezde elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve öngörüler paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Algoritmik tasarım, Genetik algoritma, Parçacık sürü optimizasyonu, Güneş hücresi, Kenar ve ızgara Bağdaştırıcı, Yönlü bağdaştırıcı, Dalga kılavuzundan alttaşa bağdaştırıcı.

ABSTRACT

Master of Science

DESIGN OF COMPACT PHOTONIC INTEGRATED COUPLERS WITH EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR SOLAR CELL AND ON-CHIP APPLICATIONS

Hasan Alper GÜNEŞ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hamza KURT

Co-Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ÜNLÜ

Date: May 2023

Coupling is an important aspect of manipulating electromagnetic waves as it involves the transfer of energy between two or more systems via electromagnetic fields. Over the years, humanity has learned to control electromagnetic waves through the development of devices such as waveguides, antennas, and lenses. This has allowed the creation of more efficient and versatile systems for a variety of applications.

The need for better solar cells, fiber-to-chip couplers and waveguide-to-waveguide couplers is driven by the ever-increasing demand for sustainable energy sources, faster and more reliable communication networks, and integrated photonic systems. Improved solar cells can contribute to a cleaner energy future, while advanced couplers enable seamless integration of fiber optics and photonic integrated circuits, resulting in more efficient data transmission and powerful computing. Waveguide to substrate coupler is a device that has not been given much attention until today. Optimizing these couplers can dramatically increase the efficiency and compactness of THz antenna arrays, lensless imaging systems, and lab-on-a-chip.

While THz antenna arrays could revolutionize wireless communication and sensing applications, they have the potential to transform lensless imaging, medical diagnostics and materials characterization. On the other hand, labs on a chip will promise to shrink and streamline complex laboratory processes, paving the way for portable and highly integrated diagnostic tools.

In summary, devices that provide the coupling of electromagnetic waves in various applications are critical and algorithms have come to the fore in the design of these devices in recent years. Particle swarm optimization and genetic algorithm, which are evolutionary algorithms, provide many advantages compared to traditional design methods. First, photonic devices often have multidimensional parameter spaces. Evolutionary algorithms are well suited to navigating these complex areas as they can effectively search a wide variety of possible solutions. Second, evolutionary algorithms are more likely to find the overall optimum, as opposed to gradient-based optimization methods that can easily stuck to local minimums. Third, particle swarm optimization and genetic algorithms can be easily tailored to specific design constraints and goals. Finally, evolutionary algorithms are inherently resilient to noise and uncertainties in the design process. Taking advantage of the strengths of particle swarm optimization and genetic algorithms, this thesis explains the importance of photonic couplers and the algorithms used in the first part. In the second part, surface shaping for solar cells and fiber to chip coupler designs are given. In the third part, devices that enable the light to be integrated within the chip are designed. In the last part, the results obtained in the thesis are interpreted and the predictions are shared.

Keywords: Algorithmic design, Genetic algorithm, Particle swarm optimization, Solar cell, Edge and grating coupler, Directional coupler, Waveguide to substrate coupler.

TEŞEKKÜR

İlk olarak, yüksek lisans sürecim boyunca bana yol gösteren, değerli vakitlerini, desteklerini ve emeklerini esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Hamza KURT'a ve Prof. Dr. Mehmet ÜNLÜ'ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Beni bugüne kadar hep destekleyen aileme teşekkür ederim. Bu süreçte bana destek veren kuzenim Serhat ACAR ve eşi Ebru ACAR'a teşekkür ederim. Yüksek lisansımda, bana bu bilimsel yolculukta ışık tutan tüm laboratuvar ve yüksek lisans arkadaşlarıma, alfabetik sıraya göre, Ahmet Canberk SONGUR, Ahmet Mesut ALPKILIÇ, Ahmet Oğuz SAKIN, Berkay NEŞELİ, Beyza AKÇAY, Ceren BABAYİĞİT, Emre BOR, Fırat Cem SAVAŞ, İpek Anıl ATALAY, Mert ÇOLAK, Mesut DEMİRCİOĞLU, Nazmi YILMAZ, Yusuf Abdulaziz YILMAZ, Yusuf Ufuk ALTINÖZ'e ve saymakla bitiremeyeceğim nicelerine teşekkür ederim. Ayrıca Dr. Ali Murat DEMİRTAŞ hocama uzun saatler süren bilim felsefesi hakkında sohbetlerimiz için teşekkür etmek istiyorum.

Bana sundukları burstan ötürü TÜBİTAK BİDEB 2210A Yurt içi Lisansüstü Burs Programı'na ve TÜBİTAK ARDEB 119E501 kodlu projede yer aldığım süre için sundukları destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, yüksek lisansım sürecinde bana sağladığı burs nedeniyle TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
KISALTMALAR	xix
SEMBOL LİSTESİ	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Kullanılan Yöntemler.....	6
1.1.1 Parçacık sürü optimizasyonu.....	6
1.1.2 Genetik algoritma.....	9
2. SERBEST UZAYDAN CİHAZA BAĞDAŞTIRMA	13
2.1 Güneş Hücrelerine Işığın Bağdaştırılması.....	13
2.1.1 Yansıma önleyici katman ile bağdaştırma performansının artırılması.....	14
2.1.2 Güve gözü yüzey şekillendirme ile bağdaştırma performansının artırılması.....	15
2.1.3 Dikdörtgen yüzey şekillendirme ile bağdaştırma performansının artırılması.....	16
2.1.4 Üçgen yüzey şekillendirme ile bağdaştırma ve tam güneş hücresi analizi.....	17
2.2 Entegre Cihazlara Işığın Bağdaştırılması.....	20
2.2.1 Kenar bağdaştırıcılar ile bağdaşım.....	21
2.2.2 Izgara bağdaştırıcılar ile bağdaşım ve tasarım.....	25
3. IŞIĞIN CİHAZ İÇİ BAĞDAŞTIRILMASI	31
3.1 Dalga Kılavuzundan Dalga Kılavuzuna Bağdaştırma ve Tasarım.....	31
3.2 Dalga Kılavuzundan Alttaşa Bağdaştırıcı Tasarımı.....	34
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1: Bazı güneş hücresi çeşitleri. (a) Silikon hücre. (b) İnce film hücre. (c) Perovskit hücre. (d) Organik güneş hücresi. 1
- Şekil 1.2: Çeşitli güneş hücresi yüzey şekillendirme yöntemleri. (a) Yansıma kaplaması. (b) Güve gözü deseni. (c) Piramit deseni . (d) Kare örgü. 3
- Şekil 1.3: Fiberden çipe bağdaştırma sağlayan metotların SEM görüntüsü. (a) Kenar bağdaştırıcı. (b) Izgara bağdaştırıcı. (c) 3B yazılmış bağdaştırıcı. 4
- Şekil 1.4: Cihaz içi bağdaştırıcılara ait şekiller ve SEM görüntüleri. (a) Yönlü bağdaştırıcı. (b) Tünel silikon viya. (c) Eğri bağdaştırıcı. (d) Gradyan bağdaştırıcı. 5
- Şekil 1.5: Alttıra bağdaştırıcının kullanılabilceği uygulamalar. (a) Terahertz anten aktif katman uyarımı. (b) lenssiz görüntüleme. (c) çip üstü laboratuvar. (d) mikro akışkan sensörler. 6
- Şekil 1.6: Parçacık sürü optimizasyonun doğadaki örneği. (a) Kuş sürüsü davranışı. (b) Çözüm uzayın sürü elemanlarının dağılımı. 7
- Şekil 1.7: Parçacık sürü optimizasyonuna ait sözde kod. 8
- Şekil 1.8: Genetik algoritmaya ait sözde kod. 9
- Şekil 1.9: Genetik algoritmada çaprazlama işleminin şematik gösterimi 11
- Şekil 1.10: Genetik algoritmaya ait mutasyon işlemi şeması. 12
- Şekil 2.1: PSO tabanlı yansıma önleyici çoklu katman optimizasyonu. (a) Simülasyon kurulumu. (b) Algoritma sonuçları. (c) Kaplamasız bir hücreye bağdaşım oranındaki iyileşmeyi gösterir dalga boyu grafiği. 15
- Şekil 2.2: PSO tabanlı güve gözü yüzey şekillendirme. (a) Simülasyon kurulumu. (b) Algoritma sonuçları. (c) Düz bir hücreye ve yansıma kaplamalı hücreye bağdaşım oranındaki iyileşmeyi gösterir dalga boyu grafiği. 16
- Şekil 2.3: PSO tabanlı dikdörtgen yüzey şekillendirme. (a) Simülasyon kurulumu. (b) Algoritma sonuçları. (c) Bağdaşım oranındaki iyileşmeyi gösterir dalga boyu grafiği. 17
- Şekil 2.4: Genel üçgen yüzey şekillendirme sistemi verilmiştir. Silisyum yeşil ve alüminyum mavi gösterilmiştir. (a) 3B görünüm. (b) 2B boyutlu görünüm. (c) Üçgen yüzey şekillendirmenin bağdaşım oranı performans karşılaştırma grafiği. 18
- Şekil 2.5: Üçgen çift taraf yüzey şekillendirmeli bağdaştırıcı. (a) Optimize edilmiş çift yüzey şekilli yapının Y-limit, Si₃N₄ yansıma önleyici kaplama, sadece üst ve sadece alt şekillendirmeli güneş hücrelerinin emilim performansları ile karşılaştırılması. (b) Optimize edilmiş çift yüzey şekillendirilmesi uygulanmış yapının Y-limit, Si₃N₄ yansıma önleyici kaplama, sadece üst ve sadece alt şekillendirmeli güneş hücrelerinin kısa devre akım performansları ile karşılaştırılması. 19
- Şekil 2.6: Fiber çip boyut uyumsuzluğu. 21

Şekil 2.7: Farklı konik kenar bağdaştırıcı türleri. (a) Doğrusal. (b) Basamak. (c) Parabolik. (d) Hiperbolik.....	23
Şekil 2.8: Çok uçlu konik bağdaştırıcı.	23
Şekil 2.9: Dalga boyu altı ızgara kenar bağdaştırıcılar.....	24
Şekil 2.10: Üst üste konik bağdaştırıcı ve 3B kenar bağdaştırıcı.	25
Şekil 2.11: Yan kesitte ızgara bağdaştırıcı değişkenlerinin gösterimi.	27
Şekil 2.12: Izgara bağdaştırıcı simülasyonunu Lumerical FDTD çözücünde görünümü.	28
Şekil 2.13: Üst oksit kaplamanın kalınlığının bağdaşım oranına etkisi.	29
Şekil 2.14: Dalga boyuna bağlı bağdaşım verimliliğinin 3B simülasyonlar sonucu grafiği.	30
Şekil 3.1: Literatürde yönlü bağdaştırıcılar. (a) eğimli dalga kılavuzları. (b) asimetrik kılavuzlar faz kontrolü. (c) mikro elektromekanik yönlü bağdaştırıcı. (d) faz değiştiren materyal yönlü bağdaştırıcı.....	32
Şekil 3.2: Genetik algoritmayla tasarlanmış simetrik ve asimetrik yönlü bağdaştırıcılar. Bağdaştırıcılara ait bant performans grafiği.	33
Şekil 3.3: Literatürdeki ara katman bağdaştırıcılar. (a) Üst üste adiyabatik gradyan bağdaştırıcı. (b) Tünel silikon viya yardımı ile ara katman bağdaştırıcı. (c) ızgara dik ara katman bağdaştırıcı.....	34
Şekil 3.4: Dalga kılavuzundan alttaşa bağdaştırıcı kurulumu. (a) Siyah dikdörtgenin SiO ₂ alttaşı ve Si substratının arayüzündeki hedef bölgeyi gösterdiği bağdaştırıcı şemasının genel 3B gösterimi. (b) tasarım bölgesinin konumlandırılmasıyla bağdaştırma şemasının xz-kesimi.	36
Şekil 3.5: Basit bir dalga kılavuzu bağdaştırıcı için SiO ₂ ve Si alttaşlarının arayüzündeki mutlak kare elektrik alan grafiği.	37
Şekil 3.6: Dalga kılavuzundan alttaşa kare bağdaştırıcılar için 3B temsili ve xz-yüzeyinde elektrik alan performans grafikleri. (a) 1×1 µm ² , (b) 2×2 µm ² , (c) 3×3 µm ² ayak izi. Farklı bölgeler siyah çizgilerle belirtilmiştir. Yeşil çizgi, bağdaştırma monitörünün konumlandırmasını gösterir.	38
Şekil 3.7: Genetik algoritma bağdaştırıcılarının 3B gösterimi ve xz-düzlemindeki elektrik alan performans grafikleri (a) 1×1 µm ² , (b) 2×2 µm ² , (c) 3×3 µm ² ayak izi için. Farklı bölgeler siyah çizgilerle belirtilmiştir. Yeşil çizgi, bağdaşım monitörünün konumlandırmasını gösterir.	39
Şekil 3.8: Dalga kılavuzundan alttaşa bağdaştırıcıya ait performans grafikleri. (a) Ayna uzaklığındaki değişime karşılık bağdaşım performansı. (b) Dalga boyundaki değişime karşılık bağdaşım performansı.	40

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Üçgen yapıya ait özet değişkenler çizelgesi.....	18
Çizelge 2.2 : Farklı kenar bağdaştırıcılar için bağdaşım oranı ve uzunluk	25





KISALTMALAR

1B	:Bir Boyutlu
2B	:İki Boyutlu
3B	:Üç Boyutlu
a.u.	:Keyfi Birim
CMOS	:Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
ÇF	:Çaprazlama Faktörü
DBAI	:Dalga Boyu Altı Izgara
DKA	:Dalga Kılavuzundan Alttıra
DKDK	:Dalga Kılavuzundan Dalga Kılavuzuna
FÇ	:Fiberden Çipe
FED	:Fotonik Entegre Devre
GA	:Genetik Algoritma
MF	:Mutasyon Faktörü
MOPSO	:Çoklu Hedef Parçacık Sürü Optimizasyonu
MZI	:Mach Zehnder İnterferometresi
PEC	:Mükemmel Elektrik İletken
PML	:Mükemmel Uyumlu Arayüzler
PSO	:Parçacık Sürü Optimizasyonu
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	:Silisyum
Si₃N₄	:Silisyum Nitrür
SMF	:Tek Modlu Fiber
SOI	:Yalıtkan Üstü Silikon
TE	:Enine Elektrik
THz	:Terahertz
TM	:Enine Manyetik
TSV	:Tünel Silisyum Viya
ZSF	:Zamanda Sonlu Farklar



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

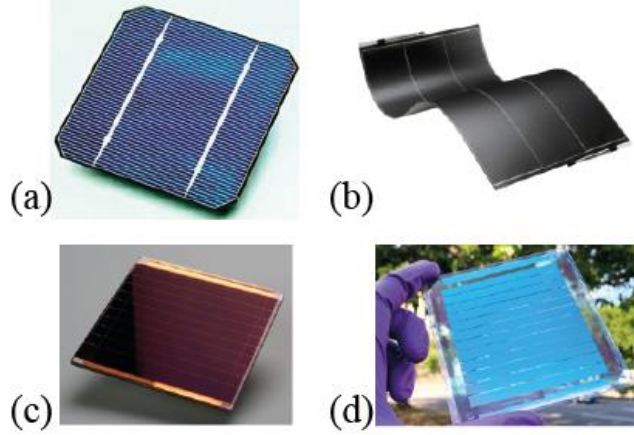
Simgeler	Açıklama
FF	Doldurma Oranı
H	Yükseklik
h_1	Aşındırma Derinliği
h_1	Üst Oksit Kalınlığı
h_2	Dalga Kılavuzu Kalınlığı
h_3	Alt Oksit Kalınlığı
k	Serbest Uzay Yayılma Dalga Sayısı
n	Kırılma İndisi
N_{eff}	İlerleyen Mod Efektif Kırılma İndisi
R	Yarıçap
Λ	Izgara Periyodu
W	Taban Genişliği
θ_i	Geliş Açısı
λ	Dalga Boyu



1. GİRİŞ

Elektromanyetik dalgalar günümüz teknolojilerinin temel fiziksel ögesidir. Eski çağlardan beri enerji ve veri iletiminde kullanılmaktadır. Örneğin, Güneş elektromanyetik ışınla Dünya'yı ısıtır ve optik dalga boylarındaki fotonlar ile insanlar görme duygusunu icra eder. Fotonlar tarafından sağlanan görsellik insan iletişiminin daimi bir parçası olmuştur. Hızla ilerleyen teknolojik gelişmeler sayesinde insanlar elektromanyetik dalgalardan pasif şekilde yararlanmak yerine onları aktif şekilde kullanabilir hâle gelmiştir.

Enerji alanında elektromanyetik dalgaların aktif şekilde kullanılmasına güneş hücreleri örnek verilebilir. İlk somut gösterimleri 19.yy'a dayanan bu yapılar, güneşten gelen elektromanyetik dalgaları bağı ya da bağımsız elektron delik ikilileri veya plazmonik etki ile soğurarak ortaya çıkan enerjiyi güneş piline bağı devrede bir elektrik akımı oluşturmak için kullanır [1]. Bu soğurmayı sağlamak için hali hazırda silikon, ince film, perovskit ve organik güneş hücreleri gibi malzeme ve yöntem çeşitleri bulunmaktadır [2-5]. Şekil 1.1 ile bu güneş hücresi çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Bazı güneş hücresi çeşitleri. (a) Silikon hücre. (b) İnce film hücre. (c) Perovskit hücre. (d) Organik güneş hücresi.

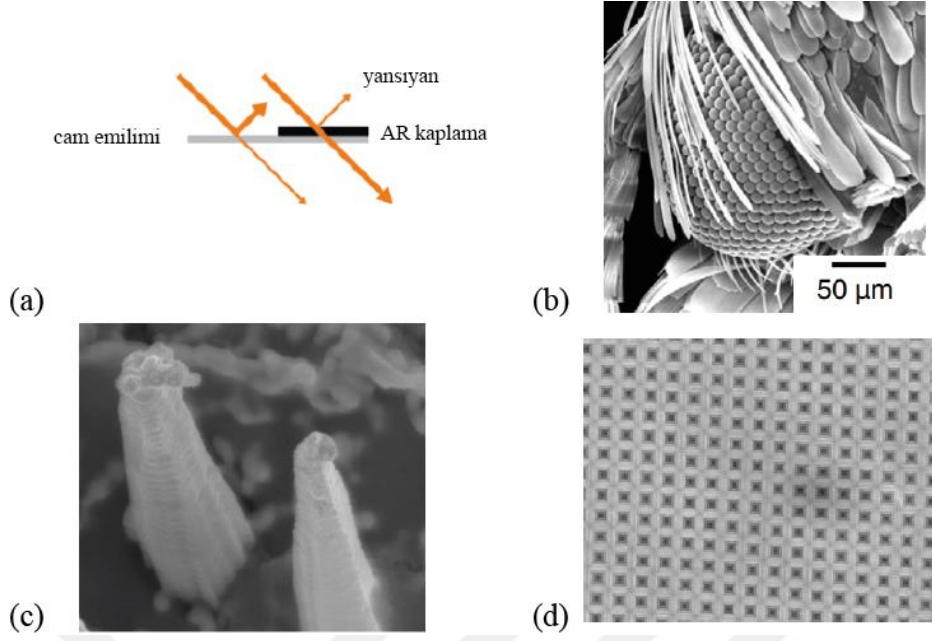
Birbirlerinden oldukça farklı görünen bu yöntemler elektromanyetik dalgaların cihaza bağdaştırılması konusunda ortak bir paydaya varır. Literatürde güneş hücreleri için elektromanyetik dalgaların bağdaştırılması üzerine çeşitli yöntemler mevcuttur. İlk yöntem bir anti yansıma kaplaması ile serbest uzaydan cihaza düşen ışığın Fresnel denklemlerine (Denklem 1.1, 1.2) dayalı olarak yansımaları minimize etmektir [6].

$$\text{dik polarizasyon: } \begin{cases} R = \left| \frac{\cos(\theta_i) - n \cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i) + n \cos(\theta_t)} \right|^2 \\ T = 1 - R \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\text{paralel polarizasyon: } \begin{cases} R = \left| \frac{\cos(\theta_t) - n \cos(\theta_i)}{\cos(\theta_t) + n \cos(\theta_i)} \right|^2 \\ T = 1 - R \end{cases} \quad (1.2)$$

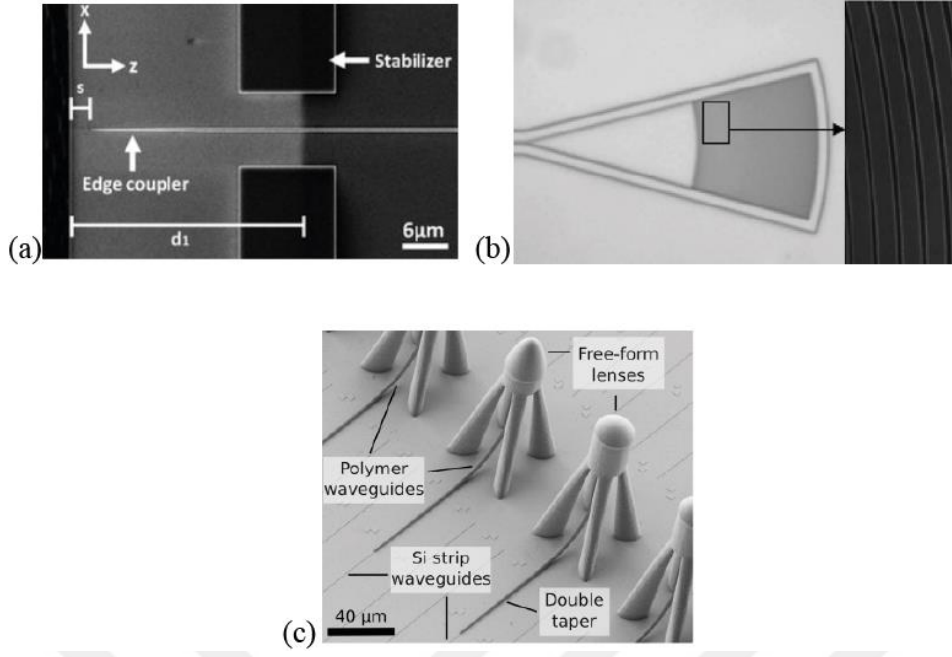
$$\theta_t = \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\theta_i)}{n} \right) \quad (1.3)$$

Denklemlerde θ_i yüzey normali ile gelen dalganın yaptığı açıyı, θ_t yüzey normali ile karşıya geçen dalganın yaptığı açıyı, n ise ikinci ortamın kırılma indisini temsil etmektedir. Fakat bahsedilen yöntem iki sebepten ötürü tek başına yeterli değildir. Birincisi Güneş'ten gelen elektromanyetik dalgalar geniş bir spektruma sahiptir ve tek bir malzemeden oluşan anti yansıma kaplaması ile dik gelen dalgayı yansıma olmaksızın bağdaştırmak mümkün olsa da bu ancak dar bir frekans bandında gerçekleşebilir. İkincisi ise Güneş'ten gelen elektromanyetik dalgaların tamamı cihaza dik bir biçimde gelmemektedir. Bu durumda Fresnel denklemlerindeki açı ve polarizasyon bağımlılığı etkisini göstermekte ve bağdaşım performansını etkilemektedir. Buradan çıkan sonuç bizi literatürde kullanılan ikinci yönteme, güneş hücresi yüzey şekillendirmesine getirmektedir. Bu yöntemde elektromanyetik dalgaların cihaza yüksek verimlilikte bağdaşması için yüzey çeşitli geometrik veya düzensiz biçimlerde şekillendirilmektedir. Literatürde yüzey şekli olarak üçgen, kare, güve gözü ve piramit gibi birçok metot vardır [2,3,7,8]. Şekil 1.2 ile bu metotlara ait elektron mikroskopu yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu yüzey morfolojilerinin araştırılması ve optimizasyonu ile güneş hücrelerinin daha da gelişip yüksek bağdaşım verimliliği ve daha yeşil bir ayak izi ile dünya geneli enerji üretimindeki payının artması beklenmektedir.



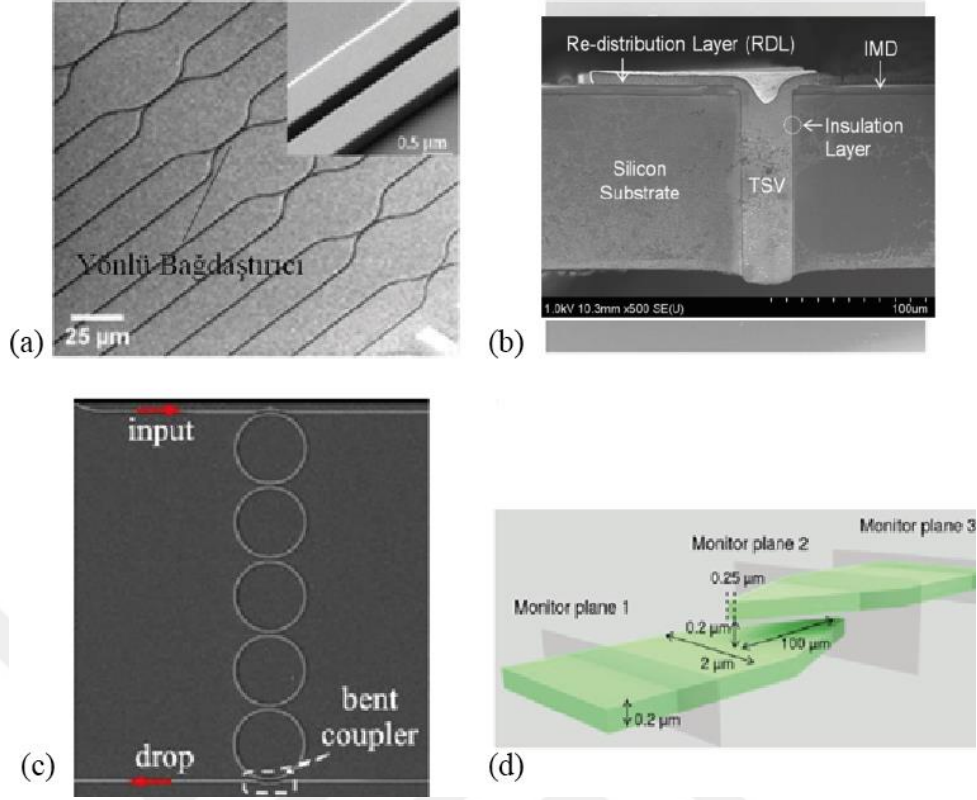
Şekil 1.2: Çeşitli güneş hücresi yüzey şekillendirmesi yöntemleri. (a) Yansıma kaplaması. (b) Güve gözü deseni [2]. (c) Piramit deseni [3]. (d) Kare örgü [7].

Veri alanında elektromanyetik dalgaların aktif şekilde kullanılmasına haberleşme ve bilgisayar sistemleri örnek verilebilir. Verileri taşıyan kiplenmiş elektromanyetik dalga paketlerinin hem cihazlar arasında hem de cihaz içindeki farklı kanallarda geçiş yapabilmesi gerekmektedir. Sinyal kaynağından yayılan verileri toplayan alıcı antenler iç elektroniklere bu sinyalleri iletebilmek için yansımayı azaltan bağdaştırıcılara ihtiyaç duyarlar. Günümüzde git gide artan hız ve veri taşıma kapasitesi ihtiyacı nedeniyle çoğu haberleşme ve bilgisayar sistemleri yüzünü elektromanyetik spektrumun optik tarafına çevirmiştir. Bu durum tekli mod ya da çoklu modda çalışabilen; merkezi yüksek indisli, çevresi daha düşük indisli camdan üretilen kablolar olan fiberlerin kullanılmasına yol açmıştır. Optik bantta gelen elektromanyetik dalga paketlerinin fiberden haberleşme ya da bilgisayar cihazlarına aktarılabilmesi için bağdaştırıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Kenar bağdaştırıcılar, ızgara bağdaştırıcılar ve üç boyutlu (3B) yazıcı ile basılmış bağdaştırıcılar literatürde bu işlevi gören fiberden cihaza bağdaştırıcı çeşitleridir [9-11]. Şekil 1.3 ile bağdaştırma yöntemlerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Kenar bağdaştırıcı, cihazla aynı düzlemde tutulan fiberden gelen veri paketini cihaz içine aktarır. Izgara bağdaştırıcı cihaz düzleminin dışında fiberden gelen veriyi cihaza bağdaştırır. 3B yazıcı ile basılmış bağdaştırıcı ise ızgara bağdaştırıcı gibi cihaz düzleminin dışından işlem yapsa da günümüz pul üzerine düzlemsel üretim tekniği ile yapılmadığından diğerlerinden ayrışır.



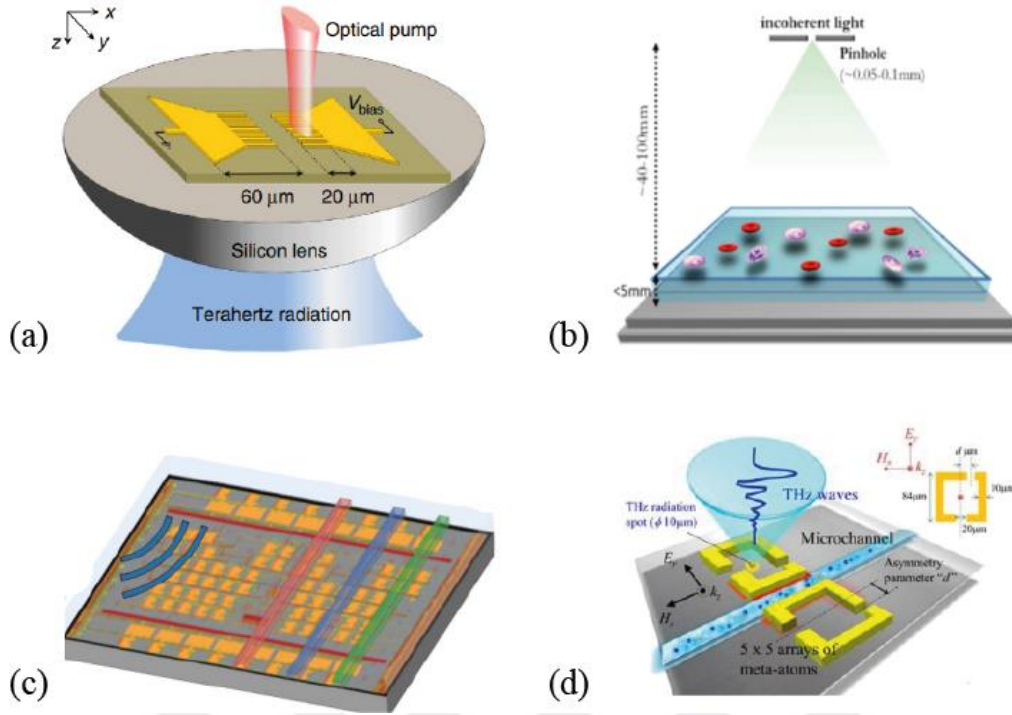
Şekil 1.3: Fiberden çipe bağdaştırma sağlayan metotların SEM görüntüsü. (a) Kenar bağdaştırıcı [9]. (b) Izgara bağdaştırıcı [10]. (c) 3B yazılmış bağdaştırıcı [11].

Cihaz içine bağdaştırmayı gerçekleştirdiğimiz elektromanyetik veri paketi cihaz içinde dalga kılavuzları aracılığı ile farklı elemanlara taşınır. Bu taşıma işleminde cihaza ait elemanlara gelen elektromanyetik veri paketinin yüksek verimle ve bozulmadan aktarılabilmesi için bağdaştırıcılara ihtiyaç vardır. Literatürde cihaz içindeki aynı katmanda farklı kısımlara sinyali aktarmak için dalga kılavuzundan dalga kılavuzuna (DKDK) başlığı altında yönlü bağdaştırıcılar ve konik bağdaştırıcılar kullanılır, farklı katmanlara aktarmak için ise katmanlar arası bağdaştırıcılar kullanılır [12,13]. Yönlü bağdaştırıcılar dalga boyu altı ızgaralardan, plazmoniklerden, eğri kılavuzlardan ve tersine tasarlanmış parçalardan yapılabilirler [14]. Katmanlar arası bağdaştırıcılar ise ızgaralardan, tünel silikon viyalardan (TSV) veya gradyan dalga kılavuzlarından yapılabilirler [15]. Şekil 1.4 ile cihaz içi bağdaştırıcıların SEM görüntüleri verilmiştir. Adiyabatik gradyan ara katman bağdaştırıcısına ait şekil ise illüstrasyon olarak verilmiştir. Yapıların mikron mertebesinde olduğu görülmektedir. Dalga boyunun silikon gibi yüksek kırılma indisli malzemelerde kırılma indisi göze alındığında serbest uzaydaki halinden 3 kat küçük olacağı göz önünde bulundurulursa mikron mertebesindeki cihazların optik dalga boylarında sofistike tasarımlar olduğu söylenebilir.



Şekil 1.4: Cihaz içi bağdaştırıcılara ait şekiller ve SEM görüntüleri. (a) Yönlü bağdaştırıcı [12]. (b) Tünel silikon viya [15]. (c) Eğri bağdaştırıcı [14]. (d) Gradyan bağdaştırıcı.

Diğer bir açıdan günümüz yonga üstü teknolojilerinden elektromanyetik dalgaların bir dalga kılavuzundan belirli altaşlara bağdaştırılmasını gerektiren uygulamalar da ortaya çıkmıştır. Terahertz (THz) anten aktif katman uyarımı, lens gerektirmeyen çip üzeri görüntüleme, çip üstü laboratuvarlar, mikro akışkan sensörler ve yonga üstü organlar bunun literatürde ihtiyaç duyulabileceği uygulamalardır [16-19]. Şekil 1.5 ile bu uygulamalara ait sistem görünümleri gösterilmiştir. Bu uygulamalar kompakt, yüksek verimli ve kolay üretilebilen bağdaştırıcılara ihtiyaç duymaktadır. Literatürde bu konu hakkında yeteri kadar araştırma olmadığından bu tezde dalga kılavuzundan altaşa (DKA) bağdaşım yapan bağdaştırıcılar da anlatılmıştır. DKA bağdaştırıcılar bir dalga kılavuzu aracılığı ile bu tez kapsamında optik banttaki sinyalleri uygun polarizasyon ile etkin altaşa efektif bir şekilde ileten bağdaştırıcı çeşididir.



Şekil 1.5: Alttaş bağdaştırıcının kullanılacağı uygulamalar. (a) Terahertz anten aktif katman uyarımı [16]. (b) lenssiz görüntüleme [17]. (c) çip üstü laboratuvar [18]. (d) mikro akışkan sensörler [19].

Bu tezde, ikinci kısımda serbest uzaydan cihaza gelen elektromanyetik dalganın bağdaştırılmasını sağlayan cihazlar anlatılmış, üçüncü kısımda ise cihaz içi farklı elemanlara ve katmanlara aktarımı sağlayan bağdaştırıcılardan bahsedilmiştir. Son kısım olan dördüncü kısımda tezin sonucu ve gelecek için öngörülere verilmiştir.

1.1 Kullanılan Yöntemler

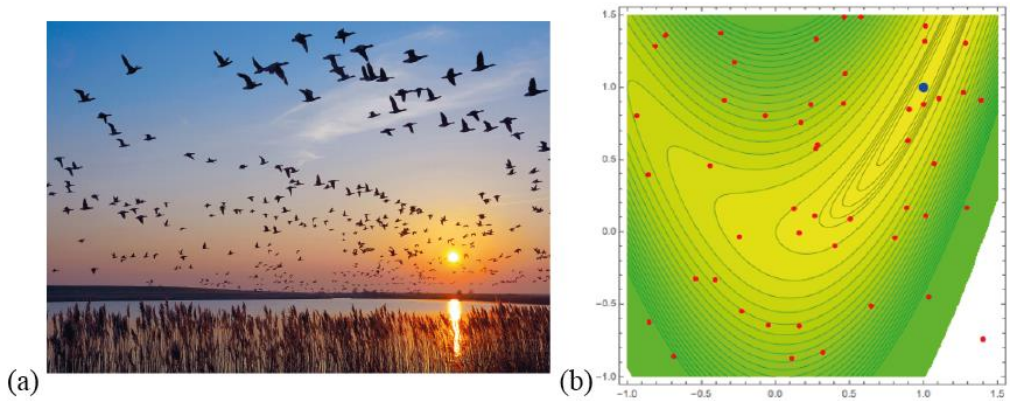
1.1.1 Parçacık sürü optimizasyonu

İlerleyiş yöntemini doğada kuş sürülerinin doğal davranışlarından esinlenen bu algoritmik yöntem; Kennedy, Eberhart ve Shi tarafından 90'lı yıllarda ortaya çıkarılmıştır [20]. Sürülerde bireyler kendi başlarına birer bilge olmayabilir, lakin organize kalabalığın bilgeliği denen fenomen grubun geniş bir alanı taraması ve aralarında veri paylaşması ile bereketli alanlara avlanmak ve konaklamak için yönelmelerine imkan sağlamaktadır.

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) önceden kural olarak koyulmuş bir performans fonksiyonuna göre sürü içinde bulunan aday çözümleri iteratif olarak daha iyi hale getirmeye çalışarak bir problemi (örneğin: bir polinomun en küçük değerini veren

değişkeni bulmak) optimize eden bir hesaplama yöntemidir. Burada parçacıklar olarak adlandırılan sürü elemanlarının her biri probleme dair potansiyel çözümlerdir. PSO, bu parçacıkları, parçacığa ait konum ve hız üzerinde genel sürü yönelimini ve yerel performansı içine alan bir matematiksel formüle göre çözüm uzayında hareket ettirerek ilgili problemi çözer. Her parçacığın hareketi, yerelde en iyi bilinen konumdan etkilenir ancak aynı zamanda, diğer parçacıklar tarafından daha iyi konumlar buldukça güncellenen, çözüm uzayındaki en iyi bilinen konumlara doğru yönlendirilir. Bu davranışın sürüyü en iyi çözümün yer aldığı bölgeye, kısaca doğada karşılığı en kaliteli avların ve en güvenli konaklamanın sağlanabileceği bölgeye doğru hareket ettirmesi beklenir.

PSO metasezgisel bir yöntemdir. Burada optimize edilen problem hakkında çok az, hatta neredeyse hiç varsayımda bulunmadığı ve olası çözümleri çok geniş alanlarda arayabildiği için böyle tanımlanır. Ayrıca PSO, optimize edilen problemin gradyanını kullanmaz. Bu, klasik optimizasyon metodlarının gerektirdiği şekilde optimizasyon probleminin türevlenebilir olmasının PSO için bir gereklilik olmadığını gösterir. Bununla birlikte, PSO gibi metasezgisel yöntemler, en iyi çözümün bulunacağını garanti etmez. Yine de araştırmacılar tarafından basit kurgusu ve doğrusal olmayan problemlerde hesaplama maliyetini düşürdüğünden çokça tercih edilmektedir [21]. Şekil 1.6 ile PSO için doğada sürü elemanlarının dağılımının örneği verilmiştir. Şekilde 1.7 ile PSO'ya ait sözde algoritma verilmiştir.



Şekil 1.6: Parçacık sürü optimizasyonun doğadaki örneği. (a) Kuş sürüsü davranışı. (b) Çözüm uzayında sürü elemanlarının dağılımı.

```

1 Start
2   Sürüye ait ilk konum ve hız değerlerini ata
3   Lideri belirle
4   i=0
5   while i < iterasyon_maksimum
6     for her bir parçacık
7       Pozisyonu güncelle
8       Performans Değerlendir
9       Parçacığa ait rekoru güncelle
10    end
11    Lideri güncelle
12    i++
13  end
14  Çıktı olarak lideri sun
15 end

```

Şekil 1.7: Parçacık sürü optimizasyonuna ait sözde kod.

Burada parçacığa ait rekor parçacığın bulunduğu çözüm uzayı konumunda ilgili problemin en küçük değerini veren kayıttır. Hız, parçacığa ait rekorun ve sürüye ait rekorun yönünde belli bir oranda ilerlemesini sağlayacak yön vektörüdür. Lider sürü içerisinde potansiyel problem çözümüne en yakın parçacıktır. Maksimum iterasyon ise döngünün sonlanma kriterini belirler. Bu iterasyon sayısı problemin zorluğuna göre ampirik olarak belirlenebilir. PSO kullanırken dikkat edilmesi gereken bir konu da rastgele bir şekilde çözüm uzayına dağılan sürü üyelerinin global çözüm noktasının etrafına denk gelmemesi ve yerel bir en iyi çözümde takılı kalmasının mümkün olmasıdır. Bu duruma bir kuş sürüsünün buldukları vadide en iyi avlanma ve barınma noktasını bulması ama bir ülke boyu göç etseler daha iyi bir noktaya gelecekken bu göçü gerçekleştirmedikleri için o vadide bulunmaya devam etmeleri örnek verilebilir.

Öte yandan çoklu hedef PSO (MOPSO), aynı anda optimize edilecek birden fazla çelişen amaç fonksiyonunun olduğu çok amaçlı optimizasyon problemleri için tasarlanmıştır. Bu problemler tipik olarak, hedefler arasındaki değiş tokuşları temsil eden Pareto cephesi adı verilen bir dizi çözüm bulmayı gerektirir. MOPSO, aramayı Pareto cephesine doğru yönlendirmeye yardımcı olmak için Pareto hakimiyeti, çeşitliliğin korunması ve özel seçim teknikleri gibi çoklu hedeflerin üstesinden gelmek için ek mekanizmalar içerir [22].

1.1.2 Genetik algoritma

Evrimsel algoritmaların bir alt sınıfı olan Genetik Algoritma (GA) oldukça popüler ve yaygındır [23,24]. Bu popülerliğin arkasında kolay kodlanır olması, ayırık parametrelerle çalışması ve mekanizmasının ilerleyiş mantığının sade olması gibi nedenler örnek verilebilir. İkilik tabanda (binary) sayılar ile çalışmak GA için zorunludur. GA ile reel sayı değişkenleri kullanarak cihaz tasarlamak arzu edildiğinde kodlama (encoding) olarak bilinen yöntemin uygulanması gerekmektedir. Bu yöntem reel sayıları ikilik tabana indirgemektedir. Bu yöntem seçilen reel sayı aralığının sonlu sayıda küçük aralıklara bölerek reel sayıları ayırık tabana indirgemiş ve GA kullanıma sunmuş olur. Bu dönüşüm yöntemi uygulandıktan sonra GA'nın çaprazlama, seçim ve varsa mutasyon adımları işlenir. Ancak, maliyet fonksiyonu değerlerinin hesaplanması için gerçek değişkenlere ihtiyaç vardır. Bu nedenle kodlama ile ikilik tabanlı sayılara çevrilen değişkenler tersi işlem olan deşifreleme (decoding) yardımıyla yeniden reel sayılara çevrilirler ve maliyet fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılırlar. Bu tezde kullanılan GA yöntemi sadece ikilik tabanlı değişkenlere sahip cihaz tasarımı için uygulamaya konulmuştur. Çözüm uzayında ara reel değerlerde iyi sonuç verecek durumları eleedikleri için bu tezdeki GA'da kodlama ve şifreleme yöntemleri yer almamaktadır. Şekil 1.8 ile genetik algoritmaya ait sözde algoritma kodu verilmiştir.

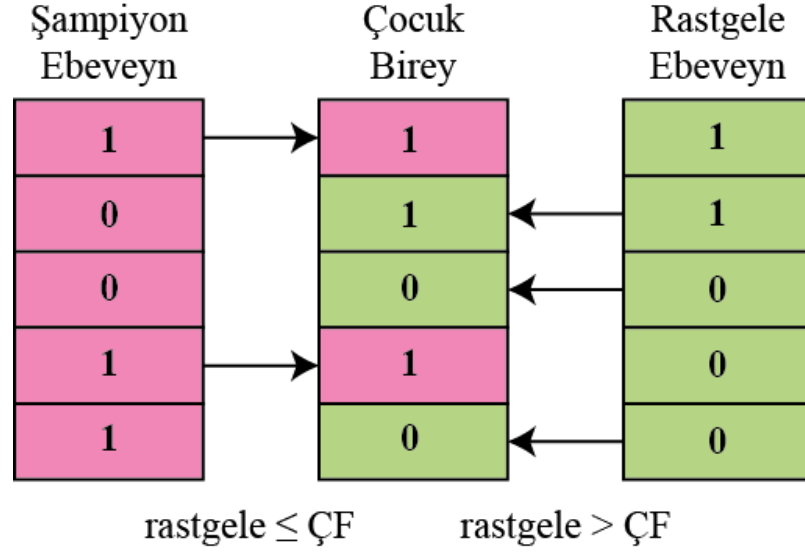
```
1 Start
2   Popülasyona ait ilk DNA havuzunu rastgele ata
3   Popülasyonu test et ve performansı belirle
4   i=0
5   while i < iterasyon_maksimum
6     for her bir birey
7       Çaprazlama
8       Mutasyon
9       Seçim
10    end
11    Popülasyonu test et ve performansı belirle
12    i++
13  end
14  Çıktı olarak popülasyon galibini sun
15 end
```

Şekil 1.8: Genetik algoritmaya ait sözde kod.

Öncelikle GA'ya ait başlangıç popülasyonunu ele alalım. Burada rastgele oluşturulan başlangıç popülasyondaki bireylerin yapısı ikilik tabanlı değişkenlere sahip

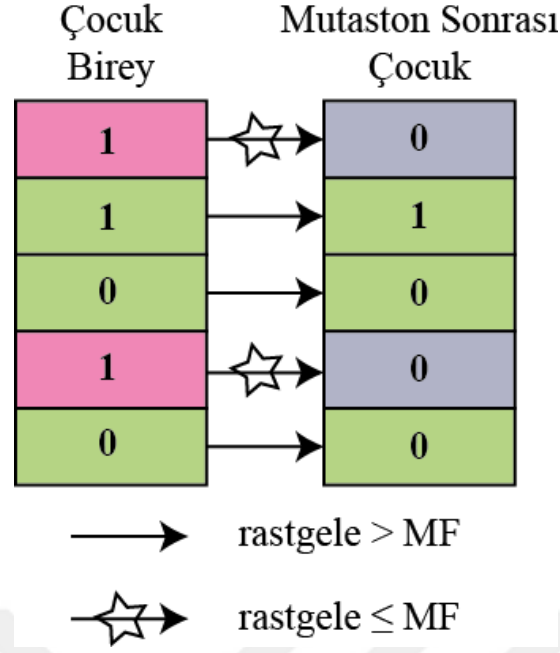
olacağından düzgün dağılımlı bir rastgelelik fonksiyonu ile bireyler kurulabilir [25]. İlk popülasyon oluştuktan sonra buradaki bireylerin iyi bir çözümüne ulaşmak istenilen problemin tanımı kapsamında performansı çıkarılır. Örneğin, bir bağdaştırıcının karşıya geçirdiği güç miktarını en yükseğe çıkarmak veya bir güç bölücüde kolların böldüğü güç oranı arasındaki farkı en düşüğe indirmek ilgili problem olabilir. Bu örneklerde performans ideal durum ve olan durum arasındaki farkın normalize edilmiş hali olabilir. Performansı bilinen ilk popülasyon artık GA'nın kod döngüsüne girmeye hazırdır. Burada öncelikle popülasyon üzerinde bireylerin genetik materyal değişimini sağlayan çaprazlama işlemi yapılır. Tek nokta çaprazlama, iki nokta çaprazlama ve grup çaprazlama gibi çeşitli çaprazlama türleri mevcuttur. Bu tez kapsamında yararlanılan GA'da iki ebeveyn kullanılır ve her iki ebeveyn sadece bir çocuk dünyaya getirebilir. Belirlenen popülasyon birey sayısına ulaşılan kadar çocuk oluşumu devam eder. Ebeveynlerden biri her zaman popülasyonun dominantı yani en yüksek performanslısıdır. Diğer ebeveyn ise popülasyonun geri kalan bireylerinden rastgele seçilir. Bu sayede her yeni nesil bir önceki şampiyonun genetik materyalini taşımaya devam edecektir ve yeni nesillerde de birey çeşitliliği galip gelemeyenlere de üreme şansı verilerek artırılacaktır.

Çaprazlama için araştırmacı $[0,1]$ aralığındaki bir sayıyı çaprazlama faktörü (ÇF) olarak seçer ve algoritma koştugu süre zarfında bu faktörün değeri sabit kalır. Çaprazlama işleminden üretilcek bir çocuk bireyin hangi genetik değişkeninin şampiyon ebeveyninden hangisinin rastgele seçilen ebeveyninden geleceğini kararlaştırmak için ÇF'den faydalanılır. İlk olarak $[0,1]$ aralığında rastgele sayılar çocuk birey için her bir değişkene üretilir. Ortaya çıkan bu sayılar ÇF ile birer birer karşılaştırılır. Eğer çocuk bireyin bir değişkeni için üretilen rastgele sayı ÇF'den büyükse çocuk bireyin ilgili değişkeninden rastgele seçilen ebeveyninden alınır. Aksi halde çocuk bireyin ilgili parametresi en iyi ebeveyninden gelir. Bu durum açıkça ÇF büyüdükçe popülasyon şampiyonunu kayırmaktadır ve bu da yerel çözümlere sıkışma olasılığını artırır [26]. Küçük ÇF ise algoritmadaki rastgeleliği artırır ve iyi bir çözüme yakınsamayı zorlaştırır. Şekil 1.9 ile çaprazlama mekanizması gösterilmiştir. Çaprazlama mekanizması görüldüğü üzere şampiyon bireyin her defasında çaprazlamada yer almasıyla ve diğer ebeveynin jenerasyon içindeki diğer bireylerden gelmesiyle işlemektedir.



Şekil 1.9: Genetik algortmada çaprazlama işleminin şematik gösterimi

Bir sonraki adım olan mutasyon doğada da karşılaştığımız nesiller arası ebeveyn bağımsız değişimlerin kaynağıdır. Bir mutasyonun yararlı mı yoksa zararlı mı olduğunu bireyin bulunduğu çevrede hayatta kalıp genetik materyalini bir sonraki aktarmasında avantaj sağlayıp sağlamadığı belirler. Mutasyon miktarının artması çaprazlama sonucu oluşmuş çocuk bireyin genetik kodunda aktarılan yapıların değişmesi ve çaprazlama işleminin anlamını yitirmesine sebep olur. Bu da dolaylı olarak yakınsama hızında düşüğe neden olabilir. Mutasyon işlemi bir zorunluluk olmadığı halde yerel en iyi çözümlerden kurtulup global en iyi çözüme ulaşmada bir kurtarıcı olabilir. Bu tezdeki GA için kullanılan mutasyon mekanizması çaprazlama ile benzerlik gösterir. İlk olarak [0,1] aralığında bir mutasyon faktörü (MF) belirlenir ve yine [0,1] aralığında rastgele sayılar çocuk birey için her bir değişkene üretilir. Üretilen bu rastgele sayılar ile MF karşılaştırılır. Eğer üretilen rastgele sayı MF'den büyükse ilgili değişkende mutasyon gerçekleşmez. Tersine durumda ise mutasyon işlemi ortaya çıkar. Mutasyon işlemi ile kastedilen durum çocuk bireyin ilgili değişkeninin ikilik tabanda olduğumuzdan tümleyenine çevrilme işlemidir. Şekil 1.10 ile mutasyon mekanizmasına ait değişim ve etkileşim şematigi gösterilmiştir. Bu şematik ile rastgele üretilen değer MF değerine mutasyon mekanizmasının işletilmesi anlatılmıştır.



Şekil 1.10: Genetik almıtmaya ait mutasyon işleml şeması.

MF seçiminin önemi algoritmanın çalışmasını iyi miktarda etkileyebilecek olmasından kaynaklanır. MF yeterince küçük olmaz ise probleme çözüm arayışımız yakınsak olmaktan çıkar. Doğada da benzer şekilde aşırı mutasyonlar canlılara faydadan çok zarar getirir. Bu tezde MF %1 civarında seçilmiştir. Çaprazlama ve mutasyon işlemleri bittikten sonra seçim işlemi uygulanır. Bireylerin performansı ile doğru orantılı seçilme kriteri gibi olan rulet yöntemi olarak adlandırılan seçim yöntemleri mevcuttur. Lakin bu tarz yöntemler şampiyon bireyin yeni nesle geçeceğini garanti etmez ve tercih edilmezler. Bu tezde bir sonraki neslin popülasyonunu oluşturacak çocuk bireyler şampiyon harici ebeveyn ile karşılaştırılarak bir sonraki nesilde yer alıp almayacakları belirlenmiştir. Ebeveynini yenen birey bir sonraki neslin popülasyonunu oluştururken yenemeyen çocuklar ise elenir. Önceki neslin şampiyonu ise otomatik olarak bir sonraki nesilde yer alır. Bu seçkinci (elitist) davranış o ana kadarki bulunmuş en iyi bireyin elenmesini önler. Popülasyondaki bireyler kendi aralarında karşılaştırılmaz. İyi performanslı olmayan bireylerin de bir sonraki nesle aktarılması yerel en iyi çözümlerden kaçabilmekte fayda sağlamaktadır. Algoritma önceden belirlenen maksimum iterasyon sayısına ulaşınca ya da uzunca bir süre en yüksek performansta bir iyileşme olmadığında sonlandırılır. Optimizasyon gradyan bazlı yapılmadığından algoritmayı birden çok kez koşturarak istenilen mertebede bir sonuca gidilip gidilmediği kontrol edilmelidir.

2. SERBEST UZAYDAN CİHAZA BAĞDAŞTIRMA

2.1 Güneş Hücrelerine Işığın Bağdaştırılması

Fotovoltaik (PV) hücreler olarak da bilinen güneş hücreleri, güneş ışığını fotovoltaik etki yoluyla doğrudan elektriğe dönüştüren cihazlardır. Bunlar, güneş ışığından gelen fotonları emebilen ve elektronları serbest bırakabilen, tipik olarak silikon yarı iletken malzemelerden yapılmıştır. Bu elektronlar, harici bir devreden geçerken bir elektrik akımı oluştururlar. Güneş hücreleri, temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak hem konut hem de ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılan güneş panellerinin birincil yapı taşlarıdır. Yıllar geçtikçe, her biri kendi avantajları ve sınırlamaları olan kristal silikon, ince film, perovskit, organik ve çok bağlantılı güneş hücreleri dahil olmak üzere çeşitli güneş pili teknolojileri geliştirilmiştir [27-30]. Farklı güneş hücresi çeşitleri haricinde var olan güneş hücrelerinin performansını artırmaya dönük yöntemler de araştırılmıştır. Bunlar amorf yapılar kullanma, kusur katkılama, yansıma kaplaması yapma, kuantum nokta katkılama ve yüzey şekillendirme [31-34]. Güneş hücrelerinin yüzeyini şekillendirerek bağdaşım performansına etki etmeye çalışan birçok çalışma literatürde geniş yer bulmuştur.

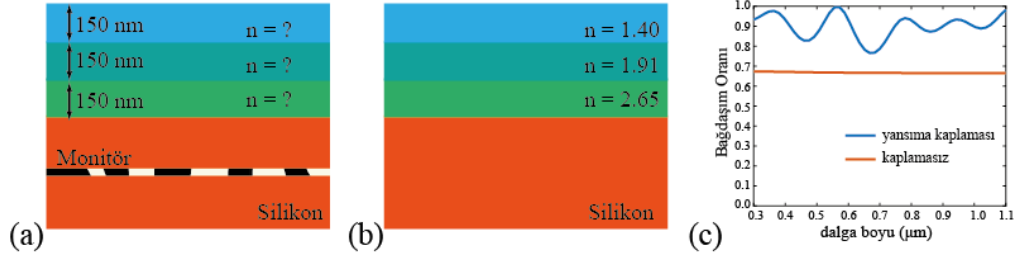
Güneş hücrelerinde yüzeyi aşındırmak için kimyasal solüsyonlar kullanan ıslak aşındırma, yüzey morfolojisinin hassas kontrolüne izin vererek yüzeyden malzemeleri çıkarmak için plazma kullanan kuru bir yöntem olan reaktif iyon aşındırma, nano küre oluşumuna izin veren nano küre litografi, lazer darbeleriyle aşındırıp şekiller ortaya çıkaran lazer aşındırma gibi çeşitli yöntemler ile yüzey şekillendirilmesi yapılabilir [35]. Yapılan bu yüzey şekillendirmesi bağdaştırma verimliliğini etkiler. Bu üretim yöntemlerinin her birinin avantajları ve sınırlamaları vardır ve yöntemin seçimi, istenen yüzey dokusu, güneş hücresi malzemesi ve genel maliyet ve karmaşıklık gibi faktörlere bağlıdır. Gelen fotonların elektrona dönüştürülme oranına kuantum efektifliği denir.

Literatürde çeşitli güneş hücresi çeşitleri mevcuttur. Tezin bu kısmında en yaygın kullanılan güneş hücrelerinden olan ince film silikon güneş hücrelerinde yüzeyi şekillendirerek bağdaştırma verimliliğinin artırılması çalışılmıştır. İnce filmlerde kalınlık mikron mertebesindedir.

İnce filmlerde yüzey şekillendirme, güneş hücrelerinin bağdaşım verimliliğini önemli ölçüde etkileyebileceğinden, literatürdeki araştırmanın önemli bir yönüdür. Bir güneş hücresinin yüzey şekli, malzemenin ışık emilimini, yansımaları ve iletimini etkileyebilen yapısını, dokusunu ve topografyasını ifade eder. Yüzey şeklini optimize ederek güneş hücresinin ışık bağdaştırma yeteneklerini geliştirmek ve dolayısıyla genel verimliliğini artırmak mümkündür. Bu, çeşitli yüzey doku teknikleri ve yüzey değişimleri kullanılarak elde edilebilir. Yüzey şekillendirme ile bağdaşımın artırılması, ışık yakalama performansını, enerji dönüşüm yüzdesini artırır ve optimum olmayan koşullarda kullanımı kolaylaştırır. Ayrıca daha ince güneş hücrelerinin kullanılabilmesini sağlayarak malzeme kullanımını azaltır. Bu faydalar direkt olarak maliyeti azaltır ve ince film güneş hücrelerinin tercih edilebilirliği artırır.

2.1.1 Yansıma önleyici katman ile bağdaştırma performansının artırılması

Literatürde güneş hücreleri üstüne tek katmanlı yansıma önleyici kaplama yardımı ile bağdaşım performansının iyileştirilebileceği gösterilmiştir [36]. Çok katmanlı yansıma önleyicilerin tasarımı ve optimizasyonu zorludur. Bu kısımda PSO kullanarak 3 katmanlı bir yansıma önleyici kaplama dizisi tasarlanmıştır. Bağdaştırma oranını test etmek için 0.3 ve 1.1 μm arası optik bölge seçilmiştir. Simülasyonlarda silikon bu optik bölgede emilimi yüksek olduğundan bağdaşımı test etmek için kırılma indisi reel ve sabit alınmıştır ($n = 3.75$) ve bağdaşım takip monitörü silikon yüzeyinden 700 nm alta konulmuştur. Amaç, gelen elektromanyetik dalganın Şekil 2.1 (a-b) ile verilen biçimde hücreye bağdaştırılmasıdır. 2B zamanda sonlu farklar (ZSF) yöntemini kullanan simülasyonlarda yatayda periyodik sınır koşulu, dikeydeyse mükemmel uyumlu arayüzler (PML) kullanılmıştır. Her bir yansıma önleyici katman 150 nm kalınlıkta konulmuştur. Çoklu hedefe sahip PSO (MOPSO) çeşitlerinde kalınlıklar da indis ile iyileştirilebilir ama bu kısımda sadece kırılma indisini optimize etmek için PSO kullanılmıştır. PSO sonuç olarak kırılma indisleri sırasıyla “2.65”, “1.91”, ve “1.40” olan 3 katman vermiştir. Bağdaşım oranının kaplamasız güneş hücresine kıyasla nasıl iyileştiği Şekil 2.1 (c)’de görülebilir.



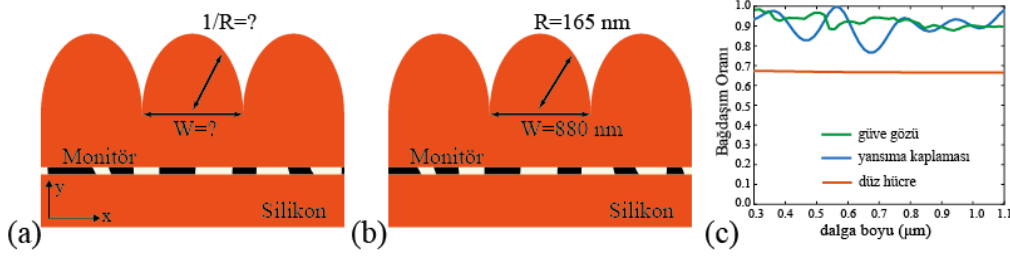
Şekil 2.1: PSO tabanlı yansıma önleyici çoklu katman optimizasyonu. (a) Simülasyon kurulumu. (b) Algoritma sonuçları. (c) Kaplamasız bir hücreye bağdaşım oranındaki iyileşmeyi gösterir dalga boyu grafiği.

2.1.2 Güve gözü yüzey şekillendirme ile bağdaştırma performansının artırılması

Güveler, gözlerinde yansıma önleyici bir kaplamaya sahip olacak şekilde evrimleşmiştir, bu da onların düşük ışık koşullarında avcılar tarafından fark edilmeden görmelerine yardımcı olur. Bilim adamları, verimliliği artırmak için bu modeli güneş hücrelerinin yüzeyine kopyaladılar. Dokulu yüzey, yansıma miktarını azaltır ve güneş hücresi tarafından emilen ışık miktarını artırarak daha yüksek bir güç çıkışına yol açar. Ek olarak, güve gözü deseni, yüzeye toz ve kir parçacıklarının yapışmasını azalttığı için güneş hücresinin kendi kendini temizleme özelliklerini de geliştirebilir. Güve gözü yapısı parabolik şekli ile literatürde güneş hücreleri için yüzey optimizasyonunda kendine yer bulmuştur [37]. Bu yüzey denklem (2.1) ile aşağıdaki formüle sahiptir.

$$y = \frac{x^2}{2R} : -\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2} \quad (2.1)$$

Burada W koniğin taban genişliğini, R koniğin eğrilik yarıçapını ve x 2B simülasyonun yürütüldüğü yatay düzlemi temsil etmektedir. Simülasyon x eksenini sınırları güve gözü yapısının oluşması için periyodiktir, y eksenini sınırları ise ekstra yansıma olmasını önlemek için PML olarak belirlenmiştir. PSO için W , 200 nm ile 1000 nm arasına sınırlanmış; R ise 50 nm ile 500 nm arasına sınırlanmıştır. Şekil 2.2 ile PSO sonucunda ortaya çıkan yapı ve bağdaşım oranı grafiği görülmektedir. Bağdaşım oranı düz bir silikon ince filme göre oldukça yüksektir. Simülasyonlarda silikon kayıpsız olarak ($n = 3.75$) alınarak güve gözünün bağdaşım davranışı incelenmiştir. Güve gözü üretim olarak zorlayıcı olsa da yüksek bağdaşım verimi ile çoklu katman yansıma önleyiciden iyi iş çıkarmıştır. PSO sonuç olarak en iyi bağdaşım için güve gözünde $W = 0.880 \mu\text{m}$ ve $R = 0.165 \mu\text{m}$ olarak bulmuştur. Şekil 2.2 (c) ile güve gözünün hem düz hem de yansıma kaplamalı güneş hücresinden genelde iyi bağdaşım oranına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.2: PSO tabanlı güve gözü yüzey şekillendirme. (a) Simülasyon kurulumu. (b) Algoritma sonuçları. (c) Düz bir hücreye ve yansımaya kaplamalı hücreye bağdaşım oranındaki iyileşmeyi gösterir dalga boyu grafiği.

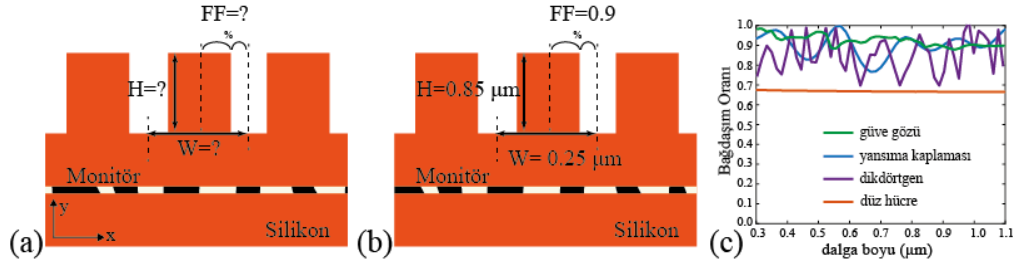
2.1.3 Dikdörtgen yüzey şekillendirme ile bağdaştırma performansının artırılması

Dikdörtgen şekli her ne kadar doğada kendini canlılar üstünde genelde göstermese de kristal uzaysal dizilimlerinde altın, silisyum ve sodyum klorür gibi element ve bileşiklerde kendini gösterir. Bilim insanları, verimliliği artırmak için dikdörtgen modeli güneş hücrelerinin yüzeyine uygulamışlardır [38]. Doku uygulanmış yüzey, bağdaştırma miktarını artırır ve güneş hücresi tarafından soğurulan enerji miktarını yükselterek daha iyi bir çıkış gücü sağlar. Dikdörtgen yüzey şekli aşağıdaki (denklem 2.2) formüle sahiptir.

$$y = H : -\frac{W*FF}{2} \leq x \leq \frac{W*FF}{2}, \text{ diğ}er y = 0 \quad (2.2)$$

Burada W birim hücre taban genişliği, H dikdörtgen yüksekliği, FF (doldurma oranı) dikdörtgenin taban genişliğinden alacağı payı ve x 2B simülasyonun yürütüldüğü yatay düzlemi temsil etmektedir. Simülasyon x eksenini sınırları dikdörtgen hücre yapısının oluşması için periyodiktir, y eksenini sınırları ise ekstra yansımaya önlemek için PML olarak belirlenmiştir. PSO için W ve H , 200 nm ile 1000 nm arasına sınırlanmış; FF ise 0.1 ile 1 oranı arasına sınırlanmıştır. Şekilde PSO sonucunda ortaya çıkan yapı ve bağdaşım oranı grafiği görülmektedir. Bağdaşım oranı düz bir silikon ince filme göre oldukça yüksektir. Simülasyonlarda silikon kayıpsız olarak ($n = 3.75$) alınarak bağdaşım davranışı incelenmiştir. Dikdörtgen üretimi olarak dik duvarlardan dolayı meydan okuyucudur. PSO sonuç olarak en iyi bağdaşım için dikdörtgen yüzey şeklinde $W = 0.25 \mu\text{m}$, $H = 0.85 \mu\text{m}$ ve $FF = 0.9$ olarak bulunmuştur. Şekil 2.3'te görüleceği üzere, dikdörtgen bağdaştırıcı ortalama olarak güve gözünden ve yansımaya kaplamasından kötü bağdaşım performansı ortaya koymuştur. Bu dikdörtgene ait düz yüzeylerin efektif olarak normal bir güneş hücresine yakınsamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bir sonraki kısımda üçgen şekil bağdaştırma

incelenmiştir. Bu bağdaştırma biçimi kademeli indis geçişini daha iyi sağlayabilmektedir.



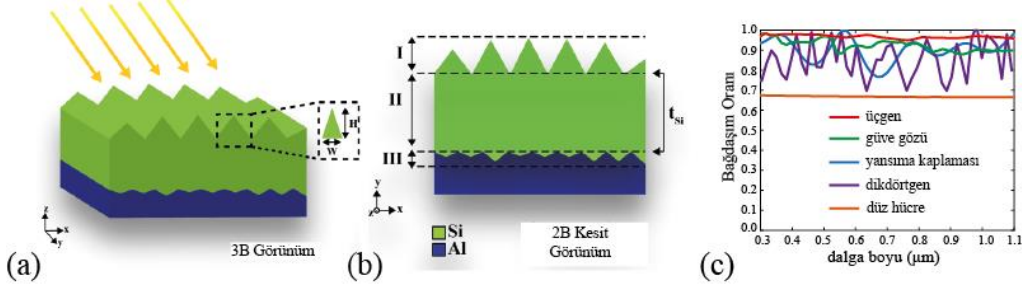
Şekil 2.3: PSO tabanlı dikdörtgen yüzey şekillendirme. (a) Simülasyon kurulumu. (b) Algoritma sonuçları. (c) Bağdaşım oranındaki iyileşmeyi gösterir dalga boyu grafiği.

2.1.4 Üçgen yüzey şekillendirme ile bağdaştırma ve tam güneş hücresi analizi

Bu kısımda ışık tuzaklama yapısını da aynı zamanda bağdaştırma kısmıyla beraber iyileştirmek istediğimizden MOPSO kullanılmıştır. PSO'dan farklı olarak birden fazla hedefi art arda arayıp iyileştirebilen MOPSO ile güneş hücresi performansında uluslararası bir dergide yayınlanan bir makale çıkarılmıştır [39]. Soğurma ve kısa devre akımı hesabının da yapılmasıyla tam güneş hücresi analizi gerçekleştirilmiştir.

Üçgen şekli kademeli bağdaşımı sağlamakta iyi bir yüzey şekillendirme yöntemi olduğu ve kızılötesine yakın bölgede foton tuzaklamayı artırmak için birkaç mikron boyunda literatürde yer bulduğu için bu kısımda incelenmiştir [40]. Literatürde kristal yapı silikon (c-Si) için çift katmanlı nano konik kullanarak $34.6 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ civarı bir kısa devre akımı elde eden çalışmalar mevcuttur [41].

Bu tezde güneş hücresi kalınlığı $1 \mu\text{m}$ seçilmiştir ve $3 \mu\text{m}$ 'lik bir ende algoritmanın üçgen yükseklik/genişlik optimizasyonu yapması istenmiştir. Şekil 2.4 ile yapı şematiği verilmiştir. Bağdaşım kısmı, soğurma kısmı ve tuzaklama kısmı olarak üç farklı bölge gösterilmiştir. Şekil 2.4 (c) ile sadece optimize edilmiş üst üçgen bağdaştırma yüzey şeklinin yansımaya kaplaması, güve gözü ve dikdörtgen şekillendirmeyi nasıl alt ettiği gösterilmiştir. Üçgen yüzey şekillendirme verilen dalga boyu aralığı boyunca 0.94 bağdaştırma oranının üstünde kalmıştır.



Şekil 2.4: Genel üçgen yüzey şekillendirme sistemi verilmiştir. Silisyum yeşil ve alüminyum mavi gösterilmiştir. (a) 3B görünüm. (b) 2B boyutlu görünüm. (c) Üçgen yüzey şekillendirmenin bağdaşım oranı performans karşılaştırma grafiği.

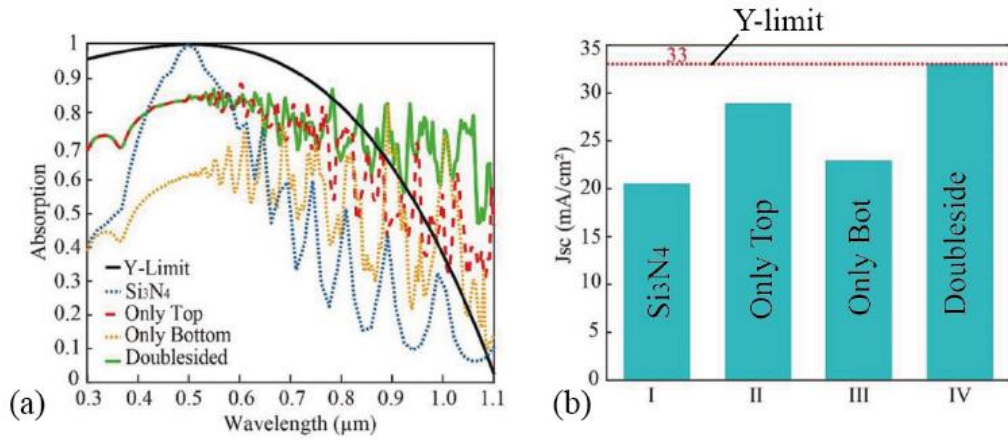
MOPSO öncelikle bağdaştırma kısmını optimize etmiştir. Üçgen yükseklikleri 0.03-0.5 μm aralığında, taban genişliği ise 0.01-3 μm aralığında sınırlanmaktadır. MOPSO için 10 parçacık ve 10 iterasyon kullanılmıştır. Algoritma üst üçgenler için 540 nm genişliğe ve çeşitli yükseklik değerlerine ulaşmıştır.

Alt tuzaklama üçgenleri bağdaştırma kısmının optimizasyonu bitince ele alınmıştır. Tuzaklama üçgen yükseklikleri için algoritma 350 nm genişliğe ve çeşitli yükseklik değerlerine ulaşmıştır. Birim güneş hücresi sabit 3 μm genişlikte olduğundan üst kısımda 6 ve alt kısımda toplam 9 adet üçgen bulunmaktadır. Kenara sığmayan üçgen kesilmiştir. Periyodik sınır koşulunun ötürü, her bir tekrarlama bu kesik üçgen mevcudiyetini korumaktadır. Üst üçgen için son kesik üçgenin tabanı 0.3 μm genişliktedir, alt kesik üçgenin tabanı ise 0.2 μm genişliktedir. Ortaya çıkan yapı için değişkenlerin özeti Çizelge 2.1 ile verilmiştir.

Çizelge 2.1 Üçgen yapıya ait özet değişkenler çizelgesi.

	Üçgen Sıra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Üst	Yükseklik (μm)	0.29	0.40	0.43	0.42	0.37	0.15	-	-	-
	Genişlik (μm)	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.3	-	-	-
Alt	Yükseklik (μm)	0.06	0.06	0.11	0.05	0.06	0.06	0.11	0.11	0.12
	Genişlik (μm)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.2

Yapı 2B ZSF yöntemi ile analiz edilmiştir. Polarize olamamış güneş ışığı spektrumunda emilim performansı grafiği Şekil 2.5 ile verilmiştir. Bağdaşım performansı dolaylı olarak emilim performansına ve kısa devre akım miktarına bağlı bir şekilde görülmektedir. Bağdaşımı yüksek ve tuzaklamayı iyi yapan bir güneş hücresi emilim ve kısa devre akımında iyi performans gösterecektir. Şekilde tasarlanan yapı Yablonoviç limitine (Y-limit), tek katman (Si_3N_4) yansıma kaplamasına, sadece üstte şekillendirme ve sadece altta şekillendirmeye göre karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere verilen tüm karşılaştırma örneklerinin performansında çift tarafı şekillendirilmiş optimize yapı galip gelmiştir.



Şekil 2.5: Üçgen çift taraf yüzey şekillendirmeli bağdaştırıcı. (a) Optimize edilmiş çift yüzey şekilli yapının Y-limit, Si_3N_4 yansıma önleyici kaplama, sadece üst ve sadece alt şekillendirmeli güneş hücrelerinin emilim performansları ile karşılaştırılması. (b) Optimize edilmiş çift yüzey şekillendirilmesi uygulanmış yapının Y-limit, Si_3N_4 yansıma önleyici kaplama, sadece üst ve sadece alt şekillendirmeli güneş hücrelerinin kısa devre akım performansları ile karşılaştırılması.

Yansıma kaplamasında 68 nm kalınlıkta silisyum nitrit kullanılmıştır ve bu kaplama 550 nm dalga boyunda yansımayı en aza indirmektedir. Lakin diğer dalga boylarında iyi bir bağdaşım performansı ortaya koymamaktadır. Optimize edilen yapının sadece bağdaşım üçgenleri bile kısa dalga boylarında tam yapıya yetişmiştir fakat uzun dalga boylarında performansı azalmıştır. Alt üçgenlerin eklenmesiyle tuzaklama artımı kazanan tam yapı neredeyse Y-limiti yakalamıştır ve $32.78 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ kısa devre akımına ulaşmıştır. Bu limit $33 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ olarak Eli Yablonoviç tarafından 1982'de çıkarılmıştır. Basit bir ifadeyle, Yablonoviç limiti, optimum ışık tutma özelliklerine sahip bir güneş hücresinin, ışık tutma özelliği olmayan bir hücreye kıyasla ışık miktarının dört katına kadar emebileceğini belirtir. Bu artan emilim, güneş hücresi için

daha yüksek bir genel verimliliğe yol açar. $4n^2$ sınırı, şekillendirmeye, yansıma önleyici kaplamalar ve fotonik kristaller gibi çeşitli ışık yakalama tekniklerinin geliştirilmesine rehberlik eden, yüksek verimli güneş pillerinin tasarımında önemli bir ilkedir [42].

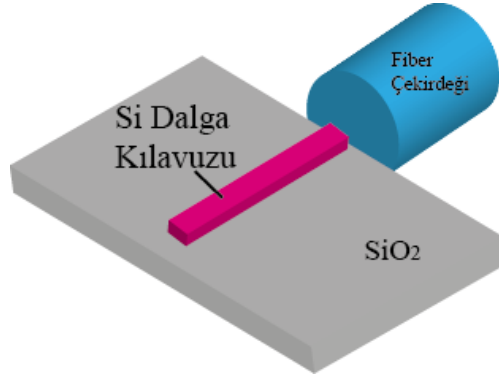
2.2 Entegre Cihazlara Işığın Bağdaştırılması

Entegre cihazlara ışığın bağdaştırılması, optik fiberleri fotonik entegre devrelere veya optoelektronik çiplere bağlayan ve yüksek verimli optik sinyal aktarımını kolaylaştıran çok önemli bir süreçtir. Bu bağlantı, veri merkezleri, telekomünikasyon ve yüksek performanslı bilgi işleme gibi uygulamalarda yüksek hızlı veri iletimi, enerji verimliliği, ölçeklenebilirlik, düşük gecikme süresi ve gelişmiş algılama yetenekleri için kayda değer bir önem taşımaktadır [43]. Birden fazla optik bileşenin tek bir çip üzerinde entegrasyonu, fotonik ve optoelektronik teknolojilerin ilerlemesi için gerekli olan ultra yüksek cihaz yoğunluğu ve işlevselliğini sağlar. Sonuç olarak, entegre cihazlara ışığın bağdaştırılması, çeşitli endüstrilerde gelecekteki yeniliklerin yolunu açarak iletişim, algılama ve bilgi işlem uygulamalarında önemli gelişmeler sağlar.

Işığın entegre cihazlara bağdaştırılması önemli bir zorluktur. Fiberden serbest uzaya çıkan profil Gaussian'dır, optik entegre dalga kılavuzlarında ise dalga kılavuzu modları ilerler. Bu mod kaybı olarak adlandırılan duruma yol açar. Işığın entegre cihaza bağdaştırmak için literatürde yoğun olarak iki yöntem kullanılır. Bunlardan birincisi kenar bağdaştırıcılar, ışığı çip düzleminde yatay tutarak çipe kenardan giriş yapmayı sağlayan çeşitli bağdaştırıcı tiplerinin çatısını oluşturur. İkincisi ise ızgara bağdaştırıcılarıdır. Işığın çip düzlemine dik ve dike yakın açılarda tutarak bağdaştırmayı sağlayan bu bağdaştırıcı ailesi farklı tipte ızgara bağdaştırıcıları içerisinde barındırır. Bunların harici olarak 3B yazıcı ile yazılmış lens benzeri entegre elemanlar ile bağdaşım yapılabilir [44]. Bu tez kapsamında klasik düzlemsel bütünleyici metal oksit yarı iletken (CMOS) üretim teknikleri sınırları içerisinde kalarak silisyum (Si) CMOS entegre olabilir Si fotonik platformları ile optik bağdaşım elemanları incelenmiş ve tasarlanmıştır. Si fotonik platformları yüksek kırılma indisi farkına sahip olduğu ve ışığın bir yerde yoğun tutulmasını kolaylaştırdığı, Telekom bandında kayıpsız olduğu ve CMOS entegre olup tekrarlanabilirliği ve keskin üretimi desteklediği için çokça tercih edilir.

2.2.1 Kenar bağdaştırıcılar ile bağdaşım

Elektronik entegre devrelerin boyutu fiziksel sınıra kadar küçüldükçe ve yüksek veri hızlarına olan talep muazzam bir şekilde arttıkça, fotonik entegreler, doğasında var olan yüksek hız ve düşük güç tüketimi nedeniyle yavaş yavaş piyasada ana aktör olmaktadır. Silisyum elementi, yüksek kırılma indisinden yararlanan kompakt cihazlar oluşturma potansiyeline sahiptir ve silikon bazlı cihazlar, mevcut olgun ve standartlaştırılmış CMOS platformuyla iyi uyumludur. Bu nedenle silikon, yeni fotonik entegre devreler (FED) için umut verici bir malzemedir ve silikon fotonuğu son yıllarda sıcak bir araştırma konusu olmuştur [45]. Karmaşık optik iletim sistemlerinde, fiber ve FED'ler arasındaki optik ara bağdaştırıcılar tüm sistemde sıklıkla meydana görülür, bu nedenle verimli fiber çip bağdaşımı sistem performansı için dikkat edilmesi gereken önemli bir faktördür. Bugüne kadar, Si dalga kılavuzunun özellik boyutu onlarca nanometre kadar küçük olabilirken, tek modlu bir fiberin (SMF) tipik çapı yaklaşık 100 μm ve çekirdek çapı 5 μm 'ye yakın olabilmektedir [46]. Şekil 2.6 ile bir fiber çekirdeği ile Si dalga kılavuzu arasındaki, fiber çekirdekte yayılan ışık doğrudan Si dalga kılavuzuna girdiğinde önemli optik iletim kaybına neden olan büyük boyut uyumsuzluğunu gösterilmektedir. Fiberden çipe bağdaştırıcılar, optik ara bağlantılarda bu sorunla başa çıkmak için bir tür anahtar fotonik bileşendir.



Şekil 2.6: Fiber çip boyut uyumsuzluğu.

Fiberden çipe bağdaştırıcılar, optik ara bağlantıların gerekli olduğu birçok uygulama senaryosunda uygulanabilir. Işığı iletebilen ve yönlendirebilen pasif cihazlardır. Çalışma mekanizması esas olarak fotonik dalga kılavuzlarında modun iletilmesi ve dönüştürülmesidir. Genel olarak, fiberden çipe birleştirmenin iki ana yaklaşımı vardır: dikey bağdaştırma (ızgara bağdaştırıcılar) ve kenar bağdaştırma [47]. Dikey bağdaştırma için çoğunlukla ızgaralı bağdaştırıcılar kullanılır ve yüksek bağdaşım verimliliği sağlamak için fiber, cihazın üzerine dikey olarak veya belirli bir derecede

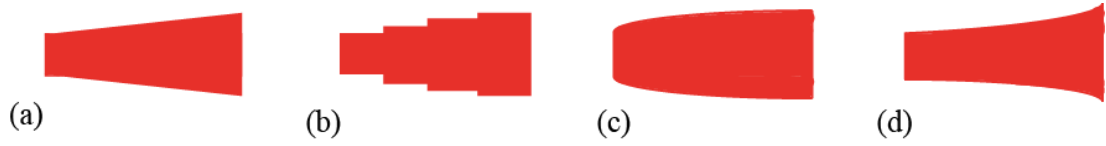
hafif eğimli olarak yerleştirilir. Izgara bağdaştırıcılar, kompakt boyut, pul seviyesi test kabiliyeti ve esnek bağdaştırma konumu gibi bazı önemli avantajlara sahipken, tipik olarak 3 dB'nin altında nispeten düşük bağdaşım verimliliği, dar bant genişliği ve yüksek dalga boyu hassasiyeti gibi bazı dezavantajları da vardır. Fiberin tipik olarak pul yan yüzeyine yerleştirildiği ve yatay olarak Si dalga kılavuzları ile hizalandığı rejimine gelince, kenar bağdaştırıcılar yaygın olarak uygulanır [48]. Kenar bağdaştırıcılar oldukça yüksek bağdaşım verimliliği, geniş bant genişliği ve polarizasyon bağımsızlığı elde edebilir, ancak ızgara bağdaştırıcılara göre nispeten daha büyük ayak izi, sabit cihaz konumu ve bağdaştırma yüzeyinin daha katı gereklilikleri gibi bazı sınırlamaları vardır.

En basit kenar bağdaştırıcı bir dalga kılavuzu olmak üzere kenar bağdaştırıcıların birçok çeşidi vardır. Ters konik kenar bağdaştırıcılar uygulamada sıkça kullanılan önemli bağdaştırıcı örneğidir. Ters konikler, fiberleri fotonik dalga kılavuzlarına bağlayan, ışık yayılma yönü boyunca kademeli olarak genişleyen bir dalga kılavuzuna sahiptir. Modal dağılım, mod sırası ve dalga kılavuzu yapısından etkilenir ve her modu yalnızca belirli kesit alanları destekleyebilir. Temel enine elektrik (TE) modu, 200 nm yüksekliğinde ve 500 nm genişliğindeki tipik silikon fotonik dalga kılavuzu boyutlarıyla optik iletişimde yaygın olarak kullanılır.

Çok küçük veya çok büyük kesit alanları, mod dağılımı sorunlarına neden olabilir veya istenmeyen yüksek dereceli modları harekete geçirebilir. Koniklikler, mod dönüşümünü ve boyut değişimini destekler; ters konikler, gelen modu tamamen sınırlayamayan dar bir uca sahiptir ve elektromanyetik alanın konik ucun etrafında dağılmasına neden olur. Konik genişlik arttıkça tüm modu destekleyebilir ve sınırlayabilir. Son olarak, fiber çekirdeğe hizalanmış bir ters konik kenar bağlayıcı, büyük bir modu optik fiberden fotonik dalga kılavuzlarında sıkıştırılmış kılavuzlu bir moda dönüştürebilir [49].

Kenar bağdaştırıcı performansını değerlendirirken, anahtar parametreler arasında bağdaşım verimliliği, cihaz ayak izi, çalışma bant genişliği, fabrikasyondan sapma toleransı ve yanlış hizalama toleransı bulunur. Işık iletimi ve mod dönüşümünden sonra çıkış giriş güç oranını gösteren bağdaşım verimliliği, yüksek performanslı optik bağdaştırıcılar tasarlamak için çok önemlidir. Cihaz ayak izi entegrasyon yoğunluğu, fabrikasyon fizibilitesi ve paketlenme zorluğu için önemlidir. Kompakt cihazlar maliyetin düşürülmesi ve entegrasyonun iyileştirilmesi için arzu edilir. Kenar

bağdaştırıcılar, kırınım etkilerinden ziyade ışık yayılma özelliklerine güvenmeleri nedeniyle doğal olarak geniş bir çalışma bant genişliğine sahiptir. Bu, dalgalanmalara karşı çok az hassasiyetle geniş bir dalga boyu aralığında verimli ve istikrarlı bir şekilde çalışabilecekleri anlamına gelir. Ek olarak, tek konik kenarlı bağdaştırıcılar yapısal basitliğe ve simetriye sahiptir, bu da bunların iyi üretim sapma toleransı ve yanlış hizalama toleransı ile imal edilmesini kolaylaştırır. Ters konikler doğrusal olmak zorunda değildir. Literatürde birden fazla konik profil çeşidi vardır [50,51]. Bu çeşitlerden bazıları Şekil 2.7 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Farklı konik kenar bağdaştırıcı türleri. (a) Doğrusal. (b) Basamak. (c) Parabolik. (d) Hiperbolik.

Bir diğer kenar bağdaştırıcı türü olan çoklu uç konik bağdaştırıcılar modal örtüşmeyi artırmak için sıkça kullanılan bağdaştırıcılardandır [52]. Şekil 2.8 ile örnek gösterim verilmiştir. Birden fazla ucun kullanılması, beklenen bağdaşım verimliliğini oldukça küçük bir ayak izi içinde gerçekleştirmek için yüksek derecede tasarım özgürlüğü sağlayabilir. Çok uçlu koniğin toplam uzunluğu genellikle $100 \mu\text{m}$ 'nin altındadır [52]. Örneğin, iki bitişik sivri uç arasında dar bir yarı oluşturulur ve yarığın uç genişliği tipik olarak tüm yapının özellik boyutudur ve birkaç on nanometre değerindedir. Bu temelde, zaman alıcı ve pahalı olma pahasına tek adımlı bir işlemle son derece hassas ve kullanışlı olan EBL modelleme yoluyla çok uçlu bir inceltme yaygın olarak hazırlanır. Fiberden çipe optik bağdaşım genel uygulamalara ek olarak, esnek uç genişliğine ve uç numaralarına sahip çok uçlu konikler, çipten çipe iletişim veya lazerden çipe optik ara bağlantı altında da çalışabilir.



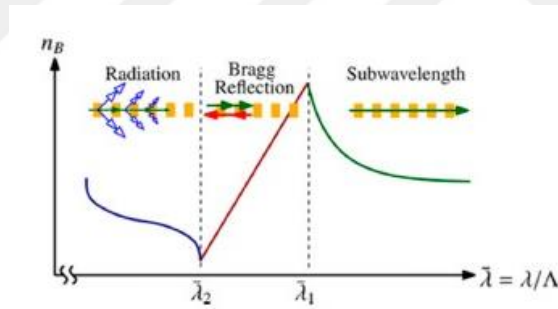
Şekil 2.8: Çok uçlu konik bağdaştırıcı.

Bir diğer kenar bağdaştırıcı türü olan dalga boyu altı ızgara (DBAI) yapıları bağdaştırıcılar da literatürde mevcuttur. DBAI kavramı, Kanadalı [53] araştırmacılar tarafından milenyumun başında silikon fotonik dalga kılavuzu tasarımında yenilikçi

bir kavram olarak önerildi ve yaygın olarak benimsendi [54]. Izgara formülasyonu aşağıdaki denklemde verilmiştir.

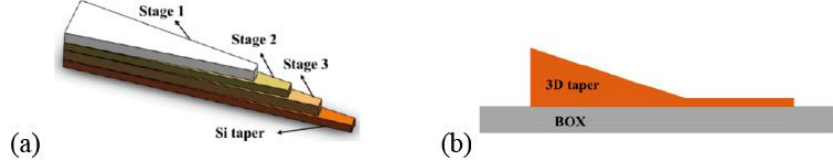
$$\Lambda < \frac{\lambda}{2N_{eff}} \quad (2.3)$$

Denklemde λ dalga boyunu, Λ ızgara periyodunu, N_{eff} ise ilerleyen moda ait efektif kırılma indisini göstermektedir. Bu denklemden aktif bağdaşım bandı öğrenilebilir. Eğer ızgara periyodu Λ , dalga boyuna kıyasla büyük olursa ışığın ilerlemesi engellenir. Sadece Bragg şartını sağlayan dalga boyu ızgara yapıda ilerleyebilir. Eğer ızgara aralığı dalga boyuna kıyasla yeterince küçükse ışık sorunsuz bir dalga kılavuzundaymışçasına akar. Bu durum Şekil 2.9 ile gösterilmiştir [55]. DBAI yapısındaki çoklu değişkenler, yüksek derecede tasarım özgürlüğü sağlar; bu nedenle, yüksek bağdaşım verimliliği, kompakt boyut, polarizasyon durumuna karşı düşük hassasiyet ve geniş bant genişliği dahil olmak üzere mükemmel bağlantı performansı elde etmek mümkündür. Ultra kompakt boyutun bu olağanüstü değeri, DBAI destekli kenar bağdaştırıcıları, yoğun entegrasyonun yüksek oranda talep edildiği uygulama senaryoları için uygun hale getirir.



Şekil 2.9: Dalga boyu altı ızgara kenar bağdaştırıcılar [47].

Bunların haricinde üst üste konmuş koniklerden oluşan kenar bağdaştırıcılar ve 3B konik şekline sahip kenar bağdaştırıcılarda da mevcuttur. Üst üste konikler daha geniş bir mod ile gelen fiber çıkışlı dalganın kademeli olarak dar entegre optik dalga kılavuzuna geçmesini sağlar. Ayrık yapısı 3B koniğe kıyasla daha yüksek bağdaşım kaybına sahip olmasına sebep olabilir ama 3B konik kenar bağdaştırıcınının sahip olduğu üretim zorluğuna sahip değildir [56]. Şekil 2.10 (a) ile üst üste konmuş konik kenar bağdaştırıcı ve Şekil 2.10 (b) ile 3B kenar bağdaştırıcı görülmektedir. Dikey ekseninde de bir üretim geçişine sahip olduğundan üç boyutlu olarak fonksiyonel değişime sahiptir. Kısaca her bir boyutunda ayrı bir fonksiyonu takip eden kenar üretilebilir lakin üretim zorluğu katlanarak artar.



Şekil 2.10: Üst üste konik bağdaştırıcı ve 3B kenar bağdaştırıcı [47].

Aşağıdaki çizelgede farklı kenar bağdaştırıcı tipleri için bir özet verilmiştir. Tüm bağdaşım değerleri TE modu için verilmiştir. Çizelge 2.2'ye göre en iyi performansa 3B konik kenar bağdaştırıcı sahiptir ama üretim süreci zorlayıcı. Kolay üretimi, ultra kompakt yapısı ve iyi bağdaşım oranı ile çift uçlu konik kenar bağdaştırıcılar içinde öne çıkmaktadır.

Çizelge 2.2 Farklı kenar bağdaştırıcılar için bağdaşım oranı ve uzunluk.

Kenar Bağdaştırıcı Tipi	Bağdaşım Kaybı (dB)	Uzunluk (μm)	Yorum
Tersine Konik [57]	1.39	170	Pratik ve kolay üretim sürecine sahip. Cihaz boyutu kompakt.
Çift Uçlu Konik [58]	1.10	40	Cihaz boyutu ultra kompakt ve daha düşük bağdaşım kaybına sahip.
Üç Uçlu Konik [59]	1.5	300	Polarizasyon bağımlılığı daha düşük.
DBAI Konik ve SiN Kaplama [60]	0.75	1500	İyi bağdaşım oranı fakat çok büyük bir ayak izine sahip.
Çok Katmanlı Konik [61]	0.40	890	Üretimi 3B koniğe göre daha basit ama kompakt olmayışı bir dezavantaj.
3B Konik [62]	0.35	180	Üretim olarak zorlayıcı.

2.2.2 Izgara bağdaştırıcılar ile bağdaşım ve tasarım

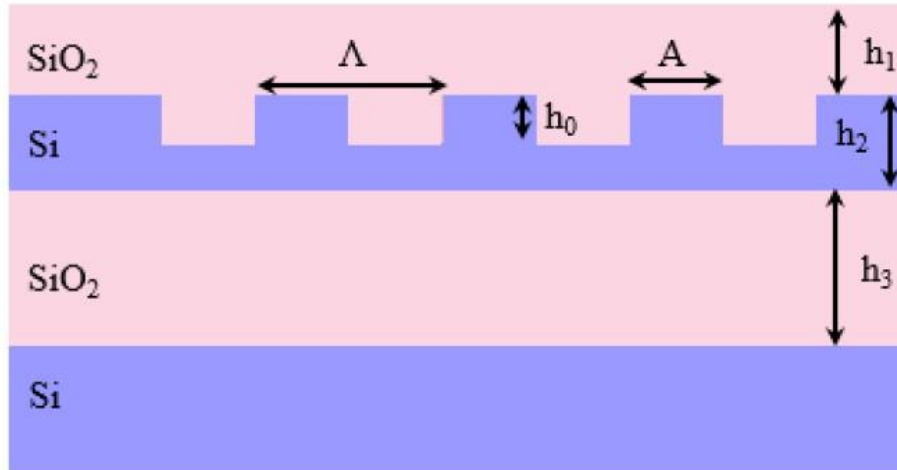
Fotonik entegre devrelerde, yüksek kırılma indeksli malzemeler, çok işlevli ve verimli seçeneklerdir. Yalıtkan üstü silikon (SOI) yüksek kırılma indeksli katman yapılarına örnek olarak verilebilir. SOI, bir Si pul üzerinde birkaç mikron kalınlığında SiO_2

kaplanan ve üstüne de yarım mikrondan daha ince bir Si tabakası tutturulan bir teknolojidir. Si elektronik sistemler ve entegre fotonik için düşük bütçeli ve ayarlanabilir çözümlerdendir. SOI sistemleri ile ışık Si içinde yönlendirilir. Bu yapılar ışığı dalga boyu ölçeklerinde manipüle etmeye izin verir. Işık iletimi, SOI nano yapıları ve optik fiberler arasında gerçekleşir. FED'lerde ışık, çoğunlukla tek modlu optik fiber ile optik dalga kılavuzuna bağlanır. Bu aktarımlar sırasında bir bağdaşım sorunu ortaya çıkar. Bağdaşım sorunu, tek modlu optik fiberlerin yaklaşık yüz nanometre genişliğindeki optik dalga kılavuzlarına bağlanması nedeniyle oluşur. Tek modlu optik fiberden gelen mod ile optik dalga kılavuzu modu arasında büyük ölçekli bir mod uyumsuzluğu bulunur. Mod uyuşmazlığı, bağdaşım verimliliğinde azalmaya neden olur. Entegre cihazların düzgün işleyebilmesi ve bilgiyi gürültüden ayırabilmeleri için yeterli miktarda güçte sinyal kendilerine ulaşmalıdır. Bu nedenle bağdaşım verimliliği, FED'lerde oldukça önemli bir husustur. FED'lerde, tek modlu optik fiberler ve optik dalga kılavuzları arasındaki güç aktarımı ve mod eşleşmesi, esas olarak ızgara bağdaştırıcı ve kenar bağdaştırıcı yapıları tarafından sağlanır. Kenar bağdaştırıcı dalga kılavuzu optik fibere doğru genişlediğinden, optik dalga kılavuzu ile optik fiber arasındaki mod iyi bir şekilde eşleşir. Bu yapılar yüksek bağdaşım verimliliğine ve bant genişliğine sahiptir. Kenar bağdaştırıcıların fiber hizalaması, bağdaşım verimliliği ve mod uyumu üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Izgara bağdaştırıcı yapısı, tek modlu optik fiber ile optik dalga kılavuzunu bağlamak için kullanılan diğer ana yapıdır. Izgara bağdaştırıcı yapıları, yaklaşık $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ 'lik küçük bir ayak izine sahiptir ve doğrudan SOI devrelerine entegre edilebilir. Izgara bağdaştırıcı yapıları, kenar bağdaştırıcı yapılarından daha düşük bağdaşım verimliliğine sahiptir. Izgara bağdaştırıcı, düşük maliyetli paketlemeye, daha kolay üretime, hizalamaya ve pul ölçeğinde teste sahiptir. Izgara bağdaştırıcı fiber hizalaması, kenar bağdaştırıcılardan daha kolaydır ve bağdaşım verimliliği üzerinde daha az etkiye sahiptir. Bu özellikler sayesinde, ızgara bağdaştırıcılar genellikle bağdaşım verimliliği ve mod uyuşmazlığı sorununa ilgi çekici bir çözümdür. Izgara bağdaştırıcı yapısı, sistem boyunca periyot sabit ise düzgün ızgara bağdaştırıcı, değilse apodize ızgara bağdaştırıcı olarak adlandırılır [63]. 1B ızgara bağdaştırıcıları için apodize ızgara bağdaştırıcı tasarımları daha yüksek verimliliğe sahiptir [64].

Yapıdaki ızgaraların konumları ve genişlikleri ayarlanarak bağdaşım verimliliği geliştirilebilir. Bununla birlikte, ızgaralı bağdaştırıcı, kenar bağdaştırıcıya kıyasla daha

az bağdaşım verimliliğine sahiptir. Bu problem için literatürde farklı çözümler bulunmaktadır. Bu çözümler çoğunlukla alt yansıtıcı [64] kullanan, standart dışı dalga kılavuzu ve bindirme yöntemi [65] kullanan gelişmiş yapılar içermektedir. Bu nedenle, üretim süreçleri karmaşık ve zordur. Izgara bağdaştırıcının etkinliğini artırmaya yönelik tekniklerden bazıları genetik algoritma [66], PSO [67] ve tersine tasarımıdır [65]. Tezin bu kısmında, alt yansıtıcı ve kaplaması olmayan SOI üzerinde yeni bir kompakt ızgara bağdaştırıcı önerilmektedir. Bağdaşım verimliliğini ve bant genişliğini artırmak için PSO ve GA kullanıldı. Konferansta sunulan bu tasarım, 250 nm özellik boyutuna sahip standart optik litografi için uygundur [68]. Önerilen tasarım, 1.55 μm merkez dalga boyunda -3.29 dB (%46.8) bağdaşım verimliliğine ve 12 $\mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ 'lik küçük bir ayak izi ile 78 nm'lik 3 dB bant genişliğine sahip apodize bir ızgara bağdaştırıcıdır.

Izgara bağdaştırıcı parametreleri, bağdaşım verimliliğini değiştirir. Bu parametreler kesit yapısı üzerinde gösterilmiş ve parametrelerin açıklamaları verilmiştir. Şekil 2.11'de, parametreler yapı üzerinde gösterilmektedir. Şekil 2.11'de, alt katman bir silikon alttaştır, gömülü oksit katmanı SiO_2 'dir ve ızgaralı dalga kılavuzu malzeme olarak silikon kullanır. Bir SiO_2 kaplaması, gerçek dünyadaki uygulamada olduğu gibi dalga kılavuzunu fiberden ayırır.



Şekil 2.11: Yan kesitte ızgara bağdaştırıcı değişkenlerinin gösterimi.

Şekil 2.11'deki değişkenler sırasıyla açıklanmıştır: h_0 aşındırma derinliğini, h_1 üst oksit kalınlığını, h_2 dalga kılavuzu kalınlığını, h_3 alt oksit kalınlığını gösterir. Λ sembolü, ızgara bağdaştırıcının periyodunu temsil eder. Izgara bağdaştırıcı periyodunun sabit

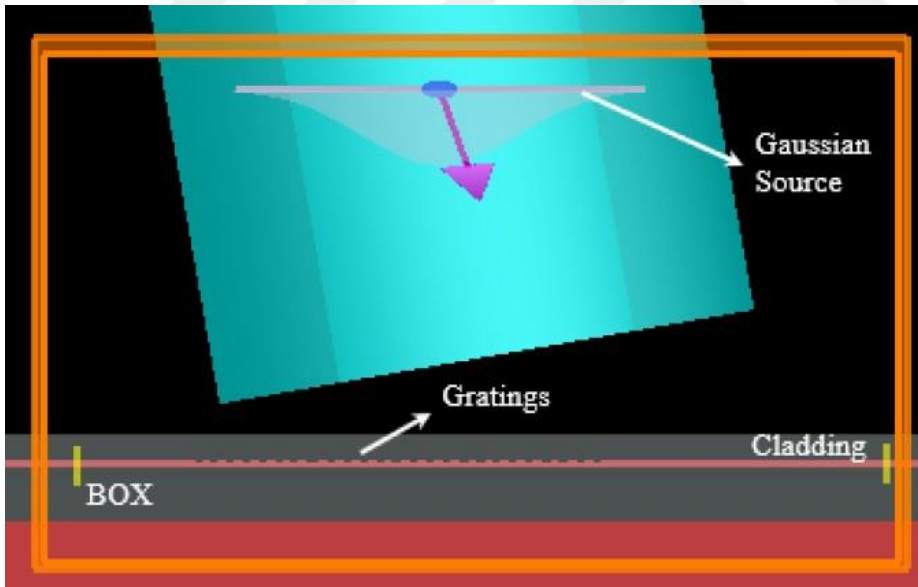
olup olmamasına göre ızgara bağdaştırıcı düzgün ve apodize olmak üzere iki tipe ayrılır. A, bağdaştırıcı üzeri ızgara genişliğini gösterir.

$$k \sin(\theta_i) - \beta = \frac{m2\pi}{\Lambda} \quad (2.4)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki denklemde k , serbest uzay yayılma dalga sayısıdır. θ_i , fiberin geliş açısıdır. β , m 'inci kılavuzlu dalga modunun yayılma dalga sayısıdır, Λ ızgara periyodudur ve m kırınım sırasını (diffraction order) temsil eder. Denklem 2.4, faz eşleştirme koşulunu veya Bragg koşulunu temsil eder [69]. Denklem 2.5, serbest uzay dalga sayısını gösterir.

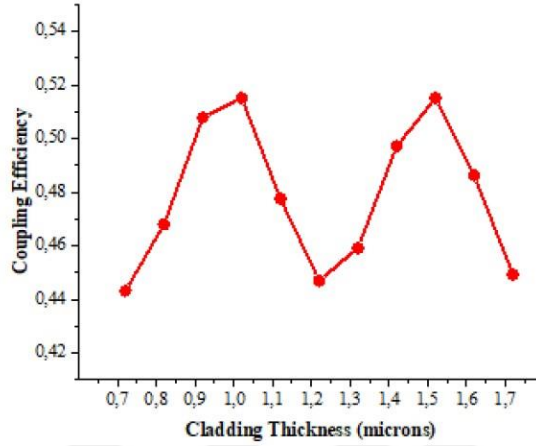
Izgara bağdaştırıcıların teorik bir analizi yapılarak, Bragg koşulundan belirli bir kırınım düzeni için bir periyot ve geliş açısı belirlendi. Böylece, düzgün bir ızgara bağdaştırıcı tasarımı elde edildi. Bu tasarıma dayalı olarak ızgara bağdaştırıcı tasarımlarının sayısal analizi zamanda sonlu farklar yöntemi ile yapılmıştır. Şekil 2.12 ızgara bağdaştırıcı tasarımının Lumerical FDTD çözücü arayüzünü göstermektedir.



Şekil 2.12: Izgara bağdaştırıcı simülasyonunu Lumerical FDTD çözücünde görünümü.

PSO algoritması, ızgara bağdaştırıcının daha önce Şekil 2.11 ile verilen parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. PSO, belirlenen bir değer elde etmek için değişkenleri çözüm olarak kabul ederek ve elde edilen sonucu sürekli iyileştirerek istenen sonuca ulaşmak için kullanılan bir algoritmadır. Şekil 2.13 ile,

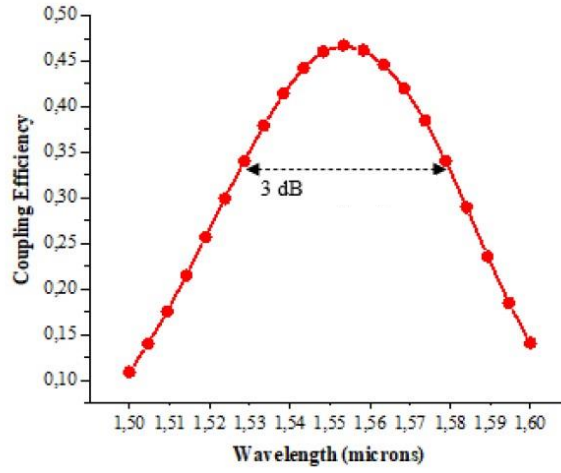
SiO₂ kaplama kalınlığının PSO algoritması kullanılarak birleştirme verimliliği üzerindeki etkisi sunulmaktadır. Kaplama kalınlığının verimlilik üzerinde periyodik bir sonucu olduğu görülmektedir. Standart 220 nm kalınlıkta SOI üretimine uymak için aşındırma derinliği (h0) 70 nm, SiO₂ üst katman kalınlığı (h1) 1µm, Si dalga kılavuzu kalınlığı (h2) 220 nm, SiO₂ alt kutu kalınlığı (h3) 2 µm ve fiber teta açısı 10° seçildi.



Şekil 2.13: Üst oksit kaplamanın kalınlığının bağdaşım oranına etkisi.

Tipik değerlerin seçilmesinin ardından fiber konumu, ızgara periyodu sayısı, dolum faktörü (A/Λ) gibi diğer değişkenler PSO algoritması ile optimize edilmiştir. Bu değişkenlerin belirlenmesiyle, optimize edilmiş düzgün bir ızgara bağdaştırıcı tasarımı elde edildi. Düzgün ızgara bağdaştırıcıların performansının apodize ızgara bağdaştırıcılara göre daha düşük ve sınırlı olduğu iyi bilinmektedir. Düzgün ızgara bağdaştırıcıyı apodize hale getirerek verimliliği artırmak için genetik algoritma kullanıldı.

Genetik algoritmanın başlangıç yapısında PSO algoritması tarafından optimize edilen parametreler kullanılmıştır. Bu kısımdaki çalışmada genetik algoritmanın işleyişi şu şekildedir: PSO ile elde edilen optimum düzgün ızgara bağdaştırıcının belirlenen tasarım bölgesindeki ızgaraların konumu ve genişliği değiştirilerek fiberden dalga kılavuzuna bağdaşım verimi optimize edilmiştir. Genetik algoritmadan elde edilen yapının ızgara genişlikleri, yapının minimum özellik boyutu 250 nm olacak şekilde ayarlanmıştır. Elde edilen yapının dalga boyuna göre fiberden dalga kılavuzuna bağdaşım etkinliğinin grafiği Şekil 2.14 ile verilmiştir. %46.8 bağdaşım verimi elde edilmiştir.



Şekil 2.14: Dalga boyuna bağlı bağdaşım verimliliğinin 3B simülasyonlar sonucu grafiği.

Tezin bu kısmında, standart SOI litografi için GA ve PSO tabanlı apodize ızgara bağdaştırıcı gösterildi. Izgara bağdaştırıcı simülasyonlarında $1\ \mu\text{m}$ SiO_2 üst kaplama kalınlığı, $220\ \text{nm}$ Si dalga kılavuzu kalınlığı ve $70\ \text{nm}$ aşındırma derinliği, $2\ \mu\text{m}$ SiO_2 alt oksit katman kalınlığı, $12\ \mu\text{m}$ ızgara genişliği seçilmiştir. Ayrıca, $\theta_i = 10^\circ$ fiber açısına ve Si için $3,48$ ve SiO_2 için $1,45$ kırılma indisine sahip bir Gauss kaynağı kullanılmıştır. Tasarlanan ızgara bağdaştırıcı, toplam uzunluğu $16\ \mu\text{m}$ olan 24 ızgara kutusuna ve 26 çukura sahiptir. $250\ \text{nm}$ özellik boyutu ile tasarımı standart SOI litografi için uygundur, $-3,29\ \text{dB}$ (%46,8) bağdaştırma verimliliğine sahip $1,55\ \mu\text{m}$ merkezi dalga boyunda ve $12\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$ 'lik küçük bir ayak izi ile $78\ \text{nm}$ 'lik $3\ \text{dB}$ bant genişliğine sahip apodize edilmiş bir ızgara bağdaştırıcı ortaya çıkarılmıştır. Bu alt yansıtıcı olmadan iyi bir performanstır. Grafikte yarı güçte tam genişlik, gücün maksimumdan yarıya düştüğü ölçü, yaklaşık olarak $500\ \text{nm}$ olduğu görülmektedir. Bu ızgara bağdaştırıcılar için özellikle de alt yansıma katmanı olmadan ve bir bant artırım özelliği öncelikli hedef konulmadan kayda değer bir performanstır.

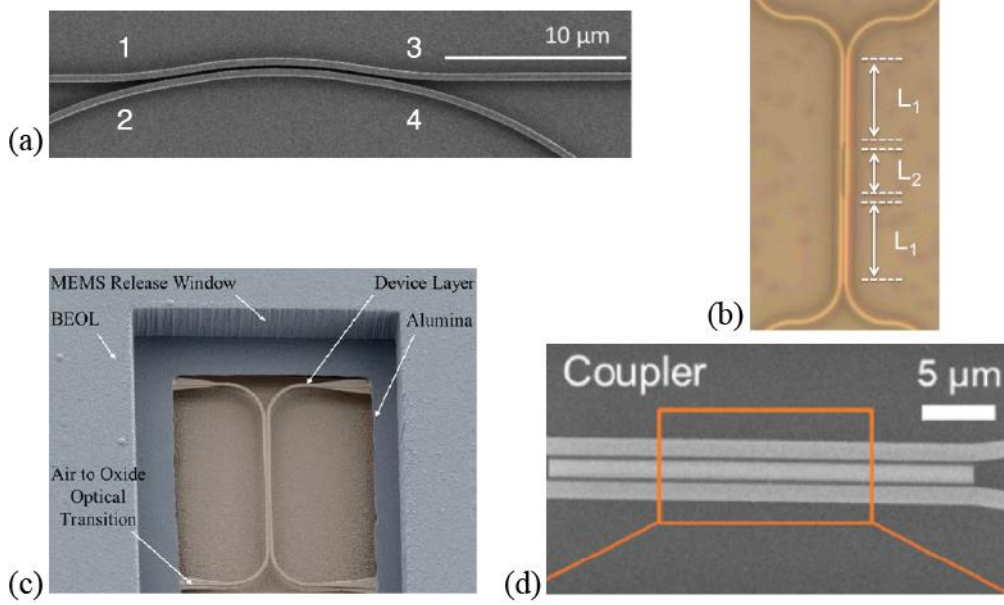
3. IŞIĞIN CİHAZ İÇİ BAĞDAŞTIRILMASI

3.1 Dalga Kılavuzundan Dalga Kılavuzuna Bağdaştırma ve Tasarım

Dalga kılavuzundan dalga kılavuzuna bağdaştırma çip teknolojilerinde gün ve gün artan entegrasyon yoğunluğu ihtiyacı, fotonik devrelerin kullanılması ve bu devreler arası kılavuzlar için bir bağdaşım gereksiniminin ortaya çıkmasından dolayı literatürde sıkça üzerine çalışılmıştır [70]. Aynı çip seviyesinde ve farklı çip seviyesindeki dalga kılavuzları arası olmak üzere iki ana bağdaşım sistematığı üzerinde durulur.

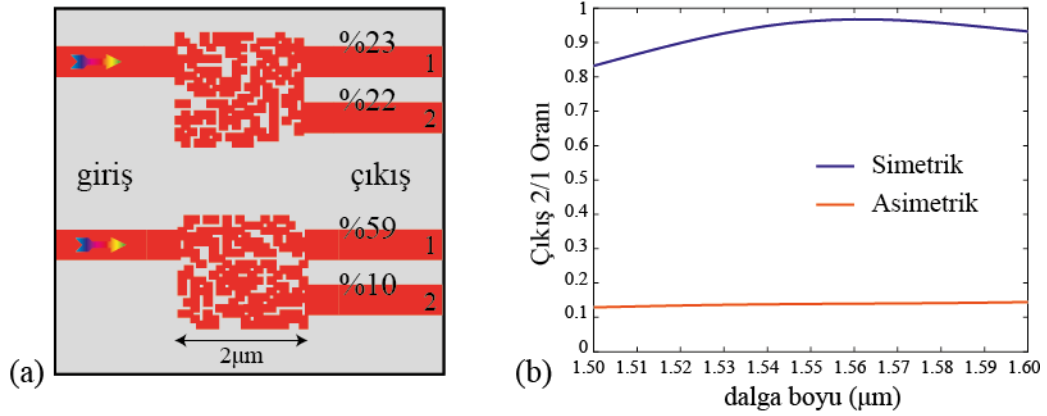
Optik güç bağdaştırıcıları, fotonik sistemlerde ışığı bölmek ve birleştirmek için gerekli cihazlardır. FED'lerde, özellikle dalga boyu bölmeli çoğullama ve sinyal anahtarlama gibi veri iletişim uygulamaları için kompakt, dalga boyundan bağımsız bir güç bağdaştırıcısı çokça arzu edilir. Yönlü bağdaştırıcılar, basit konfigürasyonları ve yalıtkan üzerinde silikon (SOI) platformunda üretilme kolaylıkları nedeniyle güç bağdaştırıcıları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel yönlü bağdaştırıcıların bağlantı oranlarının, çalışma dalga boylarına oldukça duyarlı olduğu bilinmektedir [71]. Son yirmi yılda, geniş bant güç bağdaştırıcıları geliştirmek için çok çaba harcandı. Bu çalışmalar arasında, bir Mach-Zehender interferometre (MZI) yapısını çok modlu interferometrelere entegre eden MZI tabanlı bağdaştırıcılar, geniş bant performansı sergiler, ancak ayak izleri genellikle yüzlerce μm^2 ölçeğindedir [72]. Gücü bölmek için konik dalga kılavuzları kullanan adiyabatik bağdaştırıcılar ayrıca umut verici geniş bant özelliklerine sahiptir, ancak yine de büyük ayak izine sahiptirler [73]. Literatürde çeşitli kompakt yönlü bağdaştırıcılar önerilmiştir. Şekil 3.1 (a) ile, eğimli dalga kılavuzları kullanan bir çalışma transfer matris metodu üzerinden 50/50 güç bölen bir yönlü bağdaştırıcı sunmuştur [74]. Bu bağdaştırıcı $20 \times 3 \mu\text{m}^2$ ayak izine ve 88 nm bant genişliğine sahiptir. Bir diğer çalışma Şekil 3.1 (b), asimetrik kılavuzlarla faz kontrolü sayesinde 50/50 bölme oranı sunan, $32 \times 1.3 \mu\text{m}^2$ alanında olan ve 75 nm bant genişliğine sahip bir yönlü bağdaştırıcı elde etmiştir [75].

Literatürde ayrıca mikro elektromekanik sistem yardımı ile tasarlanmış yönlü bağdaştırıcılar mevcuttur ve içlerinde $20 \times 30 \mu\text{m}^2$ alanda 0.5dB iletim kaybı ile 35 nm bant genişliği elde eden çalışma sunulmuştur (Şekil 3.1 (c)) [76]. Son olarak faz değıştiren materyalleri kullanarak 1dB iletim kaybına sahip, 30 nm bant genişliği ve 35 um uzunluk ile yönlü bağdaştırıcı anahtar yapan bir çalışma termal değışime duyarlız olmasıyla ilgi çekmiştir [77]. Çalışmaya ait gösterim Şekil 3.1 (d) ile verilmiştir.



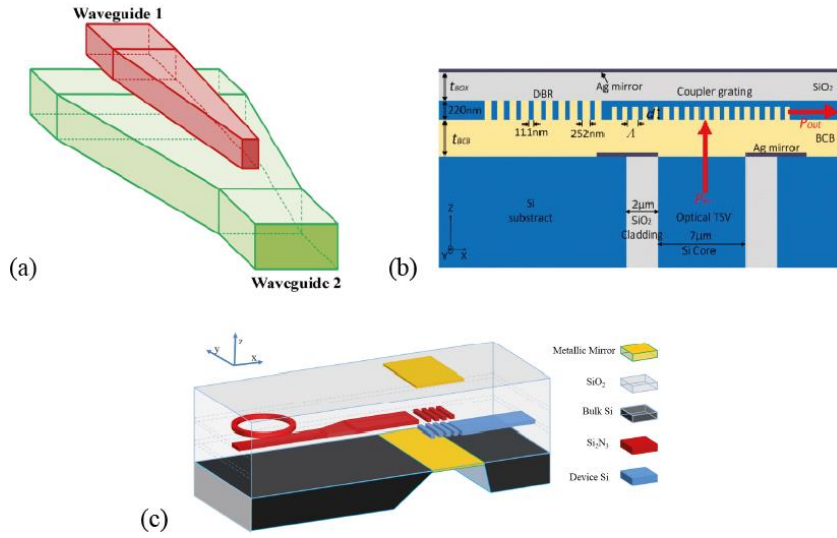
Şekil 3.1: Literatürde yönlü bağdaştırıcılar. (a) eğimli dalga kılavuzları [74]. (b) asimetrik kılavuzlar faz kontrolü [75]. (c) mikro elektromekanik yönlü bağdaştırıcı [76]. (d) faz değıştiren materyal yönlü bağdaştırıcı [77].

Tezin bu kısmında genetik algoritma yardımıyla $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ boyutunda yönlü bağdaştırıcılar tasarlanmıştır. İlk bağdaştırıcı giriş kapısından gelen sinyali çıkış 1 ve 2'ye eşit (23/22) bölerek bağdaştırmaktadır. İkinci yönlü bağdaştırıcı ise asimetrik çalışmaktadır. Gelen sinyali 59/10 oranında bölerek bağdaştırmaktadır. Şekil 3.2 (a) ile tasarlanan yönlü bağdaştırıcılara ait tasarımlar verilmiştir. Şekil 3.2 (b) ile ise bağdaştırıcıların 1.5-1.6 μm dalga boyları arasında bant performansları gösterilmiştir. Buna göre simetrik yönlü bağdaştırıcı 100 nm asimetrik yönlü bağdaştırıcı is 100 nm 1 dB bant verimine sahiptir. Ayrıca cihaz üstlerinde düzlem dışı saçılmayı azaltmak için altın ayna kaplaması mevcuttur.



Şekil 3.2: Genetik algoritmayla tasarlanmış simetrik ve asimetric yönlü bağdaştırıcılar. Bağdaştırıcılara ait bant performans grafiği.

Farklı çip seviyesinde bulunan dalga kılavuzları arasında elektromanyetik dalga transferi yapmak için literatürde çeşitli ara katman bağdaştırıcılar önerilmiştir. Bu yöntemlerden ilki gradyan dalga kılavuzlarını birbirine yakın tutarak evanesan bir geçiş sağlamaktır. Elektromanyetikte, evanesan bir alan veya evanesan dalga, elektromanyetik dalga olarak ilerlemeyen ancak enerjisi uzaysal olarak kaynağın yakınında yoğunlaşan döngüsel bir elektrik alanıdır. Üretilen yayılan bir elektromanyetik dalga olsa da elektrik veya manyetik alanın birçok dalga boyunda gözlemlenen yayılan dalgaya ait olmayan bileşeni, kaybolan bir alan olarak tanımlanabilir. Bu mekanizma, gradyan dalga kılavuzlarında birtakım eleştirilere sebep olmuştur. Bu yöntemde kılavuzlar dik ekseninde çok yakın olduğundan çip içerisinde istenmeyen çapraz gürültüler oluşabilir ve katman yakınlığı üretim kısıtı olarak süreci etkileyebilir [78]. Şekil 3.3 (a) ile gradyan bağdaştırıcı gösterilmiştir. Bir diğer yöntem ise fabrikasyon zorluğunu artıran tünel silikon viya (TSV) kullanmaktır [79]. TSV'ler yüksek kırılma indisleri sayesinde ışığı toparlayıp saçılmaları önleyerek yüksek bağdaşım verimi elde edebilirler lakin yine de en iyi performans adına ışığı TSV içine düzgün yönlendirecek ızgaralara ihtiyaç vardır. Şekil 3.3 ile (b) TSV bağdaştırıcı gösterilmiştir. Günümüzün en yaygın basit üretim tekniklerini kullanan DKDK ızgara dik bağdaştırıcılar hem üretim kolaylığı hem küçük ayak izi ile öne çıkmaktadır ama bant performansıyla eleştirilere tabi tutulmaktadır [80]. Şekil 3.3 (c) ile ızgara dik ara katman bağdaştırıcıya ait görsel verilmiştir ve bağdaştırıcıyı oluşturan katmanlar ile malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Literatürdeki ara katman bağdaştırıcılar. (a) Üst üste adiyabatik gradyan bağdaştırıcı [78]. (b) Tünel silikon viya yardımı ile ara katman bağdaştırıcı [79]. (c) ızgara dik ara katman bağdaştırıcı [80].

3.2 Dalga Kılavuzundan Alttaşa Bağdaştırıcı Tasarımı

Tezin bu kısmına kadar geleneksel bağdaştırma şekillerini gördük. Geleneksel bağdaştırma planlarının çözmekte yetersiz kaldığı bazı bağdaştırma problemleri vardır. Örneğin terahertz bir entegre anteni fotonik dalga kılavuzlarla taşınan kısa aralıklı optik lazer darbeleri ile uyarmak istenirse anten aktif alttaşındaki yük taşıyıcılarını hareke geçirecek dalganın yüksek verimle bağdaştırılması gerekir. Bu durumda alttaşa dik bağdaştırma yapan bir bağdaştırıcı çeşidi tezin bu kısmında önerilmiştir. Bağdaştırıcı farklı boyutlar için genetik algoritma ile tasarlanmıştır. Bu tarz bağdaştırıcıların boyutunun kompakt olması ultra kısa darbeleri optik zaman alanı lazer uyarımlı THz anten dizileri için önemlidir [81].

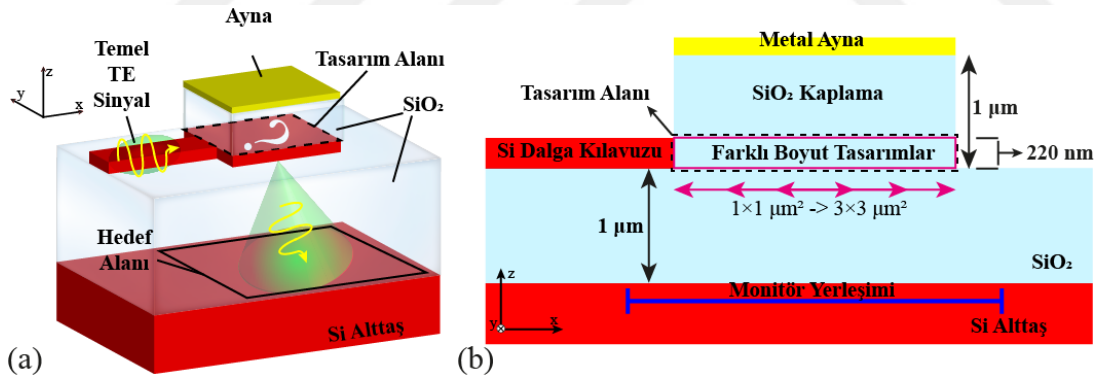
Fotonik entegre devreler (FED), fotonlarla çalışan sistemleri nasıl yaratabileceğimiz ve kullanabileceğimizi daha iyi anlamamız ile ortaya çıkıp yaygınlaştılar. Haberleşme, kuantum bilgisayarlar, biyomühendislik ve nöromorfik sistemler gibi teknolojilerin FED'ler yardımıyla daha da ilerletilebileceğinin anlaşılmasıyla büyük ilgi çektiler [82,83]. Nihayetinde araştırmacılar iletim hatları, kapılar, interferometreler, filtreler ve çınlayıcılar gibi FED bileşenlerini daha iyi hale getirmeye uğraşmaktadırlar [84-87]. FED'ler için bağdaştırma gücün ve bilginin aktarılması için kritik önem taşır. Çeşitli bağdaştırma mekanizmaları sistem harmonisini sağlamak için önemlidir. Genelde iki tip bağdaştırma şeklinden bahsedilir: fiberden çipe bağdaştırma (FÇ) ve dalga kılavuzundan dalga kılavuzuna bağdaştırma (DKDK). FÇ bağdaştırıcılar sistemin dış

dünyayla iletişimde gözü kulağı gibi çalışır. FÇ bağdaştırıcılar için kenar ve ızgara olmak üzere iki ana bağdaştırma yöntemi kullanılmaktadır [88,89]. Kenar bağdaştırıcılar çipin kenarından çip içi akış ile aynı düzlemde elektromanyetik gücün aktarımını yapar. Izgara bağdaştırıcılar ise çipe dik ve dike yakın açılarda elektromanyetik gücü bağdaştırır. İkinci bağdaştırma tipinde olan DKDK bağdaştırıcılar, çip içinde haberleşme ve güç aktarımı için kullanılmaktadır. DKDK için yönlü bağdaştırıcılar aynı seviyedeki kılavuzlar arası bağdaşımı sağlar ve aynı çip seviyesindeki elemanlar enerji dağıtımını kolaylaştırır [90]. Öte yandan farklı çip seviyelerindeki kılavuzlara enerjinin aktarılması tünel silikon viyalar (TSV), 1B ızgaralar ve gradyan bağdaştırıcılar ile yapılabilir [91]. Bu bağdaştırıcılar, dalga boyu altı ızgara, plazmonikler ve tersine tasarım gibi yöntem ve malzemeler ile tasarlanabilirler [92]. Literatür büyük oranda FÇ ve DKDK bağdaşımına odaklanmaktadır lakin ışığı kılavuzlarda hapseden dışında da bağdaşım senaryoları mevcuttur. Örneğin ışığın bir alttaşa bağdaştırılmasının genel performansı artıracak uygulamalar vardır. Optik uyarımın artırmak, entegre dizi yapabilir hale getirmek ve dış lazer kaynağının dik uyarımına kurtulmak için çip üstü terahertz antenlerde, dış optik kaynaktan kurtulup entegrasyon yoğunluğunu artırmak için lensiz çip üstü görüntüleme ve çip üstü sensör laboratuvarlarda dalga kılavuzundan alttaşa (DKA) bağdaştırıcılar tasarlanıp kullanılabilir [16-19]. Literatürde bu uygulamaların entegrasyon ve güç verimliliğini artırmak için DKA kullanan çalışmalar çok az miktardadır [93].

Tezin bu kısmında bu açığı karşılamak için günümüz CMOS üretim yöntemleri ile uyumlu, kolay üretilebilen, küçük ayak izi ile entegrasyon yoğunluğunu destekleyen ve yüksek verimli DKA bağdaştırıcılar genetik algoritma yardımıyla tasarlanmış ve sunulmuştur. Cihazlara ışığın bağdaştırılması, optik fiberleri fotonik entegre devrelere veya optoelektronik çiplere bağlayan ve yüksek verimli optik sinyal aktarımını kolaylaştıran çok önemli bir süreçtir. Bu bağlantı, veri merkezleri, telekomünikasyon ve yüksek performanslı bilgi işleme gibi uygulamalarda yüksek hızlı veri iletimi, enerji verimliliği, ölçeklenebilirlik, düşük gecikme süresi ve gelişmiş algılama yetenekleri için kayda değer bir önem taşımaktadır [94]. Birden fazla optik bileşenin tek bir çip üzerinde entegrasyonu, fotonik ve optoelektronik teknolojilerin ilerlemesi için gerekli olan ultra yüksek cihaz yoğunluğu ve işlevselliğini sağlar. Sonuç olarak, entegre

cihazlara ışığın bağdaştırılması, çeşitli endüstrilerde gelecekteki yeniliklerin yolunu açarak iletişim, algılama ve bilgi işlem uygulamalarında önemli gelişmeler sağlar.

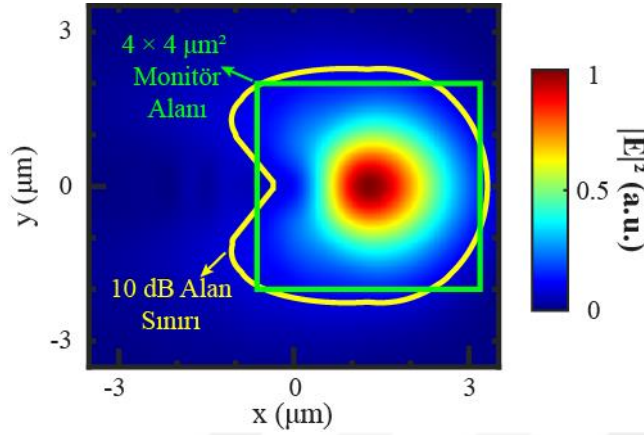
Dalga kılavuzundan alttaşa bağdaştırıcı (DKAB) şemasının 3B gösterimi Şekil 3.4 (a)'da verilmiştir. Simülasyonlarda tasarım bölgesi için 220 nm kalınlığında 1×1 , 2×2 ve $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ alanında olmak üzere üç farklı ayak izi kullanılmıştır. Tasarım bölgesi, hedef Si alttaşın üstüne yerleştirilmiş $1 \mu\text{m}$ kalınlığındaki SiO_2 alttaşın üstüne yerleştirilir. Simülasyonlarda, tasarım alanı artarken tasarım bölgesi merkezi değişmez. Bu yöntemle farklı boyutta bağdaştırıcılar arasında daha iyi bir karşılaştırma elde edilebilir. Tasarım bölgesinin üstünde $1 \mu\text{m}$ kalınlığında SiO_2 kaplama kullanılmış ve bunun üzerine mükemmel bir elektrik iletkeni (PEC) metal aynası, hedef bölgenin tersine hareket eden ışığı etkili bir şekilde hedef bölgeye yönlendirmek için yerleştirilmiştir. Kaplama ve ayna ölçüleri Şekil 3.4(b) de görüldüğü gibi tasarım bölgesine göre değişmektedir. Tasarım bölgesinin sol tarafında 220 nm yüksekliğinde ve 500 nm genişliğinde bir optik dalga kılavuzu konumlandırılmıştır. Bu çalışmada Si ve SiO_2 için kabul edilen kırılma indisi değerleri $n_{\text{Si}} = 3.48$ ve $n_{\text{SiO}_2} = 1.44$ 'tür [95]. $1.55 \mu\text{m}$ çalışma dalga boyu, DKA bağdaştırıcıyı zaman alanında uyarmak için simülasyonlarda kullanılır.



Şekil 3.4: Dalga kılavuzundan alttaşa bağdaştırıcı kurulumu. (a) Siyah dikdörtgenin SiO_2 alttaşı ve Si substratının arayüzündeki hedef bölgeyi gösterdiği bağdaştırıcı şemasının genel 3B gösterimi. (b) tasarım bölgesinin konumlandırılmasıyla bağdaştırma şemasının xz kesimi.

Bağdaştırıcı performansını adil bir şekilde karşılaştırmak için SiO_2 alttaşı ile Si alttaşı arasındaki arayüzde bir bağdaştırma monitörü seçilmelidir. Şekil 3.5'te, arayüzde xy düzleminde basit bir optik dalga kılavuzunun (ayna ve üst kaplama yok) kesik ucundan saçılan mutlak kare elektrik alan gösterilmektedir. Sarı sınırın içinde, maksimum alan değeri normalleştirildiğinde alan değeri -10 dB 'den büyüktür. Burada -10 dB alanını yeterince dahil etmek için, Şekil 3.5 ile yeşil kare ile gösterilen $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ boyutunda

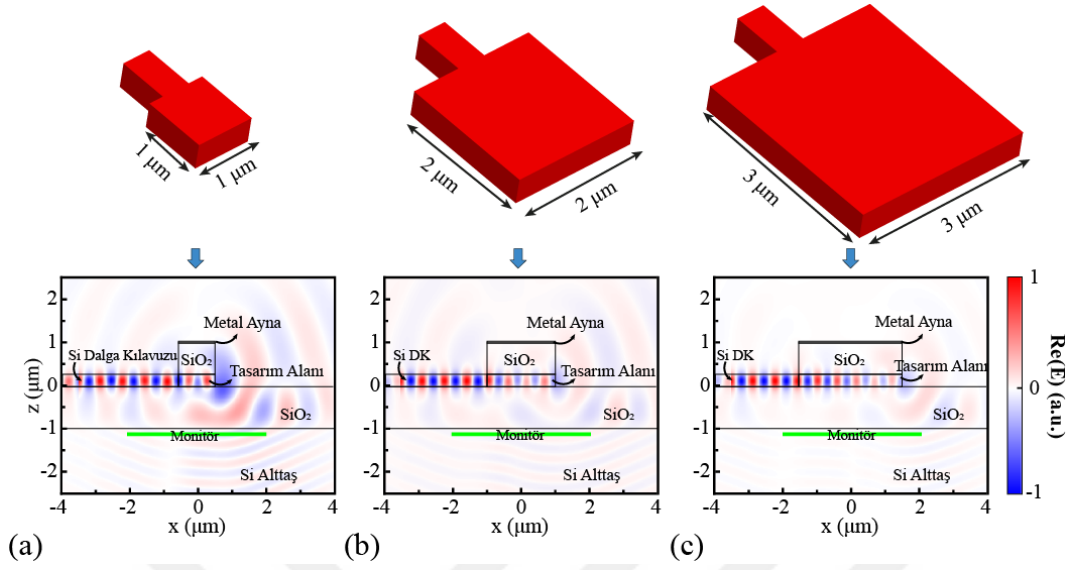
bir monitör uygun şekilde kullanılır. Monitör ve bağdaştırıcı merkezleri hizalanır. Daha sonra, bağdaşım verimliliği, monitör tarafından optik dalga kılavuzuna aktarılan güç için ölçülen gücün yüzdesi olarak tanımlanır.



Şekil 3.5: Basit bir dalga kılavuzu bağdaştırıcı için SiO₂ ve Si alttaşlarının arayüzündeki mutlak kare elektrik alan grafiği.

Basit dalga kılavuzundan alttaşa kare (DKAK) bağdaştırıcı, Şekil 3.6 ile gösterildiği gibi tasarım bölgesi tamamen Si malzemeden oluştuğunda ortaya çıkar. 3 farklı boyutta DKAK bağdaştırıcı (1×1, 2×2, ve 3×3 µm²) simüle edilerek gözlemlenir, elektromanyetik alan davranışı ve bağdaştırma performansı değeri hesaplanır. 1×1, 2×2 ve 3×3 µm² DKAK bağdaştırıcılarının bağdaştırma performansı değerleri sırasıyla %30.2, %23.4 ve %16.7'dir. Şekil 3.6 ile, elektrik alan grafikleri, dalga kılavuzunu, alt tabakaları ve tasarım bölgesini gösteren siyah çizgilerle işaretlenirken, monitör konumlandırması yeşil çizgiyle işaretlenir. DKAK bağdaştırıcılar için, boyuttaki artış performans üzerinde olumsuz bir etkiye neden olur çünkü dalga kılavuzundan gelen dalga, alt oksit tabakasına yayılmaya başlayana kadar sürekli bağdaştırıcı hacmi boyunca daha fazla dağılır. Şekil 3.6 (a)'dan 3.6 (b)'ye ve ardından Şekil 3.6 (c)'deki elektrik alan grafiklerini karşılaştırarak bağdaştırıcı altındaki alan yoğunluğundaki düşüş gözlemlenebilir. Ayrıca, DKAK bağdaştırıcıların ucundan optik dalga kılavuzuna güçlü bir yansıma olduğu dalga kılavuzunun sol tarafında görülen elektrik alan yoğunluğu ile çıkarılabilir. Bu yansıma, Şekil 3.7 ile görüldüğü gibi, genetik algoritmayla tasarlanmış dalga kılavuzundan alttaşa (GADKA) bağdaştırıcılarında çoğunlukla azalır. Son olarak, metalik ayna boyutu arttıkça alan yoğunluğu zayıflar ve böylece alanların çipten kaçmasını etkili bir şekilde önler, ancak onları hedefe tekrar odaklamaz. Sonunda, DKAK bağdaştırıcılar, genetik algoritmanın bağdaştırıcı performansını nasıl artırdığını göstermek için bir referans noktası

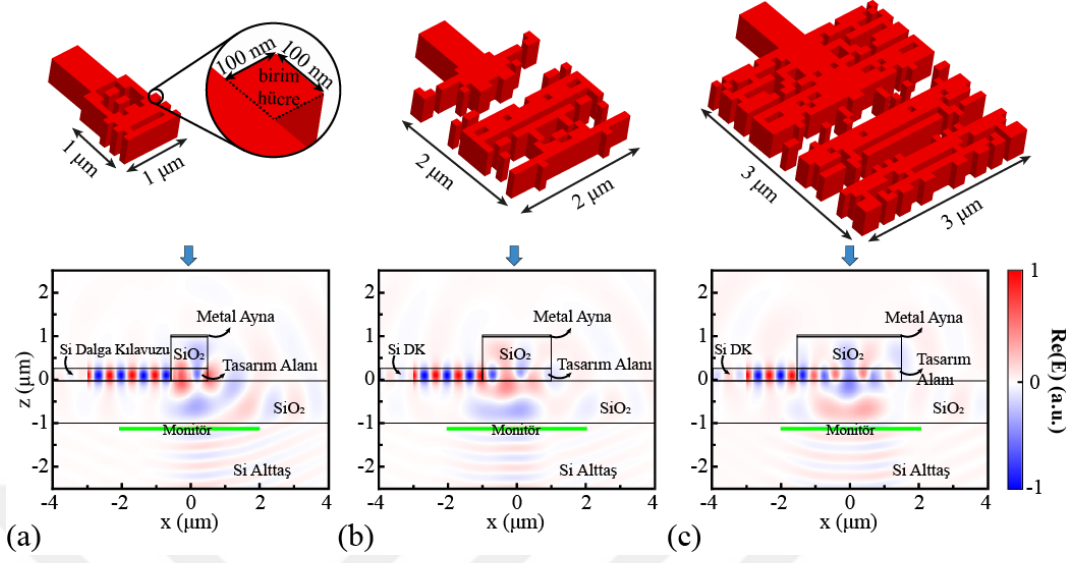
oluşturur. Algoritmada masraf (hedef) fonksiyonu mükemmel bağdaşıma olan normalize uzaklık miktarı olarak seçilmiştir.



Şekil 3.6: Dalga kılavuzundan alttışa kare bağdaştışıcılar için 3B temsili ve xz-yüzeyinde elektrik alan performans grafikleri. (a) $1 \times 1 \mu\text{m}^2$, (b) $2 \times 2 \mu\text{m}^2$, (c) $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ ayak izi. Farklı bölgeler siyah çizgilerle belirtilmiştir. Yeşil çizgi, bağdaştırma monitörünün konumlandırmasını gösterir.

Algoritmada, tasarım uzayı, Şekil 3.7(a)'da görülebileceği gibi, sırasıyla Si veya SiO_2 'nin kırılma indisini temsil eden "1" veya "0" olan 220 nm yüksekliğinde $100 \times 100 \text{ nm}^2$ hücrelerden oluşur. Değişiklikler tasarım alanının yalnızca bir yarısında kısıtlandı, böylece diğer yarısını, GA'nın çalıştığı tarafının x eksenı üzerindeki ayna simetrisi olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, arayüzdeki elektrik alan dağılımını daha derli topludur ve daha yüksek alan yoğunlaşması elde edilir, böylece toplam performansı yeterince artırır [34]. Yoğunlaşmış alan aynı zamanda terahertz anten alttış uyarımı için de yük taşıyıcıların uyarılma performansını artırır. Simetri kısıtlaması olmadan sırasıyla 100, 400 ve 900 olacak değişken sayısı simetri kısıtlaması uygulandığından dolayı azalmıştır. Burada $1 \times 1 \mu\text{m}^2$, $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ve $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ GADKA bağdaştışıcılar için evrimsel yaklaşımda genetik dizi olarak adlandırılan ayarlanabilir değişkenlerin toplam sayısı sırasıyla 50, 200 ve 450'dir. Değişken sayısı yarıya indiğinde algoritma daha kolay bir şekilde en iyi çözümleri arayama devam edebilir. $1 \times 1 \mu\text{m}^2$, $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ve $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ GADKA bağdaştışıcılar sırasıyla %60.5, %72.3 ve %76.9 bağdaştırma performansı değerine sahiptir. Şekil 3.7 ile, GADKA bağdaştışıcıların altındaki alan yoğunluğu, DKAK bağdaştışıcıların altındaki alan yoğunluğundan daha belirgindir. Şekil 3.7 (a) elektrik alan grafiği, nispeten küçük tasarım alanının, bağdaşan dalgaların Şekil 3.7 (b, c)'dekinden daha

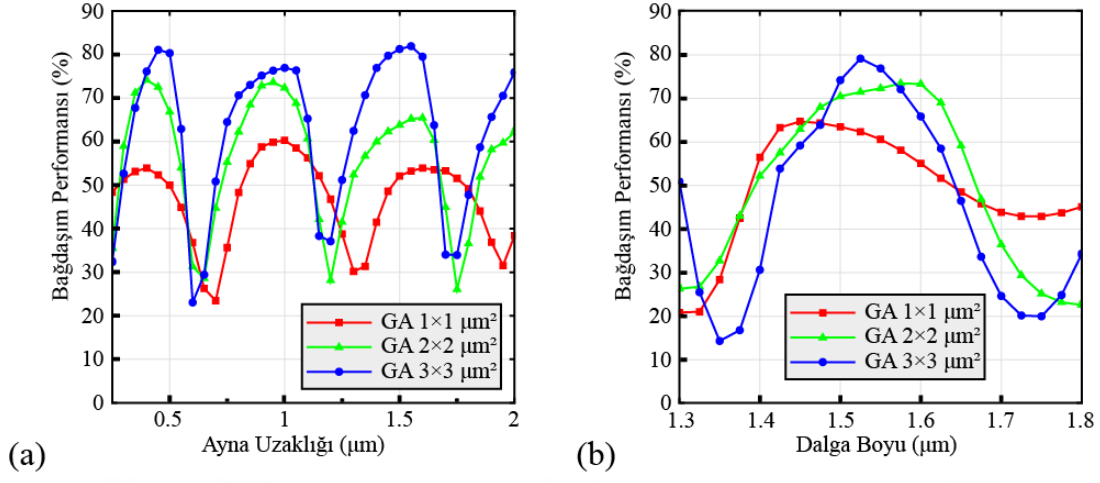
fazla öne eğilmesine neden olduğunu göstermektedir. Küçük bir hacimde bir dalga içinden bir dönüştürme daha zor olması beklenir.



Şekil 3.7: Genetik algoritma bağdaştırıcılarının 3B gösterimi ve xz düzlemindeki elektrik alan performans grafikleri (a) $1 \times 1 \mu\text{m}^2$, (b) $2 \times 2 \mu\text{m}^2$, (c) $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ ayak izi için. Farklı bölgeler siyah çizgilerle belirtilmiştir. Yeşil çizgi, bağdaşım monitörünün konumlandırmasını gösterir.

Metalik ayna mesafesindeki değişikliğin etkisini gözlemlemek için, GADKA bağdaştırıcıya $0.25 \mu\text{m}$ 'den $2 \mu\text{m}$ 'ye ayna mesafesine bir parametre taraması çalıştırıldı. Sonuçlar, yaklaşık 600 nm 'nin bağdaşım performansı tepeleri arasındaki uzaklıktır. Dolayısıyla Şekil 3.8 (a) ayna uzaklığına bağlı bir yapıcı girişim periyodu olduğu ortaya koymaktadır. Ayrıca, ayna mesafesi taraması, en küçük ayak izine sahip bağdaştırıcı dışında performans için az bir iyileşme ortaya çıkardı. $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ve $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ GADKA bağdaştırıcılar $0.45 \mu\text{m}$ ve $1.55 \mu\text{m}$ ayna mesafeleriyle %74.1 ve %81.8 performansa sahiptir. Ayna mesafesini $0.25 \mu\text{m}$ 'ye küçültmek sonunda CE'yi azaltır çünkü dielektrik dalga kılavuzlarında hareket alanı sınırda kaybolmaz, ancak yavaş yavaş azalır. Dalga kılavuzuna çok yaklaşırsa ayna dalganın yayılma modunu bozarak iletimi keser. Şekil 3.8 (b)'de bağdaştırıcıların 1 dB bant genişliği performansı çıkarılabilir. $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ boyutundaki geniş bant GADKA bağdaştırıcı 250 nm 'den daha iyi bant genişliğine ulaşabilir, $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ bağdaştırıcı 225 bant genişliği koruyabilir ve son olarak $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ bağdaştırıcı 140 nm bant genişliğini gösterir. GADKA bağdaştırıcılar, $1.3\text{-}1.8 \mu\text{m}$ dalga boyunda önemli bant performansı göstermektedir, bu sayede optik haberleşmede önemli yer tutan "O" ve "L" bandı arasını sorunsuz şekilde kullanılabilir. Bu yüksek performans, kompakt alan ve geniş bant performansı sayesinde terahertz anten alltaş entegre uyarımı, lenssiz entegre görüntüleme ve çip

üstü entegre laboratuvarların önünü açabilecek FED alttaşı bağdaştırıcılar ortaya konulmuştur.



Şekil 3.8: Dalga kılavuzundan alttaşa bağdaştırıcıya ait performans grafikleri. (a) Ayna uzaklığındaki değişime karşılık bağdaşım performansı. (b) Dalga boyundaki değişime karşılık bağdaşım performansı.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) kullanılarak daha yüksek verimli ve kompakt fotonik bağdaştırıcıların tasarımı ve güneş hücresi yüzey şekillendirme yapılmıştır. Giriş kısmında kullanılan evrimsel algoritmalar açıklanmıştır. İkinci bölümde öncelikle yansıma kaplaması, güve gözü yüzey şekillendirme ve kare yüzey şekillendirme ile güneş hücreleri için bağdaşım verimi artımı incelenmiştir. Ardından üçgen yüzey şekillendirme ile güneş hücresi için emilim hesaplanmış ve çeşitli limitlerle karşılaştırılmıştır. Devamında fiberden çipe bağdaşım başlığına geçilmiş ve kenar bağdaştırıcılar incelenmiştir. Daha sonra ızgara bağdaştırıcılar incelenip PSO ve GA yardımıyla aynasız tek aşındırmalı iyi performans bir ızgara bağdaştırıcı sunulmuştur. Üçüncü kısımda öncelikle çip üzerinde aynı katmanda veya farklı katmandaki optik dalga kılavuzları için yönlü bağdaştırıcılar ve ara katman bağdaştırıcılar incelenmiştir. Ardından biri simetrik diğeri asimetrik çalışan iki yönlü bağdaştırıcı GA ile tasarlanıp sunulmuştur. Üçüncü kısmın diğeri yarısında gün geçtikçe artan entegrasyon yoğunluğu ihtiyacına sahip THz anten aktif katman aktivasyonu, lenssiz görüntüleme, mikro akışkan sezme ve çip üstü laboratuvarlar gibi uygulamalar için umut vaat eden bir bağdaştırma konfigürasyonu olan dalga kılavuzundan alttaşa bağdaştırıcılar anlatılmıştır. Son olarak GA yardımıyla yüksek performanslı ve çok kompakt alttaşa bağdaştırıcılar tasarlanmıştır. Verim ve bant performansları karşılaştırmalı şekilde incelenmiştir.

Fotonik bağdaştırıcılar, telekomünikasyondan kuantum hesaplama kadar çok çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynayan modern optik ve fotonikte kritik bir bileşen olarak ortaya çıkmıştır. Son araştırmalar bunların önemini vurguladıkça ve teknoloji ilerlemeye devam ettikçe fotonik bağdaştırıcıların daha da hayati hale gelmesi beklenmektedir. Fotonik bağdaştırıcılar, optik iletişim sistemlerinde, verilerin ışık sinyalleri yoluyla verimli bir şekilde aktarılmasını sağlayan esastır. Bu teknoloji, azaltılmış enerji tüketimi ile yüksek hızlı, düşük gecikmeli iletişim sağlar.

6G ve ötesi gibi geleceğin teknolojileri, veri aktarım hızları ve ağ kapasitesi için artan talepleri karşılamak için muhtemelen fotonik bağdaştırıcılara dayanacaktır. Kuantum hesaplama ve bilgisayarlar, finanstan ilaç sektörüne kadar çeşitli endüstrilerde devrim yaratabilecek umut verici bir alandır. İyi tasarlanmış fotonik bağdaştırıcılar, kuantum durumlarının kontrollü bir şekilde manipüle edilmesini ve yönlendirilmesini mümkün kıldıklarından, ölçeklenebilir fotonik kuantum hesaplama sistemlerinin geliştirilmesinin ayrılmaz bir parçasıdır. Geleceğin kuantum teknolojilerinde, fotonik bağdaştırıcılar, büyük ölçekli, hataya dayanıklı kuantum bilgisayarlar oluşturmak için hayati öneme sahip olacaktır. Fotonik bağdaştırıcılar, hassas ölçümler sağlamak için ışık sinyallerini birleştirmeye ve ayırmaya yardımcı oldukları için ışık ölçüm ve tespit (LiDAR) sistemlerinde de ayrıca çok kritiktir. Otonom araç teknolojisi ilerledikçe, fotonik bağdaştırıcılar sürücüsüz araçların güvenliğini ve verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamaya devam edecektir. Fotonik bağdaştırıcılar, optik uyumlu tomografi ve biyosensörler gibi biyomedikal uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, verimli ışık sinyali işleme ve yüksek çözünürlüklü görüntüleme için fotonik bağdaştırıcılara dayanır. Biyoloji ve tıp konusundaki anlayışımız ilerledikçe, fotonik bağdaştırıcılar erken hastalık tespiti, ilaç dağıtımı ve daha kesin cerrahi prosedürlerde çığır açabilir.

Sonuç olarak tez kapsamında daha iyi ve kompakt fotonik bağdaştırıcıların geliştirilmesi gelecekteki şu 4 teknoloji açısından hayati öneme sahiptir: “6G Yüksek hız haberleşme ve entegre fotonik devreler”, “Ölçeklenebilir kuantum bilgisayarlar”, “LiDAR ve otonom robotlar” ve “Biyomedikal uygulamalar”.

KAYNAKLAR

- [1] **Soga, T.**, (2006). Fundamentals of solar cell, *In Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion* (pp. 3-43). Elsevier.
- [2] **Dewan, R., Fischer, S., Meyer-Rochow, V. B., Özdemir, Y., Hamraz, S., & Knipp, D.**, (2011). Studying nanostructured nipple arrays of moth eye facets helps to design better thin film solar cells, *Bioinspiration & biomimetics*, 7(1), 016003.
- [3] **Bardhan Roy, Arijit, Kalluri Vinay Kumar, and Moumita Saha.**, (2021). Light management studies by using different surface texturing for thin c-Si solar cells, *Applied Physics A*, 127 1-12.
- [4] **Green, M. A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H. J.**, (2014). The emergence of perovskite solar cells, *Nature photonics*, 8(7), 506-514.
- [5] **Hoppe, H., & Sariciftci, N. S.**, (2004). Organic solar cells: An overview, *Journal of materials research*, 19(7), 1924-1945.
- [6] **Skaar, J.**, (2006). Fresnel equations and the refractive index of active media. *Physical Review E*, 73(2), 026605.
- [7] **Mavrokefalos, A., Han, S. E., Yerci, S., Branham, M. S., & Chen, G.**, (2012). Efficient light trapping in inverted nanopillar thin crystalline silicon membranes for solar cell applications, *Nano letters*, 12(6), 2792-2796.
- [8] **Schneider, B. W., Lal, N. N., Baker-Finch, S., & White, T. P.**, (2014). Pyramidal surface textures for light trapping and antireflection in perovskite-on-silicon tandem solar cells, *Optics Express*, 22(106), A1422-A1430.
- [9] **Richter, J., Nezhad, M. P., Hadam, B., Taubner, T., Knoch, J., Merget, F., ... & Witzens, J.**, (2018). High-Q inverted silica microtoroid resonators monolithically integrated into a silicon photonics platform, *Optics Express*, 26(21), 27418-27440.
- [10] **Mekis, A., Gloeckner, S., Masini, G., Narasimha, A., Pinguet, T., Sahni, S., & De Dobbelaere, P.**, (2010). A grating-coupler-enabled CMOS photonics platform, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 17(3), 597-608.
- [11] **Blaicher, M., Billah, M. R., Hoose, T., Dietrich, P. I., Hofmann, A., Randel, S., ... & Koos, C.**, (2018). 3D-printed ultra-broadband highly efficient out-of-plane coupler for photonic integrated circuits. *In CLEO: Science and Innovations* (pp. STh1A-1). Optical Society of America.

- [12] **Dong, B., Guo, X., Ho, C. P., Li, B., Wang, H., Lee, C., ... & Lo, G. Q.,** (2017). Silicon-on-insulator waveguide devices for broadband mid-infrared photonics, *IEEE Photonics Journal*, 9(3), 1-10.
- [13] **Sodagar, M., Pourabolghasem, R., Eftekhar, A. A., & Adibi, A.,** (2014). High-efficiency and wideband interlayer grating couplers in multilayer Si/SiO₂/SiN platform for 3D integration of optical functionalities, *Optics express*, 22(14), 16767-16777.
- [14] **Chen, P., Chen, S., Guan, X., Shi, Y., & Dai, D.,** (2014). High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response, *Optics letters*, 39(21), 6304-6307.
- [15] **Kim, J., Pak, J. S., Cho, J., Song, E., Cho, J., Kim, H., ... & Kim, J.,** (2011). High-frequency scalable electrical model and analysis of a through silicon via (TSV), *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 1(2), 181-195.
- [16] **Berry, C. W., Wang, N., Hashemi, M. R., Unlu, M., & Jarrahi, M.,** (2013). Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes, *Nature communications*, 4(1), 1622.
- [17] **Roy, M., Seo, D., Oh, S., Yang, J. W., & Seo, S. (2017).**, A review of recent progress in lens-free imaging and sensing, *Biosensors and Bioelectronics*, 88, 130-143.
- [18] **Adamopoulos, C., Zarkos, P., Buchbinder, S., Bhargava, P., Niknejad, A., Anwar, M., & Stojanović, V.,** (2021). Lab-on-chip for everyone: Introducing an electronic-photonic platform for multiparametric biosensing using standard CMOS processes, *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society*, 1, 198-208.
- [19] **Serita, K., Murakami, H., Kawayama, I., & Tonouchi, M.,** (2019). A terahertz-microfluidic chip with a few arrays of asymmetric meta-atoms for the ultra-trace sensing of solutions, *In Photonics, MDPI* (Vol. 6, No. 1, p. 12).
- [20] **Kennedy, J., & Eberhart, R.,** (1995). Particle swarm optimization, *In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
- [21] **Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T.,** (2007). Particle swarm optimization: An overview, *Swarm intelligence*, 1, 33-57.
- [22] **Patil, D. D., & Dangewar, B. D.,** (2014). Multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) based on Pareto dominance approach, *International Journal of Computer Applications*, 107(4).
- [23] **Haupt, R. L.,** (1995). An introduction to genetic algorithms for electromagnetics, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 37(2), 7-15.
- [24] **Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V.,** (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future, *Multimedia Tools and Applications*, 80, 8091-8126.
- [25] **Deng, Y., Liu, Y., & Zhou, D.,** (2015). An improved genetic algorithm with initial population strategy for symmetric TSP, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.

- [26] **Bhandari, D., Murthy, C. A., & Pal, S. K.,** (1996). Genetic algorithm with elitist model and its convergence, *International journal of pattern recognition and artificial intelligence*, 10(06), 731-747.
- [27] **Hermle, M., Feldmann, F., Bivour, M., Goldschmidt, J. C., & Glunz, S. W.,** (2020). Passivating contacts and tandem concepts: Approaches for the highest silicon-based solar cell efficiencies, *Applied Physics Reviews*, 7(2), 021305.
- [28] **Romeo, A., & Artegiani, E.,** (2021). CdTe-based thin film solar cells: past, present and future, *Energies*, 14(6), 1684.
- [29] **Kim, J. Y., Lee, J. W., Jung, H. S., Shin, H., & Park, N. G.,** (2020). High-efficiency perovskite solar cells, *Chemical Reviews*, 120(15), 7867-7918.
- [30] **Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J. F., & Ekins-Daukes, N. J.,** (2021). Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency, *Journal of Applied Physics*, 129(24), 240901.
- [31] **Wang, B., Biesold, G. M., Zhang, M., & Lin, Z.,** (2021). Amorphous inorganic semiconductors for the development of solar cell, photoelectrocatalytic and photocatalytic applications, *Chemical Society Reviews*, 50(12), 6914-6949.
- [32] **Sarkin, A. S., Ekren, N., & Sağlam, Ş.,** (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels, *Solar energy*, 199, 63-73.
- [33] **Selopal, G. S., Zhao, H., Wang, Z. M., & Rosei, F.,** (2020). Core/shell quantum dots solar cells, *Advanced Functional Materials*, 30(13), 1908762.
- [34] **Kim, M. S., Lee, J. H., & Kwak, M. K.,** (2020). Surface texturing methods for solar cell efficiency enhancement, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 1389-1398.
- [35] **Pinto, R. M., Gund, V., Calaza, C., Nagaraja, K. K., & Vinayakumar, K. B.,** (2022). Piezoelectric aluminum nitride thin-films: A review of wet and dry etching techniques, *Microelectronic Engineering*, 111753.
- [36] **Bencherif, H., Dehimi, L., Pezzimenti, F., & Della Corte, F. G.,** (2019). Improving the efficiency of a-Si: H/c-Si thin heterojunction solar cells by using both antireflection coating engineering and diffraction grating, *Optik*, 182, 682-693.
- [37] **Zhu, Y., Shu, L., Zhang, Q., Zhu, Y., Poddar, S., Wang, C., ... & Fan, Z.,** (2021). Moth eye-inspired highly efficient, robust, and neutral-colored semitransparent perovskite solar cells for building-integrated photovoltaics. *EcoMat*, 3(4), e12117.
- [38] **Stiebig, H., Senoussaoui, N., Zahren, C., Haase, C., & Müller, J.,** (2006). Silicon thin-film solar cells with rectangular-shaped grating couplers, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 14(1), 13-24.
- [39] **Atalay, I. A., Gunes, H. A., Alpkilic, A. M., & Kurt, H.,** (2020). Multi-objective particle swarm optimization on ultra-thin silicon solar cells, *Journal of Optics*, 49, 446-454.

- [40] Wang, J., Zhong, F., Liu, H., Zhao, L., Wang, W., Xu, X., ... & Yan, H., (2021). Influence of the textured pyramid size on the performance of silicon heterojunction solar cell, *Solar Energy*, 221, 114-119.
- [41] Wang, K. X., Yu, Z., Liu, V., Cui, Y., & Fan, S., (2012). Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings, *Nano letters*, 12(3), 1616-1619.
- [42] Konedana, S. S. P., Vaida, E., Viller, V., & Shalev, G., (2019). Optical absorption beyond the Yablonovitch limit with light funnel arrays, *Nano Energy*, 59, 321-326.
- [43] Tsai, C. T., Cheng, C. H., Kuo, H. C., & Lin, G. R., (2019). Toward high-speed visible laser lighting based optical wireless communications, *Progress in Quantum Electronics*, 67, 100225.
- [44] Gao, H., Chen, G. F., Xing, P., Choi, J. W., Low, H. Y., & Tan, D. T., (2020). High-resolution 3D printed photonic waveguide devices, *Advanced Optical Materials*, 8(18), 2000613.
- [45] Chen, X., Milosevic, M. M., Stanković, S., Reynolds, S., Bucio, T. D., Li, K., ... & Reed, G. T., (2018). The emergence of silicon photonics as a flexible technology platform, *Proceedings of the IEEE*, 106(12), 2101-2116.
- [46] Tanner, M. G., Dyer, S. D., Baek, B., Hadfield, R. H., & Woo Nam, S., (2011). High-resolution single-mode fiber-optic distributed Raman sensor for absolute temperature measurement using superconducting nanowire single-photon detectors, *Applied Physics Letters*, 99(20), 201110.
- [47] Mu, X., Wu, S., Cheng, L., & Fu, H. Y., (2020). Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: A review, *Applied Sciences*, 10(4), 1538.
- [48] Li, Y., Wang, M., Yang, S., Quan, X., Xu, J., Wu, L., ... & Cheng, X., (2022). Polarization Insensitive Edge Coupler Assisted by Subwavelength Grating and Suspended Structure, *IEEE Photonics Technology Letters*, 34(14), 765-768.
- [49] Wang, J., Xuan, Y., Lee, C., Niu, B., Liu, L., Liu, G. N., & Qi, M., (2016). Low-loss and misalignment-tolerant fiber-to-chip edge coupler based on double-tip inverse tapers, *In Optical Fiber Communication Conference* (pp. M2I-6). Optica Publishing Group.
- [50] Wang, J., Qi, M., Xuan, Y., Huang, H., Li, Y., Li, M., ... & Gan, F., (2014). Proposal for fabrication-tolerant SOI polarization splitter-rotator based on cascaded MMI couplers and an assisted bi-level taper, *Optics express*, 22(23), 27869-27879.
- [51] Seok, T. J., Quack, N., Han, S., Muller, R. S., & Wu, M. C., (2016). Large-scale broadband digital silicon photonic switches with vertical adiabatic couplers, *Optica*, 3(1), 64-70.
- [52] Liu, Y., & Yu, J., (2007). Low-loss coupler between fiber and waveguide based on silicon-on-insulator slot waveguides, *Applied optics*, 46(32), 7858-7861.
- [53] Cheben, P., Xu, D. X., Janz, S., & Densmore, A., (2006). Subwavelength waveguide grating for mode conversion and light coupling in integrated optics, *Optics express*, 14(11), 4695-4702.

- [54] **Cheben, P., Bock, P. J., Schmid, J. H., Lapointe, J., Janz, S., Xu, D. X., ... & Hall, T. J.,** (2010). Refractive index engineering with subwavelength gratings for efficient microphotonic couplers and planar waveguide multiplexers, *Optics letters*, 35(15), 2526-2528.
- [55] **Halir, R., Bock, P. J., Cheben, P., Ortega-Moñux, A., Alonso-Ramos, C., Schmid, J. H., ... & Janz, S.,** (2015). Waveguide sub-wavelength structures: a review of principles and applications, *Laser & Photonics Reviews*, 9(1), 25-49.
- [56] **Fritze, M., Knecht, J., Bozler, C., Keast, C., Fijol, J., Jacobson, S., ... & Manolatos, C.,** (2003). Fabrication of three-dimensional mode converters for silicon-based integrated optics, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 21(6), 2897-2902.
- [57] **Ren, G., Chen, S., Cheng, Y., & Zhai, Y.,** (2011). Study on inverse taper based mode transformer for low loss coupling between silicon wire waveguide and lensed fiber, *Optics Communications*, 284(19), 4782-4788.
- [58] **Liu, N., Zhang, J., Zhu, Z., Xu, W., & Liu, K.,** (2021). Efficient coupling between an integrated photonic waveguide and an optical fiber, *Optics express*, 29(17), 27396-27403.
- [59] **Tu, X., Dumais, P., Li, M., Goodwill, D., Fu, H., Geng, D., & Bernier, E.,** (2015). Low polarization-dependent-loss silicon photonic trident edge coupler fabricated by 248 nm optical lithography, *In Asia Communications and Photonics Conference* (pp. AS4B-3). Optica Publishing Group.
- [60] **Papes, M., Cheben, P., Benedikovic, D., Schmid, J. H., Pond, J., Halir, R., ... & Vašinek, V.,** (2016). Fiber-chip edge coupler with large mode size for silicon photonic wire waveguides, *Optics express*, 24(5), 5026-5038.
- [61] **Doylend, J. K., & Knights, A. P.,** (2006). Design and simulation of an integrated fiber-to-chip coupler for silicon-on-insulator waveguides, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 12(6), 1363-1370.
- [62] **Takei, R., Suzuki, M., Omoda, E., Manako, S., Kamei, T., Mori, M., & Sakakibara, Y.,** (2013). Silicon knife-edge taper waveguide for ultralow-loss spot-size converter fabricated by photolithography, *Applied Physics Letters*, 102(10), 101108.
- [63] **Zhao, Z., & Fan, S.,** (2020). Design principles of apodized grating couplers, *Journal of Lightwave Technology*, 38(16), 4435-4446.
- [64] **Hong, J., Spring, A. M., Qiu, F., & Yokoyama, S.,** (2019). A high efficiency silicon nitride waveguide grating coupler with a multilayer bottom reflector, *Scientific reports*, 9(1), 1-8.
- [65] **Sapra, N. V., Vercruyse, D., Su, L., Yang, K. Y., Skarda, J., Piggott, A. Y., & Vučković, J.,** (2019). Inverse design and demonstration of broadband grating couplers, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(3), 1-7.
- [66] **Wang, X., Yu, H., Huang, Q., Zhang, Z., Zhou, Z., Fu, Z., ... & Yang, J.,** (2021). Polarization-independent fiber-chip grating couplers optimized by the adaptive genetic algorithm, *Optics Letters*, 46(2), 314-317.

- [67] **Kang, S., Gao, F., Yu, X., Bo, F., Zhang, G., & Xu, J.,** (2023). Lithium niobate thin film grating couplers optimized by particle swarm optimization and a neural network, *JOSA B*, 40(5), D21-D25.
- [68] **Akca, B., Gunes, H. A., Kurt, H., & Unlu, M.,** (2022). A fiber-to-waveguide, 1D grating coupler design using genetic algorithm for 1550 nm applications. In *Integrated Photonics Platforms II* (Vol. 12148, pp. 70-75). SPIE.
- [69] **Butler, J. K., Sun, N. H., & Evans, G. A.,** (2022). Waveguide characteristics near the second Bragg condition, *IEEE Access*, 10, 102669-102690.
- [70] **Liang, T., & Ziolkowski, R. W.,** (1998). Grating assisted waveguide-to-waveguide couplers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(5), 693-695.
- [71] **Morino, H., Maruyama, T., & Iiyama, K.,** (2014). Reduction of wavelength dependence of coupling characteristics using Si optical waveguide curved directional coupler, *Journal of lightwave technology*, 32(12), 2188-2192.
- [72] **Hsu, S. H.,** (2010). Signal power tapped with low polarization dependence and insensitive wavelength on silicon-on-insulator platforms, *JOSA B*, 27(5), 941-947.
- [73] **Yun, H., Shi, W., Wang, Y., Chrostowski, L., & Jaeger, N. A.,** (2013). 2x2 adiabatic 3-dB coupler on silicon-on-insulator rib waveguides, In *Photonics North 2013* (Vol. 8915, pp. 251-256). SPIE.
- [74] **Chen, G. F., Ong, J. R., Ang, T. Y., Lim, S. T., Png, C. E., & Tan, D. T.,** (2017). Broadband silicon-on-insulator directional couplers using a combination of straight and curved waveguide sections, *Scientific reports*, 7(1), 7246.
- [75] **Lu, Z., Yun, H., Wang, Y., Chen, Z., Zhang, F., Jaeger, N. A., & Chrostowski, L.,** (2015). Broadband silicon photonic directional coupler using asymmetric-waveguide based phase control, *Optics express*, 23(3), 3795-3808.
- [76] **Sattari, H., Takabayashi, A. Y., Zhang, Y., Verheyen, P., Bogaerts, W., & Quack, N.,** (2020). Compact broadband suspended silicon photonic directional coupler, *Optics Letters*, 45(11), 2997-3000.
- [77] **Xu, P., Zheng, J., Doylend, J. K., & Majumdar, A.,** (2019). Low-loss and broadband nonvolatile phase-change directional coupler switches, *ACS Photonics*, 6(2), 553-557.
- [78] **Hosseinnia, A. H., Atabaki, A. H., Eftekhar, A. A., & Adibi, A.,** (2015). High-quality silicon on silicon nitride integrated optical platform with an octave-spanning adiabatic interlayer coupler, *Optics express*, 23(23), 30297-30307.
- [79] **Zhang, J., Zhang, C., Liang, G., & Yang, Y.,** (2021). Simulation research of high-efficiency unidirectional vertical coupling grating couplers for optical through-silicon vias in 3D optoelectronic integrated circuits, *Optics Communications*, 479, 126408.
- [80] **Sodagar, M., Pourabolghasem, R., Eftekhar, A. A., & Adibi, A.,** (2014). High-efficiency and wideband interlayer grating couplers in multilayer Si/SiO₂/SiN platform for 3D integration of optical functionalities, *Optics express*, 22(14), 16767-16777.

- [81] **Benlakehal, M. E., Hocini, A., Khedrouche, D., Temmar, M. N. E., & Denidni, T. A.,** (2022). Design and analysis of MIMO system for THz communication using terahertz patch antenna array based on photonic crystals with graphene, *Optical and Quantum Electronics*, 54(11), 693.
- [82] **Uppu, R., Midolo, L., Zhou, X., Carolan, J., & Lodahl, P.,** (2021). Quantum-dot-based deterministic photon–emitter interfaces for scalable photonic quantum technology, *Nature nanotechnology*, 16(12), 1308-1317.
- [83] **Guo, X., Xiang, J., Zhang, Y., & Su, Y.,** (2021). Integrated neuromorphic photonics: synapses, neurons, and neural networks, *Advanced Photonics Research*, 2(6), 2000212.
- [84] **Bogaerts, W., Pérez, D., Capmany, J., Miller, D. A., Poon, J., Englund, D., ... & Melloni, A.,** (2020). Programmable photonic circuits. *Nature*, 586(7828), 207-216.
- [85] **Scott, H., Branford, D., Westerberg, N., Leach, J., & Gauger, E. M.,** (2021). Noise limits on two-photon interferometric sensing, *Physical Review A*, 104(5), 053704.
- [86] **Liu, Y., Choudhary, A., Marpaung, D., & Eggleton, B. J.,** (2020). Integrated microwave photonic filters, *Advances in Optics and Photonics*, 12(2), 485-555.
- [87] **Yu, S. P., Lucas, E., Zang, J., & Papp, S. B.,** (2022). A continuum of bright and dark-pulse states in a photonic-crystal resonator, *Nature Communications*, 13(1), 3134.
- [88] **Hafezi, M., Mittal, S., Fan, J., Migdall, A., & Taylor, J. M.,** (2013). Imaging topological edge states in silicon photonics, *Nature Photonics*, 7(12), 1001-1005.
- [89] **Tamir, T., & Peng, S. T.,** (1977). Analysis and design of grating couplers, *Applied physics*, 14, 235-254.
- [90] **Moghaddam, M. K., Attari, A. R., & Mirsalehi, M. M.,** (2010). Improved photonic crystal directional coupler with short length, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 8(1), 47-53.
- [91] **Noriki, A., Tamai, I., Ibusuki, Y., Ukita, A., Suda, S., Shimura, D., ... & Amano, T.,** (2019). Optical TSV using Si-photonics integrated curved micro-mirror, *In 2019 International 3D Systems Integration Conference (3DIC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [92] **Hsu, S. W., Ngo, C., & Tao, A. R.,** (2014). Tunable and directional plasmonic coupling within semiconductor nanodisk assemblies, *Nano letters*, 14(5), 2372-2380.
- [93] **Gunes, H. A., Kurt, H., & Unlu, M.,** (2022). Waveguide-to-substrate, vertical bend coupler design for 3D photonic integrated circuits, *In Integrated Photonics Platforms II* (Vol. 12148, pp. 119-122). SPIE.
- [94] **Dorrer, C.,** (2006). High-speed measurements for optical telecommunication systems, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 12(4), 843-858.

[95] **Palik, E. D. (Ed.)**. Handbook of optical constants of solids (Vol. 3). (Syf. 519)
Academic press. (1998).



