

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OPTİK DALGA KILAVUZU DİZİNLERİ VASITASIYLA IŞIĞIN KUPLAJ VE
SOĞURULMA VERİMLİLİKLERİNİN ARTTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf Abdulaziz YILMAZ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT

ARALIK 2017

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151211048 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Yusuf Abdulaziz YILMAZ** 'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**OPTİK DALGA KILAVUZU DİZİNLERİ VASITASIYLA IŞIĞIN KUPLAJ VE SOĞURULMA VERİMLİLİKLERİNİN ARTTIRILMASI**" başlıklı tezi **06.12.2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

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

Yrd. Doç. Dr. Mirbek TURDUEV
TED Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

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

Yusuf Abdulaziz YILMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİK DALGA KILAVUZU DİZİNLERİ VASITASIYLA IŞIĞIN KUPLAJ VE SOĞURULMA VERİMLİLİKLERİNİN ARTTIRILMASI

Yusuf Abdulaziz YILMAZ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Tarih: Aralık 2017

Sunulan çalışmalardan birinde, giriş/çıkış terminallerinin genişlik uyumsuzluğundan kaynaklanan optik güç aktarma problemi için verimli bir çözüm araştırılmıştır. Fikir, yüksek kuplaj verimliliğini sağlamak için Gauss kırılma indis profiline sahip eş dağılımlı olmayan bir ortamı kullanarak ışığın dereceli olarak sıkıştırılması olgusuna dayanır. Başlangıçta derecelendirilmiş kırılma indisli kuplör, 2 boyutlu alanda belirli bir çalışma dalga boyu rejimi göz önüne alınmaksızın tasarlandı (yalnızca normalleştirilmiş birimler kullanılarak: çalışma frekansı, yapısal boyutlar). Etkin ortam teorisi, konumsal olarak değişen indis profilini, sonlu uzunluk/genişlik ve sabit kırılma indisli dielektrik şeritler ile değiştirmek için kullanılmıştır. Zaman-alanında sonlu-farklar yöntemi, ışık kuplaj verimliliğini arttırmada önemli rol oynayan parametreleri belirlemek ve tasarlanan güç kuplörünün örneklenme etkisini araştırmak için kullanılmıştır. Geleneksel sivrileştirilmiş ve direk kuplörlerin kuplaj performansı, optik dalga kılavuzları dizinleri ile tasarlanmış kuplörün kuplaj performansı ile karşılaştırıldığında; kuplaj verimliliği geniş bir frekans aralığı boyunca yaklaşık %30'dan %95'e arttığı gözlemlenmiştir. Ardından, entegre fotonik uygulamalara uygun gerçekçi optik güç kuplörünü gerçekleştirmek için, 3 boyutlu

zaman alanı analizleri ile devam edilmiş ve önerilen yapı sayısal olarak yalıtkan üstü Si üzerinde tasarlanmıştır. Telekom dalga boyu rejiminde çalıştırmak için en yüksek iletim penceresinin merkez dalga boyu $1.55 \mu\text{m}$ 'ye eşitlendiğinde, şeritli kuplörün boyutları $9.77 \mu\text{m}$ (ilerleme yönüne dik yön boyunca) ve $7.69 \mu\text{m}$ (ilerleme yönü boyunca) olmaktadır. Mikrodalga deneyleri, önerilen şeritli kuplörün çalışma prensibini göstermek ve derecelendirilmiş indis modülasyonunun gelen konumsal ışın genişliği sıkıştırmasına etkisini anlamak için yapılmıştır. Konumsal sıkıştırma, kuplaj işlemi için hayati önem taşımaktadır ve sayısal olarak hesaplanan alan sıkıştırma/yakınsaklık fenomeni ile uyumludur. 7.1:1'e kadar yüksek benek çapı dönüşüm oranı ölçülürken, 5.0-16.0 GHz frekans aralığında %60'tan fazla bir kuplaj verimliliği gösterilmiştir. Son olarak, önerilen şeritli dalga kılavuzu kuplörün önemli noktaları şu şekilde özetlenebilir: Yapı boyutsal olarak kompakttır, geleneksel indis modülasyon tabanlı optik kuplörlere kıyasla daha az dispersiyona sahiptir, üretime daha uygundur ve tamamen dielektrik olması sayesinde ek iç malzeme kayıplarına maruz kalmamaktadır.

Sunulan çalışmaların diğerinde, kompakt, düşük maliyetli ve çok renkli germanyum kızılötesi fotodetektör, adiyabatik olarak ayarlanmış düzlemsel periyodiklikle 1 boyutlu ızgara kılavuzlanmış-mod rezonans durumu kullanılarak tasarlanmıştır. Sayısal olarak, her dalga vektör bileşeni farklı yerel düzlemsel periyotlarla eşleştiği için, rezonans fenomeni ile birlikte ayrıca tayfsal bir ayrıştırma meydana geldiği gösterilmiştir. Önerilen fotodetektör, $0.413 \mu\text{m}^2$ 'lik çok küçük aktif bölgeye sahiptir, 70 nm'lik bant genişliğinde 0.63 A/W 'ye kadar ideal duyarlılığa ve %61'e kadar çok renkli foton soğurulmasına olanak tanımıştır. Bildirilen sonuçlar, son derece minyatürleştirilmiş ultra-kompakt çok renkli fotodetektör şemalarına çok değerli bir bakış açısı sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Optik dalga kılavuzu dizinleri, Fotonik örgü, Optik kuplör, Etkin ortam teorisi, Kılavuzlanmış-mod rezonans, Optik soğurulma, Kızılötesi fotodetektör.

ABSTRACT

Master of Science

EFFICIENCY ENHANCEMENT OF LIGHT COUPLING AND ABSORPTION WITH OPTICAL WAVEGUIDE ARRAYS

Yusuf Abdulaziz YILMAZ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Hamza KURT

Date: December 2017

One of the presented works investigates a possible solution for general optical power coupling problem arising from width mismatch of in-/out- waveguide channels. The idea is based on gradually converging of light to provide high coupling efficiency and utilizes inhomogeneous medium having a Gaussian refractive index profile. Initially, the graded-index coupler was designed without considering a specific operating wavelength regime at the 2 dimensional domain (employing only normalized units: operating frequency, structural dimensions). Effective medium theory is used to replace spatially varying index profile with dielectric stripes of finite length/width and constant effective refractive index. Finite-difference time-domain method is used to determine the parameters that play a key role to enhance the light coupling efficiency and investigate the sampling effect of designed power coupler. Comparing the coupling performance of conventional benchmark adiabatic and butt couplers with the designed coupler with optical waveguide arrays, coupling efficiency increases from approximately 30% to 95% over a wide frequency interval. Then, to realize realistic optical power coupler appropriate to integrated photonic

applications, we continued with 3 dimensional time domain analyses and the proposed structure is numerically designed on a silicon-on-insulator wafer. Equalizing the center wavelength of high transmission window to be equal to 1.55 μm to operate at telecom wavelength regime, the dimensions of the striped coupler becomes 9.77 μm (along the transverse to propagation direction) and 7.68 μm (along the propagation direction). The microwave experiments have done to demonstrate the working principle of the proposed stripped waveguide coupler and to understand the effect of a gradient index modulation on the incident spatial beam width compression. A spatial compression is vital for a coupling operation and is in concordance with the numerically calculated field compression/converging phenomenon. Spot size conversion ratio as high as 7.1:1 is measured, whereas a coupling efficiency over 60% in the frequency range of 5.0-16.0 GHz has been also demonstrated. Finally, the important highlights of proposed coupler with dielectric stripes can be summarized as follows: the structure is compact, is less dispersive comparing to the conventional index modulation based optical couplers, is more feasible to fabricate, and is not exposed to additional intrinsic material losses because of all dielectric.

Other one of the presented works, a compact low-cost multicolor germanium infrared photodetector is designed by utilizing the guided-mode resonance condition of a one-dimensional grating with adiabatically tuned in-plane periodicity. It is shown numerically that the resonance phenomenon is accompanied by a spectral splitting, as every wavevector component is matched with different instantaneous local in-plane periods. In result, the proposed photodetector enables multi-wavelength photon absorption up to 61% efficiency and an ideal responsivity up to 0.63 A/W over a 70 nm bandwidth, while maintaining a very small active region of 0.413 μm^2 . The reported results provide a very valuable insight into highly miniaturized ultra-compact multicolor photodetection schemes.

Keywords: Optical waveguide arrays, Photonic lattice, Optical coupler, Effective medium theory, Guided-mode rezonance, Optical absorption, Infrared fotodetector.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımnda başarılı olmam için bana yardımcı olan kişilere samimi teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Akademik yolculuğumda benden desteklerini esirgemedikleri için aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederek başlamak istiyorum. Hayattaki başarılarımlın çoğunu, bana en yakın kişilere borçluyum.

Yüksek lisans süresi boyunca beni yönlendiren, değerli vaktini ve emeğini esirgemeyen Prof. Dr. Hamza KURT ile çalışma imkanına sahip oldum. Öncelikle tez danışmanım Prof. Dr. Hamza KURT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Yrd. Doç. Dr. Mirbek TURDUEV'e göstermiş olduğu destek ve ilgiden dolayı teşekkür ederim. Araştırmalarımnda bana yardımcı olmak için elinden gelen her şeyi yapan ve onun desteği olmadan bu yolculuğun çok daha zor olacağı kesin olan Zeki HAYRAN'a teşekkür ederim. Kıymetli dostluğu ile ilk tanıştığımız günden beri desteğini esirgemeyen Sinan Erkam TANDOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca şu andaki ve geçmişteki laboratuvar arkadaşlarıma, alfabetik sıraya göre, Bilgehan Barış ÖNER, Döne YILMAZ, İbrahim Halil GİDEN, Mediha TUTGUN, Melike YILMAZ, Nazmi YILMAZ, Neslihan ETİ, Utku Görkem YASA, Takiyettin Oytun KILINÇ, Tolga YILDIRIM'a teşekkür etmek istiyorum. Bu tezin yazılmasındaki katkılarından dolayı Sertaç KARABÜBER'e teşekkür ederim.

Son olarak TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, yüksek lisans hayatımda burs vererek maddi sıkıntı çekmememi sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne ve BİDEB 2228-A kapsamı ile kısmı burs veren TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL FENOMENLER	5
2.1 Optik Dalga Kılavuzu Dizinleri.....	5
2.2 Zaman- alanında Sonlu-farklar Yöntemi	6
2.2.1 Yee'nin ZASF yöntemi	7
2.2.2 Mükemmel uyumlu katmanlar	9
2.2.3 Sayısal dispersiyon	9
2.2.4 Sayısal kararlılık.....	9
2.3 Etkin Ortam Teorisi	11
3. KUPLÖR VE FOTODETEKTÖR TASARIMI	13
3.1 Konumsal Olarak Değişen Dielektrik Optik Dalga Kılavuzu Dizinleri ile Verimli Işık Kuplajının Teoriksel ve Deneysel Araştırılması.....	13
3.1.1 Giriş.....	13
3.1.2 Problemin tanımlanması ve kuplör bölgesinin tasarım yaklaşımı	15
3.1.3 EOT ile eş dağılımlı olmayan ortamın örneklenmesi.....	19
3.1.4 Mikrodalga rejiminde tasarım prensibinin deneysel gösterimi	25
3.1.5 Sonuç	28
3.2 Kılavuzlanmış-mod Rezonans Tabanlı Çok Renkli Germanyum Kızılötesi Fotodetektör	29
3.2.1 Giriş.....	29
3.2.2 Metot	32
3.2.3 Sonuç.....	35
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1:	(a) 14 μm 'lik bir dalga kılavuzu ayrımı ile tek boyutlu bir optik dalga kılavuzu dizininin mikroskop görüntüsü (üstten görünüş) (b) 40 μm dalga kılavuzu ayrımı ile iki boyutlu bir kübik dalga kılavuzu dizininin mikroskop görüntüsü [14,15]...	5
Şekil 2.2:	Yee ZASF algoritmasındaki tipik birim hücre [URL-1].....	8
Şekil 2.3:	ZASF küpsel birim hücresi.....	10
Şekil 3.1:	(a) Giriş dalga kılavuzu dar çıkış dalga kılavuzuna direk kuplajlı (b) Farklı direk kuplörlerin kuplaj verimliliği.....	16
Şekil 3.2:	(a) Doğrusal sivrileştirilmiş kuplaj bölgesi dalga kılavuzu kuplajının şematik gösterimi (b) Direk ve doğrusal sivrileştirilmiş konik kuplörlerin kuplaj verimlilikleri.....	17
Şekil 3.3:	(a) Eş dağılımlı olmayan kuplaj bölgesi dielektrik dalga kılavuzu kuplörün şematik gösterimi (b) Eş dağılımlı olmayan kuplaj bölgesinin elektrik geçirgenliği (c) DKİ kuplörün iletim verimliliği.....	19
Şekil 3.4:	(a) Konumsal olarak değişen şeritli dalga kılavuzu kuplörün şematik gösterimi (b) Farklı sayıda dielektrik şeritlerle tasarlanan kuplörlerin iletim verimlilikleri (c) DKİ ve şeritli kuplörlerin iletim verimlilikleri.....	20
Şekil 3.5:	Gelen frekans $a/\lambda=0.25$ iken (a) $N_s=35$ (b) $N_s=63$ ve $a/\lambda=0.50$ iken (c) $N_s=35$ (d) $N_s=63$ şeritli tasarımların kararlı durum elektrik alan şiddet dağılımları.....	22
Şekil 3.6:	(a) Yalıtkan üstü Si üzerine tasarlanan kuplörün şematik gösterimi (b) 2 ve 3 boyutlu ZASF için üst üste çizilmiş iletim spektrumları.....	23
Şekil 3.7:	(a) Deneysel kurulumun fotoğrafik resmi (b), (d), (f) deneysel ölçülen (dny) ve (c), (e), (g) analitiksel hesaplanan ($nüm$) kararlı hal elektrik alan şiddet dağılımları.....	26
Şekil 3.8:	Kuplörün giriş ve çıkış tarafındaki (a) 6.7 GHz, (b) 8.0 GHz, (c) 10.8 GHz ve (d) 15.0 GHz frekansları için ışın profilleri...	27
Şekil 3.9:	(a) (Üst) Yapılan içi boş mikrodalga dalga kılavuzlarının fotoğrafik resmi ve (alt) dalga kılavuzlu deneysel düzeneğin şematik gösterimi (b) Normalize iletim verimlilik spektrumu..	28
Şekil 3.10:	Önerinin ana fikri gösterilmiştir. Değişen frekanslı optik rezonatörlerin kaskadı çok renkli ışık lokalizasyonları verebilir.....	30
Şekil 3.11:	TE/TM dalgası için normal ışınımında çok katmanlı piramit metemalzeme soğurucu için soğurma spektrumu [77].....	30
Şekil 3.12:	(a) 3 μm , (b) 6 μm , (c) 9 μm ve (d) 12 μm dalga boyları için piramit metemalzeme soğurucu H_y (renk haritaları) ve enerji akış (ok haritaları) dağılımı [77].....	31

Şekil 3.13:	(a) Silisyum nitrür (Si_3N_4) ızgarasının ölçülmüş yansıma spektrumu (b) Chirped ızgaralı tasarım (c) Chirped ızgaranın rezonans dalga boyu haritası [78].....	32
Şekil 3.14:	(a) Önerilen konfigürasyonun düzlem içi periyodikliği mekansal spektrum ayrımı sağlar. (b) Önerilen konfigürasyonun şematik açıklaması.....	33
Şekil 3.15:	Farklı dalga boylarının (a) 1.464 μm , (b) 1.439 μm , (c) 1.418 μm ve (d) 1.401 μm elektrik alan şiddet dağılımları.....	34
Şekil 3.16:	(a) Boşluktaki 100 nm kalınlığındaki bir Ge'nin soğurma spektrumu. Ge aktif bölgesi için üst üste bindirilmiş (b) soğurma ve (c) duyarlılık spektrumu.....	35



KISALTMALAR

ZASF	: Zaman-alanında Sonlu-farklar
CFL	: Courant-Friedrichs-Lewy
EOT	: Etkin Ortam Teorisi
TE	: Enine Elektrik
TM	: Enine Manyetik
FK	: Fotonik Kristal
DKİ	: Derecelendirilmiş Kırılma İndisli
YTTG	: Yarı-tepede Tüm-genişlik
Si	: Silisyum
Ge	: Germanyum
InGaAS	: İndiyum Galyum Arsünür
KMR	: Kılavuzlanmış-mod Rezonans

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
v	Dalga hızı
μ	Manyetik geçirgenlik
ε	Elektrik geçirgenlik
Δx	x yönündeki sayısal konum adımı
Δy	y yönündeki sayısal konum adımı
Δz	z yönündeki sayısal konum adımı
Δt	Sayısal algoritma zaman adımı
Δh	Sayısal algoritma konum adımı
E_x	x yönündeki elektrik alan bileşeni
E_y	y yönündeki elektrik alan bileşeni
E_z	z yönündeki elektrik alan bileşeni
H_x	x yönündeki manyetik alan bileşeni
H_y	y yönündeki manyetik alan bileşeni
H_z	z yönündeki manyetik alan bileşeni
λ	Dalga boyu
Λ	Periyot
f	Doluluk oranı
ε_0	Ortamin elektrik geçirgenliği
ε_1	Maddenin elektrik geçirgenliği
$\varepsilon_{TE}^{(0)}$	Sıfırıncı derece TE etkin elektrik geçirgenliği
$\varepsilon_{TM}^{(0)}$	Sıfırıncı derece TM etkin elektrik geçirgenliği
$\varepsilon_{TE}^{(2)}$	İkinci derece TE etkin elektrik geçirgenliği
$\varepsilon_{TM}^{(2)}$	İkinci derece TM etkin elektrik geçirgenliği
ε_f	Boş uzayın elektrik geçirgenliği, $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m
λ_0	Boş uzay dalga boyu
$w_{giriş}$	Giriş dalga kılavuzu genişliği
$w_{çıkış}$	Çıkış dalga kılavuzu genişliği
a	Normalleştirilmiş birim mesafe
d	Plaka kalınlığı
n	Plaka kırılma indisi
k	Dalga sayısı
l_c	Kuplör uzunluğu
σ	Gauss fonksiyonu sapması
ε_{eff}	Etkin elektrik geçirgenlik
$d_{şerit}$	Dielektrik şerit genişliği

d_{kesit}	Kesit genişliği
d_{maks}	Maksimum dielektrik şerit genişliği
d_{min}	Minimum dielektrik şerit genişliği
T	İletim değeri
t_{alt}	Alttaş kalınlığı
t_{dk}	Kuplör kalınlığı
Al_2O_3	Alümina
SiO_2	Silisyum oksit
t_m	Metal ince film kalınlığı
t_d	Dielektrik ince film kalınlığı
p_1	Rezanatörün enine çıkış periyodu
p_2	Rezanatörün enine giriş periyodu
θ_m	Dielektrik şeritlerin x yönündeki açđ sapması
Si_3O_4	Silisyum nitrür



1. GİRİŞ

Periyodiklik, en temel fiziksel ve matematiksel kavramlardan biridir. Periyodik yapılar doğada sıklıkla görülür, metallerin ve yarı iletkenlerin kristal örgülerindeki atomların düzeni buna birincil örneklerden biridir. Bu tür sistemlerin fiziği çok zengindir ve kapsamlı olarak incelenmiştir. Örneğin, elektronların hareketleri periyodik kristal potansiyellerinden şiddetle etkilenir bu da belirli malzemelerin iletkenlik özelliklerini ayarlama olanağı vermiştir. Bu etki, mikroelektronik endüstrisinin gelişimine ve devam eden ilerlemesine sebep olan transistörün icat edilmesine yol açmıştır.

Optikte periyodiklik, bir veya daha fazla uzaysal boyutta bir kırılma indisi modülasyonu gösteren malzemelerle ilişkilidir. Genel örnekler optik ızgaraları, dalga kılavuzlarını, dalga kılavuzu dizinlerini, fotonik kristalleri ve fotonik kristal fiberleri içerir. Fotonik kristallerde ilerleyen optik dalgalar bir yarı iletken kristal boyunca ilerleyen elektronlara benzer bir şekilde davranır [1]. Bu nedenle, yarı iletken elektronik cihazlarda elektronun durumuna oldukça benzer bir şekilde periyodik fotonik yapılar ışığın akışını kontrol etmek için kullanılabilir. Periyodik fotonik yapılar, fiber iletişim sistemleri ile optik bilgi ve sinyal işleme için optik entegre devrelerin gerçekleştirilmesinde muazzam bir potansiyel taşırlar. Bu yüzden, bugün optikte yapılan araştırmaların büyük bir kısmı, fotonik mikro- ve nano- yapılardaki periyodik etkileri araştırmaya yöneliktir.

Tarihsel olarak, ayrı optik bileşenler fikri optik alanında oldukça yavaş ortaya çıkmıştır. Bir yandan, klasik bir perspektiften bakıldığında, elektromanyetik alanın kendisi hem konumun hem de zamanın sürekli bir fonksiyonudur ve bu, bilim insanlarının ışığın ayrık sistemlerdeki farklı karakteristik davranışları gösterebileceğini farketmesinde biraz zamana neden olmuştur [2,3]. Ayrıca, bu fikrin hayata geçirilememesinde daha önemli bir engel, üretim teknolojisinin durumuydu. Dalga kılavuzu dizinleriyle optik kuplaj problemine yönelik ilk çalışmalar 1960'lı yılların başında gerçekleştirilmiş olsa da [4,5]; fotonik kristal yapıların

oluşturulmasını mümkün kılan yüksek kontrastlı dielektrik elemanlar 2000'li yıllara doğru mevcut hale gelmiştir [6].

Yapay periyodik dielektrik yapılar, ışık ilerlemesinin temel özelliklerini kontrol etmek için güçlü bir fırsat sağlamıştır. Fotonik örgü, ışık ilerlemesinin etkin bir şekilde ayrıştırıldığı optik dalga kılavuzları dizisidir. Işığın fotonik örgüde ilerlemesi, ayırık kırınım, kırınım yönetimi ve kesikli yüzey dalgaları gibi eş dağılımlı olan ortamlarla mümkün olmayan birçok yeni fenomen oluşmasına sebep olmuştur. Fotonik örgüler, katı hal ve elektron teorisi fiziği gibi diğer fiziksel konularda ortaya çıkan olguların optik benzerliklerinin farkına varılmasına olanak sağlamıştır. Örneğin, fotonik örgülerdeki ışık ilerlemesi yarı iletken malzemelerin kristal örgüsündeki elektronların hareketini andırıyor. Ayrıca, geometrisini veya kırılma indisini değiştirerek fotonik örgünün periyodik modülasyonu, elektronların kristal örgüdeki hareketini kontrol etmek için yönlendirme uygulamanın benzeridir. Fotonik örgülerde periyodiklik ve modülasyon arasındaki etkileşim, ışığın kırınım ve dispersiyon özelliklerini ayarlamanın yanı sıra doğrusal olmayan etkileşimleri kontrol altına almak için de eşsiz fırsatlar yaratır.

Silisyum (Si), fotonik cihazlarda önemli olan yüksek ısı iletkenliği, yüksek optik hasar eşiği ve yüksek üçüncü dereceden optik doğrusal olmayanlık özellikleri gibi mükemmel malzeme özelliklerine sahiptir. Si, 1.1 μm 'den yaklaşık 7 μm 'ye uzanan dalga boyu penceresinde düşük bir soğurma katsayısına sahiptir ve bu Si 1.3-1.55 μm veri iletişim bandında kullanmak için mükemmel bir materyal yapar. Fotonik entegre devrelerin temel yapı taşı dalga kılavuzlarıdır. Bir dalga kılavuzu, fotonik entegre devrelerde iki önemli rol oynamaktadır. Bir taraftan, fotonik entegre devre üzerindeki bileşenler, dalga kılavuzları vasıtasıyla birbirine bağlanmaktadır. Öte yandan, bağlantı dalga kılavuzu fotonik entegre devre ve dış dünya arasındaki arayüz görevi görmektedir. İletişimde kullanılan optik dalga kılavuzlarının çoğu tek modludur yani her polarizasyon için yalnızca bir kılavuzlanmış-modu desteklemektedir. Bu yüzden, entegre fotonik sistemler genişlikleri farklı olan optik dalga kılavuzları arasında güçlü ışık kuplajı için verimli, kompakt ve geniş bant çözümler gerektirir.

Kızılötesi fotodetektörler, günümüz dünyasında geniş kapsamlı ve hızla genişleyen uygulamalara sahip bir teknolojidir. İnsanlar çıplak gözle görünmeyen bu ışık spektrumunu algılamak ve analiz etmek için çeşitli yollar denemişlerdir; ilk modern

fotodetektör olarak düşünebilecek şeyler Case tarafından geliştirilmiştir [7]. Şu anda kızılötesi fotodetektör uygulamaları, askeri (örneğin, navigasyon, gece görüş, silah saptama), ticari (örneğin, iletişim, havacılık, medikal görüntüleme), kamu (örneğin, atmosferik sondaj, kirlilik kontrolü, meteoroloji, çevresel izleme) ve akademik (örneğin, astronomi) alanlarında kullanılmaktadır [8]. Araştırmacılar, bu uygulamalara daha fazla hizmet vermek için çeşitli teknolojiler geliştirmek ya da var olan teknolojilerdeki eksiklikleri gidermek için muazzam zaman ve kaynak harcamaktadırlar. Bu yüzden fotonik örgülerle yani optik dalga kılavuzu dizinleri ile kompakt ve performans kriterlerini sağlayan fotonik entegre devrelerde kullanılmak üzere kuplör ve kızılötesi fotodetektörlerde kullanılacak soğurucu tasarlanması veya var olan mevcut optik uygulamalara alternatif çözümler büyük önem taşımaktadır. Literatürde mevcut bulunan optik dalga kılavuzu dizinlerine uygulanan yapısal ve geometrik modifikasyonlar neticesinde ışığın kuplaj ve soğurulma fenomenlerinin arttırılmasına yönelik analizler bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır.

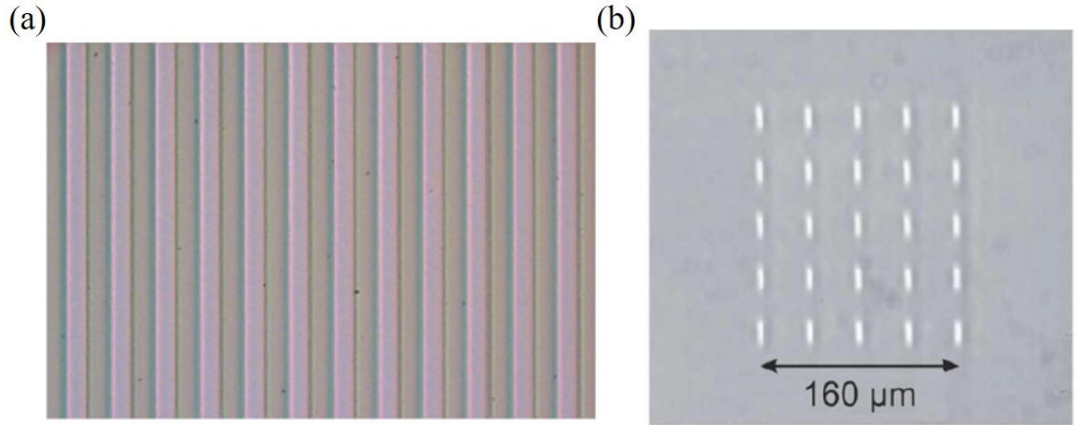
Çalışma şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de optik dalga kılavuzlarının ne olduğu, kuplör alanında kullanımına literatürden bazı örnekler ve çalışmadaki tasarımlarda kullanılan sayısal ve teorik bazı fenomenler açıklanmaya çalışılacaktır. Bölüm 3’te kuplör ve soğurulma verimliliğini arttırmaya yönelik tasarımlar literatür taraması, tasarım aşamaları ve sonuçlarıyla birlikte verilecektir. Çalışmanın dördüncü bölümünde ise tasarımlar sonuçlarıyla birlikte özetlenecek ve olası ileri çalışmalardan bahsedilecektir.



2. TEMEL FENOMENLER

2.1 Optik Dalga Kılavuzu Dizinleri

Son zamanlarda, fotonik örgülerde ayırık ışık ilerlemesi çok ilgi çekmiştir [2,3,9-12]. Fotonik örgüler, optik dalga kılavuzlarının periyodik dizilimleridir, örnek olarak Şekil 2.1'deki yapılar incelenebilir. Bu tür yapılarda, ışık farklı alanlara kolayca hapsedilebilirken; aynı zamanda kanallar arasındaki ışık ilerlemesi, sönümlenmeli kuplaj yoluyla meydana gelir. Düzlemsel veya tek boyutlu dalga kılavuzu dizinleri, enlemesine yönde periyodiktir ve ışık ilerlemesinin yönüne göre değişmezdir. Fakat iki boyutlu dizinler her iki enine yönde de periyodik olarak modüledirler. Dolayısıyla, iki boyutlu fotonik örgüler fotonik kristal fiberlere benzerdir ve dalga kılavuzları dizinlerinde incelenen bazı etkiler benzer şekilde fotonik kristal fiberlerde de gözlemlenebilir [13].



Şekil 2.1: (a) 14 μm 'lik bir dalga kılavuzu ayırımı ile tek boyutlu bir optik dalga kılavuzu dizininin mikroskop görüntüsü (üstten görünüş) (b) 40 μm dalga kılavuzu ayırımı ile iki boyutlu bir kübik dalga kılavuzu dizininin mikroskop görüntüsü [14,15].

Dalga kılavuzu dizinleri, izin verilen ve yasaklanmış bantlar, Brillouin bölgeleri ve benzeri dâhil olmak üzere fotonik bir kristal yapısının tüm temel özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, yarı iletkenlerdeki elektronların hareket dinamiklerine eşdeğer dalga dinamiklerini desteklemektedir [16]. Bragg yansımaları ve girişim etkileri, ışık

ilerlemesine özellikle dizin boyunca ilerleyen sinyallere hükmeder ve hatta fotonik örgülerdeki doğrusal dinamikler eş dağılımlı ortamdakinden temelde farklı olabilir.

Fotonik örgülerde ışık ilerlemesi ile ilgili çalışmalar birçok büyük derleme makalede özetlenmiştir [3,17,18]. Doğrusal olmayan fotonik örgülerdeki ayrık optik solitonlar alanında teorik ve deneysel gelişmelerin kapsamlı bir incelemesi Lederer ve meslektaşları tarafından yapılmıştır [3]. Bu makale doğrusal olmayan dalga kılavuzu dizinlerindeki ayrık soliton ailesinin fiziğini tanımlamıştır. Fotonik örgülerin periyodik doğasından ötürü, kuantum mekaniği ve katı hal fiziği ile birçok benzerlik bulunmaktadır, bunlar genellikle açıklamaları ile terminolojiye yansıtılmıştır [17]. Fotonik örgülerde kuantum-optik benzerlikler üzerine yapılan ilerlemelerin bazılarına genel bir bakış Longhi tarafından yapılmıştır [18].

Dalga kılavuzu optik yönlü kuplör, birbirine çok yakın yerleştirilmiş iki optik dalga kılavuzu arasındaki ışık yönlendirilmesi için kullanan cihazdır [19,20]. Optik ağların temel bir bileşenidir ve optik ağları birleştirmek ve ayırmak için kullanılır. Kuplörün iki dalga kılavuzundan birine enjekte edilen tek renkli ışık, cihazda ilerledikçe iki dalga kılavuzu arasında ileri geri salınım yapar [19]. Periyot, iki dalga kılavuzu arasındaki kuplaj oranı ile ters orantılı olan kuplaj uzunluğu ile tanımlanır. Optik dalga kılavuzu dizinleri kullanılarak yapılan birçok çalışma, kuplör içinde tek renkli veya çift renkli ışınların akışının periyodik eksen eğiliminin, dalga kılavuzlarının kanal genişliğinin veya kırılma indisinin modüle edilmesiyle kuvvetle değiştirilebileceğini göstermiştir [21-23].

Periyodik olarak kavisli bir optik dalga kılavuzunda gözlemlenen ışın ayırma etkisi, modüle edilmiş tek bir dalga kılavuzunda ışık kontrolünün klasik örneklerinden biridir. Işın ayırma etkisi, ikiye bölünme fenomeninin tam olarak optik benzeridir. Bu çalışmada incelenen optik dalga kılavuzu kavisli eksen profil ile ilişkilendirilmiştir [18]. Modülasyonun genliği yavaş yavaş sıfırdan sabit bir son genliğe yükseltilmiştir. Modülasyonun genliği çok küçük olursa ışın yoğunluğu çok uzaklara yayıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, modülasyonun genliği arttıkça ve eşiğin dışına çıktığında, ışın yoğunluğu ayrılmıştır.

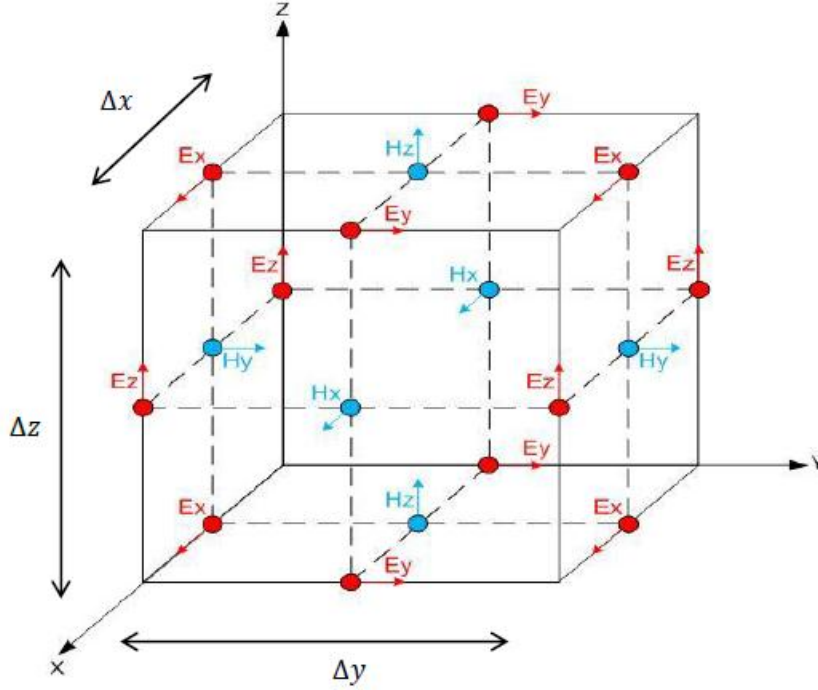
2.2 Zaman- alanında Sonlu-farklar Yöntemi

1966'da Kane Yee [24], şimdi zaman- alanında sonlu-farklar (ZASF) [25] olarak ad-

landirdığımız bir yöntem sunmuştur ve bu yöntem karmaşık geometrilere Maxwell denklemlerinin çözülmesinde ve ilerleme, saçılma ve ışınlımda dahil olmak üzere her türlü elektromanyetik problemin modellenmesinde en gelişmiş yöntem haline gelmiştir. ZASF yöntemi, Maxwell denklemlerini zaman ve konumda kesikli noktalara ayırarak elektrik ve manyetik alanları hesaplar. Maxwell denklemlerinin kesikli hale getirilmesinden sonra, hesaplama alanındaki elektrik ve manyetik alanlarını elde etmek kolaydır. Hesaplama alanı sadece simülasyonun yapıldığı alandır ve birim hücrelere bölünmüştür. Hesaplama alanı içindeki her birim hücre, elektrik ve manyetik alanlarla ilişkilendirilmelidir. Daha sonra, hesaplama alanındaki her hücrenin materyali belirtilmelidir ve böylelikle hücreler boş alan, metal, dielektrik veya sınır hücresi olabilir. Soğurma sınır koşulları, hesaplama alanını sınırlamak için gereklidir. Mükemmel uyumlu katmanlar en yaygın kullanılan ZASF soğurma sınır koşullarından biridir [26]. ZASF yöntemi, Yee algoritmasına [25] göre zaman ve konum türevlerine merkezi fark yaklaşımını uygulayarak, temel algoritma denklemlerini ifade eden altı skaler alan denklemlerini çözmektedir [27].

2.2.1 Yee'nin ZASF yöntemi

Yee, hesaplama alanındaki elektrik ve manyetik alanların vektör bileşeninin konumsal örneklenmesi için geometrik bir ilişki seçmiştir. Hesaplama alanı, $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ boyutlu küpsel hücrelere bölünür; burada Δx , Δy ve Δz , sırasıyla x , y ve z yönlerindeki birim hücre boyutlarıdır. Yee'nin algoritması değişken küp boyutuna ve ortogonal olmayan hücre seçimlerine izin verir. Bununla birlikte Şekil 2.2, tipik bir Yee ZASF yöntemi birim hücresini göstermektedir. Her birim hücre, altı alan bileşeni ile ilişkilendirilir: Elektrik alanlar için E_x , E_y ve E_z ve manyetik alanlar için H_x , H_y ve H_z . Her hücre için, tüm manyetik alan bileşenleri hücrenin yüzlerine yerleştirilir ve tüm elektrik alan bileşenleri hücrenin kenarlarına yerleştirilir [25]. Şekil 2.2'den de rahatlıkla görülebileceği üzere, bitişik küplerdeki alan bileşenleri hesaba katılırsa her elektrik alan bileşeni dört manyetik alan bileşeniyle çevrilidir ve bunun tersi de geçerlidir. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin yarım konum adımıyla ayrıldığına dikkat çekmek istiyoruz. Benzer şekilde, elektrik ve manyetik alan bileşenlerin hesaplanması da yarım zamanlı bir adımla ayrılır. Bu, elektrik ve manyetik alanların değişimli yarı zaman adımlarında hesaplandığı anlamına gelir.



Şekil 2.2: Yee ZASF algoritmasındaki tipik birim hücre [URL-1].

Yee'nin algoritmalarının basamakları aşağıda özetlenmiştir [28]:

- 1- Maxwell denklemlerindeki elektrik ve manyetik alan türevlerini sayısal türev alma yöntemi olan sonlu farklar yaklaşımı ile yer değiştirerek Maxwell denklemlerini günceller.
- 2- Bilinmeyen (gelecek) elektrik ve manyetik alanları bilinen (geçmiş) alanlar cinsinden ifade eden güncelleme denklemleri bulunur.
- 3- Hesaplama alanındaki tüm manyetik alanların bir zaman adımı gelecekteki değerleri bilinen elektrik ve manyetik alan değerleri kullanılarak hesaplanır.
- 4- Hesaplama alanındaki tüm elektrik alanların bir zaman adımı gelecekteki değerleri bilinen elektrik ve manyetik alan değerleri kullanılarak hesaplanır.
- 5- Hem elektrik hem de manyetik alanın bir zaman adımı gelecekteki değerleri hesaplanmış olur. İstenilen süreye ulaşılan kadar 3. ve 4. adımlar tekrarlanır.

Bu ZASF algoritması hem konum hem de zaman açısından ikinci dereceden doğruluğa sahiptir; çünkü merkezi fark yöntemi hem konum hem de zaman türevi üzerinde uygulanmaktadır [29].

2.2.2 Mükemmel uyumlu katmanlar

Bilgisayar depolama kapasitesindeki sınırlamadan dolayı, hesaplama alanı sonlu olmalıdır. ZASF yönteminin bu şekilde uygulanması için yapay dış sınırlar getirerek hesaplama alanının kesilmesi gereklidir. Sınırların, giden dalgaları simülasyon alanına geri yansımaz soğurması için dikkatle tasarlanması gerekir. Berenger tarafından ortaya atılan mükemmel uyumlu katmanlar olarak adlandırılan verimli bir soğurma sınır koşulu yaygın şekilde kullanılmaktadır [26]. Bu tür soğurma sınır koşulunda, hesaplama alanının sınırları uygun elektrik ve manyetik iletkenlik değerleriyle çevrelenir. Alan sınırlarındaki mükemmel uyumlu katmanlar bölgesi kademeli olarak artan elektriksel ve manyetik iletkenliği içerir.

2.2.3 Sayısal dispersiyon

Sayısal algoritmalar, hesaplama alanında simüle edilmiş dalga modlarında dispersiyona neden olur. Bu sayısal dispersiyon, tek darbeli dalga formlarının genişlemesi, çoklu dağılık dalgaların iptali ve sahte kırılma gibi fiziksel olmayan sonuçlara yol açabilir. Bu sayısal dispersiyonun ayrıntılı analizi, Taflove V. bölümünde sunulmuştur ve burada tartışılmayacaktır [30]. Sayısal dispersiyonun miktarını sınırlamak için, her bir konum adımının, hesaplama alanında ilerlemesi beklenen en kısa dalga boyundan en az 10 kat daha küçük olması gerektiği gösterilmiştir [23,30]. Elbetteki daha küçük bir konum adımı seçilirse sayısal dispersiyon daha da bastırılacaktır. Bununla birlikte, çok küçük konum adımı kullanılması, hesaplama alanını doldurmak için gerekli hücre sayısını artıracak ve dolayısıyla modelin hesaplama kaynağı talebi artacaktır. 1 boyutlu ZASF yöntemi için $\Delta t = \Delta h/v$ seçilirse Δh seçiminden bağımsız olarak sayısal dispersiyon olmayacaktır. Buna büyüklü zaman adımı denir. 2 ve 3 boyutlu durumlar için böyle büyüklü zaman adımı yoktur. Sonuç olarak konum adımı Δh , ihmal edilebilir dispersiyon hatası için ilgilenilen en küçük dalga boyundan en az 10-20 kat daha küçük olmalıdır.

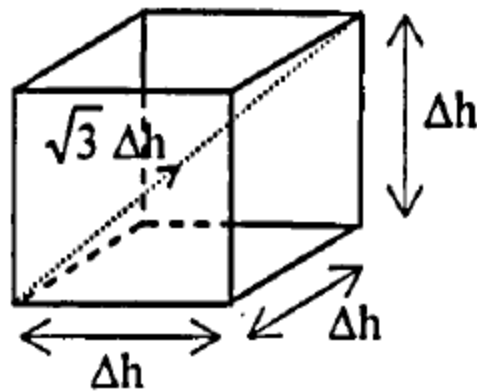
2.2.4 Sayısal kararlılık

Sayısal dispersiyon kısmında hücrelerimizin boyutlarını yani konum adımının seçilmesini anlattık. Bu bölümde ise zaman adımını hangi kurala göre seçeceğimizi

anlatacağız. Sayısal kararsızlık, sayısal diferansiyel denklem çözücülerinde istenmeyen bir durumdur ve zaman ilerledikçe hesaplanan sonuçların sahte bir şekilde artmasına neden olabilir. Sayısal kararlılığı analiz etmek için standart yöntem Courant, Friedrich ve Levy tarafından sunuldu [31] ve Eşitlik (2.1)'de gösterilmiştir.

$$\Delta t \leq \frac{1}{v \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (2.1)$$

Burada $v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$ olmak üzere ZASF yöntemi normalize dalga hızı, μ manyetik geçirgenlik ve ϵ elektrik geçirgenliktir. Bu CFL (Courant-Friedrich-Levy) kararlılık koşulu olarak bilinir. CFL kararlılık kısıtlamasının fiziksel anlamı ZASF örgüsündeki üç boyutlu hücreyi gösteren Şekil 2.3 yardımıyla açıklanabilir. Birim hücrenin bir küp olduğunu varsayalım, yani burada $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta h$ dır. Sayısal ZASF'da, örneğin, dalga hızı v olan dalgayı modellerken, sayısal dalganın küp içinde köşegen boyunca ilerlemesi için $3\Delta t$ gereklidir; yani dalga, $\sqrt{3}\Delta h$ mesafe ilerlemesini 3 zaman adımında yapar. Sayısal dalga hızı, simülasyonda kullanılan dielektrik sabiti tarafından yönetilir. Bu nedenle, eğer daha büyük bir zaman adımı aynı hızla, v , ilerleyen dalgayı modellemek için kullanılırsa dalga gerçekte olduğundan daha fazla yol almış gibi görünür. Bu, hatalı simülasyon sonuçlarına neden olur. ZASF yönteminde; hesaplanan zamandaki alan değerleri bir sonraki zamanda alan değerlerini etkilediğinden, bu hata birikir ve zaman ilerledikçe kararsız bir sisteme neden olacak şekilde büyür.



Şekil 2.3: ZASF küpsel birim hücresi.

2.3 Etkin Ortam Teorisi

Etkin ortam teorisi (EOT), Lord Rayleigh [32], Lorentz [33] ve Maxwell-Garnett [34] gibi bilim insanları tarafından 1892'den beri araştırılmıştır. Periyodik yapıların deneysel ve teorik çalışmalarında, dalga boyu, λ , ile karşılaştırıldığında periyodun, Λ , küçük olması durumunda, genellikle $\Lambda < \lambda/4$, periyodik yapıların homojen bir ortam gibi davrandıklarını göstermektedir. Periyodik yapının bir eş dağılımlı ortam ile değiştirilmesi, homojenizasyon olarak bilinen ve EOT'ye dayanan bir işlemdir. Homojenizasyon, genellikle yeni bir yapay malzeme yaratarak yapının analizini basitleştirir.

EOT hesaplanırken Taylor seri açılımından faydalanılır. Yapının periyodu ile dalga boyu arasındaki oran küçüldükçe seri açılımının ilk terimini (sıfıncı derece) kullanarak yapay malzemenin özelliği hesaplanabileceken; yüksek oranlarda serinin ikinci hatta dördüncü dereceden yaklaşımlarını kullanmak daha uygundur. EOT'nin enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) polarizasyonları için 1 boyutlu ızgara yapılarında sıfıncı dereceden yaklaşımı (dalga boyunun yapının periyodundan çok büyük olduğu durum) Eşitlik (2.2-2.3)'de verilmiştir [35].

$$\varepsilon_{TM}^{(0)} = f\varepsilon_1 + (1-f)\varepsilon_0 \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{TE}^{(0)} = \left[\frac{f}{\varepsilon_1} + \frac{(1-f)}{\varepsilon_0} \right]^{-1} \quad (2.3)$$

Burada $\varepsilon_{TM}^{(0)}$ sıfıncı derece TM etkin elektrik geçirgenliği, $\varepsilon_{TE}^{(0)}$ sıfıncı derece TE etkin elektrik geçirgenliği, ε_1 dielektrik maddenin elektrik geçirgenlik sabiti, ε_0 ortamın elektrik geçirgenlik sabiti, f madde ve ortamın alanlarının oranı yani doluluk oranıdır.

Daha büyük periyotlu dalga boyu altı ızgaralı yapılar için, sıfır derece yaklaşımlarına bir düzeltme terimi eklenmesi gereklidir. Her kutuplanma için elde edilen ikinci derece etkin elektrik geçirgenlik sabitleri, $\varepsilon_{TM}^{(2)}$ ve $\varepsilon_{TE}^{(2)}$, Eşitlik (2.4-2.5)'de verilmiştir [35].

$$\varepsilon_{TM}^{(2)} = \varepsilon_{TM}^{(0)} \left[1 + \frac{1}{3\varepsilon_f \varepsilon_{TM}^{(0)}} \left(\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \frac{\Lambda}{\lambda_0} f(1-f) \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{TE}^{(2)} = \varepsilon_{TE}^{(0)} \left[1 + \frac{\varepsilon_{TE}^{(0)}}{3\varepsilon_f} \left(\pi \frac{\varepsilon_{TE}^{(0)}(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} \frac{\Lambda}{\lambda_0} f(1-f) \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

Burada λ_0 boş uzay dalga boyu ve ε_f boş uzayın elektrik geçirgenliği, $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m. Rytov denklemlerin sadece düzeltme terimi küçük olduğunda geçerli olduğunu belirtmektedir [36]. EOT'nin homojenizasyon yaklaşımı için Λ/λ sınır değeri Bell tarafından incelenmiştir [37].

Yukarıda EOT için verdiğimiz denklemler ortamda iki madde ve değişimin tek boyutta olduğu durumlar için geçerli olmasına rağmen, EOT çok maddeli ortamlar ve değişimin birden fazla boyutta olduğu durumlar için de geçerlidir. Bu çalışmada 1 boyutlu ızgara yapılarında kullanılan EOT denklemleri kullanılmıştır.



3. KUPLÖR VE FOTODETEKTÖR TASARIMI

Bölüm 2’de anlatılan ZASF yöntemi ve EOT kullanılarak, optik dalga kılavuzu dizinlerinin yönelimsel ve boyutsal modülasyonu ile tasarlanmış kuplör ve fotodetektör anlatılacaktır. Bu bölümde bahsedilecek çalışmalardan birisi uluslararası dergide yayınlanırken, diğeri uluslararası bir konferansta sözel olarak sunulmuştur [38,39].

3.1 Konumsal Olarak Değişen Dielektrik Optik Dalga Kılavuzu Dizinleri ile Verimli Işık Kuplajının Teoriksel ve Deneysel Araştırılması

3.1.1 Giriş

Optik iletişim sistemlerindeki temel zorluklardan biri; ışığı, istenen hedef sisteme verimli bir şekilde iletmektir. Optik arabirim giriş/çıkış iletim sistemi uyumsuzlukları nedeniyle ışık gücü kayıpları kaçınılmaz bir sorun olarak düşünülebilir. Örneğin, farklı genişliklere sahip optik dalga kılavuzlarının direk kuplajı, ışığın yüksek miktarda geriye yansımaya neden olur. Öte yandan, sivrileştirilmiş kuplör kullanmak neredeyse mükemmel bir ışık kuplajı sağlayabilir. Bununla birlikte, dalga kılavuzları genişliklerinin oranı büyük ise, o zaman geniş kuplör bölgesi gereklidir. Böylece, sivrileştirilmiş kuplör hantal bir yapıya dönüşür [40,41]. Bu nedenle, optik bağlantılarda kompakt ve uygulanabilir çözümler tercih edilmektedir. Çekirdek ve kılıftan oluşan yüksek kırılma indisi zıtlığına sahip dielektrik optik dalga kılavuzları, ışığı etkili bir şekilde kılavuzlayabilir. Bununla birlikte, farklı fiziksel parametrelere sahip iki dalga kılavuzu arasındaki herhangi bir fiziksel eklem oluşması durumunda, Fresnel kayıpları kaçınılmazdır. Dahası, mod uyumsuzluğundan dolayı başka bir önemli kayıp mekanizması çok modlu - tek modlu fiziksel kontaklarda ortaya çıkabilir. Bu nedenle, bu kontaklar arasında ışık dalgalarının verimli kılavuzlanmasını ve dalga kılavuzu modlarının yoğunluk ve faz profillerinin birleşimini iyi elde etmek için farklı dalga kılavuzlarının arayüzleri dikkatle tasarlanmalıdır.

Bu kuplaj probleminin üstesinden gelmek için, literatürde çeşitli kuplaj yöntemleri tanıtılmıştır: Bir parabolik aynanın düzlemsel durumu, bir giriş dalga kılavuzundan tek bir çizgi kusur fotonik kristale (FK) etkili bir şekilde ışığı kuplaj etmek üzere önerilmiş ve üretilmiştir [42]. Bir başka çalışmada ise, FK dalga kılavuzu ile optik fiber arasındaki ışık hapsedilmesi için sivrileştirilmiş kuplör sunulmuştur [43]. Ayrıca, dikdörtgen dalga kılavuzundan FK dalga kılavuzuna ışık kuplajı ve sivrileştirilmiş kuplör kullanan kompakt mod dönüştürücü üzerine olan çalışmaları da vardır [44,45]. Tek modlu optik fiberin FK yapısı ile entegrasyonu için, eş dağılımlı olmayan sivrileştirilmiş FK konik önerilmiştir [46]. Aynı çalışmada, sivrilme parametrelerinin kuplaj verimliliği üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

Eş dağılımlı olmayan derecelendirilmiş kırılma indisli (DKİ) ortam dielektrik malzemeler kullanılarak yapay olarak tasarlanabilir ve DKİ ortam son zamanlarda umut verici fotonik ve optik uygulamaları nedeniyle önemli ilgi toplamıştır [47-52]. Kuplaj problemi, farklı genişliklerdeki iki optik dalga kılavuzu arasında bir kuplaj bölgesi olarak DKİ tasarım konsepti ile ayrıntılı olarak araştırılmıştır [53-58]. Gelişmiş optik işlevsellikler için eş dağılımlı olmayan indis formları ve profilleri ile ileri düzeydeki fotonik ortamı keşfetmek ve kullanmak için hala bir talep vardır. Fotonik tasarımlar için bu tür ortamı kullanmanın ciddi dezavantajlarından biri ise zorlu imalat gereksinimleridir.

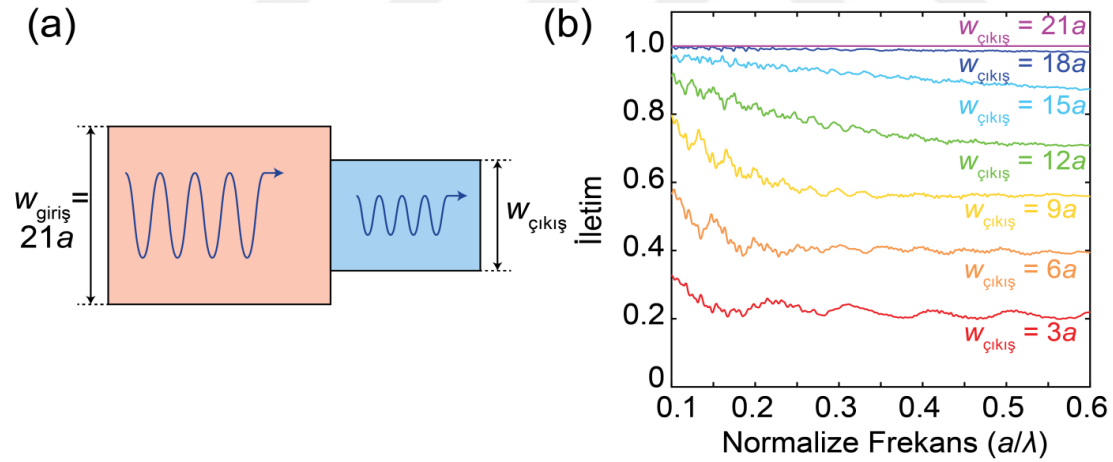
DKİ ortamın etkin kırılma indisi, ışığı hapseden ve kılavuzlayan tabakanın kalınlık değişimine bağlı olabilir. Mikro ve nano ölçeklerde kalınlık değişimini kontrol ederek, hedeflenen indis formu gerçekleştirilebilir [59,60]. Kalınlık değişimine ek olarak, indis değişimini taklit etmek için EOT kullanabilir [61]. Sabit kırılma indisine sahip tamamen dielektrik dalga kılavuzu ile EOT'ni kullanarak eş dağılımlı olmayan ortamın uygun bir örneklenmesi, güçlü odaklama ve verimli kuplaj gibi ışık manipülasyonları ile ilgili optik karakteristik özellikler sağlar. Konumsal olarak değişen eş dağılımlı dalga kılavuzu kullanımı, daha önce DKİ mercekleştirilmesi için incelenmiştir [54,58]. Bununla birlikte, bu cihazlar, plazma ve metamalzeme temelli olup iç malzeme kayıplarına maruz kalmaktadırlar. Başka bir çalışmada, sabit hava boşluğu olan DKİ merceğin etkin indisi, karesel indis profiline sahip bir yüzü düz, diğer yüzü ise dışbükey olan merceği gerçekleştirme için incelenmiştir [62].

Bu çalışmada, giriş/çıkış optik dalga kılavuzu kanallarının genişlik uyumsuzluğundan kaynaklanan genel bir ışık kuplaj problemi için olası bir çözüm araştırdık. Eş dağılımlı olmayan indis profiline sahip optik kuplörü uygulamak ve tasarlamak için oldukça pratik ve uygulanabilir bir konsept önermekteyiz. Sunulan çalışmanın nihai hedefi; hedeflenen kırılma indis dağılımını elde etmek için dizin kalınlıklarının uygun şekilde düzenlendiği, konumsal olarak değişen tamamen dielektrik dalga kılavuzu dizinlerini kullanarak optik güç aktarımını geliştirmektir. Bu çalışmamız şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 3.1.2'de, genişlik uyumsuzluğuna bağlı kuplaj kayıpları gösterilmiş ve sivriltilmiş konik ve direk kuplörlerin kuplaj performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, önerilen DKİ kuplörün tasarım süreci ve kuplaj performansı araştırılmıştır. Bölüm 3.1.3'te, Gauss indis dağılımlı kuplörün örneklenmesi değişen genişliklere ve sabit kırılma indisine sahip dielektrik dizinler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan DKİ yapının kuplaj performansı, 2 ve 3 boyutlu alanlarda analiz edildi ve örnekleme sayısının etkileri de araştırıldı. Bölüm 3.1.4'te, mikrodalga rejiminde çalışma prensibini deneysel olarak göstermek için alümina (Al_2O_3) dielektrik çubuklardan yapılmış bir prototip oluşturuldu. Ayrıca, deneysel olarak uygulanan kuplörün genlik iletim verimi ile çıkan ışın sıkıştırılma oranı da ölçüldü. Son olarak, bu çalışmamızı bölüm 3.1.5'te sonuçlandırıyoruz.

3.1.2 Problemin tanımlanması ve kuplör bölgesinin tasarım yaklaşımı

Çalışma boyunca, ZASF yöntemi, kuplör tasarımlarının zaman alanında olan yanıtını analiz etmek için kullanılmıştır [63]. Olası geri yansımaları ortadan kaldırmak için hesaplama alanı mükemmel uyumlu katmanlarla çevrilmiştir [26]. İlerleyen kısımlarda iletim verimliliklerini hesaplamak için geniş bant darbe kaynağı kullanılmıştır. Öte yandan, seçilmiş belirli bir frekanstaki kararlı durum uzaysal şiddet dağılımını elde etmek için sürekli bir kaynak kullanılmıştır. Her iki durumda da kaynağın genliği sonlu bir ışın genişliğini hesaba katmak ve mükemmel uyumlu katmanlar sınırlarında herhangi bir fiziksel olmayan kırınım etkisini önlemek için bir konumsal Gauss fonksiyonuyla çarpılmıştır. Bu durumda, ışık kaynağı kuplörün ön (sol) tarafından aydınlatılır ve iletim detektörü kuplörün çıkışına yerleştirilir. Burada sıfır olmayan elektrik ve manyetik alan bileşenleri sırasıyla E_z , H_x ve H_y olan TM kutuplamasının kullanıldığına dikkat edilmelidir.

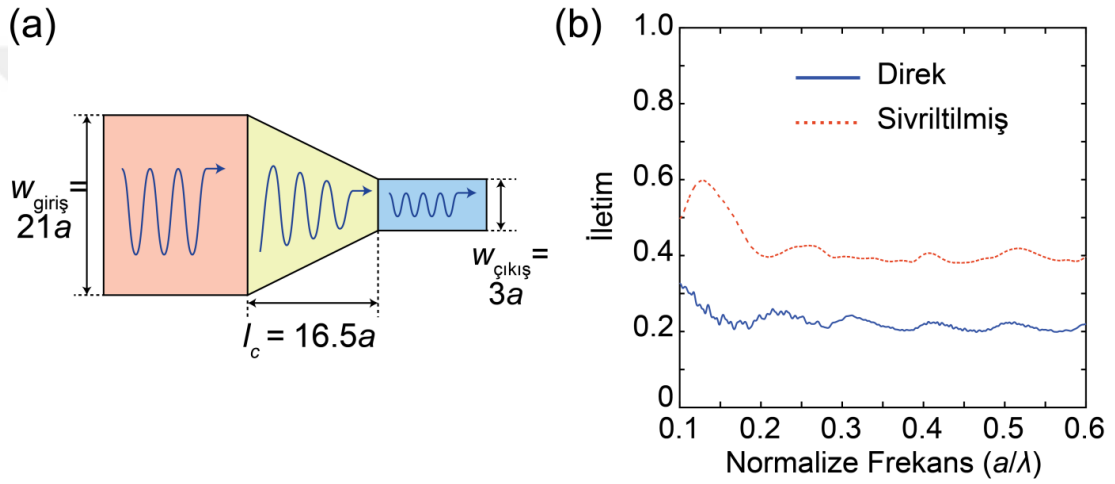
Genel olarak, basamak indisli ve silisyum (Si) tabanlı dalga kılavuzlarının direk kuplajları, farklı dalga kılavuzu boyutlarına ve giriş/çıkış dalga kılavuzları arasındaki empedans uyumsuzluğuna bağlı olarak dramatik optik güç kayıpları verir. Direk kuplör şeması Şekil 3.1(a)'da yapısal parametreleri ile gösterilmiştir. Bu şekilden görülebileceği gibi; direk kuplör, genişlik boyutları $w_{\text{giriş}}$ ve $w_{\text{çıkış}}$ boyutlarına sahip olan farklı kesitsel alanlara sahip iki dalga kılavuzunu birbirine bağlar. Bu sebeple; ışık, geniş dalga kılavuzundan dar dalga kılavuzuna kuplajlandığında, birleşme arayüzünde güçlü geri yansımalar meydana gelecektir. Şekil 3.1(b), elektrik geçirgenliği $\epsilon=12$ 'ye eşit olan giriş ve çıkış dalga kılavuzları arasındaki genişlik uyumsuzluğunun iletim aralığı üzerindeki etkisini göstermek için hazırlanmıştır. Şekilden görülebileceği gibi; giriş dalga kılavuzunu genişliği $21a$ 'ya sabitken ve çıkış dalga kılavuzunun genişliği $3a$ 'dan $21a$ 'ya artırılırken, karşılık gelen kuplaj verimliliği %20'den %100'e artmıştır. Burada a 'nın normalleştirilmiş birim mesafe olduğuna dikkat edilmelidir. Bu sonuçlardan çıkartılabileceği gibi; direk kuplaj konsepti, ışığın daha dar dalga kılavuzuna verimli kuplajı için yetersiz performans göstermektedir.



Şekil 3.1: (a) Giriş dalga kılavuzu dar çıkış dalga kılavuzuna direk kuplajlı (b) Farklı direk kuplörlerin kuplaj verimliliği.

Verimli olmayan direk kuplajlı durum, iki dalga kılavuzu arasındaki bir arayüz bölgesinin çıkış dalga kılavuzuna doğru darlaşacak şekilde tasarlandığı geleneksel sivriltilmiş konik kuplör ile değiştirilebilir. Sivrileştirilmiş konik kuplör boyutları ile şematik olarak Şekil 3.2(a)'da gösterilmiştir. Giriş ve çıkış dalga kılavuzlarının genişlikleri sırasıyla, $w_{\text{giriş}}=21a$ ve $w_{\text{çıkış}}=3a$ olarak sabitlenmiştir. Sivriltilmiş konik bölgesinin uzunluğu $l_c=16.5a$ 'ya eşittir. Burada, giriş ve çıkış dalga kılavuzunun ve sivriltilmiş kuplörün elektrik geçirgenliği $\epsilon=12$ 'ye eşittir. Direk ve sivriltilmiş konik

kuplörlerin karşılaştırılması kuplaj verimliliği açısından yapılmış ve ilgili sonuçlar Şekil 3.2(b)'de verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, iletim verimi %20'den (direk-kuplaj durumunda; $21a$ 'dan $3a$ 'ya, bkz. Şekil 3.1(b)) %40'a (sivriltilmiş konik kuplaj durumu) artmıştır. Sivriltilmiş konik kuplaj durumunda, geri yansımalar hafifçe azaltılmış ve kuplaj verimi direk-kuplaj durumuna kıyasla daha iyi sonuç vermiştir. Bununla birlikte; mükemmel iletimi elde etmek için, sivrileştirilmiş konik geçiş bölgesi son derece uzatılmalıdır ve bu da kuplörün kompaktlığını olumsuz bir şekilde etkiler. Sonuç olarak; yukarıda bahsedilen sivrileştirilmiş konik ve direk kuplaj konseptleri, entegre optik içbağlantı cihazları için kesinlikle arzu edilen çözümler değildirler.



Şekil 3.2: (a) Doğrusal sivrileştirilmiş kuplaj bölgesi dalga kılavuzu kuplajının şematik gösterimi (b) Direk ve doğrusal sivrileştirilmiş konik kuplörlerin kuplaj verimlilikleri.

Işığı geniş dalga kılavuzundan dar dalga kılavuzuna hapsedmek için, ilgili konumsal alan profili dar dalga kılavuzunun genişliğine uyacak şekilde sıkıştırılmalıdır. Işık benek çapı manipülasyonu uygun bir faz gecikmesini sağlamak için kullanılacak değişen kalınlıklı saydam plakayla gerçekleştirilebilir [64]. Bu tür yapılar genellikle dışbükey veya içbükey arayüze sahip lenslerdir. Lens sistemlerinde ışığın karşılaştığı uygun faz gecikmesi, lens kalınlığı değişimi ile yönetilir. Bu durumda, şeffaf (sönümlenmez) bir düz plakanın kompleks genlik iletimi, $\exp(-jnk d)$ olarak yazılabilir; burada d ve n sırasıyla plaka kalınlığı ile kırılma indisi, $k = 2\pi/\lambda$ dalga sayısı ve λ ise ışık dalga boyudur. Bu ifade, arayüzlerdeki iç ve dış yansımalar ihmal edilmiştir. Bu ifade açıkça bahsedilen düşünce; hem d hem de n 'nin gereken faz gecikmelerini gerçekleştirmek için eşit derecede önemli rol oynamasıdır. Optik

eksene göre eşit olmayan bir faz gecikmesi varsa, düzlemsel dalga önyüzlerinin paralellikten birleşmek ya da saçılmak haline dönüşmesi meydana gelebilir. Bu durum, pozisyona bağlı kalınlık veya konumsal olarak değişen kırılma indisinin olması gerektiği anlamına gelmektedir. Böylece, isteyen birisi $d(x, y)$ rolünü uygun kırılma indisi dağılımına $n(x, y)$ yerleştirebilir. Biz şu anki çalışmada bu yaklaşımı takip ettik.

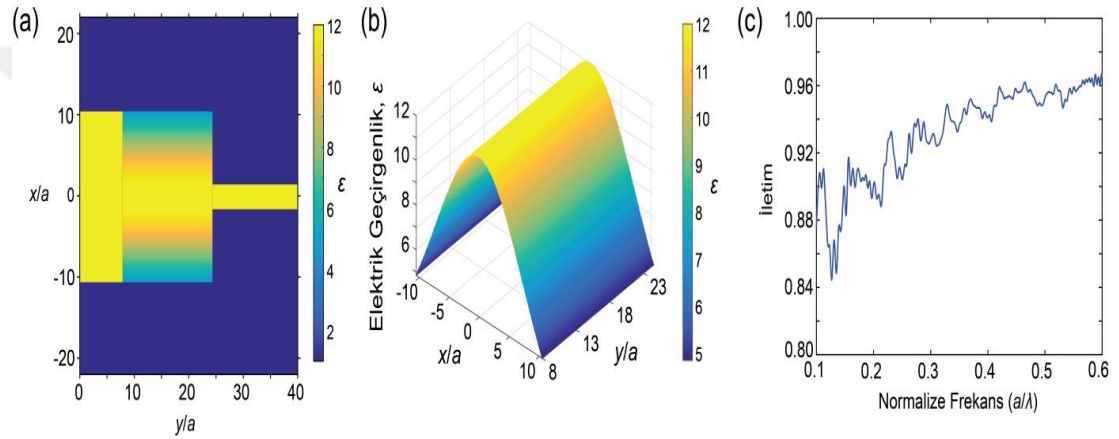
Bu çalışmanın nihai amacı; kuplaj bağlantısında konumsal olarak değişen indis modülasyonu kullanarak optik güç aktarımını, tasarlanan kuplörün çalışma bant genişliğini ve imalat fizibilitesini arttırmaktır. Bilindiği gibi DKİ optik parabolik, üstel ve hiperbolik sekant gibi farklı indis profillerinin kullanıldığı geniş optik uygulamalar sağlar. Bu çalışmada, kuplaj bölgesinin kırılma indisini modüle etmek için Gauss fonksiyonu kullanmayı tercih ediyoruz. İkinci dereceden gibi DKİ profillerin bilinen formları ile karşılaştırıldığında, Gauss indis profili aşağıdaki avantajları gösterir: Birincisi; bu profil parabolik bir fonksiyonla benzetilebilen ikinci dereceden profillerin daha genel bir şeklidir. İkincisi, bu profil optik eksenden kenara doğru nispeten yüksek bir gradyan geçişine sahip bir kavise sahiptir, bu da yüksek benek çapı dönüşümünde faydalı olabilir.

Gauss indis dağılımına sahip eş dağılımlı olmayan yapı elektrik geçirgenliği (ϵ) renk taslağı ile belirtilerek Şekil 3.3(a)'da şematik olarak sunulmuştur. Eş dağılımlı olmayan ortamın elektrik geçirgenlik değişimi ise Şekil 3.3(b)'de çizilmiştir. Dikey x -yönü boyunca sınırlar, $-w_{\text{giriş}}/2$ ve $w_{\text{giriş}}/2$ arasında değişir; burada $w_{\text{giriş}}$ giriş dalga kılavuzunun genişliğidir. Şekil 3(b)'de görüleceği üzere, elektrik geçirgenlik; optik eksenden, Eşitlik (3.1)'e göre yapının sonuna doğru üssel olarak azalır.

$$\epsilon(x) = 1 + 11 * \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

Burada x , ilerleme yönüne dik olan mesafeyi, σ ise Gauss fonksiyonunun sapmasını ifade eder. σ sabiti, kırılma indis dağılımını etkileyen tek parametredir ve en yüksek kuplaj verimliliğini elde etmek için deneysel olarak seçilmiştir. Tasarlanan Gauss indis profilli kuplör, genişliğe ($w_{\text{giriş}}, w_{\text{çıkış}}$)=(21a, 3a) eşit olan Si tabanlı ($\epsilon=12$) giriş ve çıkış dalga kılavuzları arasına yerleştirilmiştir ve kuplaj bölgesinin elektrik geçirgenliği (ϵ) 12'den 4.8'e değişmektedir. Karşılık gelen kuplaj verimliliği hesaplanıp Şekil 3.3(c)'de sunulmuştur. $a/\lambda = [0.28, 0.62]$ geniş frekans aralığında

%94'ün üzerinde nispeten yüksek bir iletim elde edilmiştir. Hesaplanan sonuçlar, önerilen Gauss indis profilli kuplörün kuplaj verimliliğini oldukça arttırdığını göstermektedir. Yukarıda tartışılan sürekli Gauss indis profiline sahip olan kuplör, yüksek kuplaj performansı gösteriyor olsa da, fotonik entegre sistemlere uygulanması pek pratik görünmemektedir. Bu durumun birincil nedeni fabrikasyon fizibilitesidir: Arzulanan indis gradyanını sağlamak için yüksek hassasiyette difüzyon işlemine ihtiyaç duyulmaktadır (genellikle gradyan küçük değerlerle sınırlıdır). Bu sorunun üstesinden gelmek için, bir sonraki bölümde tartışılacak olan EOT kullanılarak dielektrik şeritlerle eş dağılımlı olmayan sürekli ortamın örneklenmesini düşünebilirsiniz.



Şekil 3.3: (a) Eş dağılımlı olmayan kuplaj bölgesi dielektrik dalga kılavuzu kuplörün şematik gösterimi (b) Eş dağılımlı olmayan kuplaj bölgesinin elektrik geçirgenliği (c) DKİ kuplörün iletim verimliliği.

3.1.3 EOT ile eş dağılımlı olmayan ortamın örneklenmesi

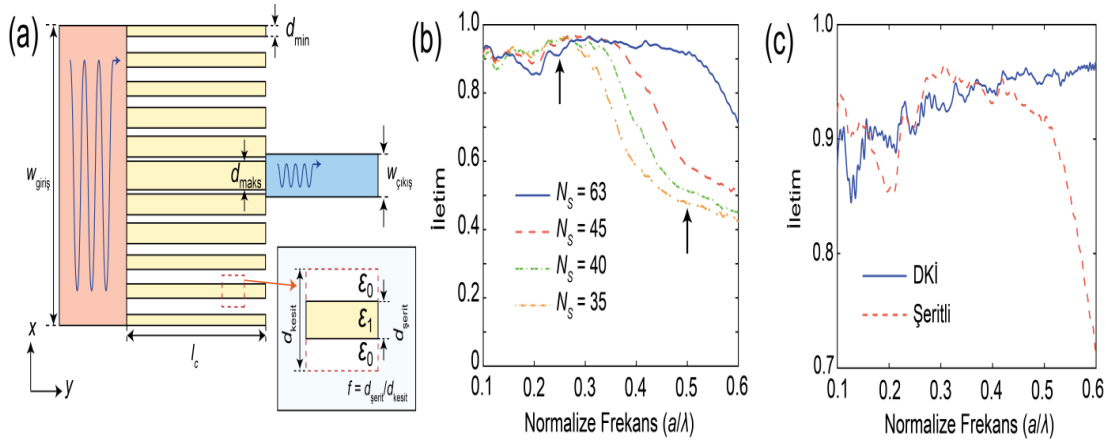
Bu bölümde; Şekil 3.3(a)'daki kuplaj bölgesi, EOT kullanılarak farklı genişliklerde dielektrik şeritlerle ayrık hale getirilmiştir. Dielektrik şeritlerle kuplör tasarımının şematik gösterimi Şekil 3.4(a)'da verilmiştir. TM polarizasyon için EOT, bölüm 2.3'te tanımlanmıştı, $\epsilon_{eff} = f\epsilon_1 + (1-f)\epsilon_0$ formundaki etkin elektrik geçirgenlik fonksiyonunu verir. Buradaki f doluluk oranı ve $\{\epsilon_0, \epsilon_1\}$ sırasıyla konağın (bizim durumumuzda boşluk) ve dielektrik ortamın elektrik geçirgenliğidir. İlk olarak, eş dağılımlı olmayan bölgenin tasarımı için şeritlerin sayısını, N_s , belirledik. Kalınlığı d_{kesit} ve uzunluğu l_c olan her kesit için, aşağıdaki Eşitlik (3.2)'deki integral, ϵ_{eff} 'yi tanımlamak için hesaplanır:

$$\epsilon_{eff}(b, b + d_{kesit}) * d_{kesit} * l_c = \int_b^{b+d_{kesit}} \epsilon(x) * l_c * dx \quad (3.2)$$

b ve $b+d_{kesit}$ arasındaki dielektrik ortamın kalınlığı $d_{şerit}$ ile gösterilir ve takip eden ifade, Eşitlik (3.3), kullanarak hesaplanır:

$$\varepsilon_{eff}(b, b + d_{kesit}) = [d_{kesit} - d_{şerit}] * l_c * \varepsilon_0 + d_{şerit} * l_c * \varepsilon_1 \quad (3.3)$$

Burada b , $-w_{giriş}/2$ ile $w_{giriş}/2-d_{kesit}$ arasında d_{kesit} kadar artarak değişir. Dielektrik şeritlerin kalınlığı, $d_{şerit}$, Şekil 3.4(a)'da gösterildiği gibi etkin indis dağılımına bağlı olarak değişir. Dahası, kuplörün ilgili yapısal parametreleri Şekil 3.4(a)'da ek olarak verilmektedir.



Şekil 3.4: (a) Konumsal olarak değişen şeritli dalga kılavuzu kuplörün şematik gösterimi (b) Farklı sayıda dielektrik şeritlerle tasarlanan kuplörlerin iletim verimlilikleri (c) DKİ ve şeritli kuplörlerin iletim verimlilikleri.

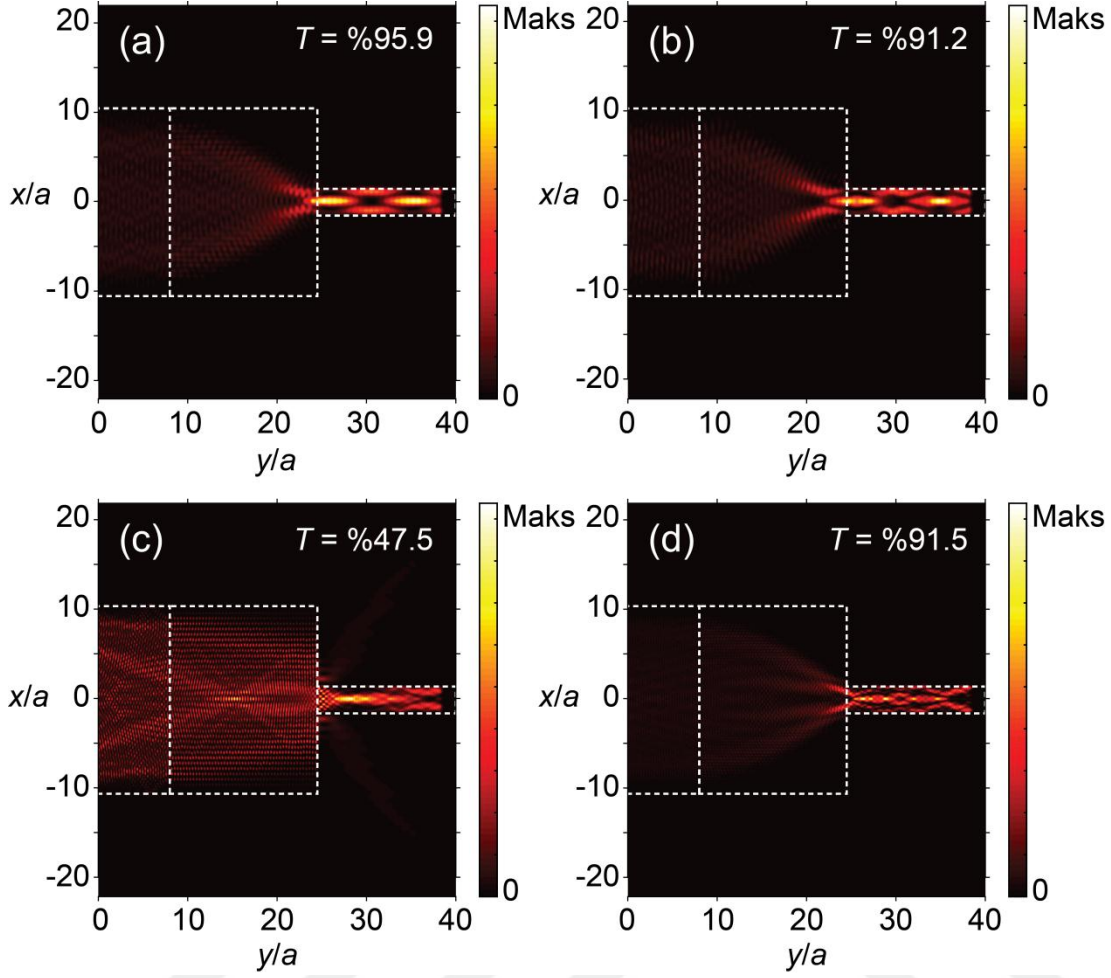
Dielektrik şeritlerin sayısı N_s , 35 ile 63 arasında değişmekte ve ilgili iletim verimlilikleri Şekil 3.4(b)'de çizilmiştir. Düşük frekanslarda ($a/\lambda < 0.28$), farklı N_s değerleri için benzer bir eğilim elde edildi. Bununla birlikte, ($a/\lambda < 0.28$)'den daha yüksek frekanslara geçildiğinde, artan şerit sayısına bağlı olarak kuplaj verimliliği artar: Örneğin, ($a/\lambda < 0.50$)'da hesaplanan kuplaj verimliliği, $N_s=35$ durumunda %47.6 iken $N_s=63$ olması durumunda %91.8 olarak hesaplandı. Eş dağılımlı olmayan ortamın daha az şeritle örneklenmesi, kuplörün alan odak dinamiklerini etkiler. Kuplaj verimliliğinin azaltılmasının ardındaki sebep şu şekilde yorumlanabilir:

Şerit sayısının azalmasıyla; her şerit, bitişik şeritler arasında ışığın hapsoldüğü özgün dalga kılavuzu gibi davranmaya başlar ve eğer çalışılan frekans arttırılırsa gelen dalga, her bir şeritte ayrı ayrı kılavuzlanır ve bu durum da kuplaj verimliliğinin azalmasına neden olur. Şeritli dalga kılavuzu kuplör, uygulama gereksinimlerine göre tasarlanabilir; örneğin, daha düşük frekans ve dar bant çalışmaları için daha az

sayıda şerit düşünmelidir. Bununla birlikte; geniş bantta çalışmasına ihtiyaç varsa, kuplörün kompaktlığını etkilemeksizin şeritlerin sayısı optimize edilmelidir.

En yüksek ışık kuplajı için şerit sayısının $N_s=63$ olduğu ve bu durumda dielektrik şeritlerin genişliğinin $d_{maks}=0.60a$ (merkezde) ile $d_{min}=0.23a$ (kenarlarda) arasında değiştiği saptanmıştır. $N_s=63$ olan şeritli kuplörün iletim spektrumu, Gauss indis profiline sahip DKİ kuplör ile karşılaştırılmış ve Şekil 3.4(c)'de sırasıyla düz ve kesikli çizgi ile gösterilmiştir. $a/\lambda= [0.22, 0.51]$ frekans aralığında hem DKİ ve hem de şeritli kuplörün iletiminde iyi bir uyuşma gözlemlendi: Bu aralıkta %90'ın üzerindeki kuplaj verimliliği elde edildi. Dolayısıyla; önerdiğimiz yöntem, bu gibi kuplör tasarımları için DKİ ortamları taklit etmek için bir alternatif yaklaşım olarak düşünülebilir.

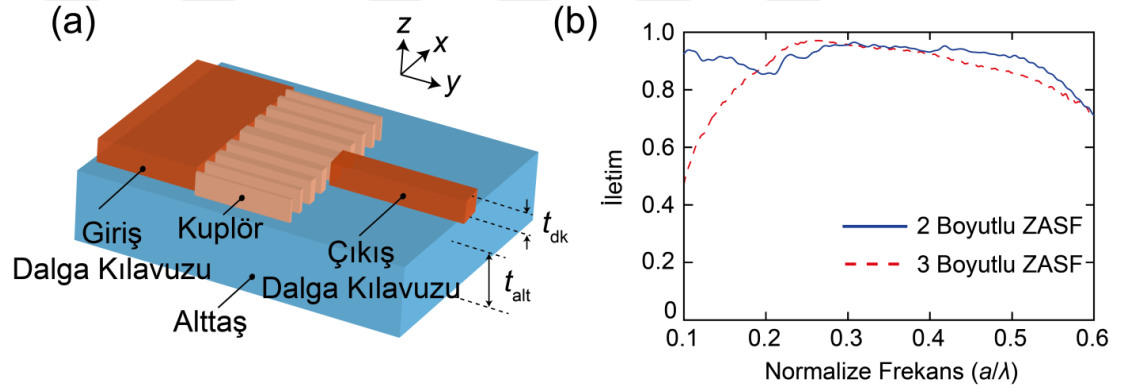
Farklı örnekleme koşulları altında performans değişikliklerini araştırmak için, kararlı durum alan incelemesini de gerçekleştirilmiştir. Kararlı durum elektrik alan şiddet dağılımları, Şekil 3.5'te farklı frekanslar için gösterilmiştir: $a/\lambda=0.25$ iken, $N_s=35$ (Şekil 3.5(a)) ve $N_s=63$ (Şekil 3.5(b)) şeritli tasarımlar için (Şekil 3.4(b)'den anlaşılacağı üzere) %90'ın üzerinde kuvvetli kuplaj elde edilmiştir. Öte yandan, Şekil 3.5(c)'de görülebileceği gibi $a/\lambda=0.50$ 'de $N_s=35$ şeritli tasarım yapısı için önemli kuplaj kaybı hesaplanmıştır. Bununla birlikte, $N_s=63$ için kuplaj verimi (Şekil 3.5(d)) hala %91'in üzerindedir. Şekil 3.5'te ek olarak verilen gelen frekansların iletim değerleri (T) Şekil 3.4(b)'de siyah ok ile belirtilmiştir. Sonuç olarak; önerilen konfigürasyonun örnekleme etkisi, farklı uygulama gereksinimleri için şeritli kuplaj bölgelerinin tasarımlarında esneklik sağlayabilir. Şekil 3.5'teki yoğunluk profillerine bakıldığında, önemli bir husus belirtilmelidir: Çıkış dalga kılavuzunda önerilen kuplör tasarımının tek modlu kuplaj verimliliğini ters yönde etkileyen güçlü bir mod uyumsuzluğu meydana gelmiştir. Böyle zayıf tek modlu kuplaj verimliliği, önerilen yapıyı tek modlu entegre fotonik uygulamalar için kaçınılmaz olarak istenmeyen hale getirecektir. Dolayısıyla, birleşen dalganın çıkış dalga kılavuzunda tek mod olarak ortaya çıkması için muhtemel gelecek perspektifler, şeritli dalga kılavuzu kuplör yapısının opto-geometrik parametrelerinin optimizasyonu üzerinde çalışabilir [58,62].



Şekil 3.5: Gelen frekans $a/\lambda=0.25$ iken (a) $N_s=35$ (b) $N_s=63$ ve $a/\lambda=0.50$ iken (c) $N_s=35$ (d) $N_s=63$ şeritli tasarımların kararlı durum elektrik alan şiddet dağılımları.

Şimdiye kadar; zaman-alan analizleri, üçüncü boyutun sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilen iki boyutlu hesaplama alanında yürütülmekteydi. Fotonik entegre sistemlerde tasarlanmış kuplörün doğru yapısal boyutlarla pratik olarak uygulanabilirliğini sağlamak için üç boyutlu ZASF analizlerini gerçekleştirmek önemlidir. Bu nedenle, önerilen yapı ($N_s=63$) yalıtkan üstü Si üzerine sayısal olarak tasarlanmıştır. Telekom dalga boyu rejimi göz önüne alındığında, Şekil 3.4(c)'deki yüksek iletim penceresinin merkez dalga boyu $1.55 \mu\text{m}$ 'ye eşit olarak seçildiğinden, birim mesafe a 465 nm 'ye eşit olur. Ardından, üst Si dalga kılavuzu ve kuplörün kalınlıkları $t_{\text{dk}}=3.22a=1.5 \mu\text{m}$ 'ye ve gömülü silisyum oksit (SiO_2) katmanın kalınlığı $t_{\text{alt}}=9.67a=4.5 \mu\text{m}$ 'ye eşit hale gelir (bkz. Şekil 3.6(a)). Giriş ve çıkış dalga kılavuzlarının genişlikleri sırasıyla, $w_{\text{giriş}}=21a=9.77 \mu\text{m}$ ve $w_{\text{çıkış}}=3a=1.39 \mu\text{m}$ olarak bulundu. Kuplaj bölgesinin uzunluğu $l_c=16.5a=7.69 \mu\text{m}$ 'ye eşittir. Si ve SiO_2 'nin kırılma indisleri ise sırasıyla 3.46 ve 1.50 olarak alınmıştır. Simülasyonlar boyunca

malzeme dispersiyonu düşünülmemiştir. 3 boyutlu örgü içindeki tasarlanan yapıyı sayısal olarak hesaplamak için Lumerical ZASF çözümleri kullanıldı [URL-2]. Simülasyon bölgesi, yalnızca temel TM modu giriş dalga kılavuzuna enjekte eden bir mod kaynağı tarafından uyarıldı. Ayrıca; hesaplama bölgesi, 2 boyutlu ZASF hesaplamaları durumunda olduğu gibi mükemmel uyumlu katmanlar ile sonlandırılmıştır. Şekil 3.6(b), 2 ve 3 boyutlu yapılar için çıkış dalga kılavuzunda elde edilen üst üste çizilmiş iletim spektrumlarını göstermektedir. Bu şekilden görülebileceği gibi, her iki sonuç normalize edilmiş frekans aralığı $a/\lambda = [0.2, 0.6]$, yani $\lambda = [0.75 \mu\text{m}, 2.32 \mu\text{m}]$ ile iyi bir uyum içindedir. Öte yandan; $a/\lambda = 0.2$ normalize edilmiş frekansın altında, sonlu bir dalga kılavuzu kalınlığındaki 3 boyutlu yapı ilerleme modları için bir kesme frekansı dayadığından, 3 boyutlu durum için iletim verimliliği 2 boyutlu durumdan sapma eğilimi gösterir.



Şekil 3.6: (a) Yalıtkan üstü Si üzerine tasarlanan kuplörün şematik gösterimi (b) 2 ve 3 boyutlu ZASF için üst üste çizilmiş iletim spektrumları.

Önerilen kuplör tasarımı ile literatürde rapor edilen tasarımlar ifade edilen performans metrik değerleri açısından karşılaştırıldığında, aşağıdakileri gözlemleyebiliriz. Rapor edilen her bir optik güç kuplaj konseptinin dalga kılavuzu tipi ve genişlik uyumsuzluğu oranı gibi benzersiz özelliklere sahip olmasına rağmen, bu karşılaştırmanın daha önce yayınlanmış çalışmaların rapor edilen sonuçlarını toplamak için faydalı bir rehber olacağını düşünüyoruz.

Sivrileştirilmiş konik dalga kılavuzlarının kullanılması ışık kuplajının geleneksel yaklaşımlarından biridir ve bu konsept, konik ve FK dalga kılavuzlarının ilerleme modları genişlikte hemen hemen eşit olduğunda, %60 ve %80 civarında oldukça yüksek bir kuplaj verimliliği sağlayabilir [43,65,66]. Öte yandan, kuplaj problemini çözmek için Gauss ışın konumsal genişliği; bir sivrileştirilmiş konik bölge ile çıkış dalga kılavuzu genişliğine uyacak şekilde daraltılır [67,68]. Bu durumlarda, deneysel

ölçümler %35 civarında kuplaj verimliliği sağlamıştır. Bununla birlikte; giriş/çıkış dalga kılavuzu genişliklerinin oranı daha da artarsa, kuplaj bölgesi daha hantal olur ve bu da kuplörü fotonik entegre devreler için tercih edilmez kılar. Bir başka yaklaşım ise kuplaj bölgesinin optik mercekler vasıtasıyla tasarlanmasıdır. Örneğin; hiperbolik sekant indis profiline sahip FK lens sayısal olarak tasarlanmış ve yalıtkan üstü Si üzerinde üretilmiştir ve yaklaşık %73'lük kuplaj verimliliği sergilemektedir [69]. Kademeli FK lens yardımıyla, dielektrik dalga kılavuzu ile FK dalga kılavuzu direk bağlandığında %60'lık kuplaj verimliliği gözlemlendi [70]. Başka bir çalışmada; üçgen indis profiline sahip DKİ lens yapısı, daha geniş konumsal genişliğe sahip gelen ışınları 10 dB'lik gelişmiş bir iletim oranı ile FK dalga kılavuzuna enjekte eden bir ışın konumsal genişlik kompresörü olarak tasarlandı [71]. Luneburg tipi lens kuplaj bölgesi olarak tasarlandı ve üretildi [59]. Öte yandan, 15.46 μm (genişlik) ve 16.19 μm (uzunluk) yapısal parametrelere sahip olan modifiye edilmiş Maxwell balık-gözü lensi, ışığı, farklı giriş/çıkış kanal genişlikleri olan dielektrik dalga kılavuzları arasında kuplajlamak için önerilmiştir [57]. Tasarlanan kuplör %75'in üzerinde bir kuplaj verimliliğine sahip olmasına rağmen, çalışma bant genişliği %18.56 (284 nm)'dir ve bu optik iletişim uygulamaları için nispeten dar kabul edilebilir. Sayın Çakmak ve ekibi, kuplaj verimliliğini arttırmak için dar bir FK dalga kılavuzunun önünde DKİ FK kullandılar ve mikrodalga rejiminde sayısal olarak 6,35 dB ve deneysel olarak 5 dB'lik bir iyileşme elde ettiler [55]. Son olarak, Gauss ışını, TM ve TE polarizasyon modları için maksimum güç kuplaj verimliliği sırasıyla yaklaşık %80 ve %60 olduğu kademeli hava delikli FK yapısı ile levha dalga kılavuzuna kuplajlanmıştır [72].

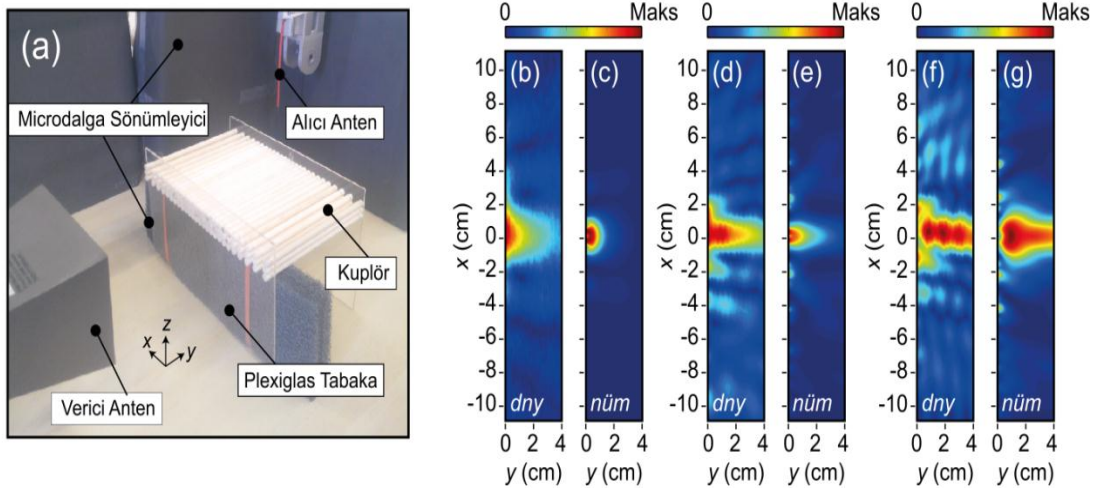
Tüm bu rapor edilen çalışmaları göz önünde bulundurarak, şeritli dalga kılavuzu kuplör ile uygulanabilir, geniş bant ve verimli kuplaj yaklaşımı öneriyoruz. Kuplaj verimliliğinin %80'in üzerinde olduğu iletim bantı düşünülürse; önerilen kuplör bildirilenlerden %93 daha geniş optik güç aktarım bant genişliğine sahiptir. Ayrıca, tasarlanmış şeritli dalga kılavuzu kuplör yapısının indis modülasyonu yalnızca bir tek yönde olduğu için daha az dispersiyonludur yani yapı bir boyutlu FK'leri taklit eder. Dahası, önerilen kuplaj konfigürasyonu üretime daha uygundur; plasmonik ve metamateriyallere dayalı olanlar ile karşılaştırıldığında, metalik içeriğe bağlı iç malzeme kayıpları göstermez.

3.1.4 Mikrodalga rejiminde tasarım prensibinin deneysel gösterimi

Alümina (Al_2O_3) dielektrik çubuklardan yapılmış bir prototip, mikrodalga rejiminde deneysel olarak çalışma prensibi göstermek için üretilmiştir. Al_2O_3 dielektrik çubukların yarıçapı ve yüksekliği sırasıyla 3.175 mm ve 153 mm'ye eşittir (birim mesefa $a=9.39$ mm'ye karşılık gelir) ve dielektrik sabiti mikrodalga frekanslarında 9.8'e eşittir. Bölüm 3.1.3'te, dielektrik şeritli dalga kılavuzlarının kalınlıklarını modüle ederek eş dağılımlı olmayan ortamı gerçekleştirdik. Bununla birlikte, Al_2O_3 dielektrik çubukların sabit yarıçapından ötürü; biz EOT'ni her dilimdeki dielektrik şeritli dalga kılavuzların kalınlığını bulmak yerine her sabit-yarıçaplı dielektrik çubuk için dilim genişliklerini tespit etmek için kullandık. Başka bir deyişle, bölüm 3.1.3'te önerilen yapıda dielektrik şeritlerin kalınlığı değişirken dilimlerin kalınlığı sabittir, deneysel yapıda laboratuvardaki mevcut imkanlara bağlı olarak dielektrik şeritlerin (çubukların) kalınlığı sabittir ve dilimlerin kalınlığı değişkendir. Sayısal olarak, bölüm 3.1.3'teki yapının deneydeki yapıdan daha verimli olduğunu gözlemledik. Kırılma indis dağılımı, $n(x,y)$ sadece çubuklar arasındaki mesafeyi ayarlayarak değiştirilir. Dahası, giriş dalga kılavuzunun kalınlığı şerit sayısını sınırlar. Bölüm 3.1.3'teki önerilen yapı 63 şeride sahiptir ($N_s=63$), ancak deneysel yapıda 21 şerit vardır. Bu deneyin amacı, verimli optik güç aktarımı ile birlikte çıkışta gerekli benek çapı dönüşüm oranını göstermek suretiyle önerilen tasarım ilkesini doğrulamaktır.

Şekil 3.7(a), bir verici olarak nominal kazancı 20 dB değere sahip standart bir horn antenden ve alıcı olarak ise bir monopol antenden oluşan deney düzeneğini tasvir etmektedir. Her iki anten de TM polarize mikrodalgaları desteklemek üzere ayarlanmıştır. Pleksiglas'tan yapılmış plakalar, alümina çubukların yerleştirilmesi ve hava kaplamasının tüm yapıyı çevrelediği serbest duran bir yapı oluşturmak için kullanılmıştır. Ayrıca, çevre yansımaları nedeniyle oluşacak gürültüyü azaltmak için deney düzeneği mikrodalga sönümleyiciler ile kaplanmıştır. Ek olarak, horn antenin açıklığı ile kuplörün kalınlığı arasındaki boyut uyumsuzluğunu gidermek için kuplör girişinin üstüne ve altına ek sönümleyiciler yerleştirilmiştir fakat bu sönümleyiciler Şekil 3.7(a)'yı daha görünür yapmak için silinmiştir. Önerilen yapının özelliklerini göstermek için; bir vektör ağ analiz cihazı (Agilent E5071C ENA), kuplör çıkışında 1 mm x 1 mm konumsal çözünürlükle, kararlı durum elektrik alan yoğunluk dağılımını ölçmek için kullanılmıştır. Şekil 3.7(b), 3.7(d), 3.7(f) deneysel olarak

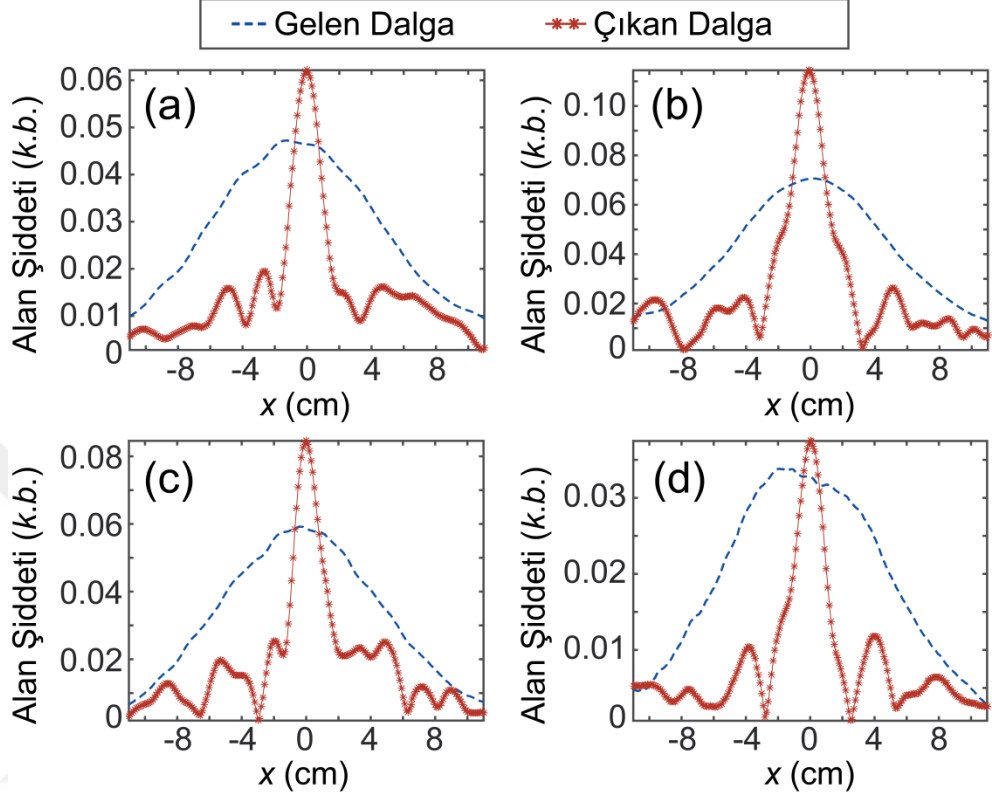
ölçülen alan dağılımlarını gösterirken, Şekil 3.7(c), 3.7(e), 3.7(f) ise sayısal olarak hesaplanan alan dağılımlarını sırasıyla 5.1 GHz ($a/\lambda=0.16$), 10.2 GHz ($a/\lambda=0.32$) ve 14.1 GHz ($a/\lambda=0.44$)'e eşit frekanslarda göstermektedir. Verici antenin açıklığı ile kuplörün çapraz kesit alanı arasındaki boyut uyumsuzluğuna ek olarak Pleksiglas plakalar ve mikrodalga sönümleyiciler nedeniyle ortaya çıkan yansımalar gibi diğer hususların etkisiyle deneysel ve sayısal durumlar arasında hafif bir tutarsızlık olduğuna dikkat edilmelidir. Sayısal sonuçlarla olan hafif tutarsızlığa rağmen Şekil 3.7(b), 3.7(d), 3.7(f)'de giren ışının konumsal olarak sıkıştırıldığını ve giriş/çıkış dalga kılavuzu yokluğunda, güçlü bir odaklama davranışının ortaya çıktığını deneysel olarak doğrulamaktadır. Ayrıca, Şekil 3.7(b) ve 3.7(g)'deki dikkatli inceleme, toplam alan yoğunluğunun çoğunlukla çıkış arayüzünde yoğunlaştığını ve dışarıda görünen yan lobların yoğunluğunun oldukça zayıf olduğunu ortaya koymaktadır. İlgili mikrodalga ölçümleri; gelen dalganın, konumsal olarak değişen kırılma indis dağılımı nedeniyle konumsal olarak sıkıştırılabileceğini; dolayısıyla istenilen kuplaj yapısının böyle şeritli dalga kılavuzları kullanılarak tasarlanabileceğini göstermiştir.



Şekil 3.7: (a) Deneysel kurulumun fotoğrafik resmi (b), (d), (f) deneysel ölçülen (dny) ve (c), (e), (g) analitiksel hesaplanan ($nüm$) kararlı hal elektrik alan şiddet dağılımları.

Işın sıkıştırma mekanizmasını nicel olarak gözlemlemek için, kuplörün girişindeki ve çıkışındaki ışın profili ölçüldü ve Şekil 3.8(a), 3.8(b), 3.8(c) ve 3.8(d)'de sırasıyla frekansları 6.7 GHz ($a/\lambda=0.21$), 8.0 GHz ($a/\lambda=0.25$), 10.8 GHz ($a/\lambda=0.34$) ve 15 GHz ($a/\lambda=0.47$)'ye eşit olacak şekilde üst üste çizilmiştir. Gelen ve çıkan dalgalarının yarı-tepede tüm-genişlik (YTTG) oranları alınarak, ışın sıkıştırma oranı Şekil 3.8(a),

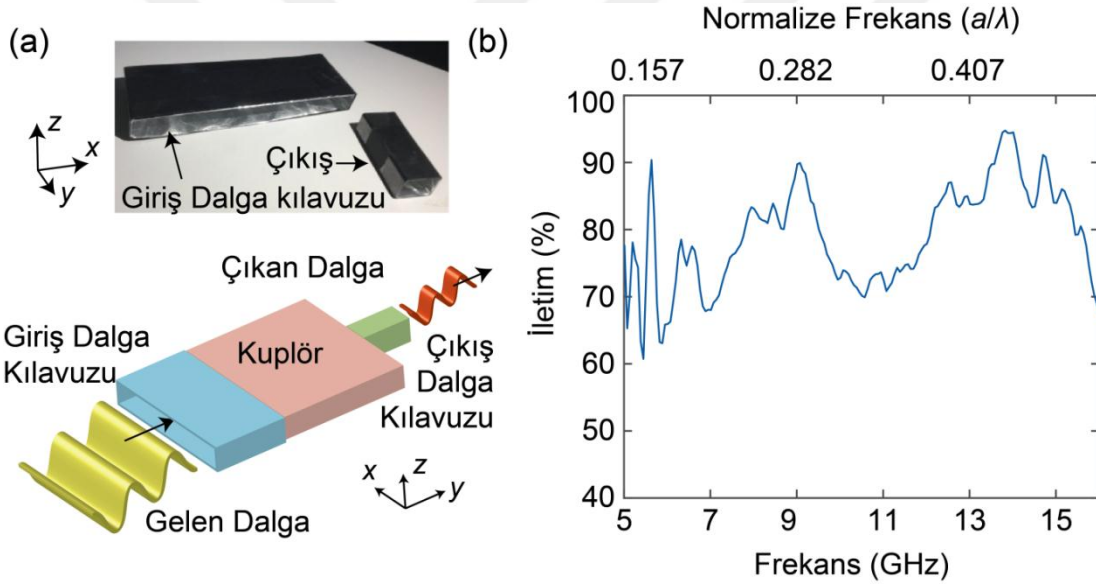
3.8(b), 3.8(c) ve 3.8(d) için sırasıyla 6.2:1, 4.6:1, 7.1:1 ve 5.6:1 olarak hesaplanabilir. Deneysel analizler, önerilen konfigürasyonun, bir kuplaj işlemi anımsatan konumsal ışın sıkıştırmasını sağlayabileceğini doğrulamıştır.



Şekil 3.8: Kuplörün giriş ve çıkış tarafındaki (a) 6.7 GHz, (b) 8.0 GHz, (c) 10.8 GHz ve (d) 15.0 GHz frekansları için ışın profilleri.

Optik güç kuplaj mekanizmasına daha fazla kanıt için, deney düzeneğine giriş/çıkış dalga kılavuzunu dahil ettik. Giriş/çıkış dalga kılavuzları (Şekil 3.9(a)'da gösterilmiştir) gerekli boyutlara sahip içi boş dikdörtgen kutular oluşturularak ve bunların alüminyum folyolarla kaplanması ile imal edilmiştir. Alüminyumun mikrodalga frekanslarında neredeyse mükemmel yansıtıcı bir madde olduğu bilinmektedir [73] ve dalga kılavuzları içindeki istenmeyen yansımaları en aza indirmek için katmanları alüminyum ile olabildiğince düz olarak kaplamaya özel olarak dikkat gösterilmiştir. Sırasıyla x, y ve z yönü için giriş dalga kılavuzu için içi boş kutu 21.0 cm, 8.0 cm ve 2.0 cm boyutlara sahipken, içi boş çıktı dalga kılavuzunun boyutları 3.0 cm, 8.0 cm ve 2.0 cm'dir. Tasarlanan kuplörün iletim spektrumunu elde etmek için, giriş/çıkış dalga kılavuzları, kuplör ile dalga kılavuzları arasında Şekil 3.9(a)'da gösterildiği gibi herhangi bir boşluk bırakılmadan sırasıyla kuplörün girişine ve çıkışına sabitlenmiştir. Daha öncede kullanılan aynı

verici horn anten, giriş dalga kılavuzu boşluğuna mikrodalgaları enjekte etmek için kullanılmıştır. Çıkış dalga kılavuzunun sonunda iletim spektrumunu ölçmek için, açıklık boyutları $x=3.5$ cm ve $y=2.5$ cm olan bir horn anten kullanılmıştır. Ayrıca; ölçülen iletim spektrumu, kuplör yapısını çıkardıktan sonra giriş dalga kılavuzunun sonundan ölçülen gelen iletim spektrumu ile normalize edilmiştir. Şekil 3.9(b) elde edilen normalleştirilmiş iletim spektrumunu göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi, iletim 5-16 GHz gibi geniş frekans aralığında %60 ile %95 arasında değişmektedir. Spektrumdaki salınımları ve biraz düşük iletim verimini, horn antenin metalik açıklığındaki ve giriş/çıkış dalga kılavuzlarındaki istenmeyen yansımalara bağlıyoruz. Bununla birlikte; iletim analizi, tasarımlanmış kuplörün, 21.0 cm ve 3.0 cm genişliğinde dalga kılavuzları arasındaki kuplaj işlemi için geniş bir frekans aralığında %70'ten fazla verimlilik sergileyebileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 3.9: (a) (Üst) Yapılan içi boş mikrodalga dalga kılavuzlarının fotoğrafik resmi ve (alt) dalga kılavuzlu deneysel düzeneğin şematik gösterimi (b) Normalize iletim verimlilik spektrumu.

3.1.5 Sonuç

Sunulan çalışmada, optik dalga kılavuzları arasındaki genişlik uyumsuzluğuna bağlı olarak ortaya çıkan zayıf optik güç aktarım problemi hedeflenmiştir. Etkili optik kuplör, kuplaj bölgesinin kademeli indis dağılımının EOT kullanılarak dielektrik şeritler vasıtasıyla gerçekleştirilmesi konseptine dayanarak önerilmiştir. Ek olarak, geniş bant yüksek iletim verimi elde etmek için şerit sayısı gibi örnekleme parametreleri ayarlanmıştır. En geniş çalışma bandı, dielektrik şerit sayısı N_s , 63'e

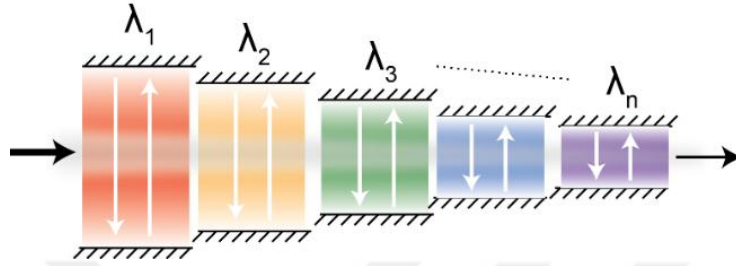
eşit olduğunda gözlemlenmiştir ve ilgili iletim veriminin %90'ın üzerinde olduğu hesaplanmıştır. Entegre fotonik uygulamalara uygun gerçekçi optik kuplörü gerçekleştirmek için, önerilen yapı üç boyutlu ZASF analizi ile sayısal olarak da analiz edilmiştir. Kuplör, yalıtkan üstü Si üzerinde uygulanmış ve telekom dalga boyu rejiminde çalışmıştır. Kuplaj verimliliği %80'in üzerinde olduğu düşünülürse önerilen kuplör, %93 ile daha önce bildirilenlerden daha geniş optik güç iletim bant genişliğine sahiptir. Ayrıca, mikrodalga rejiminde sürekli değişen eş dağılımlı olmayan kırılma indisli ortamın deneysel gerçekleştirmeleri, başarılı ışın sıkıştırma davranışını ve farklı genişliklere sahip mikrodalga dalga kılavuzları arasında verimli kuplajı doğrulamıştır. Son olarak, önerilen şeritli dalga kılavuzu kuplörün önemli noktaları şu şekilde özetlenebilir: Yapı kompakttır, geleneksel indis modülasyon tabanlı optik kuplörlere kıyasla daha az dispersiyonludur, üretime daha uygundur ve tamamen dielektrik olması sayesinde ek iç malzeme kayıplarına maruz kalmamaktadır. Dielektrik şeritler vasıtasıyla yüksek verimli optik dalga kılavuzu kuplörleri, bir bileşenden diğerine verimli güç aktarımı gerektiren entegre optik devrelerin işlevselliğini artırabilir.

3.2 Kılavuzlanmış-mod Rezonans Tabanlı Çok Renkli Germanyum Kızılötesi Fotodetektör

3.2.1 Giriş

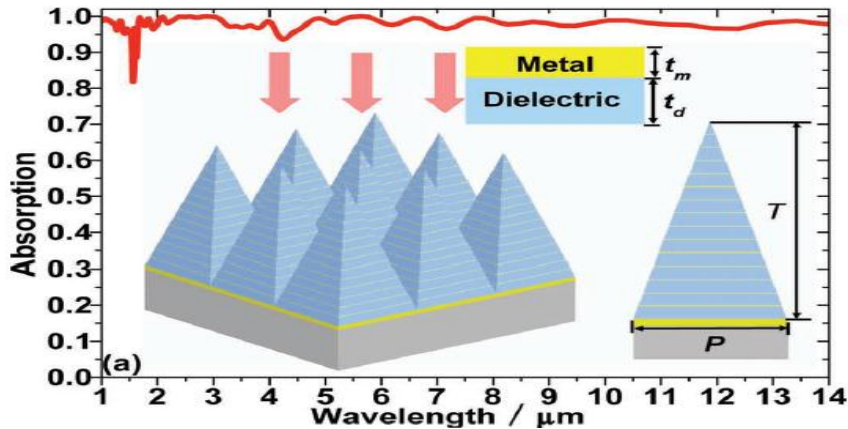
Bir kızılötesi fotodetektör, kızılötesi dalga boylarındaki ışıma enerjisini ölçülebilir bir forma dönüştürür. Kızılötesi fotodetektör, askeri, bilimsel, güvenlik, tıbbi ve otomotiv alanlarında çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bunlara demiryolu güvenliği, gaz kaçağı tespiti, alev tespiti, alkol seviyesi testi, anesteziyoloji testi, petrol arama, sıcaklık algılama, su ve çelik analizi dâhildir. İdeal bir fotodetektör, gelen ışınının ayrı dalga boylarını algılamakta aynı anda yüksek verimli foton hasatına izin verir. Bu bağlamda, her iki gereksinimi karşılamak için, birçok araştırma rezonans fenomenini destekleyen nanoyapılara yönelmiştir [74]. Örneğin, 1.31 μm dalga boyunda dikey aydınlatma altında birleştirilmiş bir germanyum (Ge) fotodetektör sunulmuştur [75]. Metalik reflektör fotodetektörün arka taraf aynası olarak kullanılırken, Bragg reflektör ön taraf ayna olarak işlev görür. Bununla birlikte, böyle tek rezonans tabanlı fotodetektörler genellikle tek renkli bir şekilde işler; diğer bir deyişle, sadece dar bir dalga bandını algırlarlar. Bu tür rezonans

etkilerini birkaç dalga boyu aralığına genişletmek oldukça arzu edilir (bkz. Şekil 3.10). Bu bağlamda, örneğin, indiyum galyum arsenür (InGaAs) ve Si'den oluşan bir fotodetektör dizisi, görülebilir ve kızılötesi spektrumun farklı dalga boylarını veya renklerini soğurmak üzere tasarlanmıştır. Burada Si katmanı 1.1 μm 'ye kadarki dalga boylarını tespit etmekten sorumluyken InGaAs katmanı 1.68 μm 'ye kadar olan dalga boylarını tespit etmekle yükümlüdür [76].



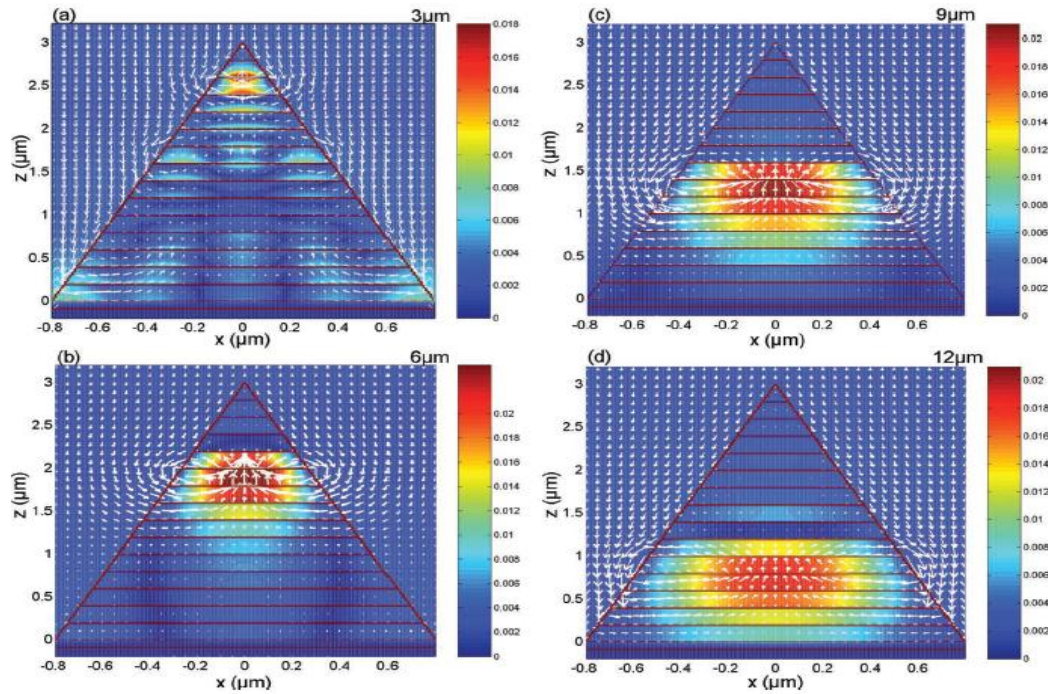
Şekil 3.10: Önerinin ana fikri gösterilmiştir. Değişen frekanslı optik rezonatörlerin kaskadı çok renkli ışık lokalizasyonları verebilir.

Başka bir çalışmada önerilen piramit soğurucu, Şekil 3.11 eklerinde gösterildiği gibi metalik ve dielektrik ince film katmanlarından oluşmuştur. Metal ince film kalınlığı $t_m=10$ nm olan altından yapılmıştır; dielektrik ince film kalınlığı $t_d=190$ nm olan Ge'den yapılmıştır. Toplam metal/dielektrik çifti sayısı 15'tir. Birim hücrenin x ve y yönlerindeki periyotları 1600 nm'dir. Soğurucunun tek bir birim hücresi, simetrik piramit yapısına sahip olduğundan, yapı TE ve TM polarize ışığa hemen hemen aynı tepkiyi vermiştir. Kolaylıkla görülebileceği gibi, normal ışınımına ait soğurulma spektrumu, 1 μm 'den 14 μm 'ye kadar olan kızılötesi dalga bandında neredeyse %100'lük bir soğurulma ile soğurulma performansının mükemmel olduğunu göstermiştir [77].



Şekil 3.11: TE/TM dalgası için normal ışınımında çok katmanlı piramit metemalzeme soğurucu için soğurma spektrumu [77].

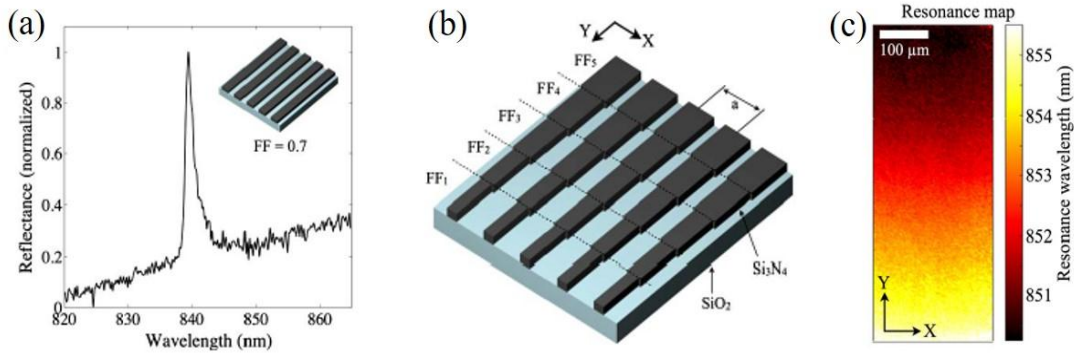
Ayrıca, bu piramit soğurucunun soğurma mekanizmasını anlamak için manyetik alanın y bileşeninin dağılımlarını ve TM polarizasyonlu gelen ışığın dört farklı dalga boyundaki (3 μm , 6 μm , 9 μm ve 12 μm) enerji akışını araştırmışlar ve Şekil 3.12’de göstermişlerdir. 3 μm gibi kısa dalga boylu gelen ışık için, enerji piramit yapısının üst kısmında rezonans olmuştur. 12 μm gibi daha uzun dalga boyuna sahip gelen ışık için, enerji, piramit yapısının alt kısmında sıkışmıştır. Bununla birlikte, farklı materyalden yapılmış ışığa duyarlı katmanların bütünleştirilmesi, kitlesel üretim girişimini engelleyebilir ve genel üretim maliyetini artırabilir. Daha uygun ve düşük maliyetli bir yaklaşım, aynı materyalden yapılmış çoklu aktif katmanları tek bir konfigürasyona entegre etmek olacaktır.



Şekil 3.12: (a) 3 μm , (b) 6 μm , (c) 9 μm ve (d) 12 μm dalga boyları için piramit metamalzeme soğurucu H_y (renk haritaları) ve enerji akış (ok haritaları) dağılımı [77].

Biyolojik sensör uygulamaları için son zamanlarda chirped kılavuzlanmış-mod rezonans (KMR) yapısı önerildiğini belirtmemiz gerekir [78]. Şekil 3.13(a)’ın ekindeki ızgara, polarize, paralelleştirilmiş ışıkla aydınlatıldığında KMR uyarılarak yaklaşık 840 nm rezonans dalga boyunda dar bant yansıma tepesi oluşturmuştur (bkz. Şekil 3.13(a)). Şekil 3.13(b)’deki gibi ızgaralar her biri farklı doluluk oranına sahip şeritler ile chirped hale getirilmiştir. Konum bilgisi elde edilmiş, böylece rezonans dalga boyu konumun bir fonksiyonu haline gelmiştir. Rezonans dalga boyu hem ızgara periyoduna hem de doluluk oranına bağlı olduğundan, bu

parametrelerden herhangi birini ayarlamak yapıyı chirped hale getirir. Bu önerilen konfigürasyonda doluluk oranı, ızgaranın kademeli olarak kalınlığının değiştirilmesi ile modüle edilmiş; ızgaranın rezonans dalga boyu haritası Şekil 3.13(c)'de gösterilmekte ve rezonans dalga boyunda yaklaşık 5.5 nm'lik kayma gözlemlenmiştir. Periyot ayarlama aralığı doluluk oranı ayarlama aralığından büyük olduğundan, ızgaranın kalınlığının sabit olduğu ve sadece her bir ızgaranın arasındaki mesafenin yani periyodun modüle edildiği KMR tasarımını önermekteyiz. Aynı zamanda, chirped yapıdaki ayrı birim hücreler, eğimli tek parçalı dielektrik şeritler olarak varsayılabilir. Bu yolla, önerilen cihazın imalat gereksinimlerinin daha az zorlayıcı olması beklenir; zira dielektrik şeritler herhangi bir ek yapısal değişikliğe ihtiyaç duymaz ve çeşitli elektron ışın litografi veya nanodamgalama litografi teknikleri kullanılarak kolaylıkla üretilebilir.



Şekil 3.13: (a) Silisyum nitrür (Si_3N_4) ızgarasının ölçülmüş yansımaya spektrumu (b) Chirped ızgaralı tasarım (c) Chirped ızgaranın rezonans dalga boyu haritası [78].

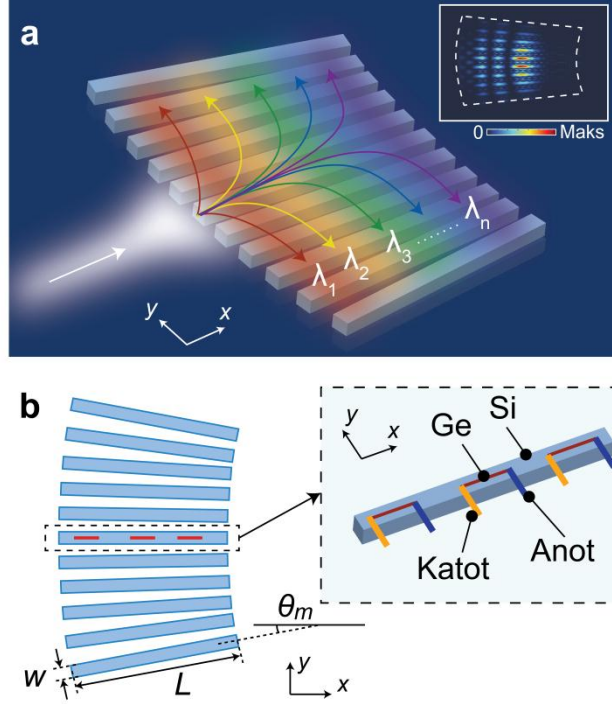
3.2.2 Metot

Bu çalışmada, düzlem-içi periyodikliği olan bir KMR temelli çok renkli bir Ge fotodetektörü önermekteyiz (bkz. Şekil 3.14(a)). Adiyabatik olarak ayarlanmış düzlemsel periyodikliğin frekansa duyarlı, güçlü foton lokalizasyonlarına yol açabileceğini gösteriyoruz. Biz daha sonra, lokalize modların merkezdeki dielektrik şeridin içine Ge aktif bölgeleri dahil edilerek güçlü foton soğurulmasıyla sonuçlanabileceğini ortaya koyuyoruz.

Önerilen konfigürasyon radyal olarak düzenlenmiş 11 dielektrik Si dikdörtgen şeritten oluşur (bkz. Şekil 3.14(b)). Dielektrik Si şeritlerinin genişliği (w) ve uzunluğu (L) sırasıyla $0.765 \mu\text{m}$ ve $9 \mu\text{m}$ 'ye eşittir. Şekil 3.14(b)'de gösterildiği gibi, her şerit x yönündeki ilerlemeden belirli bir açı ile sapmaktadır, böylece enine y -

yönünde anlık periyodiklik sabit kalır ve x - ilerleme yönü boyunca kademeli olarak değişir. Bu koşulları sağlayan açı değişimi, θ_m , analitik olarak Eşitlik (3.4)'deki gibi elde edildi. Burada, $p_1=0.9 \mu\text{m}$ ve $p_2=1.2 \mu\text{m}$ sırasıyla yapının çıkışında ve girişinde enine periyotlardır ve m her şeridin indeksidir (orta şerit için 0, alt ve üst yarılarıdaki şeritler için sırasıyla negatif ve pozitif değerler).

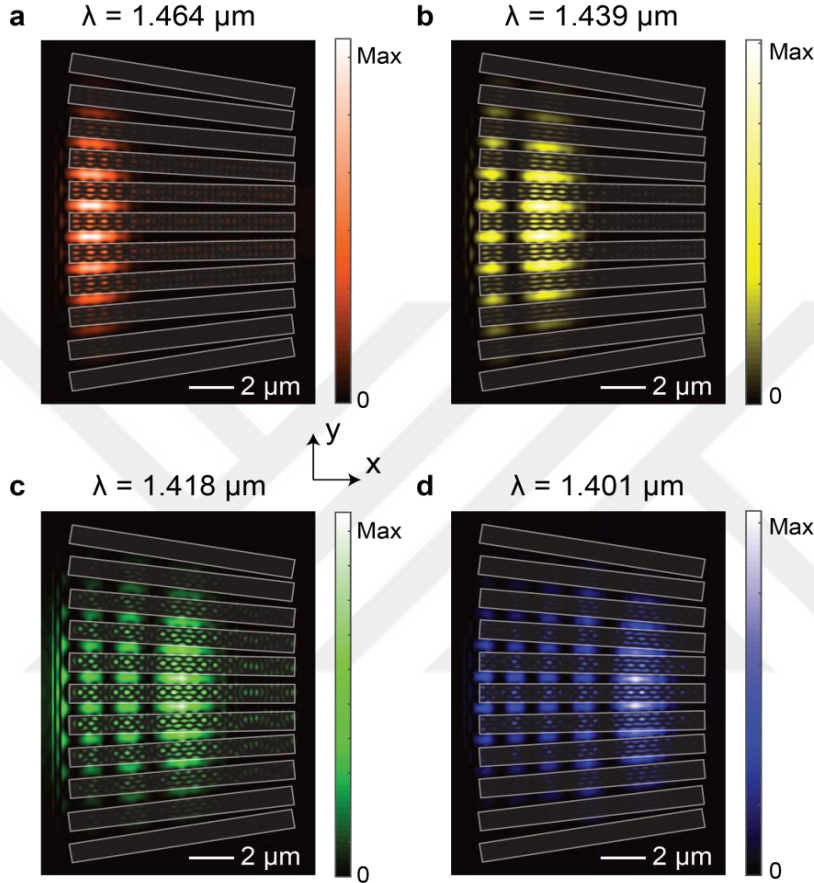
$$\theta_m = \tan^{-1} \left[\frac{m(p_2 - p_1)}{L} \right]; m = -5, -4 \dots 4, 5 \quad (3.4)$$



Şekil 3.14: (a) Önerilen konfigürasyonun düzlem içi periyodikliği mekansal spektrum ayrımı sağlar. (b) Önerilen konfigürasyonun şematik açıklaması.

Çalışma prensibini doğrulamak için nümerik analizler Lumerical ZASF kullanılarak yapılmıştır [URL-2]. Mükemmel uyumlu katmanlar, simülasyon sınırlarını sona erdirmek ve hesaplama süresini azaltmak için kullanılırken, simülasyonlar 2 boyutlu örgüde gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, sınırlı dielektrik şerit yüksekliğinin neden olduğu etkin indis değişimini tam olarak hesaba katmak için, tam bir 3 boyutlu analiz gereklidir (fakat önerinin fiziksel ilkesi değişmeden kalacaktır). TM polarizasyona sahip geniş bantlı bir kaynak yapıyı enjekte etmek için kullanılmıştır. Şekil 3.14(a)'daki sağ üstteki ek, $1.42 \mu\text{m}$ dalga boyu için kararlı durum elektrik alan şiddetini göstermektedir. Bu şekilden, KMR'nin anlık yerel periyodikliğinin ve çalışma frekansının dalga vektörünün eşleşmesinden dolayı gelen ışımın chirped yapıda lokalize olduğu açıkça doğrulanabilir.

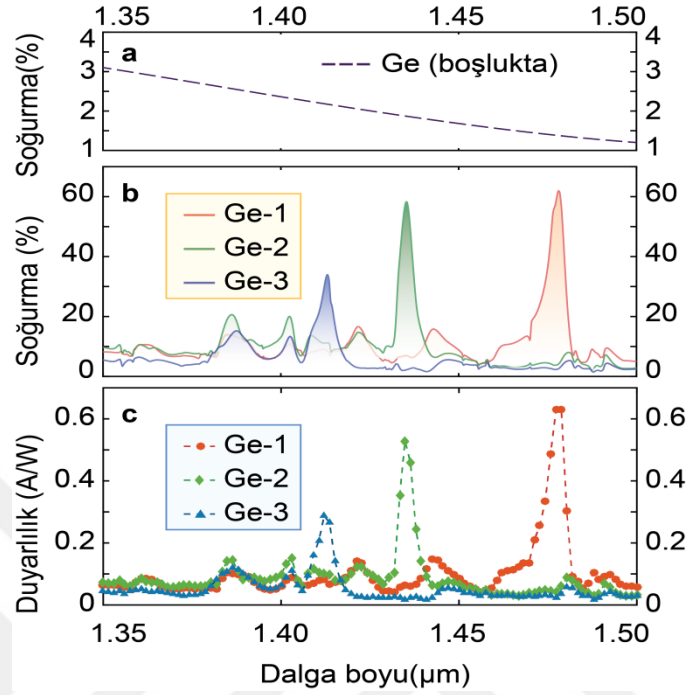
Şekil 3.15 farklı dalga boylarının chirped yapıda farklı boylamsal konumlarda lokalize edilmesini göstermektedir. Daha uzun dalga boylu ($\lambda=1.464\mu\text{m}$) gelen ışık yapının girişinde tuzaklanırken, daha kısa dalga boylu ($\lambda=1.401\mu\text{m}$) gelen ışık yapının çıkışında tutulmuştur. Bu, farklı konumlarda farklı frekans bileşenlerini hasat etmemizi sağlamıştır.



Şekil 3.15: Farklı dalga boylarının (a) 1.464 μm , (b) 1.439 μm , (c) 1.418 μm ve (d) 1.401 μm elektrik alan şiddet dağılımları.

Sırasıyla y ve x yönlerinde 100 nm x 1500 nm, 100 nm x 1500 nm ve 75 nm x 1500 nm boyutlarına sahip Ge aktif bölgeleri (Ge-1, Ge-2, Ge-3) Şekil 3.14(b)'de gösterildiği gibi merkezi dielektrik şerit içerisine yerleştirilmiştir. Ge, yapının girişine göre 700 nm (Ge-1), 5050 nm (Ge-2) ve 7130 nm (Ge-3) mesafelerine yerleştirilmiştir. Ge'nin serbest uzay soğurması Şekil 3.16(a)'da verilmişken, üç Ge bölgesi için nümerik olarak hesaplanan soğurma spektrumu Şekil 3.16(b)'de üst üste çizilmiştir. Bu şekillerden yola çıkarak, Ge'nin soğurması çeşitli dalga boylarında 60 kata kadar arttırıldığı görülmüştür. Ayrıca, Şekil 3.16(c) aynı Ge bölgeleri için ideal koşullar altında hesaplanan duyarlılık spektrumunu göstermektedir; Bunun anlamı,

her soğurulan fotondan bir elektron-delik çifti ürettiği varsayılmaktadır. Bu şekil, 70 nm bant genişliği üzerinden birim optik güç başına 0.31-0.63 A frekansa hassas fotoakım oluşumunu kanıtlamaktadır.



Şekil 3.16: (a) Boşluktaki 100 nm kalınlığındaki bir Ge'nin soğurma spektrumu. Ge aktif bölgeleri için üst üste bindirilmiş (b) soğurma ve (c) duyarlılık spektrumu.

3.2.3 Sonuç

Sonuç olarak, KMR tabanlı çok renkli Ge kızılötesi fotodetektörün tasarımını öneriyoruz. Tasarlanan fotodetektör, çeşitli dalga boylarında 0.29-0.63 A/W arasında bir duyarlılık vermiştir. Tasarımımız, kompakt boyutları, küçük aktif bölgesi ve düşük üretim maliyeti ile fotodetektör uygulamaları için uygulanabilir bir yaklaşımı temsil ediyor.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, bölüm 3.1'de giriş/çıkış terminallerinin genişlikleri farklı olan optik dalga kılavuzları arasındaki optik güç aktarma problemi için verimli bir çözüm araştırılmıştır. Optik kuplörü tasarlamak için kuplör bölümüne dereceli indis modülasyonu önerilmiştir. Kuplör bölümünün indis profili, optik dalga kılavuzu dizinleri yardımı ile bir Gauss fonksiyonu kullanılarak modüle edilmiştir. EOT temelde konumsal olarak değişen indis profilini, sabit kırılma indisine sahip olan sonlu uzunluk/genişlikteki dielektrik şeritler ile gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Tasarlanmış olan optik kuplörün örneklenme etkisini araştırmak ve optik güç aktarım performansını arttırmada çok önemli rol oynayan parametreleri belirlemek için iki ve üç boyutlu ZASF analizi kullanılmıştır. Geleneksel sivrileştirilmiş ve direk kuplörlerin kuplaj performansı, optik dalga kılavuzları dizinleri ile tasarlanmış kuplörün kuplaj performansı ile karşılaştırıldığında; kuplaj verimliliği geniş bir frekans aralığı boyunca yaklaşık %30'dan %95'e artmaktadır. Buna ek olarak, entegre fotonik uygulamalara uygun gerçekçi optik kuplörü oluşturmak için, önerilen yapı yalıtkan üstü Si üzerinde, sayısal olarak tasarlanmıştır. Uygulanan yalıtkan üstü Si platform tabanlı optik kuplör, telekom dalga boyu rejiminde ($\lambda=1.55\mu\text{m}$) çalıştırılmış ve optik kuplörün boyutları birim mesafe 465 nm olarak sabitlendiğinde 9.77 μm (ilerleme yönüne dik yön boyunca) ve 7.69 μm (ilerleme yönü boyunca) olmuştur. Son olarak, tasarım ilkesini göstermek için mikrodalga deneyleri gerçekleştirilmiş ve 7.1:1'e kadar yüksek benek çapı dönüşüm oranı da ölçülürken, 5.0-16.0 GHz frekans aralığında %60'tan fazla bir kuplaj verimliliği gösterilmiştir.

İleri çalışmalar için tasarım öncelikle, 2 boyuttan 3 boyuta çıkarılabilir. Tasarımın 3 boyutlu hale getirilmesi yani dikdörtgenler prizması şeklindeki optik dalga kılavuzundan dikdörtgenler prizması şeklindeki optik dalga kılavuzuna ışık kuplajı indis dağılımının 1 boyuttan 2 boyuta çıkması anlamına geliyor. Üretim şartlarını da düşünürsek bunun EOT ile benzerinin yapılması gerekir. Bir sonraki adım yarıçapları farklı optik fiberler arasında ışık kuplaj problemine yönelik olabilecektir. Burada yapıların silindirik olması koordinat sisteminin değişmesi anlamına geldiğinden

önceki tasarımlardan daha zorlayıcı bir süreci beraberinde getirecektir. Tüm bu aşamalarda mod uyuşmasına ve polarizasyon bağımlılığını ortadan kaldırmaya yönelik adımlarda atılabilir.

Bölüm 3.2’de, çok renkli Ge kızılötesi fotodetektör, düzlemsel periyodiklikle KMR kullanılarak tasarlanmıştır. Sayısal olarak, her dalga vektör bileşeni farklı yerel düzlemsel periyotlarla eşleştigiinden, rezonans fenomeni farklı lokasyonlarda elde edilmiştir. Önerilen fotodetektör, 70 nm’lik bant genişliğinde 0.63 A/W’ye kadar ideal duyarlılık ve %61’e kadar çok renkli foton soğurulmasına olanak tanımıştır.

İleri çalışmalar için öncelikle tasarım konsepti aynı kalmak üzere dalga kılavuzu sayısı, dalga kılavuzu kalınlığı, yapının giriş ve çıkış periyotları optimize edilebilir. Yapı 3 boyutlu tasarlanabilir. İlerleyen aşamalarda bu ve yeni tasarımların elektriksel özellik analizi (duyarlılık, akım vb.) yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D.,** (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press.
- [2] **Christodoulides, D. N., Lederer, F., Silberberg, Y.,** (2003). Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices, *Nature*, 424, 817–823.
- [3] **Lederer, F., Stegeman, G. I., Christodoulides, D. N., Assanto, G., Segev, M., Silberberg, Y.,** (2008). Discrete solitons in optics, *Physics Reports*, 463, 1-126.
- [4] **Jones, A. L.,** (1965). Coupling of optical fibers and scattering in fibers, *JOSA*, 55, 261-271.
- [5] **Somekh, S., Garmire, E., Yariv, A., Garvin, H. L., Hunsperger, R. G.,** (1973). Channel optical waveguide directional couplers, *Applied Physics Letters*, 22, 46-47.
- [6] **Joannopoulos, J. D., Villeneuve, P. R., Fan, S. H.,** (1997). Photonic crystals: putting a new twist on light, *Nature*, 386, 143-149.
- [7] **Case T.W.,** (1917). Notes on the change of resistance of certain substances in light, *Physical Review*, 9, 305–310.
- [8] **Jdidi, A., Sfina, N., Nassrallah, S. A. B., Said, M., Lazzari, J. L.,** (2011). A multi-color quantum well photodetector for mid-and long-wavelength infrared detection, *Semiconductor Science and Technology*, 26, 125019.
- [9] **Fleischer, J. W., Bartal, G., Cohen, O., Schwartz, T., Manela, O., Freedman, B., Segev, M., Buljan, H., Efremidis, N. K.,**(2005). Spatial photonics in nonlinear waveguide arrays, *Optics Express*, 13, 1780-1796.
- [10] **Kartashov, Y. V., Malomed, B. A., Torner, L.,** (2011). Solitons in nonlinear lattices, *Reviews of Modern Physics*, 83, 247-305.
- [11] **Neshev, D. N., Sukhorukov, A. A., Krolkowski, W., Kivshar, Y. S.,** (2007). Nonlinear optics and light localization in periodic photonic lattices, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 16, 1-25.
- [12] **Sukhorukov, A. A., Neshev, D. N., Kivshar, Y. S.,** (2007). Shaping and control of polychromatic light in nonlinear photonic lattices, *Optics Express*, 15, 13058-13076.

- [13] **Russell, P. S. J.**, (2003). Photonic crystal fibers, *Science*, 299, 358-362.
- [14] **Qi, X., Garanovich, I. L., Sukhorukov, A. A., Krolikowski, W., Mitchell, A., Zhang, G., Neshev, D. N., Kivshar, Y. S.**, (2010). Polychromatic solitons and symmetry breaking in curved waveguide arrays, *Optics Letters*, 35, 1371-1373.
- [15] **Szameit, A., Burghoff, J., Pertsch, T., Nolte, S., Tuennermann, A., Lederer, F.**, (2006). Two-dimensional soliton in cubic fs laser written waveguide arrays in fused silica, *Optics Express*, 14, 6055-6062.
- [16] **Yablonovitch, E.**, (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Physical Review Letters*, 58, 2059-2062.
- [17] **Kartashov, Y. V., Vysloukh, V. A., Torner, L.**, (2009). Soliton Shape and Mobility Control in Optical Lattices, *Progress in Optics*, 52, 66-148.
- [18] **Longhi, S.**, (2009). Quantum-optical analogies using photonic structures, *Laser Photonics Reviewers*, 3, 243-261.
- [19] **Jensen, S. M.**, (1982). The nonlinear coherent coupler, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 30, 1568-1571.
- [20] **Maier, A. A.**, (1982). Optical transistors and bistable devices utilizing nonlinear transmission of light in systems with unidirectional coupled waves, *Quantum Electronics*, 12, 1490-1494.
- [21] **Szameit, A., Kartashov, Y. V., Heinrich, M., Dreisow, F., Keil, R., Nolte, S., Tuennermann, A., Vysloukh, V. A., Lederer, F., Torner, L.**, (2009). Nonlinearity-induced broadening of resonances in dynamically modulated couplers, *Optics Letters*, 34, 2700-2702.
- [22] **Garanovich, I. L., Sukhorukov, A. A.**, (2007). Nonlinear directional coupler for polychromatic light, *Optics Letters*, 32, 475-477.
- [23] **Della Valle, G., Ornigotti, M., Cianci, E., Foglietti, V., Laporta, P., Longhi, S.**, (2007). Visualization of coherent destruction of tunneling in an optical double well system, *Physical Review Letters*, 98, 263601-263604.
- [24] **Yee, K.**, (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14, 302-307.
- [25] **Taflove, A.**, (2000). *The finite-difference time-domain method in Computational Electrodynamics*. Artech House.

- [26] **Berenger, J.**, (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *Journal of Computational Physics*, 114, 185-200.
- [27] **Sullivan, D. M.**, (2000). *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*. IEEE Press.
- [28] **Salh, A. S.**, Efficient Parallel Finite Difference Time Domain Algorithm for Modeling Electromagnetic Wave Interactions with Dispersive Objects, *M.Sc. thesis*, Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, (2013).
- [29] **Eng, S. C. O. M.**, An Investigation of Alternating-Direction Implicit Finite-Difference Time-Domain (ADI-FDTD) Method in Numerical Electromagnetics, *Phd thesis*, University of Hull, Hull, (2003).
- [30] **Taflove, A., Hagness, S. C.**, (2005). *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*. Artech House.
- [31] **Smith, G. D.**, (1965). *Numerical solution of partial differential equations*. Oxford University Press.
- [32] **Rayleigh, L.**, (1892). On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 34, 481-502.
- [33] **Lorentz, H. A.**, (1952). *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*. Dover Publications.
- [34] **Garnett, J. C. W.**, (1904). Colours in metal glasses and in metallic films, *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, 203, 385-420.
- [35] **Holik, S. M.**, Application of Effective Medium Theory to the Analysis of Integrated Circuit Interconnects, *Phd thesis*, University of Glasgow Glasgow, UK, (2010).
- [36] **S. M. Rytov, S. M.**, (1956). Electromagnetic properties of a finely stratified medium, *Soviet Physics JETP*, 2, 466-475.
- [37] **Bell, J. M., Derrick, G. H., McPhedran, R. C.**, (1982). Diffraction gratings in the quasistatic limit, *Optica Acta*, 29, 1475-1489.
- [38] **Yilmaz, Y. A., Tandogan, S. E., Hayran, Z., Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H.**, (2017). Theoretical and experimental investigations of efficient light coupling with spatially varied all dielectric striped waveguides, *Journal of Applied Physics*, 122, 033101.

- [39] **Yilmaz, Y. A., Hayran, Z., Yildiz, F., Kiliç, T. O., Karabacak, C., Bor, E., Kurt, H.,** (2017). Guided-mode resonance based multicolor germanium infrared photodetector, In *Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*, Copenhagen, Denmark, 24-28 July.
- [40] **Xu, Y., Lee, R. K., Yariv, A.,** (2000). Asymptotic analysis of Bragg fibers, *Optics Letters*, 25, 1756-1758.
- [41] **Tzoar, N., Pascone, R.,** (1981). Radiation loss in tapered waveguides, *JOSA*, 71, 1107-1114.
- [42] **Prather, D. W., Murakowski, J., Shi, S., Venkataraman, S., Sharkawy, A., Chen, C., Pustai, D.,** (2002). High-efficiency coupling structure for a single-line-defect photonic-crystal waveguide, *Optics Letters*, 27, 1601-1603.
- [43] **Mekis, A., Joannopoulos, J. D.,** (2001). Tapered couplers for efficient interfacing between dielectric and photonic crystal waveguides, *Journal of Lightwave Technology*, 19, 861-865.
- [44] **Lalanne, P., Talneau, A.,** (2002). Modal conversion with artificial materials for photonic-crystal waveguides, *Optics Express*, 10, 354-359.
- [45] **Palamaru, M., Lalanne, P.,** (2001). Photonic crystal waveguides: Out-of-plane losses and adiabatic modal conversion, *Applied Physics Letters*, 78, 1466-1468.
- [46] **Khoo, E., Liu, A., Wu, J.,** (2005). Nonuniform photonic crystal taper for high-efficiency mode coupling, *Optics Express*, 13, 7748-7759.
- [47] **Kurt, H., Citrin, D. S.,** (2007). Graded index photonic crystals, *Optics Express*, 15, 1240-1253.
- [48] **Kurt, H., Colak, E., Cakmak, A. O., Caglayan, H., Ozbay, E.,** (2008). The focusing effect of graded index photonic crystals, *Applied Physics Letter*, 93, 171108.
- [49] **Vasi, B., Isic, G., Gajic, R., Hingerl, K.,** (2010). Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime, *Optics Express*, 18, 20321-20333.
- [50] **Turduev, M., Oner, B. B., Giden, I. H., Kurt, H.,** (2013). Mode transformation using graded photonic crystals with axial asymmetry, *JOSA B*, 30, 1569-1579.
- [51] **Turduev, M., Giden, I. H., Kurt, H.,** (2015). Design of flat lens-like graded index medium by photonic crystals, *Optics Communications*, 339, 22-33.
- [52] **Turduev, M., Hayran, Z., Kurt, H.,** (2016). Focusing of light beyond the diffraction limit by randomly distributed graded index photonic medium, *Journal of Applied Physics*, 120, 243102.

- [53] **Kurt, H., Citrin, D. S.**, (2007). A novel optical coupler design with graded-index photonic crystals, *IEEE Photonics Technology Letters*, 19, 1532-1534.
- [54] **Levy, U., Abashin, M., Ikeda, K., Krishnamoorthy, A., Cunningham, J., Fainman, Y.**, (2007). Inhomogenous dielectric metamaterials with space-variant polarizability, *Physical Review Letters*, 98, 243901.
- [55] **Cakmak, A. O., Colak, E., Caglayan, H., Kurt, H., Ozbay, E.**, (2009). High efficiency of graded index photonic crystal as an input coupler, *Journal of Applied Physics*, 105, 103708.
- [56] **Chien, H. T., Lee, C., Chiu, H. K., Hsu, K. C., Chen, C. C., Ho, J. A. A., Chou, C.**, (2009). The comparison between the graded photonic crystal coupler and various couplers, *Journal of Lightwave Technology*, 27, 2570-2574.
- [57] **Kurt, H., Oner, B. B., Turdjev, M., Giden, I. H.**, (2012). Modified Maxwell fish-eye approach for efficient coupler design by graded photonic crystals, *Optics Express*, 20, 22018-22033.
- [58] **Grajower, M., Lerman, G. M., Goykhman, I., Desiatov, B., Yanai, A., Smith, D. R., Levy, U.**, (2013). Subwavelength plasmonics for graded-index optics on a chip, *Optics Letters*, 38, 3492-3495.
- [59] **Gabrielli, L. H., Lipson, M.**, (2011). Integrated Luneburg lens via ultra-strong index gradient on silicon, *Optics Express*, 19, 20122-20127.
- [60] **Di Falco, A., Kehr, S. C., Leonhardt, U.**, (2011). Luneburg lens in silicon photonics, *Optics Express*, 19, 5156-5162.
- [61] **Choy, T. C.**, (2015). *Effective Medium Theory: Principles and Applications*. Oxford University Press.
- [62] **Melkonyan, H., Dahlem, M. S.**, (2012). GRIN-like Dielectric Slab Lens Through Effective Index Engineering, in *Photonics Global Conference*, Singapore, Singapore, 13-16 December.
- [63] **Oskooi, A. F., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J. D., Johnson, S.G.**, (2010). MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, *Computer Physics Communications*, 181, 687-702.
- [64] **Saleh, B. E. A., Teich, M. C.**, (2007). *Fundamentals of Photonics*. Wiley.
- [65] **Happ, T. D., Kamp, M., Forchel, A.**, (2001). Photonic crystal tapers for ultra compact mode conversion, *Optics Letters*, 26, 1102-1104.

- [66] **Talneau, A., Lalanne, P., Agio, M., Soukoulis, C. M.**, (2002). Low-reflection photonic-crystal taper for efficient coupling between guide sections of arbitrary widths, *Optics Letters*, 27, 1522-1524.
- [67] **Orobtchouk, R., Layadi, A., Gualous, H., Pascal, D., Koster, A., Laval, S.**, (2000). High-efficiency light coupling in a submicrometric silicon-on-insulator waveguide, *Applied Optics*, 39, 5773-5777.
- [68] **Lardenois, S., Pascal, D., Vivien, L., Cassan, E., Laval, S., Orobtchouk, R., Heitzmann, M., Bouzaida, N., Mollard, L.**, (2003). Low-loss submicrometer silicon-on-insulator rib waveguides and corner mirrors, *Optics Letters*, 28, 1150-1152.
- [69] **Kotlyar, M. I., Triandaphilov, Y. R., Kovalev, A., Soifer, V., Kotlyar, M. V., O'Faolain, L.**, (2009). Photonic crystal lens for coupling two waveguides, *Applied Optics*, 48, 3722-3730.
- [70] **Chien, H., Chen, C. C.**, (2006). Focusing of electromagnetic waves by periodic arrays of air holes with gradually varying radii, *Optics Express*, 14, 10759-10764.
- [71] **Yogesh, N., Subramanian, V.**, (2012). Spatial beam compression and effective beam injection using triangular gradient index profile photonic crystals, *Progress In Electromagnetics Research*, 129, 51-67.
- [72] **Bahari, B., Abrishamian, M. S.**, (2013). Gaussian beam-to-slab waveguide coupler by graded index photonic crystal lens, *Journal of Optics*, 15, 125502.
- [73] **Lu, Z., Murakowski, J. A., Schuetz, C. A., Shi, S., Schneider, G. J., Prather, D. W.**, (2005). Three-dimensional subwavelength imaging by a photonic-crystal flat lens using negative refraction at microwave frequencies, *Physical Review Letters*, 95, 2.
- [74] **Konstantatos, G., Sargent, E. H.**, (2010). Nanostructured materials for photon detection, *Nature Nanotechnology*, 5, 391-400.
- [75] **Wu, T., Chou, C., Lee, M. M., Na, N.**, (2012). A critically coupled germanium photodetector under vertical illumination, *Optics Express*, 20, 29338-29346.
- [76] **Memnon, L., Yang, H., Cho, S. J., Mikael, S., Ma, Z., Reuterskiöld-Hedlund, C., Hammar, M., Zhou, W.**, (2016). Heterogeneously integrated InGaAs and Si membrane four-color photodetector arrays, *IEEE Photonics Journal*, 8, 1-7.

- [77] **Liang, Q., Wang, T., Lu, Z., Fu, Y., Yu, W.,** (2013). Metamaterial-based two dimensional plasmonic subwavelength structures offer the broadest waveband light harvesting, *Advanced Optical Materials*, 1, 43-49.
- [78] **Triggs, G. J., Wang, Y., Reardon, C. P., Fischer, M., Evans, G. J. O., Krauss, T. F.,** (2017). Chirped guided-mode resonance biosensor, *Optica*, 4, 229-234.
- [URL-1] <http://fdtd.wikispaces.com/The+Yee+Cell> alındığı tarih: 10.11.2017
- [URL-2] <http://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/> alındığı tarih: 10.04.2017





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yusuf Abdulaziz YILMAZ
Uyruđu : T.C.
Dođum Tarihi ve Yeri : 07.05.1994 - KIRIKKALE
E-posta : yayilmaz@etu.edu.tr

ÖĐRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-2017	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Burslu Y. Lisans Öğrencisi

YABANCI DİL: İngilizce, Almanca

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yilmaz, Y. A.**, Tandogan, S. E., Hayran, Z., Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H., 2017. Theoretical and experimental investigations of efficient light coupling with spatially varied all dielectric striped waveguides, *Journal of Applied Physics*, 122(3), 033101.
- **Yilmaz, Y. A.**, Hayran, Z., Yildiz, F., Kiliñç, T. O., Karabacak, C., Bor, E., Kurt, H., 2017. Guided-mode resonance based multicolor germanium infrared photodetector, In Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), July 24-28, Copenhagen, Denmark.