

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK DERECELİ DÖNEL SİMETRİYE SAHİP İKİ-BOYUTLU FOTONİK
KRİSTAL YAPILARININ SAĞLADIĞI OPTİK FENOMENLER VE
NANOFOTONİK ALANINDAKİ UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Utku Görkem YASA

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT

MART 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilim dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151211050 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Utku Görkem YASA**'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**DÜŞÜK DERECELİ DÖNEL SİMETRİYE SAHİP İKİ-BOYUTLU FOTONİK KRİSTAL YAPILARININ SAĞLADIĞI OPTİK FENOMENLER VE NANOFOTONİK ALANINDAKİ UYGULAMALARI**" başlıklı tezi **29.03.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Gönül TURHAN SAYAN (Başkan)**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
TOBB Ekonomi ve Teknoloji 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.

Utku Görkem YASA

ÖZET

Yüksek Lisans

DÜŞÜK DERECELİ DÖNEL SİMETRİYE SAHİP İKİ-BOYUTLU FOTONİK KRİSTAL YAPILARININ SAĞLADIĞI OPTİK FENOMENLER VE NANOFOTONİK ALANINDAKİ UYGULAMALARI

Utku Görkem YASA

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

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Tarih: Mart 2018

Literatürde çalışılan iki-boyutlu fotonik kristal yapılarının çoğunluğu, dairesel dielektrik çubuk veya dairesel hava deliklerinden oluşan yüksek dönel simetrik birim hücrelerden meydana gelmektedir. İki-boyutlu fotonik kristallerin birim hücrelerine ilave bileşenlerin eklenmesi ya da mevcut dairesel bileşenlerin şekillerinin değiştirilmesi ile birim hücrelerin dönel simetrisinde azalmaya gidilebilmektedir. Düşük dönel simetri sonucu ortaya çıkan yapıca zengin birim hücreler, alışılmışın dışında optik özellikleri de beraberinde getirmektedir.

Bu tezde, düşük dönel simetrik fotonik kristallerin zengin dispersiyon özelliklerinden faydalanılarak elde edilen yeni optik fenomenler ve fotonik aygıt tasarımları sunulmuştur. Ele alınan tasarımların frekans ve zaman alanındaki analizlerinde sırasıyla “düzlem dalga açılımı” ve “zaman alanında sonlu farklar” yöntemleri kullanılmıştır.

Çalışmalardan biri, C_2 simetrik hava deliklerinden oluşan fotonik kristallerin sahip olduğu polarizasyona duyarlı öz-kolimasyon fenomeni ile tasarlanan polarizasyon

ayırıcılarıdır. Önerilen polarizasyon ayırıcı aygıtlar farklı birim hücre türleri ile analiz edilmiştir. Ayrıca tamamen yeni bir konseptte dayanmaktadır ve yüksek polarizasyon sönüm oranına sahiptir. Yaklaşık $46.4 \mu\text{m} \times 12.4 \mu\text{m}$ boyutlarında olan tasarım, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ merkez dalga boyunda çıkış kanallarında 26 dB (TE) ve 22 dB (TM) gibi yüksek polarizasyon sönüm oranlarına erişmiştir. Buna ek olarak, tasarlanan yapının çalışma bant genişliği 59 nm olarak ölçülmüştür.

Diğer bir çalışma, Dirac-benzeri konik dispersiyon gösteren fotonik kristallerin birim hücrelerinde dönel simetri düşümü sağlanarak elde edilen anizotropik sıfır kırıcılık indisli ortamların numerik ve deneysel analizini kapsamaktadır. C_2 simetrik fotonik kristallerin Brillouin bölgesi merkezinde iki adet Bloch modunun kesişimi yarım-Dirac konik dispersiyonuna neden olmaktadır. Önerilen fotonik kristaller bir iletim yönü için empedans uyumlu sıfır kırıcılık indisi ($\epsilon^{\text{eff}} \approx 0, \mu^{\text{eff}} \approx 0$) gösterirken, bu yöne dik doğrultu için empedans uyumsuz sıfır kırıcılık indisi ($\epsilon^{\text{eff}} \approx 0, \mu^{\text{eff}} \neq 0$) davranışı sergilemektedir. Malzemenin bu özelliklerini doğrulamak amacıyla uygun bir etkin ortam teorisi de kullanılmıştır. Frekans ve zaman alanında yapılan numerik analizler ile yarım-Dirac konik dispersiyon gösteren fotonik kristallerin, Dirac-benzeri konik dispersiyon gösteren eşdeğerlerine karşı avantajları belirtilmiştir. Önerilen fotonik kristallerin anizotropik özellikleri kullanılarak ışın demeti saptırıcı, ışın demeti ayırıcı ve odaklayıcı lens tasarımları sunulmuştur.

Tezde yer alan son çalışmada ise C_1 simetrik birim hücreler ile tasarlanan fotonik kristal dalga kılavuzlarının kılavuzlanmış modlarının, birim hücre oryantasyonuna bağlı olarak kontrolü araştırılmıştır. Dalga kılavuzlarının içerdiği hava kusuru boyunca sıralanan C_1 simetrik birim hücrelerin geometrik özellikleri kontrol edilerek, dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen dalgaların fazları etkin olarak kontrol edilebilmektedir. Çalışmada, bu dalga kılavuzları ile tasarlanan Mach-Zehnder interferometreleri kullanılarak dalga boyu seçici iletim, gaz sensörü ve mod dönüştürücü gibi uygulamaların frekans ve zaman alanında analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristaller, Dönel simetri, Düşük dönel simetri, Polarizasyon ayırıcılar, Sıfır kırıcılık indisi, Anizotropi, Dalga kılavuzları, Mach-Zehnder interferometreleri, Optik sensörler, Mod dönüştürücüler.

ABSTRACT

Master of Science

THE OPTICAL PHENOMENA AND NANOPHOTONIC APPLICATIONS
PROVIDED BY PHOTONIC CRYSTALS HAVING LOW ROTATIONAL
SYMMETRY

Utku Görkem YASA

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

Supervisor: Prof. Dr. Hamza KURT

Date: March 2018

Most of the two-dimensional photonic crystals that are studied in the literature are based on the high rotational symmetric unit cells consisting of circular dielectric rods or circular air-holes. Inclusion of additional dielectric elements or modifying the shapes of existing circular elements gives rise to a reduction on the rotational symmetry order of two-dimensional photonic crystals' unit cells. Low rotational symmetric unit cells involve structural variety and pave the way for extraordinary optical properties.

In this thesis, novel optical phenomena and photonic device designs, which are achieved by utilizing various dispersion properties of low rotational symmetric unit cells, were presented. The proposed concepts were investigated in both frequency and time domains by exploiting “plane wave expansion” and “finite-difference time-domain” methods, respectively.

One of the studies is about the polarization beam splitters that use polarization-sensitive self-collimation phenomenon of photonic crystals consisting of C_2 symmetric air holes. The proposed polarization beam splitters were investigated with

different unit cell configurations. In addition, presented devices are novel and have high polarization extinction ratios. The device, which is $46.4 \mu\text{m} \times 12.4 \mu\text{m}$ in size, has maximum polarization extinction ratios of 26 dB (TE) and 22 dB (TM) at $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Operational bandwidth of the device was measured to be 59 nm.

Another study is about the numerical and experimental analyses of anisotropic zero-refractive-index materials that were achieved by performing a rotational symmetry reduction on the unit cells of photonic crystals exhibiting Dirac-like cone dispersion. Accidental degeneracy of two Bloch modes in the Brillouin zone center of C_2 symmetric photonic crystals gives rise to the semi-Dirac cone dispersion. The proposed photonic crystals expose impedance-matched zero-refractive-index feature ($\epsilon^{\text{eff}} \approx 0, \mu^{\text{eff}} \approx 0$) for one propagation direction and impedance-unmatched zero-refractive-index behavior ($\epsilon^{\text{eff}} \approx 0, \mu^{\text{eff}} \neq 0$) along transverse direction. A proper effective medium approach was utilized to verify proposed material's properties. The advantages of photonic crystals exhibiting semi-Dirac cone dispersion over periodic structures showing Dirac-like cone dispersion were stated in both frequency and time domains for photonic applications. By using anisotropic behavior of the proposed photonic crystals, photonic designs such as beam deflectors, beam splitters, and focusing lenses were proposed.

In the last study, controlling the guided modes of waveguides, which consist of C_1 symmetric unit cells, were investigated depending on the unit cell rotation. By controlling the geometrical properties of C_1 symmetric unit cells lying along the air-defect, adjustable phase properties of guided electromagnetic waves were achieved. Using this property, Mach-Zehnder interferometers based photonic applications such as wavelength-selective transmission, gas sensing, and mode converters were investigated in frequency and time domains.

Keywords: Photonic crystals, Rotational symmetry, Low rotational symmetry, Polarization beam splitters, Zero-refractive-index, Anisotropy, Waveguides, Mach-Zehnder interferometers, Optical sensors, Mode converters.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, yüksek lisans çalışmalarım boyunca tecrübesi, vizyonu ve anlayışıyla bana yol gösteren ve bu süreç boyunca değerli katkı ve emekleriyle verimli bir lisansüstü eğitimi geçirmemi sağlayan Prof. Dr. Hamza KURT'a teşekkür ederim.

Araştırmalarım boyunca karşılıklı fikir alışverişinde bulunduğumuz bütün laboratuvar arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu sürecin başında tecrübelerinden faydalandığım Yrd. Doç. Dr. Mirbek TURDUEV, Dr. İbrahim Halil GİDEN, Dr. Neslihan ETİ ve Zeki HAYRAN'a destek ve ilgilerinden dolayı teşekkürü borç bilirim.

Eğitim ve öğrenim hayatım boyunca beni koşulsuz şekilde destekleyen ve her türlü imkânı sunan aile bireylerine başta annem Demet YASA ve babam Nihat YASA olmak üzere şükranlarımı sunarım. Yüksek lisans eğitimim sırasında yitirdiğimiz dedem Mehmet Ali KÜSMEZ'i de özlemle anmak istiyorum.

Tanıştığımız günden bu yana, iyi ve kötü günlerimde yanımda olan çok değerli Birce KARAÜZÜM'e derin sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkür ederim. Destekleri ve sağladığı burs nedeniyle TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim. Ayrıca TÜBİTAK'a 115R036 numaralı "Düşük Simetriye Sahip Periyodik ve Kuvazi-Periyodik Fotonik Yapıların Nümerik Ve Deneysel Analizi" başlıklı proje kapsamında verdiği destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Periyodiklik Özelliklerine Göre Fotonik Kristal Türleri.....	2
1.2 İki-Boyutlu Fotonik Kristallerde Birim Hücre Tanımı ve Örgü Türleri	4
1.3 İki-Boyutlu Fotonik Kristallerde Simetri Operasyonları	6
2. FOTONİK KRİSTALLERDE DÜŞÜK DÖNEL SİMETRİ	9
3. DÜŞÜK DÖNEL SİMETRİK FOTONİK KRİSTALLER TABANLI YENİ FOTONİK AYGITLAR VE OPTİK FENOMENLER	15
3.1 Yüksek Polarizasyon Sönüm Oranına Sahip Polarizasyon Ayırıcılar	15
3.1.1 Giriş.....	15
3.1.2 Frekans ve zaman alanı analizleri	16
3.1.3 Sonuçlar	32
3.2 Sıfır Kırıcılık İndisli Anizotropik Ortamlar	33
3.2.1 Giriş.....	33
3.2.2 Frekans ve zaman alanı analizleri	35
3.2.3 Mikrodalga bölgesinde deneysel doğrulama.....	46
3.2.4 Sonuçlar	48
3.3 İnterferometrik Aygıt Tasarımları	49
3.3.1 Giriş.....	49
3.3.2 Frekans ve zaman alanı analizleri	50
3.3.3 Sonuçlar	61
4. SONUÇLAR	63
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1:	Periyodiklik özelliklerine göre FK türleri: (a) bir-boyutlu, (b) iki-boyutlu ve (c) üç-boyutlu FK'lar.....	3
Şekil 1.2:	Dielektrik konfigürasyonlarına göre iki-boyutlu FK'lar: (a) çubuk tipi ve (b) hava deliği tipi FK'lar.....	4
Şekil 1.3:	Kare örgülü bir FK'nın birim hücre gösterimi.....	5
Şekil 1.4:	Örgü türlerine göre (a) kare örgülü ve (b) altıgen örgülü FK'lar.	6
Şekil 1.5:	İki-boyutlu ve kare örgülü FK üzerinde tanımlanan ayna simetrisi ve dönel simetri operasyonları.....	7
Şekil 2.1:	İki-boyutlu ve kare örgülü FK yapısına ait (a) C_1 , (b) C_2 , (c) C_3 ve (d) C_4 simetrik birim hücre örnekleri.....	10
Şekil 2.2:	C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 dönel simetrisine sahip birim hücre yapıları ile oluşturulan iki-boyutlu ve kare örgülü FK yapıları. Periyodik ortam içerisindeki birim hücreler çerçeve içine alınarak gösterilmiştir.....	10
Şekil 2.3:	C_2 simetrik örnek bir birim hücrenin farklı açısız yönelimleri ve karşılık gelen TM polarizasyon 2.bant EFE'leri.....	12
Şekil 2.4:	C_2 simetrik birim hücrenin farklı oryantasyonlarına göre öz-kolimasyon fenomeninde meydana gelen yönsel değişim.....	12
Şekil 3.1:	Dikdörtgen hava deliklerinin iki-boyutlu kare örgüsü. (b) Birim hücrenin geometrik temsili. (c) TM ve (d) TE polarizasyonlara karşılık gelen 2. bant EFE görüntüleri.....	17
Şekil 3.2:	Farklı θ değerleri için $a/\lambda = 0.300$ normalize frekansında (a) TM ve (b) TE polarizasyon EFE'lerinin değişimi. (c) Tasarlanan FK'nın her iki polarizasyon için bant yapısı. (d) $\theta = 45^\circ$ için her iki polarizasyona karşılık gelen iletim grafiği.....	19
Şekil 3.3:	$a/\lambda = 0.295$ normalize frekansında, $\theta = 45^\circ$ için (a) TE ve (b) TM polarizasyonların elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin dağılımı.....	20
Şekil 3.4:	Birim hücre oryantasyonuna bağılı olarak, $a/\lambda = 0.300$ normalize frekansına karşılık gelen TM ve TE polarizasyon EFE'lerinin eğim miktarlarındaki (β_{TM} , β_{TE}) değişim.....	21
Şekil 3.5:	$a/\lambda = 0.295$ normalize frekansında (a) TE ve (b) TM polarizasyonlara karşılık gelen alan yoğunluğu dağılımları. Yapının çıkışındaki alan yoğunluğunun frekansa bağılı konumsal değişiminin (c) TE ve (d) TM polarizasyonlar için gösterimi.....	22
Şekil 3.6:	(a) Aygıtın çalışma prensibi ve giriş-çıkış portları. CH1 ve CH2 çıkış portlarındaki (b) iletim verimliliği ve (c) polarizasyon sönüm oranı grafikleri.....	23

Şekil 3.7:	(a) FK'nın birim hücre görünümü. Verilen birim hücre için (b) TM ve (c) TE polarizasyon 2. bant EFE grafikleri. (d) Birim hücrenin $\theta = 45^\circ$ için görünümü. Verilen birim hücre için (e) TM ve (f) TE polarizasyon 2. bant EFE grafikleri.....	26
Şekil 3.8:	Eliptik hava deliklerinden oluşan FK'nın, $a/\lambda=0.265$ normalize frekansında (a) TE ve (b) TM polarizasyon alan yoğunluğu dağılımları. (c) Aygıtın CH1 ve CH2 çıkış kanalları ile birlikte üç-boyutlu gösterimi.....	28
Şekil 3.9:	C_2 simetrik hava delikleri içeren farklı birim hücre türleri: (a) U1, (b) U2, (c) U3 ve (d) U4. Verilen birim hücre yapıları ile tasarlanan aygıtın (e) CH1 ve (f) CH2 çıkış kanallarındaki polarizasyon sönüm oranları.....	29
Şekil 3.10:	(a) CH1 ve CH2 çıkış portlarındaki polarizasyon sönüm oranının açısal yönelime göre değişimi. $\theta = 45^\circ$ için, U3 numaralı birim hücreye karşılık gelen (b) TM ve (c) TE polarizasyon 2. bant EFE'leri.....	31
Şekil 3.11:	U3 numaralı birim hücreden oluşan polarizasyon ayırıcının $\lambda = 1550$ nm'de (a) TE ve (b) TM polarizasyon alan yoğunlukları. (c) TE ve (d) TM polarizasyon alan yoğunluklarının çıkış pozisyonlarının dalga boyuna göre değişimi.....	32
Şekil 3.12:	DBK özelliği gösteren C_4 simetrik (a) birim hücre ve (b) ilgili fotonik bant yapısı. (c) DBK'nın yakınlaştırılmış görüntüsü. (d) YDK özelliği gösteren C_2 simetrik (d) birim hücre ve (e) ilgili fotonik bant yapısı. (f) YDK'nın yakınlaştırılmış görüntüsü.....	36
Şekil 3.13:	(a) C_4 simetrik ve (b) C_2 simetrik FK'lara ait elektrik alan profilleri. (c) YDK noktası komşuluğunda ($a/\lambda = 0.569$) ve (d) $a/\lambda = 0.602$ 'de çalışan 4 adet asimetrik dağıtılmış nokta kaynak ile uyarılan C_2 simetrik FK yapısının faz dağılımı.....	38
Şekil 3.14:	(a) DBK ve (b) YDK içeren FK'lar için Γ_X ve Γ_Y doğrultuları boyunca frekansa bağlı etkin ortam parametreleri. (c) C_2 simetrik birim hücrelerin farklı boyutlarına göre YDK noktasının değişimi.....	42
Şekil 3.15:	YDK içeren C_2 simetrik FK yapıları ile fotonik aygıt uygulamaları: (a) dalga yönü değiştirme, (b) dalga bölücü ve (c) odaklayıcı lens.....	44
Şekil 3.16:	YDK'lı ve dikdörtgen örgülü FK'nın (a) birim hücre gösterimi, (b) ilgili fotonik bant diyagramı ve (c) Γ_X ve Γ_Y yönleri boyunca hesaplanan frekansa bağlı etkin ortam parametreleri....	45
Şekil 3.17:	(a) Alümina çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü FK yapısının birim hücre yapısı ve inşa edilen FK'nın farklı cephelerden fotoğrafları. (b) Mikrodalga deney düzeneğinin temsili gösterimi.....	46
Şekil 3.18:	FK'nın YDK frekansının altında (11.7 GHz) (a) simülasyon ve (b) deneyden elde edilen elektrik alan profilleri. FK'nın YDK frekansında (12.1 GHz) (c) simülasyon ve (d) deneyden elde edilen elektrik alan profilleri. FK'nın YDK frekansının üzerinde (12.9 GHz) (e) simülasyon ve (f) deneyden elde edilen elektrik alan profilleri.....	48

Şekil 3.19:	(a) Yüksek döneel simetrik ve (b) C_1 simetrik birim hücre yapıları. (c) Yüksel döneel simetrik ve (d) C_1 simetrik birim hücrelerin ΓX simetri eksenini boyunca fotonik bant diyagramları.....	50
Şekil 3.20:	(a) Hava kusuru boyunca C_1 simetrik birim hücrelerden meydana gelen FK dalga kılavuzu. Birim hücre oryantasyonuna bağılı olarak, dalga kılavuzuna ait TM_0 modlarının (b) dispersiyon eğrileri ve (c) faz kırıcılık indisleri.....	52
Şekil 3.21:	(a) Tasarlanan FK tabanlı MZI aygıtı. (b), (c) Üst kanaldaki C_1 simetrik birim hücrelerin farklı θ değerleri için yapı çıkışındaki iletim verimliliği.....	53
Şekil 3.22:	MZI aygıtının verilen oryantasyon açıları için (a) $\lambda = 1418$ nm, (b) $\lambda = 1419$ nm, (c) $\lambda = 1460$ nm ve (d) $\lambda = 1461$ nm dalga boylarındaki TM polarizasyon elektrik alan görüntüleri.....	54
Şekil 3.23:	(a) Üç kanallı interferometrik konfigürasyon. (b), (c) Verilen yapının iletim spektrumunun, alt kanaldaki birim hücrelerin oryantasyonuna göre değişimi.....	55
Şekil 3.24:	Tasarlanan MZI aygıtının kullandığı gaz algılama düzeneği. n_{ortam} , gaz haznesinin içindeki kırıcılık indisini temsil etmektedir.....	57
Şekil 3.25:	Sensörün, bulunduğu ortamın farklı kırıcılık indisleri altındaki spektral tepkisi: C_1 simetrik birim hücrelerin açısall yönelimlerinin (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 30^\circ$, (c) $\theta = 60^\circ$ ve (d) $\theta = 90^\circ$ olduğu durumlar.....	58
Şekil 3.26:	(a) C_1 simetrik birim hücreler ile tasarlanan FK tabanlı mod dönüştürücü. (b) Verilen mod dönüştürücü aygıtın ilgili dalga kılavuzlarına karşılık gelen TM_0 ve TM_1 kılavuzlanmış mod dispersiyon eğrileri.....	59
Şekil 3.27:	(a) $\lambda = 1255$ nm, (b) $\lambda = 1285$ nm ve (c) $\lambda = 1315$ nm dalga boylarında uyarılan mod dönüştürücünün TM polarizasyon elektrik alan profilleri.....	60

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : FK'ların $\lambda = 1550$ nm'de performans değerleri..... 30



KISALTMALAR

DBK	: Dirac-benzeri Konik Dispersiyon
EFE	: Eş-frekans Eğrisi
EMNZ	: Epsilon-mu-near-zero
ENZ	: Epsilon-near-zero
FDTD	: Zaman-alanında Sonlu-farklar (Finite-difference time-domain)
FED	: Fotonik Entegre Devre
FK	: Fotonik Kristal
FWHM	: Yarı Doruk Genişliği (Full width at half maximum)
FYB	: Fotonik Yasaklı Bant Aralığı
MNZ	: Mu-near-zero
MZI	: Mach-Zehnder İnterferometresi
PML	: Mükemmel Uyumlu Tabaka (Perfectly matched layer)
PWE	: Düzlem Dalga Açılımı (Plane wave expansion)
RIU	: Kırıcılık İndisi Birimi (Refractive index unit)
TE	: Enine-elektrik (Transverse-electric)
TM	: Enine-manyetik (Transverse-magnetic)
YDK	: Yarım-Dirac Konik Dispersiyon

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
ε	Elektriksel geçirgenlik
ε^{eff}	Etkin elektriksel geçirgenlik
μ	Manyetik geçirgenlik
μ^{eff}	Etkin manyetik geçirgenlik
λ	Dalga boyu
θ	Birim hücre açısal yönelimi
Γ	Brillouin bölgesi yüksek simetri noktası
X	Brillouin bölgesi yüksek simetri noktası
Y	Brillouin bölgesi yüksek simetri noktası
σ	Ayna simetrisi operasyonu
C_r	Dönel simetri derecesi
φ	Dalga fazı
$\Delta\varphi$	Dalga faz farkı
v_p	Dalga faz hızı
v_g	Dalga grup hızı
E_x	Elektrik alanın x yönündeki bileşeni
E_y	Elektrik alanın y yönündeki bileşeni
E_z	Elektrik alanın z yönündeki bileşeni
H_x	Manyetik alanın x yönündeki bileşeni
H_y	Manyetik alanın y yönündeki bileşeni
H_z	Manyetik alanın z yönündeki bileşeni
Λ	Kırıcılık indisi değişim periyodu
F_a	Hava doluluk oranı
a	Örgü sabiti
k	Dalga vektörü
n	Kırıcılık indisi
a_1	Örgü vektörü
a_2	Örgü vektörü
ω	Açısal frekans
f	Frekans

1. GİRİŞ

Maddenin ve fiziksel olayların derininde yatan nedenleri sorgulamak, onları kavramak ve fiziksel olgulara arzu edilen şekilde hükmetmek, insanoğlunun geçmişten beri süregelen hedefleri arasındadır. Bu hedeflerin unsurlarından biri olan ve geçmişten beri insanlığın temel ihtiyaçlarını karşılayan ışık, daha da genel tanımıyla elektromanyetik dalgalar, günümüz teknolojisinde fotonların nanometre veya mikrometre ölçeğinde kontrol edilebilir hale gelmesiyle yeni bir boyut kazanmıştır. Fotonların optik sinyal işleme, kızılötesi algılama veya anlamlı veri transferi gibi gayeler doğrultusunda üretilip, etkin olarak kontrol edilmesini hedefleyen araştırma alanına fotonik adı verilir. Fotonik entegre devre (FED) teknolojisi, elektronik entegre devrelerde faydalanılan elektronların yerine fotonların bilinçli kontrolü ile optik uygulamaların operasyonunu sağlamaktadır. FED teknolojisinin en temel amacı, tasarlanan fotonik devre elemanları ile yüksek hızlı veri iletimi veya optik bilgi işlemenin mikrometre veya nanometre ölçeğinde gerçekleştirilmesidir. Lazerin 1960'ların başında Maimann [1] tarafından dünyaya tanıtılmasıyla gelişimi ivmelenen optik teknolojisi, günümüzde tasarlanan fotonik devre elemanlarının bir yandan daha küçük hale getirilmesini gerektirirken, aynı zamanda dizayn edilen fotonik aygıtların daha da verimli çalışmasını zorunlu kılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda üretilen mikrometre ve hatta nanometre boyutlarındaki metamalzemeler, metayüzeyler ve fotonik kristaller (FK) gibi suni ortamların fotonların akışı üzerindeki hükmetme yetileri, bu materyalleri fotonik alanındaki önemli unsurlardan birisi kılmıştır. Sağladıkları olağandışı optik özellikler nedeniyle FK'lar, bahsi geçen mikro yapıların temel üyelerinden biri haline gelmiştir.

FK'lar, kırıcılık indisinin bir-boyutlu, iki-boyutlu veya üç-boyutlu eksenlerdeki periyodik modülasyonundan meydana gelen optik malzemelerdir. Bu materyaller doğada mevcut oldukları gibi insanlar tarafından suni olarak da üretilebilirler. FK konsepti, 1987 yılında Eli Yablonovitch ve Sajeev John'un bağımsız çalışmaları ile

literatüre giriş yapmıştır [2, 3]. Yablonoitch'in çalışmasına göre eğer üç-boyutlu bir periyodik dielektrik yapı, elektronik bant sınırları ile örtüşen bir fotonik yasaklı bant aralığına (FYB) sahip ise atomların kendiliğinden ışıması engellenmektedir [2]. John ise yeterli dielektrik kontrastına sahip olan ve itinayla hazırlanmış düzensiz dielektrik örgülerde kuvvetli bir Anderson yerelleşmesinin meydana geldiğini rapor etmiştir [3]. Yablonoitch ve John'un öncü olarak tanımlanabilecek bu çalışmalarından yola çıkan birçok araştırmacı, FK'ların fotonlar üzerindeki olağandışı hakimiyetini keşfetmeye başlamış ve çeşitli uygulama konseptleri öne sürmüştür. FK'ların benzersiz özelliklerinden birisi FYB'ye sahip olmalarıdır. Araştırmacılar, Yablonoitch ve John'un öncü çalışmalarından itibaren 1990'ların başına kadar bant yapılarında FYB içeren FK'ların tasarımı, üretimi ve kullanışlı uygulamaları üzerine yoğunlaşmıştır. FYB'ler, fotonik bant yapılarında foton yoğunluğunun sıfır olduğu frekans aralıklarını ifade etmektedir. Yani, salınım frekansı FYB'de yer alan elektromanyetik dalgalar FK'lar içerisine nüfuz edemeyecek ve ayna görevi gören FK yüzeyinden tamamen geri yansiyacaktır. Bu fenomenin nedeni, yapı içerisindeki dalga yayılımını karşılayacak bir Bloch modunun mevcut olmamasıdır. Bu önemli olgunun ortaya çıkışıyla, elektromanyetik dalgaları istenen şekilde kontrol etmek yolunda yeni bir aşama kaydedilmiş ve FYB özelliğinden faydalanılarak FK tabanlı dalga kılavuzları [4], optik kaviteler [5] ve fiberler [6] tasarlanmıştır.

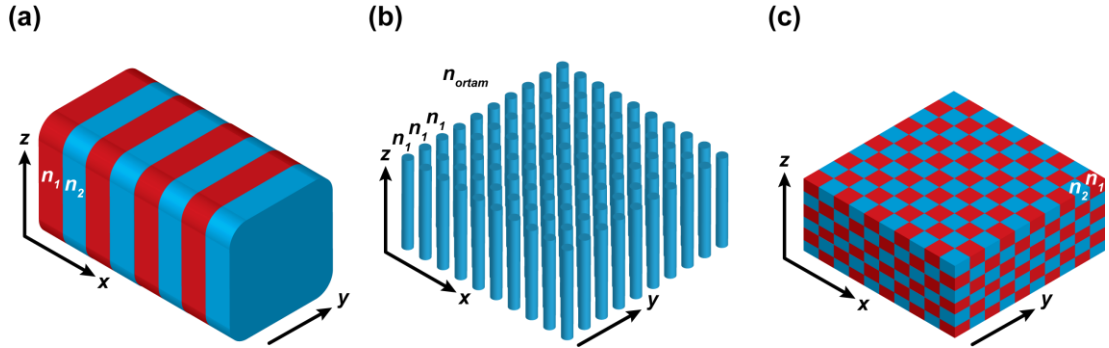
Bununla birlikte 1990'ların ikinci yarısından itibaren FK'ların sadece FYB'lerden ibaret olmadığı ve daha birçok optik zenginlik içerdiği zamanla keşfedilmiştir. Sağladıkları sıra dışı dispersiyon özellikleri sayesinde öz-kolimasyon [7], süper-prizma [8], negatif kırıcılık indisi [9], sıfır kırıcılık indisi [10], dalga boyu ayırıcı [11] ve polarizasyon ayırıcı [12] gibi birçok optik olgunun ve fotonik aygıtın FK'lar vasıtasıyla gerçekleştirilebileceği fark edilmiştir.

Bu tezin ilerleyen aşamalarında yoğun olarak değinilecek olan bazı FK özelliklerini aktarmakta fayda vardır.

1.1 Periyodiklik Özelliklerine Göre Fotonik Kristal Türleri

FK'ları meydana getiren dielektrik bileşenlerin kırıcılık indislerinin uzayda dağılımı periyodik bir karakteristik gösterir. FK'lar temsil ettikleri periyodikliğe göre bir-

boyutlu, iki-boyutlu ve üç-boyutlu olmak üzere üç temel başlık altında değerlendirilmektedir. FK yapılarının periyodiklik doğrultularına göre temsili gösterimleri Şekil 1.1’de verilmiştir.

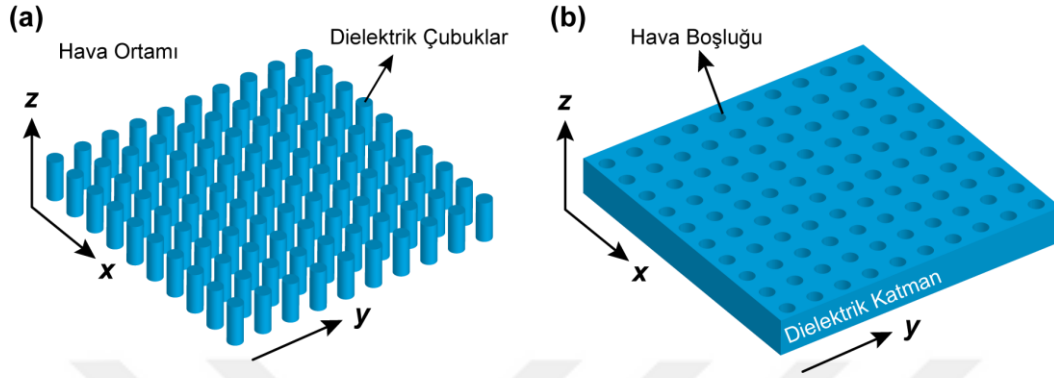


Şekil 1.1 : Periyodiklik özelliklerine göre FK türleri: (a) bir-boyutlu, (b) iki-boyutlu ve (c) üç-boyutlu FK'lar.

Bir-boyutlu FK'lar, Şekil 1.1(a)'da görülebileceği üzere sadece tek bir yön doğrultusunda kırıcılık indisi değişimi göstermektedir. Verilen şekildeki FK incelendiğinde, farklı renklerle temsil edilen n_1 ve n_2 kırıcılık indislerine sahip dielektrik katmanların sadece x ekseninde doğrultusunda değişim gösterdiği gözlenmektedir. Bu tarz periyodik ortamlar, genelde yüksek kırıcılık indisli dielektrik katmanların, düşük kırıcılık indisli eş değerleri ile tek eksen boyunca art arda hizalanmalarından meydana gelmektedir. Kırıcılık indisi modülasyonunun sadece tek eksen boyunca mevcut olmasından dolayı bir-boyutlu FK'lar, fotonların kontrolünü ve FYB'leri bütün yönler boyunca sağlayamamaktadır. Bir-boyutlu FK'ların optik özelliklerini belirleyen 3 temel etmen şunlardır: 1) dielektrik katmanların kalınlıkları, 2) kırıcılık indisinin modülasyon periyodu ve 3) katmanlar arasındaki kırıcılık indisi kontrastı.

İki-boyutlu FK'lar, birbirinden bağımsız iki eksen boyunca kırıcılık indisinin modülasyonunu içermektedir. Şekil 1.1(b)'de bir örneği verilen iki-boyutlu FK yapısı incelendiğinde dielektrik çubukların x ve y eksenlerinde doğrultusunda dizilim gösterdiği ancak z ekseninde homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu periyodik ortamların optik özelliklerinden çoğu zaman modülasyon gösterdikleri eksenler doğrultusunda faydalanılmaktadır. İki-boyutlu FK'lar genel olarak iki tür konfigürasyondan oluşmaktadır. Bunlardan ilki dielektrik çubukların serbest uzaydaki periyodik düzenini tanımlayan “çubuk tipi” FK yapısıdır. Diğer

konfigürasyon ise dielektrik bir malzemenin üzerine hava deliklerinin periyodik olarak açılması ile meydana getirilen “hava deliği tipi” FK yapısıdır. Çubuk tipi ve hava deliği tipi FK yapılarına ait temsili gösterimler Şekiller 1.2(a) ve 1.2(b)’de sırasıyla sunulmuştur.



Şekil 1.2 : Dielektrik konfigürasyonlarına göre iki-boyutlu FK'lar: (a) çubuk tipi ve (b) hava deliği tipi FK'lar.

İki-boyutlu FK'ların, kırıcılık indisi modülasyonu göstermedikleri eksen boyunca sonlu bir yapı göstermeleri neticesinde FK levhaları meydana gelmektedir. FK levhaları genel olarak FED teknolojisinde kullanılmakta olup tasarlanan çiplere kolaylıkla entegre edilebilmektedir.

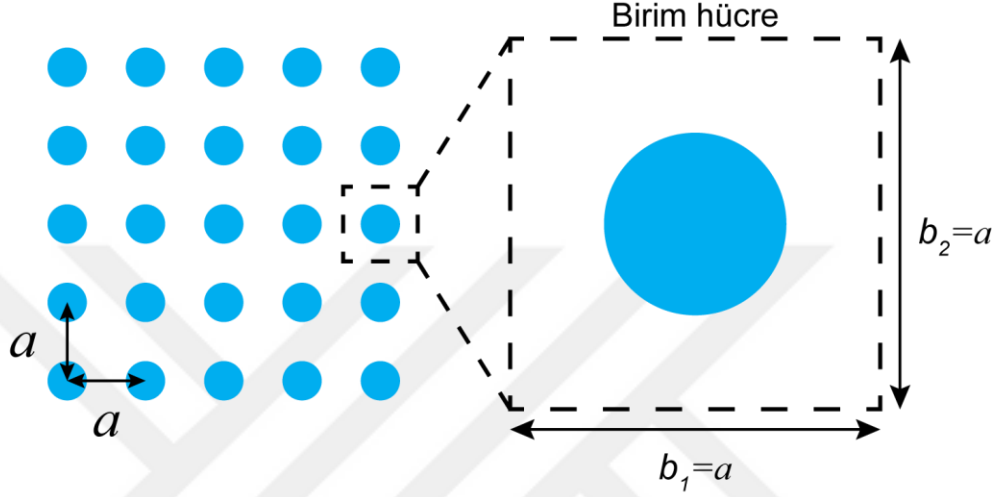
Üç-boyutlu FK'lar, birbirinden bağımsız 3 eksen boyunca kırıcılık indisi modülasyonu içermektedir. Şekil 1.1(c)'de bir örneği verilen üç-boyutlu FK'lar, elektromanyetik dalgaların tüm yönlerden kontrolünü mümkün kılmaktadır. Öte yandan tüm yönler doğrultusunda periyodik bir dağılım göstermelerinden dolayı bu tür FK yapılarının üretim süreçleri zordur.

1.2 İki-Boyutlu Fotonik Kristallerde Birim Hücre Tanımı ve Örgü Türleri

Bu tezin esas aldığı ve sonraki başlıklarda uygulamaları sunulacak olan FK yapıları iki-boyutlu bir örgü dizilimi göstermektedir. Bu bağlamda, iki-boyutlu FK yapılarının sahip oldukları örgü türlerinin incelenmesinde fayda vardır.

Bilindiği üzere periyodik yapılar kendilerini oluşturan en küçük bileşenin belirli eksenler boyunca uzayda periyodik olarak tekrarlanması ile meydana gelmektedir. Örneğin, kristal yapıları bir malzemenin atomları belirli örgü düzeni içerisinde dizilidir. Bu örgü düzeninde kendini belirli bir kural çerçevesinde tekrar eden ve

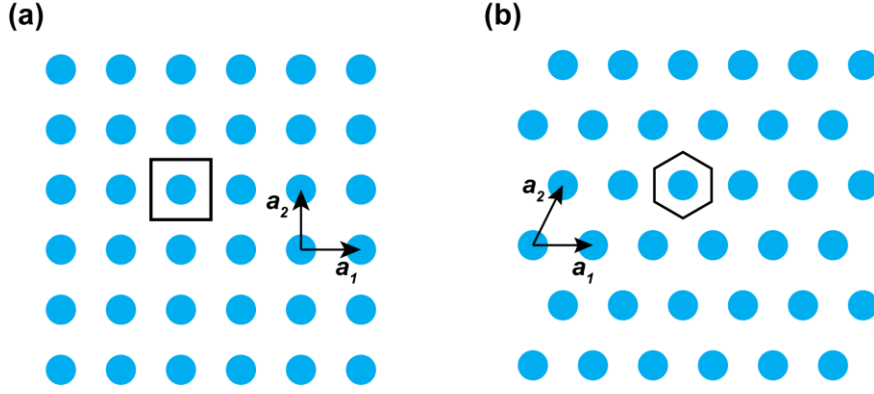
kristal yapısını oluşturan atomlara birim hücre adı verilir. Elektronik katı hal yapıları ve FK'lar arasındaki analogiden dolayı, FK'ları da böyle bir yaklaşım ile ele almak mümkündür. Yani FK'lar, birim hücre adı verilen ve dielektrik bileşenler içeren unsurların periyodik olarak hizalanmasından meydana gelmektedir. Şekil 1.3, verilen FK yapısının bir adet dairesel dielektrik çubuktan oluşan birim hücre yapısını temsil etmektedir.



Şekil 1.3 : Kare örgülü bir FK'nın birim hücre gösterimi.

Bu birim hücre, kare örgü düzenine sahip iki-boyutlu bir FK yapısına aittir. Verilen birim hücre yapısının x ve y eksenleri boyunca $b_1 = b_2 = a$ kadarlık mesafelerde tekrar edilmesi ile FK yapısı meydana getirilmektedir. Burada, b_1 ve b_2 ile tanımlanan parametreler birim hücrenin boyutlarını temsil etmektedir ve örgü sabiti olarak tanımlanmaktadır.

İki-boyutlu FK yapıları, birim hücrelerinin dizilim desenlerine ve boyutlarına bağlı olarak farklı tipte örgülere sahip olmaktadır: kare, dikdörtgen ve altıgen örgüler. Bu örgü türlerinden “kare örgü” ve “altıgen örgü” literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Kare örgülü FK'lar, uzunluk ve genişlikleri birbirine eşit olan birim hücre yapılarının Şekil 1.4(a)'da verilen \mathbf{a}_1 ve \mathbf{a}_2 vektörleri doğrultusunda eş aralıklar (örgü sabiti) ile diziliminden meydana gelmektedir. Altıgen örgülü FK'lar ise birim hücrenin Şekil 1.4(b)'de verilen \mathbf{a}_1 ve \mathbf{a}_2 vektörleri boyunca tekrarlanması ile meydana gelmektedir. Şekil 1.4'te sunulan gösterimlerde, \mathbf{a}_1 ve \mathbf{a}_2 ile temsil edilen vektörler “örgü vektörleri” olarak adlandırılmaktadır ve birim hücrelerin dizilim yönlerini gösteren bağımsız vektörlerdir.



Şekil 1.4 : Örgü türlerine göre (a) kare örgülü ve (b) altıgen örgülü FK'lar.

1.3 İki-Boyutlu Fotonik Kristallerde Simetri Operasyonları

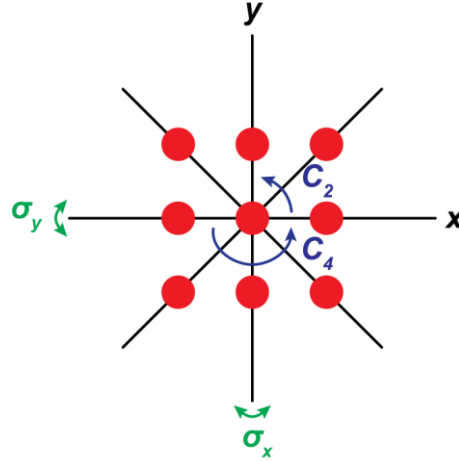
Periyodik ortamlar, temel bir yapı biriminin belirli bir düzen çerçevesinde tekrar edilmesinden ibaret değildir. Bu yapıları, uzayda temsil ettikleri simetri türleri bakımından da incelemek mümkündür. FK'lar "öteleme simetrisi", "ayna simetrisi" ve "dönel simetri" adı verilen 3 adet simetri operasyonu ile değerlendirilebilir.

Atom ya da moleküllerin periyodik dizilimlerinden oluşan kristaller gibi FK'lar da "sürekli" öteleme simetrisine sahip değildir. Kırıcılık indisinin farklı değerlerinin modülasyonunu içerdiklerinden dolayı "ayrık" öteleme simetrisi göstermektedirler. Yani, belirli bir mesafe boyunca uzayda ötelendiklerinde geometrik olarak bir değişim göstermezler ancak bu mesafe sabit bir değer tam sayı katları olmalıdır. Şekil 1.4(a)'da verilen kare örgülü FK yapısı incelendiğinde, periyodik ortamın dielektrik sabitinin modülasyonu, $\epsilon(\mathbf{r}) = \epsilon(\mathbf{r} + l_1\mathbf{a}_1 + l_2\mathbf{a}_2)$ eşitliğine göre tanımlanabilir. Burada \mathbf{a}_1 ve \mathbf{a}_2 örgü vektörleri olup şu şekilde tanımlanmaktadır: $\mathbf{a}_1 = a\hat{\mathbf{x}}$, $\mathbf{a}_2 = a\hat{\mathbf{y}}$. Daha önce de tanımlandığı üzere, "a" burada örgü sabitini tanımlamaktadır. Verilen eşitlik incelendiğinde, l_1 ve l_2 katsayılarının alacağı tam sayı değerleri için ayrık öteleme simetrisinin karşılandığı görülmektedir.

Diğer bir simetri türü ayna simetrisi adı verilen ve FK'ların belirli doğrultularda çizilen eksenler boyunca yansımaları alındığında aynı görüntüyü göstermesidir. Şekil 1.5'te σ_x ve σ_y sembolleri ile temsil edilen eksenler boyunca yansımaları alındığında, verilen iki-boyutlu FK yapısının yine aynı görüntüyü temsil ettiği ve periyodik ortamın yapısında herhangi bir bozulma olmadığı görülmektedir. σ_x ve σ_y ile verilen simetri operasyonlarına karşılık gelen dielektrik değişim fonksiyonları sırasıyla şu

şekilde tanımlanabilir: $\varepsilon(x, y) = \varepsilon(-x, y)$ ve $\varepsilon(x, y) = \varepsilon(x, -y)$. Ayna simetrisi, literatürde yer alan çoğu FK yapısı için korunmaktadır. Ancak, tezin devamında sunulacak olan FK yapılarının ayna simetrisini sağlamadığı durumlar olduğu görülecektir.

FK'ların temsil ettiği diğer bir simetri türü dönele simetridir. Dönele simetri, bir objenin tekrar aynı görünüme kavuşması için kendi eksenini etrafında kaç derece döndürülmesi gerektiği ile tanımlanmaktadır. Dönele simetrisinin grubu " C_r " ile simgelenmektedir. Buradaki " r " parametresi, objenin tekrar aynı görünüme kavuşması için döndürülmesi gereken açı miktarının, 2π radyan (360°) ile oranını temsil etmektedir. Örneğin kare şeklindeki bir obje en az 90° döndürüldüğü zaman tekrar eski görünümüne sahip olur. Bu bağlamda $r = 4$ ($360^\circ/90^\circ$) olarak hesaplanır ve objenin C_4 dönele simetrisine sahip olduğu belirlenir. Cisimler sahip oldukları geometrik şekillere bağlı olarak C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 gibi farklı simetri grupları altında yer alırlar. FK'lar da örgü türleri ve birim hücre geometrilerine bağlı olarak farklı dönele simetrisi sağlamaktadır. Örneğin Şekil 1.5'te verilen iki-boyutlu ve kare örgülü FK yapısı, merkezi etrafında 90° veya 180° döndürüldüğünde mevcut görünümünü korumaktadır. Bu nedenle verilen FK yapısının C_4 ve C_2 dönele simetrisine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 1.5 : İki-boyutlu ve kare örgülü FK üzerinde tanımlanan ayna simetrisi ve dönele simetri operasyonları.

Dönele simetrisinin FK ölçeğinde yapılan bu tanımını birim hücre ölçeğine indirgemek de mümkündür. Örneğin Şekil 1.3'te verilen birim hücre incelendiğinde, dairesel geometriye sahip bir adet dielektrik çubuktan oluştuğu görülmektedir. Dairesel

şekiller sonsuz dönel simetriye (C_{∞}) sahiptir. Bunun nedeni dairesel dielektrik çubukların kendi eksenleri etrafındaki herhangi bir miktardaki dönüşünde, sahip olduğu görünümü mutlaka korumasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, birim hücreleri dairesel dielektrik çubuklar veya dairesel hava deliklerinden oluşan FK'lar, “yüksek dönel simetrik” olarak tanımlanabilir.

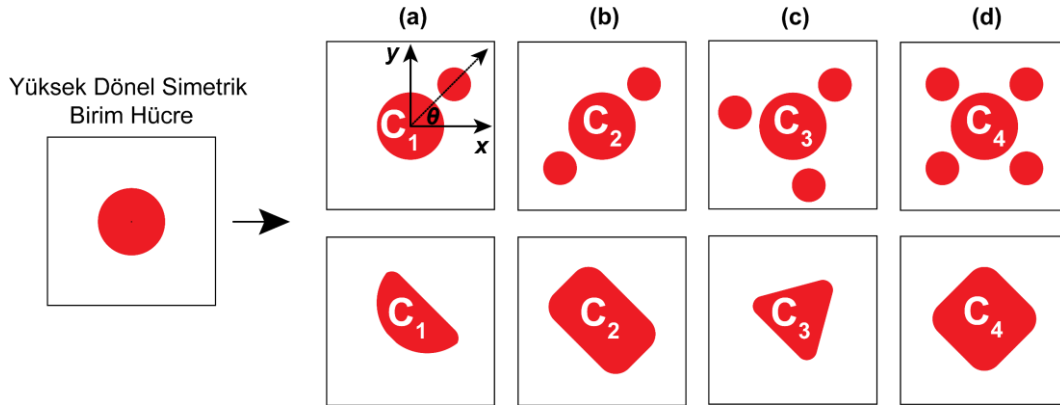


2. FOTONİK KRİSTALLERDE DÜŞÜK DÖNEL SİMETRİ

Bu tezin ana konusu olan düşük dönel simetrik FK'lar tabanlı optik fenomenler ve fotonik aygıtlara geçmeden önce periyodik ortamlarda düşük dönel simetri kavramının incelenmesinde fayda vardır.

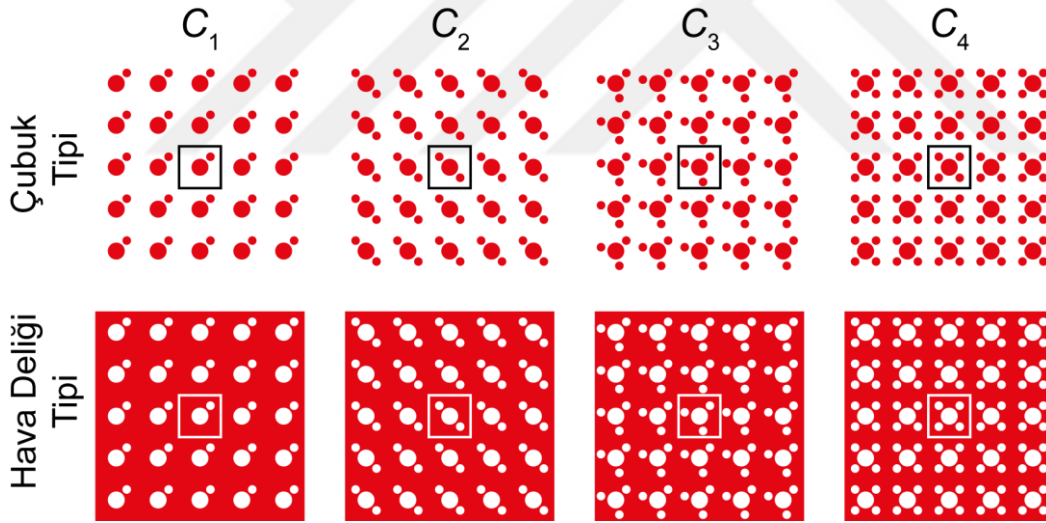
Bilindiği üzere birim hücreler, FK'ların en küçük yapı birimidir. Birim hücrelerin simetri, şekil veya örgü tipi gibi geometrik özellikleri, oluşturdukları periyodik yapıların optik tepkileri üzerinde etkilidir. Dönel simetri, FK'ların dispersiyon özelliklerinde belirleyici rol oynayan temel unsurlardandır. Literatürde şimdiye kadar yer alan FK çalışmaları incelendiğinde büyük bir kısmının, yüksek dönel simetrik olarak adlandırılan ve dairesel dielektrik çubuklardan (veya hava deliklerinden) oluşan birim hücrelerden meydana geldiği görülmektedir. Yüksek dönel simetrik FK'lar kusursuz bir simetri düzenini temsil etmektedir. Ancak bu yapıların simetrik kusursuzluğu, birim hücrelerin geometrik ayarlanma serbestliklerini azaltmaktadır. Geometrik ayarlanabilirlik özgürlüklerinin sınırlı olması sebebiyle, yüksek dönel simetrik FK'ların optik özelliklerinin kontrolü de sınırlıdır.

Bu yapılara bir alternatif olarak, yapısal zenginlik içeren düşük dönel simetrik FK'lar kullanılabilir [13]. Sahip oldukları geometrik çeşitlilik nedeniyle düşük dönel simetrik FK'lar, zengin ve alışılmışın dışında optik tepkiler gösterebilmektedir. Birim hücre yapılarına ilave bileşenlerin (dielektrik çubuk veya hava deliği) eklenmesi ya da mevcut bileşenlerin şekillerinin değiştirilmesi (örneğin dairesel dielektrik çubuğu eliptik versiyonu ile değiştirmek) ile “düşük dönel simetrik” FK'lar elde edilmektedir. Şekiller 2.1'de, iki-boyutlu ve kare örgülü bir FK'nın sahip olabileceği C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 simetrik birim hücre türlerine örnekler sergilenmektedir. Verilen birim hücre konfigürasyonları incelendiği zaman, ilave dairesel bileşenlerin eklenmesi veya mevcut dielektrik çubukların şeklinin değiştirilmesi ile düşük dönel simetrik birim hücreler elde edildiği görülmektedir. Şekil 2.1(a)'da verilen birim hücre yapısında θ ile temsil edilen parametre, birim hücrenin x eksenine göre açılmal yönelimini tanımlamaktadır.



Şekil 2.1 : İki-boyutlu ve kare örgülü FK yapısına ait (a) C_1 , (b) C_2 , (c) C_3 ve (d) C_4 simetrik birim hücre örnekleri.

Düşük dönel simetrik FK'lar, dielektrik kontrastları ve örgü düzenlerine göre çok farklı periyodik ortamlar sergilemektedir. Şekil 2.2'de, C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 simetrik birim hücrelerden oluşan kare örgülü FK yapılarının örnekleri verilmiştir. Ancak bu yapılar sadece kare örgü düzeni ile sınırlı değildir ve diğer örgü türlerine de uygulanabilir.



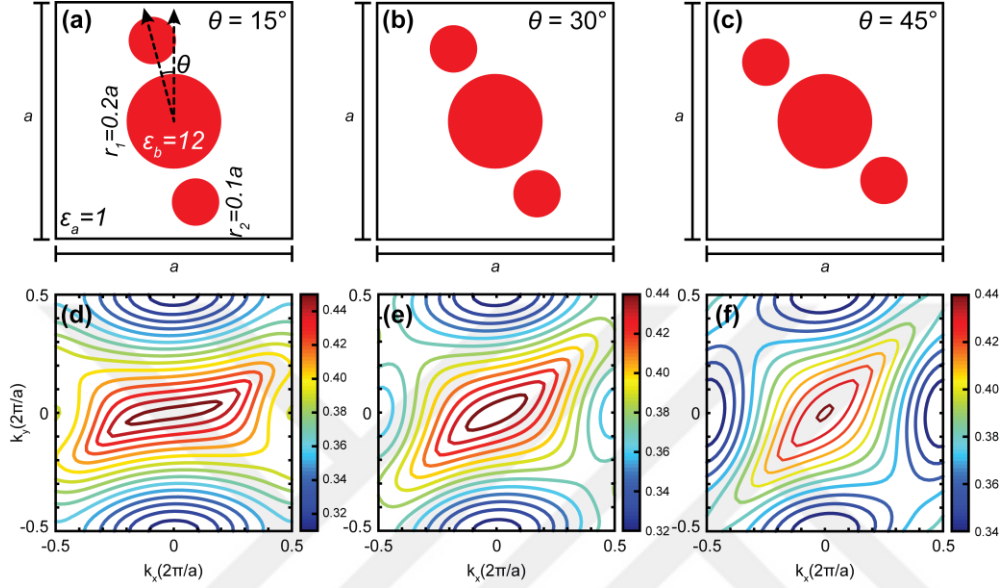
Şekil 2.2 : C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 dönel simetrisine sahip birim hücre yapıları ile oluşturulan iki-boyutlu ve kare örgülü FK yapıları. Periyodik ortam içerisindeki birim hücreler çerçeve içine alınarak gösterilmiştir.

FK'lara uygulanan simetri azaltımı neticesinde Şekil 2.2'deki gibi ortaya çıkan geometrik çeşitlilik, bu periyodik malzemelerin dispersiyon özelliklerini zenginleştirmektedir. Sahip oldukları alışılmışın dışında optik özellikleri sayesinde düşük dönel simetrik FK'lar, eğik ve geniş bantlı öz-kolimasyon [14, 15], ışık odaklama [16], dağılımsız dalga iletimi [17], dalga boyu ayırıcı [18], anizotropik sıfır

kırıcılık indisi [19] ve polarizasyon ayırıcılar [20, 21] gibi optik uygulamalar ve fenomenlerin tasarımında etkin rol oynamaktadır.

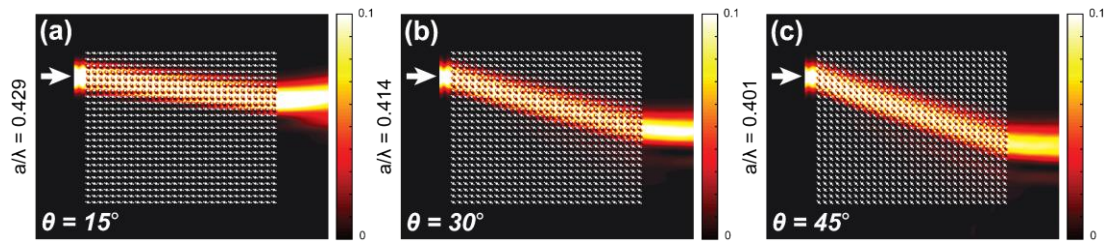
Daha önce de belirtildiği üzere, düşük dönel simetrik FK'ların geometrik özellikleri ayarlanarak, dispersiyon özellikleri kontrol edilebilmektedir. Bu yapıların optik tepkileri, tek bir birim hücreyi oluşturan bileşenlerin uzaysal dağılımı ve birim hücrenin kendi eksenini etrafındaki açısal yönelimine oldukça duyarlıdır. Dispersiyon mühendisliği sayesinde, bu duyarlılık bir avantaja çevrilmektedir ve istenen optik özellikler birim hücreler ayarlanarak elde edilmektedir. Şekiller 2.3(a), 2.3(b) ve 2.3(c)'de sunulan C_2 simetrik birim hücreler, açısal yönelimlerin sırasıyla $\theta = 15^\circ$, $\theta = 30^\circ$ ve $\theta = 45^\circ$ olduğu durumlara karşılık gelmektedir. Bu oryantasyonlara karşılık gelen TM polarizasyon 2. bant eş-frekans eğrileri (EFE), Şekiller 2.3(d), 2.3(e) ve 2.3(f)'de sunulmuştur. Bu tez çalışmasında, TM polarizasyonun elektrik alan bileşeni (E_z), dielektrik çubukların eksenleri yönündedir. Öte yandan, TM polarize dalgaların manyetik alan bileşenleri (H_x ve H_y) dielektrik çubukların eksenlerine dik olan yöndedir. Verilen EFE grafikleri, düzlem dalga açılımı (PWE) metodu kullanılarak hesaplanmıştır [22]. FK'lar içerisindeki elektromanyetik dalgaların yayılım karakteristikleri EFE grafikleri incelenerek belirlenir. Elektromanyetik dalgaların FK yapıları içerisindeki iletim yönü $\vec{v}_g(x, y) = \nabla_k \omega(k)$ eşitliği ile yani EFE'lerin gradyan vektörleri hesaplanarak belirlenir. Burada, \vec{v}_g grup hızını temsil ederken, k dalga vektörüne karşılık gelmektedir. Dahası, \vec{v}_g , EFE eğrileri ile dik açı yapan enerji akışını temsil etmektedir. Yani, FK içerisinde ilerleyen dalgaların yönü, EFE'ler tarafından belirlenen doğrultuyu takip etmektedir. Verilen EFE'ler incelendiğinde, birim hücrelerin açısal yönelimi arttıkça dispersiyon eğrilerinin eğiminin arttığı görülmektedir. EFE'lerdeki bu değişim, periyodik ortam içerisinde yayılım gösteren elektromanyetik dalgaların yönünü tayin etmektedir. Burada, FK'ların sahip olduğu örnek bir optik fenomen hakkında yorumda bulunmakta fayda vardır. $a/\lambda = (0.400 - 0.440)$ normalize frekans aralığına karşılık gelen dispersiyon eğrileri incelendiğinde, k_x doğrultusu boyunca düz bir profile sahip oldukları görülmektedir. EFE'lerin düz bir profile sahip olması, elektromanyetik dalgaların yapı içerisinde dağılıma uğramadan ilgili EFE'ler tarafından belirlenen yönlerde ilerlemesi anlamına gelmektedir. Bu olguya "öz-kolimasyon" adı verilir [7]. Yüksek dönel simetrik periyodik ortamlarda öz-kolimasyon özelliği tek bir yönde görülmekte ve FK

içerisindeki yayılım yönü pasif olarak kontrol edilememektedir. Öte yandan simetri düşüklüğü sayesinde öz-kolimasyon olgusunun yönü ayarlanabilmektedir ve “eğik öz-kolimasyon” fenomeni oluşturulmaktadır [14, 16]. Yani birim hücrelerin oryantasyonları ayarlanarak, yapı içerisinde ilerleyen ışığın yönü dağınımsız bir şekilde kontrol edilebilmektedir.



Şekil 2.3 : C_2 simetrik örnek bir birim hücrenin farklı açısal yönelimleri ve karşılık gelen TM polarizasyon 2.bant EFE’leri.

Eğik öz-kolimasyon olgusunu zaman düzleminde göstermek amacıyla zaman-alanında sonlu-farklar (FDTD) metodu kullanılmıştır [23]. TM polarizasyon elektrik alan yoğunlukları, Şekil 2.4’te farklı θ değerleri için temsil edilmektedir. Verilen figürler incelendiğinde, elektromanyetik dalgaların yapı içerisinde dağılmadan ilerlediği görülmektedir. Dahası, birim hücre oryantasyonunun $\theta = 15^\circ$ ’den $\theta = 45^\circ$ ’e artırılmasıyla, yapı içerisinde yayılan dalgaların ilerleme yönünün değiştiği ve FK’nın sonunda farklı pozisyonlarda çıkış yaptığı gözlenmektedir.



Şekil 2.4 : C_2 simetrik birim hücrenin farklı oryantasyonlarına göre öz-kolimasyon fenomeninde meydana gelen yönsel değişim.

Eđik öz-kolimasyon fenomenini, simetri dūřüklüđünün sađladıđı tipik bir optik özellihtir ve tezin bu ařamasında dūřük dōnel simetrik FK'ların elektromanyetik dalgalara hūkmetme yetisini ۆrnekleme amacıyla sunulmuřtur. Ancak, simetri dūřüklüđünün beraberinde getirdiđi daha birēok optik ۆzellik, dispersiyon mūhendisliđi sayesinde farklı fotonik aygıtların tasarımında rol oynamaktadır. Tezin devamında simetri dūřüklüđü kullanılarak tasarlanan fotonik aygıtlar ve optik fenomenler sunulacaktır.





3. DÜŞÜK DÖNEL SİMETRİK FOTONİK KRİSTALLER TABANLI YENİ FOTONİK AYGITLAR VE OPTİK FENOMENLER

Bu başlık altında, düşük dönel simetrik FK yapıları kullanılarak tasarlanan belirli fotonik aygıtların ve yeni optik fenomenlerin sunumu yapılacaktır. Tezin ana konusunu oluşturan bu kısımda polarizasyon ayırıcılar, interferometrik konfigürasyonlar ve sıfır kırıcılık indisi fenomeni incelenecektir.

3.1 Yüksek Polarizasyon Sönüm Oranına Sahip Polarizasyon Ayırıcılar

3.1.1 Giriş

Polarizasyon ayırıcılar, iki dikey polarizasyonu, yani TE ve TM polarizasyonları farklı iki yöne ayırıştırma kabiliyetlerinden dolayı FED'ler ve optik haberleşme uygulamaları için büyük bir önem arz etmektedir. Günümüzde birçok fotonik aygıt, elektromanyetik dalgaların polarizasyonunun tek bir türü altında çalışmak üzere tasarlanmaktadır. Bu nedenle, bu yapılara gönderilen polarize olmamış veya kısmen polarize olmuş elektromanyetik dalgaların, iki dikey polarizasyona ayrılması elzemdir. Erken dönem polarizasyon ayırıcıları [24-28], milimetrik boyutlarda olduklarından dolayı optik devre elemanlarının gereksinimlerini karşılayacak kadar kompakt değildir. Buna karşın, FK'lar kullanılarak tasarlanan polarizasyon ayırıcıları bu gereksinimleri karşılamaktadır ve performans kriterleri bakımından daha verimlidir. FK yapıları tabanlı çeşitli polarizasyon ayırıcıları literatüre tanıtılmıştır [12, 29-33]. Bunlardan öncü olarak nitelendirilebilecek bazı çalışmalarını özetlemek gerekirse, Ao ve ekibi, FK'ların negatif kırıcılık indisi özelliğinden faydalanarak bir polarizasyon ayırıcı tasarlamıştır [31]. Negatif kırılma özelliğine dayanan bu çalışmanın zafiyeti, hava-FK ara yüzeyinde optik kırılma gerçekleşikten sonra elektromanyetik dalga'nın difraksiyona uğramasıdır. Ayrıca, negatif kırılma özelliğinden faydalanabilmek için ışığın FK'ya eğik bir açı ile gönderilmesi gerekmektedir. Bu durum yansıma kayıplarında artışa neden olmaktadır ve tasarımın

iletim performansını düşürmektedir. FK tabanlı başka bir polarizasyon ayırıcı konsepti ise Ohtera ve ekibi tarafından FYB'ler kullanılarak tasarlanmıştır [12]. Buna ek olarak, öz-kolimasyon fenomenini, FYB'ler ile beraber kullanarak ortaya çıkarılan bir polarizasyon ayırıcı tasarımı da mevcuttur [32]. FYB kullanımını gerektiren bu tarz aygıtlar, periyodik ortamların içine dielektrik “kusurlar” eklenmesini gerektirmektedir. Fabrikasyon sürecinde bu kusurlarda meydana gelebilecek olası hatalar, periyodik yapının FYB'sinde spektral bir kaymaya neden olabilir ve aygıtın performansında düşüş meydana gelebilir. Başka bir polarizasyon ayırıcı tasarımı, Wu ve ekibi tarafından iki ayrı polarizasyonun farklı dispersiyon özelliklerinden faydalanılarak tasarlanmıştır [33]. Işığın bu tasarım içerisinde hizalanması ve yönlendirilmesi zor olduğundan, ayrıştırılan polarize dalgalarda saçılım ve düşük iletim verimliliği gözlenir.

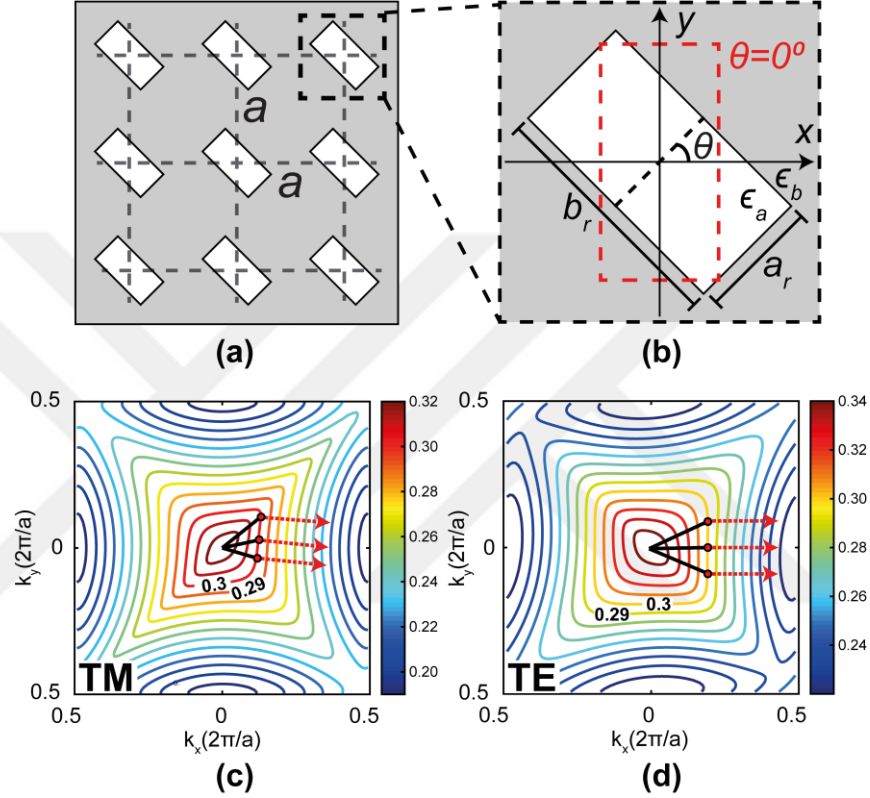
Yukarıda örnekleri verilen polarizasyon ayırıcı yapılarına bir alternatif olarak, bu çalışmada, periyodik ortamı oluşturan FK birim hücrelerinin dönele simetrilerini azaltarak yüksek polarizasyon sönüm oranına sahip ve eğik öz-kolimasyon tabanlı bir polarizasyon ayırıcı konsepti önerilmektedir.

3.1.2 Frekans ve zaman alanı analizleri

Bu çalışmada önerilen ve eğik öz-kolimasyon fenomeninden faydalanarak gelen ışığı iki dikey polarizasyona ayırıtıran düşük dönele simetrik FK yapısı kare örgüye sahiptir ve Şekil 3.1(a)'da görülebileceği üzere dikdörtgen şekilli hava deliklerinden meydana gelen birim hücre konfigürasyonlarından oluşmaktadır. Önerilen yapının örgü sabiti $a = 460$ nm'dir. FK'nın dielektrik zemininin ve hava deliklerinin elektriksel geçirgenlik sabitleri ise sırasıyla $\epsilon_b = 9.61$ ve $\epsilon_a = 1$ 'dir. Şekil 3.1(b), hava deliği içeren birim hücre yapısını, $a_r = 0.30a$ ve $b_r = 0.60a$ uzunluk parametreleri ile temsil etmektedir. Dikdörtgen hava deliklerinin x eksenine göre açılma yönelimi ise θ sembolü ile temsil edilmektedir.

Bir FK birim hücrelerinin geometrisi, farklı spektral özellikler içeren kompleks fotonik yapıların tasarımında belirleyici bir unsurdur. Önerilen yapı içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalgaların davranışını sorgulamak amacıyla, yapıya ait EFE'ler hesaplanır. EFE'ler, yapının dispersiyon özellikleri hakkında bilgiler vermekte ve

polarizasyon ayrışımının altında yatan fiziksel mekanizmayı açıklamaktadır. Elektromanyetik dalgaların FK içerisindeki yayılımı $\vec{v}_g(x, y) = \nabla_k \omega(k)$ formülü ile belirlenir. Burada, \vec{v}_g grup hızını temsil ederken, k dalga vektörüne karşılık gelmektedir. Dahası, \vec{v}_g , dispersiyon konturları ile dik açı yapan enerji akışını temsil etmektedir. Yani, FK içerisinde yayılım gösteren ışığın yönü, EFE tarafından belirlenen doğrultuyu takip etmektedir.



Şekil 3.1 : (a) Dikdörtgen hava deliklerinin iki-boyutlu kare örgüsü. (b) Birim hücrenin geometrik temsili. (c) TM ve (d) TE polarizasyonlara karşılık gelen 2. bant EFE görüntüleri.

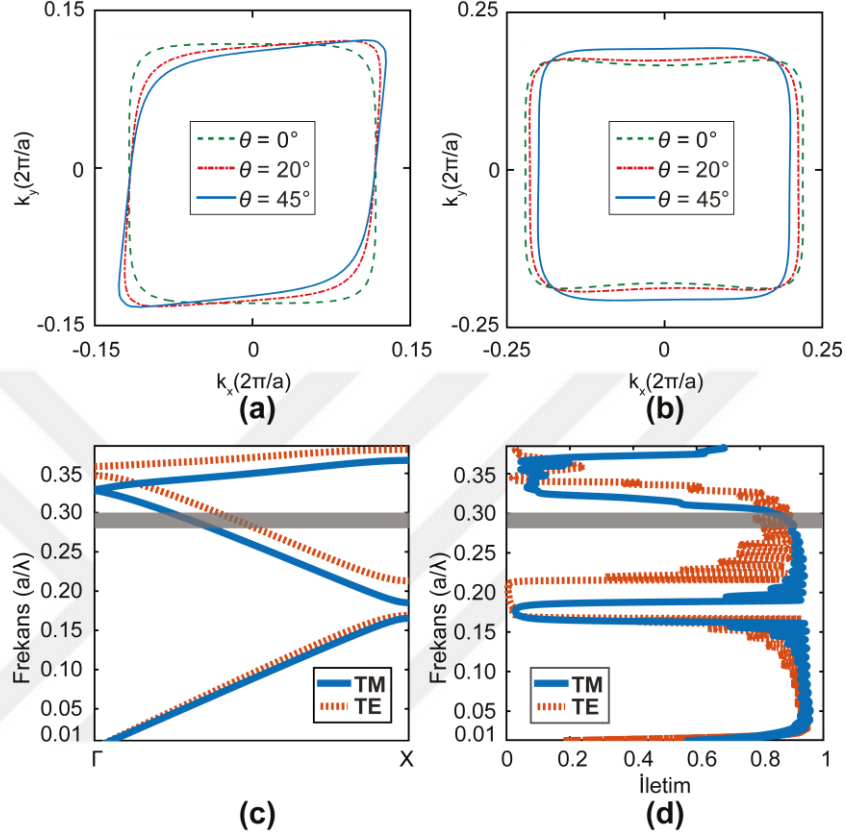
Önerilen FK yapısının dispersif özelliklerinin incelenmesi için PWE metodu kullanılmıştır [22]. Bilindiği üzere, kare örgülü FK yapılarının 1. bant dispersiyon eğrileri, yuvarlak şekilli EFE'lerden meydana gelmektedir. Bu özellik, izotropik bir yapıyı işaret etmektedir ve birim hücrenin geometrik özelliklerinden genel olarak bağımsızdır. Bununla birlikte, kare örgülü FK yapılarının her iki polarizasyon için 2. bantları, öz-kolimasyon özelliğinin varlığını gösteren ve kare benzeri şekle sahip olan EFE'ler içermektedir [7, 34]. Kolime olan ışık, yüksek verimli ve dağılımsız bir iletme olarak sağlamaktadır. Bu karakteristik, öz-kolimasyon fenomenini kullanan

FK ortamlarını, ışığın dağılımsız iletimi için ilave yapılar gerektiren alternatiflerine göre daha avantajlı kılmaktadır. Düşük dönel simetrik FK yapıları, öz-kolimasyon özelliği gösteren EFE'lerin şekillerini etkin bir şekilde manipüle edebilmeye olanak sağlamaktadır ve eğik öz-kolimasyon olgusunun ortaya çıkmasına öncü olmaktadır [14, 16, 18]. Bu nedenle, önerilen polarizasyon ayırıcının tasarımında, TM ve TE polarizasyonun 2. bantları göz önünde bulundurulmuştur.

TM ve TE polarizasyon 2. fotonik bantlarına ait EFE'ler, $\theta = 45^\circ$ için hesaplanmıştır ve Şekiller 3.1(c) ve 3.1(d)'de sırasıyla gösterilmiştir. Birim hücre yöneliminin $\theta = 45^\circ$ olarak seçilmesinin nedeni daha sonra açıklanacaktır. TM polarizasyon için, ΓX simetri eksenini boyunca eğim gösteren ve düz bir yüzeye sahip olan dispersiyon eğrileri Şekil 3.1(c)'de gözlemlenebilir. Dispersiyon eğrisinin düz bir yüzeye sahip olması, FK yapısı içerisinde bu yüzeye dik vektörler boyunca ilerleyen eğik öz-kolime elektromanyetik dalgaları meydana getirmektedir. Öte yandan, verilen TE polarizasyon EFE'leri ele alındığında, dikdörtgen şekilli hava deliklerinin açısallık oryantasyonunun kare benzeri geometriye sahip dispersiyon eğrilerinde bir eğilmeye neden olmadığı görülmektedir. Bundan dolayı, TE polarizasyon için eğik öz-kolimasyon olgusu gözlenmemektedir. Buradan şu çıkarım yapılabilir: FK yapısını oluşturan dikdörtgen şekilli hava deliklerinin açısallık yönelimi, yapı içerisinde ilerleyen TM polarize ışığın yönünün belirlenmesinde etkili bir unsurdur. Ancak söz konusu belirleyicilik, FK içerisinde yayılım gösteren TE polarizasyona sahip elektromanyetik dalgalar için geçerli değildir. Düşük simetrik FK'nın polarizasyona hassas bu özelliği, belirli bir dalga boyu aralığında çalışma gösteren, konvansiyonel ve eğik öz-kolimasyon fenomenlerine dayalı polarizasyon ayırıcı tasarımlarını mümkün kılmaktadır.

Şekiller 3.2(a) ve 3.2(b), $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$ ve $\theta_3 = 45^\circ$ değerleri için $a/\lambda = 0.300$ normalize frekansına karşılık gelen EFE'leri sırasıyla TM ve TE polarizasyonlar için göstermektedir. Şekil 3.2(a)'dan anlaşılacağı üzere θ açısının artışı, TM polarizasyon EFE'lerinin kare benzeri şekillerini bozmadan onları eğimli hale getirerek dispersiyon özelliklerini doğrudan etkilemektedir. TM polarizasyon EFE'lerinin eğilimi, eğik öz-kolimasyon fenomenine neden olmaktadır ve eğim miktarı hava deliklerinin yönelim açısını kontrol ederek ayarlanabilir. Bununla birlikte, FK birim hücrelerinin açısallık oryantasyonu, TE polarizasyona ait EFE'lerde bir eğilmeye neden

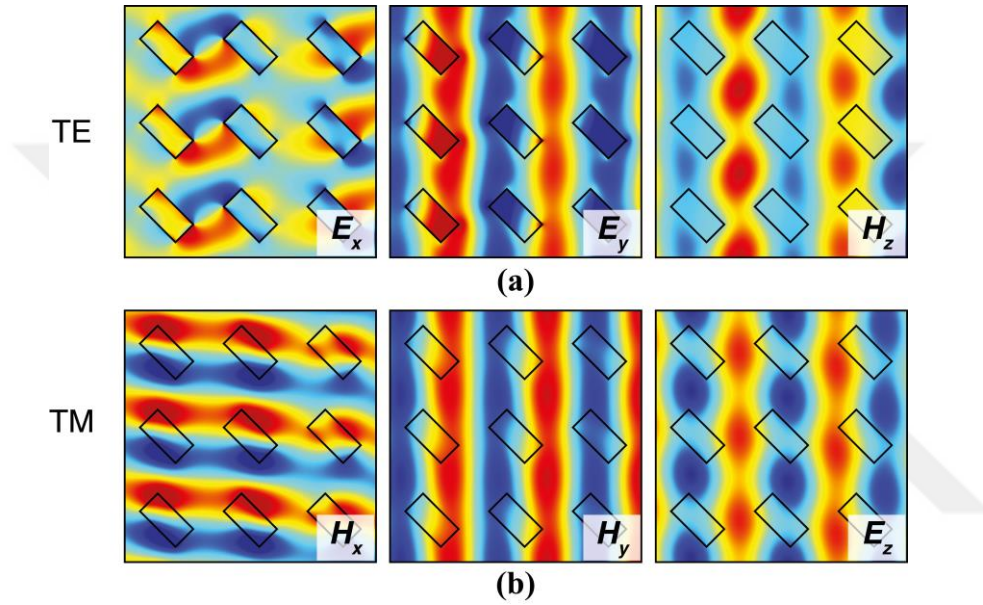
olmamaktadır. Bu nedenle, FK yapısı üzerine düşen elektromanyetik dalganın TE ve TM polarizasyona sahip bileşenleri, yapı içerisinde farklı doğrultularda öz-kolimasyon karakteristiği ile ilerlemektedir. Bu özellik, gelen ışığın polarizasyonlarına bölünmüş biçimde yapıdan ayrılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.2 : Farklı θ değerleri için $a/\lambda = 0.300$ normalize frekansında (a) TM ve (b) TE polarizasyon EFE'lerinin değişimi. (c) Tasarlanan FK'nın her iki polarizasyon için bant yapısı. (d) $\theta = 45^\circ$ için her iki polarizasyona karşılık gelen iletim grafiği.

Seçilen dalga boyu aralığında TE ve TM polarizasyon modları, düşük dönel simetrik birim hücrelerin yönelimlerine göre farklı davranışlar göstermektedir. Bu fark, modların enerji dağılımları ve ilgili frekans aralığında uzanan fotonik bant yapılarının eğimleri ile ilişkilendirilebilir. Birim hücre oryantasyonunun $\theta = 45^\circ$ ve normalize frekans değerinin $a/\lambda = 0.295$ olduğu durumda, TM polarizasyon elektrik alan bileşeni (E_z) ve TE polarizasyon manyetik alan bileşeninin (H_z) dağılımları, Şekiller 3.3(a) ve 3.3(b)'de verilmiştir. Şekil 3.3(b) incelendiğinde, TM polarizasyon mod enerjisinin dikdörtgen hava deliklerinin yakın köşelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 3.3(a) incelendiğinde, TE polarizasyonun enerji profili hava deliklerinin uzak köşelerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durum, TM

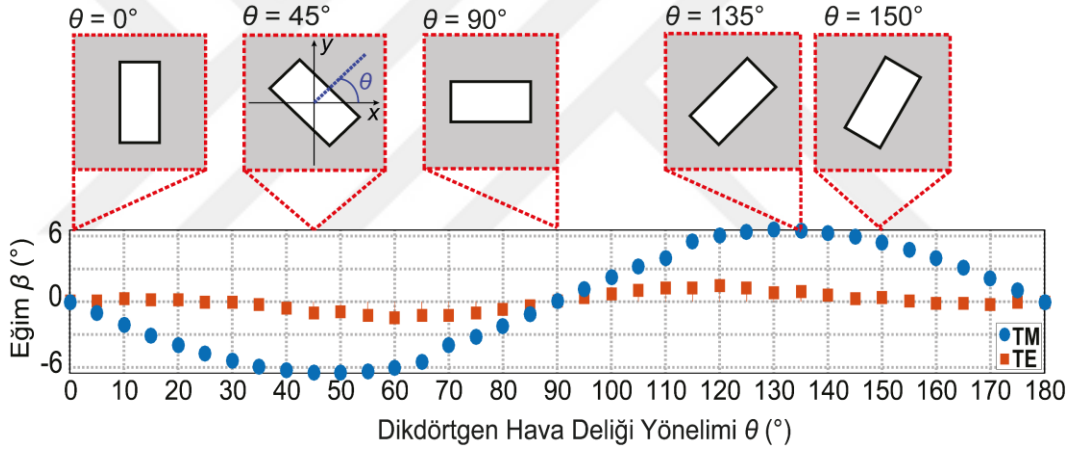
polarizasyon halinin birim hücrelerin açılal yönelimlerine neden daha duyarlı olduğuna işaret etmektedir. Değinilen açılal yönelim hassasiyeti, Şekil 3.2(c)'de verilen fotonik bant diyagramı ile de açıklanabilir. Seçilen normalize frekans değerinde, TM polarizasyon bant yapısı söz konusu olduğunda, çalışılan dispersiyon bandının eğimi daha düşük olup, Γ simetri noktasına daha yakın konumda yer almaktadır. Bu durum küçük grup hızı, yani yavaş ışık fenomenine işaret etmektedir ve TM polarizasyonun birim hücre açılalına duyarlı olmasına ışık tutan kanıtlardan birisidir.



Şekil 3.3 : $a/\lambda = 0.295$ normalize frekansında, $\theta = 45^\circ$ için (a) TE ve (b) TM polarizasyonların elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin dağılımı.

Şekil 3.4, TM ve TE polarizasyonlara ait EFE'lerin eğim açılarının, θ parametresine göre değişimini temsil etmektedir. Burada, TM ve TE polarizasyona ait dispersiyon eğrilerinin eğim açıları, sırasıyla β_{TM} ve β_{TE} parametreleri ile temsil edilmiştir. İlgili Şekilde, belirli θ parametrelerine karşılık gelen birim hücre görünümleri de gösterilmiştir. β_{TM} ve β_{TE} parametrelerinin değişimini hesaplamak amacıyla, ilgili frekans bölgesine karşılık gelen TM ve TE polarizasyon EFE'lerinin farklı θ değerlerine karşılık gelen gradyan vektör alanları hesaplanmıştır. Hesaplanan gradyan vektörleri, ışığın FK içerisinde hangi yönde yayılım göstereceğini belirlemektedir. $k_y = 0$ komşuluğundaki gradyan vektörlerinin, referans k_x eksenine yaptıkları açılar hesaplanarak, EFE'lerin eğim açıları belirlenmiştir. Hesaplama işleminde baz alınan EFE eğrileri, $a/\lambda = 0.300$ normalize frekansına karşılık gelen

dispersiyon eğrileridir. Şekil 3.4'ten görüleceği üzere $\theta = [0^\circ, 180^\circ]$ değer aralığında, TM polarizasyon dispersiyon eğrisinin eğim varyasyonu sinüzoidal bir tepki vermektedir. TM polarizasyondan farklı olarak, TE polarizasyon EFE'lerinin eğilme açılarının birim hücre yönelimlerden fazla etkilenmediği ve β_{TE} parametresindeki değişimin β_{TM} 'ye göre ihmal edilebileceği görülmektedir. Birim hücrelerin oryantasyonları değiştirilirken, en yüksek polarizasyon ayrışımının, $\theta = [40^\circ, 50^\circ]$ değer aralığı için ortaya çıktığı görülmüştür. $\theta = 45^\circ$ olduğunda $\beta_{TM} = 6.507^\circ$ ve $\beta_{TE} = 0.983^\circ$ olarak hesaplanmıştır. θ parametresinin 45° 'den daha büyük veya daha küçük değerleri için, TM polarizasyon EFE'leri eğimlerini kaybetmektedir ve bu durum β_{TM} değerinin Şekil 3.4'te verilen sinüzoidal tepkisinden de görülebilmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, önerilen polarizasyon ayırıcı yapısındaki FK birim hücrelerinin yönelim açıları, yüksek ayırıcı performansı elde etmek amacıyla $\theta = 45^\circ$ olarak belirlenmiştir.

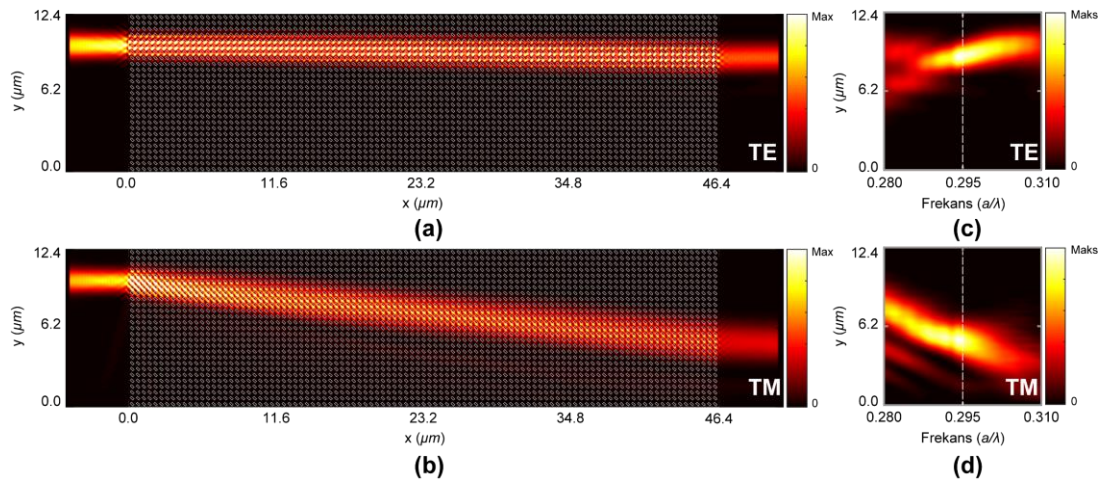


Şekil 3.4 : Birim hücre oryantasyonuna bağlı olarak, $a/\lambda = 0.300$ normalize frekansına karşılık gelen TM ve TE polarizasyon EFE'lerinin eğim miktarlarındaki (β_{TM}, β_{TE}) değişim.

Fotonik bant diyagramlarının analizi yapı içerisinde ilerleyen dalgaların mod karakteristiklerinin tanımlanmasını sağlamaktadır. Şekil 3.2(c)'den görüldüğü üzere, tasarlanan yapının fonksiyonel olduğu frekans aralığı hem TM hem de TE polarizasyonlar için tek bir moda karşılık gelmektedir. Bu sayede, çok modlu dalga iletiminin beraberinde getirdiği mod dispersiyonu da ortadan kalkmaktadır. Önerilen fotonik aygıt için iletim verimliliğinin oldukça yüksek olması amaçlanmıştır. Bu gaye doğrultusunda FDTD yöntemi [23] kullanılarak temel FK yapısının çıkışından alınan iletim verimlilikleri ölçülmüştür ve sonuçlar Şekil 3.2(d)'de temsil

edilmektedir. Şekil 3.2(d) göstermektedir ki öz-kolimasyon olgusunun bulunduğu frekans aralıklarında yapı çıkışındaki iletim verimliliği her iki polarizasyon için en az %70'tir. Bu ölçüm esnasında, iletim performansını daha da arttıracak kırıcılık indisi uyumlu iyileştirici katmanlar yapıya uygulanmamıştır. Yine de Fabry–Pérot salınımlarını azaltarak, tasarımın iletim performansını stabil hale getirecek anti-yansıma kaplamaları FK yapısının ön ve arka yüzeylerine eklenebilir [35, 36].

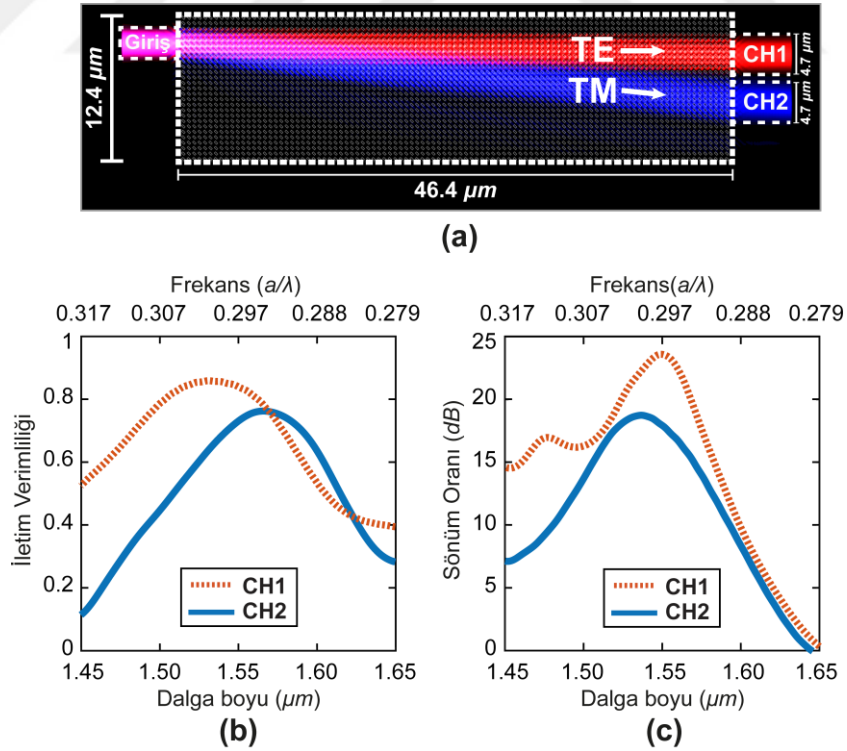
FK yapısının polarizasyon ayırıştırma özelliğini incelemek için zaman alanında hesaplamalar yapılmıştır. Simülasyon alanındaki yapının etrafı “mükemmel uyumlu tabakalar” (PML) [37] ile çevrilmiştir ve hesaplama çözünürlüğü $a/32$ olarak sabitlenmiştir. Simülasyonu yapılan polarizasyon ayırıcı aygıtın boyutları şu şekildedir: $[L_x, L_y] = [46.4 \mu\text{m}, 12.4 \mu\text{m}]$. Tasarlanan yapı, $3.68 \mu\text{m}$ genişliğe sahip ve $a/\lambda = 0.295$ normalize frekansında çalışan bir dalga kaynağı ile uyarılmıştır. TM ve TE polarizasyona karşılık gelen alan yoğunluğu dağılımları Şekiller 3.5(a) ve 3.5(b)'de temsil edilmektedir. Şekil 3.5(b)'de görüleceği üzere, TM polarizasyona sahip dalganın eğik öz-kolimasyon olgusuna sahip olmasından dolayı yapı içerisinde ilerlerken y eksenini boyunca kayma gerçekleşmektedir. Öte yandan, Şekil 3.5(a) göstermektedir ki TE polarize elektromanyetik dalganın yapı içerisindeki yayılımında bir kayma söz konusu değildir. Bu şartlar, yapıya giriş olarak verilen ve polarizasyonlarına ayrılmamış bir dalganın yapı sonuna polarizasyonlarına ayrılmış bir şekilde erişmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.5 : $a/\lambda = 0.295$ normalize frekansında (a) TE ve (b) TM polarizasyon alan yoğunluğu dağılımları. Yapının çıkışındaki alan yoğunluğunun frekansa bağlı konumsal değişiminin (c) TE ve (d) TM polarizasyonlar için gösterimi.

Tasarlanan polarizasyon ayırıcısı daha iyi analiz etmek amacıyla, farklı frekanslara karşılık gelen dalgaların alan yoğunluklarının yapıdan çıkış konumları hem TE hem de TM polarizasyon için sırasıyla Şekiller 3.5(c) ve 3.5(d)'de temsil edilmektedir. Şekil 3.5(c) incelendiğinde, $a/\lambda = [0.288 - 0.305]$ normalize frekans aralığında TE polarize dalganın yapı içerisinde düz bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Bununla birlikte $a/\lambda = [0.286 - 0.300]$ normalize frekans aralığında, TM polarize elektromanyetik dalganın yatay pozisyonunda bir değişim meydana gelmektedir.

Verimli bir polarizasyon ayırıcı tasarımının iki önemli kriteri yüksek çıkış iletimi ve yüksek polarizasyon sönüm oranıdır. Önerilen yapının performansını ölçmek amacıyla, $\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$ bant genişliğine sahip ve 1550 nm merkez dalga boyunda çalışma gösteren polarize olmamış bir Gauss sinyali yapıya gönderilmiştir. Şekil 3.6(a)'da, polarizasyonların ayrışımına bağlı olarak yapının sonunda belirlenen CH1 ve CH2 çıkış portları görülmektedir. Bu çıkış portları arasındaki mesafe $1.23 \mu\text{m}$ olup, her bir çıkış portunun kanal genişliği $4.7 \mu\text{m}$ 'dir. Bu portlardan alınan ölçümler vasıtasıyla yapının çıkışında elde edilen iletim gücü ve polarizasyon sönüm oranları hem TE hem de TM polarizasyon için Şekiller 3.6(b) ve 3.6(c)'de verilmiştir.



Şekil 3.6 : (a) Aygıtın çalışma prensibi ve giriş-çıkış portları. CH1 ve CH2 çıkış portlarındaki (b) iletim verimliliği ve (c) polarizasyon sönüm oranı grafikleri.

Şekil 3.6(b)'de, $\lambda = [1.45 - 1.65 \mu\text{m}]$ dalga boyu aralığında çıkış kanallarında hesaplanan iletim gücü görülmektedir. Önerilen yapının polarizasyon ayrıştırma özelliği, $\lambda = [1.533 - 1.586 \mu\text{m}]$ dalga boyu aralığında görülmektedir ve çalışma bant genişliği 53 nm'dir. Verilen iletim grafiğinden görülebileceği üzere, optik C-bandı dalga boylarında $[1.530 - 1.565 \mu\text{m}]$, CH1'deki iletim gücünün maksimum değeri %85'i aşarken, CH2 için bu değer %76'ya erişmektedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki yapının sonunda polarizasyonlarına ayrılmış olarak çıkan dalgalar kabul edilebilir iletim verimliliğine sahiptir. Verilen bu iletim oranları, fotonik aygıtın giriş ve çıkış yüzeylerine kırıcılık indisli uyumlu tabakalar yerleştirilerek daha da artırılabilir.

Tasarlanan aygıtın iletim verimliliğine ek olarak, ayrıştırılan polarizasyonların izolasyonu da performans kriterlerinden birisidir. Polarizasyon sönüm oranı, polarizasyon ayırıcının bir kanalındaki istenen polarizasyon ile istenmeyen polarizasyon arasındaki iletim oranına karşılık gelmektedir. Polarizasyon sönüm oranı, dB ölçeğinde şu şekilde hesaplanır:

$$\text{PER}_{\text{CH\#}} = 10 \log_{10} \frac{T_{\text{istenen}}}{T_{\text{istenmeyen}}} \quad (3.1)$$

Burada, T_{istenen} ilgili kanalda istenen polarizasyona sahip dalganın çıkış gücünü, $T_{\text{istenmeyen}}$ ise aynı kanalda istenmeyen polarizasyona sahip dalganın çıkış gücünü temsil etmektedir. Şekil 3.6(c)'de, CH1 ve CH2 kanallarındaki polarizasyon sönüm oranı eğrileri $\lambda = [1.450 - 1.650 \mu\text{m}]$ dalga boyu aralığında görülmektedir. Hesaplanan değerler göstermektedir ki, tasarlanan yapının polarizasyon sönüm oranı optik C-bandı dalga boylarında PER_{CH1} ve PER_{CH2} için sırasıyla 21.01 dB ve 16.00 dB'den daha fazladır. Optik haberleşmede sıklıkla kullanılan $\lambda = 1.550 \mu\text{m}$ merkez dalga boyunda ise $\text{PER}_{\text{CH1}}=23.64$ dB ve $\text{PER}_{\text{CH2}} = 18.00$ dB olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, aynı dalga boyunda çıkış iletimi verimlilikleri $T_{\text{CH1(TE)}} = \%84$ ve $T_{\text{CH2(TM)}} = \%73$ olarak hesaplanmıştır.

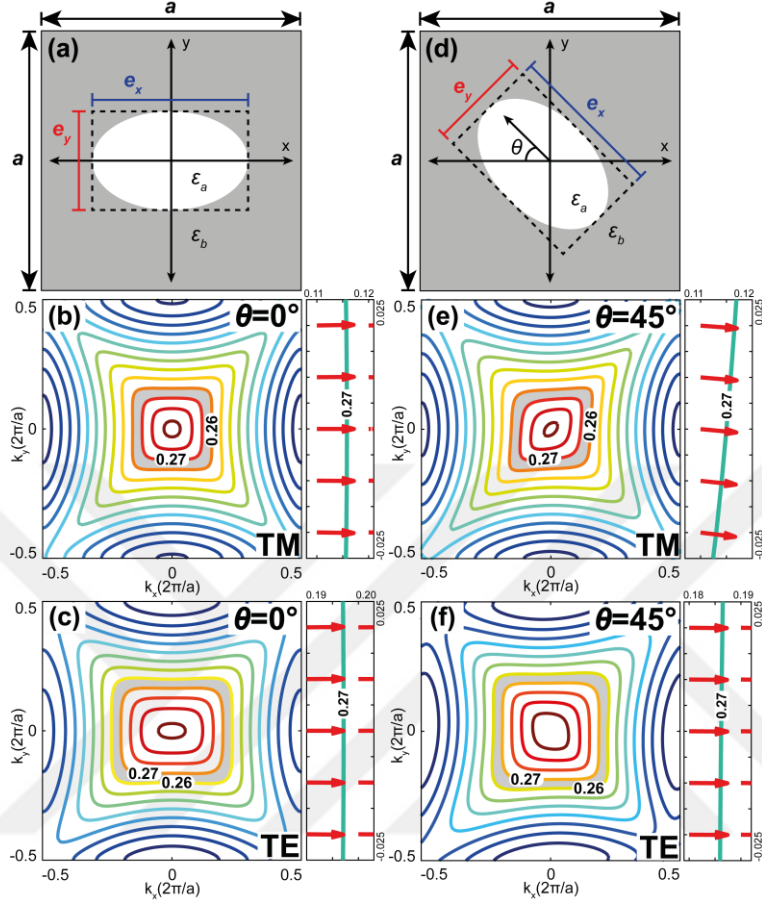
Bilindiği üzere nanometre ölçekli üretim süreçlerinde dikdörtgen şekilli yapıların üretimi, keskin kenarlarından dolayı bazı kısıtlamaları beraberinde getirmektedir. Tasarım sürecinde keskin kenarlı olarak dizayn edilen yapıların, üretim esnasında keskin kenarlı kısımlarında olası fabrikasyon hataları meydana gelebilmektedir. Bu tarz hatalar aygıtın performansında azalmalara neden olabilir ve daha kötüsü aygıtın istenen operasyonu yerine getirememesine neden olabilmektedir. Ayrıca, sunulan

tasarımda kullanılan dielektrik zeminin elektriksel geçirgenlik sabiti $\epsilon_b = 9.61$ olarak verilmiştir. Ancak, FED teknolojisinde sıklıkla kullanılan bir malzeme olan Silisyuma uygun ($\epsilon_s = 12$) bir aygıt tasarımı yapmak da önemlidir.

Düşük dönel simetrik FK yapılarının polarizasyon izolasyonu özelliği, C_2 simetrisine sahip diğer birim hücre yapılarına da uygulanabilir. Yani, polarizasyon ayırıcı aygıt tasarımı sadece keskin kenarlı dikdörtgen hava delikleri içeren birim hücrelerden ibaret değildir. Çalışmanın bundan sonraki aşamasında, polarizasyon ayırıcı özellik gösteren C_2 simetrik alternatif birim hücre türleri incelenecektir. Buna ek olarak, incelenen yapılar üretim elverişliliği bakımından ele alınacaktır ve FED teknolojisinde kullanılan malzeme yaklaşımları da göz önünde bulundurulacaktır.

Çalışmanın bu aşamasında, C_2 simetrik FK yapılarının polarizasyon ayırıcı özelliklerinin gösterimi için öncelikle eliptik deliklerden oluşan birim hücre yapıları seçilmiştir. Eliptik şekiller, C_2 dönel simetri grubunda yer alan temel geometrilere birisidir. Bu nedenle, polarizasyon ayırma özelliğinin tanıtımına ilk olarak eliptik birim hücre yapıları ile başlanmıştır. Şekil 3.7(a), $a \times a$ boyutundaki kare örgülü FK yapısına ait olan bir birim hücreyi temsil etmektedir. Verilen görselde temsil edilen elektriksel geçirgenlik sabitleri $\epsilon_b = 12$ ve $\epsilon_a = 1$ 'dir. Temsil edilen eliptik hava deliklerinin yapısal boyutları $e_x = 0.600a$ ve $e_y = 0.382a$ olarak belirlenmiştir. Verilen FK yapısının örgü sabiti $a = 411$ nm'dir ve birim hücrenin hava doluluk oranı $F_a = \%18$ olarak hesaplanmıştır. FK'ların dispersiyon özellikleri üzerindeki analizler, PWE metodu kullanılarak yapılmıştır [22]. Şekiller 3.7(b) ve 3.7(c), Şekil 3.7(a)'da temsil edilen birim hücre yapısının TM ve TE polarizasyonlara karşılık gelen 2. fotonik bant EFE'lerini göstermektedir. Verilen şekillerden görüleceği üzere, $a/\lambda = [0.260 - 0.270]$ normalize frekans aralığında dispersiyon eğrileri düz bir şekilde sahiptir. Bu olgu, daha önce de belirtildiği üzere, FK içerisinde yayılım gösteren elektromanyetik dalgaların verilen frekans aralığında öz-kolimasyon fenomeni gösterdiğini kanıtlamaktadır. Saçılmadan yayılım gösteren kolime dalgaların yapı içerisindeki ilerleme doğrultusu, birim hücrelerin oryantasyonu değiştirilerek kontrol edilebilir. Bu amaç doğrultusunda, Şekil 3.7(a)'da verilen eliptik hava delikleri kendi eksenleri etrafında $\theta = 45^\circ$ döndürülmüştür ve yeni birim hücre yapısı Şekil 3.7(d)'de temsil edilmektedir. Burada θ açısı, birim hücrenin açısal oryantasyonunu temsil etmektedir. Elde edilen yeni birim hücre

konfigürasyonuna ait TM ve TE polarizasyon EFE'ler sırasıyla Şekiller 3.7(e) ve 3.7(f)'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : (a) FK'nın birim hücre görünümü. Verilen birim hücre için (b) TM ve (c) TE polarizasyon 2. bant EFE grafikleri. (d) Birim hücrenin $\theta = 45^\circ$ için görünümü. Verilen birim hücre için (e) TM ve (f) TE polarizasyon 2. bant EFE grafikleri.

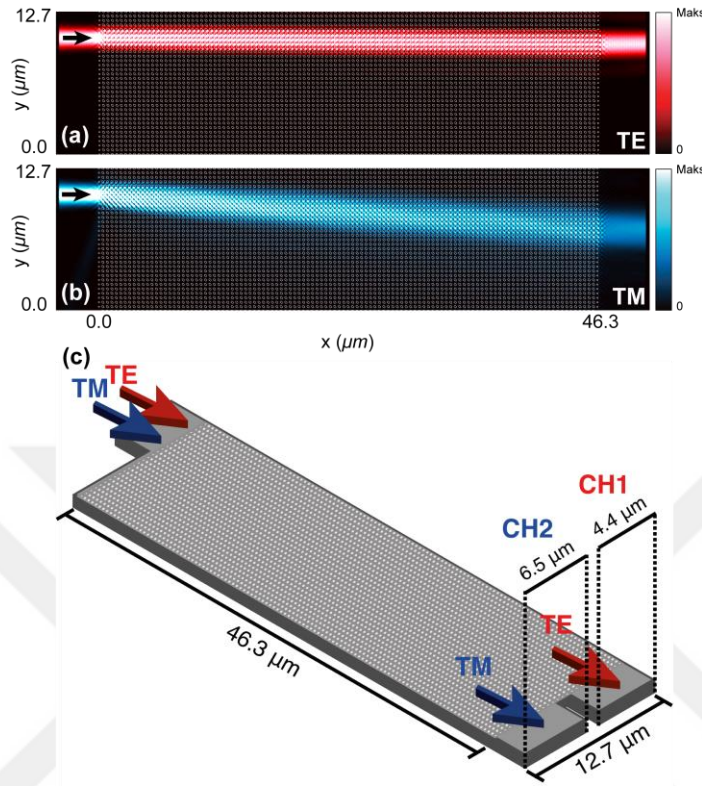
Verilen dispersiyon eğrileri incelendiğinde birim hücre oryantasyonundaki değişimin, çalışmanın ilk aşamasındaki gibi TM polarizasyon EFE'lerinde bir eğilmeye neden olduğu ancak benzer etkinin TE polarizasyon dispersiyon eğrilerinde ortaya çıkmadığı görülmektedir. Bilindiği üzere EFE'lerin gradyan vektörleri, elektromanyetik dalganın yapı içerisindeki iletim doğrultusu hakkında bilgi vermektedir. Buradan şu çıkarım yapılabilir: TM polarizasyon EFE'lerinde meydana gelen eğim nedeniyle, TM polarize dalga FK içerisinde eğik açı ile ilerleyecektir ve eğik öz-kolimasyon fenomenini ortaya çıkaracaktır. Öte yandan TE polarizasyon EFE'leri birim hücre oryantasyonundan fazla etkilenmediği için, TE polarize elektromanyetik dalgaların yapı içerisindeki iletim doğrultusunda bir değişim

gözlenmemektedir ve konvansiyonel öz-kolimasyon olgusunu korumaktadır. Ortaya çıkan polarizasyona hassas yönlü iletim özelliği, kusur içermeyen fotonik yapılar kullanılarak polarizasyon ayırıcı tasarımların yapılabilmesini sağlamaktadır.

Şekil 3.7’de verilen eliptik birim hücre yapısının boyutları seçilirken, öncelikle, farklı en ve boy değerleri için TM ve TE polarizasyon EFE’leri, $\theta = 45^\circ$ olduğu durumda hesaplanmıştır. Parametre havuzundaki elips boyutları taranırken, TM ve TE polarizasyonda görülen öz-kolimasyon fenomenlerinin aynı frekans aralıklarında ortaya çıkmasına özen gösterilmiştir. Bir sonraki aşamada, TM polarizasyon EFE’lerinin en çok eğim gösterdiği yapı değerleri seçilmiştir. Buna ek olarak, hava ortamında periyodik olarak hizalanan ve C_2 simetrik dielektrik çubuklar içeren birim hücre yapıları polarizasyona duyarlı öz-kolimasyon olgusunu gösterse de ortak bir frekans alanı bulunamadığından çalışmaya dahil edilmemiştir.

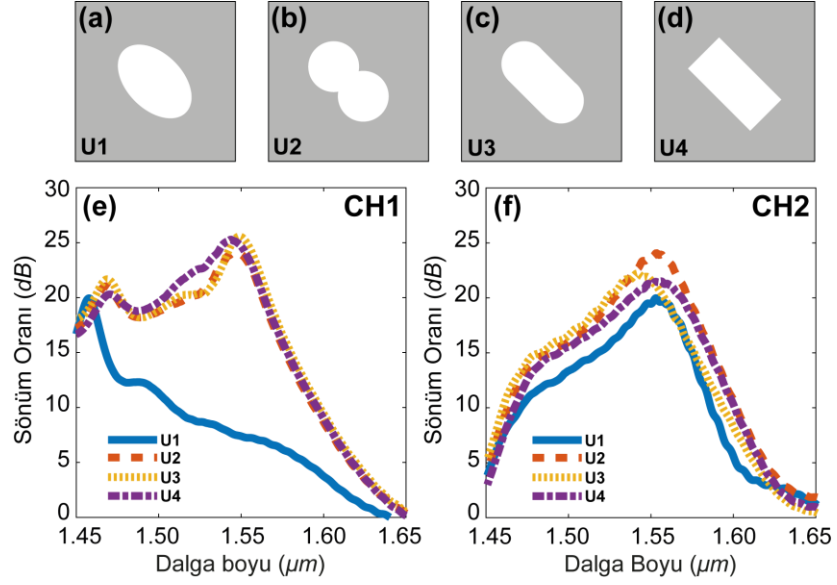
Yapının zaman alanındaki karakteristiğini analiz etmek amacıyla FDTD yönteminden faydalanılmıştır [23]. Şekiller 3.8(a) ve 3.8(b), tasarlanan FK yapısının içerisinde $a/\lambda = 0.265$ normalize frekansındaki elektromanyetik dalgaların TM ve TE polarizasyon alan yoğunluklarını göstermektedir. Verilen yapı, oryantasyonu $\theta = 45^\circ$ olan eliptik hava deliklerinden meydana gelmektedir. Şekil 3.7(e) ve 3.7(f)’de temsil edilen EFE’ler ile uyumlu olarak, TE polarizasyon için beklenen konvansiyonel öz-kolimasyon ve TM polarizasyon için beklenen eğik öz-kolimasyon olguları görülmektedir. Her iki polarizasyonda da öz-kolimasyon özelliğinin olmasından dolayı, yapı içerisinde ilerleyen dalgalarda dağılma olmamaktadır. Verilen sonuçlar göstermektedir ki dikey polarizasyonların ayrışımı eliptik hava deliklerinden oluşan FK’lar kullanılarak da mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, polarizasyon bölücü karakteristik, C_2 dönel simetri grubuna dahil olan diğer birim hücre türlerine de uygulanabilir. Önerilen polarizasyon ayırıcı özelliğini bir fotonik aygıt uygulamasına dönüştürmek amacıyla, tasarlanan yapıya giriş ve çıkış portları (CH1, CH2) tanımlanmıştır. İlgili fotonik aygıt, Şekil 3.8(c)’deki görselde temsil edilmiştir. Verilen fotonik aygıtın giriş ve çıkış portları, çalışmanın ilk aşamasında verilen fotonik aygıttan farklı olarak yeni sistem parametrelerine göre optimize edilmiştir. Kanal ayarlamaları, C_2 simetrik farklı birim hücrelerden optimum polarizasyon ayrışımı elde edilecek şekilde tasarlanmıştır. CH1 ve CH2 çıkış portlarının

genişlikleri sırasıyla $4.4 \mu\text{m}$ ve $6.5 \mu\text{m}$ 'dir. Tasarlanan yapının boyutu, örgü sabitinin $a = 411 \text{ nm}$ olduğu durumda, $46.3 \mu\text{m} \times 12.7 \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 3.8 : Eliptik hava deliklerinden oluşan FK'nın, $a/\lambda = 0.265$ normalize frekansında (a) TE ve (b) TM polarizasyon alan yoğunluğu dağılımları. (c) Aygıtın CH1 ve CH2 çıkış kanalları ile birlikte üç-boyutlu gösterimi.

Bu bölümde, eliptik birim hücreler ile aynı hava doluluk oranına sahip ve polarizasyon ayırıştırma özelliği gösteren C_2 simetrik alternatif FK yapıları tanıtılacaktır. Seçilen birim hücrelerin hava doluluk oranlarının ($F_a = \%18$) aynı seçilmesinin sebebi, polarizasyon ayırıştırma performanslarının aynı koşullar altında karşılaştırılmak istenmesidir. Şekiller 3.9(b), 3.9(c) ve 3.9(d), alternatif C_2 simetrik birim hücre yapılarını (U2, U3 ve U4) göstermektedir. Şekil 3.9'da verilen birim hücrelerden meydana gelen FK'ların polarizasyon sönüm oranlarını kıyaslamak amacıyla, CH1 ve CH2 kanallarında ölçümler alınmıştır. Şekil 3.9(e), CH1 çıkış kanalındaki polarizasyon sönüm oranlarını, $\lambda = [1.45 - 1.65 \mu\text{m}]$ dalga boyları arasında göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 3.9(f), verilen 4 adet birim hücre yapısına karşılık gelen polarizasyon sönüm oranlarını CH2 çıkış kanalı için göstermektedir.



Şekil 3.9 : C_2 simetrik hava delikleri içeren farklı birim hücre türleri: (a) U1, (b) U2, (c) U3 ve (d) U4. Verilen birim hücre yapıları ile tasarlanan aygıtın (e) CH1 ve (f) CH2 çıkış kanallarındaki polarizasyon sönüm oranları.

Her iki grafikte de farklı birim hücre türlerine karşılık gelen eğriler, farklı çizgi ve renkler ile gösterilmiştir. Şekil 3.9(e) incelendiğinde, CH1 çıkış kanalında ölçülen polarizasyon sönüm oranı değerlerinin U2, U3 ve U4 birim hücreleri için benzer karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, U1 birim hücresinden oluşan FK'nın polarizasyon sönüm oranı, diğer birim hücrelerden farklıdır. PER_{CH1} değerinin U1 (eliptik) birim hücresi için daha düşük olmasının sebebi ilgili EFE'lerde yatmaktadır. Eliptik hava deliklerinden oluşan fotonik aygıtın çıkışındaki polarizasyon ayrışımı, TM polarizasyon EFE'lerinin eğiminin, diğer birim hücre türlerine karşılık gelen TM polarizasyon EFE'lerinin eğiminden daha küçük olmasından dolayı düşüktür. Öte yandan U2, U3 ve U4 birim hücre türleri için PER_{CH1} nispeten daha yüksektir, çünkü bu birim hücrelerin TM polarizasyon EFE'lerindeki eğim miktarı fazladır. U1 birim hücresi ile U2, U3 ve U4 birim hücrelerine karşılık gelen PER_{CH1} değerleri arasındaki bu fark, PER_{CH2} için söz konusu değildir. Bunun nedeni, TM polarizasyon EFE'lerindeki eğimsel farkın, CH2 çıkış kanalındaki TE polarizasyon iletim gücüne bir etkisinin olmamasıdır.

Çizelge 3.1, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ dalga boyunda yapının çıkış kanallarında ölçülen iletim gücü ve polarizasyon sönüm oranlarını her bir birim hücre yapısı için temsil etmektedir. Şekil 3.9(e) ve 3.9(f)'den beklendiği üzere, CH2 çıkış kanalında TM

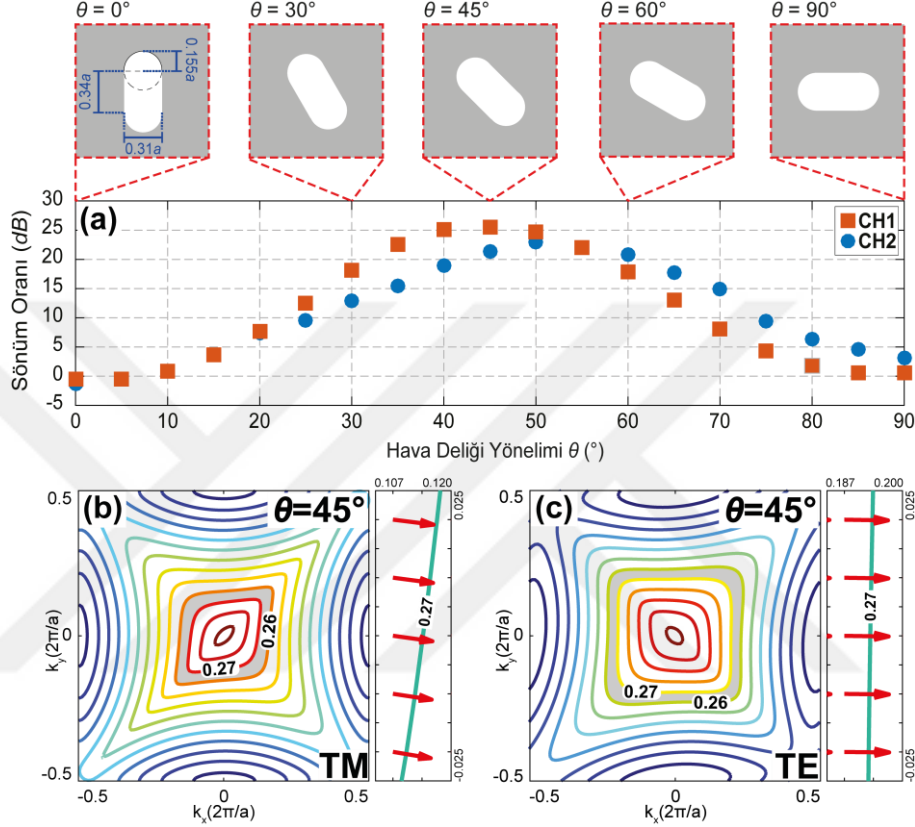
polarizasyon iletim gücünün düşük olmasından dolayı, U1 birim hücresi için polarizasyon sönüm oranı en düşük seviyededir. Öte yandan, diğer birim hücreler için CH1 çıkış kanalında %85'in üzerinde çıkış iletimi mevcutken, bu değer CH2 için %71'dir. Buna ek olarak, U2, U3 ve U4 birim hücreleri için PER_{CH1} ve PER_{CH2} değerlerinin 20 dB'den yüksek olduğu görülmektedir. Polarizasyon ayırıştırma performansı ve fabrikasyon elverişliliği nedeniyle, önerilen fotonik aygıt, bundan sonraki kısımda U3 tipi birim hücre üzerinden incelenecektir. Burada, U2 ve U4 tipi birim hücrelerin seçilmemesinin sebebi, sahip oldukları keskin kenarlar nedeniyle yüksek çözünürlüklü üretim işlemleri gerektirmeleridir.

Çizelge 3.1 : FK'ların $\lambda = 1550$ nm'de performans değerleri.

Birim Hücre	İletim (CH1)	İletim (CH2)	PER_{CH1} (dB)	PER_{CH2} (dB)
U1	% 92.8	% 30.3	7.4	19.6
U2	% 92.8	% 71.1	23.9	23.8
U3	% 87.7	% 72.5	25.5	21.5
U4	% 93.0	% 73.9	24.7	21.3

Düşük dönel simetrik birim hücrelerin sahip oldukları spektral özelliklerin oryantasyonlarına bağlı olarak değişmesi sebebiyle, θ açısının farklı değerleri optimum polarizasyon ayırıştırma performansını elde etmek amacıyla taranmıştır. Şekil 3.10(a), PER_{CH1} ve PER_{CH2} değerlerinin, θ açısının değişimine bağlı olarak $\lambda = 1.55$ μm 'de aldığı değerleri 5°'lik adımlar ile göstermektedir. Örnek olarak seçilen oryantasyon açılarındaki birim hücrelerin gösterimi de aynı şekilde temsili olarak verilmiştir. Verilen şekilden görülebileceği üzere, TM polarizasyon EFE'lerinin maksimum eğim açısı $\theta = 45^\circ$ ve komşuluğunda sağlanmaktadır. Bu nedenle, maksimum polarizasyon ayırıştırma performansını elde etmek amacıyla birim hücredeki hava deliklerinin oryantasyonu $\theta = 45^\circ$ olarak sabitlenmiştir. Şekiller 3.10(b) ve 3.10(c), U3 tipi birim hücrenin TM ve TE polarizasyonlara karşılık gelen EFE'lerini göstermektedir. Şekil 3.7(e)'de verilen TM polarizasyon EFE'leri ile karşılaştırıldığında, U3 tipi birim hücrenin neden daha iyi polarizasyon ayırıştırma performansına sahip olduğu görülmektedir: Gözlendiği üzere, U3 tipi birim hücrenin TM polarizasyon EFE'lerindeki eğim, eliptik birim hücreye göre daha fazladır. Şekil 3.10(a) incelendiğinde, $\theta = [35^\circ-55^\circ]$ aralığında PER_{CH1} 20 dB değerinin üstündedir.

Ek olarak, $\theta = [40^\circ-60^\circ]$ aralığında, PER_{CH2} değeri ise 18 dB'nin üzerindedir. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere, önerilen yapının polarizasyon ayrıştırma performansı geniş bir oryantasyon açısı aralığı için yüksektir. Bu durum, önerilen polarizasyon ayırıcı tasarımın, birim hücrelerin oryantasyon açılarındaki olası üretim hatalarına karşı kabul edilebilir bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

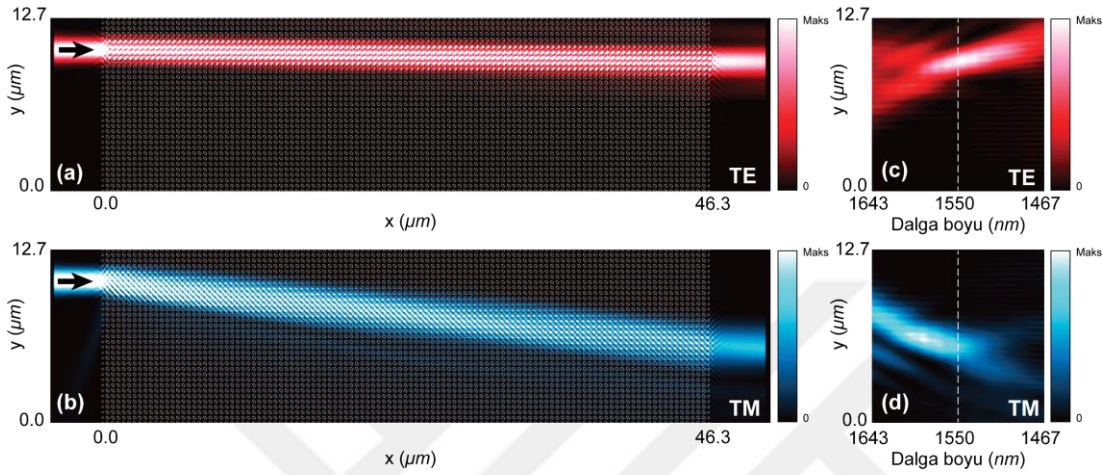


Şekil 3.10 : (a) CH1 ve CH2 çıkış portlarındaki polarizasyon sönüm oranının açısal yönetime göre değişimi. $\theta = 45^\circ$ için, U3 numaralı birim hücreye karşılık gelen (b) TM ve (c) TE polarizasyon 2. bant EFE'leri.

Aygıtın polarizasyon sönüm oranları, şimdiye kadar $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ dalga boyunda verilmiştir. Ancak, fotonik uygulamalar için çalışma bant genişliği de önemlidir. Tasarlanan yapının PER_{CH1} ve PER_{CH2} değerleri, optik C-bant dalga boylarında sırasıyla 20.7 dB ve 17.96 dB'den fazladır. Fotonik aygıtın çalışma dalga boyu, $a/\lambda = [0.260 - 0.270]$ normalize frekans aralığına karşılık gelecek şekilde $\Delta\lambda = 59 \text{ nm}$ olarak hesaplanmıştır.

U3 tipi birim hücrelerden oluşan fotonik tasarımın $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 'deki TM ve TE polarizasyon alan yoğunlukları Şekiller 3.11(a) ve 3.11(b)'de verilmiştir. Eliptik

birim hücrelerden oluşan fotonik ağıta denk gelen alan yoğunlukları ile karşılaştırıldığında, U3 tipi birim hücre için yapı içerisindeki polarizasyon ayrışımının daha fazla olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere bunun nedeni, TM polarizasyon EFE'lerinin eğim açılarının U3 tipi birim hücre için daha yüksek olmasıdır.



Şekil 3.11 : U3 numaralı birim hücreden oluşan polarizasyon ayrıcının $\lambda = 1550$ nm'de (a) TE ve (b) TM polarizasyon alan yoğunlukları. (c) TE ve (d) TM polarizasyon alan yoğunluklarının çıkış pozisyonlarının dalga boyuna göre değişimi.

Şekiller 3.11(c) ve 3.11(d), $\lambda = [1467 - 1643$ nm] dalga boyu aralığında aygıtın sonundan çıkan TM ve TE polarize dalgaların alan yoğunluklarındaki konumsal değişimi dalga boyuna göre göstermektedir. Verilen şekiller incelendiğinde, çalışma frekansındaki artışa bağlı olarak, TM polarize dalgaların yapıdan çıkış yaptığı noktanın -y yönünde kaymaya başladığı görülmektedir. Bununla birlikte, TE polarizasyona sahip dalgalar çalışma frekansı arttıkça +y yönünde değişim göstermektedir.

3.1.3 Sonuçlar

Bu çalışmada, düşük döneel simetrik FK'ların polarizasyona hassas öz-kolimasyon özelliklerini kullanarak yeni bir polarizasyon ayrıştırıcı konsepti frekans ve zaman alanlarında numerik olarak incelenmiştir. C_2 simetrik birim hücrelerin kendilerine özgü dispersiyon özellikleri kullanılarak, TM ve TE polarizasyonlara sahip elektromanyetik dalgaların ayrışımı yapılmıştır. Çalışmada 4 adet birim hücre türü incelenmiş ve bu yapıların sunduğu polarizasyon ayrışım karakteristikleri

karşılaştırılmıştır. Önerilen aygıtın çıkış portlarındaki sönüm oranlarının her iki polarizasyon için 20 dB'den yüksek değerlere eriştiği görülmüştür.

3.2 Sıfır Kırıcılık İndisli Anizotropik Ortamlar

3.2.1 Giriş

Literatüre girdikleri ilk andan itibaren, FK yapılarının birçok özelliği keşfedilmektedir. Bu özelliklerden birisi, altıgen örgüye sahip FK'ların Brillouin bölgelerinin köşe noktalarında boy gösteren doğrusal tekillik ile ortaya çıkan fotonik Dirac konisidir. Fotonik Dirac konisi, grafen gibi elektronik katı hâl sistemlerinde görülen Dirac konisinin optik eşdeğeri ve kuantum Hall etkisi [38] ve "zitterbewegung" [39] gibi önemli karakteristikleri göstermektedir. Son zamanlarda, Huang ve ekibinin [10] yayınladıkları çalışma ile başlayarak, fotonik Dirac konisinin tanımı genişlemiştir ve "Dirac-benzeri konik dispersiyon" (DBK) olgusu kanıtlanmıştır [10, 40-46]. DBK, belirli yapı parametrelerine sahip dielektrik çubuklardan oluşan FK yapılarının Brillouin bölgesi merkezinde ($k = 0$) yer almaktadır. Periyodik yapı, DBK noktasında EMNZ yani sıfır kırıcılık indisli malzeme davranışı göstermektedir. Tipik olarak EMNZ yapıların elektriksel ve manyetik geçirgenlikleri sıfıra yakınsamaktadır ($\epsilon^{\text{eff}} \approx \mu^{\text{eff}} \approx 0$) ve dolayısıyla kırıcılık indisleri yaklaşık olarak sıfırdır. DBK içeren FK'ların bu özellikleri kullanılarak, tek yönlü iletim [47], odaklama [48] ve cisim görünmezliği [10] gibi birçok fotonik uygulama tasarlanmıştır. Yukarıda örnekleri verilen FK tabanlı bu çalışmalardan önce, sıfır kırıcılık indisi gösteren malzemeler, metalik bileşenler içeren tasarımlar ile elde edilmiştir [49-55]. Ancak, bu yapıların elektriksel ve manyetik geçirgenlik katsayıları eş zamanlı olarak sıfıra eşit olmadığı için ($\epsilon^{\text{eff}} \approx 0, \mu^{\text{eff}} \neq 0$ veya $\epsilon^{\text{eff}} \neq 0, \mu^{\text{eff}} \approx 0$), buldukları ortam ile aralarında empedans farkı oluşmaktadır. Ortaya çıkan empedans uyumsuzluğu, tasarlanan aygıtların iletim verimliliklerinin iyi olmamasına sebep olmaktadır. Bu suni yapılar, etkin yapısal parametrelerine göre iki başlık altında toplanabilmektedir: $\epsilon^{\text{eff}} \approx 0, \mu^{\text{eff}} \neq 0$ ise ENZ ve $\epsilon^{\text{eff}} \neq 0, \mu^{\text{eff}} \approx 0$ ise MNZ. Erken dönem yaklaşımlarının sahip olduğu metalik bileşenler, empedans uyumsuzluğu ve karmaşık tasarımlar nedeniyle, DBK'ya sahip FK'lar kırıcılık indisi sıfıra eşit olan ortamlar elde etmek için uygun bir alternatiftir.

DBK'ya sahip FK'lar elektromanyetik dalgaların tüm yayılım yönleri için izotropik bir karakteristiğe sahiptir. Yani, elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerleri yapının bütün doğrultuları boyunca aynıdır. Bu özelliklerinden dolayı, DBK tabanlı fotonik aygıt uygulamalarında, arzulanmayan doğrultulardaki ışık iletimini engellemek için yansıtıcı katmanlar kullanılması gerekmektedir. Ayrıca DBK, spesifik birim hücre konfigürasyonlarında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, tasarlanan birim hücre yapılarına karşılık gelen sadece tek bir DBK frekansı bulunmaktadır. Bu yapısal eşsizlik, farklı frekans noktalarında sıfır kırıcılık indisi gerektiren fotonik aygıt uygulamaları için istenmeyen bir durumdur. Yukarıda belirtilen kısıtlayıcı etmenler, DBK içeren FK'lara dayalı fotonik aygıt uygulamalarının tasarım ve optimizasyon aşamalarını güçleştirmektedir.

Sıfır kırıcılık indisi gösteren suni ortamları tasarlamak üzerine olan heves, bu malzemelerin elektromanyetik dalgalar ile alışılmıştan dışındaki etkileşimi altında yatmaktadır. Snell yasasına göre, sıfır kırıcılık indisinin temel fiziksel belirtilerinden birisi, bu malzemelerden çıkış yapan dalgaların yüzey normali ile 0° açı yaparak yoluna devam etmesidir. Ayrıca, bu malzeme üzerine düşen elektromanyetik dalgaların normal ile yaptığı geliş açısı 0° 'den farklı ise dalgalar sıfır kırıcılık indisli malzemenin yüzeyinden büyük oranda yansımaktadır. Kırıcılık indisinin sıfıra yakınsamasından dolayı yapı içerisinde yayılım gösteren dalgaların dalga boyları oldukça büyüktür. Çok büyük dalga boylarına sahip olarak ilerleyen dalgalar, sıfır kırıcılık indisi içeren malzemeler ile doldurulan dalga kılavuzlarındaki dirsek kayıplarını azaltabilir. Diğer bir deyişle elektromanyetik dalgalar, sıfır kırıcılık indisli ortamlar vasıtasıyla çok dar ve keskin kanallarda verimli bir şekilde tünellenebilir [55]. Ayrıca, yapı içerisindeki dalga boylarının çok büyük olmasından dolayı, yapı içerisindeki faz profili eş dağılım göstermektedir. Bu sayede, sıfır kırıcılık indisli ortamlardan ayrılan elektromanyetik dalgaların dalga önyüzleri istenen biçimde şekillendirilebilir [51].

Bu çalışmada, DBK fenomenine bir alternatif olarak, düşük dönel simetrik FK'ların sahip olduğu "yarım-Dirac konik dispersiyonu" (YDK) hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Önerilen FK tasarımları, DBK içeren periyodik ortamlardan farklı olarak anizotropik sıfır kırıcılık indisi özelliği göstermektedir [56, 57]. Bu çalışmada, YDK özelliği gösteren düşük dönel simetrik FK'ların avantajları ve

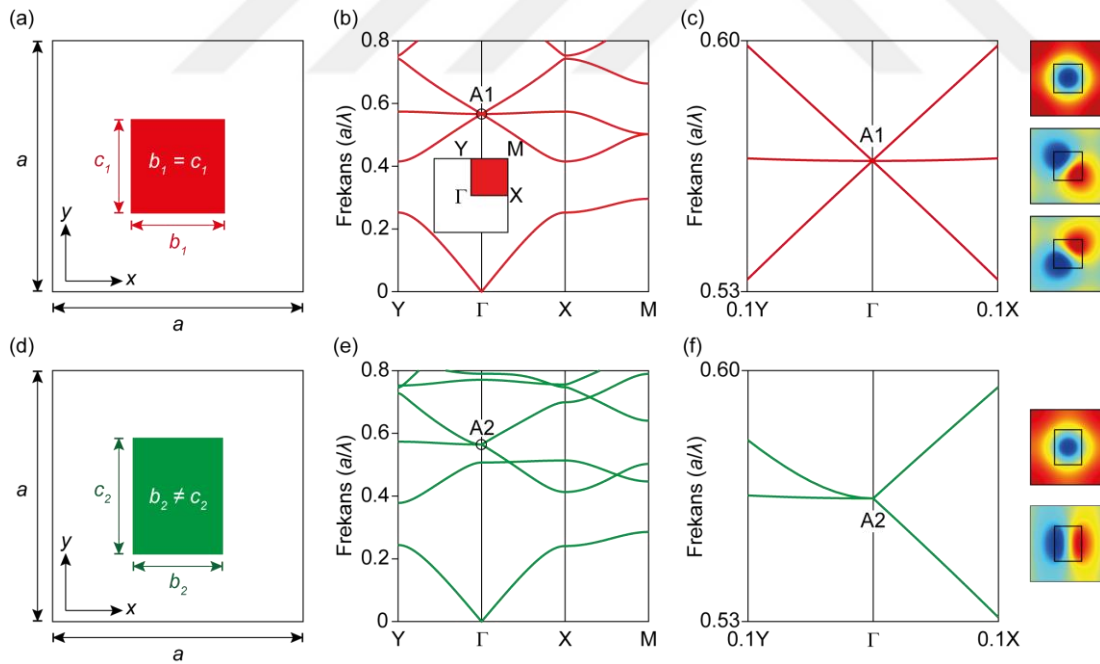
fotonik alanındaki aygıt uygulamaları üzerine odaklanılmıştır. DBK sahibi periyodik ortamlardan farklı olarak YDK içeren FK'lar, bir iletim yönü için düşük kayıplı EMNZ ortam davranışı gösterirken, dikey iletim yönü için uyumsuz empedanslı ENZ özelliğine sahiptir. Bu nedenle, önerilen düşük dönel simetrik ortamlar herhangi bir yansıtıcı katmana gerek olmadan elektromanyetik dalgaları tek bir doğrultuda iletmektedir.

Referanslar [56] ve [57]'de verilen çalışmalar, YDK özelliğini FK literatürüne ilk kez tanıtmış olsalar da keşfedilmeyi bekleyen özellikleri hala bulunmaktadır. Referans [56]'de verilen çalışma, tek bir birim hücre türü (eliptik dielektrik çubuklar) için sunulmuştur. Ayrıca, verilen eliptik birim hücrelerin tek bir boyutu için YDK fenomeni incelenmiştir. Öte yandan bu tez çalışmasında, YDK fenomenini oluşturmak için FK'ların farklı örgü türleri (kare ve dikdörtgen örgüler) ve farklı birim hücre türleri (dikdörtgen ve dairesel dielektrik çubuklar) incelenmiştir. Ayrıca, dairesel çubukların dikdörtgen örgüsü YDK fenomeninin yapısal olarak elverişli olmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak, birim hücrelerin geometrik parametrelerinin ayarlanarak YDK frekansının ayarlanabildiği de bu tez çalışmasında kanıtlanmaktadır. YDK frekansının kontrol edilebilirlik özelliği, tasarım ve üretim kısıtlamalarının söz konusu olduğu optik ve fotonik uygulamalarda faydalı olacaktır. Ayrıca, literatürde şimdiye kadar numerik analizler ile incelenen YDK fenomeni, bu tez çalışmasında mikrodalga deney sonuçları ile de doğrulanmıştır.

3.2.2 Frekans ve zaman alanı analizleri

Şekil 3.12(a), DBK özelliği gösteren kare örgülü FK'yı oluşturan C_4 simetrik ve $a \times a$ boyutlarındaki bir birim hücreyi temsil etmektedir. Verilen birim hücre, kare şekle sahip $b_1 = 0.378a$ ve $b_2 = 0.378a$ boyutlarındaki dielektrik elemanlardan oluşmaktadır. Dielektrik çubukların elektriksel geçirgenliği $\epsilon = 10.04$ 'dür. Burada "a" sembolü, örgü sabitini temsil etmektedir. Verilen birim hücre yapısı, 90° döndürüldükten sonra tekrar aynı görünüme kavuştuğundan dolayı C_4 dönel simetri grubunda yer almaktadır. FK'nın frekans alanındaki özelliklerini incelemek amacıyla PWE metodu kullanılmıştır [22]. Şekil 3.12(b), verilen FK'nın TM polarizasyon bant yapısını göstermektedir. Verilen şekilden görülebileceği üzere ikinci, üçüncü ve dördüncü dispersiyon bantları Brillouin bölgesinin merkezinde A1 ile gösterilen üçlü

eş-frekans noktasında “tesadüfi” olarak kesişmektedir. A1 ile gösterilen kesişim noktasına karşılık gelen frekans değeri $a/\lambda = 0.566$ 'dır. Buradaki “tesadüfi” kavramı, FK birim hücrelerinin yapısal parametrelerinin ayarlanarak eş-enerjili üç Bloch modunun Γ noktasında kesiştirilmesini tanımlamaktadır. Bu kesişim noktasına, yani A1 noktasına, DBK noktası adı verilmektedir. A1 noktasının çevresindeki doğrusal dispersiyon ilişkisine ise DBK adı verilmektedir. DBK'yı oluşturan dispersiyon bantları doğrusal olduğunda ve DBK frekansına karşılık gelen alan dağılımları 1 adet tek kutuplu ve 2 adet çift kutuplu modlardan oluştuğunda FK yapısı EMNZ davranışı sergilemektedir. Şekil 3.12(c), DBK noktası komşuluğundaki bant karakteristiğini ve bu noktadaki modların elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Verilen bant yapısının, DBK civarında 4 adet doğrusal ve 2 adet düz banttan oluştuğu görülmektedir. Buna ek olarak, A1 noktasındaki alan görüntülerinin 1 adet tek kutuplu ile 2 adet çift kutuplu moddan oluştuğu gözlemlenmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, Şekil 3.12(b)'de verilen dispersiyon ilişkisinin DBK olduğunu ve tasarlanan C_4 simetrik FK'nın A1 noktasında EMNZ davranışı sergileyeceğini doğrulamaktadır.

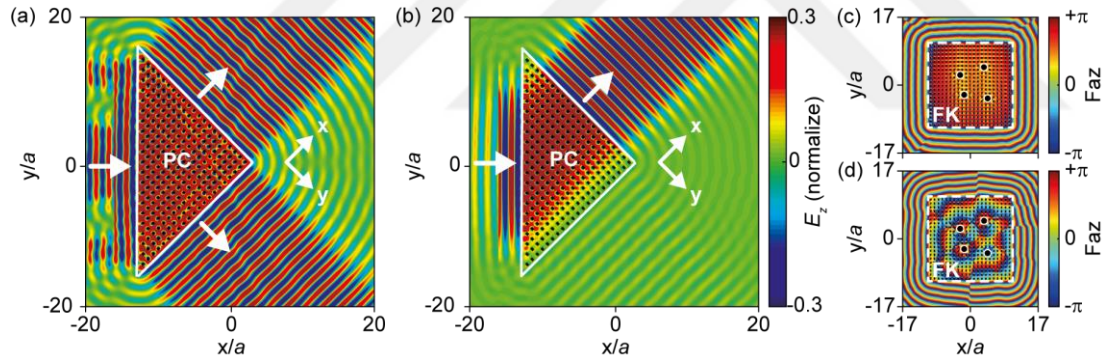


Şekil 3.12 : DBK özelliği gösteren C_4 simetrik (a) birim hücre ve (b) ilgili fotonik bant yapısı. (c) DBK'nın yakınlaştırılmış görüntüsü. YDK özelliği gösteren C_2 simetrik (d) birim hücre ve (e) ilgili fotonik bant yapısı. (f) YDK'nın yakınlaştırılmış görüntüsü.

Belirtildiği üzere, DBK içeren FK yapıları, yukarıda belirtilen özel gereksinimleri karşılıyorsa EMNZ ortam özellikleri göstermektedir. Öte yandan bazı spesifik fotonik uygulamalarda, ışığın efektif iletimi ve etkin yönlendirilmesi için FK'ların sağladığı anizotropik özelliklerden faydalanılması gerekmektedir. İzotropik bir ortama anizotropik materyallerin eklenmesi veya periyodik ortamı oluşturan yapıların geometrik özelliklerinin (birim hücrelerin şekli veya simetrisi) ayarlanması ile anizotropik periyodik ortamlar elde edilebilir. Örnek verilen ilk yaklaşımda, ilgili materyalin optik özellikleri dışarıdan uygulanan elektrik alan ile dinamik olarak kontrol edilebilir [58-63]. İkinci yaklaşım ise, birim hücrelerin dönele simetrisinin düşürülerek FK'nın EFE'lerinin uyarlanmasını ve periyodik ortamın anizotropik ortama dönüştürülmesini içermektedir [16, 20, 64]. Bu çalışmada sunulan anizotropik sıfır kırıcılık indisli periyodik ortamları elde ederken ikinci yaklaşımdan, yani FK'ların dönele simetri derecesindeki azalmadan yararlanılmıştır. Şekil 3.12(d), kare örgülü bir FK'yı oluşturan ve dikdörtgen şekilli dielektrik çubuklardan meydana gelen C_2 simetrik birim hücre yapısını göstermektedir. Dikdörtgen dielektrik çubukların elektriksel geçirgenlik sabiti $\varepsilon = 10.04$ olup, yapısal boyutları $b_2 = 0.360a$ ve $c_2 = 0.465a$ olarak belirlenmiştir. Birim hücre gösteriminden görülebileceği üzere dielektrik çubukların en-boy oranı dönele simetri üzerindeki azalma sebebiyle 1'e eşit değildir. Dönele simetri düşümünün, FK'nın fotonik bant yapısı üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla Şekil 3.12(e) hazırlanmıştır. Şekil 3.12(b)'de verilen DBK durumundan farklı olarak, Şekil 3.12(f)'de A2 noktasında sadece iki adet bant (üçüncü ve dördüncü bantlar) kesişmiştir. Bu kesişim noktasına YDK noktası adı verilmektedir. FK, YDK noktasına karşılık gelen frekanstaki bir dalga ile uyarıldığında anizotropik bir davranış göstermektedir. Yani, ΓX iletim doğrultusunda EMNZ malzeme olarak davranırken, ΓY yönü boyunca ENZ ortamı özellikleri göstermektedir. DBK özelliği gösteren FK yapılarına benzer şekilde, YDK içeren FK'lar sıfır kırıcılık indisi sergilemek için belirli gereksinimleri karşılamak zorundadır [56]. İlk olarak, YDK noktası komşuluğundaki dispersiyon ilişkisi bir simetri eksenini boyunca doğrusal bir bant yapısından meydana gelmek zorunda olup diğer simetri eksenini için ikinci dereceden ve düz bant yapılarını beraber içermelidir. İkinci olarak, $k = 0$ noktasında, yani Brillouin bölgesi merkezinde kesişen Bloch modlarına karşılık gelen alan dağılımları 1 adet tek kutuplu ve 1 adet çift kutuplu

modlar içermelidir. Tasarlanan C_2 simetrik FK'nın belirtilen kriterleri sağlayıp sağlamadığını tespit etmek amacıyla, $k = 0$ etrafındaki fotonik bant yapısının yakınlaştırılmış hali Şekil 3.12(f)'de gösterilmektedir. Verilen şekilden görüleceği üzere A2 noktası etrafındaki dispersiyon ilişkisi ΓY simetri eksenini boyunca düz ve ikinci dereceden iki adet bantın beraberliğinden oluşmaktadır. Öte yandan, ΓX simetri eksenini boyunca, iki adet doğrusal bant yapısı görülmektedir. Buna ek olarak, A2 noktasındaki modların elektrik alan dağılımları 1 adet tek kutuplu ve 1 adet çift kutuplu dağılım göstermektedir. Yapılan numerik hesaplamalar göstermektedir ki verilen C_2 simetrik FK yapısının sahip olduğu dispersiyon ilişkisi, YDK olarak tanımlanabilir.

DBK ve YDK özelliklerini gösteren FK'ların zaman alanındaki tepkilerini analiz etmek amacıyla FDTD yöntemi kullanılmıştır [23]. Şekiller 3.13(a) ve 3.13(b)'de birim hücreleri, üçgen bir FK oluşturacak şekilde dizilen ve sırasıyla DBK ile YDK frekanslarında Gauss genlik profiline sahip bir dalga kaynağı ile uyarılan periyodik ortamlar görülmektedir.



Şekil 3.13 : (a) C_4 simetrik ve (b) C_2 simetrik FK'lara ait elektrik alan profilleri. (c) YDK noktası komşuluğunda ($a/\lambda = 0.569$) ve (d) $a/\lambda = 0.602$ 'de çalışan 4 adet asimetrik dağıtılmış nokta kaynağı ile uyarılan C_2 simetrik FK yapısının faz dağılımı.

Şekil 3.13(a), DBK özellikli ve C_4 simetrik birim hücrelerden meydana gelen FK'nın elektrik alan profilini temsil etmektedir. Verilen yapı, $a/\lambda = 0.566$ normalize frekansında uyarılmıştır. İlgili elektrik alan profili, EMNZ ortamlarındaki ışık-madde etkileşiminin iki temel unsurunu da sergilemektedir. İlk olarak, verilen FK yapısı içerisinde yayılım gösteren elektromanyetik dalgaların faz hızı sonsuza yakınsadığı için, dalga boyu çok büyüktür. Bu nedenle yapı içerisindeki faz karakteristiği eş-dağılımlıdır. İkincisi, Snell yasası ile uyumlu olarak, üçgen şekilli periyodik

ortamdan çıkış yapan dalgalar hava-FK ara yüzeyine dik açı yapan doğrultuda ilerlemektedir. Ayrıca, yapıdan ayrılan dalgalar düzlem dalga görünümüne sahiptir ve hava-FK ara yüzeyinin şeklini taklit etmektedir. DBK ilişkisine sahip olan FK yapıları izotropik sıfır kırıcılık indisine sahip olduğundan, Γ_X ve Γ_Y doğrultuları boyunca çıkış yapan elektromanyetik dalgaların şiddetleri eşittir (bkz. Şekil 3.13(a)). Ancak bu durum, tasarlanacak olan fotonik uygulamalarda ışığın yönlendirilmesi ve kaçakların engellenmesi bakımından bir dezavantaj olabilir. Bu nedenle, dalgaların çıkış yaptığı iki adet yüzeyden birine yansıtıcı bir yüzey eklenmesi gerekebilir. Şekil 3.13(b), YDK konseptine sahip olan C_2 simetrik FK'nın elektrik alan dağılımını göstermektedir. Verilen yapı YDK frekansında ($a/\lambda = 0.564$) çalışan bir dalga kaynağı ile uyarılmıştır. İlgili elektrik alan dağılımı incelendiğinde asimetric ışık iletimi rahatlıkla görülmektedir. YDK'nın anizotropik dağılımı sebebiyle, FK'dan çıkan dalgalar üçgenin üst kenarından yüksek güç ile ayrılmaktadır ve alt kenardaki çıkış gücü ise ciddi oranda düşüktür. Ölçülen çıkış iletim güçlerine göre, üst kenardaki çıkış verimliliği $T_{üst} = \%81.646$ ve alt kanaldaki çıkış verimliliği $T_{alt} = \%0.002$ 'dir. Bu durum şu şekilde yorumlanabilir: Önerilen C_2 simetrik FK yapısı Γ_X yönü boyunca EMNZ ve Γ_Y doğrultusu boyunca ENZ ortam olarak davranmaktadır. Bilindiği üzere, ENZ ortamların elektriksel geçirgenlikleri sıfıra yakınsarken ($\epsilon^{eff} \approx 0$), manyetik geçirgenlikleri sıfırdan farklıdır ($\mu^{eff} \neq 0$). Manyetik geçirgenliğin sıfıra eşit olmamasından dolayı, FK ile hava ortamı arasında empedans uyumsuzluğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle elektromanyetik dalgalar, yapı içerisinde Γ_Y doğrultusu boyunca hapsolmektedir. Bununla birlikte, Γ_X yönü boyunca hem elektriksel hem de manyetik geçirgenlik sabitleri sıfıra yakınsamaktadır ($\epsilon^{eff} \approx \mu^{eff} \approx 0$) ve FK yapısı Γ_X yönü boyunca EMNZ ortam davranışı sergilemektedir. Elektriksel ve manyetik geçirgenliklerin eş zamanlı olarak sıfıra yakınsaması, Γ_X yönü boyunca empedans uyumlu ve yüksek iletim gösteren bir FK meydana getirmektedir. Bu durum, verilen FK'nın elektromanyetik dalgaları Γ_X boyunca iletmesi ve Γ_Y yönü boyunca hapsedmesinin nedenidir. C_2 simetrik FK'nın sıfır kırıcılık indisi özelliği, Şekil 3.13(b)'de verilen elektrik alan profilinde görülmektedir. İlk olarak, yapı içerisindeki faz dağılımı, DBK durumuna benzer şekilde eş-dağılım göstermektedir. İkincisi, fotonik yapıdan çıkış yapan dalgaların dalga ön yüzleri, düzlem dalga karakteristiği göstermektedir. Burada şunu belirtmek

gerekir ki ΓY yönündeki çıkış iletimi her ne kadar düşük olsa da yapı yine bu yönde de sıfır kırıcılık indisine sahiptir. Bu durum, ΓY yönünde çıkış yapan dalgaların dalga ön yüzlerinin düzlem dalga karakteristiğine sahip olmasından anlaşılmaktadır. YDK ilişkisi gösteren FK'lar, yöne bağımlı iletim karakteristikleri sayesinde DBK içeren periyodik ortamlar üzerinde fotonik aygıt uygulamaları bakımından avantaja sahiptir.

EMNZ ortamlarda yayılım gösteren elektromanyetik dalgaların dalga boyu, serbest uzaydaki dalga boyuna göre oldukça büyüktür ve bu nedenle yapı içerisindeki faz profili eş-dağılımlıdır. Bu durum, FK içerisindeki dalgaların eş-evresel olmasını sağlamaktadır. Böylece YDK ilişkisine sahip olan FK'lar, içerisine birden fazla dalga kaynağı eklense dahi tek yönlü iletim özelliklerini korumaktadır. Bu fenomeni kanıtlamak amacıyla, C_2 simetrik FK, içerisine rastgele dağıtılan ve YDK noktasında yakın bir frekansta ($a/\lambda = 0.569$) çalışan 4 adet nokta kaynak ile uyarılmıştır ve faz dağılımları Şekil 3.13(c)'de verilmiştir. Verilen şekilde siyah renk ile temsil edilen noktalar, nokta kaynakların yapı içerisindeki konumlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde yapı içerisindeki faz profilinin eş-dağılımlı olduğu görülmektedir. Buna karşın, nokta kaynakların çalışma frekansı $a/\lambda = 0.602$ normalize frekansına yükseltildiğinde yapı içerisindeki faz dağılımının eş-dağılımlı karakteristiğini ve yapıdan çıkan dalgaların düzlem dalga özelliğini kaybettiği Şekil 3.13(d)'de görülmektedir.

Verilen FK'ların izotropik ve anizotropik sıfır kırıcılık indisi özellikleri şimdiye kadar yapıların içerisindeki elektrik alan ve faz özellikleri vasıtasıyla kanıtlanmıştır. Ancak önerilen yapıların etkin ortam parametrelerinin hesaplanması, mevcut FK'ların sıfır kırıcılık indisi ile bağdaştırılması bakımından gereklidir. Etkin ortam yaklaşımları, genellikle, dalga boyunun periyodiklik sabitinden daha büyük olduğu durumlarda geçerlidir ve bu çalışmada kullanılan dalga boyları etkin ortam yaklaşımlarını doğru bir şekilde uygulamak için yeteri kadar küçük değildir. Yine de DBK ve YDK noktalarının Brillouin bölgesi merkezinde yer almalarından dolayı önerilen FK'lar için etkin ortam hesaplamaları yapılabilir [10]. Tasarlanan yapıların etkin ortam parametrelerini elde etmek amacıyla, Wu'nun çalışmasında kullandığı yaklaşımdan faydalanılmıştır [56]. İlk olarak, Eşitlik (3.2)'de verilen temel eşitlikler dikkate alınmıştır.

$$\bar{D}_z = \varepsilon^{eff} \bar{E}_z, \begin{bmatrix} \bar{B}_x \\ \bar{B}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_x^{eff} & 0 \\ 0 & \mu_y^{eff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{H}_x \\ \bar{H}_y \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de verilen ortalama alan değerlerinin hesaplanmasında, birim hücre sınırlarındaki mod alanlarının değerleri ele alınmıştır. Etkin ortam parametrelerinin çıkarımında, ortalama alan değerleri dalga vektörünün (k) yönüne göre düzenlenmiştir. Örneğin, ΓX yönü boyunca uyarılan FK için elektrik ve manyetik ortalama alan değerleri şöyledir:

$$\bar{E}_z = \frac{\int_{-0.5a}^{0.5a} E_z(x=-0.5a) dy}{2a} + \frac{\int_{-0.5a}^{0.5a} E_z(x=0.5a) dy}{2a} \quad (3.3)$$

$$\bar{H}_y = \frac{\int_{-0.5a}^{0.5a} H_y(x=-0.5a) dy}{2a} + \frac{\int_{-0.5a}^{0.5a} H_y(x=0.5a) dy}{2a} \quad (3.4)$$

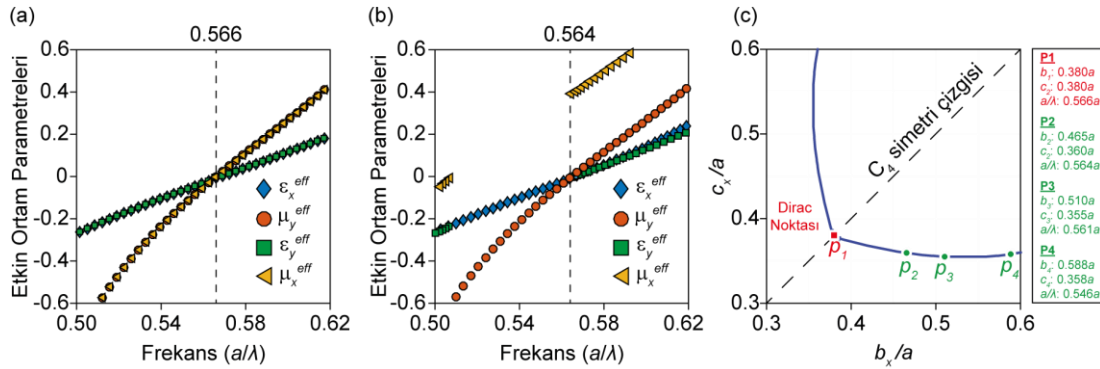
Elektrik ve manyetik alan yoğunluklarının ortalama değerleri ise şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\bar{D}_z = \frac{\int_{-0.5a}^{0.5a} H_y(x=0.5a) dy}{-j\omega a^2} - \frac{\int_{-0.5a}^{0.5a} H_y(x=-0.5a) dy}{-j\omega a^2} \quad (3.5)$$

$$\bar{B}_y = \frac{\int_{-0.5a}^{0.5a} E_z(x=0.5a) dy}{j\omega a^2} - \frac{\int_{-0.5a}^{0.5a} E_z(x=-0.5a) dy}{j\omega a^2} \quad (3.6)$$

Şekiller 3.14(a) ve 3.14(b), sırasıyla DBK ve YDK özellikli FK'lara karşılık gelen etkin ortam parametrelerini frekansa bağlı olarak göstermektedir. Şekil 3.14(a)'da C_4 simetrik FK'nın frekansa bağımlı optik parametreleri ΓX ve ΓY simetri doğrultuları boyunca hesaplanmıştır. Burada, incelenen yapı izotropik bir karakteristiğe sahip olduğu için ΓX yönü boyunca hesaplanan etkin ortam parametreleri ΓY iletim yönü için de aynıdır. Bu nedenle, verilen grafikteki etkin ortam parametreleri her iki iletim yönü için üst üste gelmektedir. Şekil 3.14(a)'dan görülebileceği üzere $\varepsilon_{x,y}^{eff}$ ve $\mu_{x,y}^{eff}$ parametrelerini temsil eden eğriler, DBK noktası olan $a/\lambda = 0.566$ normalize frekansında kesişmektedir. Dahası, önceki yorumlar ile paralel olarak, etkin ortam parametrelerinin bu noktadaki değerlerinin $\varepsilon_{x,y}^{eff} \approx \mu_{x,y}^{eff} \approx 0$ olduğu görülmektedir ve bu durum, verilen FK'nın ΓX ve ΓY iletim yönleri için DBK frekansında EMNZ ortam davranışı gösterdiğini kanıtlamaktadır. Etkin ortam parametrelerinin çalışılan frekans aralığındaki sürekli ilişkisi nedeniyle, önerilen yapı sıfır kırıcılık indisi özelliğine ek olarak DBK noktasının üzerinde pozitif kırıcılık indisi ($\varepsilon_{x,y}^{eff} > 0$ ve $\mu_{x,y}^{eff} > 0$) ve DBK noktasının altında ise negatif kırıcılık indisi ($\varepsilon_{x,y}^{eff} < 0$ ve $\mu_{x,y}^{eff} < 0$)

0) özelliğine sahiptir. DBK ve YDK ilişkilerini karşılaştırmak amacıyla C_2 simetrik FK için de etkin ortam parametreleri hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekil 3.14(b)'de temsil edilmektedir. C_2 simetrik FK'nın anizotropik yapısından dolayı, DBK'lı ortamdan farklı olarak, Γ_X ve Γ_Y iletim yönleri için etkin ortam parametrelerinin birbirinden farklı olması beklenmektedir. Şekil 3.14(b)'de görülebileceği üzere Γ_X yönü için hesaplanan elektriksel ve manyetik geçirgenlik parametrelerinin değişim karakteristiği DBK gösteren FK'nın etkin ortam eğrisine benzemektedir. Öte yandan, verilen yapının anizotropik özelliklerinden dolayı, Γ_Y yönü boyunca hesaplanan etkin ortam parametreleri farklı bir karakteristiğe sahiptir. DBK'dan farklı olarak, ϵ_y^{eff} ve μ_x^{eff} parametreleri YDK frekansında ($a/\lambda = 0.564$) kesişmemektedir. Ayrıca $\epsilon_y^{eff} \approx 0$ olsa bile, μ_x^{eff} parametresi 0 değerine asla yaklaşmamaktadır. Bu bağlamda, YDK frekansında $\epsilon_y^{eff} \approx 0$ ve $\mu_x^{eff} \neq 0$ olduğu için Γ_Y iletim yönü boyunca FK, ENZ ortamı olarak davranmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere YDK noktasında manyetik geçirgenlik $\mu_x^{eff} \neq 0$ olduğundan, optik empedans, yani $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$, hava ortamı ile uyumlu değildir ve Γ_Y yönü boyunca iletim verimliliği düşmektedir. Burada ayrıca şunu vurgulamak gerekmektedir: $a/\lambda = [0.507 - 0.564]$ normalize frekans aralığında Γ_Y yönü boyunca kısmi FYB mevcut olduğundan, bu aralığa karşılık gelen etkin ortam parametreleri grafikte yer almamaktadır.



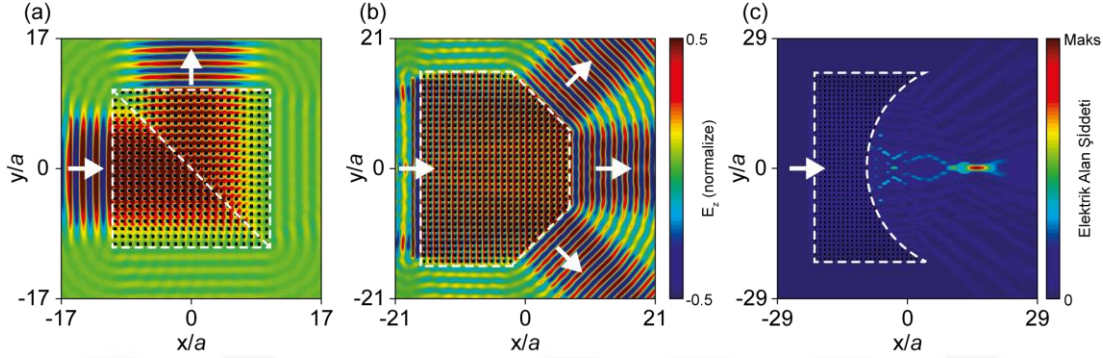
Şekil 3.14 : (a) DBK ve (b) YDK içeren FK'lar için Γ_X ve Γ_Y doğrultuları boyunca frekansa bağlı etkin ortam parametreleri. (c) C_2 simetrik birim hücrelerin farklı boyutlarına göre YDK noktasının değişimi.

Bilindiği üzere, kırıcılık indisi sabit olan dielektrik çubuklardan oluşan birim hücreler için sadece tek bir DBK frekansı bulunmaktadır. DBK frekansının sadece belirli yapısal parametrelerde ortaya çıkması, bu noktanın istenen frekans değerine ayarlanmasını engellemektedir. Bu olgu, sıfır kırıcılık indisi gösteren ortamların

kullanımını gerektiren fotonik uygulamaların tasarımında kısıtlamalara neden olabilmektedir. Ayrıca, DBK içeren FK'ların spesifik yapısal parametreleri üretim sürecinde bazı kısıtlamaları da beraberinde getirebilmektedir. YDK gösteren FK'lar bu sorunlara bir alternatif olabilir. YDK'nın ayarlanabilirlik serbestliğini araştırmak amacıyla, Şekil 3.12(d)'de verilen dikdörtgen dielektrik çubukların yapısal parametreleri (b_2 ve c_2) belirli bir aralıkta taranmıştır. Şekil 3.14(c)'de, taranan yapısal parametrelere karşılık gelen ve YDK ortaya çıkan noktaları temsil eden eğriler gösterilmiştir. P_1 ile gösterilen nokta, DBK özelliği gösteren C_4 simetrik FK birim hücresinin yapı parametrelerini temsil etmektedir ve bu yapı Şekil 3.12(a)'da temsil edilen birim hücre yapısına karşılık gelmektedir. P_1 noktasından uzaklaştıkça, dielektrik çubukların en ve boy değerleri eşitliklerini kaybettiğinden, birim hücre yapısı C_4 simetri durumundan C_2 simetrisine geçiş yapmaktadır. Burada vurgulamak gerekir ki bu yapısal dönüşüm esnasında DBK özelliği de YDK'ya geçiş yapmaktadır. Ortaya çıkan YDK noktaları, birim hücrelerin en-boy oranlarına göre farklı frekanslarda ortaya çıkmaktadır. Örneğin P_2 , P_3 ve P_4 noktaları, dikdörtgen şekilli dielektrik çubukların farklı en-boy oranlarına karşılık gelmekte olup farklı frekans noktalarında YDK konsepti göstermektedir. P_2 , P_3 ve P_4 noktalarına karşılık gelen yapı parametreleri ve ilgili YDK frekansları aynı görsel üzerinde sunulmuştur. Bu yorumlar göstermektedir ki YDK içeren FK'lar, istenen birim hücre konfigürasyonlarına ve YDK frekanslarına göre ayarlanabilmektedir. Bu durum, DBK içeren FK'lara göre bir avantaj oluşturmaktadır.

YDK'nın sağladığı anizotropik özellik, bu dispersiyon fenomenini fotonik uygulamalar için daha elverişli yapmaktadır. DBK ile karşılaştırıldığında YDK'lı FK'lar, ΓX yönü boyunca yüksek enerji akışı sağlarken ΓY yönü boyunca düşük iletim sağlamaktadır. Bu durum, istenmeyen doğrultular boyunca elektromanyetik dalga iletiminin herhangi bir yansıtıcı madde kullanılmadan kısıtlanmasını sağlamaktadır. Bu özellik, FK tabanlı ve yönlülük gerektiren uygulamalarda önemli bir çözüm olabilir. Bu bağlam doğrultusunda, YDK frekansında çalışan kaynaklar ile uyarılan C_2 simetrik FK'ların anizotropik sıfır kırıcılık indisi özelliği kullanılarak çeşitli fotonik aygıtlar tasarlanmıştır ve ilgili uygulamalar Şekil 3.15'te sunulmuştur. Bunlardan ilki, Şekil 3.15(a)'da görülebileceği üzere, gelen ışığın yönünün saptırılmasıdır. Dikdörtgen dielektrik çubuklar üçgen şeklinde FK'lar oluşturacak

şekilde dizilmiştir. Dizilen dielektrik çubuklar gelen ışığı 90° döndürecek şekilde, Şekil 3.15(a)'daki gibi artarda yerleştirilmiştir. Sunulan aygıt, YDK frekansında gelen dalgaları 90° saptırmaktadır ve YDK frekansında $T = \%70$ iletim verimliliğine sahiptir.

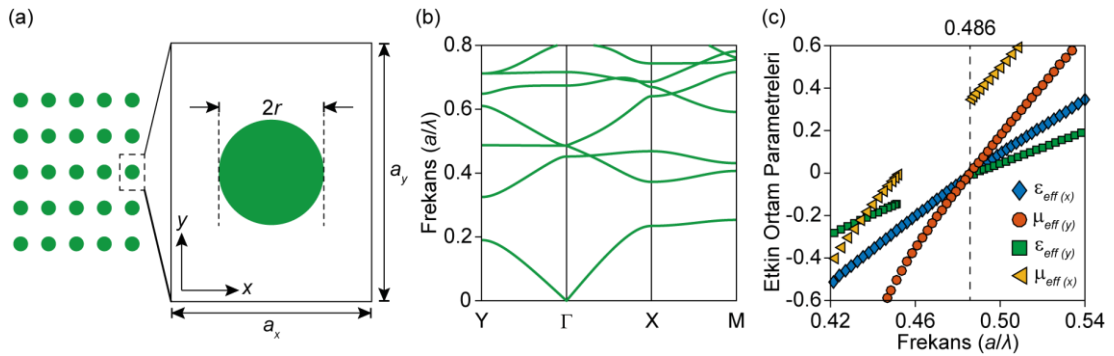


Şekil 3.15 : YDK içeren C_2 simetrik FK yapıları ile fotonik aygıt uygulamaları: (a) dalga yönü değiştirme, (b) dalga bölücü ve (c) odaklayıcı lens.

Diğer bir ışık mühendisliği konsepti ise dalga bölücü olarak davranan ve tasarımı Şekil 3.15(b)'de verilen FK yapısıdır. Tasarlanan yapının sağ kenarı, yarım bir sekizgen oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. Bir EMNZ ortamından çıkış yapan dalgalar hava-EMNZ ara yüzeyinin şeklini taklit ettikleri için, önerilen FK gelen ışığın üç ayrı kola ayrılmasını sağlamaktadır. Çıkış kenarlarındaki iletim verimlilikleri üst kenar, orta kenar ve alt kenar için sırasıyla şu şekildedir: $T_1 = \%26$, $T_2 = \%37$, $T_3 = \%26$. EMNZ ortamları, dalga ön yüzlerinin mühendisliğine olanak sağladığı için, dalga bölücü konsepti sadece burada verilen uygulama ile sınırlı değildir. Gelen ışığın ayrıldığı kol sayısı FK'nın çıkış kenarına verilecek uygun şekiller ile artırılabilir. YDK içeren FK'lar ile tasarlanan sonuncu aygıt ise odaklayıcı lenstir. EMNZ ortamlardan çıkış yapan dalgalar, hava-EMNZ ara yüzeyi ile dik açı yapacak şekilde yapıyı terk etmektedir. Bu özellik kullanılarak, DBK'ya sahip bir FK'nın çıkış yüzeyine konkav bir şekil verilmesiyle elde edilen odaklayıcı bir lens olarak daha önce tasarlanmıştır [48]. Ancak DBK'lı FK yapılarının izotropik karakteristiği, dalga çıkışının istenmediği yönlerde yansıtıcı yüzeylerin kullanılmasını gerektirmektedir. Yansıtıcı yüzeylerin kullanılmaması durumunda ise tasarlanan odaklayıcı aygıtın odaklama şiddeti artan kayıplara bağlı olarak azalacaktır. Çalışmamızda tasarladığımız YDK'lı FK'lara dayanan odaklayıcı lens bu soruna iyi bir çözüm olabilir. Şekil 3.15(c), dikdörtgen dielektrik çubuklardan oluşan

FK'nın odaklayıcı özelliğini göstermektedir. Konkav lens, YDK frekansındaki dalgaları $24.25a$ uzaklıkta odaklamaktadır. Odak noktasında, yarı-doruk genişliği değeri (FWHM) 0.661λ olup, $\lambda = 1.773a$ 'dır.

Bu çalışmada şimdiye kadar sunulan C_2 simetrik FK yapıları, dikdörtgen dielektrik çubuklar içeren birim hücre konfigürasyonlarından oluşmaktadır. Güncel fabrikasyon teknikleri fotonik yapıların nano ölçekte üretimini sağlasa da FK yapılarının karmaşıklığına bağlı olarak bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Bu bağlamda, sivri kenarlara sahip olan dikdörtgen birim hücre elemanlarında üretim esnasında bazı fabrikasyon hataları meydana gelebilir. Bu sivri kenarlar, üretim tekniklerinin çözünürlük sınırlamaları nedeniyle yuvarlak hale gelebilir ve bu nedenle üretilen FK'ların numerik olarak hesaplanan eşdeğerlerinden farklı olmasına yol açabilir. FK'ların dispersiyon özelliklerinin birim hücrelerin yapısal parametrelerine bağlı olmasından dolayı, fabrikasyon süresince meydana gelebilecek olası kusurlar YDK frekansında sapmalara, hatta YDK'nın bozulmasına neden olabilir. Fabrikasyon esnasında meydana gelebilecek bu sorunları engellemek amacıyla, YDK'ya sahip olan ve yuvarlak dielektrik çubuklardan dikdörtgen örgülü FK'lar da bu çalışmada incelenmiştir. Şekil 3.16(a)'da yarıçapları $r = 0.262a$ olan dairesel dielektrik ($\epsilon = 10.04$) çubuklardan meydana gelen dikdörtgen örgülü FK'nın iki boyutlu temsili verilmiştir. FK'nın birim hücrelerinin yapı parametreleri $a_x = 1a$ ve $a_y = 1.287a$ 'dır ve TM polarizasyon bant diyagramı Şekil 3.16(b)'de temsil edilmektedir.



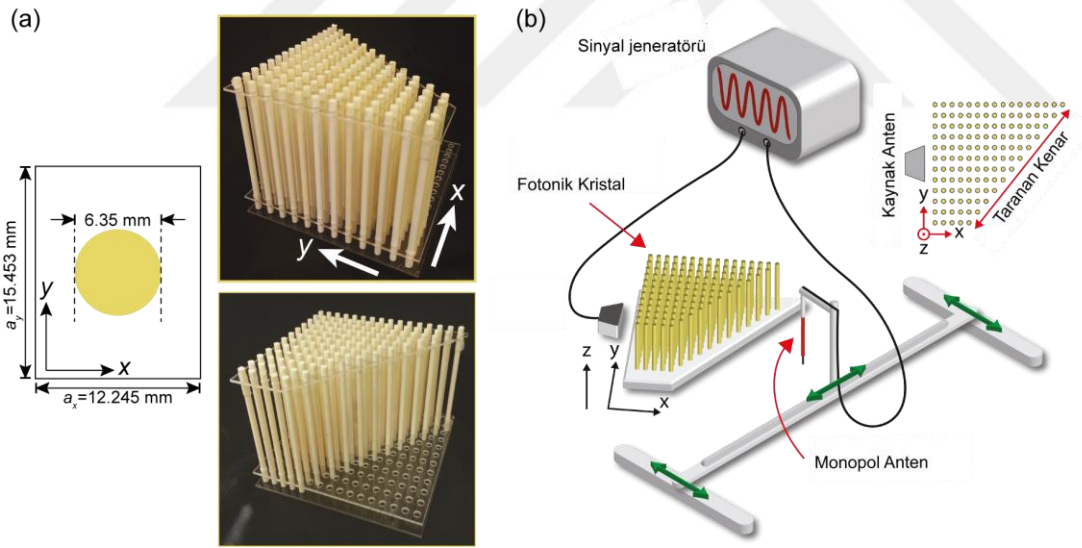
Şekil 3.16 : YDK'lı ve dikdörtgen örgülü FK'nın (a) birim hücre gösterimi, (b) ilgili fotonik bant diyagramı ve (c) ΓX ve ΓY yönleri boyunca hesaplanan frekansa bağlı etkin ortam parametreleri.

Verilen şekilden görülebileceği üzere iki Bloch modu, $a/\lambda = 0.486$ normalize frekansında ve Brillouin bölgesi merkezinde kesişerek YDK noktası oluşturmaktadır.

Verilen yapının ΓX ve ΓY iletim yönleri boyunca etkin ortam parametreleri hesaplanmış olup, sonuçlar Şekil 3.16(c)'de temsil edilmektedir. Etkin ortam parametrelerine ait sonuçlar incelendiğinde, kare örgülü FK yapısına denk gelen ve Şekil 3.14'te verilen etkin ortam hesaplamaları ile benzer karakteristikler göstermektedir. Şekil 3.16(c)'den görülebileceği üzere μ_x^{eff} eğrisi hariç bütün etkin ortam parametreleri $a/\lambda = 0.486$ normalize frekansında 0'a eşittir. Verilen sonuçlar göstermektedir ki YDK özelliği sadece kare örgülü FK'lara özgü olmayıp, dikdörtgen örgülü periyodik ortamlarda da ortaya çıkmaktadır.

3.2.3 Mikrodalga bölgesinde deneysel doğrulama

Daha önce belirtildiği gibi, YDK olgusu sadece sıfır kırıcılık indisinin görüldüğü bir fenomen olmayıp aynı zamanda negatif ve pozitif kırıcılık indislerine sahip yapay ortamların oluşturulmasını da sağlamaktadır. YDK'nın kırıcılık indisi özelliklerini gözlemek amacıyla, %99.8 saflıktaki Al_2O_3 (Alümina) çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü bir FK yapısı Şekil 3.17(a)'da görüldüğü üzere inşa edilmiştir.



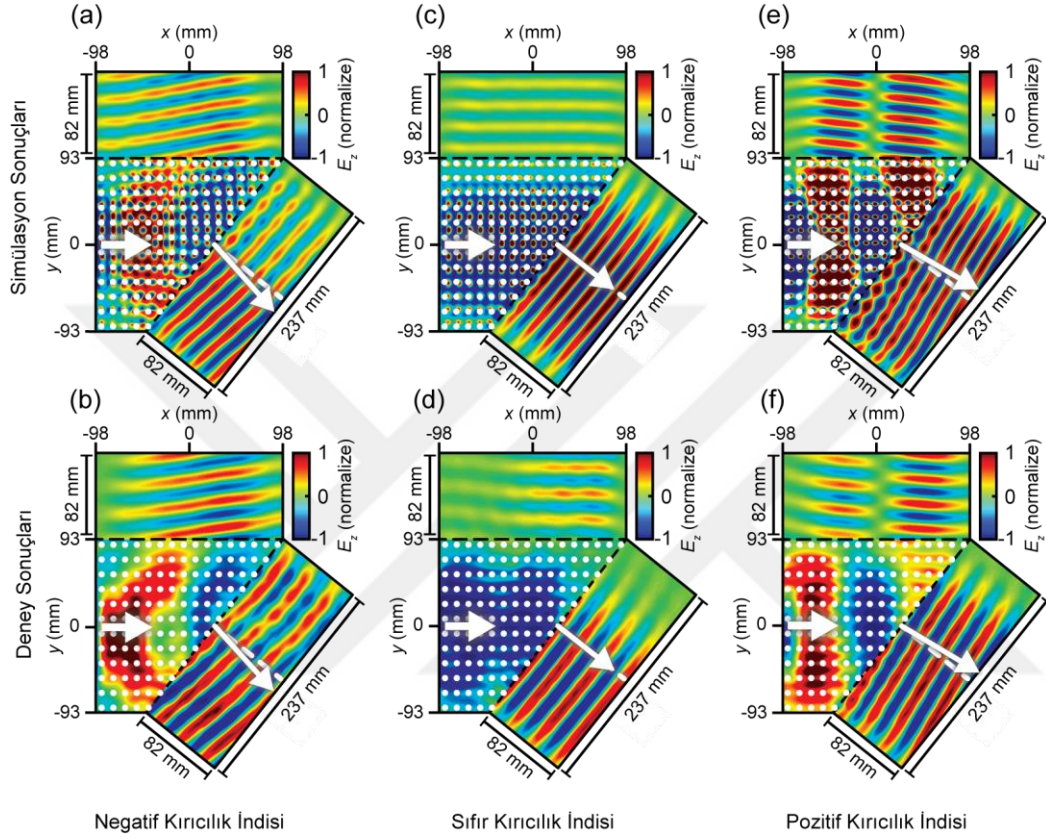
Şekil 3.17 : (a) Alümina çubuklardan oluşan dikdörtgen örgülü FK yapısının birim hücre yapısı ve inşa edilen FK'nın farklı cephelerden fotoğrafları. (b) Mikrodalga deney düzeneğinin temsili gösterimi.

Verilen şekilde, üretilen FK'nın birim hücre temsili de gösterilmektedir. Kullanılan Alümina çubukların elektriksel geçirgenlik sabiti mikrodalga frekans aralığında $\epsilon = 9.8$ olup, yarıçapları ve yükseklikleri sırasıyla $r = 3.175 \text{ mm}$ ve $h = 152 \text{ mm}$ 'dir. Yapının tasarım süreci aşamasında, Şekiller 3.12(d) ve 3.16(a)'da verilen birim hücre

türleri ile aynı hava doluluk oranına sahip birim hücrelerden meydana gelmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan yapı, Brillouin bölgesi merkezinde $f = 12.1$ GHz frekansında YDK frekansına sahiptir ve örgü sabiti $a = 12.245$ mm'dir. Dikdörtgen şekilli birim hücre çerçevesinin boyutları $a_x = 12.245$ mm ve $a_y = 15.543$ mm'dir. Deneysel ortamının temsili gösterimi Şekil 3.17(b)'de verilmiştir. Mikrodalgalar, Agilent E5701C ENA vektör analizöründe $\Delta f = [6 - 18$ GHz] frekans aralığında üretilerek yapıya gönderilmiştir. Üretilen dalgalar, FK yapısına y eksenine dik açı yapacak şekilde ΓX yönünde horn anten yardımıyla gönderilmiştir. Bir monopollü anten yardımıyla FK içindeki ve dışındaki elektrik alan dağılımı 2 mm'lik adımlarla ölçülmüştür.

Şekil 3.18(a) ve Şekil 3.18(b), YDK frekansının altında uyarılan FK'nın içindeki ve dışındaki elektrik alan dağılımlarına karşılık gelen simülasyon ve deneysel sonuçlarını göstermektedir. Tasarlanan yapı simülasyon kısmında, YDK frekansının altında çalışan ve Gauss genlik profiline sahip bir dalga kaynağı ile $f = 11.7$ GHz frekansında uyarılmıştır (bkz. Şekil 3.18(a)). Öte yandan Şekil 3.18(b), $f = 11.7$ GHz frekansında yapıdan ölçülen elektrik alan verisini temsil etmektedir. Verilen simülasyon ve deneysel sonuçları incelendiğinde, yapının sahip olduğu faz profillerinin benzer olduğu görülmektedir. Ayrıca, YDK frekansının altında elektriksel ve manyetik geçirgenlik katsayıları negatif olduğu için ($\epsilon^{\text{eff}} < 0$, $\mu^{\text{eff}} < 0$), teorik ve deneysel sonuçların her ikisinde de yapıya giren dalgaların negatif kırılma özelliği gösterdiği görülmektedir. Şekil 3.18(c) ve Şekil 3.18(d), YDK frekansında ($f = 12.1$ GHz) uyarılan yapının simülasyon ve deneysel sonuçlarını göstermektedir. Verilen elektrik alan profilleri sıfır kırıcılık indisini açık bir şekilde işaret etmektedir. Bunun ilk kanıtı, yapı içerisindeki dalga boyunun çok büyük olmasından dolayı simülasyon ve deneysel sonuçlarındaki faz profillerinin eş-dağılımlı olmasıdır. İkinci olarak, yapıdan ayrılan dalgaların dalga ön yüzleri Snell yasası ile uyumlu olarak FK yüzeyleri ile $\theta_{\text{çıkış}} = 0^\circ$ açısı yapmaktadır. Burada şunu belirtmek gerekir ki tasarlanan yapının anizotropik karakterde olmasından dolayı, yapıdan y eksenine boyunca çıkan dalgaların şiddetinin üçgen şeklindeki FK'nın hipotenüsünden çıkan dalgaların gücünden daha düşük olduğu görülmektedir. Son olarak, Şekil 3.18(e) ve Şekil 3.18(f), YDK frekansının üzerinde ($f = 12.9$ GHz) hem simülasyon hem de deneysel ortamında pozitif kırıcılık indisi gösteren FK yapısının elektrik alan profillerini temsil etmektedir.

Benzer şekilde, verilen simülasyon ve deney sonuçları birbirleri ile örtüşmektedir. Özetlemek gerekirse, FDTD yöntemi ile analizi yapılan YDK'lı dikdörtgen örgülü FK'nın negatif, sıfır ve pozitif kırıcılık indisleri mikrodalga deneyi ile doğrulanmıştır. Numerik analizler ile elde edilen elektrik alan dağılımları, mikrodalga deney düzeneğinde alınan ölçümler ile örtüşmektedir.



Şekil 3.18 : FK'nın YDK frekansının altında (11.7 GHz) (a) simülasyon ve (b) deneyden elde edilen elektrik alan profilleri. FK'nın YDK frekansında (12.1 GHz) (c) simülasyon ve (d) deneyden elde edilen elektrik alan profilleri. FK'nın YDK frekansının üzerinde (12.9 GHz) (e) simülasyon ve (f) deneyden elde edilen elektrik alan profilleri.

3.2.4 Sonuçlar

Bu çalışmada, Brillouin bölgesi merkezinde DBK içeren FK'ların dönel simetri derecelerinde azalma sağlanarak YDK içeren anizotropik sıfır kırıcılık indisli FK'ların elde edilebileceği numerik ve deneysel analizler ile kanıtlanmıştır. YDK noktasında FK'lar, bir iletim yönü için EMNZ davranışı sergilerken, bu yöne dik olan doğrultu için ENZ özellikleri göstermektedir. DBK'lı FK yapıları, kaçak kayıplarını engellemek amacıyla iletim olması istenmeyen yönlerde yansıtıcı

yüzeyley gerektirmektedir. Ayrıca, DBK noktası yapısal parametrelerin tek bir değeri için ortaya çıkmaktadır. Öte yandan, YDK'lı FK yapıları anizotropik özellik taşıdığından yansıtıcı yüzeyley gerektirmemektedir ve yapısal olarak ayarlanabilirlik özelliğine sahiptir. YDK içeren FK yapıları, yansıtıcı yüzey gerektirmeyen ışın saptırıcı, ışın bölücü ve odaklayıcı lens gibi aygıt tasarımları yapılmasına olanak sağlamaktadır.

3.3 İnterferometrik Aygıt Tasarımları

3.3.1 Giriş

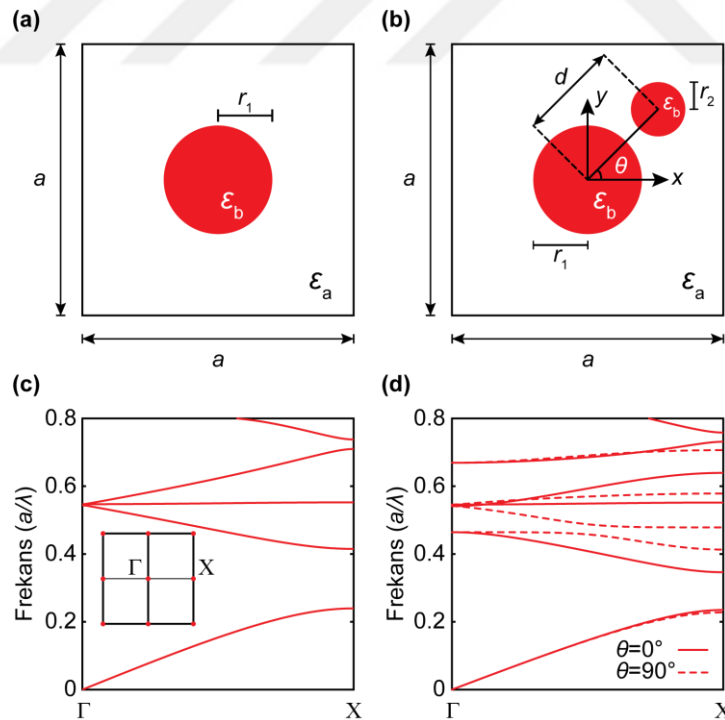
İnterferometreler, kırılma indisi vb. optik karakteristiklerdeki çok küçük değışimleri ölçmek amacıyla kullanılan ve FED teknolojisi için vazgeçilmez olan optik bileşenlerdir. İnterferometrelere gönderilen dalgalar iki ana kola ayrılır ve optik mesafe farkına bağılı olarak ayrılan dalgalar arasında bir faz farkı oluşur. Aralarında belirli bir faz farkı olan bu dalgaların tekrar birleştirilmesi ile aralarındaki faz farkına bağılı olarak yapıcı veya yıkıcı girişim meydana gelir [65]. Meydana gelen girişim desenine bağılı olarak anlamlı bir verinin ölçümü yapılır. Mach-Zehnder interferometresi (MZI), faz modülasyonunu çıkış kanalında genlik modülasyonuna çevirme yetisinde olan ve en çok çalışılan fotonik aygıtlardan birisidir [66]. Bu interferometreler optik filtreleme, dalga boyu ayrıştırma, optik anahtarlama ve algılama uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [67-69]. MZI'larda iki interferometre kanalı arasında faz farkı yaratmak için genellikle bir kolun kırıcılık indisinde değışiklikler yapılmaktadır. Bununla birlikte, kanal uzunluklarını eşit ve kırıcılık indisini sabit tutarak MZI aygıtının çıkışındaki girişim desenini kontrol etmek mümkün değildir.

Bu çalışmada, MZI tasarımlarının faz özelliklerini kontrol etmek için düşük dönel simetrik FK yapılarının kullanılması önerilmiştir. Kare örgülü ve iki-boyutlu FK dalga kılavuzlarına dahil edilen düşük dönel simetrik birim hücre yapılarının açısıl yönelimleri değıştirilerek, tasarlanan MZI aygıtlarının girişim özellikleri analiz edilmektedir. MZI kolları arasındaki optik mesafe ile oynamak yerine, FK dalga kılavuzlarında kullanılan düşük dönel simetrik birim hücrelerin oryantasyonları kontrol edilerek istenen girişim deseni aygıt çıkışında elde edilmektedir. Düşük dönel

simetriklerin, FK dalga kılavuzlarında etkin faz kontrolü sağlamasından dolayı optik algılayıcı, mod dönüştürücü ve dalga boyuna hassas iletim içeren aygıt tasarımları incelenmiştir.

3.3.2 Frekans ve zaman alanı analizleri

Düşük dönel simetrik FK'ların, oryantasyona hassas dispersiyon özelliklerini kanıtlamak amacıyla Şekil 3.19 hazırlanmıştır. Şekil 3.19(a), $r_1 = 0.2a$ yarıçapına sahip dairesel dielektrik çubuklardan oluşan yüksek dönel simetrik birim hücre yapısını göstermektedir. Burada "a" örgü sabitini tanımlamaktadır. Arka zemin ve dielektrik çubukların elektriksel geçirgenlik katsayıları sırasıyla $\epsilon_a = 1$ ve $\epsilon_b = 12.25$ 'dir. Öte yandan Şekil 3.19(b), Şekil 3.19(a)'da verilen birim hücre yapısına ilave bir dielektrik çubuğun eklenmesiyle oluşturulan C_1 simetrik birim hücreyi temsil etmektedir. Verilen birim hücre yapısında dairesel dielektrik çubukların yarıçapları $r_1 = 0.2a$ ve $r_2 = 0.096a$ 'dır. İki dielektrik çubuk arasındaki mesafe ise $d = 0.350a$ olarak ayarlanmıştır. Burada, θ sembolü küçük dielektrik çubuğun x eksenine yaptığı oryantasyon açısını temsil etmektedir.

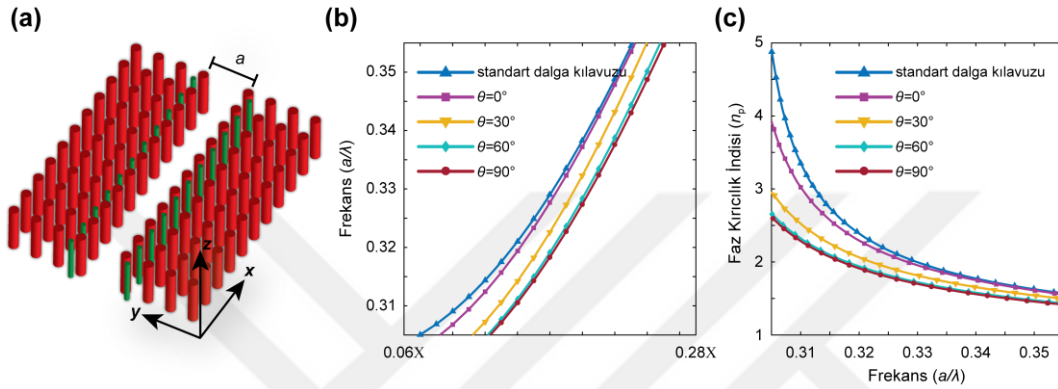


Şekil 3.19 : (a) Yüksek dönel simetrik ve (b) C_1 simetrik birim hücre yapıları. (c) Yüksek dönel simetrik ve (d) C_1 simetrik birim hücrelerin ΓX simetri eksenine boyunca fotonik bant diyagramları.

Bilindiği üzere periyodik ortamların dispersiyon özellikleri fotonik bant diyagramları ile analiz edilebilmektedir. Şekiller 3.19(c) ve 3.19(d) verilen birim hücre türlerinden oluşan FK'ların PWE metodu kullanılarak elde edilen TM polarizasyon fotonik bant yapılarını temsil etmektedir [22]. Şekil 3.19(c), Şekil 3.19(a)'da sunulan yüksek dönel simetrik FK'nın bant yapısını ΓX simetri eksenini boyunca göstermektedir. İlgili şekilde, Brillouin bölgesinin temsili ve gerekli simetri noktaları da gösterilmiştir. Şekil 3.19(d) ise sunulan C_1 simetrik birim hücre yapısına karşılık gelen TM polarizasyon fotonik bant yapılarını göstermektedir. Verilen grafik, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ değerlerine karşılık gelen iki adet fotonik bant diyagramı içermektedir. Şekiller 3.19(c) ve 3.19(d) incelendiğinde, yüksek dönel simetrik FK yapısının dispersiyon özelliklerinin eklenen ilave dielektrik çubuk ile birlikte değiştiği gözlenmektedir. Daha da önemlisi, küçük dielektrik çubuğun oryantasyon açısının periyodik ortamın dispersiyon karakteristiği üzerinde güçlü bir etkisi olduğu ve oryantasyon açısının FK'nın optik tepkisini belirlediği Şekil 3.19(d)'de görülmektedir. Buradan şu çıkarım yapılabilir: Düşük dönel simetrik FK'ların fotonik bant yapıları, periyodik ortamı oluşturan birim hücre konfigürasyonlarının açılal yönelimine oldukça hassastır. Örneğin, birim hücre oryantasyonunu $\theta = 0^\circ$ değerinden $\theta = 90^\circ$ değerine getirdiğimizde, özellikle 2. bantlardan başlayarak spektral bir değişim gözlenmektedir. Düşük dönel simetrik FK'ların birim hücre yönelimine duyarlı fotonik bant yapıları, bu periyodik ortamlarda yayılım gösteren elektromanyetik dalgaların faz özelliklerinin kontrolünü de beraberinde getirmektedir. Simetri düşümü sonucu ortaya çıkan bu özellik, faz özellikleri ayarlanabilir FK dalga kılavuzları gibi kontrol edilebilir fotonik uygulamaların tasarımına olanak sağlamaktadır.

Düşük dönel simetrik FK'ların ayarlanabilir dispersiyon özellikleri, dalga kılavuzu gibi "kusur" içeren periyodik ortamlarda da kullanılabilir. Bu sayede, FK tabanlı dalga kılavuzlarında kılavuzlanmış elektromanyetik dalgaların etkin faz kontrolü sağlanmaktadır. Bu özelliği kanıtlamak amacıyla hava kusuru boyunca C_1 simetrik birim hücre yapılarından oluşan bir FK dalga kılavuzu tasarlanmıştır ve ilgili tasarımın üç-boyutlu modellemesi Şekil 3.20(a)'da temsil edilmektedir. Verilen tasarımdaki C_1 simetrik birim hücreler, Şekil 3.19(b)'deki birim hücre konfigürasyona karşılık gelmektedir. Verilen üç-boyutlu modellemede C_1 simetrik

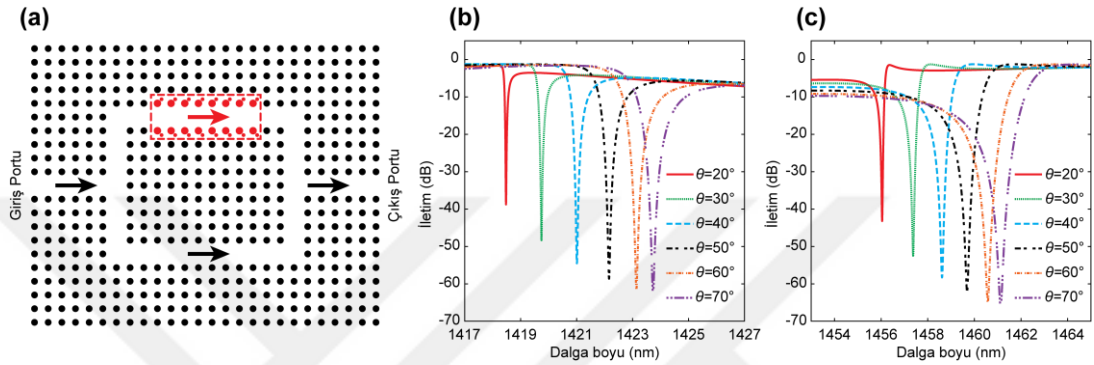
birim hücrenin küçük yarıçaplı elemanları yeşil renk ile gösterilmiştir. Tasarlanan FK yapısının hava kusuru genişliği $w = a$ 'dır. Düşük dönel simetrik birim hücrelerin etkisini göstermek amacıyla, TM_0 kılavuzlanmış modlarının dispersiyon eğrileri C_1 simetrik birim hücrelerin farklı θ değerlerine göre hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekil 3.20(b)'de gösterilmektedir. C_1 simetrik birim hücreleri içermeyen dalga kılavuzuna ait TM_0 mod dispersiyonu da "standart dalga kılavuzu" adıyla ilgili grafiğe dahil edilmiştir.



Şekil 3.20 : (a) Hava kusuru boyunca C_1 simetrik birim hücrelerden meydana gelen FK dalga kılavuzu. Birim hücre oryantasyonuna bağlı olarak, dalga kılavuzuna ait TM_0 modlarının (b) dispersiyon eğrileri ve (c) faz kırıcılık indisleri.

Verilen şekilden görülebileceği üzere standart dalga kılavuzuna C_1 simetrik birim hücreleri eklemek ve açısal yönelimlerini gerekli değerlere getirmek, istenen dispersiyon özelliklerinin mühendisliğine etkin bir rol oynamaktadır. Örneğin, C_1 simetrik birim hücrelerin yönelim açısını $\theta = 0^\circ$ 'den $\theta = 90^\circ$ 'a getirmek, sabit dalga vektörü (k) için TM_0 modlarının normalize frekans değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. Bu özellik, dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen kılavuzlanmış dalgaların faz hızlarının (v_p) kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. Bunu göstermek amacıyla, Şekil 3.20(b)'de verilen kılavuzlanmış mod eğrilerinin faz kırıcılık indisleri (n_p) hesaplanıp Şekil 3.20(c)'de sunulmuştur. Şekil 3.20(c) incelendiğinde C_1 simetrik birim hücrelerin açısal yönelimlerinin kasti olarak arttırılmasının, faz kırıcılık indislerinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu hassasiyet kullanılarak, TM_0 modunda ilerleyen kılavuzlanmış dalgalar istenen faz gecikmelerine maruz bırakılabilir. Düşük dönel simetrik FK'ların bu karakteristiği, faz kontrolünü hedefleyen fotonik uygulamaların tasarımında önemli rol oynamaktadır.

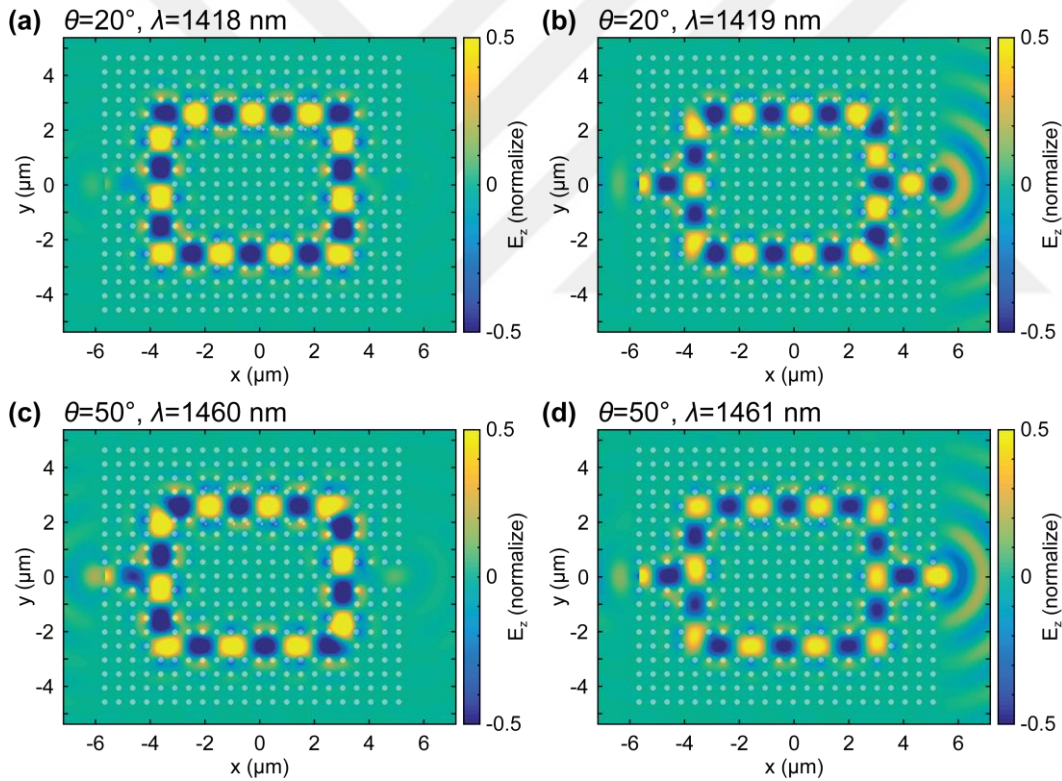
Bilindiği üzere, interferometreler, elektromanyetik dalgaların girişim fenomenini kullanarak iki dalga kılavuzu arasındaki faz farkını ölçen ve bu sayede anlamlı veriye ulaşmayı sağlayan çok amaçlı optik aygıtlardır. Düşük dönel simetrik FK tabanlı dalga kılavuzlarının etkin faz kontrolü sunması, verimli interferometrik uygulamaların tasarımında iyi bir alternatif olabilir. Bu uygulamalardan ilki, Şekil 3.21(a)'da verilen ve üst kanalı C_1 simetrik birim hücrelerden oluşan çift-kanallı MZI'dır.



Şekil 3.21 : (a) Tasarlanan FK tabanlı MZI aygıtı. (b), (c) Üst kanaldaki C_1 simetrik birim hücrelerin farklı θ değerleri için yapı çıkışındaki iletim verimliliği.

Tasarlanan MZI, Şekiller 3.19(a) ve 3.19(b)'de temsil edilen birim hücre yapılarını içeren dalga kılavuzlarından oluşmaktadır. MZI aygıtının üst kanalında kırmızı ile gösterilen kısımdaki birim hücre türleri C_1 simetriktir ve fotonik tasarımın geri kalan kısmı yüksek dönel simetrik birim hücrelerden oluşmaktadır. Aygıtın üst kolu, iki MZI kanalı arasında kontrollü faz farkı yaratan faz geciktirme bölgesidir. Daha önce de belirtildiği üzere, FK dalga kılavuzlarında ilerleyen elektromanyetik dalgaların faz hızları, düşük dönel simetrik birim hücrelerin açısız yönelimleri ile kontrol edilebilmektedir. Birim hücrelerin her bir yönelim açısı, kılavuzlanmış dalgalarda farklı değerlerde faz kaymasına neden olduğu için, tasarlanan MZI yapısının iki kolu arasındaki faz farkı bu sayede istenen değere atanabilir. İki dalga kılavuzu arasındaki faz farkına bağlı olarak, MZI yapısının çıkışındaki girişim deseni belirlenebilir. Yani, iki MZI kanalı arasındaki faz farkı $\Delta\varphi = 2\pi n$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) olduğunda “yapıcı girişim” ve $\Delta\varphi = \pi n$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) için “yıkıcı girişim” gözlenir. Düşük dönel simetrik FK dalga kılavuzlarının oryantasyona hassas dispersiyon özellikleri sayesinde, belirli girişim desenlerinin gözlemlendiği dalga boyları spektral olarak kontrol edilebilmektedir. Bu sayede MZI aygıtının çıkış gücü frekansa bağlı olarak

ayarlanabilmektedir. Şekiller 3.21(b) ve 3.21(c), $\lambda_1 = [1417 - 1427 \text{ nm}]$ ve $\lambda_2 = [1453 - 1465 \text{ nm}]$ dalga boyu aralıklarındaki MZI çıkış gücünün, birim hücrelerin açısız yönelimlerine bağılılığını göstermek amacıyla FDTD yöntemi [23] kullanılarak hesaplanmıştır. MZI, her iki dalga boyu aralığında da Gauss genlik profiline sahip bir dalga kaynağı ile uyarılmış olup, verilen periyodik ortamların örgü sabiti $a = 512 \text{ nm}$ 'dir. Verilen iletim grafiklerinde, güç eğrilerinin dip noktaları yıkıcı girişim meydana gelen dalga boylarını temsil etmektedir. Görülebileceği üzere birim hücrelerin oryantasyon açılarının artırılması yıkıcı girişimin gözlemlendiği "sıfır-iletim" noktalarını daha büyük dalga boylarına kaydırmaktadır. Verilen interferometik tasarımın spektral modülasyon özelliğini görsel olarak kanıtlamak amacıyla, TM polarizasyon elektrik alan profilleri hesaplanmış olup sonuçlar Şekil 3.22'de temsil edilmektedir.

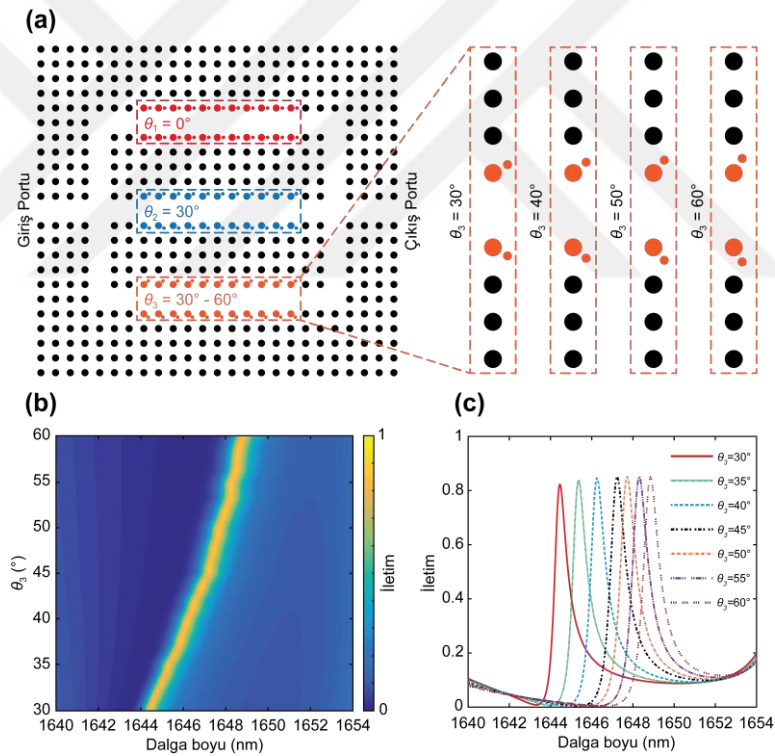


Şekil 3.22 : MZI aygıtının verilen oryantasyon açıları için (a) $\lambda = 1418 \text{ nm}$, (b) $\lambda = 1419 \text{ nm}$, (c) $\lambda = 1460 \text{ nm}$ ve (d) $\lambda = 1461 \text{ nm}$ dalga boylarındaki TM polarizasyon elektrik alan görüntüleri.

Şekiller 3.22(a) ve 3.22(b), $\theta = 20^\circ$ için $\lambda_1 = 1418 \text{ nm}$ ve $\lambda_2 = 1419 \text{ nm}$ dalga boylarına karşılık gelen elektrik alan görüntüleridir. Öte yandan Şekiller 3.22(c) ve 3.22(d), $\theta = 50^\circ$ durumunda, MZI yapısının $\lambda_1 = 1460 \text{ nm}$ ve $\lambda_2 = 1462 \text{ nm}$ dalga

boylarındaki elektrik alan profillerini temsil etmektedir. Verilen grafikler, düşük dñnel simetrik MZI tasarımı nın çıkış gücünün kontrol edilebilirliğini açık bir şekilde kanıtlamaktadır. Örneğin, şekiller 3.22(a) ve 3.22(c), MZI çıkışında yıkıcı girişimin olduğu duruma karşılık gelmektedir ve çıkış gücü neredeyse sıfırdır. Bununla birlikte çalışma dalga boyu 1 nm arttırıldığında, yapının çıkışındaki girişim deseni yapıcı girişim desenine dñnřmektedir ve bu sayede yapının çıkışındaki iletim gücü ciddi oranda artış göstermektedir (bkz. şekiller 3.22(b) ve 3.22(d)).

Yapılan analiz ve verilen sonuçlardan yola çıkarak önerilen olguyu derinleştirmek adına şu soru sorulabilir: Çift kanallı bir MZI yapısı kullanmak yerine, üç kanallı bir interferometre kullanırsak nasıl bir değişim gözleriz? Bu soruya bir cevap bulmak adına, 3 farklı dalga kılavuzu kanalından oluşan bir interferometre yapısı tasarlanmış olup ilgili tasarımı nın görseli şekil 3.23(a)'da temsil edilmektedir.



şekil 3.23 : (a)  kanallı interferometrik konfigürasyon. (b), (c) Verilen yapının iletim spektrumunun, alt kanaldaki birim hücrelerin oryantasyonuna göre değişimi.

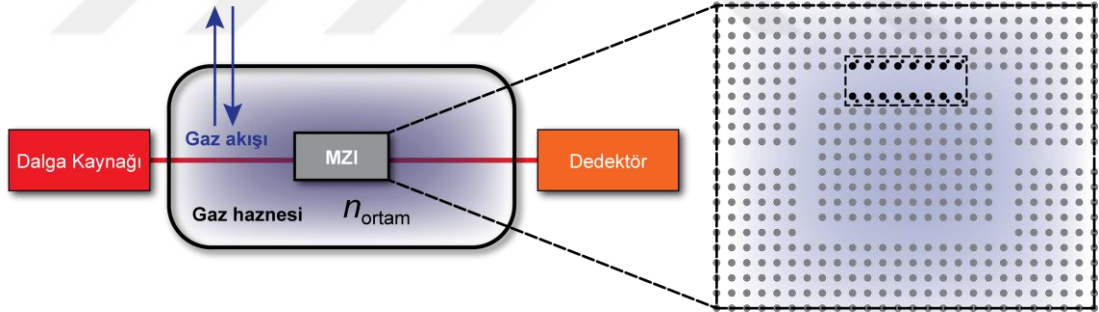
Verilen tasarımı nın incelendiğinde, interferometrenin her bir kanalının farklı oryantasyonlara karşılık gelen düşük dñnel simetrik birim hücre yapılarından oluştuğu gözlenebilir. st ve orta kanaldaki birim hücrelerin yönelim alıları sırasıyla $\theta_1 = 0^\circ$ ve $\theta_2 = 30^\circ$ 'a sabitlenmiştir. Bununla birlikte alt kanaldaki birim hücrelerin

yönelimleri sabitlenmemiş olup $\theta_3 = [30^\circ - 60^\circ]$ değer aralığında değiştirilerek ölçümler alınmıştır. Şekil 3.23(a)'da verilen ek görseller, farklı oryantasyonlara karşılık gelen dalga kılavuzu sütunlarını temsil etmektedir. İnterferometre çıkışındaki güç yoğunluğunun farklı oryantasyon açlarına karşılık gelen değişimi hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekiller 3.23(b) ve 3.23(c)'de verilmiştir. Verilen şekillerden görülebileceği üzere, alt kanaldaki birim hücrelerin oryantasyon açısı arttırıldıkça yapıcı girişimin görüldüğü dalga boyları daha büyük değerlere doğru kayma göstermektedir. Yönelim açısı, dalga kılavuzlarında ilerleyen dalgaların birbirleri ile olan etkileşimlerini belirlediği için, bu interferometre yapısında da çıkış gücünün spektral kontrolü rahatlıkla yapılabilir. Verilen interferometre tasarımlarının dalga boyu seçici kontrollü iletim özellikleri, optik algılama sağlayan sensör uygulamalarında kullanılabilir. Aygıtın operasyon gösterdiği ortama gaz ve protein gibi kimyasal maddelerin dışarıdan müdahalesi, ortamın kırıcılık indisinde değişimlere neden olarak verilen iletim spektrumlarındaki rezonans frekanslarında kaymalara neden olmaktadır. Bu bağlamda, rezonans frekansların spektral değişimi gözlenerek ve bu değişimin miktarı ölçülerek ortamda bulunan kimyasal bileşenlerin tespiti sağlanabilir.

Optik sensörler, biyokimyasalların, zehirli maddelerin ve zararlı gazların endüstriyel ve biyomedikal amaçlar doğrultusunda algılanmasını sağlayan önemli araçlardır. Elektromanyetik girişime (EMI) karşı bağışıklık göstermeleri ve çok yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özelliklerinden dolayı, diğer sensör konseptlerine bir alternatif olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca, tepki süreleri diğer sensör uygulamalarına göre daha yüksek olduğundan, algılanan malzemelerin gerçek zamanlı ve uzaktan kontrolünü sağlamaktadırlar. Bu aygıtlar genel olarak optik kavitelelerin [70, 71], interferometrelerin [72-76], yüzey plazmonların [77-79] ve halka rezonatörlerin [80-82] uygun özelliklerinin kullanımı ile tasarlanmaktadır. Bunlara ek olarak, sundukları avantajlardan dolayı FK tabanlı sensör uygulamaları da bulunmaktadır [83-85]. FK tabanlı sensörlerin avantajlarından birisi, endüstriyel uygulamalarda kullanımlarına uygun olarak çipler üzerinde küçük boyutlu olarak üretilebilmeleri ve bu sayede ekonomik olarak avantaj sunmalarıdır. Ayrıca, FK'ların optik özellikleri dispersiyon mühendisliği sayesinde kolaylıkla manipüle edilebildiği için, dışarıdan yapılan müdahalelere oldukça hassas olmaları sağlanabilmektedir. Bu

nedenle, FK'lar, ortamın kırıcılık indisindeki 10^{-4} mertebesindeki değişimleri bile yüksek çözünürlük ile algılayabilmektedir.

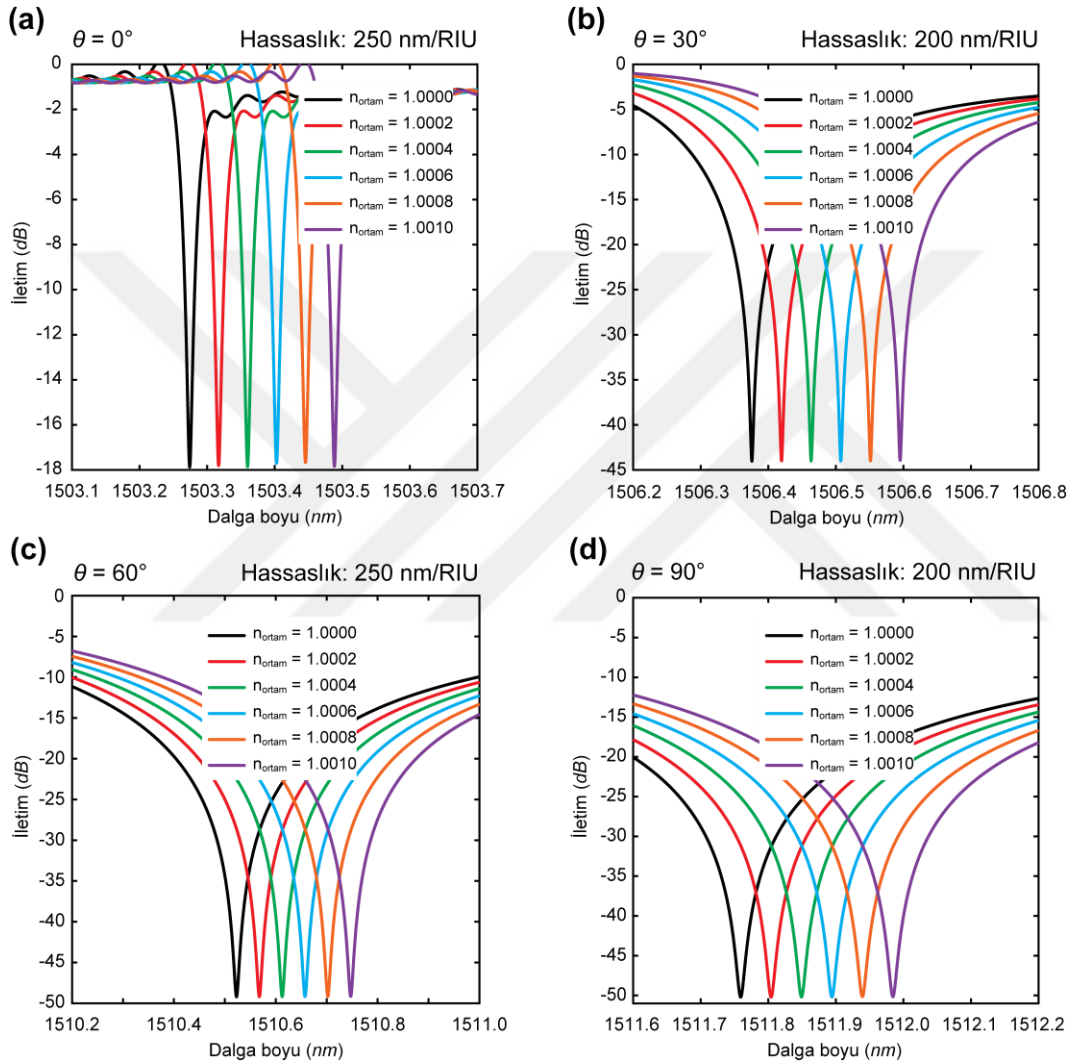
Çalışmanın bu aşamasında, Şekil 3.21'de tanıtilan düşük dönel simetrik FK tabanlı MZI aygıtı kullanılarak tasarlanan bir gaz sensörü uygulaması tanıtilacaktır. Bilindiği üzere doğada bulunan gazların kırıcılık indisleri $n = [1.000-1.001]$ aralığında değişim göstermektedir. Tasarlanan aygıtın operasyon gösterdiği ortamda meydana gelen 10^{-4} kırıcılık indisi birimi (RIU) mertebesindeki değişimler neticesinde, Şekiller 3.21(b) ve 3.21(c)'de verilen iletim spektrumlarının rezonans frekanslarında kaymalar gerçekleşmektedir ve bu sayede ortamda bulunan gazın tespiti yapılabilmektedir. Çift kanallı MZI ile sağlanan gaz algılamanın sensör düzeneği Şekil 3.24'te verilmiştir. İlk olarak, MZI tasarımı gaz giriş-çıkışının olduğu bir gaz haznesine yerleştirilir. MZI'nın bir dalga kaynağı ile uyarılmasından sonra, sensörün spektral tepkisi dedektör aracılığı ile ölçülür. Ortamın kırıcılık indisindeki değişime bağlı olarak, yıkıcı girişimlerin olduğu "sıfır-iletim" dalga boylarında spektral bir kayma gözlenir. Bu kaymanın miktarı hesaplanarak, ortama etki eden malzemenin kırıcılık indisi belirlenir.



Şekil 3.24 : Tasarlanan MZI aygıtının kullanıldığı gaz algılama düzeneği. n_{ortam} , gaz haznesinin içindeki kırıcılık indisini temsil etmektedir.

Farklı gaz ortamlarında çalışan sensörün optik tepkisini ölçmek amacıyla FDTD yöntemi kullanılmıştır. Önerilen MZI yapısının çıkış gücü, bulunduğun ortamın kırıcılık indisinde 2×10^{-5} RIU'luk değişimler yapılarak $n_{ortam} = 1.000-1.001$ arasında ölçülmüştür. Bu ölçüm işlemi, üst kanaldaki C_1 simetrik birim hücrelerin açısıl yönelimlerinin $\theta = 0^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ olduğu durumlar için tekrar edilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 3.25'te her bir oryantasyon açısı için dB cinsinden temsil edilmektedir. Verilen grafikler incelendiğinde, her 4 oryantasyon

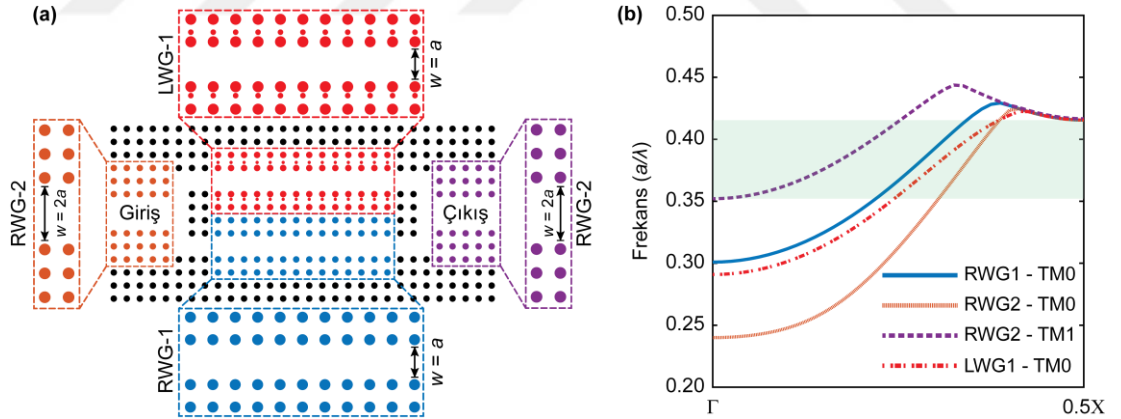
açısı durumu için de ortamın kırıcılık indisindeki ufak değişimlerin sensörün rezonans frekansında değişimlere sebep olduğu ve “sıfır-iletim” noktalarının ortamın kırıcılık indisine bağlı olarak farklı dalga boylarında ortaya çıktığı görülmektedir. Elde edilen verilere göre, $\theta = 0^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ olduğu durumlara karşılık gelen MZI sensörlerin hassaslık değerleri sırasıyla 250 nm/RIU, 200 nm/RIU, 250 nm/RIU ve 200 nm/RIU’dur.



Şekil 3.25 : Sensörün, bulunduğu ortamın farklı kırıcılık indisleri altındaki spektral tepkisi: C_1 simetrik birim hücrelerin açılal yönelimlerinin (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 30^\circ$, (c) $\theta = 60^\circ$ ve (d) $\theta = 90^\circ$ olduğu durumlar.

Çalışmada şimdiye kadar verilen interferometrik uygulamaların yanı sıra, tasarlanan bu aygıtlar mod dönüştürücü olarak da kullanılabilir. Uygun bir mod dönüştürücü fotonik aygıt tasarlamak amacıyla, MZI'nın üst kanalındaki birim hücre

oryantasyonları gerekli şekilde ayarlanarak iki MZI kanalı arasındaki faz farkı $\Delta\varphi = \pi$ 'ye eşitlenir. Bu gaye doğrultusunda tasarlanan mod dönüştürücü Şekil 3.26(a)'da temsil edilmektedir. Verilen FK tabanlı mod dönüştürücü, farklı hava kusuru genişliklerine ve birim hücre konfigürasyonlarına sahip 3 farklı dalga kılavuzundan oluşmaktadır. Bu dalga kılavuzları, şekilde de görüleceği üzere "RWG-1", "RWG-2" ve "LWG-1" olarak tanımlanmıştır. Aygıtın giriş ve çıkış portları, tamamı yüksek dönel simetrik birim hücrelerden oluşan RWG-2 türü dalga kılavuzuna sahiptir. Mod dönüştürücünün giriş ve çıkış portlarının hem TM_0 hem de TM_1 modlarını desteklemesi gerektiğinden, RWG-2 türü dalga kılavuzunun genişliği $w = 2a$ olacak şekilde tasarlanmıştır. Verilen aygıtın ana kısmı, LWG-1 ve RWG-1 dalga kılavuzlarından oluşan orta kısımdır. MZI'nın üst kanalındaki dalga kılavuzunun (LWG-1) hava kusuru genişliği $w = a$ 'dır. Bu kanal, hava kusuru boyunca açılmal yönelimi $\theta = 90^\circ$ olan C_1 simetrik birim hücreler içermektedir. Alt kanalın (RWG-1) tamamı ise yüksek dönel simetrik birim hücrelerden meydana gelmektedir ve kusur genişliği $w = a$ 'dır. MZI'ya birbirine paralel olarak yerleştirilen bu iki dalga kılavuzu arasında meydana getirilecek $\Delta\varphi = \pi$ kadarlık faz kayması, iki ayrı kanalda ilerleyen dalgaların yapının sonuna "faz dışı" olarak erişmesini sağlamaktadır.

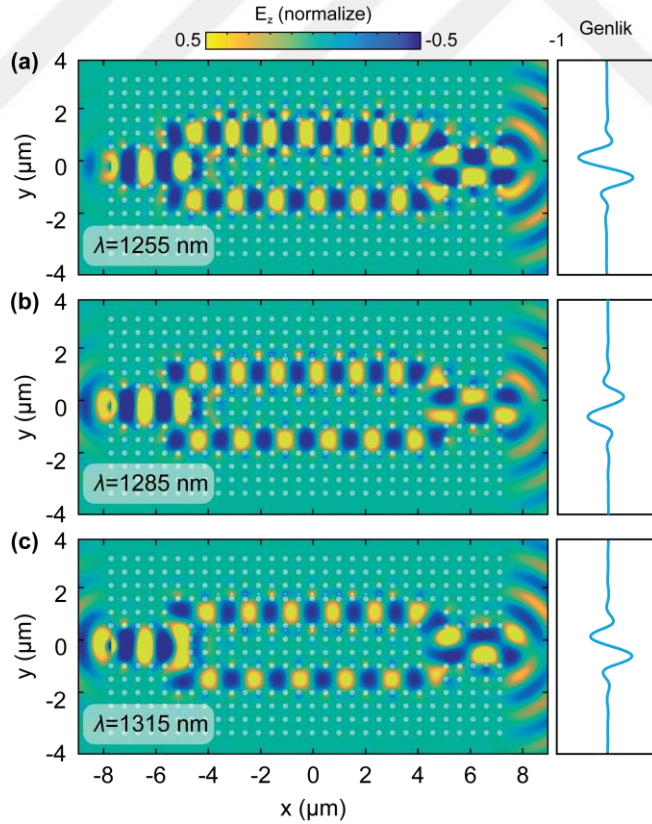


Şekil 3.26 : (a) C_1 simetrik birim hücreler ile tasarlanan FK tabanlı mod dönüştürücü. (b) Verilen mod dönüştürücü aygıtın ilgili dalga kılavuzlarına karşılık gelen TM_0 ve TM_1 kılavuzlanmış mod dispersiyon eğrileri.

Şekil 3.26(b), ΓX iletim yönü boyunca ilgili dalga kılavuzlarına göre hesaplanan TM_0 ve TM_1 mod eğrilerini göstermektedir. Verilen grafikte yeşil renk ile gölgelendirilmiş bölge tasarlanan yapının hem TM_0 hem de TM_1 modlarını desteklediği frekans aralığına karşılık gelmektedir. Verilen grafik incelendiğinde

RWG1-TM₀ ve LWG1-TM₀ ile tanımlanan dispersiyon eğrileri sabit frekans değeri altında farklı dalga vektörü (k) değerlerine karşılık gelmektedir. Bu durum üst ve alt kanallar arasında ilerleyen aynı frekanstaki iki elektromanyetik dalganın yapının sonuna ulaştığında aralarında faz farkı olacağına işaret etmektedir.

Tasarlanan yapıyı zaman alanında incelemek ve mod dönüştürme operasyonunu kanıtlamak amacıyla FDTD yönteminden faydalanılmıştır. Şekiller 3.27(a), 3.27(b) ve 3.27(c) TM₀ modunda yapıya gönderilen elektromanyetik dalgaların yapının sonunda TM₁ moduna dönüştürülmesini sırasıyla $\lambda = 1225$ nm, $\lambda = 1285$ nm ve $\lambda = 1315$ nm dalga boylarında göstermektedir. Verilen FK'lar için örgü sabiti $a = 512$ nm'dir. Elektrik alan profillerine ek olarak, aygıtın çıkışındaki elektrik alan genlikleri normalize edilerek ilgili dalga boyları için verilen şekillere eklenmiştir. Görüleceği üzere, düşük dönel simetrik FK'ların faz kontrol özellikleri sayesinde, yapıya giriş olarak verilen temel modun birinci dereceden çıkış moduna dönüştürülmesi her 3 dalga boyunda da başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan mod dönüştürücünün çalışma bant aralığı $\Delta\lambda = 205$ nm'dir.



Şekil 3.27 : (a) $\lambda = 1255$ nm, (b) $\lambda = 1285$ nm ve (c) $\lambda = 1315$ nm dalga boylarında uyarılan mod dönüştürücünün TM polarizasyon elektrik alan profilleri.

3.3.3 Sonuçlar

Bu çalışmada, dūřuk dōnel simetrik FK yapıları ile tasarlanan dalga kılavuzlarında ilerleyen dalgaların dispersiyon ۆzelliklerinin, birim hūcrelerin geometrik ۆzellikleri ayarlanarak kontrol edilebileceği kanıtlanmıştır. Kılavuzlanmış modların fazlarının etkin kontrolünü sağlayan dūřuk dōnel simetrik FK dalga kılavuzları ile tasarlanan interferometrik konfigürasyonların paralel kanalları arasındaki faz farkı kontrol edilmiştir. Bu durumdan yararlanarak dalga boyu seçici iletim, optik sensör ve mod dōnūřtürücü gibi önemli fotonik aygıtların tasarımı gerçekleştirilmiştir.





4. SONUÇLAR

Dönel simetri, FK yapılarının optik özelliklerini belirleyen en temel etmenlerden birisidir. Literatürde yer alan çoğu FK, tek bir dairesel elemandan oluşan yüksek dönel simetrik birim hücrelerden meydana gelmektedir. FK'ların dönel simetri dereceleri düşürülerek düşük dönel simetrik periyodik ortamlar elde edilmektedir. Bu yapılar, simetri düşüklüğünün beraberinde getirmiş olduğu yapısal zenginlik sebebiyle alışılmışın dışında optik özellikler sergilemektedir. Dahası, düşük dönel simetrik birim hücrelerin açılmal yönelim, şekil veya konumsal dağılım gibi geometrik özellikleri ayarlanarak, FK'ların optik özellikleri istenen şekilde manipüle edilebilmektedir. Sahip oldukları avantajlar nedeniyle düşük dönel simetrik FK'lar, çeşitli fotonik aygıtların ve yeni optik fenomenlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Bölüm 3.1'de, dielektrik tabaka üzerine C_2 simetrik hava deliklerinin açılmasıyla elde edilen FK'lar kullanılarak TM-TE polarizasyon ayırıcı aygıtlar tasarlanmıştır. Sunulan polarizasyon ayırıcı konsepti, düşük dönel simetrik FK'ların sahip olduğu polarizasyona duyarlı öz-kolimasyon fenomenine dayanmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında sunulan aygıtın boyutları $46.4 \mu\text{m} \times 12.4 \mu\text{m}$ olup, dielektrik hava delikleri içeren birim hücrelerden meydana gelmektedir. Verilen aygıtın polarizasyon sönüm oranları $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 'de $\text{PER}_{\text{CH1}} = 23.64 \text{ dB}$ ve $\text{PER}_{\text{CH2}} = 18 \text{ dB}$ olarak hesaplanmıştır. Yine aynı dalga boyunda CH1 ve CH2 çıkış kanallarındaki iletim verimliliği %84.1 ve %72.9 olarak ölçülmüştür. Çalışmanın ikinci aşamasında fabrikasyon ve malzeme kaygıları göz önünde bulundurularak alternatif birim hücre türleri, polarizasyon ayırıcı aygıt tasarımı üzerinde analiz edilmiştir. Bu aşamada tasarlanan polarizasyon ayırıcı $46.3 \mu\text{m} \times 12.7 \mu\text{m}$ boyutlarındadır. İncelenen 4 adet birim hücre türünden U2, U3 ve U4 kodlu birim hücre konfigürasyonlarının $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 'de her iki polarizasyon için 20 dB'den daha yüksek polarizasyon sönüm oranı sunduğu tespit edilmiştir. Tasarlanan yapının çalışma bant genişliği 59 nm'dir. Literatürdeki mevcut polarizasyon ayırıcı tasarımlar ile karşılaştırıldığında, önerilen

tasarımın polarizasyon sönüm oranı bakımından gayet iyi bir alternatif olabileceği görülmektedir.

Bölüm 3.2’de, DBK içeren FK birim hücrelerinin dönel simetri derecelerinde azalmaya gidilerek elde edilen YDK özellikli anizotropik sıfır kırıcılık indisine sahip periyodik ortamlar numerik ve deneysel olarak incelenmiştir. FK’ların YDK frekansında uyarıldığında bir iletim yönü için EMNZ, bu yöne dik iletim doğrultusu için ENZ malzeme davranışı sergilediği gösterilmiştir. DBK içeren FK’ların istenmeyen yönlerdeki ışık iletiminin engellenmesi için yansıtıcı yüzeyler gerekmektedir. Ayrıca, seçilen yapı parametrelerine karşılık gelen tek bir DBK frekansı olmasından dolayı, fotonik yapıların ayarlanabilir özellikleri kısıtlıdır. Ancak, anizotropik özelliklerinden dolayı YDK’lı periyodik ortamlar yansıtıcı veya hapsedici yardımcı yapılar gerektirmemektedir ve fotonik uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir. Buna ek olarak, yapısal parametrelerin ayarlanması ile YDK özelliği spektral ekseninde kontrol edilebilmektedir. Bu avantajları sayesinde, YDK içeren FK’lar kullanılarak dalga saptırıcı, dalga bölücü ve odaklayıcı lens gibi fotonik aygıtlar tasarlanmıştır.

Bölüm 3.3’te, C_1 simetrik birim hücreler içeren FK dalga kılavuzlarına ait kılavuzlanmış modların dispersiyon eğrilerinin, birim hücrelerin açısız oryantasyonu ile kontrol edilebildiği kanıtlanmıştır. Dispersiyon özelliklerinin ayarlanabilir olması sayesinde, dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen dalgaların faz hızları kontrol edilebilmektedir. Bu özellik kullanılarak, çift kanallı ve üç kanallı interferometre yapıları tasarlanmıştır. Birim hücrelerin açısız yönelimlerini kontrol ederek, interferometre kanalları arasındaki faz farkına bağlı olarak, yapı çıkışında istenen girişim deseni istenen dalga boyunda elde edilmiştir. Bu özellik kullanılarak MZI tabanlı gaz sensörü uygulaması sunulmuştur. Tasarımın bulunduğu ortamın kırıcılık indisi 10^{-4} mertebesinde adımlar ile değiştirilmiş ve yapının çıkışında iletim gücü ölçülmüştür. Tasarlanan sensörün minimum 200 nm/RIU hassasiyet gösterdiği hesaplanmıştır. Düşük dönel simetrik FK tabanlı MZI tasarımı, aynı zamanda mod dönüştürücü olarak da tasarlanmıştır. Giriş ve çıkış portlarında hem TM_0 hem de TM_1 modlarını destekleyecek şekilde tasarlanan fotonik aygıt 3 adet dalga kılavuzu tipi içermektedir. Birim hücre oryantasyonu ayarlanarak, MZI’nın paralel iki kanalı arasındaki faz farkı $\Delta\phi = \pi$ ’ye eşitlenmiş ve yapı sonuna erişen dalgaların “faz dışı”

olması sağlanmıştır. Bu sayede, yapıya TM_0 modunda gönderilen dalgaların yapı çıkışında TM_1 moduna dönüştürüldüğü gözlenmiştir. Tasarlanan mod dönüştürücünün bant aralığı 205 nm'dir.





KAYNAKLAR

- [1] **Maiman, T. H.**, (1960). Stimulated optical radiation in Ruby, *Nature*, 187, 493-494.
- [2] **Yablonovitch, E.**, (1987). Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics, *Physical Review Letters*, 58, 2059-2062.
- [3] **John, S.**, (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters*, 58, 2486-2489.
- [4] **Mekis, A., Chen, J. C., Kurland, I., Fan, S., Villeneuve, P. R., Joannopoulos, J. D.**, (1996). High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides. *Physical Review Letters*, 77, 3787-3790.
- [5] **Villeneuve, P. R., Fan, S., Joannopoulos, J.**, (1996). Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tunability, and coupling efficiency. *Physical Review B*, 54, 7837-7842.
- [6] **Knight, J. C., Birks, T. A., Russell, P. S. J., Atkin, D. M.**, (1997). All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Optics Letters*, 22, 484.
- [7] **Witzens, J., Lončar, M., Scherer, A.**, (2002). Self-collimation in planar photonic crystals. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8, 1246-1257.
- [8] **Kosaka, H., Kawashima, T.**, (1998). Superprism phenomena in photonic crystals. *Physical Review B*, 58, R10096-R10099.
- [9] **Cubukcu, E., Aydın, K., Ozbay, E., Foteinopoulou, S., Soukoulis, C. M.**, (2003). Electromagnetic waves: negative refraction by photonic crystals. *Nature*, 423, 604-605.
- [10] **Huang, X., Lai, Y., Hang, Z. H., Zheng, H., Chan, C. T.**, (2011). Dirac cones induced by accidental degeneracy in photonic crystals and zero-refractive-index materials. *Nature Materials*, 10, 582–586.
- [11] **Koshiba, M.**, (2001). Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers. *Journal of Lightwave Technology*, 19, 1970–1975.
- [12] **Ohtera, Y., Sato, T., Kawashima, T., Tamamura, T., Kawakami, S.**, (1999). Photonic crystal polarisation splitters. *Electronics Letters*, 35, 1271.
- [13] **Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H.**, (2014). Reduced symmetry and analogy to chirality in periodic dielectric media. *Journal of the European Optical Society*, 9.

- [14] **Turduev, M., Giden, I. H., Kurt, H.**, (2012). Modified annular photonic crystals with enhanced dispersion relations: polarization insensitive self-collimation and nanophotonic wire waveguide designs. *Journal of the Optical Society of America B*, 29, 1589.
- [15] **Jiang, L., Wu, H., Li, X.**, (2013). Polarization-insensitive and broad-angle self-collimation in a two-dimensional photonic crystal with rectangular air holes. *Applied Optics*, 52, 6676-6684.
- [16] **Kurt, H., Turduev, M., Giden, I. H.** (2012). Crescent shaped dielectric periodic structure for light manipulation. *Optics Express*, 20, 7184.
- [17] **Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H.**, (2013). Broadband super-collimation with low-symmetric photonic crystal. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 11, 132–138.
- [18] **Turduev, M., Giden, I. H., Kurt, H.**, (2013). Extraordinary wavelength dependence of self-collimation effect in photonic crystal with low structural symmetry. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 11, 241–252.
- [19] **Yasa, U. G., Eti, N., Kurt, H.**, (2016). Manipulation of light using semi-Dirac dispersion in low-symmetric photonic crystals. *18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*.
- [20] **Yasa, U. G., Turduev, M., Giden, I. H., Kurt, H.**, (2017). High extinction ratio polarization beam splitter design by low-symmetric photonic crystals. *Journal of Lightwave Technology*, 35, 1677–1683.
- [21] **Yasa, U. G., Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H.**, (2017). Polarization splitting phenomenon of photonic crystals constructed by two-fold rotationally symmetric unit-cells. *Journal of Optics*, 19.
- [22] **Johnson, S., Joannopoulos, J.**, (2001). Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis. *Optics Express*, 8, 173.
- [23] **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.
- [24] **Albrecht, P., Hamacher, M., Heidrich, H., Hoffmann, D., Nolting, H. P., Weinert, C. M.**, (1990). TE/TM mode splitters on InGaAsP/InP. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2, 114–115.
- [25] **van der Tol, J. J. G. M., Pedersen, J. W., Metaal, E. G., Oei, Y. S., van Brug, H., Moerman, I.**, (1993). Mode evolution type polarization splitter on InGaAsP/InP. *IEEE Photonics Technology Letters*, 5, 1412–1414.
- [26] **de Ridder, R. M., Sander, A. F. M., Driessen, A., Fluitman, J. H. J.**, (1993). Integrated optic adiabatic TE/TM mode splitter on silicon. *Journal of Lightwave Technology*, 11(11), 1806–1811.

- [27] **Groen, F. H., de Vreede, A. H., Smit, M. K., Verbeek, B. H.**, (1994). Mach-Zehnder interferometer polarization splitter in InGaAsP/InP. *IEEE Photonics Technology Letters*, 6, 402–405.
- [28] **Maruyama, H., Maruyama, H., Haruna, M., Haruna, M., Nishihara, H.**, (1995). TE-TM mode splitter using directional coupling between heterogeneous waveguides in LiNbO₃. *Journal of Lightwave Technology*, 13, 1550–1554.
- [29] **Schonbrun, E., Wu, Q., Park, W., Yamashita, T., Summers, C. J.**, (2006). Polarization beam splitter based on a photonic crystal heterostructure. *Optics Letters*, 31, 3104.
- [30] **Hou, J., Wang, L., Yang, C., Wang, B., Chen, S.**, (2015). Compact high extinction ratio asymmetric polarization beam splitter of periodic rods waveguide. *Applied Optics*, 54, 10277.
- [31] **Ao, X., Liu, L., Wosinski, L., He, S.**, (2006). Polarization beam splitter based on a two-dimensional photonic crystal of pillar type. *Applied Physics Letters*, 89.
- [32] **Zabelin, V., Dunbar, L. A., Le Thomas, N., Houdré, R., Kotlyar, M. V., O’Faolain, L., Krauss, T. F.**, (2007). Self-collimating photonic crystal polarization beam splitter. *Optics Letters*, 32, 530.
- [33] **Wu, L., Mazilu, M., Gallet, J.-F., Krauss, T. F., Jugessur, A., De La Rue, R. M.**, (2004). Planar photonic crystal polarization splitter. *Optics Letters*, 29, 1620.
- [34] **Kosaka, H., Kawashima, T., Tomita, A., Notomi, M., Tamamura, T., Sato, T., Kawakami, S.**, (1999). Self-collimating phenomena in photonic crystals. *Applied Physics Letters*, 74, 1212–1214.
- [35] **Lee, S.-G., Choi, J., Kim, J.-E., Park, H.-Y., Kee, C.-S.**, (2008). Reflection minimization at two-dimensional photonic crystal interfaces. *Optics Express*, 16, 4270.
- [36] **Momeni, B., Adibi, A.**, (2005). Adiabatic matching stage for coupling of light to extended Bloch modes of photonic crystals. *Applied Physics Letters*, 87, 1–3.
- [37] **Berenger, J.-P.**, (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114, 185–200.
- [38] **Raghu, S., Haldane, F. D. M.**, (2008). Analogs of quantum-Hall-effect edge states in photonic crystals. *Physical Review A*, 78.
- [39] **Zhang, X.**, (2008). Observing zitterbewegung for photons near the dirac point of a two-dimensional photonic crystal. *Physical Review Letters*, 100.
- [40] **Chan, C.-T., Huang, X., Liu, F., Hang, Z. H.**, (2012). Dirac dispersion and zero-index in two dimensional and three dimensional photonic and phononic systems. *Progress in Electromagnetics Research B*, 44, 163–190.

- [41] **Moitra, P., Yang, Y., Anderson, Z., Kravchenko, I. I., Briggs, D. P., Valentine, J.**, (2013). Realization of an all-dielectric zero-index optical metamaterial. *Nature Photonics*, 7, 791–795.
- [42] **Dong, J. W., Chang, M. L., Huang, X. Q., Hang, Z. H., Zhong, Z. C., Chen, W. J., Huang, Z. Y., Chan, C. T.**, (2015). Conical dispersion and effective zero refractive index in photonic quasicrystals. *Physical Review Letters*, 114, 163901.
- [43] **Wang, J. R., Chen, X. D., Zhao, F. L., Dong, J. W.**, (2016). Full polarization conical dispersion and zero-refractive-index in two-dimensional photonic hypercrystals. *Scientific Reports*, 6.
- [44] **Xu, C., Lai, Y.**, (2017). Configurable Dirac-like conical dispersions in complex photonic crystals. *Physical Review B*, 95(4).
- [45] **Boriskina, S. V.**, (2015). Quasicrystals: making invisible materials. *Nature Photonics*.
- [46] **Kita, S., Li, Y., Camayd-Muñoz, P., Reshef, O., Vulis, D. I., Day, R. W., Mazur, E., Lončar, M.**, (2017). On-chip all-dielectric fabrication-tolerant zero-index metamaterials. *Optics Express*, 25, 791–795.
- [47] **Gao, H., Zhou, Y., Zheng, Z.**, (2016). Broadband unidirectional transmission realized by properties of the Dirac cone formed in photonic crystals. *Journal of Optics*, 18.
- [48] **He, X. T., Huang, Z. Z., Chang, M. L., Xu, S. Z., Zhao, F. L., Deng, S. Z., She, S. Z., Dong, J. W.**, (2016). Realization of zero-refractive-index lens with ultralow spherical aberration. *ACS Photonics*, 3, 2262–2267.
- [49] **Enoch, S., Tayeb, G., Sabouroux, P., Guérin, N., Vincent, P.**, (2002). A metamaterial for directive emission. *Physical Review Letters*, 89.
- [50] **Silveirinha, M., Engheta, N.**, (2007). Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero media. *Physical Review B*, 75.
- [51] **Alù, A., Silveirinha, M. G., Salandrino, A., Engheta, N.**, (2007). Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: tailoring the radiation phase pattern. *Physical Review*, 75.
- [52] **Liu, R., Cheng, Q., Hand, T., Mock, J. J., Cui, T. J., Cummer, S. A., & Smith, D. R.**, (2008). Experimental demonstration of electromagnetic tunneling through an epsilon-near-zero metamaterial at microwave frequencies. *Physical Review Letters*, 100.
- [53] **Adams, D. C., Inampudi, S., Ribardo, T., Slocum, D., Vangala, S., Kuhta, N. A., Goodhue, W. D., Podolskiy, A., Wasserman, D.**, (2011). Funneling light through a subwavelength aperture with epsilon-near-zero materials. *Physical Review Letters*, 107.
- [54] **Alù, A., Silveirinha, M. G., Engheta, N.**, (2008). Transmission-line analysis of ϵ -near-zero-filled narrow channels. *Physical Review*, 78.

- [55] **Silveirinha, M., Engheta, N.**, (2006). Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials. *Physical Review Letters*, 97.
- [56] **Wu, Y.**, (2014). A semi-Dirac point and an electromagnetic topological transition in a dielectric photonic crystal. *Optics Express*, 22, 1906.
- [57] **He, X. T., Zhong, Y. N., Zhou, Y., Zhong, Z. C., Dong, J. W.**, (2015). Dirac directional emission in anisotropic zero refractive index photonic crystals. *Scientific Reports*, 5.
- [58] **Busch, K., John, S.**, (1999). Liquid-crystal photonic-band-gap materials: The tunable electromagnetic vacuum. *Physical Review Letters*, 83, 967–970.
- [59] **Chen, H.-T., Padilla, W. J., Zide, J. M. O., Gossard, A. C., Antoinette, J. T., Averitt, R. D.**, (2006). Active terahertz metamaterial devices. *Nature*, 444, 597–600.
- [60] **Wang, Y.-Y., Chen, L.-W.**, (2006). Tunable negative refraction photonic crystals achieved by liquid crystals. *Optics Express*, 14, 10580–7.
- [61] **Rauh, H., Yampolskaya, G. I., Yampolskii, S. V.**, (2010). Optical transmittance of photonic structures with linearly graded dielectric constituents. *New Journal of Physics*, 12.
- [62] **Zhu, W. M., Liu, A. Q., Bourouina, T., Tsai, D. P., Teng, J. H., Zhang, X. H., Kwong, D. L., Zheludev, N. I.**, (2012). Microelectromechanical Maltese-cross metamaterial with tunable terahertz anisotropy. *Nature Communications*, 3.
- [63] **Ho, C. H., Cheng, Y. C., Maigyte, L., Zeng, H., Trull, J., Cojocar, C., Wiersma, D. S., Staliunas, K.**, (2015). Controllable light diffraction in woodpile photonic crystals filled with liquid crystal. *Applied Physics Letters*, 106.
- [64] **Giden, I. H., Kurt, H.**, (2012). Modified annular photonic crystals for enhanced band gap properties and iso-frequency contour engineering. *Applied Optics*, 51, 1287.
- [65] **Hariharan, P.**, (2010). *Basics of interferometry*. Academic Press.
- [66] **Martínez, A., Sanchis, P., Martí, J.**, (2005). Mach–Zehnder interferometers in photonic crystals. *Optical and Quantum Electronics*, 37, 77-93.
- [67] **Zhao, D., Zhang, J., Yao, P., Jiang, X., Chen, X.**, (2007). Photonic crystal Mach-Zehnder interferometer based on self-collimation. *Applied Physics Letters*, 90.
- [68] **Camargo, E. A., Chong, H. M. H., De La Rue, R. M.**, (2004). 2D Photonic crystal thermo-optic switch based on AlGaAs/GaAs epitaxial structure. *Optics Express*, 12, 588.

- [69] Sepúlveda, B., Río, J. S. del, Moreno, M., Blanco, F. J., Mayora, K., Domínguez, C., Lechuga, L. M., (2006). Optical biosensor microsystems based on the integration of highly sensitive Mach - Zehnder interferometer devices. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 8, S561–S566.
- [70] Zhang, Y., Han, S., Zhang, S., Liu, P., Shi, Y., (2015). High-Q and high-sensitivity photonic crystal cavity sensor. *IEEE Photonics Journal*, 7.
- [71] Zhang, Y., Zhao, Y., Hu, H., (2015). Miniature photonic crystal cavity sensor for simultaneous measurement of liquid concentration and temperature. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 216, 563–571.
- [72] Ymeti, A., Greve, J., Lambeck, P. V., Wink, T., Van Hövell, S. W. F. M., Beumer, T. A. M., Wijn, R. R., Heideman, R. G., Subramaniam, V., Kanger, J. S., (2007). Fast, ultrasensitive virus detection using a young interferometer sensor. *Nano Letters*, 7, 394–397.
- [73] Xiao, G. Z., Adnet, A., Zhang, Z., Sun, F. G., & Grover, C. P., (2005). Monitoring changes in the refractive index of gases by means of a fiber optic Fabry-Perot interferometer sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 118, 177–182.
- [74] Heideman, R. G., Kooyman, R. P. H., Greve, J., (1993). Performance of a highly sensitive optical waveguide Mach-Zehnder interferometer immunosensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 10, 209-217.
- [75] Tian, Z., Yam, S. S. H., Barnes, J., Bock, W., Greig, P., Fraser, J. M., Loock, H. P., Oleschuk, R. D., (2008). Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20, 626-628.
- [76] Tian, J., Lu, Y., Zhang, Q., Han, M., (2013). Microfluidic refractive index sensor based on an all-silica in-line Fabry-Perot interferometer fabricated with microstructured fibers. *Optics express*, 21, 6633-6639.
- [77] Homola, J., Yee, S. S., Gauglitz, G., (1999). Surface plasmon resonance sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 54, 3-15.
- [78] Perrotton, C., Westerwaal, R. J., Javahiraly, N., Slaman, M., Schreuders, H., Dam, B., Meyrueis, P., (2013). A reliable, sensitive and fast optical fiber hydrogen sensor based on surface plasmon resonance. *Optics Express*, 21, 382-390.
- [79] Luan, N., Wang, R., Lv, W., Yao, J., (2015). Surface plasmon resonance sensor based on D-shaped microstructured optical fiber with hollow core. *Optics Express*, 23, 8576-8582.
- [80] Carlborg, C. F., Gylfason, K. B., Kaźmierczak, A., Dortu, F., Polo, M. B., Catala, A. M., Kresbach, G. M., Sohlström, H., Moh, T., Vivien, L., Popplewell, J., Ronan, G., Barrios, C. A., Stemme, G., Wijngaart, W., (2010). A packaged optical slot-waveguide ring resonator sensor array for multiplex label-free assays in labs-on-chips. *Lab on a Chip*, 10, 281-290.

- [81] **Zhu, H., White, I. M., Suter, J. D., Dale, P. S., Fan, X.**, (2007). Analysis of biomolecule detection with optofluidic ring resonator sensors. *Optics Express*, 15, 9139-9146.
- [82] **Ksendzov, A., Lin, Y.** (2005). Integrated optics ring-resonator sensors for protein detection. *Optics Letters*, 30, 3344-3346.
- [83] **Chow, E., Grot, A., Mirkarimi, L. W., Sigalas, M., Girolami, G.**, (2004). Ultracompact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity. *Optics Letters*, 29, 1093-1095.
- [84] **Lee, K., Asher, S. A.**, (2000). Photonic crystal chemical sensors: pH and ionic strength. *Journal of the American Chemical Society*, 122, 9534-9537.
- [85] **Asher, S. A., Alexeev, V. L., Goponenko, A. V., Sharma, A. C., Lednev, I. K., Wilcox, C. S., Finegold, D. N.**, (2003). Photonic crystal carbohydrate sensors: low ionic strength sugar sensing. *Journal of the American Chemical Society*, 125, 3322-3329.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Utku Görkem YASA
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 02.08.1992 - ANKARA
E-posta : gorkemyasa@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

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

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2017-2018	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Burslu Y. Lisans Öğrencisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yasa, U. G.**, Eti, N., Kurt, H., (2016). Manipulation of light using semi-Dirac dispersion in low-symmetric photonic crystals. *18th International Conference on Transparent Optical Networks*.
- **Yasa, U. G.**, Turdjev, M., Giden, I. H., Kurt, H., (2017). High extinction ratio polarization beam splitter design by low-symmetric photonic crystals. *Journal of Lightwave Technology*, 35, 1677-1683.
- **Yasa, U. G.**, Kurt, H., (2017). Düşük dönel simetrik fotonik kristal yapıları tabanlı optik fenomenler ve fotonik aygıt uygulamaları. *19. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*.
- **Yasa, U. G.**, Kurt, H., (2017). Manipulating light with symmetry-reduced photonic crystals. *13th Nanoscience & Nanotechnology Conference*.
- **Yasa, U. G.**, Giden, I. H., Kurt, H., (2017). Efficient Mach-Zehnder interferometer design based on low-symmetric photonic crystals. *19th International Conference on Transparent Optical Networks*.

- **Yasa, U. G.**, Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H., (2017). Polarization splitting phenomenon of photonic crystals constructed by two-fold rotationally symmetric unit-cells. *Journal of Optics*, 19, 095005.
- **Yasa, U. G.**, Giden, I. H., Kurt, H., (2018). Optical modulators and biochemical sensors based on low-symmetric nanophotonic structures with interferometric configurations. *Photonic and Phononic Properties of Engineered Nanostructures VIII* (Vol. 10541, p. 105411Q). International Society for Optics and Photonics.
- **Yasa, U. G.**, Turduev, M., Giden, I. H., Kurt, H., (*Değerlendirme aşamasında*). Full utilization of semi-Dirac cones in photonics.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yasa, U. G.**, Erim, M. N., Erim, N., Girgin, M. O., Kurt, H., (2017). Design of anti-reflective graded height nanogratings for photovoltaic applications. *International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices*.

