

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARI VE YAVAŞ IŞIK ELDE
EDİLMESİ**

Fulya BAĞCI

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

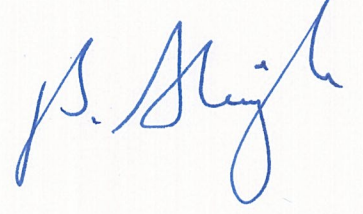
2013

Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

Fulya BAĞCI tarafından hazırlanan “**Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları ve Yavaş Işık Elde Edilmesi**” adlı tez çalışması **16.09.2013** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Barış AKAOĞLU



Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Raşit TURAN

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü



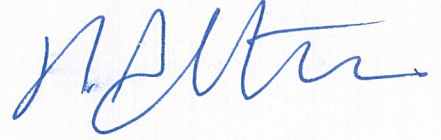
Üye : Prof. Dr. Mehmet KABAK

Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü



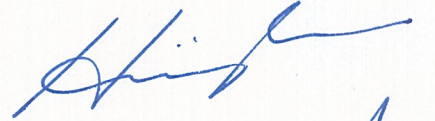
Üye : Doç. Dr. Hakan Altan

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü



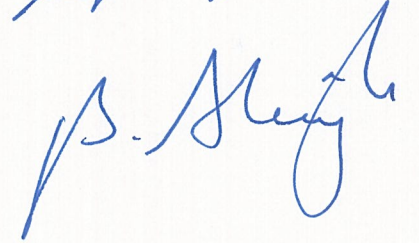
Üye : Doç. Dr. Hüseyin Sarı

Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü



Üye : Doç. Dr. Barış Akaoğlu

Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof.Dr.İbrahim DEMİR

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARI ve YAVAŞ IŞIK ELDE EDİLMESİ

Fulya BAĞCI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Barış AKAOĞLU

Fotonik kristaller dielektrik sabitinin periyodik olarak değiştiği, ışığı kontrol altına alabilen optik yapılardır ve olağandışı optik özelliklere ve çok sayıda yenilikçi uygulamalara sahiptir. Bu tez çalışmasında öncelikli olarak fotonik kristallerde bant mühendisliği çalışmalarıyla hibrit örgü tipinin ve örgü simetrisinin bant yapısına ve bantın düzlüğüne etkisi incelenmiştir. Fotonik kristallerin bant yapıları düzlem dalga açılımı yöntemi ile belirlenmiştir. Atmanın zaman içinde ilerleyişi ve iletim spektrumları zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi hesaplamalarıyla elde edilmiştir. Fotonik kristallerin teknolojideki uygulamaları olarak fotonik kristal temelli bir kırılma indisi algılayıcısı ve 1x4 güç bölücü tasarlanmıştır. Fotonik kristal yapılarda ışığın yavaşlatılması ışık-madde etkileşimini artırarak fotonik aletlerin boyutlarının azalmasına ve birçok bakımdan performanslarının iyileşmesine olanak sağlamaktadır. Tezin yavaş ışık ile ilgili kısmında fotonik kristal dalga kılavuzu yapılarında tasarım parametreleri ile yavaş ışık özellikleri (grup hızı, bant genişliği, grup hızı dağılımı,..) arasındaki ilişki derinlemesine irdelenerek, dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalganın hızı ayarlanmıştır. Yavaş ışık olgusundan yararlanılarak optik gecikme hatlarında ve arabelleklerde kullanılmak üzere çizgi kusurlu fotonik kristal dilim yapılar tasarlanmış ve elektro-optik kiplenim verimlilikleri iyileştirilmiştir. Yavaş ışık fotonik kristal dalga kılavuzlarının bant yapılarının doğru belirlenmesi için süper hücrenin doğru tasarlanmasının önemi de bu tez çalışmasında ortaya konulmuştur.

Eylül 2013, 133 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristaller, fotonik kristal dalga kılavuzları, düzlem dalga açılımı yöntemi, zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi, yavaş ışık, grup hızı, grup hızı dağılımı, elektro-optik kiplenim

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDES AND SLOW LIGHT GENERATION

Fulya BAĞCI

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Baris AKAOGLU

Photonic crystals are optical structures with a periodically changing dielectric constant. They can control the propagation of light, leading to unusual optical properties and innovative applications. In this thesis, first, the effect of the hybrid lattice and lattice symmetry on the band structure and band flatness is investigated by performing band engineering studies of photonic crystals. Band structures of photonic crystals are determined by plane-wave expansion method. The propagation of the pulse in time and transmission spectrums are obtained by finite-difference time-domain calculations. As technological applications of photonic crystals, a photonic crystal based refractive index sensor and a 1x4 power splitter are designed. The slowness of light in photonic crystal structures enables the decrease in size and improvement in performance of the photonic devices with the increase of light-matter interaction. In the slow light part of this thesis, the relation between the design parameters and the properties of slow light (group velocity, bandwidth, group velocity dispersion,..) is examined in depth and the speed of the electromagnetic wave propagation inside the waveguide is adjusted. Using slow light phenomenon, line-defect photonic crystal slab structures are designed to be used in optical delay lines and optical buffers. Their electro-optic modulation efficiencies are improved. The importance of accurate determination of the supercell to accurately determine the band structure of slow light photonic crystal waveguides has also been put forward.

September 2013, 133 pages

Key Words: Photonic crystals, photonic crystal waveguides, plane-wave expansion method, finite-difference time-domain method, slow light, group velocity, group velocity dispersion, electro-optic modulation

TEŞEKKÜR

Bu güncel ve ilginç çalışma konusuna beni yönlendiren, tezimin her aşamasında desteğini aldığım, çalışmalarım konusunda beni yüreklendiren, yeni araştırmalara teşvik eden tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Barış Akaoğlu'na (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı) içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca önerileriyle ve ilgileriyle akademik anlamda gelişmemde katkıları bulunan tez izleme komitesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Raşit Turan'a (Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Ana Bilim Dalı) ve Sayın Doç. Dr. Hüseyin Sarı'ya (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı) teşekkürü borç bilirim. Fikirleriyle yardımını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Hamza Kurt'a (TOBB ETÜ, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı) da çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olup maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok sevgili annem ve babama doktoram süresince gösterdikleri tüm anlayış, hoşgörü ve sabırları için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yine bu süreçte yanımda olan çok sevgili kardeşime, anneannem ve dedeme ve adları burada geçmeyen tüm değerli arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Fulya BAĞCI

Ankara, Eylül 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	7
2.1 Fotonik Kristaller.....	7
2.2 Boyutlarına Göre Fotonik Kristaller	7
2.2.1 Bir boyutlu fotonik kristaller.....	8
2.2.2 İki boyutlu fotonik kristaller	9
2.3 Fotonik Kristal Dilim.....	14
2.4 Dilim Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları	15
2.5 Temel Denklemin Elde Edilmesi.....	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1 Düzlem Dalga Açılımı Yöntemi	22
3.2 Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi	25
3.2.1 Yee algoritması.....	26
3.2.2 Bir boyutta zamanda sonlu farklar yöntemi.....	28
3.2.3 Courent koşulu	32
3.3 Etkin İndis Yöntemi.....	33
4. FOTONİK KRİSTALLERDE SİMETRİNİN BANT YAPISINA ETKİSİ	36
4.1 Simetrinin Azaltılmasının Kare Örgülü Fotonik Kristalin Bant Yapısına Etkisi.....	36
4.2 Simetrinin Azaltılmasının Hibrit Üçgen-Grafit Örgülü Fotonik Kristalin Bant Yapısına Etkisi	41
5. FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZU TEMELLİ OPTİK ALETLER ..	51
5.1 Fotonik Kristal Kırılma İndisi Algılayıcısı	51

5.1.1 Giriş.....	51
5.1.2 Fotonik kristal dalga kılavuzunun algılama karakteristiği	53
5.1.3 İlk sıra delikleri farklı çapta fotonik kristal dalga kılavuzu ile algılama.....	55
5.1.4 Merkezdeki delikleri farklı çapta fotonik kristal dalga kılavuzu ile algılama.....	56
5.1.5 Sonuç.....	59
5.2 1x4 Fotonik Kristal Güç Bölücü	59
5.2.1 Giriş.....	59
5.2.2 Ardışık 60° bükülü fotonik kristal dalga kılavuzunun optimizasyonu	62
5.2.3 Fotonik kristal Y-eklemin optimizasyonu	64
5.2.4 Fotonik kristal yönlü bağlaştıracının optimizasyonu.....	66
5.2.5 Sonuç.....	69
6. FOTONİK KRİSTAL YAPILARDA IŞIĞIN HIZININ YAVAŞLATILMASI	70
6.1 Giriş	70
6.2 Yavaş Işığı Tanımlayan Parametreler	74
6.3 Yavaş Işık Fotonik Kristal Dalga Kılavuzlarının Modellenmesinde Süper Hücre Seçimi.....	75
6.3.1 Dağınım ve yavaş ışık özelliklerinin doğru tespiti için süper hücrenin doğru tanımlanmasının önemi.....	75
6.3.2 Fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı.....	77
6.3.3 Süper hücrenin sonlandırılmasının etkisi.....	78
6.3.4 Süper hücrede çizgi kusuru çevresindeki sıra sayısının etkisi	82
6.3.5 Süper hücrenin ızgara aralığının etkisi	83
6.3.6 Sonuç.....	84
6.4 Çizgi Kusuru Çevresindeki Deliklerin Kaydırılması ile Işığın Hızının Yavaşlatılması	85
6.4.1 Giriş.....	85
6.4.2 Dalga kılavuzu tasarımı ve modellenmesi	86
6.4.3 Çap değişiminin etkisi	87
6.4.4 Grup hızı dağılımı karakteristikleri	91
6.4.5 Atmanın zamansal şekli	92
6.4.6 Sonuç.....	93

6.5 Dalga Kılavuzu Genişliği Sabit Bırakılarak Çizgi Kusuru Çevresindeki Deliklerin Kaydırılması ile Işığın Hızının Yavaşlatılması.....	94
6.5.1 Giriş.....	94
6.5.2 Dalga kılavuzu tasarımı ve modellenmesi	94
6.5.3 Yarıçap değişiminin etkileri.....	95
6.6 Çizgi Kusurunun Çevreleyen Sıraların Kusura Dik Yönde Kaydırılmasının Etkisi.....	98
6.6.5 Sonuç.....	105
7. IŞIĞIN HIZININ YAVAŞLATILMASI İLE ELEKTRO-OPTİK KİPLENİM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ.....	106
7.1 Giriş.....	106
7.2 Optik Arabelleklerin Performansını Tanımlayan Parametreler.....	106
7.3 Fotonik Kristal Dilimin Yapısı ve Modelleme.....	108
7.4 Fotonik Kristal Dilimin Yavaş Işık Performansı	109
7.5 İlk Sıra Delikleri 0.22a Kaydırılmış Fotonik Kristal Dilimin Kiplenim Performansı	111
7.6 İlk Sıra Delikleri 0.27a Kaydırılmış ve Örgü Parametresi Genişletilmiş Fotonik Kristal Dilimin Kiplenim Performansı	113
7.7 İlk Sıra Delikleri 0.30a Kaydırılmış ve Örgü Parametresi Genişletilmiş Fotonik Kristal Dilimin Kiplenim Performansı	118
7.8 Sonuç	122
8. SONUÇ	123
KAYNAKLAR	126
ÖZGEÇMİŞ.....	132

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

c	Işığın vakumdaki hızı
v_G	Grup hızı
n_G	Grup indisi
ϵ	Dielektrik sabiti
λ	Dalga boyu
ρ	Yük yoğunluğu
μ	Manyetik alınganlık
$\vec{k}$	Dalga vektörü
$\vec{E}$	Elektrik alan vektörü
$\vec{H}$	Manyetik alan vektörü
FK	Fotonik kristal
FKD	Fotonik kristal dalga kılavuzu
FBA	Fotonik bant aralığı
TBA	Tam bant aralığı
PWE	Düzlem dalga açılımı yöntemi
FDTD	Zamanda sonlu farklar yöntemi
PML	Mükemmel uyumlu tabaka
TE	Enine elektrik
TM	Enine manyetik
SC	Süper hücre
GVD	Grup hızı dağınımı
NDBP	Normalize gecikme-bant genişliği çarpanı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 FKD yapısının üretimi (Askari vd. 2011)	3
Şekil 1.2.a. Üretilen fotonik kristal dalga kılavuzunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü, b. Üç elektrik kontaklı Mach-Zehnder interferometresinin optik mikroskop görüntüsü (Vlasov vd. 2005)	4
Şekil 2.1.a. Bir boyutlu, b. iki boyutlu ve c. üç boyutlu fotonik kristaller	7
Şekil 2.2.a. Bir boyutlu fotonik kristal, b. GaAs/GaAlAs çok katmanlı filmin fotonik bant yapısı (Joannopoulos 2008)	8
Şekil 2.3 GaAs/GaAlAs çok katmanlı film için $k=0.5(2\pi/a)$ 'da (Joannopoulos 2008) ...	9
a. $n=1$ no'lu kipin elektrik alanı, b. $n=2$ no'lu kipin elektrik alanı	9
Şekil 2.4 Kare örgülü dielektrik çubuklu iki boyutlu fotonik kristal yapısı (Joannopoulos 2008)	10
Şekil 2.5 Hava içerisinde $r=0.2a$ yarıçaplı silisyum dielektrik çubuklu bal peteği örgülü fotonik kristalin hesaplanan fotonik bant yapısı grafiği	11
Şekil 2.6 Hava içerisinde $r=0.2a$ yarıçaplı silisyum dielektrik çubuklu kare örgülü fotonik kristalin fotonik bant yapısı grafiği (Joannopoulos vd. 2008)	12
Şekil 2.7 Hava içerisinde dielektrik çubuklu kare örgülü fotonik kristal (Joannopoulos vd. 2008)	12
a. İlk TM bandının, b. ikinci TM bandının elektrik yer değiştirme alanı dağılımı	12
Şekil 2.8 Hava içerisinde kare örgülü dielektrik ($\epsilon=8.9$) kanalların (kalınlık= $0.165a$) fotonik bant yapısı (Joannopoulos vd. 2008)	13
Şekil 2.9 Hava içerisinde kare örgülü dielektrik kanallı fotonik kristal (Joannopoulos vd. 2008)	13
a. İlk TE bandının, b. ikinci TE bandının manyetik alan dağılımı	13
Şekil 2.10 Fotonik kristal dilim yapıları (Joannopoulos vd. 2008)	14
a. Havada kare örgülü dielektrik çubuklar, b. dielektrik dilimde üçgen örgülü hava delikleri	14
Şekil 2.11 $z=0$ ayna simetri düzlemine sahip ince FK dielektrik dilim yapılarında	15
a. TM-benzer kip için, b. TE-benzer kip için elektrik alan çizgilerinin şematik gösterimi	15
Şekil 2.12.a. Nokta kusuru (rezonant kavite), b. çizgi kusuru (dalga kılavuzu)	15
Şekil 2.13 x-doğrultusunda bir sıra hava deliklerinin çıkartılmasıyla oluşturulmuş dilim fotonik kristal dalga kılavuzuna ait dağılım grafiği (Joannopoulos vd. 2008)	17
Şekil 2.14 Havada asılı fotonik kristal dilim yapının fabrike edildiğindeki şematik görünüşü (Carlsson vd. 2002)	17
Şekil 2.15 FKD'nın a. $k_x=0.32\pi/a$ noktasında, b. $k_x=0.5\pi/a$ noktasında y-tek kipinin H_z alan dağılımı	18

Şekil 3.2 Bir boyutlu dalga ilerlemesi örneği için Yee algoritmasının uzay zaman konumlanması (Schneider 2011)	27
Şekil 3.3 Elektrik ve manyetik alan düğümlerinin zaman ve konum bölgesinde konumlanması. Belirtilen noktada H_y için güncelleme denklemi yazılmıştır. (Schneider 2011).....	30
Şekil 3.4 Elektrik ve manyetik alan düğümlerinin zaman ve konum bölgesinde konumlanması.....	32
Şekil 3.5.a. Geleneksel heteroyapılı dilim fotonik kristal dalga kılavuzu, b. iki boyutlu fotonik kristal, c. heteroyapılı dilim dalga kılavuzu temelli iki boyutlu fotonik kristal (Qui 2002)	33
Şekil 3.6 İki boyutlu üçgen örgülü InP/GaInAsP/InP fotonik kristalin bant yapısı.....	35
Şekil 4.1 Farklı doluluk ve çap oranlarına göre dielektrik ortamda iki boyutlu kare fotonik kristal örgü.....	37
Şekil 4.2 Silikon ortamda dairesel hava delikli kare örgüde TE ve TM bantları ($f=0.8$)	38
Şekil 4.3 Merkezi kare hava delikli kare örgülü yapıda TE ve TM bantları.....	38
Şekil 4.4 Merkezi kare, dairesel hava delikli kare örgülü yapıda yapıda	39
a. TE2 ve b. TE3 kipleri için manyetik alan dağılımı.....	39
Şekil 4.5 Merkezi kare, hava delikli kare örgülü yapıda kare örgü noktalarının döndürülmesi ile bant aralığı değişimi.....	39
Şekil 4.7 Merkezi dairesel, dairesel hava delikli kare örgülü yapıda yapıda.....	40
a. TE2 ve b. TE3 kipleri için manyetik alan dağılımı.....	40
Şekil 4.11.a. D1 yapısına ait TM kutuplu, b. TE kutuplu dağınım grafikleri, c. D2 yapısına ait TM kutuplu, d. TE kutuplu dağınım grafikleri.....	45
Şekil 4.13 a. D5 yapısına ait TM kutuplu, b. TE kutuplu dağınım grafikleri	47
Şekil 4.14 Dokuzuncu TM kipinin Γ simetri noktasında:	49
a. D3 yapısına ait, b. D5 yapısına ait manyetik alan dağılımı	49
Şekil 5.1 Sadece ilk sıra delikleri sıvı ile doldurulmuş üçgen örgülü fotonik kristal dilim dalga kılavuzu.....	53
Şekil 5.2 0.76a delik çaplı ve 0.6a kalınlıklı fotonik kristal dilim dalga kılavuzunun bant yapısı	54
Şekil 5.3.a. Fotonik kristal dilim dalga kılavuzunun farklı sıvılar için geçirgenlik spektrumu, b. kesilim dalga boyundaki kaymanın kırılma indisi ile değişimi.....	55
Şekil 5.4.a. $d=0.60a-0.68a$, b. $d=0.72a-0.80a$ delik çapları için fotonik kristal dilim dalga kılavuzunun iletim spektrumları.....	56
Şekil 5.5 Sadece merkezdeki delikleri doldurulmuş üçgen örgülü fotonik kristal dilim dalga kılavuzu.....	56
Şekil 5.6 0.76a çaplı örgü noktalı, dalga kılavuzu içerisinde 0.60a çaplı delikleri olan ve 0.6a kalınlıklı bir dilim fotonik kristal dalga kılavuzunun bant yapısı	57

Şekil 5.8.a. Dilim fotonik kristal dalga kılavuzunun farklı sıvılar için iletim spektrumu, b. kesilim dalga boyundaki kaymanın kırılma indisi ile değişimi	58
Şekil 5.9 Tasarlanan 1x4 fotonik kristal güç bölücü.....	61
Şekil 5.10.a. 0.3a yarıçaplı ve 220 nm kalınlıklı üçgen örgülü FK'in band yapısı, b. FKD'nun dağıtım grafiği	62
Şekil 5.11.a. Standart 60° bükülü FKD, b-f. bükülme bölgesindeki deliklerin yarıçapının optimizasyonu ile iletim verimi artırılmış bükülmeler	63
Şekil 5.12 Farklı 60° bükülü FKD yapılarının iletim spektrumu	63
Şekil 5.13 Standart ve optimize edilmiş Y-eklemin iletim spektrumu	66
Şekil 5.14 0.30a bağlaştırmacı delikli yönlü bağlaştırmacının dağıtım grafiği	66
Şekil 5.15.a. 0.34a bağlaştırmacı delikli yönlü bağlaştırmacının dağıtım grafiği, b. ilgili ç-ç ve ç-t kiplerinin ikiye ayrışması	67
Şekil 5.16 1x4 güç bölücünün çıkış kapılarının iletim spektrumları	68
Şekil 5.17 1.53 µm merkez dalga boylu ve 40 nm bant genişlikli TE kipindeki Gaussyen atmanın ilerleyişi.....	68
Şekil 6.3 İncelenen üçgen örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı	78
a.ve c.'deki süper hücrelerde delikler kenarlarda yarım olacak biçimde, b. ve d.'deki süper hücrelerde ise delikler tam olacak biçimde sonlandırılmıştır.....	78
Şekil 6.4 Çizgi kusuru etrafında dört sıra delikli fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının (SC1 ve SC2) a. dağıtım, b. grup indisi-frekans grafikleri; çizgi kusuru etrafında sekiz sıra delikli fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının (SC3 ve SC4), c. dağıtım ve d. grup indisi-frekans grafikleri, e. çizgi kusuru etrafında on sıra delikli fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının (SC5 ve SC6) e. dağıtım ve f. grup indisi-frekans grafikleri.....	79
Şekil 6.5.a. SC1'in dalga kılavuzuna dik doğrultuda kendini tekrarlaması, b. SC2'nin dalga kılavuzuna dik doğrultuda kendini tekrarlaması	80
Şekil 6.6.a. SC3 ve b. SC4 süper hücreli, çizgi kusuru çevresinde sekiz sıra saçıcı fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının fotonik bant diyagramı	81
Şekil 6.7 Kılavuz kiplerin (G1-G6), dielektrik bandın (D.B.) üst ve hava bandının (A.B.) alt noktasındaki sürekli kiplerin ve sahte kiplerin (E1, E2) $k=0.40[2\pi/a]$ 'daki manyetik alan dağılımları	82
Şekil 6.8 Çizgi kusuru etrafındaki sıra saçıcıların sayısı artırılırken SC3 süper hücreli FKD'daki temel çift kılavuz kipi.....	83
a. Dağıtım ve b. grup indisi-frekans grafiklerinin değişimi.....	83
Şekil 6.9 Izgara genişliği 16x16'dan 128x128'e artırılırken SC3 süper hücreli FKD'daki temel çift kılavuz kipi.....	84
a. Dağıtım ve b. grup indisi-frekans eğrileri.....	84
Şekil 6.10 Fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının şematik resmi.....	86
Şekil 6.11 $s_2=0$ için farklı s_1 kaymaları	87
a. Dağıtım, b. grup indisi karakteristiklerinin değişimi	87

Şekil 6.12 $s_1=0$ için farklı s_2 kaymaları	88
a. Dağılım, b. grup indisi karakteristiklerinin değişimi	88
Şekil 6.14 Farklı s_1 ve s_2 kaymaları	90
a. Dağılım, b. grup indisi karakteristiklerinin değişimi	90
Şekil 6.16 Farklı s_1 , s_2 kaymaları için grup hızı dağılımı değerlerinin değişimi	92
Şekil 6.17 (0.02a; 0.08a) yapısı için $L=143a$ uzunluklu bir FKD'nun giriş ve çıkış noktalarında atmanın zamansal profili	93
Şekil 6.18 Fotonik kristal dalga kılavuzunun şematik gösterimi	95
Şekil 6.19 Tek sırası halka şeklinde delikli FKD'nın a. dağılım, b. grup indisi karakteristiği	96
Şekil 6.20.a. İlk sırası halka şeklinde delikli, b. ilk iki sırası halka şeklinde delikli, c. ilk üç sırası halka şeklinde delikli FKD yapısının grup indisi karakteristikleri	97
Şekil 6.21 Kılavuz kiplerin ve bant aralığı alt ucunun $r_{dış}$ arttıkça değişimi	97
Şekil 6.22 Tek sırası halka şeklindeki FKD yapısında	98
a. ikinci sıra delikler, b. ikinci ve üçüncü sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırıldığında grup indisinin değişimi	98
Şekil 6.23 İlk iki sırası halka şeklindeki FKD yapısında	99
a. ikinci sıra delikler, b. ikinci ve üçüncü sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırıldığında grup indisinin değişimi	99
Şekil 6.24 İlk üç sırası halka şeklindeki FKD yapısında	100
a. ikinci sıra delikler, b. ikinci ve üçüncü sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırıldığında grup indisinin değişimi	100
Şekil 6.25.a İlk sırası halka şeklinde delikli FKD'nın s_2 kaymalarının, b. ilk iki sırası halka şeklinde delikli FKD'nın s_2 kaymalarının, c. ilk sırası halka şeklinde delikli FKD'nın s_2 , s_3 kaymalarının dağılım grafiği	103
Şekil 6.26 Tek sırası halka şeklinde olan FKD yapısının $s_2=0.02a$, $0.04a$ ve $0.06a$ için grup hız dağılımı karakteristiği	104
Şekil 6.27 İkinci sıra delikleri $0.04a$ kaydırılmış FKD yapısında deliklerin ± 2 nm kayması altında grup indisi karakteristikleri	104
Şekil 7.1 İncelenen fotonik kristal yapısı	109
Şekil 7.2.a “ δx ” kaymaları ile kılavuz kiplin, b. grup indisi-frekans eğrisinin değişimi	110
Şekil 7.3 $\delta x=0.22a-0.27a$ kaymaları için grup indisi-dalga boyu eğrisinin değişimi ...	110
Şekil 7.4 Gerilim kiplenimi altında grup indisi karakteristikleri	111
Şekil 7.5 Yavaş ışık bölgesinin merkez dalga boyunun gerilim ile değişimi	112
Şekil 7.6 $\delta x=0.22a$ kaydırılmış delikler için gecikme süresi ve optik arabellek kapasitesinin gerilim ile değişimi	112
Şekil 7.7 $\delta x=0.22a$ kaydırılmış delikler için grup hız dağılımı spektrumu	113
Şekil 7.8 İlk sıra delikleri a. $\delta x=0.244a$, b. $\delta x=0.27a$ kaydırılmış fotonik kristal yapısı için $\Delta \delta x=0.001a$ kayma değişimi altında grup indisi eğrileri	114

Şekil 7.9 $\delta x=0.27a$ kayma için birim hücresi (a_x) $1.04a$ 'ya genişletilmiş süper hücre yapısı.....	114
Şekil 7.10 İlk sıra delikleri $\delta x=0.244a$ ve $\delta x=0.27a$ ($a_x=1.04a$) kaydırılmış fotonik kristal yapısı için grup indisi-dalga boyu grafiği.....	115
Şekil 7.11 İlk sıra delikleri $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı	116
a. grup indisi-frekans grafiği, b. yavaş ışık bölgesinin merkez dalga boyunun gerilimle değişimi	116
Şekil 7.12 İlk sıra delikleri $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısının grup hız dağılımı spektrumu	117
Şekil 7.13 $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı için gecikme süresi ve optik arabellek kapasitesinin gerilim ile değişimi	118
Şekil 7.14 İlk sıra delikleri $\delta x=0.2755a$ ve $\delta x=0.30a$ ($a_x=1.04a$) kaydırılmış fotonik kristal yapısı için grup indisi-dalga boyu grafiği	119
Şekil 7.15 İlk sıra delikleri a. $\delta x=0.2755a$, b. $\delta x=0.30a$ kaydırılmış fotonik kristal yapısı için $\Delta\delta x=0.005a$ kayma altında grup indisi eğrisinin değişimi.....	119
Şekil 7.16 İlk sıra delikleri $\delta x=0.30a$ kaydırılmış kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısının grup hız dağılımı spektrumu	120

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Γ -M-K- Γ boyunca düz 9. TM bandının ve M-K boyunca 6. TE bandının frekans genişliği ($\Delta\omega$) ve merkez frekansı (ω_c)	48
Çizelge 6.1 İkinci sıra deliklerin kaydırılmasıyla (a, b, c), ikinci ve üçüncü sıra deliklerin kaydırılmasıyla (d, e, f) ortalama grup indisleri ($\langle n_G \rangle$), 1550 nm çevresinde bant genişlikleri ($\Delta\omega$) ve normalize-gecikme bant- genişliği çarpanları	101

1. GİRİŞ

Optik teknolojileri her geçen yıl daha da gelişmekte ve hayatımızda daha çok önem kazanmaktadır. Işığın kılavuzlayan fiber optik kablolar haberleşme endüstrisini tamamen değiştirmiştir. Optik haberleşme ağları internetin gelişimini sağlamıştır ve artan kullanıcı sayısı ile birlikte bant genişliği talebi her geçen gün artmaktadır. Haberleşme sistemlerinin kapasitesinin genişlemesindeki engel elektronik sinyal işlemenin hızının yavaş olmasıdır. Tamamen optiksel aletler, yani optikten elektroniğe ve elektrondan optiğe çevirime ihtiyaç duymayan aletler daha hızlı sinyal işlemenin önünü açacaktır. Bu bağlamda optik anahtarlar ve kitleyiciler yeni nesil iletişim teknolojisinin anahtar bileşenleridir (O' Faolain vd. 2010).

Fotonik kristaller fotonik bilimi ve uygulamaları açısından oldukça önemli malzemelerdir. Fotonik kristaller ile ışık kontrol edilebilir ve işlenebilir. Fotonik kristaller periyodik dielektrik veya metalik yapıdaki kompozit optik malzemelerdir. Fotonik kristaller yarı iletken malzemelerin optiksel karşılığı olarak görülebilir. Yarı iletken bir kristalde iletim ve değerlik bantlarının bulunması gibi fotonik kristallerde de dielektrik ve hava bantları bulunmaktadır. Yarı iletkenlerde elektronun hareketinin katkılama ile kusur yaratılarak kontrol edilebilmesi gibi fotonik kristallerde de yapıda çizgi veya nokta kusuru oluşturularak elektromanyetik dalgalar belirli yönlerde ve belirli frekanslarda iletilebilir veya bir hacme hapsedilebilir (Joannopoulos vd. 2008).

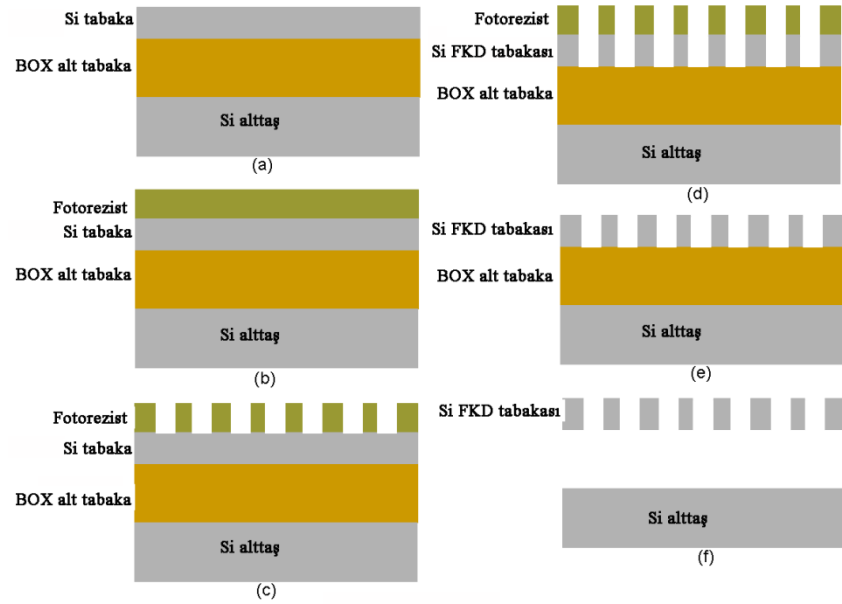
Tek boyutlu fotonik kristaller ayna ve merceklerde yansımayı önleyici kaplamalar olarak hali hazırda oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Keşfedildiğinden beri fotonik kristallerin çok sayıda olağan dışı özelliği teorik olarak öngörülmüş ve deneysel olarak da doğrulanmıştır. Bu özelliklere örnek olarak kutuplanma doğrultularına göre veya kutuplanma doğrultusundan bağımsız istenilen frekanslarda fotonik bant aralıklarının oluşturulması (Anderson vd. 1996), fotonik bant aralıklarının içerisinde yerleştirilmiş kusur kiplerinin yaratılması (Sakoda vd. 1998), yayılan ışığın kendiliğinden ışımasının önlenmesi (Yablonovitch vd. 1987), ışığın kırınıma uğramadan iletilemesi (Kosaka vd. 1998), ilerleyen ışığın hızının yavaşlatılması (Krauss vd. 2007), entegre optik devreler

oluşturularak ayna, filtre, demet bölücü, güç bölücü, lazer gibi yüksek performanslı aletlerin geliştirilmesi (Wu vd. 2004) verilebilir.

1987 yılında Eli Yablonovitch ve Sajeev John'un mihenk taşı sayılan iki önemli çalışmasının yayınlanmasının (Yablonovitch vd. 1987) ardından fotonik kristaller ile ilgili çalışmaların sayısı bir hayli artış göstermiştir. İlk motivasyon kendiliğinden ısımanın kontrolü araştırmaları ile olmuş, sonrasında elektromanyetik dalgaların yarı iletken kavitelere bağlaştırılması, optik fiberlerde beyaz ışık üretimi ve LED'lerin ışık veriminin artırılması gibi çalışmalarla ilgi devam etmiştir.

İki boyutlu fotonik kristal temelli optik aletlere yönelik araştırmaların üç boyutlu fotonik kristallere yönelik araştırmalardan daha fazla olmasının temel sebeplerinden biri üretimlerinin görece kolay olmasıdır. İki boyutlu havada asılı bir fotonik kristal dalga kılavuzu (FKD) yapısının üretilmesi dört aşamada tanımlanabilir. İlk aşama CAD dosyasının hazırlanmasıdır (Şekil 1.1.a). CAD, "bilgisayar destekli çizim" sözcüklerinin baş harflerinin birleşimidir. Fotorezist tabakasına şablon CAD dosyası aracılığıyla fotolitografik yöntemlerle yazılmaktadır. Fotorezist, belirli bir dalga boyundaki bir elektromanyetik dalgaya maruz bırakıldığında kimyasal yapısı uygun bir çözücü içinde çözünebilecek şekilde değişen, litografi uygulamalarında kullanılan reçine biçiminde bir polimer maddedir (Campbell vd. 2001). İkinci aşama litografi ile şablonun oluşturulması olarak tanımlanabilir. Silisyum dilim tabakası üzerine fotorezist döndürerek kaplama gibi yöntemlerle ince bir film şeklinde kaplanmaktadır (Şekil 1.1.b). Fotorezist üzerinde fotonik kristalin desen şablonu oluşturulmaktadır (Şekil 1.1.c). Bunun için en yaygın kullanılan litografi yöntemi optik litografidir. Fakat deliklerin çapının 100 nm'den az olduğu veya çapların örgü boyunca değişiklik gösterdiği durumlarda elektron demet litografisi tercih edilmektedir (Askari vd. 2011). Üçüncü aşama "aşındırma" aşamasıdır. Fotorezist üzerindeki desen Si dilim üzerine aşındırma yapılarak FKD yapısı oluşturulmaktadır (Loncar vd. 2000) (Şekil 1.1.d). Genellikle iki boyutlu havada asılı fotonik kristal yapıları seçici ıslak aşındırma yöntemiyle oluşturulmaktadır (Carlsson vd. 2002). Islak aşındırma tekniğinde örneğin fotorezist ile korunan yerleri haricindeki bölgeler bir kimyasal banyo içerisinde kimyasal reaksiyonlarla aşındırılmaktadır (Campbell vd. 2001). Si dilim aşındırıldıktan

sonra fotorezist tabakası kaldırılmaktadır (Şekil 1.1.e). Dördüncü aşama olarak oksit tabakasının kaldırılması verilebilir. Oksit tabakası kaldırılarak (Şekil 1.1.f) daha geniş bir spektrumda kılavuzlanma sağlanmaktadır. Üretim sürecinde üretimin kalitesi taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleme yapılarak kontrol edilmektedir (O’Faolain vd. 2006).

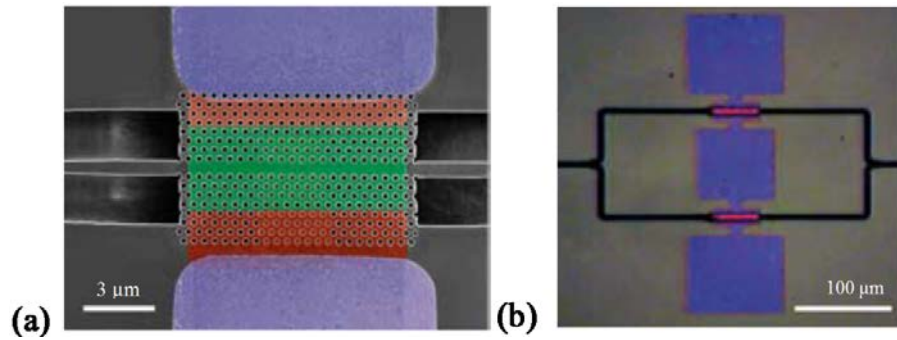


Şekil 1.1 FGD yapısının üretimi (Askari vd. 2011)

a. SOI alttaşın oluşturulması, b. e-demet rezistin kaplanması, c. Rezist üzerine desenin verilmesi, d. Si dilim tabakasının aşındırılması, e. rezistin kaldırılması, f. BOX tabakasının kaldırılması

Yavaş ışık bir optik atmanın düşük grup hızında ilerlemesidir ve fotonik biliminde önemli bir olgudur. Yavaş ışık doğrusal faz değişimlerini artırmakta, ışık-madde etkileşimini artırarak doğrusal olmayan optik süreçleri geliştirmekte ve ışığın depolanabilmesine, geciktirilebilmesine imkân vermektedir. Işığın hızının yavaşlatılması optik sinyal işleme, optik anahtarlama ve yüksek performanslı algılayıcıların, kipleycilerin geliştirilmesinde oldukça önemlidir. Fotonik kristaller oda sıcaklığında çalışabilmeleri, dalga boylarının ve grup hızlarının geniş bir aralıkta ayarlanabilir olması ve çip üzerine entegre edilebilir olmaları açısından yavaş ışık uygulamalarında tercih edilmektedir.

Işığın hızı (grup hızı) faz değişimine duyarlı optik teknikler ile deneysel olarak belirlenebilmektedir. Bu yöntemlerden biri Mach-Zehnder interferometresi konfigürasyonunda iletişim spektrumunun alınması ve spektrumdaki girişim saçaklarının incelenmesidir (Vlasov vd. 2005). Bu yöntemle grup indisi 100'e yakın birçok yavaş ışık FKD'nun grup indisleri doğru olarak ölçülmüştür (Notomi vd. 2001, Vlasov vd. 2005). FKD'lerin tamamen optik arabellerde kullanımı için grup hızı dağınımı (GVD) ve kayıp analiz edilmesi gereken önemli parametrelerdir. Grup indisi 100 civarında olan bir yavaş ışık FKD yapısında GVD 500 ps/(nm.mm) olarak tespit edilmiştir. Haberleşmede kullanılan optik fiberlerdeki dağınıma kıyasla bu değer 10^7 kat fazladır. GVD'nin bu kadar yüksek olmasına rağmen tasarlanan 1 mm uzunluklu FKD yapılı arabellek ile 10 Gbit/s veri aktarma hızında 3 bit veri depolanmıştır (Khurgin vd. 2005). Mach-Zehnder interferometresi konfigürasyonunda (Şekil 1.2) işaret kolu metalik kontaklarla 2 mW'lık elektrik gücü ile ısıtılarak yavaş ışık FKD'nin grup indisi 20'den 60'a artırılmıştır. Bu esnadaki anahtarlama süresi 100 ns olarak ölçülmüştür. Oldukça hızlı (~ 100 ns) ve etkin (2 mW elektrik gücü ile) bir biçimde grup hızı aktif olarak kontrol edilmiştir (Vlasov vd. 2005).



Şekil 1.2.a. Üretilen fotonik kristal dalga kılavuzunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü, b. Üç elektrik kontaklı Mach-Zehnder interferometresinin optik mikroskop görüntüsü (Vlasov vd. 2005)

Fotonik kristallerin uygulamalarından biri de güneş hücrelerinin verimini artırmaya yöneliktir. İnce soğurucu tabakalardan oluşan fotovoltaik aletler ikinci nesil güneş hücreleri olarak nitelendirilmektedir (Park vd. 2009). Bu yapılarda yüksek soğurma katsayısına sahip ve kolayca ince film haline getirilebilen amorf silikon gibi malzemeler

kullanılmaktadır. Fakat bu malzemelerdeki fotovoltaiik dönüşüm verimliliği sınırlıdır. Fotovoltaiik aletlerin üst yüzeyinden ışığın yansımısını önlemek ve fotonun soğurucu malzeme içindeki optik yolunu fazlalaştıarak soğurmasını artırmak amacıyla ince yarı iletken tabakalara bir veya iki boyutlu fotonik kristaller şeklinde desenler verilmektedir (Park vd. 2009, Gomard vd. 2010). Gelen ışık ve soğurucu ortam arasında empedans eşlenmesinin sağlanması için, optik kayıplardan ötürü olan FK içindeki ışığın foton ömrü FK'in olmadığı soğurucu oramdaki soğurma kayıplarından dolayı oluşan foton ömrüne eşit olmalıdır (Park vd. 2009). Bu amaçla yavaş Bloch kipi rezonansının olduğu dalga boyu kullanılmaktadır (Park vd. 2009). 100 nm kalınlıklı a-Si tabakasının 300-750 nm aralığındaki en yüksek soğurması %58 iken, hava yarıklarıyla ayrılmış silikon çubuklu bir boyutlu FK yapısı kullanıldığında en yüksek iletim %75'e erişmiştir (Park vd. 2009).

Bu tez sayısal ortamda fotonik kristal dalga kılavuzları oluşturarak ve yapısal tasarımlarla ışığın hızını optimize ederek optik aletler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu tez çalışmasında düzlem dalga açılımı ve zamanda sonlu farklar yöntemleri kullanılmıştır. Tez çalışmasının bulguları dördüncü bölümden başlamaktadır. Bu bölümde, farklı fotonik kristal örgülerde örgü simetrisi azaltılarak kiplerin ve fotonik bant aralığı özelliklerinin değişimi analiz edilmiştir. Tezin beşinci bölümünde, üç boyutlu bir fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı oluşturularak bir kırılma indisi algılayıcısı tasarlanmış ve yalnızca belirli delikler sıvı ile doldurularak algılayıcının verimliliği artırılmıştır. Diğer bir çalışmada, bir Y-bölücü ve iki yönlü bağlaştıracı kullanılarak yüksek performanslı bir 1x4'lük güç bölücü tasarlanmıştır. "Fotonik kristal dalga kılavuzları ve yavaş ışık elde edilmesi" başlıklı bu tezin "yavaş ışık elde edilmesi" kısmına altıncı bölümde değinilmiştir. Bu kısımda öncelikle yavaş ışık olgusuna bir giriş yapılmış, literatürdeki bazı dikkatsiz kullanımlardan esinlenilerek yavaş ışık fotonik kristal dalga kılavuzlarında dağınım özelliklerinin doğru belirlenebilmesi için düzlem dalga açılımı yönteminde doğru süper hücre tanımının önemine dikkat çekilmiştir. Sonrasında, fotonik kristal dalga kılavuzu yapılarında dalga kılavuzu çevresindeki deliklerin ışığın ilerlemesine dik yönde kaydırılmasının ışığın hızına, bant genişliğine, grup hızı dağınıma etkisi incelenmiştir. Tezin son çalışmasında ise çizgi kusuru çevresindeki delikler ışığın ilerleme yönü boyunca kaydırılarak ve

birim hücre genişletilerek ışığın hızı farklı derecelerde azaltılmış, her bir tasarımın optik arabelleklerde ve gecikme hatlarında kullanımı için elektro-optik kiplenim verimliliği incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu farklı çalışmalar sonuç kısmında özetlenerek konunun önemi vurgulanmıştır.

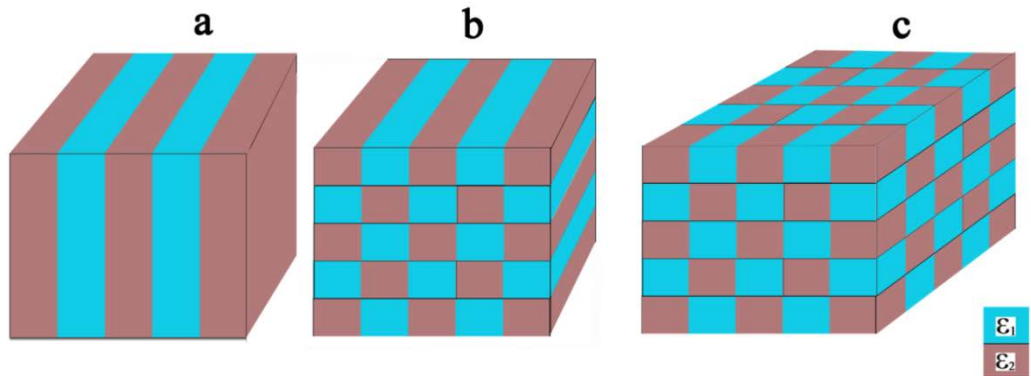
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Fotonik Kristaller

Bir kristal atom ve moleküllerin belirli bir periyodiklikte sıralanmasıyla oluşmaktadır ve içerisinde geçen elektron periyodik bir potansiyel altında hareket etmektedir. Kristalin enerji bandı yapısında belirli enerjilerde elektronun geçişinin yasak olduğu bant aralıkları bulunabilmektedir. Atomik kristallerin optikteki karşılığı fotonik kristallerdir. Fotonik kristallerde atom ve moleküllerin yerini değişen dielektrik sabitli makroskobik bir ortam, periyodik potansiyelin yerini ise periyodik kırılma indisi almaktadır. Fotonik kristali oluşturan malzemelerin dielektrik sabitlerinin oranı yeterince büyükse ve geçen ışığın soğurması en az düzeyde ise, ışığın tüm yüzeylerden girişim yaparak kırınımına uğramasıyla fotonik bant aralığı (FBA) oluşabilmektedir. Fotonların FBA'yı oluşturan frekans aralığında ve doğrultuda kristal içerisinde geçişi yasaklıdır. Fotonik kristaller, ışığı optik olarak kontrol etme, yönlendirme ve işleme imkânı veren malzemelerdir.

2.2 Boyutlarına Göre Fotonik Kristaller

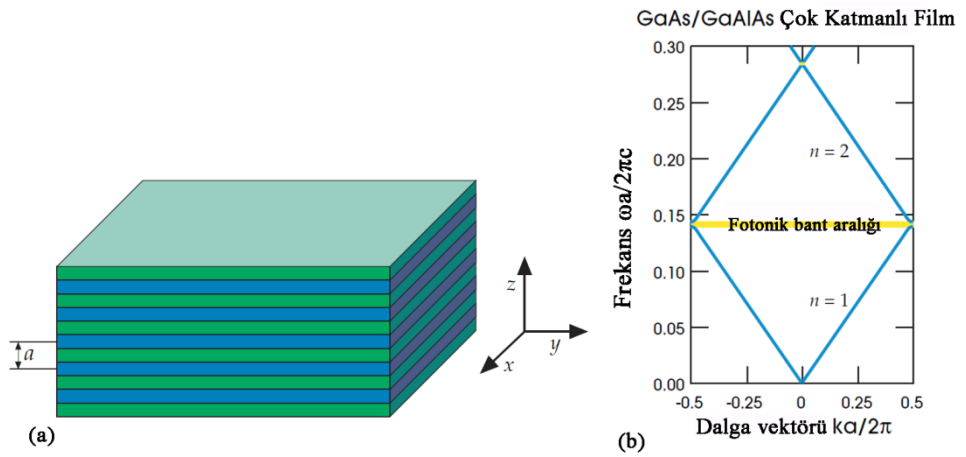
Fotonik kristaller uzaysal ortamda periyodik olarak dielektrik veya metalik yapıların konumlandığı kompozit optik malzemelerdir. Periyodikliğin tekrarı bakımından fotonik kristaller bir, iki veya üç boyutlu olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 2.1.a. Bir boyutlu, b. iki boyutlu, c. üç boyutlu fotonik kristaller

2.2.1 Bir boyutlu fotonik kristaller

Farklı dielektrik sabitli malzemelerin arka arkaya periyodik olarak sıralanmasıyla oluşan çok katmanlı bir film bir boyutlu bir fotonik kristaldir. Fotonik kristallerin en basit formu olan bir boyutlu fotonik kristal şekil 2.2.a’da gösterilmiştir. Çok katmanlı filmlerin optik özellikleri üzerine yapılan ilk çalışmalardan biri Lord Rayleigh tarafından gerçekleştirilmiştir ve bu çalışma 1887 yılında yayımlanmıştır (Rayleigh 1887). Bir boyutlu fotonik kristal belirli frekanstaki ışınlar için ayna görevi görmektedir. Burada bir kusur yaratılırsa belirli frekanstaki ışık fotonik kristal içerisine hapsedilebilir. Günümüzde bu yapılar sıkça dielektrik aynalarda ve optik filmlerde kullanılmaktadır.

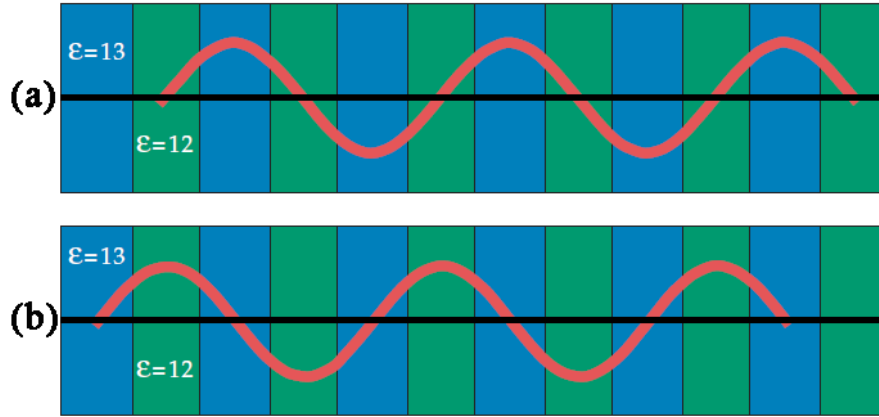


Şekil 2.2.a. Bir boyutlu fotonik kristal, b. GaAs/GaAlAs çok katmanlı filmin fotonik bant yapısı (Joannopoulos vd. 2008)

Şekil 2.2.a’daki yapı xy doğrultusunda homojendir ama z doğrultusunda kesikli ve periyodiktir. Bu sebeple kipler $k_{//}$ ve k_z olarak iki kısımda incelenebilir. $k_{//}$ xy düzleminde sürekli olduğundan her değeri alabilirken k_z z doğrultusunda kesikli öteleme simetrisine sahip olduğundan birinci Brillouin bölgesi sınırlarını oluşturan $\pi/a < k_z < \pi/a$ aralığındaki değerleri alabilir.

Şekil 2.2.b’de GaAs/GaAlAs çok katmanlı filme ait fotonik bant yapısı verilmiştir. Her bir tabaka $0.5a$ kalınlıktadır. GaAlAs’ın dielektrik sabiti 12, GaAs’in ise 13’dür. GaAs/GaAlAs oranı düşük olduğundan dolayı FBA dardır. FBA’nın üstündeki ve altındaki kiplerin elektrik alan profilleri incelenerek FBA oluşumu fiziksel temellere dayandırılabilir.

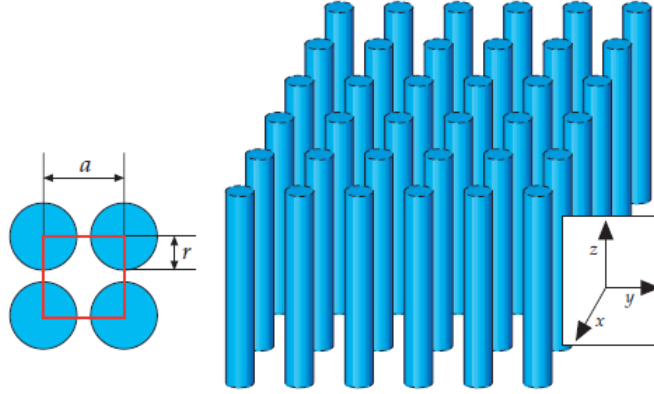
Şekil 2.3’den görüldüğü gibi $n=1$ no’lu kpin $0.5(2\pi/a)$ dalga numarasında elektrik alanı GaAs dilimin merkezinde depolanırken $n=2$ no’lu kpin $0.5(2\pi/a)$ dalga numarasında elektrik alanı GaAlAs dilimin merkezinde depolanmaktadır. Bu durum yüksek bir zıtlık oluşturarak fotonik kristal bant aralığı oluşumuna izin vermiştir (Joannopoulos 2008).



Şekil 2.3 GaAs/GaAlAs çok katmanlı film için $k=0.5(2\pi/a)$ ’da (Joannopoulos vd. 2008)
a. $n=1$ no’lu kpin elektrik alanı, b. $n=2$ no’lu kpin elektrik alanı

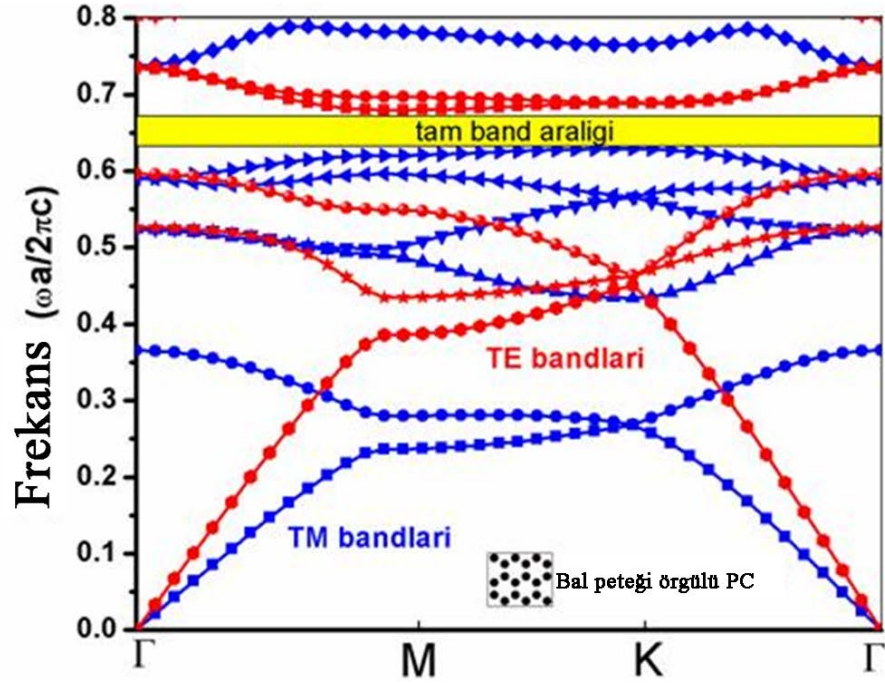
2.2.2 İki boyutlu fotonik kristaller

İki boyutlu bir fotonik kristal x ve y doğrultularında periyodik, z doğrultusunda homojen bir yapıya sahiptir. Periyodikliğin olduğu xy düzleminde FBA bulunabilir. Burada bir boyutlu FK’den farklı olarak $k_{//}$ kesikli öteleme simetrisine sahiptir, dolayısıyla Brillouin bölgesi içinde sınırlıdır.



Şekil 2.4 Kare örgülü dielektrik çubuklu iki boyutlu fotonik kristal yapısı (Joannopoulos vd. 2008)

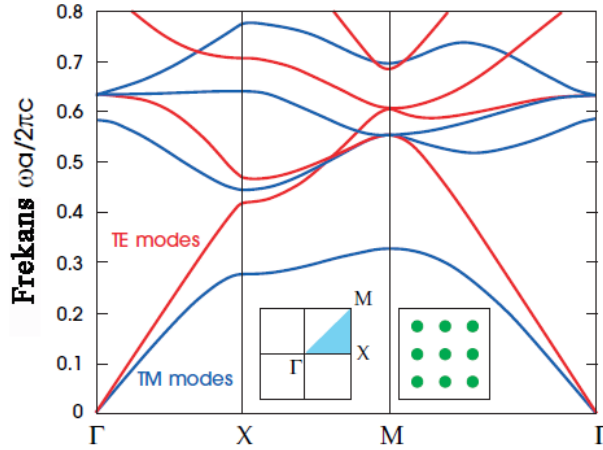
Simetrik bir fotonik kristalde, xy düzleminde ilerleyen ($k_z=0$) kipler xy düzlemindeki yansımalarına karşı değişmezdir. Bu ayna simetrisi kipleri kutupluluklarına göre iki ayrı sınıfa ayırmaya olanak verir. Enine-elektrik kiplerde manyetik alan vektörü (**H**) xy düzlemine diktir, bu kipler **TE kipleri** olarak adlandırılır. Enine-manyetik kiplerde ise elektrik alan vektörü (**E**) xy düzlemine diktir, bu kipler **TM kipleri** olarak adlandırılır. Bu kiplerin bant yapıları birbirinden tamamıyla farklı olabilir. Bununla birlikte, bazı frekans değerlerinde TM ve TE bant aralıkları üst üste çakışarak **tam bant aralıklarını** (TBA) oluşturabilir. Şekil 2.5’de hava içerisinde $r=0.2a$ yarıçaplı silisyum dielektrik çubuklu bal peteği örgülü fotonik kristal yapısına ait bant yapısı grafiği verilmiştir. Burada düşey eksen frekanstır ve boyutsuz bir nicelik olarak a/λ veya $\omega a/2\pi c$ cinsinden ifade edilmektedir. Yatay eksen ise dalga vektörüdür ve Brillouin bölgesi köşeleri boyunca çizilmiştir. Bant aralığını belirleyen bandın minimum ve maksimum noktaları çoğunlukla Brillouin bölgesi köşelerinde oluşmaktadır. Bu fotonik kristal için $0.366(a/\lambda)$ ile $0.434(a/\lambda)$, $0.629(a/\lambda)$ ile $0.737(a/\lambda)$, $0.788(a/\lambda)$ ile $0.823(a/\lambda)$ frekansları arasında TM FBA’lar; $0.596(a/\lambda)$ ile $0.680(a/\lambda)$, $0.737(a/\lambda)$ ile $0.802(a/\lambda)$ frekansları arasında ise TE FBA’lar mevcuttur. Bu FBA’ların kesiştiği $0.629(a/\lambda)$ ile $0.680(a/\lambda)$ frekansları arasında ise bir tam bant aralığı bulunmaktadır.



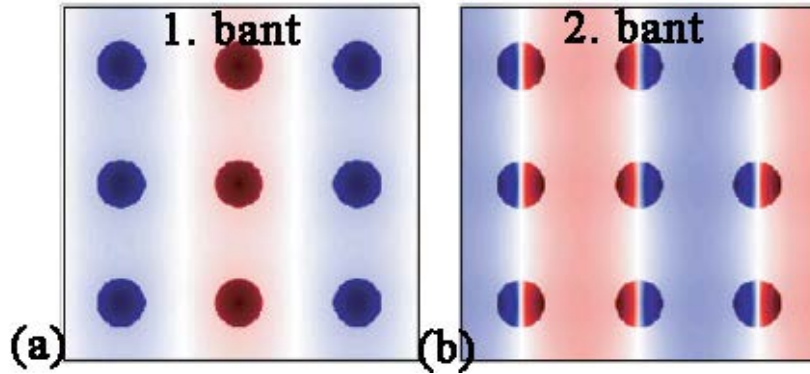
Şekil 2.5 Hava içerisinde $r=0.2a$ yarıçaplı silisyum dielektrik çubuklu bal peteği örgülü fotonik kristalin hesaplanan fotonik bant yapısı grafiği

Şekil 2.6’da hava içerisinde $0.2a$ yarıçaplı dielektrik çubuklu kare örgülü fotonik kristal yapısına ait bant yapısı verilmiştir. Bu yapı bir TM FBA’ya sahiptir ve yapıda TE FBA bulunmamaktadır. Brillouin bölgesinin X noktasında skaler olduğu için D_z elektrik yer değiştirme alan dağılımına bakılarak FBA oluşumu açıklanabilir. Burada kırmızı renk pozitif, beyaz renk sıfır ve mavi renk negatif alanı göstermektedir (Şekil 2.7). Renklerin koyuluğu elektrik yer değiştirme alanının genliği ile ilişkilidir. $n=1$ no’lu TM kipi dielektrik bölgede yoğunlaşırken $n=2$ no’lu TM kipinde dielektrik çubukları kesen bir düğüm çizgisi bulunmaktadır (Şekil 2.7). Varyasyon ilkesine göre bir kip frekansını düşürmek için elektrik alan enerjisinin çoğunu yüksek- ϵ' ’lu bölgede depolamaktadır. İki bandın birbirinden uzak frekanslarda kalarak bir FBA oluşturmasını bu ilke açıklamaktadır. Dielektrik bölgede yoğunlaşan ilk kipi frekansı düşüktür (Şekil 2.6 ve 2.7.a). İkinci kip ilkinin dik olmak zorunda olduğundan çubukların içinden bir düğüm çizgisi geçmektedir (Şekil 2.6 ve 2.7.b). Enerjinin çoğu hava bölgesinde depolandığı için ikinci kipi frekansı yüksektir. Bu durum TM FBA oluşumunu sağlamıştır. TM kipinde elektrik yer değiştirme alanı dielektrik ara yüzeylere paraleldir. Dolayısıyla $n=1$ nolu kipe ait D_z yüksek- ϵ' ’lu bölgelerde yüksek konsantrasyonda depolanabilir. TE kipi

için ise elektrik alan çizgileri sürekli olmak zorunda olduğundan dielektrik çubukları geçmek durumundadır. Bu sebeple yüksek- ϵ 'lu bölgelerde elektrik yer değiştirme alanı oranı düşüktür. Bu durum TE FBA'nın oluşumunu engellemektedir.



Şekil 2.6 Hava içerisinde $r=0.2a$ yarıçaplı silisyum dielektrik çubuklu kare örgülü fotonik kristalin fotonik bant yapısı grafiği (Joannopoulos vd. 2008)

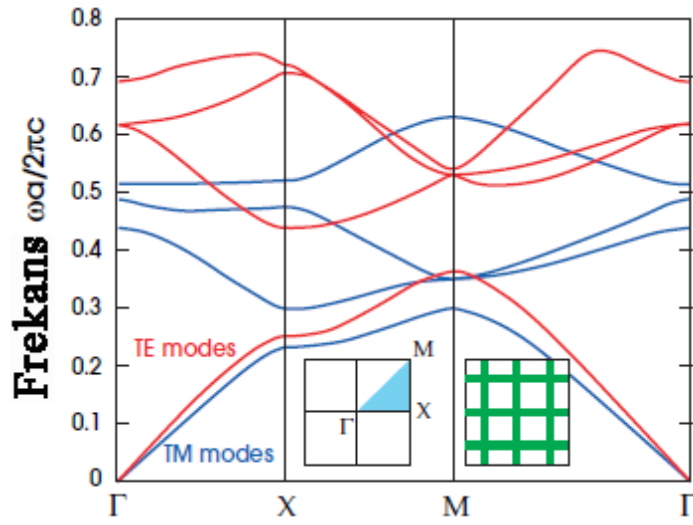


Şekil 2.7 Hava içerisinde dielektrik çubuklu kare örgülü fotonik kristal (Joannopoulos vd. 2008)

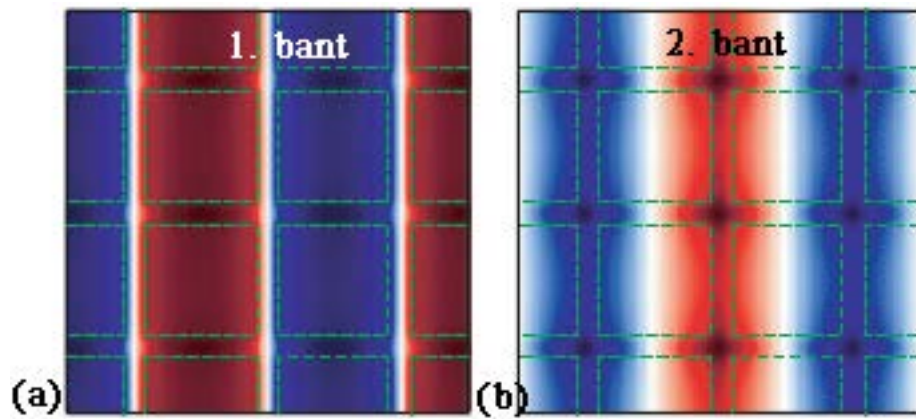
a. İlk TM bandının, b. ikinci TM bandının elektrik yer değiştirme alanı dağılımı

Şekil 2.8'de dielektrik kanallı kare örgü yapısına ait bant yapısı grafiği görülmektedir. Bu yapıda yüksek- ϵ 'lu bölgeler xy düzleminde süreklilik göstermektedir. Dielektrik kanalların kalınlığı $0.165a$ 'dır. Bu yapı için TM FBA yoktur, fakat TE FBA bulunmaktadır. TM kipi için $n=1$ ve 2 no'lu kiplerin ikisi de yüksek- ϵ 'lu bölgede

depolandığı için bu iki kipi frekansları birbirine yakındır. TE kipi için ise sürekli olan elektrik alan çizgileri dielektrik kanallar sayesinde yüksek- ϵ 'lu bölgeden ayrılmadan komşu örgüye geçebilmektedir (Şekil 2.9). $n=2$ no'lu kipte ise bu elektrik alan çizgileri yatay dielektrik kanallara dik yönde yoğunlaşmıştır (Şekil 2.9.b). (**D**'de düğüm çizgilerinin olduğu noktalarda **H** maksimumdur.) Dolayısıyla enerjisinin bir kısmı düşük- ϵ 'lu bölgededir. Bu durum iki bandın frekans değerleri arasında yüksek farklılığa yol açarak TE FBA oluşumuna izin vermiştir.



Şekil 2.8 Hava içerisinde kare örgülü dielektrik ($\epsilon=8.9$) kanalların (kalınlık=0.165a) fotonik bant yapısı (Joannopoulos vd. 2008)



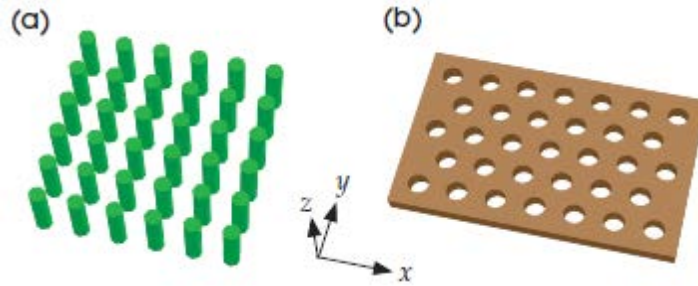
Şekil 2.9 Hava içerisinde kare örgülü dielektrik kanallı fotonik kristal (Joannopoulos vd. 2008)

a. İlk TE bandının, b. ikinci TE bandının manyetik alan dağılımı

Dielektrik çubuklu ve kanallı yapıları göz önünde bulundurursak, birbirinden izole yüksek- ϵ 'lu yapılar TM FBA'ları, birbiriyle bağlantılı yapılar ise TE FBA'ları desteklemektedir. Bu durumda hem TM hem TE FBA'ların beraberce desteklendiği tam bant aralıkları oluşumu imkânsız gibi görünmektedir. Fakat yüksek- ϵ 'lu bölgeleri birbirinden ayırık ama dar kanalları bulunan yapılarda TBA'lar bulunabilir. Örneğin, dielektrik içinde üçgen örgülü hava delikli yapı delikler $r=0.48a$ yarıçapında olduğunda bir TBA'ya sahiptir.

2.3 Fotonik Kristal Dilim

İki boyutlu bir fotonik kristal eğer üçüncü boyutta sonsuz sayılabilecek kalınlıkta değilse (kalınlığı dalga boyundan küçük ise), kipler tam olarak TM-kutuplu veya TE-kutuplu değildir. Şekil 2.10'da örnek fotonik kristal dilim yapıları gösterilmiştir. Şekil 2.10.a hava içerisinde kare örgülü dielektrik çubuklu, şekil 2.10.b ise dielektrik dilimde üçgen örgülü hava delikli bir FK dilim yapısıdır.

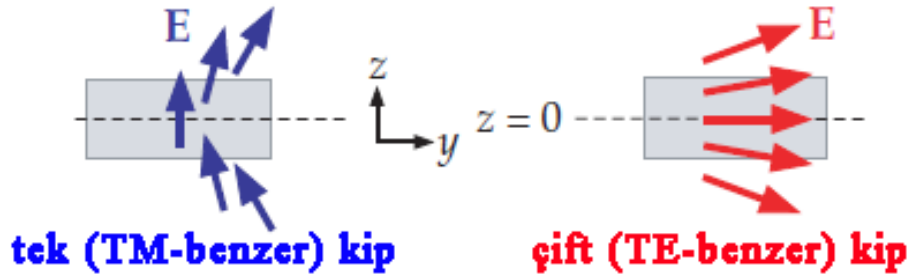


Şekil 2.10 Fotonik kristal dilim yapıları (Joannopoulos vd. 2008)

a. Havada kare örgülü dielektrik çubuklar, b. dielektrik dilimde üçgen örgülü hava delikleri

Fotonik kristal dilimden geçen elektrik alan çizgileri TM ve TE kipleri için temsili olarak Şekil 2.11'de gösterilmiştir. $z=0$ simetri düzlemi boyunca TM ve TE kipleri tamamen kutuplu iken bu düzlemde ayrıldıkça TM ve TE kiplerin elektrik alan çizgileri idealden uzaklaşmaktadır. Bu sebeple bir fotonik kristal dilim için TM ve TE

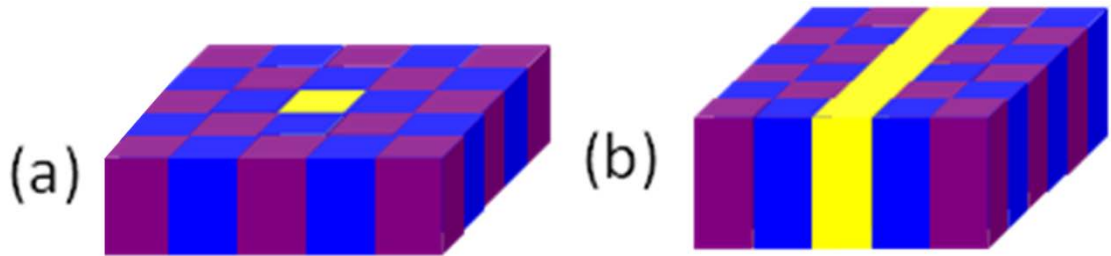
kipleri TM-benzer ve TE-benzer kipler olarak adlandırılmıştır. $y=0$ düzlemi için TM-benzer kip çift, TE-benzer kip ise tek kiptir. Dilim FK'lerde $\omega > ck/n_{\min}$ frekansları için ışık konisi bulunmaktadır. Işık konisinde hava/altaş içerisinde ilerleyen kipler yaygın kiplerdir. FK hava içerisinde değil de altaş üzerinde ise bant aralığının ve kılavuz kipin ışık konisinin altında kalması için altaşın kırılma indisinin FK'den daha düşük olması gerekmektedir. Genellikle FK olarak Si, altaş olarak silika kullanılmaktadır. $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ dalga boyunda Si'nin kırılma indisi 3.4, silikanın ise 1.4'dür. Düzlem üzerindeki $k_{//} = (k_x, k_y)$ dalga vektörü iki doğrultudaki kesikli öteleme simetrisinden dolayı korunmakta, fakat dik yöndeki k_z dalga vektörü korunmamaktadır.



Şekil 2.11 $z=0$ ayna simetri düzlemine sahip ince FK dielektrik dilim yapılarında
a. TM-benzer kip için, b. TE-benzer kip için elektrik alan çizgilerinin şematik gösterimi

2.4 Dilim Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları

FK'lerde nokta kusurları kullanılarak ışık hapsedilebilir (Şekil 2.12.a). Çizgisel kusurlar kullanılarak ise ışık bir konumdan diğerine kılavuzlandırılabilir (Şekil 2.12.b).

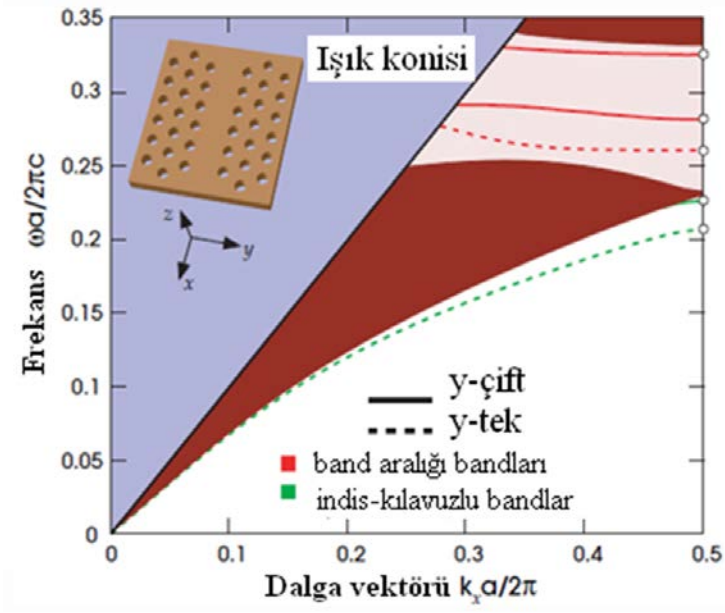


Şekil 2.12.a. Nokta kusuru (rezonant kavite), b. çizgi kusuru (dalga kılavuzu)

Bir dilim fotonik kristal dalga kılavuzunda ışık FBA içerisinde kılavuz kipin bulunduğu frekans aralığında kusur içerisine hapsolmuştur, dolayısıyla kusur boyunca ilerletilebilir. Bant aralığından ötürü bu kip kristal içerisinde sönümlüdür. Işığın ilerlediği kılavuz boyunca kesikli öteleme simetrisi korunduğundan dolayı kılavuz kipler oluşabilmektedir.

Si dilim içerisinde $r=0.3a$ yarıçaplı üçgen örgülü hava delikli, $t=0.6a$ kalınlıklı FK dilim yapısı ve bu yapıya ait bant yapısı şekil 2.13'de gösterilmiştir. Böyle bir yapının üretilmiş şekli ise şematik olarak şekil 2.14'de verilmiştir. Havada asılı iki boyutlu fotonik kristal yapılar çoğunlukla seçici ıslak aşındırma teknikleriyle üretilmektedir (Carlsson vd. 2002). Bant aralığı dışında taralı olan bölgede kipler sürekli frekans aralığına sahiptir ve kip profilleri kristal içerisine yayılmıştır. Bu kipler yaygın kipler olarak adlandırılır ve kristal örgüsündeki kiplerin çizgi kusuru üzerine izdüşümlerinin alınmasıyla elde edilir. Bir dilim FK dalga kılavuzundaki kılavuz kipler yatay yönde bant aralığı etkisiyle ve dikey yönde indis kılavuzlanma etkisiyle kılavuzlanmaktadır. Burada yaygın kiplerin altındaki kesikli çizgiyle gösterilen bant tamamıyla indis-kılavuzlu banttır ve tam iç yansıma yolu ile kılavuzlanmıştır.

Işık konisinin altında kalan alanda FBA içerisinde fotonik bant aralığına kılavuzlanmış üç kip bulunmaktadır. Yapı $y=0$ yansıma düzlemi altında değişmez ise kipler bu düzlemden yansımalarına göre tek veya çift kipler olarak sınıflandırılabilirler. Bu üç kipten en düşük frekanslı olanı y -tek, diğer ikisi y -çift kipler olarak adlandırılır. Bu adlandırma tamamen bu kiplerin H_z alan dağılımlarının $y=0$ düzlemine göre simetrik (tek kip) veya antisimetrik (çift kip) olmasına bağlıdır. Burada H 'nin bir psedovektör olduğu ve bu yüzden y -çift olarak görülen bir H_z deseninin aslında y -tek olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Işık konisinin altında ve FBA içinde FK dilimin yüksek dielektrik sabiti kılavuz kipleri oluşturmaktadır. Bu kiplerin öz durumları dilimden uzaklaştıkça üstel olarak sönümlenmektedir (Joannopoulos vd. 2008).



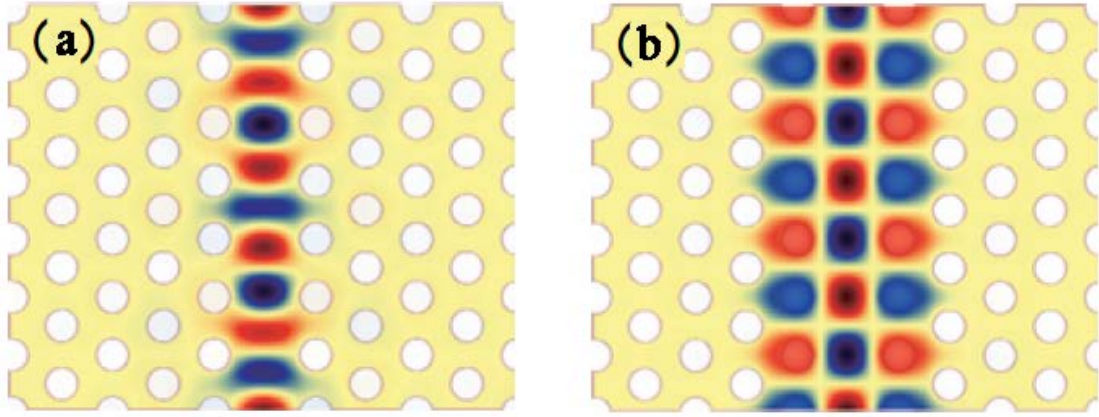
Şekil 2.13 x-doğrultusunda bir sıra hava deliklerinin çıkartılmasıyla oluşturulmuş dilim fotonik kristal dalga kılavuzuna ait dağınım grafiği (Joannopoulos vd. 2008)



Şekil 2.14 Havada asılı fotonik kristal dilim yapının fabrike edildiğindeki şematik görünüşü (Carlsson vd. 2002)

Tüm kılavuz kipler TE-benzer olduğundan ve z doğrultusu bir düğüm çizgisi içermediğinden H_z dağılımları $z=0$ düzleminde incelenebilir. Dalga kılavuzunun girişine bir düzlem dalga verilerek kolayca uyarılabileceğinden ötürü y-tek kipler ile ilgilenilmektedir. FBA içerisindeki y-tek kipinin H_z deseni dalga vektörü ışık konisinden Brillouin bölgesi köşesine doğru değıştikçe değışiklik göstermektedir. Şekil 2.15.a $k_x=0.32\pi/a$, şekil 2.15.b $k_x=0.5\pi/a$ için bu alan dağılımı desenlerini göstermektedir. Alan dağılımlarından ötürü bu kipler indis-kılavuzlu ve bant aralığı-kılavuzlu olarak adlandırılabilir. İndis kılavuzlu kipin enerjisi kusur içerisinde yoğunlaşmıştır ve sadece kusur çevresindeki ilk sıra delikler ile etkileşmektedir (Notomi vd. 2001). Bant aralığı kılavuzlu kiplerin enerjisi ise kılavuz çevresindeki birden çok sıra ile etkileşmektedir. Bu adlandırma kiplerin kılavuzlanma

mekanizmalarını belirtmemekte, sadece kip alan dağılımlarını tanımlamaktadır. Kılavuz kpin indis ve bant aralığı kılavuzlu kısımları arasındaki etkileşme dağınım eğrisinin şeklini ve eğimini değiştirmektedir (Notomi vd. 2001).



Şekil 2.15 FKD'nın a. $k_x=0.32\pi/a$ noktasında, b. $k_x=0.5\pi/a$ noktasında y-tek kpinin H_z alan dağılımı (Joannopoulos vd. 2008)

Frekans ve zaman bölgesinde fotonik kristal dalga kılavuzlarının bant yapısının ve iletim özelliklerinin hesaplanması konusunda gerekli teorik altyapı aşağıda sunulmuştur.

2.5 Temel Denklemin Elde Edilmesi

Maxwell eşitlikleri; kısmi, çizgisel, birinci dereceden diferansiyel denklemler ile eşlenik çizgisellikten dolayı üst üste gelme özelliğı olan eşitliklerdir. Elektrik alan $\mathbf{E}$ ve manyetik alan $\mathbf{H}$; yük yoğunluğu ρ , uzay koordinat vektörü $\mathbf{r}$ 'nin ve t zamanının bir fonksiyonudur ve birbirlerine Maxwell eşitlikleri ile bağılıdır. Maxwell denklemleri kaynaksız bir ortamda ($\rho=0$ ve $\mathbf{J}=0$),

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

olarak verilir. İzotropik bir ortamda elektriksel alınganlık ϵ , manyetik alınganlık μ ve elektrik iletkenliği σ skaler niceliklerdir. Elektriksel geçirgenlik $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon(\mathbf{r})$ olarak ifade edilir. Burada ϵ_0 vakumun geçirgenliği, $\epsilon(\mathbf{r})$ malzemenin görelî geçirgenliğidir. Kullanılan malzemelerin manyetik olmadığı göz önüne alındığında $\mu = \mu_0$, yük yoğunluğu olmadığı göz önüne alındığında $\sigma(\mathbf{r}) = 0$ 'dır. Makroskopik, izotropik ve dağınımın olmadığı doğrusal rejimde saydam bir ortamda (ϵ gerçel ve pozitif)

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \epsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.6)$$

olarak yazılır. (2.5) ve (2.6) denklemleri yerlerine konulduğunda Maxwell denklemleri:

$$\nabla \cdot [\epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)] = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = - \frac{\partial (\mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t))}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = - \frac{\partial (\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}(\mathbf{r}, t))}{\partial t} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'daki $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ çekilip (2.9) denkleminde yerine konulursa ikinci dereceden bir diferansiyel denklem elde edilir:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r},t) \right] = -\frac{\partial^2}{\partial t^2} \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r},t) \quad (2.11)$$

Maxwell denklemleri doğrusal olduğundan alanlar harmonik modlara açılarak uzaysal ve zamansal davranış ayrı ayrı çözülebilir:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r},t) = \mathbf{H}(\mathbf{r}) \exp(-i\omega t) \quad (2.12)$$

Bu denklemde $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ bir düzlem dalgası şeklinde, $\vec{H}(\vec{r}) = \vec{a} \cdot \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r})$ olarak ifade edilir. Denklem 2.11'deki $\mathbf{H}(\mathbf{r},t)$ ifadesi yerine (2.12) denklemindeki karşılığı yazılıp zamana göre iki kez türevi alındığında ve $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ eşitliği dikkate alındığında, (2.11) denklemi frekans bölgesinde ifade edilmiş olur. Denklem 2.13 **temel denklem** olarak adlandırılır.

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right] = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.13)$$

Kuantum mekaniğindeki Schrödinger denklemi gibi elektromanyetik dalgaların temel denklemi de budur. Bu denklem Maxwell denklemlerinin sağladığı özdeğer denklemidir (Joannopoulos vd. 2008).

Elektromanyetik dalgaların enine olması ($\nabla \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0$) manyetik alan genliğinin ilerleme doğrultusuna dik olmasını gerektirir. (2.13) eşitliği Φ dönü operatörünü temsil etmek üzere (2.14) eşitliğinde yeniden yazılmıştır.

$$\Phi \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \left(\omega / c \right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.14)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) - i\omega\mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) - i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.16)$$

Temel denklemin çözümü ile birlikte $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ kipleri ve sahip oldukları frekanslar hakkında tüm bilgiye sahip olunur.

Temel denklem doğrusal bir özdeğer denklemidir. Doğrusal olduğundan $\mathbf{H}_1(\mathbf{r})$ ve $\mathbf{H}_2(\mathbf{r})$ ayrı ayrı çözüm olmak üzere $\alpha \mathbf{H}_1(\mathbf{r}) + \beta \mathbf{H}_2(\mathbf{r})$ de bir çözümdür. Dolayısıyla aynı kiplere (frekansa) karşı gelen farklı alan desenleri olabilir. Bu doğrusal operatör, kuantum mekaniğindeki gibi Hermityen bir operatörüdür.

Hermityen operatörlerin özdeğerleri olan ω 'lar gerçeldir. Farklı Hermityen operatörlere denk gelen özfonksiyonlar birbirine diktir:

$$\begin{aligned} \omega_1^2(H_2, H_1) &= c^2(H_2, \Phi H_1) = c^2(\Phi H_2, H_1) = \omega_2^2(H_2, H_1) \\ &= (\omega_1^2 - \omega_2^2)(H_2, H_1) = 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Fotonik kristallerin özelliklerini hesaplayan, frekans ve zaman bölgesinde olmak üzere iki hesaplama yöntemi yaklaşımı bulunmaktadır. Bu yaklaşımların kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Frekans bölgesi yöntemleri Maxwell denklemlerinin öz değer ve öz durumlarını doğrudan hesaplamaktadır. Hesaplanan her alanın belirli bir frekansı vardır. Dolayısıyla, frekans bölgesi yöntemleri bant yapılarının hesaplanmasında çok daha uygundur; fakat zamana-bağılı süreçler doğrudan hesaplanamamaktadır. Buna karşılık, zaman bölgesi yöntemleri Maxwell denklemlerini zaman içerisinde yinelemektedir. Hesaplanan alanlar her bir zaman adımında tanımlıdır; fakat belirli frekansları yoktur. Zaman bölgesi yöntemleri dalga paketi yayılımı, iletimi, rezonans sönme-zaman hesaplamaları vb. benzetimler için çok uygundur. Ayrıca Fourier dönüşümü uygulanarak bant yapılarının hesaplanmasında da kullanılmaktadır.

Fotonik kristallerin bant yapılarını hesaplayan başlıca yöntemler düzlem dalga açılım yöntemi (PWE), zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi (FDTD), frekans bölgesinde sonlu farklar yöntemi (FDFD) ve transfer-matris yöntemidir. Bu tez çalışmasında fotonik kristallerin bant yapılarının ve iletim özelliklerinin belirlenmesinde PWE ve FDTD yöntemleri kullanılmıştır. PWE genelde simetrik durumlarda bant yapısının bulunmasında kullanılırken, FDTD ve FDFD herhangi bir karmaşık yapı için de kullanılabilir. PWE yöntemi frekans bölgesinde tanımlıdır ve fotonik kristallerin bant yapılarını yüksek verimlilikle ve doğrulukta hesaplanmaktadır. Zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir ve tek bir çevrimde geniş bir frekans aralığında bilgi verebilmektedir.

3.1 Düzlem Dalga Açılımı Yöntemi

Düzlem dalga açılımı yönteminde elektromanyetik sistemlerin özdeğerlerinin ayrıştırılması işlemi, alanlar kesikli-frekanslı durumlara genişletilerek ve bütün baz seti bir yerde sonlandırılıp doğrusal problemin çözülmesi ile gerçekleştirilir.

Temel denklem bir özdeğer denklemidir ve ω^2 / c^2 bu denklemin özdeğerleridir. PWE denkleminde frekansların elde edilmesi için özdeğer denklemi çözülmektedir. Özdeğerlere karşı gelen özvektörler frekanslara karşı gelen alan profillerini vermektedir. PWE denkleminde periyodikliğin periyodiklik düzleminde sonsuz olduğu kabul edilmektedir. Herhangi bir n_i tamsayı değeri için periyodiklik düzlemince

$$\varepsilon_r(r) = \varepsilon_r(r + \sum_{i=1,N} n_i a_i) \quad (3.1)$$

olarak verilmektedir. Bu denklemde a_i örgü vektörüdür ve N periyodikliğin bir, iki veya üç boyutta olmasına bağlı olarak 1, 2 veya 3 değerlerini almaktadır. Bu tez çalışmasında iki boyutlu FK'ler ile ilgilenildiğinden N=2'dir.

Yapı periyodik olduğundan ε_r veya $\frac{1}{\varepsilon_r}$ Fourier serisine açılabilir. Örneğin $\frac{1}{\varepsilon_r}$,

$$\frac{1}{\varepsilon_r(r)} = \sum_G \kappa(G) \exp(iGr) \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\kappa(G)$ Fourier açılım katsayıları ve G ters örgü uzayında örgü vektörleridir.

Ters örgü vektörü ilkel ters örgü vektörleri olan b_i 'lerin doğrusal bir bileşimi şeklinde ifade edilebilir:

$$G = \sum_{i=1,N} l_i b_i \quad (3.3)$$

Burada l_i 'ler rastgele tamsayılardır. İlkel ters örgü vektörleri olan b_j 'ler,

$$a_i \cdot b_j = 2\pi \delta_{ij} \quad (3.4)$$

olarak verilmektedir. ε uzaysal r koordinatının periyodik bir fonksiyonu olduğundan Bloch teoremine göre öz fonksiyonlar,

$$H(r) = H_{kn}(r) = u_{kn}(r) \exp(ikr) \quad (3.5)$$

olarak seçilebilir. Burada u_{kn} periyodiktir ve FK ile aynı periyodikliğe sahiptir. Bu eşitlikte k birinci Brillouin bölgesi olan $-\pi \leq ka_i \leq \pi$ aralığında dalga vektörü ve n bandın indisidir. $u_{kn}(r)$ periyodik olduğundan $H(r)$ $1/\varepsilon$ 'a benzer biçimde Fourier serisine açılabilir:

$$H_{kn}(r) = \sum_G H_{kn}(G) \exp(i(k+G)r) \quad (3.6)$$

Denklem (3.6) ile denklem (3.2) temel denklemde yerine konulursa,

$$\nabla \times \sum_{G'} \kappa(G') \nabla \times \sum_{G^*} H_{kn}(G^*) \exp(i(k+G^*+G')r) = \frac{\omega_{kn}^2}{c^2} \sum_G H_{kn}(G) \exp(i(k+G)r) \quad (3.7)$$

elde edilir. Burada ω_{kn}^2 , $H_{kn}(r)$ 'nin öz frekanslarıdır. $G' + G^* = G$ olduğundan denklem (3.7),

$$\nabla \times \sum_G \kappa(G-G^*) \nabla \times \sum_{G^*} H_{kn}(G^*) \exp(i(k+G)r) = \frac{\omega_{kn}^2}{c^2} \sum_G H_{kn}(G) \exp(i(k+G)r) \quad (3.8)$$

olarak yazılabilir. $\nabla \times (V \exp(ivr)) = i\vec{u} \times \vec{v} \exp(ivr)$ eşitliği denklem (3.8)'e iki kere uygulanırsa,

$$-\sum_G \sum_{G^*} \kappa(G-G^*)(k+G) \times [(k+G) \times H_{kn}(G^*)] \exp(i(k+G)r) = \frac{\omega_{kn}^2}{2} \sum_G H_{kn}(G) \exp(i(k+G)r) \quad (3.9)$$

elde edilir. Bu denklemin $\exp(i(k+G)r)$ baz fonksiyonuna izdüşümü yapılırsa,

$$\sum_{G^*} \kappa(G-G^*)(k+G) \times [(k+G) \times H_{kn}(G^*)] = -\frac{\omega_{kn}^2}{2} \sum_G H_{kn}(G) \quad (3.10)$$

şeklinde özdeğer denklemi elde edilmiş olur. Bu denklem sayısal olarak çözülerek birinci Brillouin bölgesinde, verilen bir k dalga vektörü için özdeğerleri olan ω_{kn}^2 ve öz fonksiyonları olan $H_{kn}(r)$ çözümlenebilir. ω_{kn}^2 değerleri k 'ya karşı çizdirilerek fotonik kristalin bant yapısı elde edilir (Askari vd. 2011).

Bu tez çalışmasında bant yapılarının hesaplanmasında Massachusetts Institute of Technology Üniversitesi'nce geliştirilen MPB yazılım paketi (Johnson vd. 2001) ve ticari CrystalWave programının Bant Çözümleyici Modülü kullanılmıştır (<http://www.photond.com/products/crystalwave.htm>). MPB Maxwell denklemlerinin periyodik sınır koşullarındaki özkiplerini tamamen vektörel ve üç boyutlu yöntemlerle frekans bölgesinde düzlem dalga bazında öntanımlanmış konjuge-gradyent minimizasyon yöntemi ile hesaplayan serbest bir yazılım paketidir (Johnson vd. 2001). MPB özellikle fotonik kristaller için tasarlanmıştır ve Guile/Scheme tabanlı betik dili kullanmaktadır.

3.2 Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi

Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD) Maxwell dolanım denklemlerinin elektrik ve manyetik alan için zaman bölgesinde çözümlerine dayanmaktadır. Dolanım denklemlerindeki zaman ve konuma göre olan türevlere sonlu farklarla yaklaştırım yapılmaktadır. Karmaşık yapıları çalışabilme esnekliği ve kapasitesi, kolay uygulanabilirlik, belirli bir hacim içerisinde zamanla değişen alanları görselleştirebilme, doğrusal olmayan, frekansa bağlı ve iletken malzemeleri ele alabilme, tek bir çevrimde geniş spektral alanda bilgi verme FDTD yöntemini güçlü bir sayısal yöntem kılmaktadır (Taflove 2000).

Kendisi ve türevleri her noktada sürekli olan bir $f(x)$ fonksiyonunun türevi merkezi farklar yöntemi kullanılarak çok küçük bir hata miktarı ile belirlenebilir:

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x=x_0} = \frac{f\left(x = x_0 + \frac{\Delta x}{2}, t\right) - f\left(x = x_0 - \frac{\Delta x}{2}, t\right)}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (3.11)$$

Burada O ile parantez içerisinde gösterilen ifade bu yöntemdeki hata miktarıdır. Hata miktarı iki nokta arası mesafenin karesi ile orantılıdır. Eğer türev alınan iki nokta arası mesafe yeterince küçük ise O ile temsil edilen tüm terimler ihmal edilerek merkezi fark yaklaşımı,

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x=x_0} \approx \frac{f\left(x = x_0 + \frac{\Delta x}{2}, t\right) - f\left(x = x_0 - \frac{\Delta x}{2}, t\right)}{\Delta x} \quad (3.12)$$

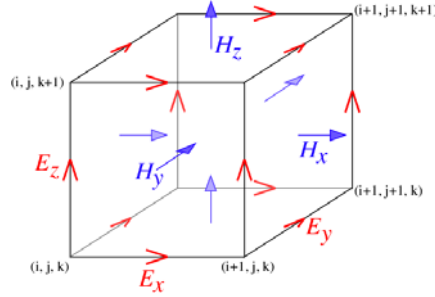
ile verilir.

Üç boyutlu uzayda f fonksiyonunun uzay ve zaman değişimleri $f(i,j,k,n)=f(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n)$ ile temsil edilmektedir. FDTD'nin temeli, bir boyutlu FDTD yöntemi incelenerek öğrenilebilir. FDTD yöntemi elektrik ve manyetik alanların belirlenmesinde Yee algoritmasını kullanmaktadır.

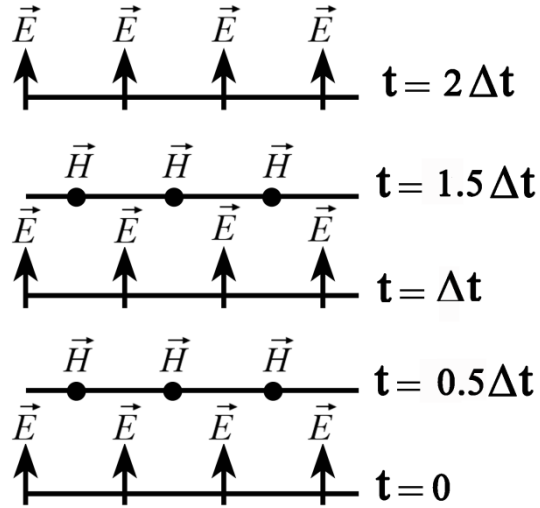
3.2.1 Yee algoritması

1966 yılında Yee kayıpsız ortamlar için zamana bağlı Maxwell dolanım denklemlerini sonlu fark denklemleri biçiminde yazmıştır (Yee 1966). Yee algoritması dalga denklemini kullanarak manyetik alanı ve elektrik alanı ayrı ayrı çözmek yerine birbirine bağlı Maxwell dolanım denklemlerini kullanarak elektrik alanı ve manyetik alanı uzay ve zaman bölgesinde birlikte çözmektedir. Yee algoritması $\mathbf{E}$ elektrik alan ve $\mathbf{H}$ manyetik alan bileşenlerini üç boyutlu konum bölgesinde her bir $\mathbf{E}$ bileşeni dört $\mathbf{H}$ bileşeni ve her bir $\mathbf{H}$ bileşeni dört $\mathbf{E}$ bileşeni ile çevrelenecek biçimde yerleştirmektedir (Şekil 3.1). Zaman bölgesinde ise Yee algoritması $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{H}$ alanlarını atlamalı bir biçimde yerleştirmektedir. Şekil 3.2'de bir boyutlu dalga ilerlemesi problemi uzay

bölgesindeki türevler için sonlu farklar ve zaman bölgesindeki türevler için atlamalı bir yerleştirme kullanılarak uzay-zaman tablosunda gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Elektrik ve manyetik alan vektör bileşenlerinin Yee örgüsünün kübik birim hücresinde konumlanması



Şekil 3.2 Bir boyutlu dalga ilerlemesi örneği için Yee algoritmasının uzay-zaman konumlanması (Schneider 2011)

Yee algoritmasında zaman ve konuma bağlı kısmi türevler sonlu farklar olarak ifade edilmektedir. Modellenen uzayda önceden depolanan $\mathbf{H}$ verileri kullanılarak tüm $\mathbf{E}$ hesaplamaları gerçekleştirilmekte ve belirli bir zaman noktası için hafızada depo edilmektedir. Sonrasında, uzay bölgesinde hesaplanan $\mathbf{E}$ verileri kullanılarak tüm $\mathbf{H}$ hesaplamaları gerçekleştirilmekte ve hafızada depo edilmektedir. Yeni elde edilen $\mathbf{H}$ sonuçları kullanılarak $\mathbf{E}$ bileşenleri hesaplanmakta ve bu döngü zaman adımlamaları

sonlanana kadar devam ettirilmektedir. Zaman bölgesinde sonlu farklar yönteminin temeli bir boyutta kesim 3.2.2’de ele alınmıştır (Schneider 2011).

3.2.2 Bir boyutta zamanda sonlu farklar yöntemi

Elektromanyetik dalgaın sadece **z** bileşeninin olduğu ve **x** doğrultusunda ilerlediğini düşünelim. Faraday yasası ve Amper yasası denklem (3.13) ve denklem (3.14) biçimlerinde yazılmaktadır.

$$-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \partial / \partial x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_z \end{vmatrix} = -\hat{a}_y \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \vec{H} = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \partial / \partial x & 0 & 0 \\ 0 & H_y & 0 \end{vmatrix} = \hat{a}_z \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.14)$$

(3.13) ve (3.14) denklemleri yeniden düzenlenirse,

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.15)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.16)$$

elde edilir. (3.15) denklemi manyetik alanın zamana göre türevini elektrik alanın konuma göre türevi cinsinden, (3.16) denklemi ise elektrik alanın zamana göre türevini manyetik alanın konuma göre türevi cinsinden vermektedir. Zaman ve konum uzayları parçalı hale getirilmeden önce alanın konumdaki ve zamandaki yeri aşağıdaki gösterimle ifade edilebilir:

$$E_z(x, t) = E_z(m\Delta x, q\Delta t) = E_z^q[m] \quad (3.17)$$

$$H_y(x, t) = H_y(m\Delta x, q\Delta t) = H_y^q[m] \quad (3.18)$$

Burada Δx iki ardışık konum noktası arasındaki mesafe, Δt ise zamanda iki ardışık nokta arası süredir. Köşeli parantez içerisinde yazılan m konum adımlarının, üstel olarak yazılan q ise zaman adımlarının sayısını ifade etmektedir. Şekil 3.3’de elektrik ve manyetik alan düğüm noktalarının zaman ve konum uzaylarında düzenlenişi bir boyutlu düzlem için gösterilmektedir. Burada kesikli çizgi $t=0$ anını göstermektedir. Altında kalan alan geçmiş, üstte kalan alan ise gelecek olarak düşünülebilir. Geçmiş bölgedeki bütün alanlar bilinmekte, gelecek bölgedekiler ise bilinmemektedir. Kesikli çizgi zaman bölgesinde ötelendikçe bilinmeyen alanlar bilinen olarak değişmektedir.

Elektrik ve manyetik alanları Faraday ve Amper yasalarını uygulayarak bir zaman aralığı için belirleyelim. Bu amaçla şekil 3.3’deki $\left(\left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta x, q\Delta t \right)$ konum-zaman noktasını başlangıç olarak kabul ederek önce Faraday yasasını kullanarak yarım zaman aralığı ilerleyelim.

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \bigg|_{(m+\frac{1}{2})\Delta x, q\Delta t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \bigg|_{(m+\frac{1}{2})\Delta x, q\Delta t} \quad (3.19)$$

Yukarıdaki eşitlikteki türevleri sonlu farklar karşılıkları ile yazalım:

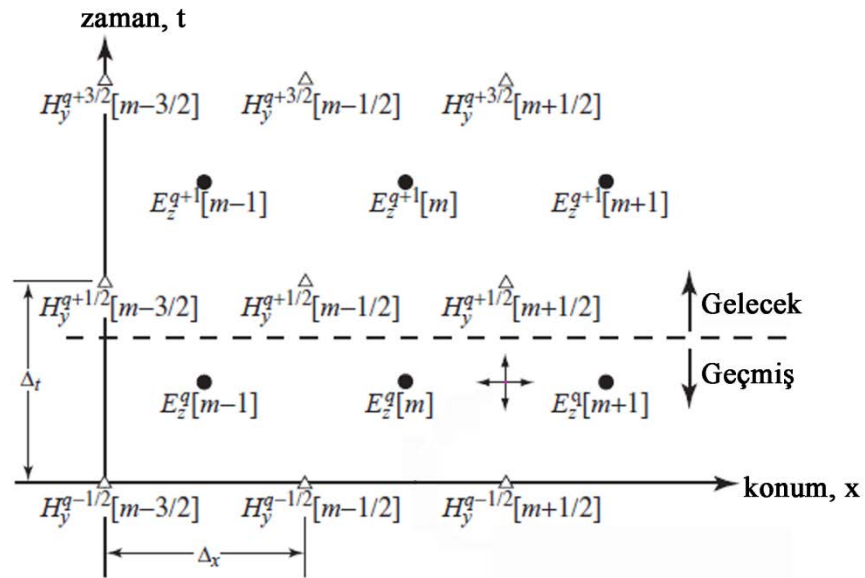
$$\mu \frac{H_y^{q+\frac{1}{2}} \left[m + \frac{1}{2} \right] - H_y^{q-\frac{1}{2}} \left[m + \frac{1}{2} \right]}{\Delta t} = \frac{E_z^q[m+1] - E_z^q[m]}{\Delta x} \quad (3.20)$$

Buradan gelecekteki $H_y^{q+\frac{1}{2}}$ değeri,

$$H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m+\frac{1}{2}\right] = H_y^{q-\frac{1}{2}}\left[m+\frac{1}{2}\right] + \frac{\Delta t}{\mu\Delta x} (E_z^q[m+1] - E_z^q[m])$$

(3.21)

olarak belirlenir. (3.21) denklemi H_z manyetik alan için güncelleme denklemidir. H_z 'nin gelecekteki değeri geçmişteki değerine ve komşu elektrik alanlara bağlıdır. (3.21) denklemi her H_z bileşenine uygulandığında geçmiş ve geleceği ayıran çizgi bir yarım zaman adımı ileri gider.



Şekil 3.3 Elektrik ve manyetik alan düğümlerinin zaman ve konum bölgesinde konumlanması. Belirtilen noktada H_y için güncelleme denklemi yazılmıştır. (Schneider 2011).

Manyetik alan güncellendikten sonra yeni konum-zaman uzayı konumlanması şekil

3.4'de gösterilmiştir. Amper yasasını benzer biçimde $\left(m\Delta x, \left(q+\frac{1}{2}\right)\Delta t\right)$ noktasına

uygulayalım:

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \bigg|_{\left(m\Delta x, \left(q+\frac{1}{2}\right)\Delta t\right)} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \bigg|_{\left(m\Delta x, \left(q+\frac{1}{2}\right)\Delta t\right)} \quad (3.22)$$

$$\varepsilon \frac{E_z^{q+1}[m] - E_z^q[m]}{\Delta t} = \frac{H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m+\frac{1}{2}\right] - H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m-\frac{1}{2}\right]}{\Delta x} \quad (3.23)$$

Buradan $E_z^{q+1}[m]$ değeri,

$$E_z^{q+1}[m] = E_z^q[m] + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} \left(H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m+\frac{1}{2}\right] - H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m-\frac{1}{2}\right] \right) \quad (3.24)$$

olarak elde edilir. (3.24) denklemi E_z elektrik alanı için güncelleme denklemdir. Güncelleme denklemlerinin indisleri geneldir ve her H_y ve E_z düğümü için aynı denklemler geçerlidir.

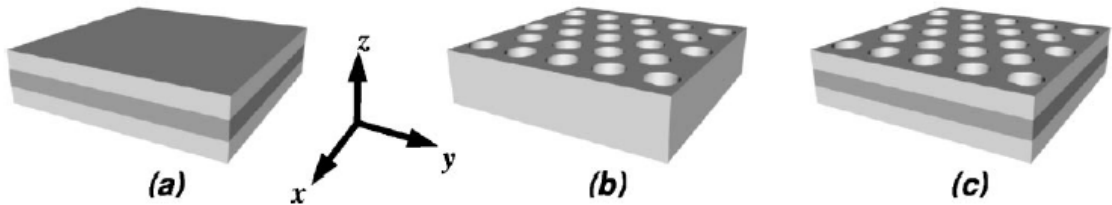
Manyetik alanın güncelleme denklemine benzer biçimde E_z 'nin gelecekteki değeri geçmişteki değeri ile komşu manyetik alan değerlerine bağlıdır. (3.24) denklemi her elektrik alan düğüm noktasına uygulandığında geçmiş ve geleceği ayıran çizgi bir yarım zaman aralığı ilerler. Elektrik ve manyetik alanlar bu şekilde belirlenerek konum-zaman uzayındaki tüm elektrik alan ve manyetik alan değerleri çözümlenir.

bölgesinin kenarlarına mükemmel uyumlu tabaka (PML) eklenmesi ile bu durum yaratılabilir. PML kenarlardan yansımayı önlemek için tasarlanmış sanal, soğurucu bir malzemedir.

Bu tez çalışmasında iletim spektrumları grafiklerinin ve atmanın zaman bölgesindeki profillerinin elde edilmesinde Massachusetts Institute of Technology tarafından geliştirilen MEEP serbest yazılım paketi (Oskooi vd. 2010) ve CrystalWave ticari benzetim programının FDTD modülü kullanılmıştır (<http://www.photonix.com/products/crystalwave.htm>). MEEP programı elektromanyetik sistemlerin modellenmesi için geliştirilen ve FDTD yöntemini kullanan serbest bir yazılım paketidir.

3.3 Etkin İndis Yöntemi

Üç boyutlu bir FK dilimin bant yapısı ve iletim özellikleri etkin indis yöntemi kullanılarak iki boyutlu hesaplamalarla belirlenebilir. Şekil 3.5.a'da üst ve altı düşük kırılma indisli heteroyapılı bir dilim dalga kılavuzu, şekil 3.5.b'de iki boyutlu fotonik kristal yapısı, şekil 3.5.c'de heteroyapılı dilim dalga kılavuzu temelli iki boyutlu fotonik kristal yapısı verilmiştir. Şekil 3.5.c'deki yapının dağıtım kipleri şekil 3.5.a'daki yapının kiplerine oldukça benzerlik göstermektedir (Johnson vd. 1999). TM-benzer ve TE-benzer kipler $z=0$ düzleminde tamamen TM ve TE kiplerdir. Bu sebeple, bu düzlemde üç boyutlu dilim fotonik kristal tamamen iki boyutlu bir fotonik kristal olarak düşünülebilir.



Şekil 3.5.a. Geleneksel heteroyapılı dilim fotonik kristal dalga kılavuzu, b. iki boyutlu fotonik kristal, c. heteroyapılı dilim dalga kılavuzu temelli iki boyutlu fotonik kristal (Qui 2002)

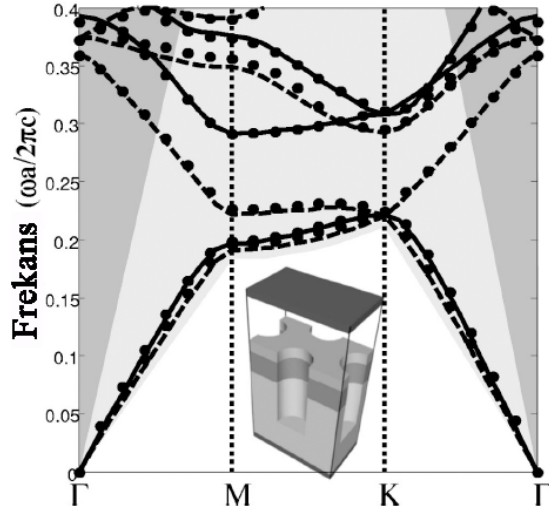
Kılavuz kiplerin faz hızının ve dağılım özelliklerinin iki boyutta doğru olarak belirlenebilmesi için iki boyutlu fotonik kristalin kırılma indisi olarak üç boyutlu heteroyapının (Şekil 3.5.a) kılavuz kiplerine ait indis değeri kullanılabilir. Etkin indis değeriyle yapılan bant yapısı hesaplamalarının doğru olabilmesi için heteroyapılı dilim dalga kılavuzu yapısı ilgilenilen frekans aralığında tek kipli olmalıdır (Qui 2002).

Heteroyapılı dilim dalga kılavuzu temelli fotonik kristaller kırılma indisi zıtlığının düşük olduğu InP/GaInAsP/InP gibi yapılar ve yüksek olduğu hava/GaAs/Al₂O₃ gibi yapılar için olmak üzere iki grupta incelenebilir. İlk grupta, dilim kiplerin etkin indisi geniş bir frekans aralığında az değişim göstermektedir. Örneğin dilimlerin kalınlıklarının örgü parametresi “a” kadar olduğu InP/GaInAs heteroyapısında ($n_{\text{GaInAsP}}=3.35$, $n_{\text{InP}}=3.17$) $0-0.5(\omega a/2\pi c)$ frekans aralığında etkin indis değeri 3.17 ile 3.28 arasında değişim gösterir. Tüm frekans aralığında indis farkı en fazla %3.5'dir. Bu sebeple, geniş bir frekans bölgesi için iki boyutlu yaklaştırmayla ortalama bir etkin indis değeri kullanılabilir. Bu yapılar için etkin indis yöntemiyle iki boyutta hesaplanan bant yapıları üç boyutlu bant yapılarıyla geniş bir frekans aralığında büyük uyum sağlamıştır. Fakat böyle bir yapıda kipler alttaşın ışık çizgisinin üzerinde olabileceğinden ötürü kayıp bulunmaktadır (Qui 2002).

Yüksek indis zıtlığının olduğu SiO₂/Si/SiO₂ yapılı ($n_{\text{Si}}=3.48$, $n_{\text{SiO}_2}=1.5$) ve Si dilimin 0.4a kalınlıkta olduğu bir yapıda kılavuz kiplerin etkin indisi $0-0.5(\omega a/2\pi c)$ aralığında 1.5 ile 3.2 arasında değişim göstermektedir. Bu kadar geniş bir frekans aralığında dilimin kırılma indisi büyük değişim gösterdiğinden dolayı etkin indis yöntemi geçersizdir. Bununla birlikte, optik haberleşmenin olduğu frekans bölgesinde ($\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$) bant genişliği 100 nm'dir. Bu aralıkta etkin kırılma indisi değişimi yalnız %7 olduğundan, bu dar frekans aralığında etkin indis yöntemi geçerlidir (Qui 2002).

Şekil 3.6'da 0.4a kalınlıklı Si tabakalı, üst ve altı silika olan, $r=0.3a$ yarıçaplı üçgen örgülü hava delikli iki boyutlu bir fotonik kristal dalga kılavuzuna ait bant diyagramı verilmiştir. Siyah daireler şeklinde gösterilen kılavuz kipler üç boyutlu FDTD yöntemiyle hesaplanmıştır. $0.27-0.29(\omega a/2\pi c)$ 'lik dar bir frekans aralığında iki kılavuz kip bulunmaktadır. Siyah eğriler şeklinde gösterilen kılavuz kipler ise 2.73 etkin indis

değeri atanarak iki boyutlu FDTD yöntemiyle hesaplanmıştır. Şekil 3.6'daki fotonik bant yapısı grafiğinden görüldüğü gibi iki boyutlu hesaplama sonuçları tamamen vektörel üç boyutlu hesaplama sonuçları ile oldukça yüksek uyum içerisindedir.



Şekil 3.6 İki boyutlu üçgen örgülü InP/GaInAsP/InP fotonik kristalin bant yapısı

4. FOTONİK KRİSTALLERDE SİMETRİNİN BANT YAPISINA ETKİSİ

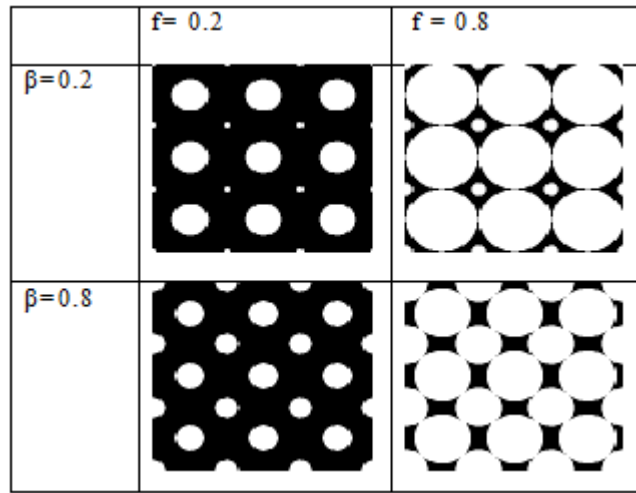
Bir fotonik kristal örgüsünün simetrisi azaltılarak fotonik bant aralıkları genişletilebilir. Fotonik kristallerin bant aralıkları ne kadar geniş ise yasaklı olan frekans aralığı o kadar geniş ve bant aralığı merkezindeki frekansın kristal içine sızma olasılığı o ölçüde düşüktür. Simetrinin bant yapısına etkisinin incelenmesi amacıyla iki farklı örgü tipi, kare örgü ve hibrit üçgen-grafit örgü kullanılmıştır. Bir fotonik bant aralığının genişliği, frekans genişliği $\Delta\omega$ 'nın FBA'nın merkezindeki frekansa oranı olarak ve yüzde biçiminde tanımlıdır. Bu tanım FBA'nın genişliğini fotonik kristalin boyutlarından bağımsız olarak verdiği için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular aşağıda başlıklar halinde daha detaylı olarak ele alınmıştır.

4.1 Simetrinin Azaltılmasının Kare Örgülü Fotonik Kristalin Bant Yapısına Etkisi

TM ve TE kutuplu fotonik bant aralıklarının (FBA) üst üste bindiği bölgelerde oluşan “tam” bant aralıklarında elektromanyetik dalgaların ilerlemesi kutuplanma doğrultusundan bağımsız olarak yasaklıdır. Dolayısıyla, tam bant aralıklarının genişletilmesi TM ve TE kiplerinde kutuplanmış ışınları birlikte yapan çoğu iki boyutlu fotonik kristal temelli lazerler ve optik dalga kılavuzları için önemlidir. Tam bant aralıklarının oluşturulabilmesi için genel yaklaşım kırılma indisi oranının veya kristal geometrisinin değiştirilmesidir. Kristal geometri simetrisinin azaltılması ile tam bant aralıklarının genişletilmesi fikri ilk defa Anderson vd. (1996) tarafından ortaya atılmıştır. İki boyutlu üçgen, kare veya altıgen örgülü fotonik kristallerde simetri azaltılarak tam bant aralıkları genişletilmiştir (Wang vd. 2001, Susa vd. 2002).

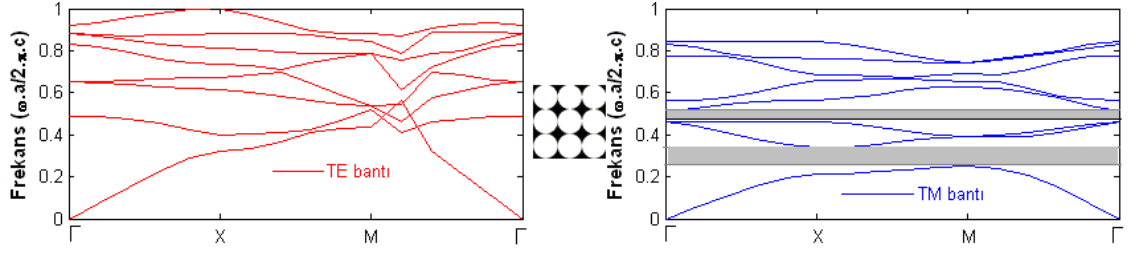
Bu çalışmada, iki boyutlu silikon ortamındaki hava delikli kare örgünün fotonik bant yapısı çıkartılmış, kristal örgüsünde simetri azaltılarak maksimum tam bant aralığının olduğu örgü yapısı özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca simetri azaltıcı örgü noktalarının şeklinin ve yöneliminin tam bant aralığı oranına etkisi incelenmiştir.

Birim hücrede simetri azaltıcı örgü noktalarının yerleştirilmesinde simetri azaltıcı elemanın çapının temel örgü noktalarının çapına oranı (β) ve f ile gösterilen hava deliklerinin doldurduğu alanın dielektrik örgü alanına oranı kıstas parametrelerdir. Simetri azaltıcı örgü noktası birim hücrenin merkezine yerleştirilmiştir. Aynı doluluk oranında (f 'de) birim hücredeki örgü noktaları merkezdeki örgü noktasından farklı tutularak veya çap oranı (β) aynı tutulup doluluk oranı değiştirilerek bant aralığında değişim oluşturulabilir. Şekil 4.1'de bu kavramlar iki boyutlu dairesel merkezli kare örgü için şekillendirilmiştir.



Şekil 4.1 Farklı doluluk ve çap oranlarına göre dielektrik ortamda iki boyutlu kare fotonik kristal örgü

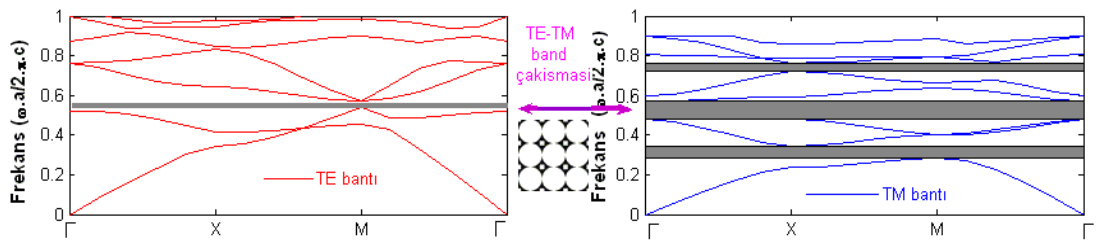
Birbirinden izole örgü noktalarında TM bant aralıkları TE bant aralıklarına göre daha fazla desteklenmektedir (Joannopoulos 2008). Nitekim silikon ortamda dairesel hava delikli kare örgüde TE bant aralığı bulunmamaktadır. Dolayısıyla tam bant aralığı oluşumu engellenmiştir. TM bant aralığı en yüksek $f=0.76$ doluluk oranında görülmektedir ve genişliği %3.9'dur (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Silikon ortamda dairesel hava delikli kare örgüde TE ve TM bantları ($f=0.8$)

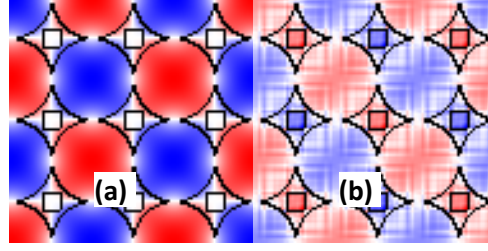
Doluluk oranları sabit tutulup ϕ oranı 0.05a aralıklarla değiştirilerek veya ϕ oranı sabit tutulup doluluk oranları değiştirilerek tam bant aralıklarının olduğu bölgeler taranmıştır.

Dairesel hava delikli kare örgüde M simetri noktasında TE2 ve TE3 kiplerinin çakışık olması tam bant aralığı oluşmasını engellemektedir. Kare örgünün merkezine farklı boyutta kare delikler açılarak yapı simetrisi azaltıldığında tam bant aralığı oluşmuştur. $f=0.83$ doluluk oranı ve eklenen kare hava deliklerinin kenarı temel hava deliklerinin ϕ oranının 0.2 katı olduğunda en geniş tam bant aralığı görülmüştür.



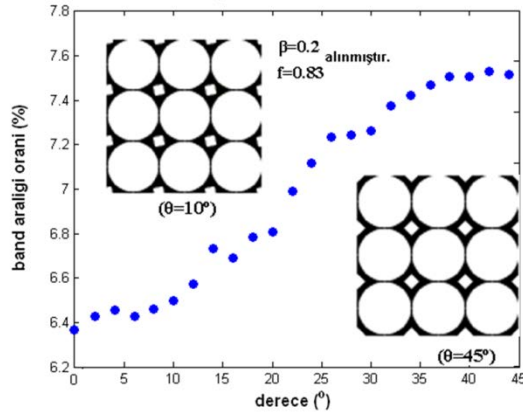
Şekil 4.3 Merkezi kare hava delikli kare örgülü yapıda TE ve TM bantları

Merkeze kare şeklinde bir dielektrik örgü noktası yerleştirildiğinde, TE2 ve TE3 bantları arasında bir bant aralığının oluşması tam bant aralığı oluşmasına olanak vermiştir. Şekil 4.4'de TE2 ve TE3 kiplerinin M simetri noktasında manyetik alan dağılımları verilmiştir. TE2 kipinin manyetik alanı daireler içinde depolanırken TE3 kipi için simetri azaltıcı elemanlarda depolanması keskin bir kontrast oluşturmaktadır. Bu durum TE bant aralığı oluşumunun işaretidir (Şekil 4.4).



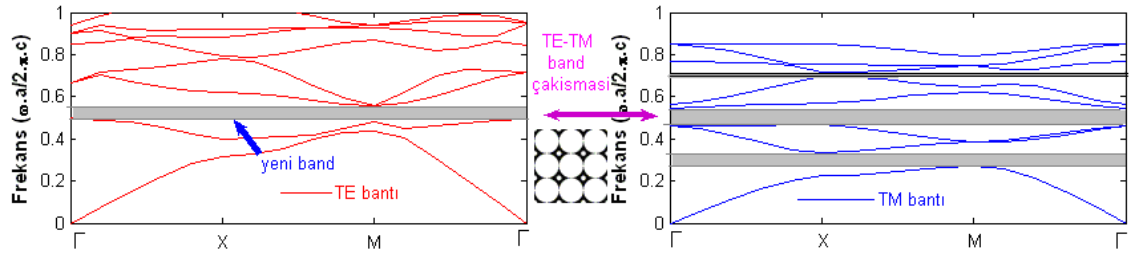
Şekil 4.4 Merkezi kare, dairesel hava delikli kare örgülü yapıda yapıda
a.TE2 ve b.TE3 kipleri için manyetik alan dağılımı

Merkezdeki kare örgüler döndürüldüğünde tam bant aralığı oranı %23 genişlemektedir. Merkezi simetriden dolayı bant aralıkları $\theta=45^\circ$ 'e göre simetrik bulunmuştur. $\theta=45^\circ$ 'de kare örgü noktalarının ucu köşegensel simetriye sahiptir. Dolayısıyla örgü noktaları arasındaki etkileşmenin artması bant aralığını artırmıştır.



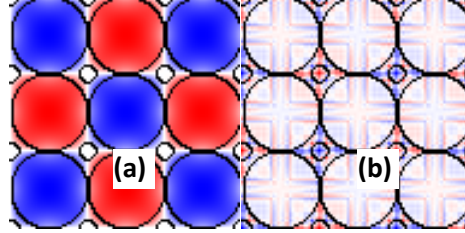
Şekil 4.5 Merkezi kare, hava delikli kare örgülü yapıda kare örgü noktalarının döndürülmesi ile bant aralığı değişimi

Bir sonraki aşamada merkeze dairesel delikler yerleştirilerek örgü simetrisi azaltılmıştır. Merkezi dairesel, dairesel hava delikli kare örgü için en geniş tam bant aralığı $f=0.8$ doluluk oranı ve eklenen hava deliklerinin çapı örgü hava deliklerinin 0.18 katı olduğunda görülmüştür (Şekil 4.6). Aynı doluluk oranında merkezdeki örgü noktası büyütüldükçe tam bant aralığı azalmakta ve aynı çapta dairesel hava delikleri olduğu durumda ($f=0.8$, $\beta=1$) tam bant aralığı kaybolmaktadır. Bu durum yapıda simetrisinin artmasından kaynaklanabilir. Bu örgü yapısında simetri azaltıldıkça tam bant aralığının arttığı görülmüştür.



Şekil 4.6 Merkezi dairesel hava delikli kare örgülü yapıda TE ve TM bantları

Merkezi dairesel hava delikli kare örgü için de TE2 kipinin manyetik alanı daireler içinde depolanırken TE3 kipi için simetri azaltıcı elemanlarda depolanması bir zıtlık oluşturmaktadır. TE2 ve TE3 kipleri arasında TE bant aralığı oluşmuştur (Şekil 4.7).



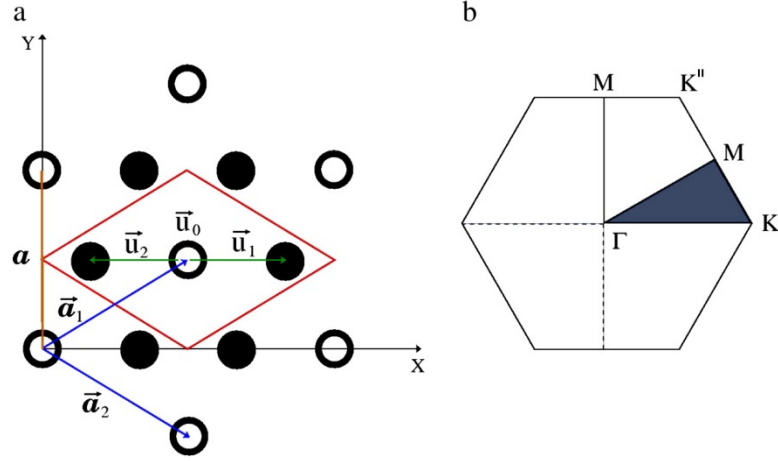
Şekil 4.7 Merkezi dairesel, dairesel hava delikli kare örgülü yapıda yapıda
a. TE2 ve b. TE3 kipleri için manyetik alan dağılımı

Sonuç olarak, kristal örgüde simetrinin azaltılması tam bant aralığı oluşturabilir veya tam bant aralığını genişletmede yararlı olabilir. Simetri azaltıcı elemanın şekli, boyutu ve yönelimi tam bant aralığını genişletmede etkindir. İki boyutlu kare dielektrik örgüde simetri azaltılarak tam bant aralıklarının genişletilmesinde yüksek doluluk oranları ve küçük çaplı/kenarlı simetri kırıcı elemanlarının daha etkili olduğu saptanmıştır. Fakat, geniş tam bant aralığının yüksek doluluk oranlarında görülmesi ve tam bant aralığının en fazla olduğu çap ve doluluk oranlarında temel örgü noktalarının birbirine çok yakın olması örgü noktaları arasındaki dielektrik kanalı daraltmaktadır. Bu durum fabrikasyon açısından zorluk oluşturabilir.

4.2 Simetrisinin Azaltılmasının Hibrit Üçgen-Grafit Örgülü Fotonik Kristalin Bant Yapısına Etkisi

Bu çalışmada hava ortamında iki boyutlu üçgen-grafit hibrit yapılı bir örgü kullanılmıştır. Bu hibrit yapılı örgüdeki üçgen örgü noktalarının, çap oranının değiştirilmesiyle ve yapısal deformasyon uygulanarak örgü noktalarının şeklinin değiştirilmesiyle simetrisinin azaltılmasının bant yapısına etkisi incelenmiştir. Chang vd (2006) tarafından yapılan çalışmada Te çubuklu üçgen örgülü yapıda çubukların deforme edilmesiyle ve döndürülmesiyle TM ve TE bant aralıklarının değişimi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada ise yapısal deformasyon tüm örgü noktalarına değil, hibrit bir örgüyü oluşturan alt örgü noktalarının yalnız birine uygulanmıştır. Üçgen örgüye ait noktalar grafit örgüden farklı büyüklük ve biçimde tutulduğunda üçgen-grafit hibrit örgü, simetrisi azaltılmış grafit örgü olarak düşünülebilir.

Çalışmada kullanılan hibrit örgünün yapısı ve ilk Brillouin bölgesi şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bu örgüde üçgen örgü noktaları $a_1 = a(\sqrt{3}/2, 1/2)$ ve $a_2 = a(\sqrt{3}/2, -1/2)$ olan ilkel vektörler ile tanımlanmaktadır. Birim hücredeki üç çubuğun konumları birim hücre merkezine göre $\mathbf{u}_0=0$, $\mathbf{u}_1=(a_1+a_2)/3$ ve $\mathbf{u}_2=-(a_1+a_2)/3$ ’tür. Üçgen örgü noktaları grafit örgünün merkezine yerleştirilmiştir. Birim hücre şekil 4.8’de kırmızı eşkenar dörtgen içerisinde gösterilmiştir. Birim hücre içerisinde üç örgü noktası yer almaktadır. Üçgen örgü noktalarının yarıçapı sıfır olduğunda örgü grafit örgüdür. Üçgen örgü noktalarının yarıçapı grafitinki ile aynı alındığında ise hibrit üçgen-grafit örgü, örgü parametresi $a/\sqrt{3}$ olan üçgen örgü olarak düşünülebilir.



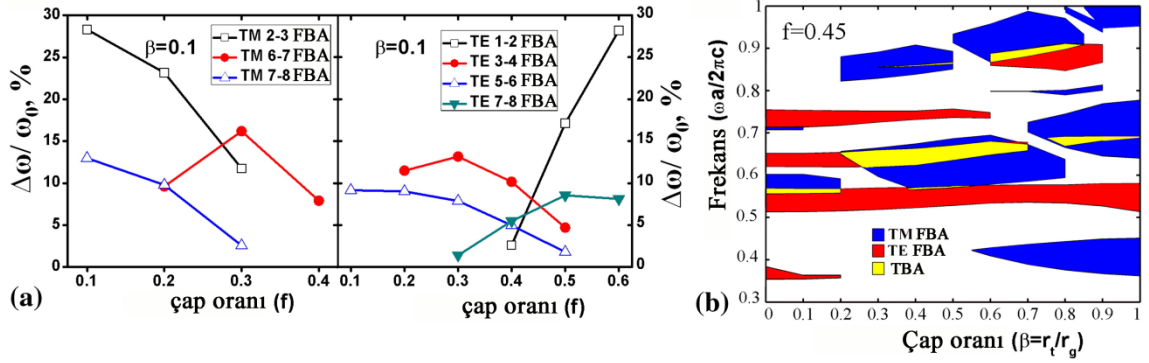
Şekil 4.8 a. Hava ortamında simetrisi azaltılmış grafit örgünün şematik gösterimi, b. örgünün birinci Brillouin bölgesi

Çalışmada dielektrik malzeme olarak dielektrik sabiti 12.09 olan silikon kullanılmıştır. Yapısal deformasyonun en etkili olduğu yarıçap değerini bulmak için öncelikli olarak simetrisi azaltılmış grafit örgünün dağınım özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla doluluk oranı f , 0.1'den 0.6'ya 0.05'er aralıklarla ve çap oranı β , 0'dan 1'e 0.05'er aralıklarla değiştirilmiştir.

Şekil 4.9.a'da $\beta=0.1$ için TM ve TE FBA'ların değişimi gösterilmektedir. Yüksek f değerlerinde ilk TE FBA genişken düşük f değerlerinde ise ilk TM FBA geniştir. TM 6-7 ve TE 3-4 FBA ise benzer davranış göstermektedir. f arttıkça kritik bir β değerine kadar genişlikleri artmakta, sonrasında azalış göstermektedir. TM 7-8 ve TE 5-6 FBA'ları da benzer davranış göstererek f arttıkça azalmaktadır.

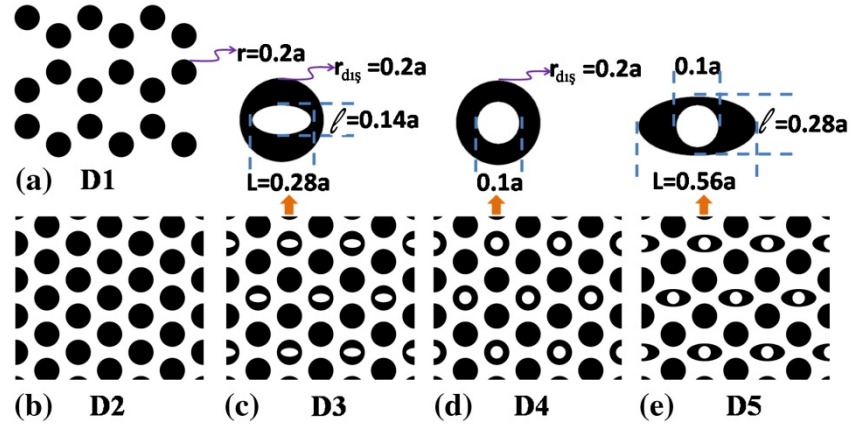
Sabit f değerlerinde, β arttıkça TM 2-3 FBA azalırken TM 3-4 FBA artmaktadır. $f=0.45$ için fotonik bant aralığı haritası şekil 4.9.b'de verilmiştir. Simetrisi azaltılmış grafit örgünün TM FBA'ları TE FBA'lara göre daha çok desteklediği bu grafikten anlaşılmaktadır. Manyetik alan dağılımı üçgen örgü noktaları üzerinde depolandığından ikinci TE FBA çap değişiminden neredeyse hiç etkilenmemiştir. Çünkü β sıfırdan bire değişim gösterirken grafit örgü noktalarının çapı sadece %18 oranında değişmektedir. Grafit örgü $f=0.45$ doluluk oranında iken %2.7 tam bant aralığına sahiptir. $\beta=0.3$ 'de grafit örgü merkezine küçük bir örgü noktası eklenmesi tam bant aralığı oranını %6.9'a

artırmaktadır. Neredeyse tüm β değerleri için bir tam bant aralığı bulunmaktadır. Bunun yanında, simetrisi azaltılmış grafit örgü, TM FBA'ları TE FBA'lara göre daha fazla desteklemektedir.



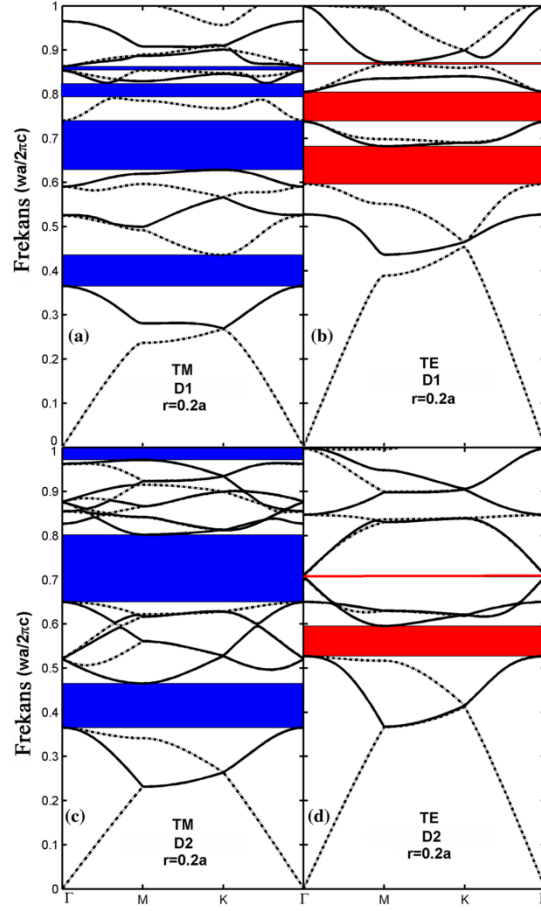
Şekil 4.9.a. Simetrisi azaltılmış grafit yapı için $\beta=0.1$ 'de doluluk oranı değiştikçe bant aralığı oranının değişimi, b. simetrisi azaltılmış grafit yapının $f=0.45$ 'deki bant aralığı haritası

Simetrisi azaltılmış grafit örgü yapısında ikinci aşama olarak üçgen örgü noktalarına yapısal deformasyon uygulanarak bant aralıklarının değişimi incelenmiştir. $f=0.45$ doluluk oranında ve $\beta=1$ çap oranında TE FBA ve TBA çok dardır (Şekil 4.9.b'de $\omega=0.7(2\pi c/a)$ frekans değerinde %0.4 tam bant oranı). Dolayısıyla hava deliklerinin açılmasıyla TE FBA'nın ve TBA'nın oluşumu daha net ortaya çıkacaktır. $f=0.45$ ve $\beta=1$ değerleri seçilerek üçgen örgü noktalarına hava delikleri açma yoluyla TM, TE ve tam bant aralığındaki değişim incelenmiştir. Sadece şekil etkisinin dağıtım grafiği üzerindeki sonuçlarını görmek için D3, D4 ve D5 yapılarının parametreleri çubukların içindeki hava oranı aynı bırakılacak şekilde ($f=0.4$) tasarlanmıştır. Yapısal deformasyon araştırmasında kullanılan grafit örgü ve simetrisi azaltılmış türevleri yapısal değerleri ile birlikte şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10.a. Grafit örgü (D1), b. simetrisi-azaltılmış grafit örgü (D2), c. üçgen örgü noktaları eliptik delikli, simetrisi-azaltılmış grafit örgü (D3), d. dairesel delikli, simetrisi-azaltılmış grafit örgü (D4), e. üçgen örgü noktaları dairesel delikli, eliptik çubuklu simetrisi-azaltılmış grafit örgü (D5)

Şekil 4.11.a. ve b. $r=0.20a$ çubuklu grafit örgünün TM ve TE bantlarının dağılım grafiğini göstermektedir. Nokta nokta ve düz çizgiler tek ve çift numaralı bantları göstermektedir. Bu yarıçap değerleri için belirtilen frekans aralığında üç TM FBA ve iki TE FBA bulunmaktadır. İkinci TM FBA'nın ilk TE FBA ile $0.63(2\pi c/a)$ ile $0.68(2\pi c/a)$ frekansları arasında örtüşmesinden $\Delta\omega_{\max}/\omega_0=\%8.2$ 'lık bir tam bant aralığı oluşmuştur (Şekil 4.11.a). Şekil 4.11.c, d ise $f=0.45$ ve $\beta=1$ hibrit üçgen-grafit örgüye ait TM ve TE bantlarının dağılım grafiğini göstermektedir. Birim hücre yoğunluğu merkeze eklenen çubuklar ile arttığından TM ve TE bantlarının sayısı önemli ölçüde artmıştır. Bu yapı geniş TM FBA'ları desteklemektedir. TE FBA sınırları daha düşük frekanslara kaymıştır. Hibrit yapıya geçerken yapının dielektrik konsantrasyonunun artışı TM FBA'yı artırırken TE FBA'nın ve tam bant aralığının daralmasıyla sonuçlanmıştır. Yapıda sadece $\%0.4$ genişliğinde TBA mevcuttur.



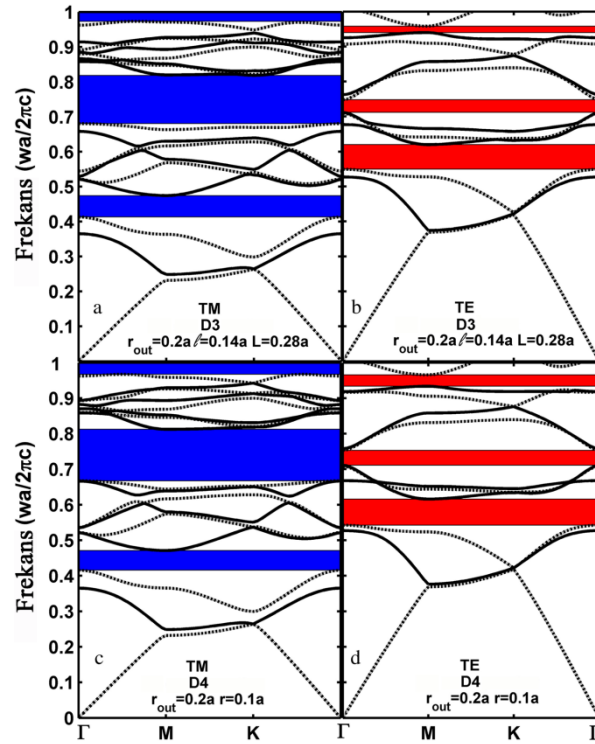
Şekil 4.11.a. D1 yapısına ait TM kutuplu, b. TE kutuplu dağılım grafikleri, c. D2 yapısına ait TM kutuplu, d. TE kutuplu dağılım grafikleri

Hibrit örgüyü oluşturan üçgen ve grafit örgüden birinde hava delikleri açılarak deformasyon yaratılabilir. Ayrıca içi delik çubukların iç veya dış çeperlerinin şeklinin deformasyonu ile yapısal deformasyon oranı artırılabilir. Bu çalışmada deformasyon üçgen örgü noktalarında oluşturulmuştur.

Üçgen örgü noktalarına eliptik delikler açılarak örgü noktalarının dış simetrisi korunmuş, fakat iç simetrisi değiştirilmiştir. Bu örgüye ait yapısal parametreler $\gamma=2$, $f=0.4$ ve $\beta=1$ 'dir (Şekil 4.10.c). Burada γ eliptik örgü noktasının büyük ekseninin uzunluğunun küçük eksenine oranıdır. Örgü yapısı değiştikçe FBA'ların genişliğinin değişmesi alan dağılımı incelenerek yorumlanabilir. Örneğin, manyetik alan dağılımı üçüncü TM bantının Γ simetri noktalarında, üçgen örgü noktalarının merkezinde depolanmaktadır. Bu örgü noktalarında deliklerin açılması Γ simetri noktasında üçüncü

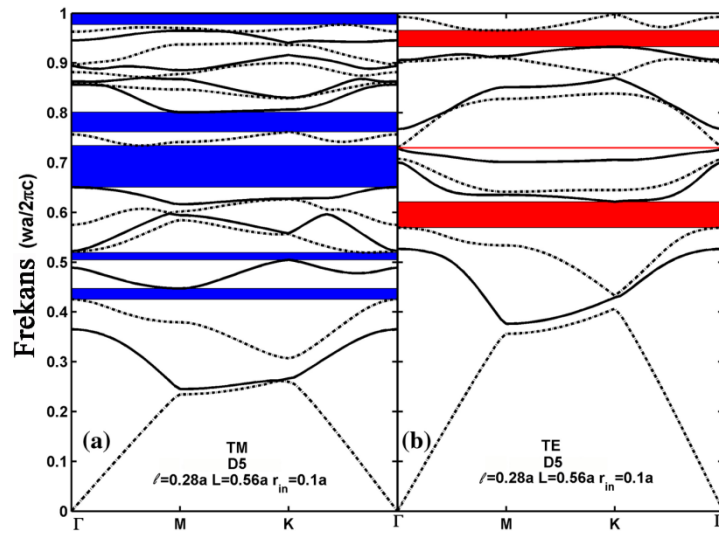
TM bandının frekansının artmasına yol açarak ilk TM FBA'nın genişliğini azaltmaktadır. Bunun yanında örgüde hava doluluk oranının artması TE FBA'yı genişleterek tam bant aralığını %5 genişliğe artırmıştır. 10. TE bandı ile 11. TE bandı arasındaki dejenereliğin kalkması üçüncü bir TE FBA oluşumuna izin vermiştir.

İkinci olarak, doluluk oranı aynı kalmak üzere üçgen alt örgü noktalarının merkezine $r=0.10a$ yarıçaplı dairesel delikler açılmıştır (Şekil 4.10.d). Böylelikle sonuçlardan doluluk oranının etkisi bertaraf edilmiştir. Dairesel veya altıgen delikli üçgen örgüde ve eliptik veya altıgen delikli grafit örgüde TBA artış göstermektedir (Susa vd. 2002, Rezaei vd. 2009). Önceki çalışmalarla uyumlu olarak şekil 4.12.c ve d'de görüldüğü üzere dairesel hava delikleri için TE FBA ve TBA oranı daha fazladır. $0.71(2\pi c/a)$ ve $0.75(2\pi c/a)$ frekansları arasında %5.7 genişlikte bir TBA oluşmaktadır. Çubuklar arasındaki hava oranı değişmediğinden D2 ve D3 yapılarına ait TE FBA'larda olduğu gibi ilk TE FBA'nın genişliği aynı kalmıştır.



Şekil 4.12.a. D3 yapısına ait TM kutuplu, b. TE kutuplu dağılım grafikleri, c. D4 yapısına ait TM kutuplu, d. TE kutuplu dağılım grafikleri

Son olarak üçgen örgü noktaları dairesel iç ve eliptik dış çeperli hibrit üçgen-grafit örgü yapısı olan D5 yapısı ($\gamma=2$, $f=0.4$) incelenmiştir. Bu durumda çubukların içyapı simetrisi korunmuş, dış yapı simetrisi bozulmuştur. TM FBA'ların küçük parçalara ayrıldığı görülmüştür. Çubukların arasındaki havanın azalması ilk TE FBA'yı azaltmış, ikincisini ise yok etmiştir (Şekil 4.13). Bu yapıda TBA yoktur. Örgü ile örgü noktalarının simetrisi aynı olmadığında FBA'nın azaldığı göz önünde bulundurulduğunda bu sonuç beklenilirdir (Wang vd. 2001).



Şekil 4.13.a. D5 yapısına ait TM kutuplu, b. TE kutuplu dağılım grafikleri

Hibrit üçgen-grafit örgünün bant yapısına ait temel özelliklerden biri TBA'nın genişliğini TE FBA'nın belirlemesidir. Diğer göze çarpan özellik ise ikinci TM FBA ve ikinci TE FBA alt sınırlarını oluşturan dokuzuncu TM bandı ve altıncı TE bantlarının yaklaşık $0.7(2\pi c/a)$ frekans değerinde geniş bir k-bölgesinde oldukça düz olmasıdır (Şekil 4.11.c, d ve şekil 4.12). Arka plan dielektrik yapıldığında bu düz bantlara rastlanmamıştır.

Bandın düzlüğünün ölçüsü olarak bandın neredeyse düz olduğu k-bölgesindeki maksimum ve minimum frekans noktaları arasındaki frekans farkı verilebilir. Bu bağlamda D2, D3 ve D4 yapıları karşılaştırıldığında en düz TM ve TE bantları önce D3, sonra D4 ve sonrasında da D5 yapısında mevcuttur. Özellikle D4 yapısında 9. TM bandı

ve 6. TE bandı geniş bir k-bölgesinde oldukça düzdür. Bu yapıda düz bantların $\lambda=1.55$ μm 'de ortalanması için yapının örgü sabiti 1 μm ve hava deliklerini çevreleyen halkaların genişliği 100 nm olarak ayarlanmalıdır.

D4 yapısı düz bantlar içeren D3 ve D5 yapılarına göre daha kolay üretilebilir olduğundan bu yapı için doluluk oranı değıştikçe bantların düzlüğünün değışimi incelenmiş ve çizelge 4.1'de sunulmuştur.

İçi dairesel delikli D4 yapısındaki hibrid üçgen-grafit örgünün doluluk oranı,

$$f = [2\pi r_g^2 + \pi(r_t^2 - r_{t,iç}^2)] / (\sqrt{3} / 2) \quad (4.1)$$

ile hesaplanabilir. 9. TM bandının ve 6. TE bandının düzlüğü çizelge 4.1'den görüldüğü gibi $f=0.2$ doluluk oranına kadar artmakta, sonrasında f arttıkça azalış göstermektedir. $f=0.2$ için fotonik kristal örgü, merkez frekans değęerlerinin yüksek olmasından ötürü sıkı paket yapısından uzak bir biçimde üretilebilir.

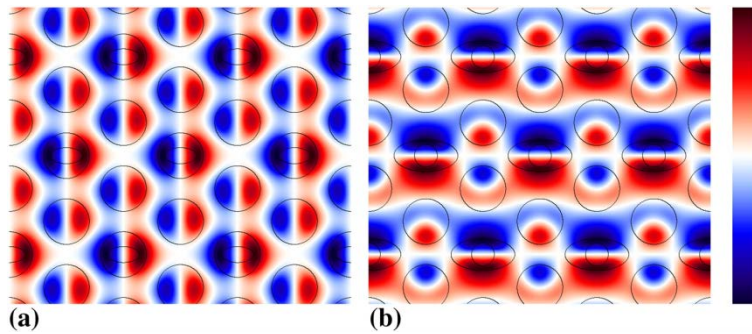
Çizelge 4.1 Γ -M-K- Γ boyunca düz 9. TM bandının ve M-K boyunca 6. TE bandının frekans genişliği ($\Delta\omega$) ve merkez frekansı (ω_c)

TM			TE		
f	$\Delta\omega(2\pi c/a)$	$\omega_c(2\pi c/a)$	f	$\Delta\omega(2\pi c/a)$	$\omega_c(2\pi c/a)$
0.1	0.0112	1.098	0.1	0.0322	1.083
0.2	0.0098	0.835	0.2	0.0092	0.837
0.3	0.0158	0.714	0.3	0.0204	0.718
0.4	0.0234	0.648	0.4	0.0191	0.649
0.5	0.0353	0.603	0.5	0.0342	0.598
0.6	0.0472	0.572	0.6	0.0529	0.561

D4 yapısı için bantların düzlüğü, üçgen örgü noktalarının iç çapının dış çapına oranının değişimine ($\delta=r_{iç}/r_{dış}$) göre de incelenmiştir. $0.5 \leq \delta \leq 0.7$ durumunda bantların oldukça düz olduğu saptanmıştır. D4 yapısında en düz TM ve TE bantları $f=0.2$, $\delta=0.6$ değerlerinde bulunmaktadır. TM için bu değerlerdeki bant aralığı $\Delta\omega=0.0055(2\pi c/a)$ ve TE için ise $0.0038(2\pi c/a)$ 'dır. Dalga boyu merkezi $1.55 \mu m$ olan bu düz bantlar için dielektrik çubukların yarıçapı $190 nm$ olmalıdır.

Fotonik kristal yapılarda çoğunlukla Brillouin bölgesi civarlarında bantlar düzdür. Bu çalışmada ise bantlar neredeyse tüm k-bölgesi boyunca düzlüğünü korumaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada önerilen örgü yapıları, kutuplanmadan bağımsız düz bantlarından ötürü optik kazancın geliştirilmesinde ve düşük eşikli lazer ışınımları elde edilmesinde kullanım alanları bulabilir.

Son olarak, D3 ve D5 yapılarının FBA'larının karşılaştırılması için Γ simetri noktasında 9. TM kipinin alan dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.14'den görüldüğü gibi D5 yapısında alan D3'e göre daha ziyade hava bölgesinde depolanmıştır. Bu sebeple D5 yapısı için 9. TM kipinin frekansı D3'e göre daha yüksektir. D3 yapısı için alan dağılımı düzgündür ve elektromanyetik dalgalar dairesel delikli çubukların çeperlerinden yapıcı girişim yaparak saçılmaktadır. Fakat D5 yapısında alanlar düzgün olmayan bir biçimde dağılmaktadır. Bu sebeple D5 yapısı için TM FBA dardır.



Şekil 4.14 Dokuzuncu TM kipinin Γ simetri noktasında
a. D3 yapısına ait, b. D5 yapısına ait manyetik alan dağılımı

Sonuç olarak, bu çalışmada simetrisi azaltılmış grafit fotonik kristal yapısında üçgen örgü noktalarına deliklerin eklenmesinin ve deliklerin iç ve dış çevresinin deforme

edilmesinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, öncelikle bu yapının bant haritası çıkartılmış ve çap değişimine karşı FBA'ların değişimi incelenmiştir. Seçilen doluluk ve çap oranı değerlerinde üçgen örgü noktalarına dairesel çubuklar, eliptik delikli dairesel çubuklar, dairesel delikli çubuklar ve dairesel delikli eliptik çubuklar yerleştirilmiştir ve bant yapısı özellikleri araştırılmıştır. Eliptik delikli dairesel çubuklu ve dairesel delikli çubuklu hibrit üçgen-grafit örgüde geniş bir k-bölgesinde ve doluluk oranlarında kutupluluktan bağımsız düz bantlar bulunmaktadır. Bu sebeple bu yapı optik kazanç artırımı ve düşük eşikli lazerleme uygulamaları için elverişlidir ¹ .

¹ Bu çalışma, SCI kapsamına giren uluslararası Optics Communations adlı dergide yayınlanmıştır. [Opt. Commun. 285 (2012) 1486-1493.]

5. FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZU TEMELLİ OPTİK ALETLER

Fotonik kristal dalga kılavuzlarının optik algılayıcı ve güç bölücü devre elemanları olarak kullanılmalarına yönelik iki farklı çalışma bu kısımda verilmiştir.

5.1 Fotonik Kristal Kırılma İndisi Algılayıcısı

5.1.1 Giriş

Sıcaklık, nem, basınç, kimyasal bileşim, oksitlenme gibi değişimlere karşı oldukça duyarlı olmalarından ötürü optik algılayıcılar zaman içinde oldukça önem kazanmıştır. Moleküllerin floresans veya radyoaktif olarak etiketlenmesi floresans boya, enzim veya radyoaktif maddeye ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden pahalıdır, etiketlenme işlemi zahmetlidir ve arkaplanda yüksek gürültü sinyali oluşmaktadır (Endo vd. 2005). Optik interferometreler, dalga kılavuzları, fiberler ve halka rezonatörler gibi çok farklı optik algılayıcılar geliştirilmiştir (Fan vd. 2008). Fakat fotonik kristaller küçük boyutlarından ve gelişmiş fabrikasyon tekniklerinden ötürü çip üzerine entegre edilmeye ve seri üretimde daha avantajlıdır. Fotonik kristaller keskin rezonans eğrilerine sahip oluşları, kutupluluğun ve spektrumlarının ayarlanabilir oluşu sebebiyle algılama bakımından güçlü bir platform teşkil etmektedirler (Frascella vd. 2013).

Çok sayıda grup farklı yapılarda fotonik kristal algılayıcılar geliştirmiştir (Fan vd. 2008). Genel itibariyle, fotonik kristal temelli kırılma indisi algılayıcıları, fotonik kristaller, fotonik kristal dalga kılavuzları ve FK kaviteler olmak üzere üç farklı yapısal grupta incelenebilir (Fan vd. 2008). FK kavite algılayıcıları daha fazla duyarlılığa ve daha küçük algılama alanına sahip olmakla birlikte fabrikasyon hatalarına karşı FKD algılayıcılar kadar duyarlı değildir.

Sıvı veya moleküllerin FKD'larda algılanması, molekülleri yüzeye tutundurarak veya dilim FK'ini veya FKD'nu sıvı içerisine daldırılarak ve/veya örgü delikleri sıvı ile doldurularak gerçekleştirilir (Kang vd. 2010). Tüm örgü deliklerinin doldurulması

yanında sadece elektromanyetik alan ile etkileşen delikler doldurularak da algılama yapılabilir. Bir FKD'nin kesilim dalga boyu, $k=0.5(2\pi/a)$ dalga vektörü değerinde FK içerisinde ışığın ilerleyebileceği en düşük veya en yüksek dalga boyudur. Kesilim dalga boyunda ışığın hızı yavaş olduğundan, dalga kılavuzu ve etrafındaki ortam değişikliklerine karşı yapı oldukça duyarlıdır (Rindorf vd. 2006). FKD yapısındaki deliklerin seçici olarak sıvı ile doldurulması ile kesilim dalga boyunun kayması kullanılarak bir algılayıcı tasarlanabilir.

Çalışmada ışığın kutupluluğu TE-çift olarak alınmıştır. Bant yapısı ve kip alan dağılımlarının belirlenmesinde MIT'nin fotonik bant paketi (MPB) (Johnson vd. 2008) ve iletim spektrumlarının alınmasında zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) kullanılmıştır. FDTD hesapları Ankara Üniversitesi 12B4343011 no'lu bilimsel araştırma projesi kapsamında temin edilen CrystalWave programında gerçekleştirilmiştir (CrystalWave, Photon Design). FDTD hesap alanında FKD'nin uzunluğu çizgi kusuru boyunca 16 delik olarak alınmıştır ve FK çevresi $2a$ (a , örgü sabiti) kalınlıklı mükemmel uyumlu tabaka ile çevrilmiştir. Dalga kılavuzunun başına geniş bant aralıklı bir Gaussyen ışık kaynağı yerleştirilmiş ve kılavuzun başına ve sonuna algılayıcılar yerleştirilerek normalize iletim spektrumu alınmıştır.

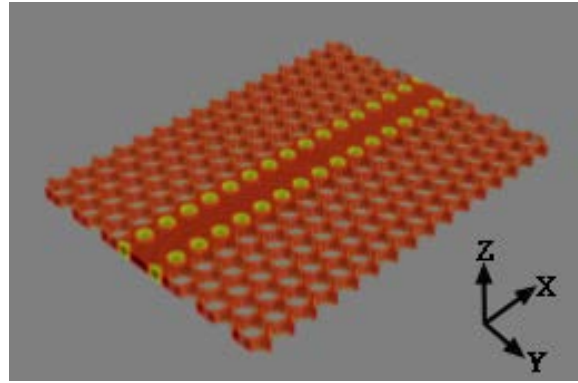
Kırılma indisi algılayıcısının performansı, duyarlılık parametresi, S ile belirlenmiştir. S kırılma indisi değişimi ile kesilim dalga boyundaki kayma olarak tanımlanmaktadır.

$$S = \frac{\partial \lambda}{\partial n} \quad (5.1)$$

Tüm FK hava deliklerinin suyla doldurulmasının algılama performansını, FK'i tamamen sıvı içine koymaktan daha fazla geliştirdiği belirlenmiştir (Buswell vd. 2008). Daha sonraki bir çalışmada, çizgi kusuru çevresindeki sadece ilk sıra delikleri sıvı ile doldurmanın duyarlılığı, tüm delikleri sıvı ile doldurmaktan daha fazla geliştirdiği saptanmıştır (Bougriou vd. 2011). Bu sonuçlar ışığında bu çalışmada FKD yapısında seçici doldurma ile algılama yapılmıştır.

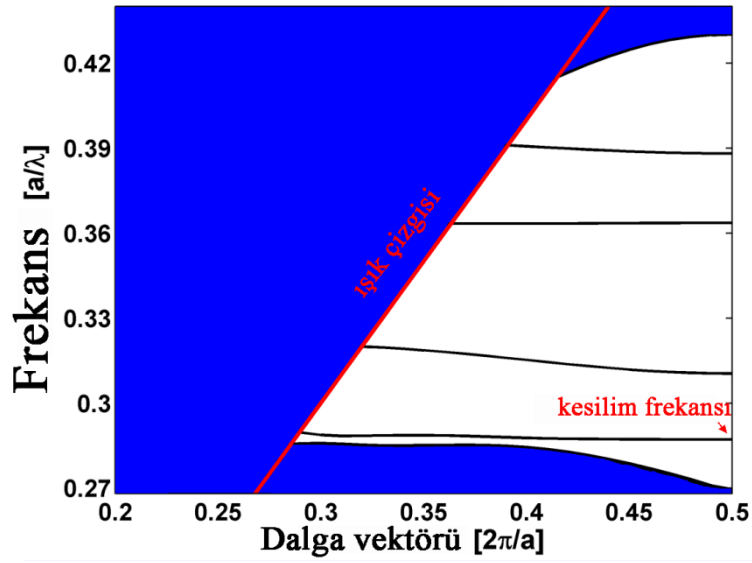
5.1.2 Fotonik kristal dalga kılavuzunun algılama karakteristiği

Kırılma indisi algılayıcısı tasarımı için üçgen örgülü ve $d=0.76a$ çaplı bir silisyum fotonik kristalde çizgi kusuru yaratılarak bir FKD oluşturulmuştur. FKD dilimin kalınlığı $0.6a$ olarak seçilmiştir. Havada asılı dilim FK'lerin alttaşlı FK'lere göre daha yüksek duyarlılıkta olduğu tespit edildiğinden FK dilimin üst ve altı hava olarak alınmıştır. Çalışılan FK dilim yapısı şekil 5.1'de verilmiştir. Sadece çizgi kusuru etrafındaki ilk sıra deliklerin doldurulduğunun vurgulanması için bu delikler sarı renkte gösterilmiştir.



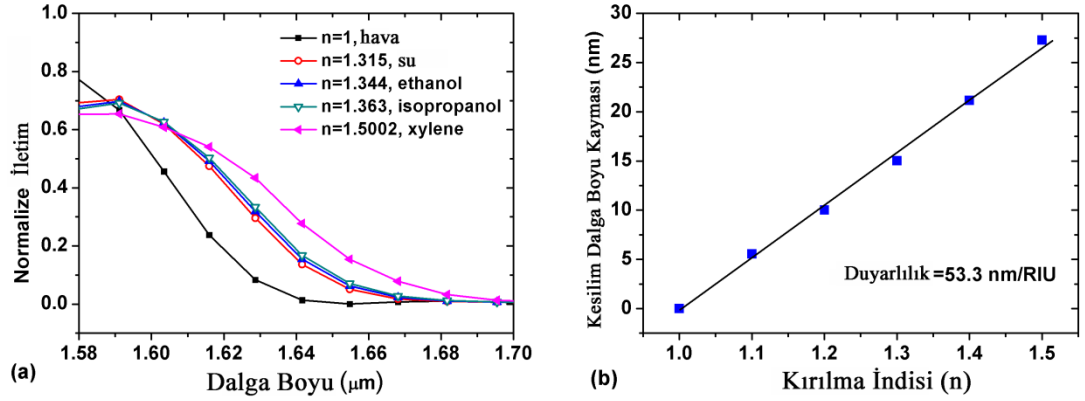
Şekil 5.1 Sadece ilk sıra delikleri sıvı ile doldurulmuş üçgen örgülü fotonik kristal dilim dalga kılavuzu

Bu FKD'nun bant yapısı şekil 5.2'de gösterilmiştir. Fotonik bant aralığı içerisinde dört kip bulunmaktadır ve $0.2865(a/\lambda)$ ve $0.31(a/\lambda)$ frekansları arasında FKD tek kiplidir.



Şekil 5.2 0.76a delik çaplı ve 0.6a kalınlıklı fotonik kristal dilim dalga kılavuzunun bant yapısı

Bu çalışmada delikler seçici olarak doldurularak su, etanol, isopropanol ve xylene sıvıları algılanmıştır. Şekil 5.3.a bu sıvılar için TE kipli iletim spektrumunu göstermektedir. Kesilim dalga boyunu 1.58 μm civarında ayarlamak için FK örgü sabiti 460 nm olarak alınmıştır. Kip kesilim dalga boyu olan 1.58 μm dalga boyundan daha yüksek dalga boylarında geçirgenlik düşüş göstermektedir. Kırılma indisi arttıkça iletim bandı daha yüksek dalga boylarına kaymaktadır. Bunun sebebi elektromanyetik alanın algıladığı ortalama kırılma indisinin artmasıdır. Şekil 5.3.b’de kırılma indisi değişimine karşı kesilim dalga boyunun kayması görülmektedir. Bu çalışmada kesilim dalga boyu değeri için standart olarak 0.3 normalize iletim değeri alınmıştır. Bu değerle okunan kesilim dalga boyu, kırılma indisinin 1’den 1.5’a artışı ile 27.28 nm kırmızıya kaymaktadır. Şekil 5.3.b’deki veri noktaları neredeyse doğrusal bir artış göstermektedir, bu doğrunun eğiminden duyarlılık 53.3 nm/RIU olarak hesaplanmıştır.

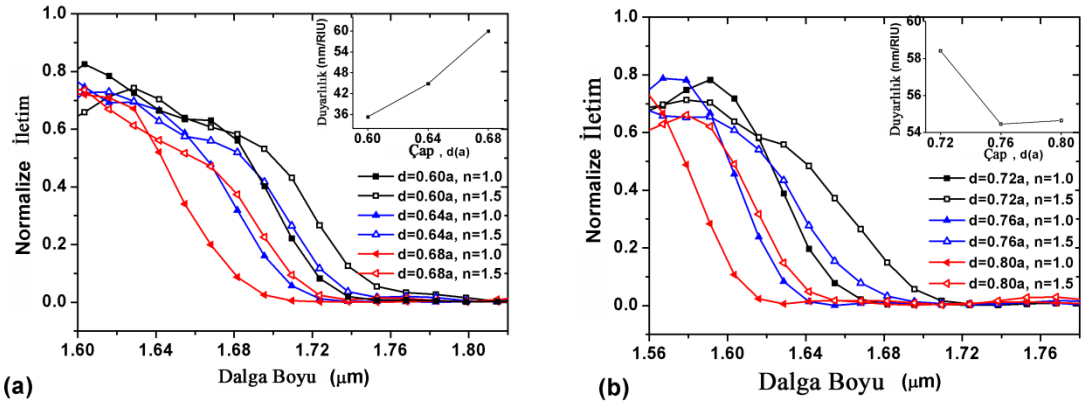


Şekil 5.3.a. Fotonik kristal dilim dalga kılavuzunun farklı sıvılar için geçirgenlik spektrumu, b. kesilim dalga boyundaki kaymanın kırılma indisi ile değişimi

5.1.3 İlk sıra delikleri farklı çapta fotonik kristal dalga kılavuzu ile algılama

Kılavuz bir kipi elektromanyetik alanı dalga kılavuzu merkezinde maksimumdur ve merkezden uzaklaştıkça azalmaktadır. Dolayısıyla çizgi kusuru çevresindeki ilk sıra delikler dağılımı karakteristiğini, ikinci ve üçüncü sıra deliklerden daha fazla etkilemektedir. Birinci sıra deliklerin yarıçapı tüm örgüden daha farklı seçilerek elektromanyetik alanın deliklerde daha fazla yerleşmesi sağlanabilir.

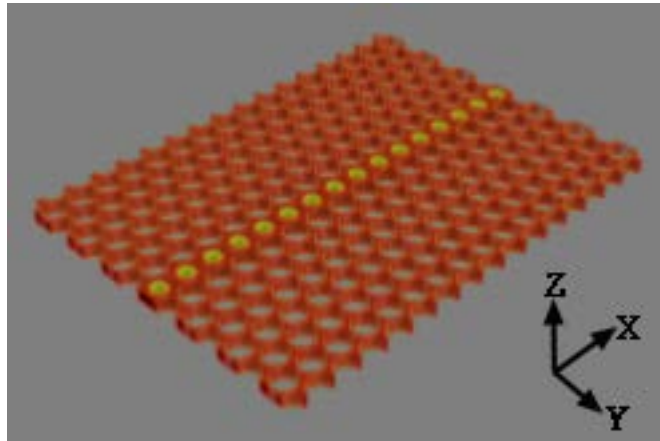
Şekil 5.4'de ilk sıra delikleri $d=0.60a$ ile $d=0.80a$ arasında çaplı FKD için iletim spektrumu verilmiştir. Kırılma indisi değişimine karşı kesilim dalga boyunun kayması doğrusal bir değişim verdiğinden farklı çaplı ilk sıra delikler için algılayıcı duyarlılığı $n=1$ ve $n=1.5$ 'teki kesilim dalga boyları ele alınarak belirlenmiştir. İlk sıra deliklerin çapı arttıkça kesilim dalga boyu daha yüksek dalga boylarına kaymıştır. Her bir çap değeri için duyarlılık değerleri hesaplanarak değişim şekil 5.4.a ve 5.4.b'nin içlerinde gösterilmiştir. Birinci sıra deliklerin çapı arttıkça duyarlılık $d=0.68a$ çapına kadar artmakta, sonrasında ise azalmakta ve doyuma ulaşmaktadır. En yüksek duyarlılık ilk sıra delikleri $0.68a$ çaplı olan FKD için gözlenmiştir.



Şekil 5.4.a. $d=0.60a$ - $0.68a$, b. $d=0.72a$ - $0.80a$ delik çapları için fotonik kristal dilim dalga kılavuzunun iletim spektrumları
Şekillerin iç kısımlarında delik çapı ile duyarlılığın değişimi gösterilmiştir.

5.1.4 Merkezdeki delikleri farklı çapta fotonik kristal dalga kılavuzu ile algılama

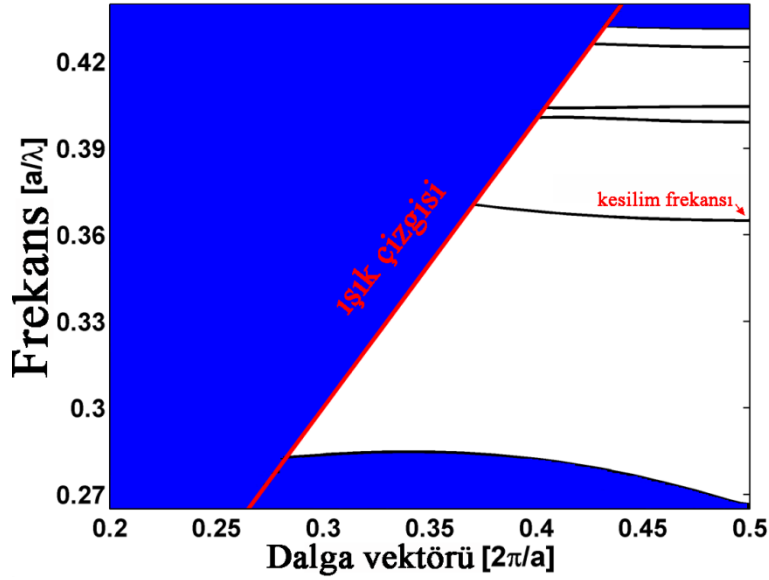
Elektromanyetik alanın en yoğun olduğu dalga kılavuzu kısmı kullanılarak algılayıcı duyarlılığı artırılabilir. Bu amaçla çizgi kusuru içerisine delikler açılarak sadece bu delikler sıvı ile doldurulmuştur (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Sadece merkezdeki delikleri doldurulmuş üçgen örgülü fotonik kristal dilim dalga kılavuzu

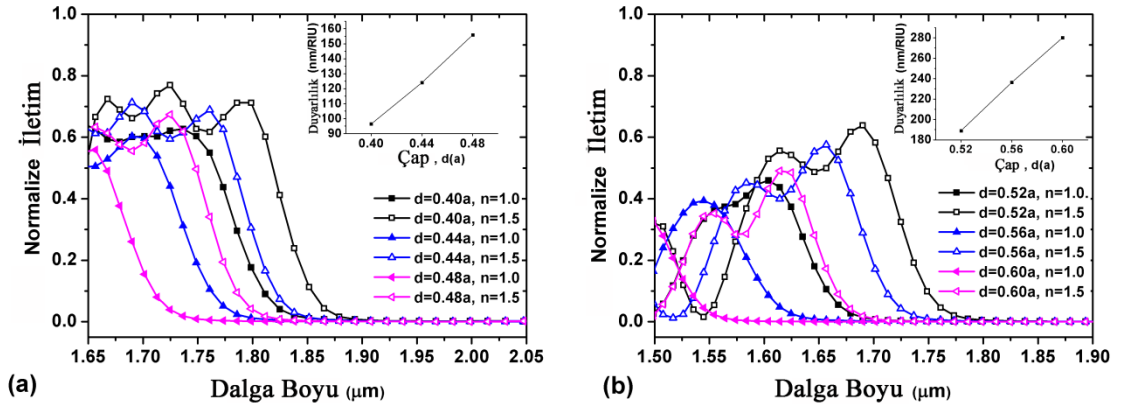
Şekil 5.6'da $d=0.76a$ çaplı üçgen örgü delikli ve merkezde $d=0.68a$ çaplı delikleri olan FK yapısının bant diyagramı verilmiştir. Fotonik bant aralığı içerisinde dört kılavuz bant yer almaktadır. Şekil 5.2 ile kıyaslandığında merkeze hava deliklerinin eklenmesi

ile temel kılavuz kipin daha yüksek frekanslara kaydığı görülmüştür. FKD $0.285(a/\lambda)$ ve $0.4(a/\lambda)$ frekansları arasında tek kiplidir.



Şekil 5.6 0.76a çaplı örgü noktalı, dalga kılavuzu içerisinde 0.60a çaplı delikleri olan ve 0.6a kalınlıklı bir dilim fotonik kristal dalga kılavuzunun bant yapısı

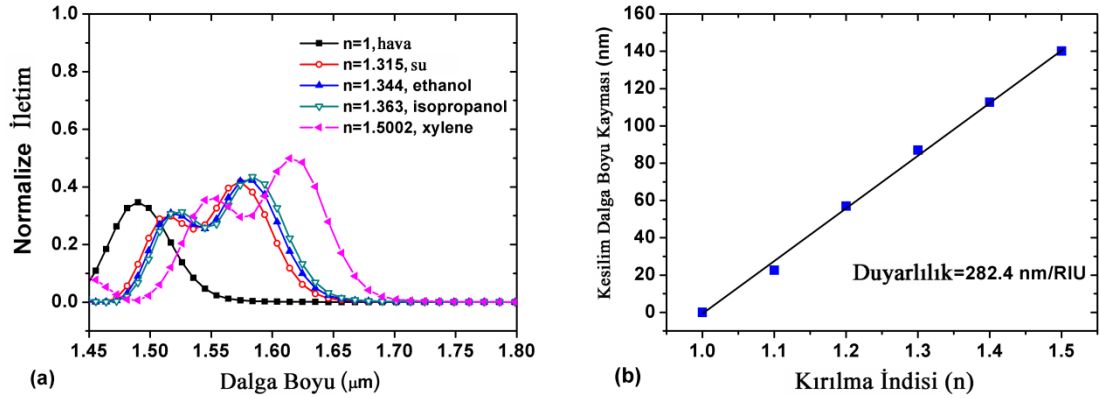
Çizgi kusuru içerisindeki deliklerin çapı $d=0.40a$ 'dan $0.60a$ 'ya kadar artırılmıştır. Farklı delik çaplarına karşı gelen iletim spektrumları şekil 5.7.a, b.'de gösterilmiştir. Minimum kesilim dalga boyunu $1.5 \mu\text{m}$ olarak ayarlayabilmek için örgü sabiti 560 nm olarak alınmıştır. Merkezi deliklerin çapı arttıkça ortalama kırılma indisi azaldığından dolayı kesilim dalga boyu daha küçük değerlere kaymaktadır. Buna ek olarak, $n=1$ ve $n=1.5$ kırılma indislerine karşı gelen kesilim dalga boyları arasındaki spektral mesafe artmaktadır. $d=0.40a$ çaplı merkez delikleri için 96.4 nm/RIU olan duyarlılık, merkezi deliklerin çapı arttıkça artmaktadır. Fakat sinyal gücü zayıflamaktadır. Bu yüzden merkezi deliklerin çapı $0.60a$ 'dan daha fazla artırılmamıştır.



Şekil 5.7 Farklı merkezi delik çapları için fotonik kristal dilim dalga kılavuzunun iletim spektrumları

Şekillerin iç kısımlarında delik çapı ile duyarlılığın değişimi gösterilmiştir.

Şekil 5.8.a $d=0.60a$ merkez delikli yapı için farklı sıvıların doldurulması ile oluşan iletim spektrumlarını göstermektedir. Sıvıların kırılma indisi arttıkça kesilim dalga boyu kırmızıya kaymaktadır. Bu kayma, şekil 5.8.b'den görüldüğü gibi kırılma indisi değişimi ile doğru orantılıdır. Doğrunun eğiminden duyarlılık $S=282.4$ nm/RIU olarak bulunmuştur. Bu değer incelenen yapılar arasında en yüksek duyarlılıktır.



Şekil 5.8.a. Dilim fotonik kristal dalga kılavuzunun farklı sıvılar için iletim spektrumu, b. kesilim dalga boyundaki kaymanın kırılma indisi ile değişimi

Duyarlılık merkezdeki delikler çizgi kusuru boyunca veya çizgi kusuruna dik kaydırarak da artırılmaya çalışılmıştır. Fakat merkezi deliklerin kaydırılmasının duyarlılığı azalttığı gözlenmiştir. Bu çalışmada FK dilimin tamamen sıvıya batırılması da ele alınmıştır.

Fakat bu durumda sinyal seviyesi ve duyarlılığın daha az ve geçirgenlik bandının daha dar olduğu gözlenmiştir.

5.1.5 Sonuç

Üç farklı dilim FK dalga kılavuzu yapısı tasarlanmış ve üç boyutlu düzlem dalga açılımı ve zaman bölgesinde sonlu farklı yöntemleriyle algılayıcının performansı incelenmiştir. Kesilim dalga boyu ile kırılma indisi değişimi arasında doğrusal bir ilişki olduğu saptanmıştır. İlk incelenen yapı olan W1 FKD, çizgi kusuru etrafındaki delikleri sıvı ile doldurulunca 53.3 nm/RIU algılayıcı duyarlılığına sahip olmaktadır. Birinci sıra deliklerin çapı optimize edildiğinde ise algılayıcı duyarlılığı 60.02 nm/RIU'ye yükselmektedir. Fakat, duyarlılıktaki dikkate değer artış merkeze deliklerin açılması ve sadece bu deliklerin doldurulması sonucu elde edilmiştir. Önceki bir çalışmada merkezde delikler olan bir FKD algılayıcı diyonize suya batırıldığında duyarlılık 120 nm/RIU olarak ölçülmüştür (Topolancik vd. 2003). Bu çalışmada ise sadece merkezdeki delikler doldurularak 282.4 nm/RIU duyarlılığa erişilmiştir. Bu sonuçlar sadece çizgi kusuru içerisine algılayıcı delikler açarak bunları doldurmanın daha tercih edilir olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu özel tasarım ve doldurma yöntemi daha yüksek duyarlılık için kırılma indisi algılayıcılarında kullanılabilir².

5.2 1x4 Fotonik Kristal Güç Bölücü

5.2.1 Giriş

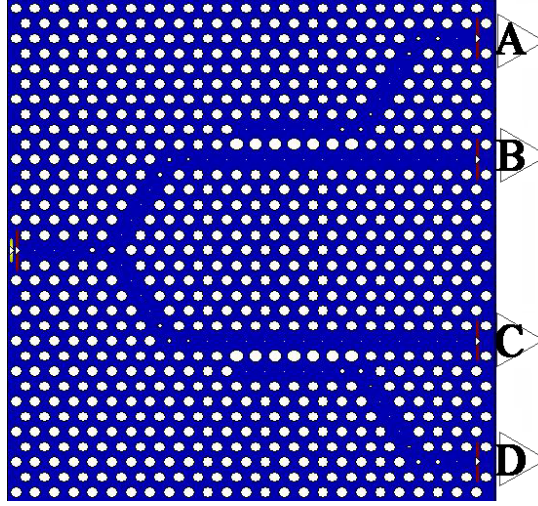
FK temelli optik aletlerin küçük boyutlara indirgenebilmesi için yapıda bükülmelerin oluşturulması kaçınılmazdır. Bükülmeler ile tek bir çip içerisine çok sayıda optik işlevsellik yerleştirilebilir. İdeal bir bükülme geniş bir bant aralığında yüksek geçirgenlik ve düşük dağınım göstermelidir. Optik entegre devrelerin temel yapı taşları olan optik güç bölücülerde bükülmeler kaçınılmazdır. İdeal bir $N \times$ güç bölücü giriş

² Bu çalışma, SCI kapsamına giren uluslararası Acta Physica Polonica A adlı dergide yayınlanmıştır. [Acta Phys Pol A 124 (2013) 50-55.]

gücünü neredeyse sıfır yansıma ile N sayıda eşit güce ayırmalıdır. Güç bölücü olarak Y-eklemler, T-eklemler veya yönlü bağlaştırmacılar kullanılabilir. İlkel örgü vektörlerinin yöneliminden ötürü T-eklemler genellikle kare örgülü FK'lerde, Y-eklemler ise üçgen örgülü FK'lerde kullanılmaktadır (Chung vd. 2003). Dielektrik çubuklu üçgen örgüde üç adet T-eklem birleştirilerek 1x4 güç bölücü FK tasarlanmıştır (Chung vd. 2003). Fakat T-eklemler ve Y-eklemlerin eklem bölgeleri geniş olduğu için çok sayıda kipi desteklemektedir ve kiplerin birbiriyle etkileşmesi kayba neden olmaktadır. Eklem yerlerine küçük delikler eklenerek kip sayısı azaltılabilir ve iletim verimliliği olabildiğince artırılabilir (Wilson vd. 2003). 1x4 güç bölücünün iletim bant genişliği giriş ve çıkış T-eklemleri arasına 0.07a yarıçaplı küçük delikler eklenerek artırılmıştır (Chung vd. 2003).

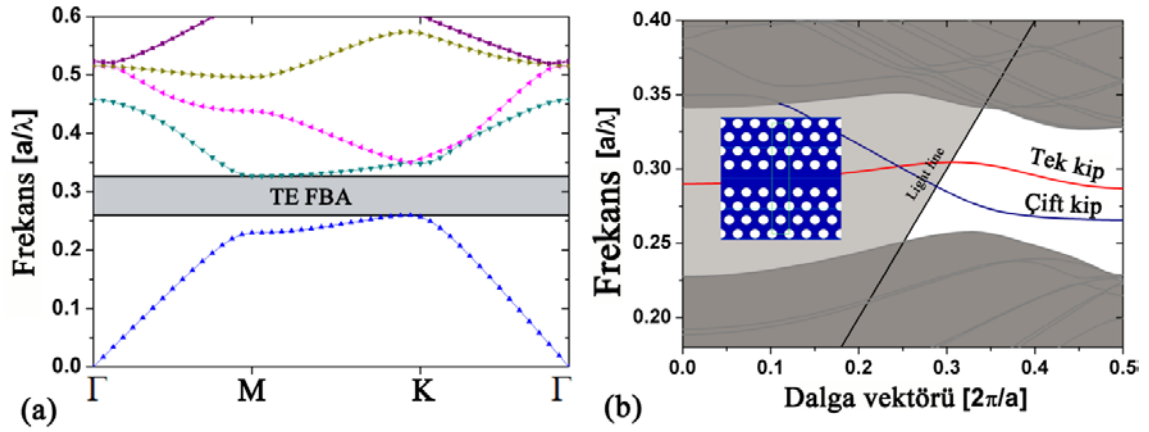
Yönlü bağlaştırmacılar birbirine paralel ve yakın mesafelerde iki dalga kılavuzundan oluşmaktadır. Her bir dalga kılavuzunun kipleri birbiriyle etkileşime girerek bağlaştık dalga kılavuzu sisteminin süper kiplerini oluşturmaktadır. Bir yönlü bağlaştırmacıda elektromanyetik dalgalar giriş dalga kılavuzundan çapraz dalga kılavuzuna ve sonrasında tekrar düz dalga kılavuzuna olmak üzere ilerlemektedir. Yönlü bağlaştırmacının uzunluğu uygun olarak ayarlandığında giriş dalga kılavuzundaki optik dalganın gücü eşit olarak düz ve çapraz dalga kılavuzlarına ayrıştırılabilir.

Bu çalışmada tasarlanan FK temelli güç bölücü şekil 5.9'da gösterilmektedir. Bölücü bir Y-eklemi ve yönlü bağlaştırmacıdan oluşmaktadır. FK yapı 220 nm kalınlıklı Si dilimde 0.30a yarıçaplı üçgen örgülü hava deliklerinden oluşmaktadır. Örgü sabiti, a 432.5 nm'dir. Havada asılı FK dilim yapısı FK bölgesinin altındaki altta seçici olarak aşındırılarak üretilebilir (O'Faolain 2006). Üç FKD 120° açıda kesiştirilerek Y-eklemi oluşturulmuştur. Y-eklemin girişe paralel kollarından bir sıra deliklerin çıkarılması ile yönlü bağlaştırmacılar oluşturulmuştur. Çıkış kapılarında çapraz girişimi azaltmak ve ışığı giriş doğrultusuna paralel olarak terk ettirmek için yönlü bağlaştırmacıların sonuna 60° eğimli FKD'lar yerleştirilmiştir.



Şekil 5.9 Tasarlanan 1x4 fotonik kristal güç bölücü

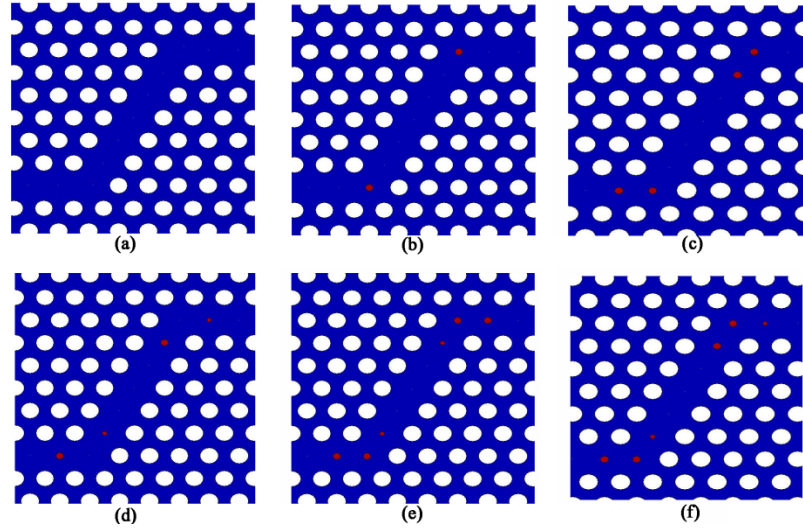
Üç boyutlu hesaplamalar etkin indis değeri 2.75 olarak alınarak iki boyutta gerçekleştirilmiştir. Bant diyagramları ve iletim spektrumları CrystalWave yazılım paketi kullanılarak belirlenmiştir. CrystalWave yazılım paketi bant diyagramlarının ve iletim spektrumlarının çıkartılmasında sırasıyla düzlem dalga açılımı yöntemi ve zamanda sonlu farklar yöntemini kullanmaktadır. Düzlem dalga açılımı yönteminde süper hücrenin kısa kenarı boyunca ızgara aralığı $a/16$, uzun kenarı boyunca ise $a/128$ olarak alınmıştır. Zamanda sonlu farklar yöntemi hesaplamalarında ızgara aralığı $a/32$, benzetim alanı çevresini kaplayan mükemmel uyumlu tabaka kalınlığı a kadar alınmıştır. FDTD benzetimlerinde girişe $1.55 \mu\text{m}$ merkezli, geniş bant aralığında Gaussyen bir ışık kaynağı yerleştirilmiştir. Çıkıştaki algılayıcılardan toplanan sinyal gücü referans algılayıcıdan alınan sinyal gücüne bölünerek iletim spektrumu 1'e boylandırılmıştır. Büküm yerlerindeki deliklerin çapının optimizasyonu CrystalWave Kallistos optimizasyon aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 60° bükülü dalga kılavuzlarının tasarımında eklenen bir deliğin yarıçapı, Y-eklemin optimizasyonunda eklenen iki deliğin yarıçapı bağımsız değişkenler olarak alınmıştır. Optimizasyon $1.5 \mu\text{m}$ ile $1.6 \mu\text{m}$ arasındaki dalga boyu aralığında yapılmıştır. TE kipleri ve $0.2584(a/\lambda)$ ile $0.3257(a/\lambda)$ arasında oluşan TE FBA şekil 5.10.a'da gösterilmiştir. Işık çizgisinin altında $0.265(a/\lambda)$ ile $0.288(a/\lambda)$ arasında yapı tek kiplidir. Yapıdan bir sıra deliklerin çıkarılmasıyla elde edilen dalga kılavuzu FBA'nın olduğu frekans aralığında bir çift, bir tek olmak üzere iki kip içermektedir. Şekil 5.10.b'de dalga kılavuzu yapısı için seçilen süper hücre de gösterilmiştir.



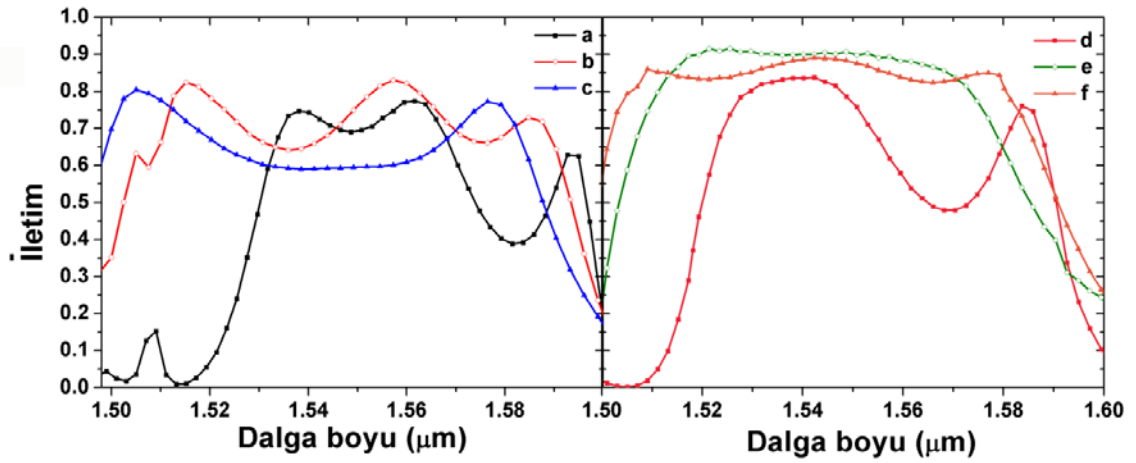
Şekil 5.10.a. 0.3a yarıçaplı ve 220 nm kalınlıklı üçgen örgülü FK'in band yapısı, b. FKD'nun dağılım grafiği

5.2.2 Ardışık 60° bükülmeli fotonik kristal dalga kılavuzunun optimizasyonu

İki ardışık 60° bükülmeli fotonik kristal yapısında bükülmenin olduğu bölgelere bir, iki veya üç adet delik açılarak en geniş bant aralığında en yüksek iletim elde edilmeye çalışılmıştır. İletim spektrumları bant aralığının bulunduğu 1.5µm ile 1.6µm arası 100 nm'lik spektral bölge için incelenmiştir. Farklı bükülme yapılarının karşılaştırılması için iletimin %70'in üzerinde olduğu bant genişliği esas alınmıştır. Standart ardışık 60° bükülmeli fotonik kristal yapısı ve bükülme bölgelerine bir, iki veya üç delik açılarak gerçekleştirilen optimize edilmiş 60°'li bükülmeli yapılar şekil 5.11'de gösterilmiştir. Bu yapıların her birine ait iletim spektrumları şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.11.a. Standart 60° bükülü FKD, b-f. bükülme bölgesindeki deliklerin yarıçapının optimizasyonu ile iletim verimi artırılmış bükülmeler



Şekil 5.12 Farklı 60° bükülü FKD yapıların iletim spektrumu

Standart ardışık 60° bükümlü FKD şekil 5.11.a’da gösterilmiştir. 1.535 μm ile 1.545 μm arası ve 1.552 μm ile 1.567 μm arası dalga boyu aralığında geçirgenlik %70’in üzerindedir (Şekil 5.12.a). En yüksek geçirgenlik 1.562 dalga boyunda %77.4 olarak bulunmuştur. Şekil 5.11’deki yapıların her birinde iki bükülme bölgesinde de simetrinin korunması için delikler özdeş olarak yerleştirilmiştir.

Bükülme bölgelerine birer delik eklenerek Kallistos optimizasyon aracına tek değişkenli optimizasyon yaptırılmıştır. Optimizasyonda çıkıştaki algılayıcıdan

alınan elektromanyetik akı değerinin girişteki referans algılayıcıya bölümüyle elde edilen net akı FDTD modülü aracılığıyla maksimize edilmektedir. Optimizasyona başlamadan önce en düşük yarıçap değeri $0.08a$, en yüksek yarıçap değeri $0.2a$ olarak alınmıştır. Optimizasyon başlangıç değeri $0.12a$ olarak belirlenmiştir. Global optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem tüm problem alanını küçük parçalara bölerek tüm optimum noktaları taramaktadır. Optimum noktanın hangi değer civarında olduğunun bilinmediği durumlarda bu yöntem kullanılmaktadır. Global yöntem en güvenilir yöntemdir, fakat yavaştır.

İlk olarak bükülme bölgesine tek delik yerleştirilmiştir ve optimum yarıçap $0.12a$ olarak bulunmuştur. İletim spektrumunun bant genişliğinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 5.12.b). Fakat iletim eğrisi düz değildir, dalgalanmalar içermektedir. Şekil 5.11.c’de Şekil 5.11.b’deki yapının sol tarafına bir delik eklenmiş ve optimum yarıçap $0.125a$ olarak bulunmuştur. Bu durumda $1.52\ \mu\text{m}$ ile $1.56\ \mu\text{m}$ arasındaki spektral aralıkta iletim %60’ın altına düşmüştür. Bükülmenin merkezindeki delik kaldırıldığında ve optimizasyon sonucunda bükülmenin sağ tarafına $0.08a$ yarıçaplı bir delik eklendiğinde ise iletim penceresi oldukça daralmıştır. Bunun yanında, iletim standart 60° bükülü dalga kılavuzunda olduğu gibi $1.57\ \mu\text{m}$ ’de düşmektedir. Bu durum bükülme bölgesine merkezi delik eklemenin önemine işaret etmektedir. Bu sebeple merkeze şekil 5.11.e’de görüldüğü gibi bir delik yerleştirilmiştir. Bu durumda $1.506\ \mu\text{m}$ ve $1.577\ \mu\text{m}$ arasındaki geniş bir aralıkta iletim %70’in üzerindedir. En yüksek iletim $1.52\ \mu\text{m}$ ’de %91 olarak bulunmuştur. Delikler şekil 5.11.f’de görüldüğü gibi aynı sırada yerleştirildiğinde ise iletim değerleri biraz azalarak iletim penceresi biraz genişlemiştir. En yüksek iletim $1.544\ \mu\text{m}$ ’de %88.9 olarak bulunmuştur. Bu tasarım daha geniş bir bant aralığında topoloji optimizasyonu yapılmış ardışık FK bükülmeden %14 daha fazla maksimum iletim değerine sahiptir (Badaoui vd. 2012).

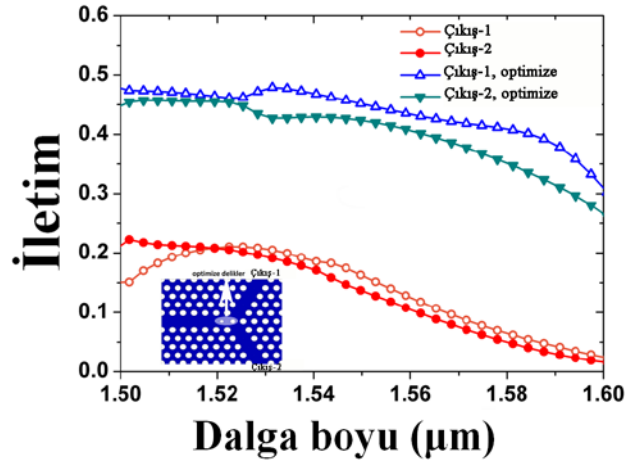
5.2.3 Fotonik kristal Y-eklemin optimizasyonu

Şekil 5.13’de Y-eklemin birinci ve ikinci çıkış noktalarındaki iletim spektrumu görülmektedir. Y-eklemlerin merkezine farklı yarıçapta iki delik eklenerek optik hacim

daraltılmış, elektromanyetik dalgaların daha yüksek dereceden kipleri uyarması önlenmiştir.

Y-bölücünün uçlarındaki iki deliğin yarıçapları iki serbestlik dereceli bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Optimizasyonda birinci ve ikinci çıkıştaki algılayıcıların elektrik akı değerleri toplamının referans algılayıcısının elektrik akı değerine bölüldüğü kullanıcı tanımlı bir komut dizisi yazılarak net akı değeri maksimize edilmiştir. Y-bölücünün ucundaki ilk hava deliğine ait yarıçap değerinin optimizasyonunda alt sınır değeri olarak 0.1a, üst sınır değeri olarak 0.2a ve başlangıç değeri 0.12a atanmıştır. Y-bölücüye biraz uzak olan diğer hava deliğinin optimizasyonunda ise yarıçap alt sınır değeri 0.03a, üst sınır değeri 0.15a olarak kabul edilmiş ve başlangıç değeri 0.09a olarak verilmiştir. Global optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

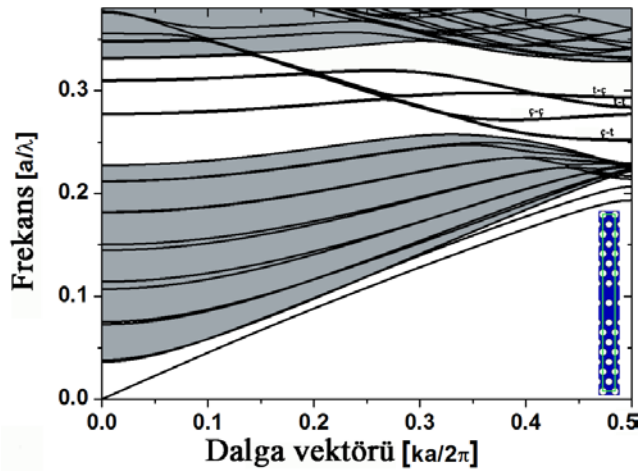
Optimize edilmiş yarıçap değerleri Y-eklemin en yakınındaki delik için 0.211a ve diğer delik için ise 0.1522a olarak belirlenmiştir. Şekil 5.13'ten görüldüğü gibi optimize edilmiş iletim iki kattan fazla artış göstermektedir. Çıkış-1 için en yüksek iletim $1.53 \mu\text{m}$ 'de 0.483, çıkış-2 içinse $1.52 \mu\text{m}$ 'de 0.46 olarak bulunmuştur. Bu çalışmadaki en yüksek iletim değerleri topoloji optimizasyonu yapılarak büküm yerlerindeki delikleri silinmiş ve bazı deliklerin çapları artırılmış Y-eklemin iletim değerlerinden daha yüksektir (Badaoui vd. 2012). Bu çalışmadaki iletim değerleri eklemin ucuna delikler açılarak 0.4 maksimum güç iletiminin elde edildiği (Mekis vd. 1996) çalışmasından da daha yüksektir.



Şekil 5.13 Standart ve optimize edilmiş Y-eklemin iletim spektrumu

5.2.4 Fotonik kristal yönlü bağdaştırıcının optimizasyonu

0.30a yarıçaplı bağlaşım deliklerine sahip fotonik kristal yönlü bağdaştırıcının bant diyagramı şekil 5.14’de verilmiştir. Çift ve tek kipin her biri yönlü bağdaştırıcıdan ötürü tek ve çift kiplere ayrılmaktadır. Çift-çift, çift-tek, tek-çift ve tek-tek kip profiline sahip kipler şekil 5.14’de sırasıyla ç-ç, ç-t, t-t ve t-t kısaltmalı olarak gösterilmiştir. Yönlü bağdaştırıcının bant yapısının belirlenmesinde seçilen süper hücre de şekil 5.14’ün içerisinde gösterilmiştir.

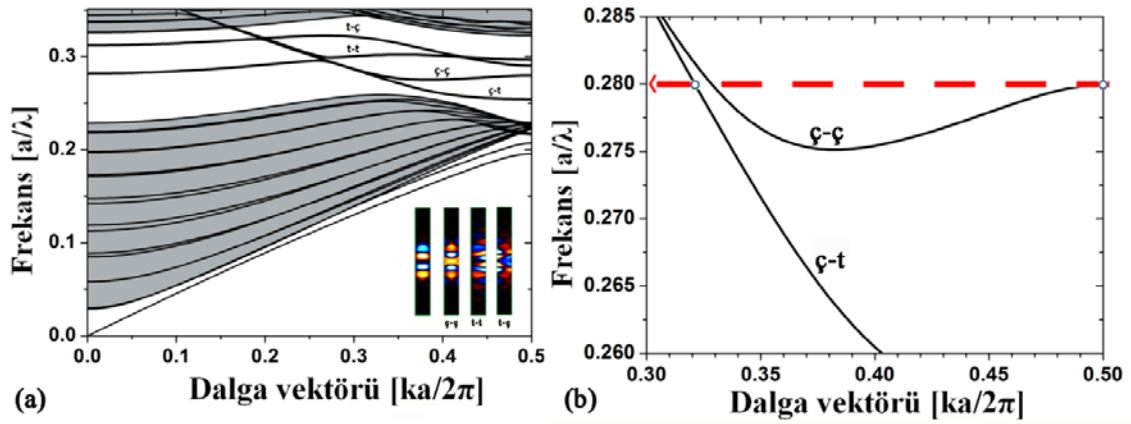


Şekil 5.14 0.30a bağdaştırıcı delikli yönlü bağdaştırıcının dağılım grafiği

Çalışmada ζ - ζ ve ζ - t kipleriyle ilgilenilmiştir. Bu kipler $0.324(2\pi/a)$ dalga vektöründe ve 1561.4 nm dalga boyunda ikiye yarılmaktadır. Bağlaştırmacı deliklerin yarıçapı artırılarak çalışma dalga boyu Y-eklem ve ardışık FK bükülmelerle uyumlu olacak şekilde biraz azaltılabilir. Şekil 5.15.a'da bağlaştırmacı delikler $0.34a$ 'ya çıkarıldığı durumdaki bant diyagramı gösterilmiştir. Şekil 5.15.b'de ise ζ - ζ ve ζ - t kiplerin ayrışması gösterilmiştir. Yönlü bağlaştırmacının frekansı $0.28(a/\lambda)$ olarak seçildiğinde $k_{\zeta\zeta}=0.3211(2\pi/a)$ ve $k_{\zeta t}=0.5(2\pi/a)$ değerlerini almaktadır. Bir yönlü bağlaştırmacıda gücün eşit olarak ikiye paylaştırılması için yönlü bağlaştırmacının uzunluğu,

$$L_C = (2m+1) \frac{\pi}{2|k_{even} - k_{odd}|} \quad m=1, 2, 3, .. \quad (5.2)$$

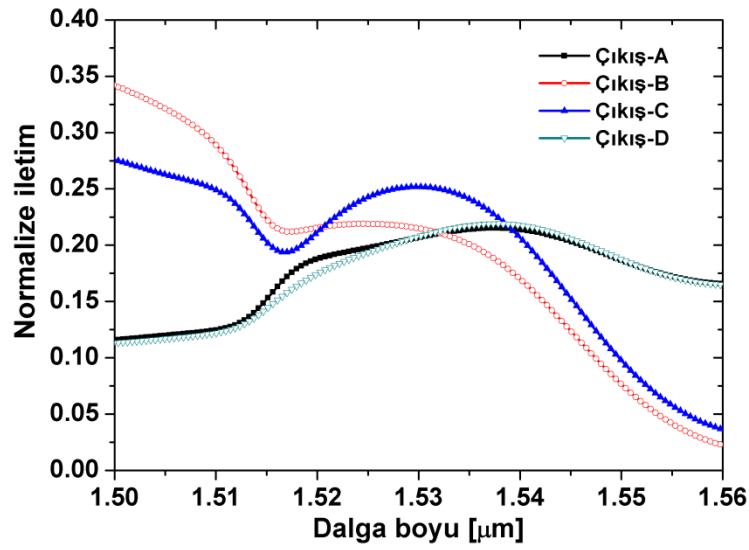
olmalıdır. Deklem (5.2)'den bağlaştırmacı uzunluğu $L_c=1.397a$ olarak hesaplanmıştır. Bağlaştırmadan sonra ani bir bükülme verimli olmadığı için L_c , 5 ile çarpılarak $6.985a$ olarak alınmıştır. Fotonik kristaller kesikli yapıya sahip olduklarından L_c uzunluğu $7a$ olarak yuvarlanmıştır. Bükülmelerden sonra yönlü bağlaştırmacılara geçmeden önce $3a$ kadar boşluk bırakılarak alanın durağan durumda ilerlemesi sağlanmıştır.



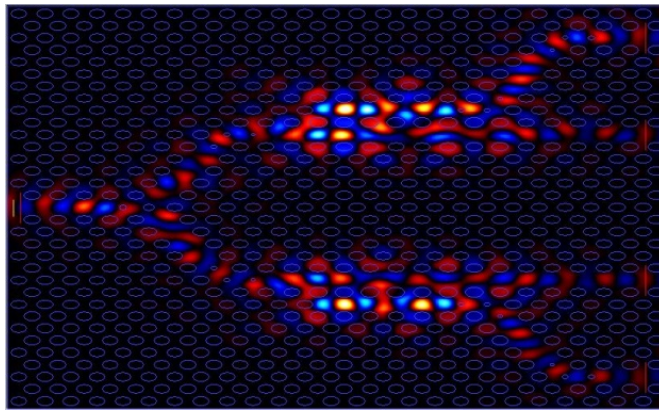
Şekil 5.15.a. $0.34a$ bağlaştırmacı delikli yönlü bağlaştırmacının dağıtım grafiği, b. ilgili ζ - ζ ve ζ - t kiplerinin ikiye ayrışması

1×4 güç bölücünün A, B,C ve D çıkışları için iletim spektrumu şekil 5.16'da verilmiştir. $1.532 \mu\text{m}$ dalga boyunda A, B, C ve D çıkışlarına ait iletim değerleri sırasıyla 0.211 , 0.211 , 0.251 ve 0.211 olarak bulunmuştur. Bu dalga boyunda iletim verimliliği

0.885'dir. 60° bükülmelerdeki kaçınılmaz yansılardan ve yönlü bağlaştırmacılarıdaki geriye yansılardan ötürü dalga boyu arttıkça A ve D çıkışlarında çıkış gücü artmakta, B ve C çıkışlarında ise azalmaktadır. $1.54 \mu\text{m}$ 'de en yüksek iletim 0.825'e düşmektedir. Bir FK Y-eklemi ve iki FK yönlü bağlaştırmacı kullanılarak tamamen yönlü bağlaştırmacı temelli 1×4 güç bölücüye göre (Ghaffari vd. 2008), dört çıkışta da daha yüksek iletim ve toplamda daha yüksek iletim verimliliği elde edilmiştir. Elektromagnetik alan şekil 5.17'de görüldüğü gibi A, B, C ve D çıkış kapılarına etkin bir biçimde iletilmektedir.



Şekil 5.16 1×4 güç bölücünün çıkış kapılarının iletim spektrumları



Şekil 5.17 $1.53 \mu\text{m}$ merkez dalga boylu ve 40 nm bant genişlikli TE kipindeki Gaussyen atmanın ilerleyişi

Kırmızı ve mavi renkler elektrik alanının pozitif ve negatif olduğu durumları göstermektedir.

5.2.5 Sonuç

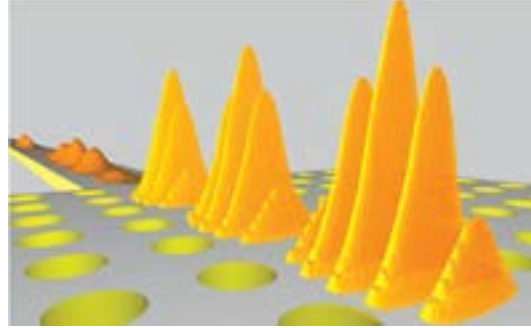
Üçgen örgülü fotonik kristal yapısında Y-eklem, yönlü bağlaştırmacı ve ardışık bükülmeler optimize edilerek optik haberleşme bölgesinde yüksek verimle çalışan fotonik kristal temelli bir 1x4 optik güç bölücü geliştirilmiştir ³ .

³ Bu çalışma, SCI kapsamına giren uluslararası Óptica Pura y Aplicada adlı dergide yayımlanmıştır. [Opt. Pura Apl. 46, 3 (2013) 265-272.]

6. FOTONİK KRİSTAL YAPILARDA IŞIĞIN HIZININ YAVAŞLATILMASI

6.1 Giriş

Fotonlar çoğu malzemelerle güçlü etkileşime girmediğinden doğrusal olmayan süreçler ancak güçlü lazerler ile uyarılabilmektedir. Bu durum büyük ve pahalı cihazların kullanılmasını gerektirmektedir. Işığın hızının azaltılması doğrusal olmayan optik etkileri artırmaktadır. Mikrometre çapında minyatür fotonik kristal dalga kılavuzları kullanılarak doğrusal olmayan süreçler geliştirilebilir. Şekil 6.1’de gösterildiği gibi optik atma yavaş ışık dalga kılavuzunda ilerlerken sıkışır ve enerji yoğunluğu artar (Baba 2008, Krauss 2008). Işığın hızının yavaşlatılmasının birçok avantajları vardır: Yavaş ışık, ışık-madde etkileşimlerini güçlendirmekte, etkileşimin spektral ve faz özelliklerinin daha etkin olarak kontrol edilebilmesine imkan tanımakta ve ışığı optik arabelleklerde ve gecikme hatlarında geciktirmeye veya geçici süreliğine depolamaya olanak sağlamaktadır. Yavaş ışık fotonik kristal dalga kılavuzları kullanılarak uyarılmış Raman saçılması kazancı 10^4 kat artırılmıştır (McMillan vd. 2006).



Şekil 6.1 Yavaş ışık rejiminde ışık şiddetinin artışının gösterimi

Bir ortamın fazı denklem (6.1) ile ifade edilir:

$$\phi(\omega) = k(\omega)L \quad (6.1)$$

Dalga vektörü $k(\omega)$ Taylor serisine açılırsa,

$$k(\omega) = k(\omega_0) + k'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}k''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + .. \quad (6.2)$$

Denklem 6.3’de ilk terim dalganın faz hızı, ikinci terim grup hızı, üçüncü terim grup hız dağılımı ile ilişkilidir.

Grup hızı denklem (6.3) ile ifade edilir:

$$g_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (6.3)$$

Grup hızı dalga cephesinin uzayda ilerleme hızıdır. Eğer dalganın ilerlediği ortam soğurmasız ise grup hızı enerji veya bilginin dalga boyunca iletilme hızı olarak da tanımlanabilir. Yavaş ışık grup hızı düşük olan ışıktır. ω -k dağılım eğrisinde bir bandın eğimi ne kadar azsa grup hızı o kadar düşüktür.

Grup indisi ışığın c hızından yavaşlama oranı olarak ifade edilir. Yavaş ışık birçok malzemede üretilebilir, fakat yararlı olabilmesi için yeterli bant genişliğine sahip olmalıdır.

$$n_G = \frac{c}{g_G} \quad (6.4)$$

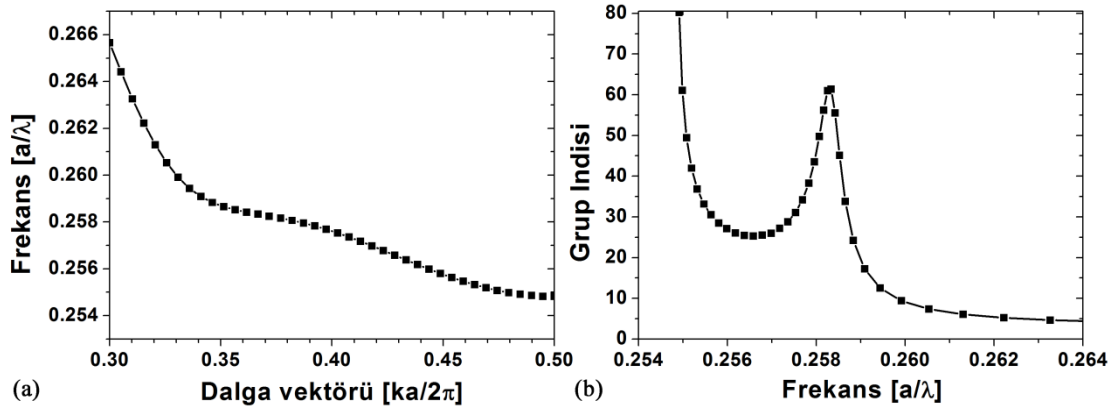
Optik paketler kendi hedeflerine varmadan önce birçok anahtardan geçerler. Eş zamanlı gelen optik paketlerin çakışmalarının önlenmesi için ağ noktalarında tutulmaları gereklidir. Bu amaçla optik veri elektriğe çevrilmekte, veya mekanik olarak ayarlanabilen gecikme hatları veya fiber gecikme hatları kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemler pratik değildir ve kapasiteleri sınırlıdır. Elektromanyetik indüklenme şeffaflığı ile çalışan optik tamponlar ise kayıba sahiptir ve bant genişliği-gecikme çarpanları düşüktür. Dolayısıyla bit oranları ve kapasiteleri zayıftır (Bowers vd. 2006).

Eğer bir sinyal veya atma birden fazla dalga boyu içeriyorsa, bu sinyalin dalga boyu bileşenlerinin her biri farklı grup hızlarında ilerleyecektir. Dolayısıyla bu bileşenler

alıcıya farklı zamanlarda ulaşacaktır. Bu durum atmanın genişlemesine yol açacaktır. Bu etki grup hız dağınımı (GVD) olarak adlandırılır ve (6.5) denklemi ile ifade edilir. GVD birimi ps/(nm-mm) ile verilir. Bu terim atmanın 1 mm yol aldığında 1 nm spektral bant genişliği başına ne kadar ps genişleyeceğini göstermektedir (Pollock vd. 1995).

$$D_{\lambda} = -2\pi c / \lambda^2 \times \partial^2 k / \partial \omega^2 \quad (6.5)$$

Fotonik kristaller oda sıcaklığında çalışmaları, grup indislerinin ve bant genişliklerinin ayarlanabilir olması ve dağınımdan bağımsız ilerleyebilme özelliklerinden ötürü yavaş ışık uygulamaları için oldukça tercih edilmektedir. Fotonik kristallerin bant eğrilerinin sınırlarında ışığın hızı düşüktür. Kiplerin Brillouin bölgesi sınırlarındaki bant kenarlarında bant eğrisi düzleşmektedir. Bir fotonik kristal dalga kılavuzunda kiplerin bant kenarlarında oluşan yavaş ışık dar bir bant genişliği bölgesinde sınırlıdır ve yüksek grup hızı dağınımı sergilemektedir (Baba vd. 2008, Krauss vd. 2007). FKD'larda bant kenarları yerine Brillouin bölgesinden daha uzakta olan dalga numaralarında düz bant bölgesi oluşturulursa grup hızı dağınımı miktarı ve ışıma kayıpları oldukça azaltılabilir. Şekil 6.2'de bir yavaş ışık fotonik kristal dalga kılavuzuna ait dağınım grafiği ve grup indisi eğrisinin frekansa bağlı grafiği örnek olarak gösterilmiştir. Eğer grup indisi belirli bir frekans aralığında sabit kalacak şekilde dağınım eğrisi değiştirilebilirse, bu frekans aralığında elektromanyetik dalga aynı grup indisini görerek ve grup indisi neredeyse sabit olduğundan düşük grup hızı dağınımı ile ilerletilebilir. Yavaş ışık FKD çalışmalarında grup hızı dağınımını azaltmanın yanında bandın düz olduğu frekans aralığını olabildiğince genişletmek amaçlanır. Bu amaçla dağınım mühendisliği yapılarak FKD tasarımında türlü değişikliklere gidilir.



Şekil 6.2.a. FKD'nın dağınım grafiği, b. grup indisi-frekans eğrisi

Bir FKD'da ışığın hızı çeşitli yollarla düşürülebilir. Bu yollara örnek olarak, W1 genişlikli FKD'nun çizgi genişliğinin değiştirilmesi (Notomi vd. 2001, Petrov vd. 2004, Settle vd. 2007), deliklerin yarıçaplarının değiştirilmesi (Frandsen vd. 2006, Kubo vd. 2007, Kurt vd. 2010, Wang vd. 2008), bütün örgü noktalarında (Saynatjoki vd. 2008) veya çizgi kusuru çevresindeki sadece ilk sırada (Dai 2009, Hou vd. 2009) veya ilk iki sırada halka şeklinde deliklerin kullanılması (Zhai vd. 2011) veya ilk veya ilk iki sıra deliklerin konumlarının yatay (Hao 2010), dikey (Li vd. 2008, Wu vd. 2010) veya her iki doğrultuda da (Liang 2011) çizgi kusuruna doğru/boyunca kaydırılması verilebilir.

FKD'larda indis-kılavuzlu ve bant-aralığı kılavuzlu kipler arasında içsel bir etkileşme bulunmaktadır (Natomy vd. 2001). Bu kipler arasındaki etkileşme dalga kılavuzu civarındaki yapının özelliklerine karşı oldukça duyarlıdır (Frandsen vd. 2006, Petrov vd. 2004). FKD'nun çizgi kusuru çevresindeki yapısal özellikleri değiştirilerek dağınım kontrol edilebilir ve etkileşme noktası kaydırılabilir. Böylelikle, Brillouin bölgesi sınırından uzakta yavaş ışık bölgesi elde edilebilir. Dağınım eğrisini ayarlamak için başvuru tüm yaklaşımlar geniş bir bant aralığında düşük grup hızı dağınımı ile sabit ve yüksek grup indisi elde etmeyi amaçlamaktadır. FKD'larda yavaş ışık elde etmek için en çok başvuru, pratik yollardan birisi çizgi kusuru etrafındaki deliklerin konumunu değiştirmektir. Bu tez kapsamında fotonik kristal dalga kılavuzlarında ışığın hızını azaltmak ve yapısal özellikler ile yavaş ışık parametreleri arasındaki ilişkiyi açığa çıkarmak için silika içerisine gömülü, halka şeklinde çubukları ve dairesel hava delikleri olan bir FKD yapısı önerilmiştir. İlk çalışmada, ilk sırası halka şeklinde olan çizgi

kusuru etrafındaki iki sıra delikleri, çizgi kusuruna dik yönde kaydırmanın yavaş ışık özelliklerine etkisi incelenmiştir. İkinci çalışmada ise çizgi kusuru çevresindeki deliklerin özellikleri değiştirilerek ve çizgi kusurunun genişliği sabit bırakılıp ikinci ve üçüncü sıra delikler çizgi kusuruna dik yönde kaydırılarak yavaş ışık mekanizması incelenmiştir.

6.2 Yavaş Işığı Tanımlayan Parametreler

Yavaş ışık özelliklerini tanımlayan bir takım ölçüler bulunmaktadır. Bunlardan biri normalize gecikme-bant genişliği çarpanı (NDBP)'dır ve denklem (6.6) ile tanımlıdır.

$$NDBP = \langle n_G \rangle \times \Delta\omega / \omega_0 \quad (6.6)$$

Denklem (6.7)'de denklem (6.4)'de tanımlanan grup indisi ortalama olarak verilmiştir. Ortalama grup indisi,

$$\langle n_G \rangle = \frac{\int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} n_G(\omega) d\omega}{\Delta\omega} \quad (6.7)$$

ile tanımlıdır. Bu tez kapsamındaki çalışmalarda literatürle uyumlu olarak (Frandsen vd. 2006, Li vd. 2008, Kurt vd. 2010) normalize bant genişliği $\Delta\omega$, yavaş ışık bölgesindeki grup indisinin minimum değerinin 10% değişimi olan dalga boyu aralığında alınmıştır.

Grup indis ve NDBP çarpanı değerleri yavaş ışık özelliklerini tanımlamak için yeterli değildir. Yüksek grup hızı dağılımı (GVD) etkileri atma ilerlerken sinyalde bozulmalara ve kayıplara yol açar. Bu sebeple tasarlanan yavaş ışık dalga kılavuzu düşük GVD göstermelidir.

Simetrik, mükemmel bir fotonik kristalde kılavuz kipler kayıpsız olsa da gerçekte bir miktar kayıp mutlaka vardır. Alt taştan kaynaklanan kayıpların yanında malzemenin soğurmasından veya fabrikasyon sırasında ortaya çıkan düzensizliklerden ışığın

saçılmasından ötürü de kayıp meydana gelir. Fabrikasyon hataları fotonik kristal dilimin öteleme simetrisinin ihlal olmasına ve dalga kılavuzu kiplerinin farklı “k” dalga vektöründeki kiplerle bağlaşmasına yol açar. Fabrikasyon hatalarından dolayı oluşan kayıp düzlem dışı kayıp ve düzlem üzerinde geri saçılma kaybı olarak ikiye ayrılabilir. İlk kayıp durumu grup indisi ile orantılı olarak artarken ikincisi grup indisinin karesiyle orantılı olarak artış gösterir. Dolayısıyla geri saçılma kayıpları bir yavaş ışık fotonik kristal dalga kılavuzunda daha kritik derecede önemlidir. Bunun yanında, her ne kadar orantı karesel de olsa geri saçılma kayıpları grup indisine o kadar katı bir şekilde bağlı değildir. Kipin profili de kayıpları önlemede son derece önemlidir. Uygun dalga kılavuzu tasarımı ile kip profili ayarlanarak komşu deliklerden saçılmanın geri saçılma katsayısına eş fazlı olmayarak eklenmesi sağlanabilir. Bu durum kaybın beklenildiği gibi grup indisinin tam olarak karesiyle değil daha düşük oranda değiştiği anlamına gelir (O’Faolain vd. 2010).

6.3 Yavaş Işık Fotonik Kristal Dalga Kılavuzlarının Modellenmesinde Süper Hücre Seçimi

Fotonik kristallerin dağınım ve yavaş ışık özelliklerinin tespitinde doğru tanımlanmamış süper hücre kullanımının etkileri ve sonuçları incelenmiştir.

6.3.1 Dağınım ve yavaş ışık özelliklerinin doğru tespiti için süper hücrenin doğru tanımlanmasının önemi

1987’de Yablonovitch ve John tarafından keşfedilmelerinin ardından fotonik kristaller üzerinde oldukça yoğun çalışmalar yürütülmektedir (John vd. 1987 ve Yablonovitch vd. 1987). Fotonik kristallerin optik alet uygulamaları genellikle fotonik kristal içerisinde kusur/kusurlar oluşturmayı gerektirmektedir. Fotonik kristallerde çizgi kusurları oluşturularak fotonik kristal dalga kılavuzları tasarlanabilir ve ışığa bir doğrultu boyunca yol aldırılabilir. Yerleşmiş kipler fotonik kristal içerisinde bu kusur boyunca ilerletilebilir. Kılavuz kiplerin dağınım özelliklerinin doğru bir biçimde belirlenmesi lazerlerin, optik filtrelerin, optik anahtarların, optik arabelleklerin geliştirilmesinde ve yavaş ışık uygulamalarında oldukça önemlidir.

Fotonik kristallerin bant yapılarının belirlenmesinde birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler içerisinde düzlem dalga açılımı (PWE) yöntemi bant yapılarının belirlenmesinde en çok tercih edilen, güvenilir ve pratik bir yöntemdir (Meade vd. 1993). İki veya üç boyutlu periyodik yapılarda kusur kiplerinin özelliklerinin belirlenmesinde süper hücreler kullanılmaktadır. Kusur iki veya üç boyutta kendini tekrarlayan süper hücrelerde belirli aralıklar boyunca tekrarlanmaktadır. Dolayısıyla süper hücrenin doğru tanımlanmasının bant yapısının doğru bir biçimde belirlenmesinde önemi büyüktür.

Fotonik kristal dilim yapılarda kalınlık doğrultusunda fotonik kristal periyodik değildir. Bu yapılarda kalınlık doğrultusunda süper hücre uzun tutularak süper hücre yaklaşımı yapılmaktadır. Fakat bu durum komşu süper hücrelerin birbiriyle etkileşmelerine neden olmakta ve bant yapısı içerisinde sahte kipler yaratmaktadır. Sahte kipler bant yapısından her bir kiplin enerji dağılımı farklı sayısal yöntemlerle incelenerek temizlenebilir (Jiang vd. 2012).

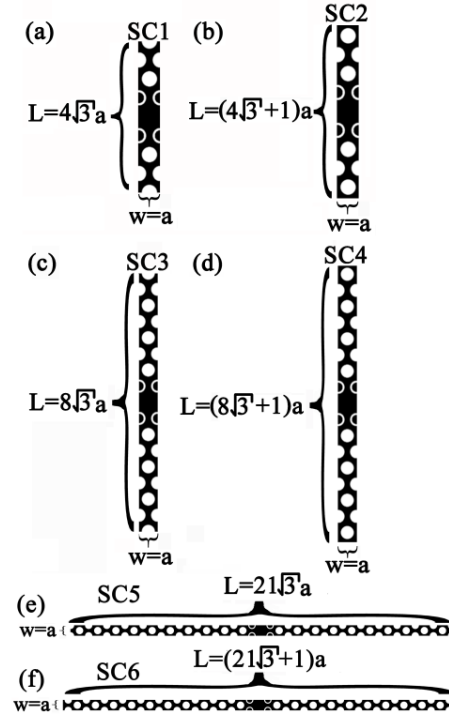
Nokta kusuru içeren iki boyuttaki fotonik kristallerde ise iki boyutta tanımlanan süper hücrenin en ve boyca geniş olması ($1a \times 1a$ 'dan daha geniş) bant yapısı içerisinde fazladan kiplerin oluşmasına neden olmaktadır. Fakat bu gereksiz kipler sahte kipler değildir, bandın katlanmasından dolayı oluşan gerçekte de var olan kiplerdir (Jiang vd. 2012).

Bu tez çalışması kapsamında literatürdeki bu iki çalışmadan farklı olarak iki boyutta fotonik kristal dalga kılavuzu (FKD) yapılarında da süper hücrenin üst ve alt kısımlarının doğru biçimde sonlandırılmamasının fotonik bant aralığı içerisinde sahte, fazladan kiplerin oluşmasına yol açtığı saptanmıştır. Fakat bu fazladan kiplerin kaynağı bandın katlanması veya süper hücreler arasındaki etkileşmeden kaynaklı değildir. Bu durum süper hücrenin üst ve alt kenarlarında yeni dalga kılavuzlarının oluşmasından ötürüdür. Periyodikliğin bozulmasından dolayı bu fazladan kiplerin alanı bu dalga kılavuzlarında depolanmaktadır. Çok ilginçtir ki literatürde doğru olarak tanımlanmamış görünen süper hücreli fotonik kristal dalga kılavuzu ile birçok bant yapısı hesaplamalarına rastlanmıştır (Frandsen vd. 2006, Hou vd. 2009, Liang vd. 2011, Lotfi

vd. 2012, Ma vd. 2008 ve Shen vd. 2011). Süper hücreyi yanlış olarak tanımlamanın sonuçları iyi bilinmemektedir ve çalışmalarımız bu durumun yavaş ışık özelliklerinin yanlış belirlenmesine yol açtığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla süper hücrenin oluşturulması daha fazla dikkat gerektirmektedir.

6.3.2 Fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı

Bu çalışmada silikon içerisinde $r=0.35a$ hava delikli fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı kullanılmıştır. Dalga kılavuzu bir sıra delikler kaldırılarak oluşturulmuş ve çizgi kusuru çevresindeki ilk sıra delikler kılavuzun yavaş ışık özellikleri göstermesi için $r_{dış}=0.35a$ dış ve $r=0.25a$ iç yarıçaplı olarak halka şeklinde tasarlanmıştır. Bu çalışmadaki bant yapıları MIT'nin geliştirdiği fotonik kristal bant yapıları paketi olan MPB kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Johnson vd. 2001). Grup indisleri MPB'nin tanımlı fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Süper hücrenin ızgara aralığı $a/64$ olarak alınmıştır. Bu çalışmada süper hücreyi doğru sonlandırmanın, çizgi kusuru çevresinde tanımlanan deliklerin sıra sayısının ve çözünürlüğün etkisi altı farklı fotonik kristal yapısı ele alınarak incelenmiştir. Şekil 6.3.a'da tanımlanan ilk süper hücre olan SC1 $4\sqrt{3}a$ uzunluğundadır ve çizgi kusuru etrafında dört sıra bulunmaktadır. İkinci SC2 tasarımı ise çizgi kusuru çevresinde dört sıra bulunmakla beraber delikler tam bırakılacak şekilde süper hücre sonlandırılmıştır (Şekil 6.3.b). Daha uzun olan SC3 yapısı $8\sqrt{3}a$ uzunluğundadır ve çizgi kusuru etrafında sekiz sıra bulunmaktadır (Şekil 6.3.c). Benzer biçimde SC4 yapısında çizgi kusuru çevresinde sekiz sıra bulunmaktadır ve delikler tam olacak şekilde süper hücre sonludur (Şekil 6.3.d). Sonsuz uzunlukta bir FK'nin doğru yaklaştırmasının ve karşılaştırmasının yapılabilmesi için çizgi kusuru etrafında on sıra olan SC5 ve SC6 süper hücre yapıları da ele alınmıştır (Şekil 6.3.e ve f).

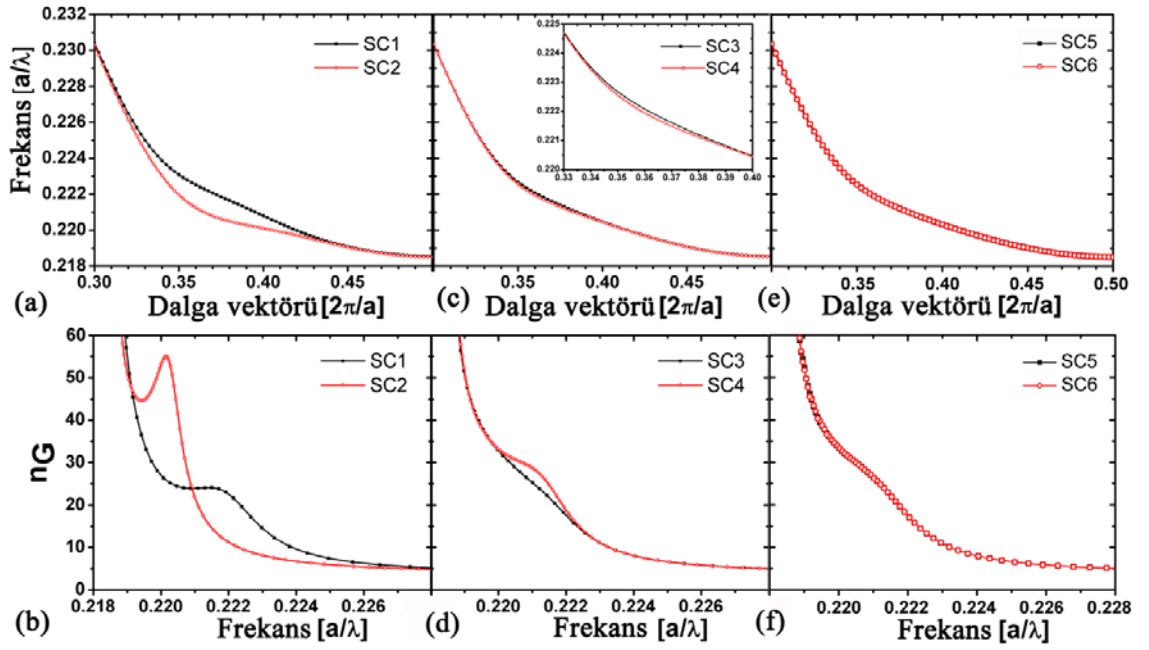


Şekil 6.3 İncelenen üçgen örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı

a.ve c.'deki süper hücrelerde delikler kenarlarda yarım olacak biçimde, b. ve d.'deki süper hücrelerde ise delikler tam olacak biçimde sonlandırılmıştır.

6.3.3 Süper hücrenin sonlandırılmasının etkisi

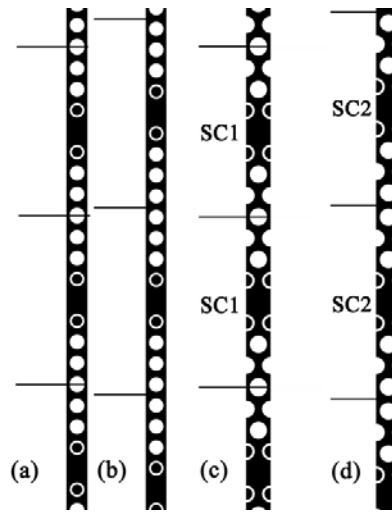
Şekil 6.4'de temel kılavuz çift kipin SC1 ve SC2 FKD yapıları için dağıtım grafikleri gösterilmektedir. İndis kılavuzlu kip ile bant aralığı kılavuzlu kip arasındaki kesişme noktası civarında iki SC'nin dağıtım grafikleri değişim göstermektedir. SC2'nin frekansı $0.36[2\pi/a]$ dalga vektörü civarında daha azdır. SC2'nin dielektrik oranı daha fazla olduğundan frekansının bu bölgede daha düşük olması beklenilirdir. Frekansın azalması eğimi azaltmaktadır. Dolayısıyla SC2 için grup indisinin minimum değeri SC1 için olanın neredeyse iki katı kadar daha fazladır. Bunun yanında SC1 için grup indisi - frekans eğrisi basamak şeklinde iken SC2 için U şeklindedir ve bant aralığı daha dardır. Ayrıca grup indisi-frekans eğrisi U-şeklinde olduğundan grup hız dağıtımını daha yüksektir.



Şekil 6.4 Çizgi kusuru etrafında dört sıra delikli fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının (SC1 ve SC2) a. dağıtım, b. grup indisi-frekans grafikleri; çizgi kusuru etrafında sekiz sıra delikli fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının (SC3 ve SC4), c. dağıtım ve d. grup indisi-frekans grafikleri, e. çizgi kusuru etrafında on sıra delikli fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının (SC5 ve SC6) e. dağıtım ve f. grup indisi-frekans grafikleri

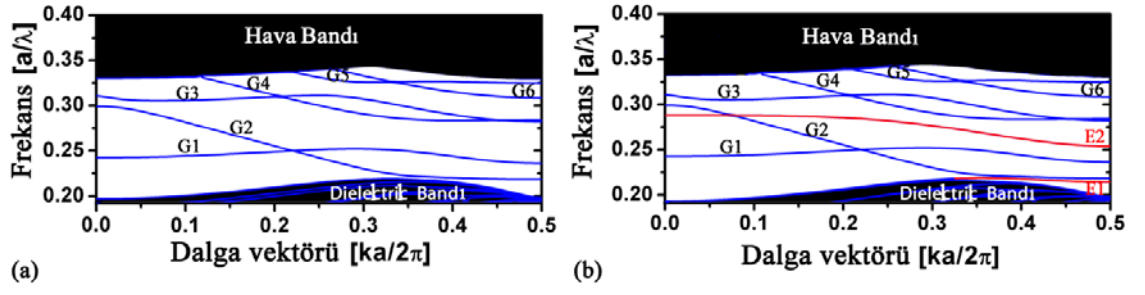
Şekil 6.4.c ve d SC3 ve SC4 yapıları için temel kılavuz çift kipin dağıtım özelliklerini göstermektedir. Çizgi kusuru etrafındaki saçıcıların sayısı sekize artırıldığında SC3 ve SC4'ün dağıtım kipleri arasındaki farklılık azalmıştır. Fakat yine de bu az farklılık bandın türevi olan grup indisi karakteristiklerinde daha fazla değişime yol açmaktadır. SC3 için eğri omuz şeklinde iken SC4 için biraz daha içeridedir. SC'lerin üst ve alt kısımlarını tam delikler ile sonlandırmanın daha yüksek grup indisi değerlerine yol açtığı tespit edilmiştir. SC2 ve SC4'ün grup indisi değerlerindeki farklılık SC1 ve SC3'den daha fazladır. SC1 ve SC5 süper hücre yapılarının grup indisi-frekans grafikleri SC6 süper hücre yapısına daha yakındır. Şekil 6.4.f'deki oldukça uzun SC yapısına ait dağıtım ve grup indisi grafikleri baz alındığında süper hücresinde delikleri tam bırakılmış FK'lerin grup indislerindeki farklılık SC'nin doğru tanımlanmadığının bir göstergesidir.

Literatürde süper hücrenin yanlış sonlandırılması olarak süper hücrenin kenarlarındaki deliklerin tam olarak bırakılması durumuna rastlanmıştır. Bu durum kare örgülü FGD için şekil 6.5.b’den görüldüğü gibi periyodikliği bozmamaktadır. Fakat SC’nin tam deliklerle sonlandırılması şekil 6.5.d’den görüldüğü gibi periyodikliği bozmaktadır. Bu yapıda W1 dalga kılavuzu yanında sıfır kalınlıklı fazlardan iki dalga kılavuzu bulunmaktadır. Bu çalışmada sadece delikleri tam olarak sonlandırmak ele alınmış olsa da hatalı SC sonlandırılması ve etkileri periyodikliğin bozulduğu farklı tüm SC sonlandırmaları için geçerlidir.



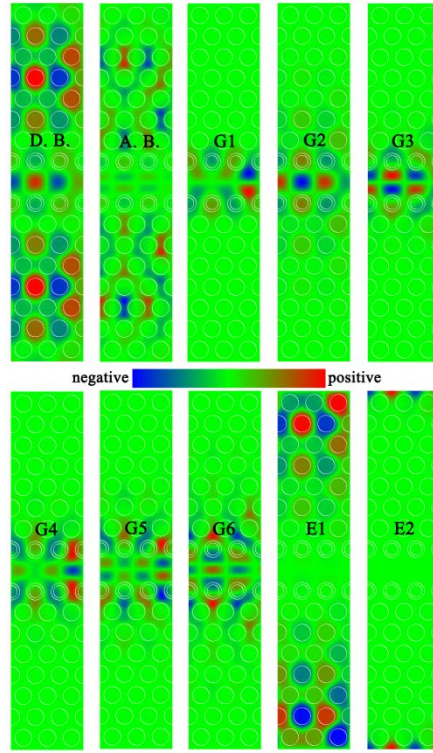
Şekil 6.5.a. SC1’in dalga kılavuzuna dik doğrultuda kendini tekrarlaması, b. SC2’nin dalga kılavuzuna dik doğrultuda kendini tekrarlaması

Fotonik bant aralığındaki kılavuz kiplerin hatalı SC sonlandırılmasından nasıl etkilendiği çizgi kusuru çevresinde sekiz sıralı SC yapısı ele alınarak incelenmiştir. Şekil 6.6.a SC3, şekil 6.6.b SC4 yapılarına ait dağıtım grafikleridir. Şekil 6.6’da G harfi ile belirtilen kılavuz kiplerin frekansları hemen hemen aynı olmasına rağmen şekil 6.6.b’den görüldüğü gibi SC4 yapısına ait bant diyagramında E1 ve E2 harfleri ile gösterilen iki fazlıdan kip bulunmaktadır. Bu kiplerin gerçekten var olup olmadığı elektrik alan dağılımı incelenerek saptanmıştır.



Şekil 6.6.a. SC3 ve b. SC4 süper hücreli, çizgi kusuru çevresinde sekiz sıra saçılı fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının fotonik bant diyagramı

Şekil 6.7’de şekil 6.6’da gösterilen kılavuz kipler (G1-G6), sürekli kipler (dielektrik bandı ve hava bandı) ve sahte kiplere ait $k=0.40[2\pi/a]$ noktasındaki alan dağılımı grafikleri verilmiştir. Kılavuz kiplerin alan dağılımı çizgi kusuru çevresinde depolanırken şekil 6.6.b’de E1 ve E2 ile gösterilen kiplerin alan dağılımları gariptir. Hava ve dielektrik bandına ait sürekli kiplerin alanı tüm örgü içerisine dağılmıştır. Fakat E1 ve E2, alan dağılımı itibariyle ne sürekli kiplere ne de kılavuz kiplere benzemektedir. Bu kipler süper hücrenin üst ve alt kenarlarında oluşan iki W0 dalga kılavuzundan kaynaklanan gerçek kiplerdir. Eğer süper hücre uzunluğu yeterince uzun alınırsa bant yapısından bu fazlalık kipler atılarak doğru bant yapısı elde edilebilir.

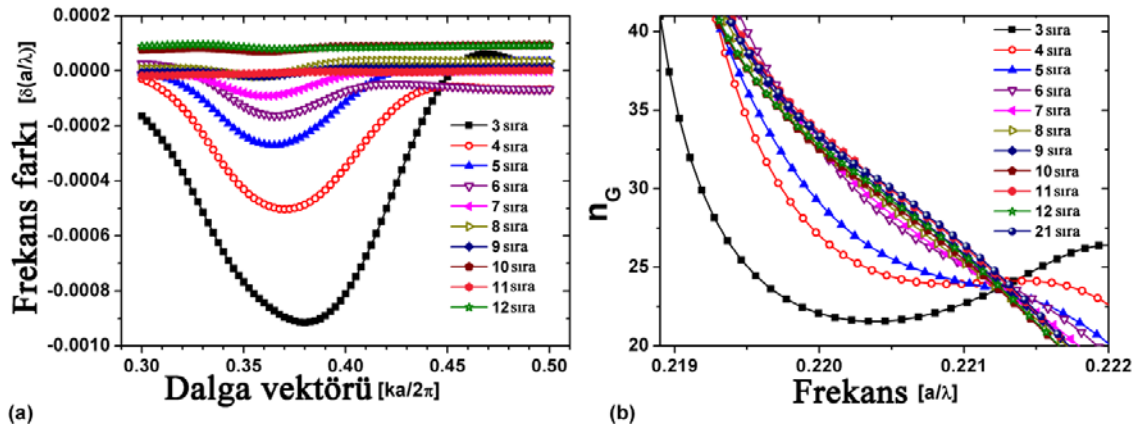


Şekil 6.7 Kılavuz kiplerin (G1-G6), dielektrik bandın (D.B.) üst ve hava bandının (A.B.) alt noktasındaki sürekli kiplerin ve sahte kiplerin ($k=0.40[2\pi/a]$ 'daki manyetik alan dağılımları

6.3.4 Süper hücrede çizgi kusuru çevresindeki sıra sayısının etkisi

Süper hücrenin sonlandırılmasının yanında çizgi kusuru etrafındaki sıraların sayısı da SC'nin tanımlanmasında önemli bir etkidir. Şekil 6.8.a'da farklı sıra saçıcı süper hücreli yapıdaki FKD'lara ait temel kılavuz kipin frekanslarının 21 sıra süper hücreli FKD'nun kılavuz kipinin frekansına göre farklı dalga vektörüne karşı gösterilmiştir. Şekilden oldukça açık olduğu gibi çizgi kusuru etrafında 3 sıra olan SC'de hata oldukça fazladır. Hata dip noktanın olduğu $0.38(2\pi/a)$ dalga numarasında maksimumdur. Sıra sayısı arttıkça frekans farkı azalmaktadır. Bu dip kısım kılavuz kiplerin yavaş ışık bölgesine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla SC'nin doğru tanımlanması yavaş ışık çalışmalarında daha çok önem kazanmaktadır.

Şekil 6.8.b’de şekil 6.8.a’da dağınım eğrileri verilen yapıların grup indisi-frekans grafikleri gösterilmektedir. Üç sıra saçıcı SC’li yapının dağınım eğrisi $k=0.37[2\pi/a]$ civarında U-şeklinde grup indisi-frekans eğrisi oluşturmaktadır. Çizgi kusuru çevresindeki sıra saçıcıların artırılması grup indisi-frekans eğrilerini U-şeklinden basamak şekline ve sonrasında da omuz şekline dönüştürmektedir. Çizgi kusuru çevresindeki sıra sayısı beşten fazla olduğunda, grup indisi-frekans eğrileri birbirine oldukça yaklaşmıştır. Örneğin $\omega=0.220(a/\lambda)$ frekans değerinde dört ve beş sıra saçıcı SC’lerin grup indisi değerlerinde %10 farklılık varken çizgi kusuru çevresinde sekiz veya dokuz sıra delik olduğunda farklılık sadece %4’dür. Çizgi kusuru etrafında altıdan fazla sıra olduğunda grup indisi eğrileri yakınsamaktadır. Bu sonuçlar PWE yönteminde kullanılan SC yapıların yeterli sayıda sıra sayılı delik/çubuk içermesi gerektiğini göstermektedir.



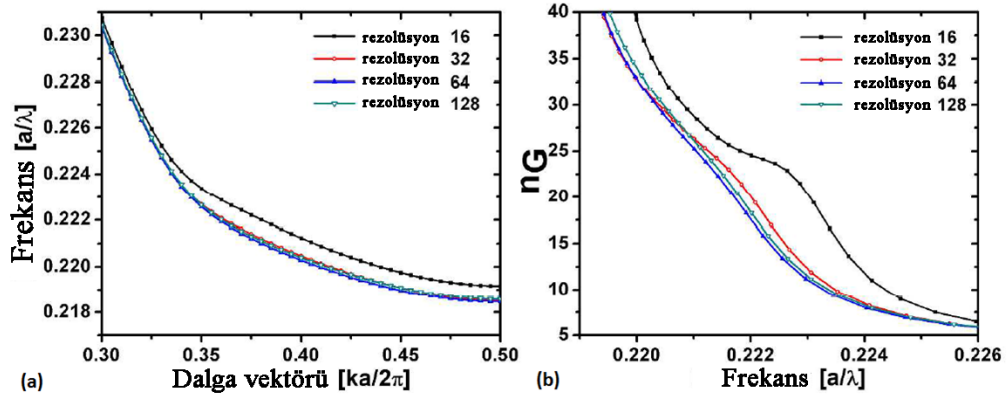
Şekil 6.8 Çizgi kusuru etrafındaki sıra saçıcıların sayısı artırılırken SC3 süper hücreli FKD’daki temel çift kılavuz kip

a. Dağınım ve b. grup indisi-frekans grafiklerinin değişimi

6.3.5 Süper hücrenin ızgara aralığının etkisi

Dağınım ve grup indisi frekans eğrilerinin MPB benzetim programındaki bir birim hücrenin ızgara aralığı (çözünürlüğü) ile nasıl değiştiği de incelenmiştir (Şekil 6.9). Süper hücrenin kısa kenarında çözünürlük 16 alınarak uzun kenarı boyunca olan çözünürlük 16’dan 128’e kadar değiştirilmiştir. 16x16 ızgara aralığının dağınım ve grup indisi-frekans eğrileri daha yüksek rezolüsyonlu olanlardan oldukça farklıdır.

Çözünürlük 16'dan 32'ye artırıldığında yakınsama oldukça artmaktadır. Fakat yine de dağınım eğrisindeki çok ufak farklılıklar grup indisi eğrilerinde daha fazla değişime yol açmaktadır. Çözünürlük 32'den 64'e artırıldığında grup indisi eğrisindeki ufak omuzun genişliği azalmaktadır. Sonuçlar dağınım ve yavaş ışık özelliklerinin doğru belirlenmesi için çözünürlüğün en az 16x32 alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 6.9 Izgara genişliği 16x16'dan 128x128'e artırılırken SC3 süper hücreli FKD'daki temel çift kılavuz kip
a. Dağınım ve b. grup indisi-frekans eğrileri

6.3.6 Sonuç

Süper hücrenin doğru sonlandırılmamasının, yeterince uzun olmayan süper hücre kullanılmasının ve çözünürlüğün düzlem dalga açılımı yöntemi ile dağınım ve yavaş ışık özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiştir. Süper hücreyi tam delikler ile sonlandırmak ardışık süper hücreler arasındaki periyodikliği bozmakta ve daha yavaş, fakat doğru olmayan dağınım kiplerinin oluşmasına yol açmaktadır. SC uzunluğu arttıkça SC'nin doğru sonlandırılmamasından kaynaklı farklılık azalsa da hata ancak çok uzun SC'ler için yok olmaktadır. Buna ek olarak, yanlış SC yapılar fotonik bant aralığı içerisinde fazladan kılavuz kiplerinin var olmasına yol açmaktadır. Kılavuz kiplerinin alan dağılımları incelenerek fazladan olan kipler bant diyagramından çıkartılabilir. Bu çalışmada literatürde en çok karşılaşılan dielektrik içinde üçgen hava delikli örgü ele alınmış olsa da etkiler ve sonuçlar farklı örgü yapısındaki FK'ler, FK dilimler ve hava içerisinde dielektrik çubuklu yapılar için de geçerli olacaktır.

Periyodikliğin korunup korunmadığı ve SC uzunluğu arttıkça yavaş ışık özelliklerinin yakınsayıp yakınsamadığı kontrol edilmelidir. Süper hücrenin doğru seçilmemesinin etkileri azımsanmamalı ve PWE yönteminde süper hücre tanımına daha fazla dikkat gösterilmelidir⁴.

6.4 Çizgi Kusuru Çevresindeki Deliklerin Kaydırılması ile Işığın Hızının Yavaşlatılması

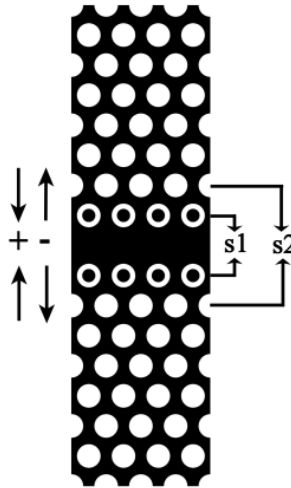
6.4.1 Giriş

Havada asılı bir W1 FKD'nın ilk iki sıra delikleri çizgi kusuruna doğru sistematik olarak kaydırılmış ve geniş bir grup indisi aralığında neredeyse sabit grup indisi-bant genişliği çarpanı değerleri elde edilmiştir (Li vd. 2008). Tez kapsamındaki bu çalışmada silika içerisine gömülü ve ilk sıra delikleri halka şeklinde tasarlanmış fotonik kristal yapısı için benzer sonuçlar aranmıştır. Çalışmada Li vd. (2008)'den farklı olarak ilk sıra delikler çizgi kusuru W1 dalga kılavuzundan daha dar olacak şekilde kaydırılmıştır. Delikleri kaydırmak deliklerin çapını değiştirmeye göre fabrikasyon açısından daha kontrol edilebilirdir (Li vd. 2008). Buna ek olarak, halka şeklinde delikler, kırılma indisi algılama özellikleri daha gelişmiş olduğundan tercih edilirdir (Saynatjoki 2008). Silika içine gömülü FKD'ları CMOS teknolojisine uyumludur, mekanik olarak sağlamdır, çevresel kirlenmelerden etkilenmemektedir ve elektronik bileşenlerle tek bir çip üzerine kolayca entegre edilebilir (Li vd. 2008). Optik anahtar, optik kipleyici gibi optik aletlerin tasarımında silika içine gömülü FKD yapılar sıkça tercih edilmektedir. Bu çalışmada, çizgi kusuru çevresindeki ilk veya ikinci sıra deliklerin konumu ayrı ayrı veya birlikte değiştirilerek yavaş ışık özelliklerinin kontrol mekanizması araştırılmıştır. İlk veya ikinci sıra delikleri kaydırmanın grup indisi-frekans eğrilerine etkileri farklıdır ve bu bulgular daha düz bantlar oluşturmada kullanılabilir.

⁴ Bu çalışma, SCI kapsamındaki Optik dergisinde yayımlanmıştır.
[Optik 124, 21 (2013) 4739-4743.]

6.4.2 Dalga kılavuzu tasarımı ve modellenmesi

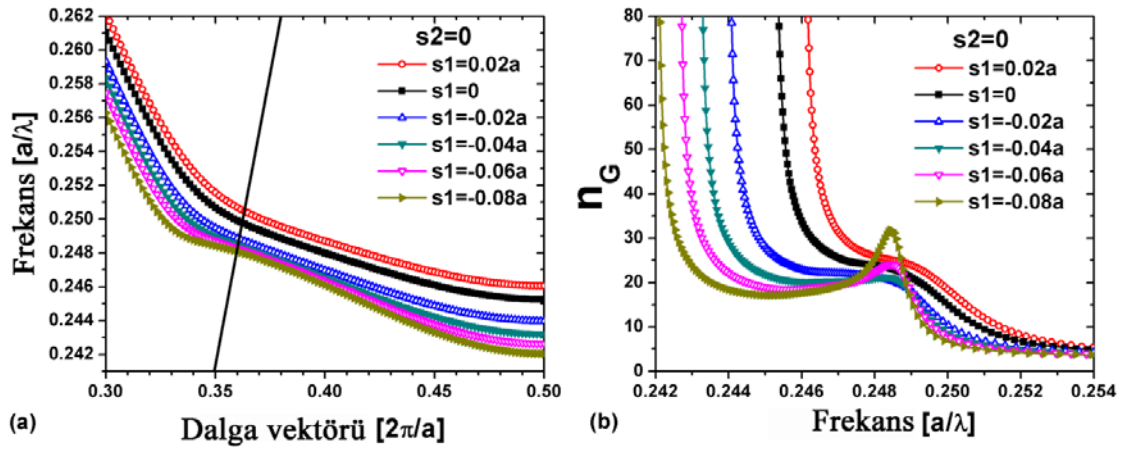
Bu çalışmada üst ve altı silika tabakalı silikon dilim fotonik kristal yapısı önerilmiştir. Şekil 6.10'da gösterildiği gibi çizgi kusuru çevresindeki ilk sıra delikler dış yarıçapı $0.34a$ ve iç yarıçapı $0.19a$ olacak biçimde halka şeklinde tasarlanmıştır. Arka plandaki deliklerin yarıçapı ise $0.34a$ 'dır. İlk sıra deliklerin kaydırılması “s1”, ikinci sıra deliklerin kaydırılması “s2” ile gösterilmiştir. Çizgi kusurunun merkezine doğru kaydırmalar “+” alınmış, merkezden dışa doğru olan kaydırmalar ise “-” işareti ile gösterilmiştir. S1 $0.02a$ 'dan $-0.08a$ 'ya kadar s2 ise $-0.02a$ 'dan $0.08a$ 'ya kadar kaydırılmıştır. Dar çizgi genişliği saçılma ile oluşan kaybı artırdığından ilk sıra delikler çizgi kusuruna maksimum $0.02a$ kadar yaklaştırılmıştır. Yapıya etkin biçimde bağlaştırmamanın sağlanabilmesi için TE- çift kipleri ile ilgilenilmiştir. TE kılavuz kiplerin dağılım özellikleri MPB yazılım programı kullanılarak saptanmıştır (Johnson vd. 2001). Üç boyuttaki hesaplamalar etkin kırılma indisi 2.98 olarak atanarak iki boyutta hesaplamalarla gerçekleştirilmiştir (Qui 2002). PWE hesaplamalarında süper hücrenin büyüklüğü $ax17a$ olarak alınmıştır. Atmanın zaman bölgesindeki şekli analiz edilerek PWE yöntemi ile bulunan grup indisi değeri zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi hesaplamaları (Oskooi 2010) ile tasdiklenmiştir.



Şekil 6.10 Fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının şematik resmi

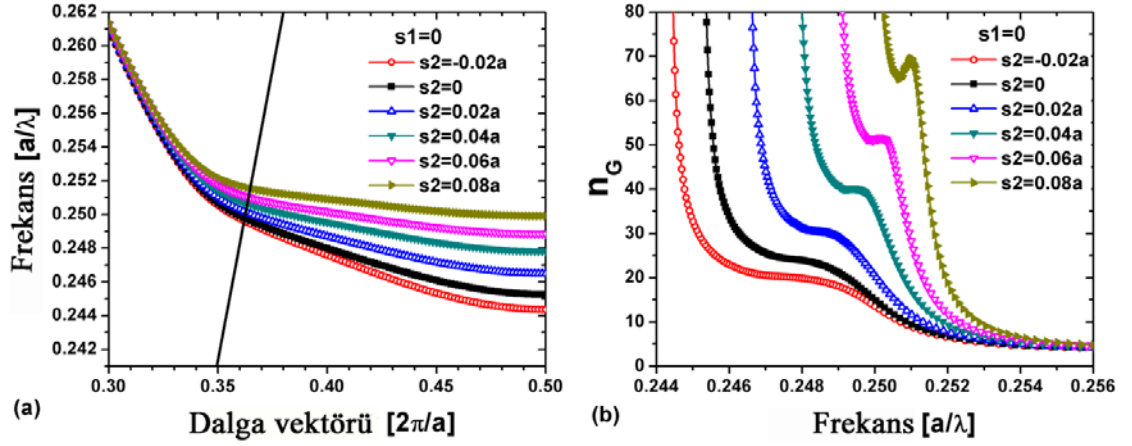
6.4.3 Çap değişiminin etkisi

İlk olarak, sadece çizgi kusuru etrafındaki ilk sıra deliklerin etkisi incelenmiştir. $s_2=0$ için dağıtım ve grup indisi karakteristikleri şekil 6.11.a ve b.'de gösterilmiştir. İlk sıra delikler çizgi kusurundan uzaklaştıkça kılavuz kipin frekansı azalmakta ve bandın $0.37(2\pi/a)$ 'daki aşağıya doğru olan eğriliği önce düzleşmekte sonra yukarıya doğru yönelmektedir. Bu durum grup indisi eğrilerinin basamak şeklinden U-şekline dönüşmesine yol açmaktadır. Ortalama grup indisi 25.26'dan 17.68'e azalırken bant genişliği 11.37 nm'den 32.13 nm'ye artmaktadır.



Şekil 6.11 $s_2=0$ için farklı s_1 kaymaları
a. Dağıtım, b. grup indisi karakteristiklerinin değişimi

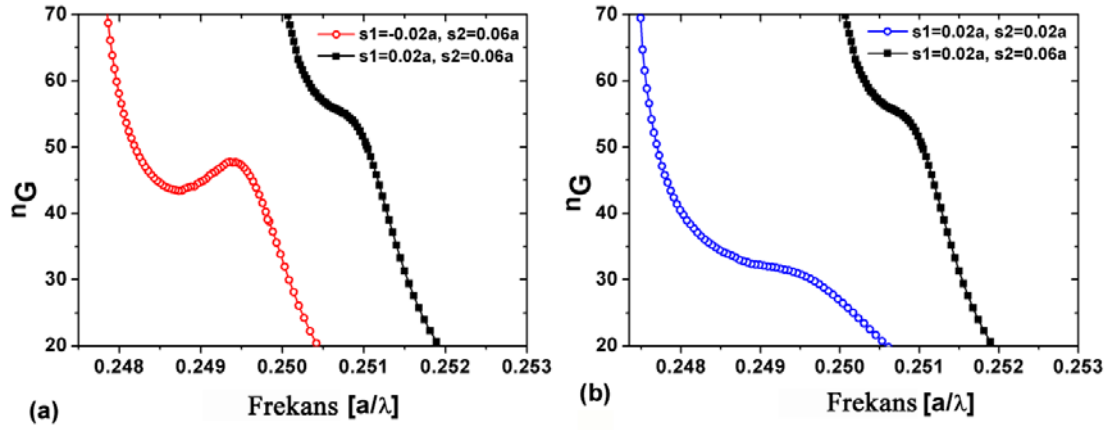
İkinci olarak, sadece çizgi kusuru etrafındaki ikinci sıra deliklerin etkisi incelenmiştir. $S_1=0$ için dağıtım ve grup indisi karakteristikleri şekil 6.12.a ve b.'de gösterilmiştir. İkinci sıra delikler çizgi kusuruna doğru yaklaştıkça bandın bant aralığı kılavuzlu kısmının frekansı artmaktadır. İlk sıra deliklerde hiç bir değişim olmadığı için bandın indis-kılavuzlu kısmı bu değişimden çok az etkilenmektedir. Bu durum dağıtım eğrisinin eğimini azaltarak grup indisi değerlerinde yüksek artışa yol açmaktadır. Ortalama grup indisi değerleri 21.16'dan 66.74'e değişirken bant genişlikleri 16.60 nm'den 5.36 nm'ye azalmaktadır.



Şekil 6.12 $s_1=0$ için farklı s_2 kaymaları
a. Dağılım, b. grup indisi karakteristiklerinin değişimi

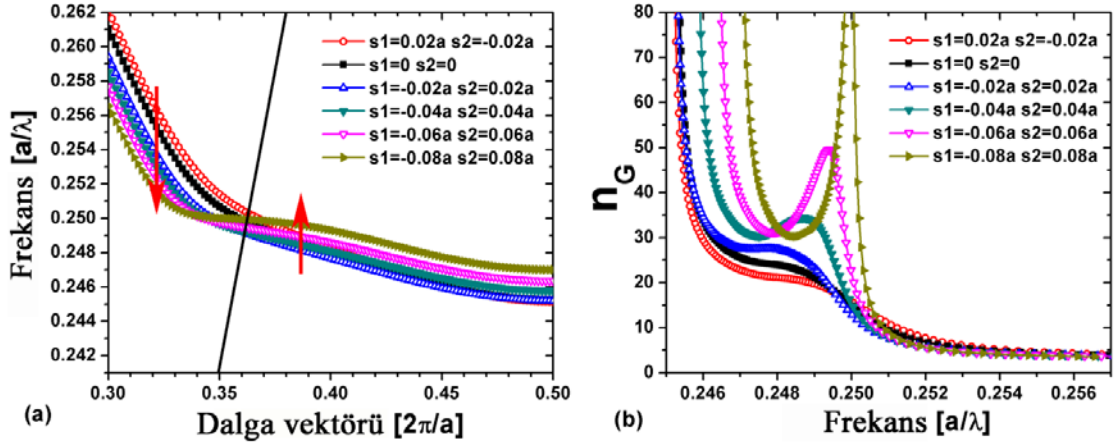
Son olarak, tüm s_1 , s_2 kayma durumları ele alınmıştır. İlk iki sıra delikleri çizgi kusuruna doğru kaydırmanın grup indisi değerlerini artırdığı görülmüştür. Fakat, sadece ilk sıra delikler kaydırılarak grup indisi değerleri sınırlı biçimde artırılabilir. Daha yüksek grup indisi değerlerine ulaşılabilmesi için ikinci sıra deliklerin de kaydırılması gerekmektedir.

S_1 ve s_2 kaymalarının grup indisi-frekans eğrileri üzerine etkisini karşılaştırmak için bir $(s_1;s_2)=(0.02a;0.06a)$ bileşimi referans olarak alınmış ve s_1 veya s_2 $0.04a$ kadar kaydırılmıştır. İlk sıra delikleri çizgi kusuruna doğru yaklaştırıldıkça, kılavuz kipin frekans ve grup indisi değerleri artmakta ve grup indisi-frekans eğrisi U-biçiminden omuz biçimine dönüşmektedir (Şekil 6.13.a.). İkinci sıra delikleri çizgi kusuruna yaklaştırıldıkça, kipin frekans ve grup indisi değerleri artmakla beraber grup indisi-frekans eğrisinin biçimi değişmemektedir (Şekil 6.13.b). Farklı $(s_1;s_2)$ bileşenleriyle analiz sonucunda görülmüştür ki, sabit bir s_1 değerinde s_2 'nin değiştirilmesi frekans ve grup indisi değerlerini değiştirirse de grup indisi-frekans eğrilerinin biçimini genel olarak etkilememektedir. İlk sıra delikleri halka şeklinde olmasına rağmen grup indisi eğrilerinin biçimi çizgi kusuru çevresindeki ilk sıra deliklerin kaydırılmasıyla belirlenmektedir.



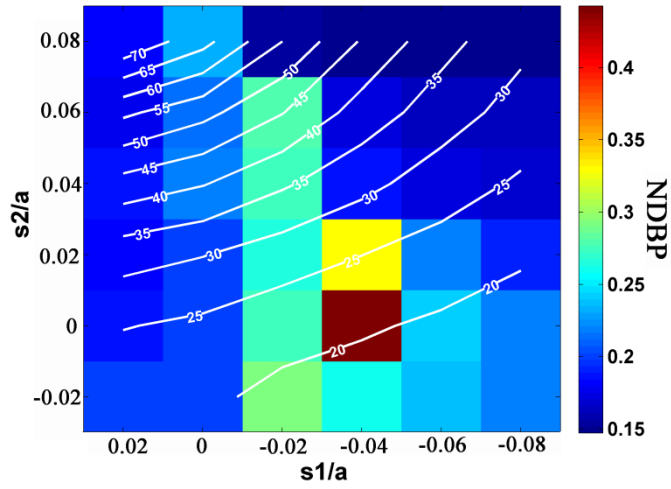
Şekil 6.13.a. İlk sıra deliklerin, b. ikinci sıra deliklerin kaydırılmasının grup indisi karakteristiklerine etkisi

Bu analizin bir diğer sonucu ise iç sıra delikleri çizgi kusurundan içe doğru veya dışa doğru kaydırmak yavaş ışık özellikleri üzerinde birbirine zıt etkilere neden olmaktadır. Bu durum s_1 ve s_2 kaymaları için eşit miktarda fakat birbirine zıt işaretle kaydırmalar uygulanarak şekil 6.14’de incelenmiştir. Şekil 6.14.a’dan görüldüğü üzere indis kılavuzlu kipin frekansı azalırken bant aralığı kılavuzlu kipin frekansı artmaktadır. s_1 negatif yönde artarken etkin kırılma indisi değeri arttığından bantın indis kılavuzlu kısmının frekansı azalmaktadır. s_2 pozitif yönde arttıkça etkin kırılma indisi değeri azalarak bantın bant aralığı kılavuzlu kısmının frekansı artmaktadır. Bu durum daha ziyade ilk sıra deliklerin bantın indis kılavuzlu kısmına, ikinci sıra deliklerin ise bantın bant aralığı kılavuzlu kısmına etkidiğini göstermektedir. İlk sıra delikler halka şeklinde olduğundan bant aralığı kılavuzlu kısma daha az etkimleri makuldur. s_1 ve s_2 kaymaları 0.02a’dan daha da arttıkça kılavuz kipin bant aralığı kılavuzlu kısmı yukarı doğru kırılmaktadır. Bu durum grup indisi-frekans eğrilerinin biçimini basamak şeklinden U-şekline dönüştürerek grup indisi değerindeki artışı durdurmaktadır. s_1 değeri s_2 ’den daha küçük seçilerek bant aralığı kılavuzlu kısmın yukarı doğru kırılması, dolayısıyla n_G -frekans eğrisinin U-biçimine dönüşmesi önlenabilir.



Şekil 6.14 Farklı s_1 ve s_2 kaymaları
a. Dağılım, b. grup indisi karakteristiklerinin değişimi

NDBP çarpanı değerleri Şekil 6.15’de farklı FGD konfigürasyonları için s_1 ve s_2 ’nin fonksiyonu olarak çizdirilmiştir. Ortalama grup indisi değerleri Şekil üzerinde kontur olarak gösterilmiştir. Burada kırmızı renk en yüksek, mavi renk ise en düşük NDBP değerini göstermektedir. $S_2=0.08a$, $s_1=-0.08a$ ve $s_1=0.02a$ sütunlarında NDBP değerleri 0.15 ile 0.22 arasındadır. Düşük NDBP değerlerinin sebebi n_g ’nin düşük olması ve bant genişliğinin az olmasıdır. Bant aralığı genişliği tespitinde basamak biçimindeki n_g eğrisinin minimumunun $+10\%$ ve -10% arasında kalan kısmı alınırken, eğri U-biçimine dönüştüğünde U-şeklinin her iki tarafının da $+10\%$ ’u bant genişliği olarak alınmaktadır. Bu durum bant genişliğini azaltmaktadır. Basamak şeklinde n_g -frekans eğrileri NDBP ve GVD bakımından U-şeklinde olanlara yeğlenmektedir. En yüksek NDBP değeri yüksek normalize bant genişliğinden ötürü $s_1=-0.04a$ için ve 0.4427 olarak bulunmuştur.



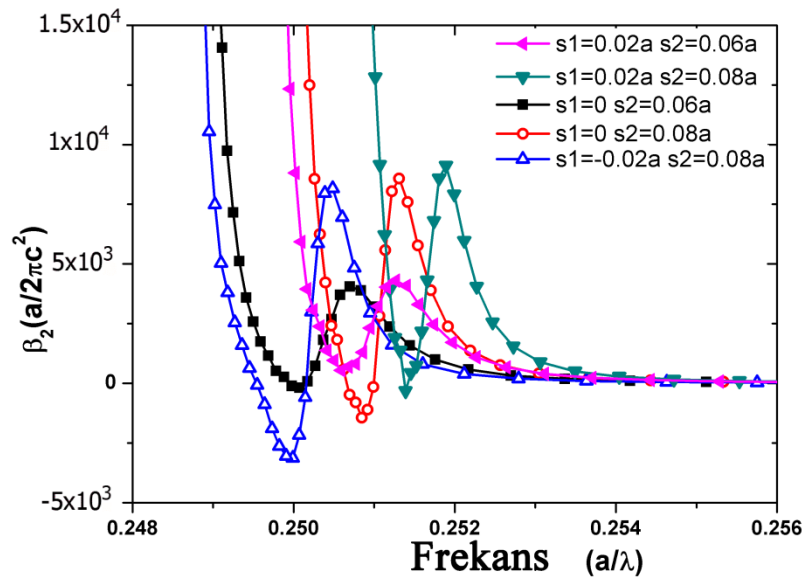
Şekil 6.15 s_1 ve s_2 kaymaları ile NDBP değerlerinin değişimi

Literatürdeki yavaş ışık FKD tasarımlarında grup indisi arttıkça NDBP değerleri azalmaktadır. Fakat bu çalışmada sabit s_1 değerleri için NDBP değerlerinin neredeyse aynı kaldığı gözlenmiştir. Li vd. (2008) çizgi kusuru etrafındaki iki sıra delikleri kusura doğru yaklaştırdığı çalışmasında 30 ile 90 arasında değişen grup indisleri için 0.3 civarında sabit bir NDBP bölgesi bulmuştur. Bu çalışmada da $s_1 = -0.02a$ ve $s_2 = -0.02a$ ile $0.06a$ arasında iken ortalama grup indisi değerleri 18.6 ile 45.2 arasında değişirken NDBP çarpanı 0.28 civarında kalmaktadır. NDBP haritasındaki n_G 'lerin konturundan s_1 ve s_2 arttıkça ortalama n_G 'nin arttığı tespit edilmiştir. En yüksek ortalama grup indisi değeri $(s_1; s_2) = (0.02a; 0.08a)$ için 74.42 olarak bulunmuştur. Bu konfigürasyon fabrike edildiğinde halkalar arasındaki hava tabakası 62 nm olmalıdır. Saynatjoki vd. (2008) halka şeklinde FKD'larda halkalar arası kalınlık azaldıkça algılayıcının duyarlılığının iyileştiğini tespit etmiştir. Halkalar arası bu boşluk silikaya yakın kırılma indisli sıvılar ile doldurularak algılama yapılabilir.

6.4.4 Grup hızı dağılımı karakteristikleri

İncelenen FKD yapısı için $\langle n_G \rangle > 50$ durumundaki GVD karakteristikleri Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Eğer $\beta_2 < 7.5 \times 10^3 (a/2\pi c^2)$ düşük GVD olarak düşünülürse, bu değer Ma vd. (2008) ve Wang vd. (2011)'den iki kat daha düşüktür, incelenen tüm FKD yapıları ultra düşük GVD göstermektedir. Eğer birim hücre uzunluğu 1550 nm dalga boyu sabit

n_G -frekans eğrisinin minimumuna denk gelecek şekilde seçilirse, ultra düşük GVD kriterine uyan bant genişlikleri $(-0.02a; 0.08a)$, $(0; 0.08a)$, $(0.02a; 0.08a)$ için sırasıyla 8.21 nm, 5.66 nm ve 4.08 nm olarak hesaplanmaktadır. GVD değerlerinin düşük n_G değerleri için daha düşük olduğu göz önünde bulundurulduğunda, yavaş ışık FKD'larda iç sıra delikleri merkeze doğru kaydırmak tercih edilen bir yavaş ışık oluşturma yöntemidir. Ek olarak, farklı frekans değerlerinde GVD eğrilerinin pozitif ve negatif değer göstermesinden ötürü bu yapı dağınımının telafi edilmesi uygulamalarında da kullanılabilir.

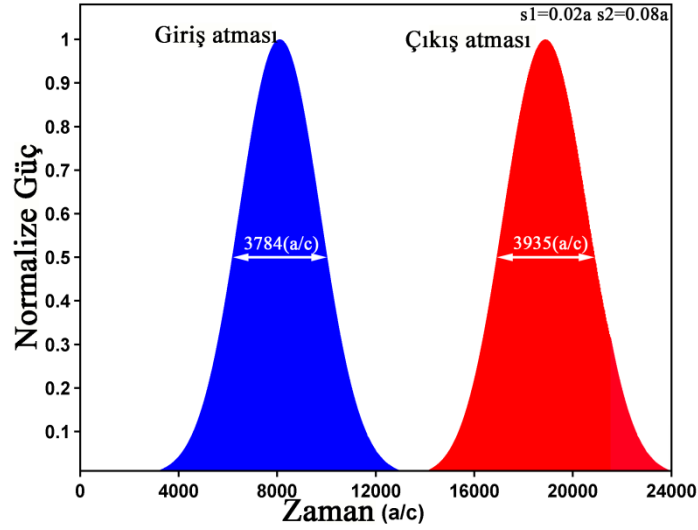


Şekil 6.16 Farklı s_1, s_2 kaymaları için grup hızı dağınımı değerlerinin değişimi

6.4.5 Atmanın zamansal şekli

$(0.02a; 0.08a)$ konfigürasyonu için zaman bölgesinde atmanın ilerleme karakteristikleri incelenmiştir. H_z alanının giriş ve çıkış algılayıcılarındaki zamansal profili şekil 6.17'de gösterilmiştir. FKD'nın toplam uzunluğu $L=143a$ olarak alınmıştır ve FKD içerisine merkez frekansı $0.251477(2\pi c/a)$ olan bir Gaussyen kaynak yerleştirilmiştir. Kaynağın merkez frekansı sabit grup indisi-frekans eğrisinin minimum noktası olarak ayarlanmış ve kaynağın bant genişliği %10 n_G aralığı olarak alınmıştır. Giriş ve çıkış algılayıcıları ışık kaynağının $0.5a$ ve $140.5a$ ötesine yerleştirilmiştir. H_z atmasının pik noktası zaman ölçeğinde giriş algılayıcısında $8112(a/c)$, çıkış algılayıcısında $18781(a/c)$ 'dir. Bu zaman

farkı atmanın katettiği yola bölünerek grup indisi 76.21 olarak bulunmuştur. PWE hesaplamalarından bulunan ortalama grup indisi ise 74.42'dir. FDTD yönteminden elde edilen grup indisi PWE yönteminden hesaplanan ile uyumlu çıkmıştır. Ayrıca atmanın 140a (54.57 μ m) ilerlemesiyle %3.8 genişlediği tespit edilmiştir.



Şekil 6.17 (0.02a; 0.08a) yapısı için L=143a uzunluklu bir FKD'nun giriş ve çıkış noktalarında atmanın zamansal profili

6.4.6 Sonuç

İlk sıra delikleri halka şeklinde bir FKD tasarlanmış ve ilk iki sırayı çizgi kusuruna doğru kaydırmanın yavaş ışık özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Yüksek grup indisi değerlerine erişilebilmesi için ikinci sıra deliklerin de birinci sırayla beraber kaydırılması gerektiği saptanmıştır. İkinci sıra delikler kaydırıldıkça grup indisi değerleri 18.6 ile 45.2 arasında değişirken NDBP değerleri 0.28 civarında sabit kalmaktadır. Birinci ve ikinci sıra delikleri eşit miktarlarda zıt yönlerde doğru kaydırmak, kılavuz kipin indis kılavuzlu kısmının ilk sıra deliklerin kaydırılmasıyla, bant aralığı kılavuzlu kısmının ise, 0.02a'dan büyük kayma değerleri için, ikinci sıra deliklerin kaydırılmasıyla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Ek olarak, n_G -frekans eğrisi şekli baskın olarak ilk sıra deliklerin kaydırılmasıyla belirlenmektedir. Tüm bu sonuçlar

kılavuz kipin eğiminin yavaş ışık uygulamaları için istenilen biçimde değiştirilebilmesinde faydalı olacaktır.⁵

6.5 Dalga Kılavuzu Genişliği Sabit Bırakılarak Çizgi Kusuru Çevresindeki Deliklerin Kaydırılması ile Işığın Hızının Yavaşlatılması

6.5.1 Giriş

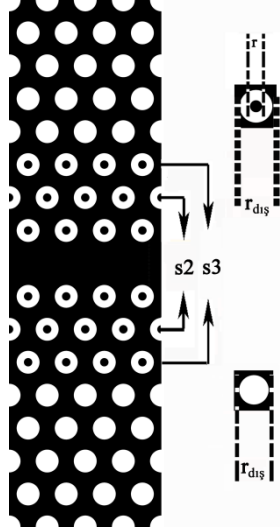
Bu çalışmada halka şeklinde bir fotonik kristal dalga kılavuzu önerilmiş ve iç sıradaki deliklerin yavaş ışık özellikleri üzerine etkisi sistematik olarak araştırılmıştır. Dielektrik bandına yakın olan bantlarda alan dağılımı dördüncü sıra deliklere kadar sızmaktadır (Kurt, 2010). Bu çalışmada da kılavuz kipler aşağıya doğru meyilli ve dielektrik bandına yakın olduğundan çizgi kusuru çevresindeki üç sıra delik halka şeklinde tasarlanmıştır. Buna ek olarak, iç sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırılmıştır. Kaç sıranın çizgi kusuruna doğru kaydığı ve kayan sıradaki deliklerin şeklinin yavaş ışık özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Çizgi kusuru geniş olan FKD'lar çok kipli olabilmektedir (Galli 2005). Buna ek olarak, dalga kılavuzu kalınlığı azaldıkça saçılma kayıpları artış göstermektedir (Schulz 2010). Bu problemleri önlemek ve etkileri çizgi kusuru genişliğinden bağımsız incelemek için çizgi kusurunun genişliği değiştirilmeden ikinci veya ikinci ve üçüncü sıra deliklerin her ikisi birden kaydırılmıştır. İç sıra delikleri sistematik olarak çizgi kusuruna doğru, çizgi kusurunun kalınlığından bağımsız olarak kaydırmanın yavaş ışık özellikleri üzerine etkisi ilk defa rapor edilmektedir.

6.5.2 Dalga kılavuzu tasarımı ve modellenmesi

Önerilen FKD yapısı şekil 6.18'de gösterilmiştir. Yapı önceki çalışmada olduğu gibi silika içerisine gömülü Si dilim FK'den oluşmaktadır. Çizgi kusuru etrafında ilk üç sıraya kadar olan delikler halka şeklinde tasarlanmıştır. İlk olarak, halka şeklinde olan deliklerin iç ve dış yarıçaplarının ve sıra sayılarının yavaş ışık özelliklerine etkisi incelenmiştir. İkinci olarak, seçilen iç ve dış yarıçap değerlerinde çizgi kusuru

⁵ Bu çalışma, SCI kapsamına giren uluslararası dergide değerlendirme aşamasındadır.

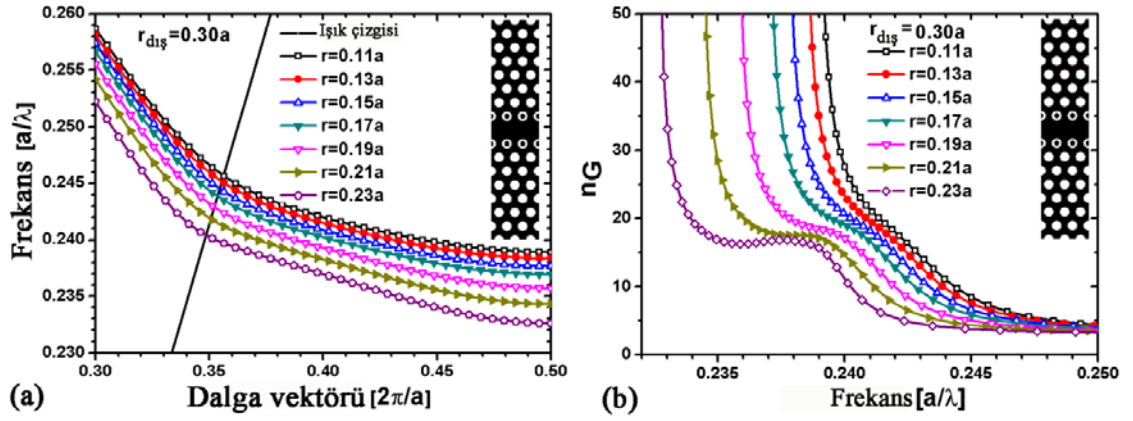
etrafındaki ikinci veya ikinci ve üçüncü delikler beraber çizgi kusuruna doğru kaydırılarak yavaş ışık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Üç boyutlu hesaplamalar etkin indis değeri 2.98 atanarak (Qui 2002) iki boyutta MPB programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (Johnson vd. 2008).



Şekil 6.18 Fotonik kristal dalga kılavuzunun şematik gösterimi

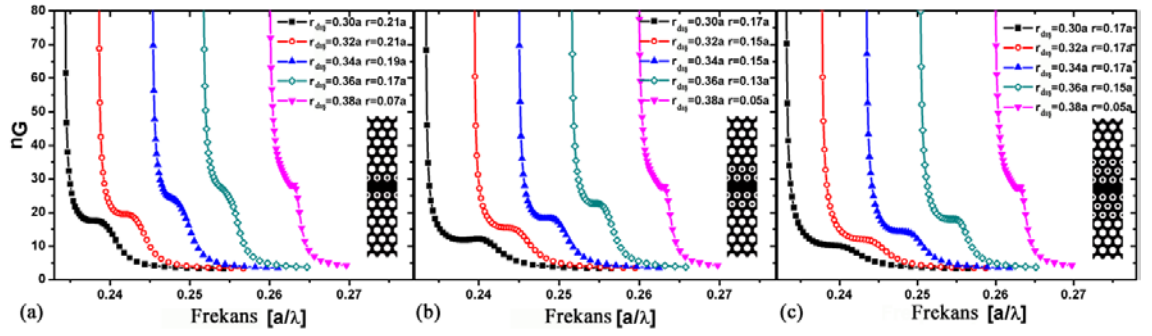
6.5.3 Yarıçap değişiminin etkileri

FKD'nın çizgi kusuru etrafındaki ilk sıra delikleri halka şeklinde tasarlanarak $r_{dış}=0.30a$ için deliklerin iç yarıçapının değişiminin yavaş ışık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. İç yarıçap arttıkça bantlar daha düşük frekanslara kaymaktadır. İç yarıçap değişiminden indis ve bant aralığı kılavuzlu kiplerin her ikisi de etkilenmiştir; fakat bant aralığı kılavuzlu kip daha fazla etkilenmiştir (Şekil 6.19.a). Dolayısıyla etkileşme noktası daha küçük dalga sayılarına kaymıştır. Ek olarak, iç yarıçap değeri attıkça n_G -frekans eğrileri omuz şeklinden basamak şekline dönüşmüştür (Şekil 6.19.b). $r=0.19a$ yarıçap değerinde $\langle n_G \rangle = 18.76$, bant genişliği 15.96 nm ve NDBP 0.1935'dir. r arttıkça $\langle n_G \rangle$ azalmakta, bant genişliği artmaktadır.



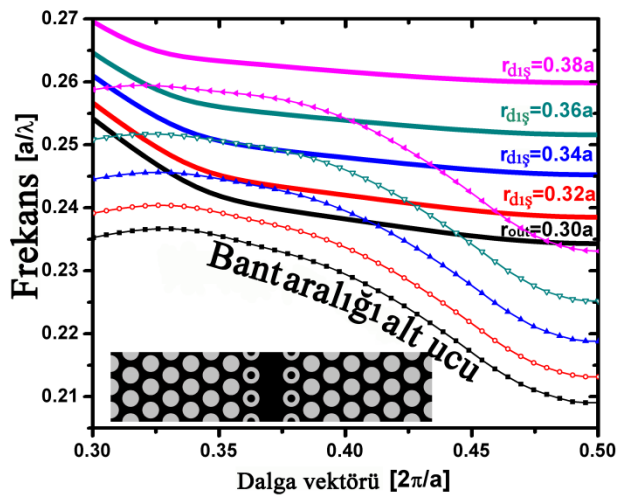
Şekil 6.19 Tek sırası halka şeklinde delikli FPD'nin a. dağınım, b. grup indisi karakteristiği

Şekil 6.20'de çizgi kusuru çevresinde ilk, iki veya üç sırası halka şeklinde delikli FPD'nin $0.30a$ ile $0.38a$ dış yarıçap ve bu dış yarıçaplara uygun optimize edilmiş iç yarıçap değerlerinde grup indisi-frekans grafikleri gösterilmektedir. Bu analizde yüksek grup indisi ve düşük GVD karakterinden ötürü basamak şeklinde n_g eğrileri gösterecek şekilde iç yarıçap değerleri ayarlanmıştır. Üç yapı için de grup indisleri benzer özellik göstermektedir. İlk olarak, dış yarıçap arttıkça daha küçük iç yarıçap değerlerinde ve daha yüksek grup indisi/daha dar bant genişliğinde yavaş ışık optimize edilmiştir. Bu sonuçlar ilk iki sırası halka şeklinde delikli FPD yapısındaki analiz ile tutarlıdır (Dai 2009, Hou 2009, Zhai 2011). Şekil 6.20.a, b. ve c. karşılaştırıldığında halka şeklinde deliklerin eklenmesinin n_g 'de azalışa neden olduğu gözlenmiştir. Hem grup indisi değerleri bakımından hem de fabrikasyon kolaylığı açısından ilk sırası halka şeklinde delikli FPD yapısı yavaş ışık özelliklerini en iyi gösteren yapıdır. Ortalama grup indisi değerleri 17.63 ile 33.93 arasında, bant genişlikleri 22.72 nm ile 10.57 nm arasında değişim göstermektedir. NDBP değerleri 0.2022 ve 0.2592 arasında değişmektedir.



Şekil 6.20.a. İlk sırası halka şeklinde delikli, b. ilk iki sırası halka şeklinde delikli, c. ilk üç sırası halka şeklinde delikli FKD yapısının grup indisi karakteristikleri

Şekil 6.21 halka şeklinde deliklerin dış yarıçapı ve örgü noktalarının yarıçapı $0.30a$ 'dan $0.38a$ 'ya doğru artırıldıkça bant aralığı alt ucu ve kılavuz kiplerin değişimini göstermektedir. Dış yarıçap değeri artırıldıkça bant aralığı alt ucu ve kılavuz kipler daha yüksek frekanslara kaymaktadır. $r_{dış}$ ile birlikte tüm örgü noktalarının yarıçapı değiştiğinden bant aralığı alt ucunun frekansının kayması akla yatkın bir sonuçtur. Fakat bant aralığı alt ucu kılavuz kiplere göre daha az kayma göstermektedir. Bu sebeple bant aralığı alt ucu ile kılavuz kip arasındaki frekans aralığı daralmakta ve dielektrik bandıyla kılavuz bant arasındaki etkileşme artmaktadır. Bu durum bantların düzleşmesine yol açmaktadır. Bu gözlem $r_{dış}$ arttıkça n_G 'nin artışının sebebini açıklamaktadır.



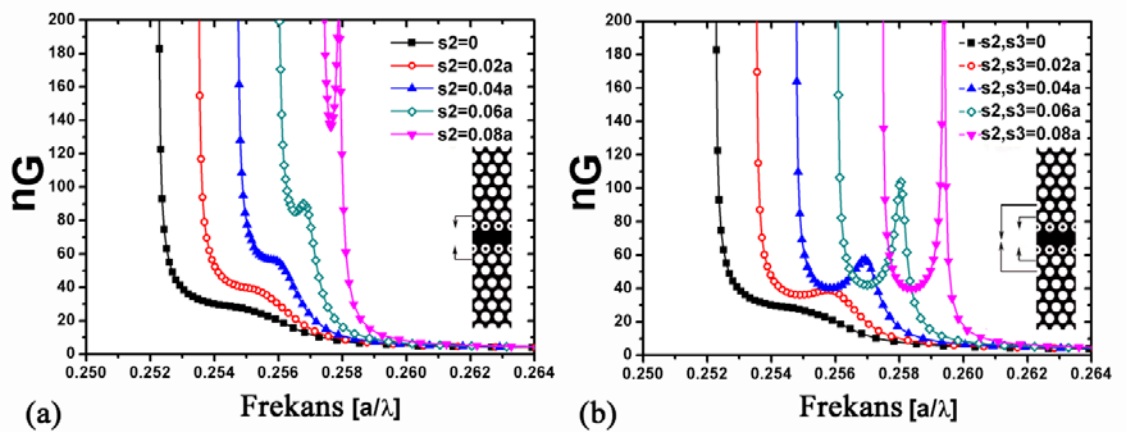
Şekil 6.21 Kılavuz kiplerin ve bant aralığı alt ucunun $r_{dış}$ arttıkça değişimi

6.6 Çizgi Kusurunun Çevreleyen Sıraların Kusura Dik Yönde Kaydırılmasının Etkisi

6.6.1 Grup indisi analizi

Çizgi kusurunun kalınlığını değiştirmeden, yalnız ikinci veya ikinci ve üçüncü sıra delikleri birlikte çizgi kusuruna doğru kaydırarak, yavaş ışık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu kaydırmalar şekil 6.20'deki üç FKD yapısına da uygulanmıştır. Halka deliklerin dış yarıçapı ve örgü noktalarının yarıçapı $0.36a$ ve halka deliklerin iç yarıçapı $0.15a$ olarak seçilmiştir.

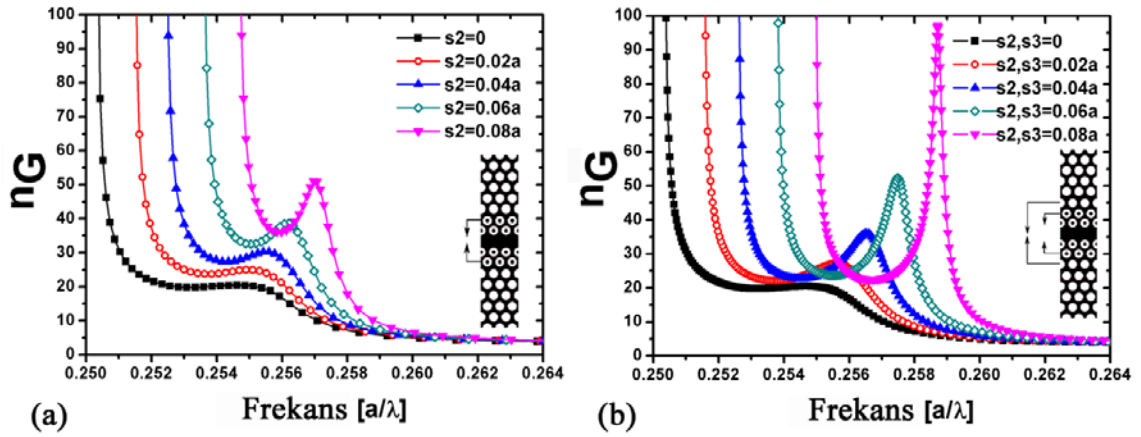
Çizgi kusuru çevresindeki ilk sırası halka şeklinde delikli FKD yapısında Şekil 6.22.a.'da ikinci sıra delikler ve şekil 6.22.b.'de ikinci ve üçüncü sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırılmıştır. İkinci ve üçüncü sıra delikler beraber çizgi kusuruna doğru kaydırıldığında ortalama grup indisi değerindeki artış azdır. Fakat ikinci sıra delikleri kaydırmak ortalama grup indisi değerlerini oldukça artırmaktadır. Kaydırma miktarı arttıkça grup indisi-frekans eğrileri basamak şeklinden U-şekline dönüşmektedir.



Şekil 6.22 Tek sırası halka şeklindeki FKD yapısında

a. ikinci sıra delikler, b. ikinci ve üçüncü sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırıldığında grup indisinin değişimi

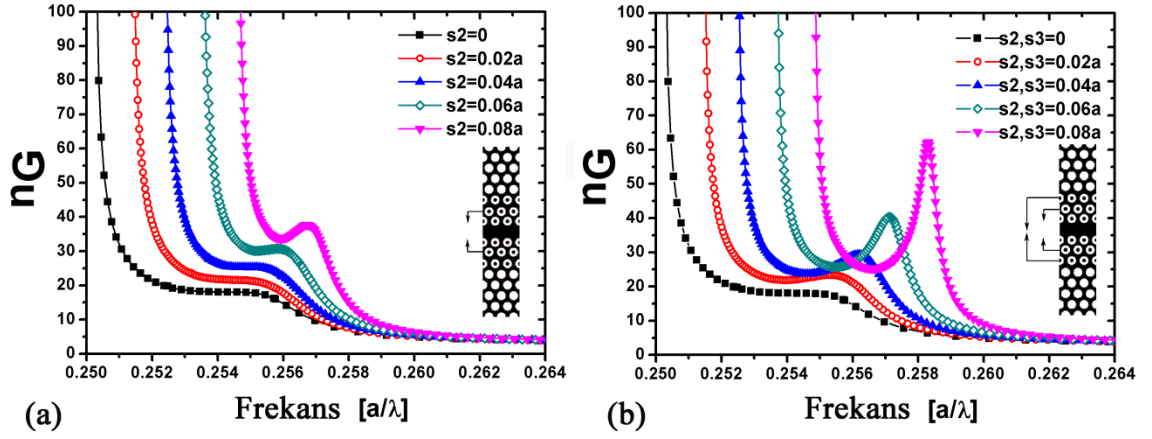
Şekil 6.23 ilk iki sırası halka şeklinde delikli FKD yapısında ikinci sıra delikler (Şekil 6.23.a) ve ikinci ve üçüncü sıra delikler beraber (Şekil 6.23.b) çizgi kusuruna doğru yaklaştırıldığı durumdaki grup indisi karakteristiklerini göstermektedir. Sadece ikinci sıra delikler kaydırıldığında grup indisinin minimum değeri 19.80'den ($s_2=0$) 36.05'e ($s_2=0.08a$) doğrusal bir değişim gözlenmektedir. Fakat üçüncü sıra delikler de çizgi kusuruna yaklaştırıldığında minimum grup indisi değerindeki artış azdır.



Şekil 6.23 İlk iki sırası halka şeklindeki FKD yapısında

a. ikinci sıra delikler, b. ikinci ve üçüncü sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırıldığında grup indisinin değişimi

Şekil 6.24 ilk üç sırası halka şeklinde delikli FKD yapısında ikinci sıra delikler (Şekil 6.24.a) ve ikinci ve üçüncü sıra delikler beraber (Şekil 6.24.b) çizgi kusuruna doğru yaklaştırıldığı durumdaki grup indisi karakteristiklerini göstermektedir. Şekil 6.24.a'da n_G -frekans eğrileri şekil 6.23.a'dakinden farklı olarak daha basamak şeklindedir. Üçüncü sıra deliklerin de çizgi kusuruna yaklaştırılması minimum n_G değerinde çok az bir artışa sebep olmuştur. Bu artış $s_2, s_3=0.06a$ parametre değeriyle beraber azalışa dönüşmüştür.



Şekil 6.24 İlk üç sırası halka şeklindeki FPD yapısında

a. ikinci sıra delikler, b. ikinci ve üçüncü sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırıldığında grup indisinin değişimi

Şekil 6.22.a, şekil 6.23.a ve şekil 6.24.a’da gösterilen yapıların ortalama grup indisi, bant genişliği ve NDBP çarpanları Çizelge 6.1(a-c)’de gösterilmiştir. Bu üç FPD yapısı için s_2 arttıkça ortalama grup indisi artmakta, bant genişliği azalmaktadır. Fakat $\langle n_G \rangle$ ve $\Delta\omega$ ’daki artışlar farklı oranlarda olduğundan NDBP değerleri tamamen artan veya azalan bir davranış göstermemektedir. İlk sırası halka şeklindeki FPD yapısı için ikinci sıra delikler çizgi kusuruna doğru 0.08a kadar kaydırıldığında $\langle n_G \rangle$ 143.2’ye kadar artmaktadır, fakat bant genişliği 1.25 nm’ye azalmaktadır. s_2 0.06a’dan 0.08a’ya artarken $\langle n_G \rangle$ çok artsa da $\Delta\omega$ ’daki azalış ve ω_0 ’daki artış NDBP değerini azaltmıştır. Fakat ilk iki sırası halka şeklindeki FPD yapısında NDBP değerleri s_2 arttıkça sürekli azalma göstermektedir (Çizelge 6.1.b). Sonuç olarak, ikinci sıra delik şeklinde olduğunda $\langle n_G \rangle$ değerleri yüksek, halka şeklinde olduğunda düşüktür. Fakat ilk iki sırası halka şeklindeki FPD yapısı bant genişliğinin daha önemli olduğu uygulamalarda tercih edilebilir. Çizelge 6.1.c’deki $\langle n_G \rangle$, $\Delta\omega$ ve NDBP değerleri Çizelge 6.1.b’den biraz daha azdır.

İlk sırası halka şeklinde olan FPD yapısında, 0.365a yarıçap değerinde, 82 ortalama grup indisi için bant genişliği 0.93 nm olarak bulunmuştur (Hou vd. 2009). Bu çalışmada benzer bir dış yarıçap, dilim indisi ve n_G değerinde ikinci sıra delikler çizgi kusuruna dik kaydırılarak yavaş ışık bant genişliği oldukça artırılmıştır (Çizelge 6.1.a).

Çizelge 6.1 İkinci sıra deliklerin kaydırılmasıyla (a, b, c), ikinci ve üçüncü sıra deliklerin kaydırılmasıyla (d, e, f) ortalama grup indisleri ($\langle n_G \rangle$), 1550 nm çevresinde bant genişlikleri ($\Delta\omega$) ve normalize-gecikme bant-genişliği çarpanları

a. s2	$\langle n_G \rangle$	$\Delta\omega$	NDBP	d. s2,s3	$\langle n_G \rangle$	$\Delta\omega$	NDBP
0	29.49	9.55nm	0.1817	0	29.49	9.55nm	0.1817
0.02a	39.71	7.38nm	0.2464	0.02a	37.18	12.51nm	0.3011
0.04a	56.58	5.54nm	0.2022	0.04a	41.78	7.54nm	0.2034
0.06a	86.81	4.30nm	0.2369	0.06a	43.44	4.95nm	0.1386
0.08a	143.19	1.25nm	0.1189	0.08a	41.00	4.76nm	0.1260
b. s2	$\langle n_G \rangle$	$\Delta\omega$	NDBP	e.s2,s3	$\langle n_G \rangle$	$\Delta\omega$	NDBP
0	20.11	23.04nm	0.3083	0	20.11	23.48nm	0.3061
0.02a	24.28	19.55nm	0.3077	0.02a	22.81	11.96nm	0.1761
0.04a	28.31	11.00nm	0.2013	0.04a	23.49	10.30nm	0.1561
0.06a	33.51	7.78nm	0.1682	0.06a	24.45	9.19nm	0.1451
0.08a	37.17	6.17nm	0.1478	0.08a	23.13	9.47nm	0.1413
c. s2	$\langle n_G \rangle$	$\Delta\omega$	NDBP	f. s2,s3	$\langle n_G \rangle$	$\Delta\omega$	NDBP
0	18.11	19.76nm	0.2295	0	18.11	19.76nm	0.2295
0.02a	19.37	15.47nm	0.2150	0.02a	22.46	19.66nm	0.2864
0.04a	25.09	13.42nm	0.2166	0.04a	24.46	10.14nm	0.1600
0.06a	30.36	11.39nm	0.2235	0.06a	26.57	8.68nm	0.1487
0.08a	34.88	6.76nm	0.1521	0.08a	26.07	8.34nm	0.1403

İkinci ve üçüncü sıra deliklerin beraber kaydırıldığı durumdaki ortalama grup indisi, bant genişliği ve NDBP değerleri çizelge 6.1.d-f’de gösterilmiştir. Bu üç FGD yapısı da benzer özellikler göstermektedir. s2 ve s3 kayma miktarları artırıldıkça, genel olarak, ortalama grup indisleri artmakta ve bant genişlikleri azalmaktadır. Ek olarak, s2 ve s3 kaymaları 0.06a’dan 0.08a’ya doğru artırıldığında üç yapı için de $\langle n_G \rangle$ azalmaktadır. Bu davranışın sebebini aydınlığa çıkarmak için kılavuz kiplerin dağıtım grafikleri kesim 6.6.2’de incelenmiştir. Çizelge 6.1.d ve 6.1.e ile 6.1.d ve 6.1.f karşılaştırıldığında, şekil 6.22.a’daki delikleri kaydırılmış yapının yavaş ışık özellikleri

bakımından daha iyi olduğu gözlenmektedir. Buna ek olarak, çizelge 6.1'in sol sütunu sağ sütunu ile karşılaştırıldığında sadece ikinci sıra deliklerin kaydırılmasının yavaş ışık özelliklerini, ikinci ve üçüncü sıra deliklerin beraber kaydırıldığı duruma göre daha fazla geliştirdiği tespit edilmiştir.

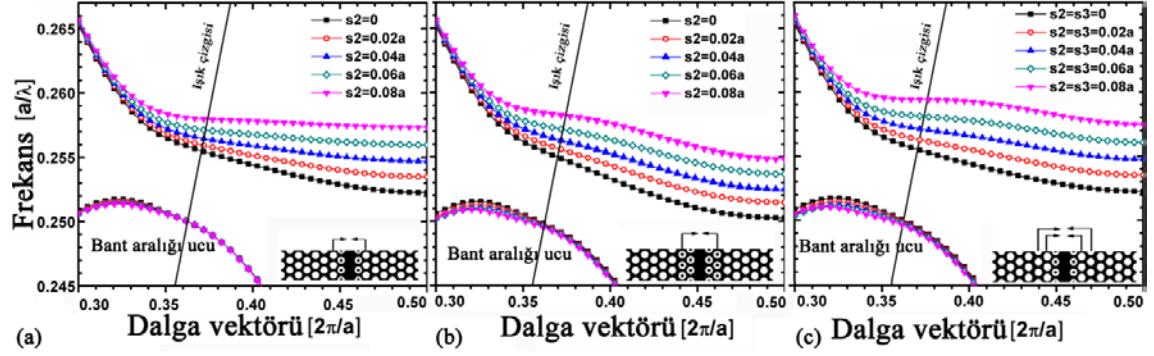
6.6.2 Kılavuz bantların dağılımı karakteristiği

Şekil 6.22.a, şekil 6.23.a ve şekil 6.22.b'deki FKD yapılarının dağılım grafikleri sırasıyla şekil 6.25.a, b ve c'de verilmiştir. Şekil 6.25'deki tüm şekillerde kayma miktarı arttıkça H_z alanı hava bölgesinde daha çok yoğunlaştığından etkin indis değeri azalmakta ve kılavuz kiplerin frekansı artmaktadır. Buna ek olarak, indis kılavuzlu kiplerin ve bant aralığı alt ucunun frekansı ilk sıra deliklerin konumu aynı kaldığı için değişim göstermemektedir.

İlk olarak, ikinci sıralar hava (şekil 6.25.a) ve halka şeklinde delikler (şekil 6.25.b) olduğu durumdaki dağılım eğrileri karşılaştırılmıştır. İkinci sıra halka şeklinde delikler olduğunda bantların kesilim frekansı daha düşüktür. Dağılım eğrilerinin düşük k kısmı aynı karakterde olduğundan şekil 6.25.b için bandın eğimi daha fazladır, grup indisi değerleri daha düşüktür. Şekil 6.25.b'de $0.39(2\pi/a)$ çevresinde $s_2=0.04a$ olduğunda bant biraz yukarı kıvrılmaktadır. Bu durum daha yüksek s_2 değerleri için daha belirgindir ve n_G eğrileri basamak şeklinden U-şekline dönüşmektedir.

İkinci olarak, ikinci sıra delikler (şekil 6.25.a) ve ikinci ve üçüncü sıra delikler (şekil 6.25.c) çizgi kusuruna doğru yaklaştırıldığında dağılım eğrileri karşılaştırılmıştır. $k=0.5(2\pi/a)$ 'da kip üçüncü sıra deliklerdeki değişimden çok az etkilendiğinden (Saynatjoki 2007) şekil 6.25.a ve şekil 6.25.c'deki yapıların kesilim frekansları neredeyse aynıdır. Şekil 6.25.b'deki $s_2=0.04a$, $0.06a$ ve $0.08a$ kaymalarına benzer biçimde, şekil 6.25.c'de $s_2=s_3>0.04a$ durumunda $0.39(2\pi/a)$ civarındaki bant bölgesi biraz yukarı doğru kıvrılmaktadır. $k=0.5(2\pi/a)$ 'da bandın frekansı fazla değişmediğinden dağılım eğrisinin eğimi artmaktadır. Bandın yukarı doğru kıvrılması n_G -frekans eğrilerinin basamak şeklinden U-şekline dönüşmesine ve ortalama grup

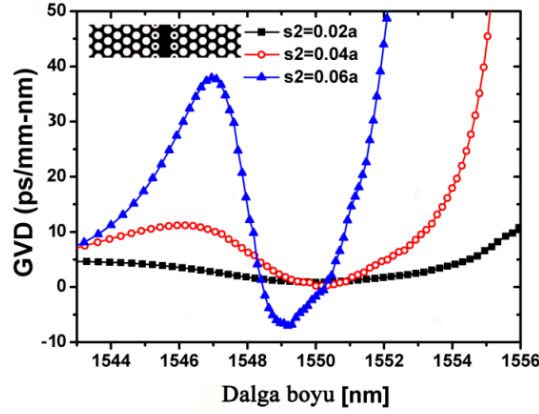
indisi değerinin $s_2=s_3=0.06a$ 'dan $s_2=s_3=0.08a$ 'ya geçişte azalmasına yol açmıştır (Çizelge d-f).



Şekil 6.25.a İlk sırası halka şeklinde delikli FPD'nin s_2 kaymalarının, b. ilk iki sırası halka şeklinde delikli FPD'nin s_2 kaymalarının, c. ilk sırası halka şeklinde delikli FPD'nin s_2, s_3 kaymalarının dağılım grafiği

6.6.3 Grup hız dağılımı karakteristiği

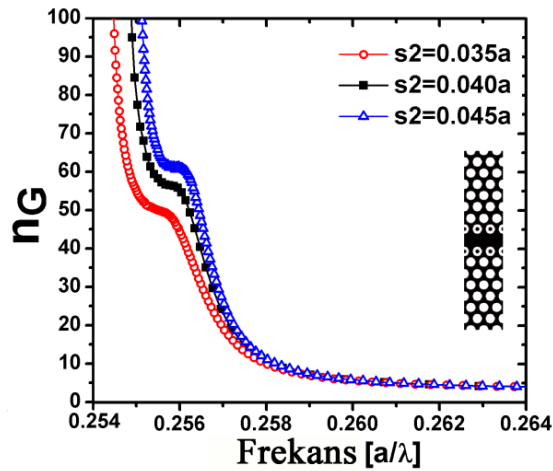
Ortalama grup indisi değeri 35'den büyük olan FPD yapılarının grup hız dağılımı özellikleri şekil 6.26'da sunulmuştur. $\pm 10 n_G$ bant aralığında $s_2=0.02a$ yapısı için $GVD \pm 7 \text{ ps}/(\text{nm-mm})$, $s_2=0.04a$ yapısı için $\pm 19 \text{ ps}/(\text{nm-mm})$, $s_2=0.06a$ yapısı için ise $\pm 55 \text{ ps}/(\text{nm-mm})$ içerisinde değişim göstermektedir. $s_2=0.08a$ yapısı yüksek GVD gösterdiğinden (yavaş ışık bandında $\pm 180 \text{ ps}/(\text{nm-mm})$) şekil 6.26'da gösterilmemiştir. $\pm 5 \text{ ps}/(\text{nm-mm})$ aralığında $s_2=0.02a$, $s_2=0.04a$ ve $s_2=0.06a$ FPD yapılarının bant genişlikleri sırasıyla 6.1 nm, 2.66 nm ve 0.82 nm'dir. Yoğun frekans bölmeli çoğullayıcılarda 0.8 nm bant genişliği yeterli olduğundan (Hou vd. 2009) $s_2=0.06a$ yapısı böyle bir uygulamada kullanılabilir.



Şekil 6.26 Tek sırası halka şeklinde olan FKD yapısının $s_2=0.02a$, $0.04a$ ve $0.06a$ için grup hız dağılımı karakteristiği

6.6.4 Fabrikasyon duyarlılığı

Grup indisi karakteristiklerinin ikinci sıra deliklerin ± 2 nm kayması altında davranışı $s_2=0.04a$ FKD yapısı için Şekil 6.27’de verilmiştir. Bu analiz için ilk sırası halka şeklinde delikli ve ikinci sırası $0.04a$ kadar kaymış FKD yapısı seçilmiştir. Siyah eğri fabrikasyon hatası içermeyen referans modele aittir. $s_2=0.035a$ için merkez dalga boyu 2.53 nm kırmızıya, $s_2=0.045a$ için ise 0.085 nm maviye kaymaktadır. Ortalama grup indisi değerleri $s_2=0.035a$ için 11% azalmış, $s_2=0.045a$ için ise 8.3% artmıştır.



Şekil 6.27 İkinci sıra delikleri $0.04a$ kaydırılmış FKD yapısında deliklerin ± 2 nm kayması altında grup indisi karakteristikleri

Li vd. (2008) tarafından fabrike edilen FKD'larında dairesel şekilde ilk iki sıra delikler çizgi kusuruna doğru kaydırılarak dalga boyu ayarlanabilir bir lazer ile iletim spektrumu ölçülmüş ve Fourier dönüşümlü spektral interferometre tekniği (Gomez-Iglesias 2007) ile grup indisi değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Etkin indis yöntemiyle iki boyutta hesaplanan grup indisi değerleri ile grup indisi eğrisinin davranışı deneysel olarak tasdiklenmiştir (Li vd. 2008). Günümüz modern elektron demet yazıcılarıyla delikleri kaydırmanın 2 nm'den daha az fabrikasyon hatası verdiği not edilmelidir. Bu çalışmada incelenen FKD yapısının yavaş ışık özellikleri fabrikasyon hatalarına karşı toleranslıdır.

6.6.5 Sonuç

Çizgi kusuru çevresindeki kusurlu sıraların ve bu sıralardaki delikli yapının yavaş ışık özelliklerine etkisi, sıraları kaydırılmamış ve kaydırılmış FKD yapıları için detaylıca incelenmiştir. İlk sırası halka şeklindeki FKD yapısı, ilk iki veya üç sırası da halka şeklinde olan FKD yapısına göre tercih edilir. İkinci sırası hava delikli olan FKD yapısında ikinci sıraları çok küçük bir miktar kaydırmak, ilk iki sırası halka şeklinde delikli FKD yapısında halka şeklindeki delikleri kaydırmaya göre daha etkilidir. Sadece ilk sırası halka şeklinde delikli FKD yapısında çizgi kusuru etrafında ikinci sıra delikleri kaydırmak grup indisi değerlerini üstel olarak artırmaktadır. Fakat ilk iki veya üç sırası halka şeklinde delikli FKD yapısında ikinci sıra delikleri kaydırmanın minimum grup indisi değerine etkisi doğrusal bir artıştır. Ek olarak, 0.06a'dan fazla kayma miktarları için, ikinci ve üçüncü sıraları beraber kaydırmak kılavuz kip yukarı doğru kıvrıldığı için yavaş ışık özelliklerini iyileştirmemektedir. Bu kıvrılma grup indisi-frekans eğrilerinin basamak şeklinden U-şekline dönüşmesine yol açmaktadır⁶.

⁶ Bu çalışma, SCI kapsamına giren uluslararası dergide değerlendirme aşamasındadır.

7. IŞIĞIN HIZININ YAVAŞLATILMASI İLE ELEKTRO-OPTİK KİPLENİM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

7.1 Giriş

Bir optik arabellek ışığı geçici olarak depolayan ve optik sinyallerin zamanlamasını ayarlayan bir alettir. Optik gecikme hatları ve arabellekler optik haberleşme ağlarının ve bilgi işleme sistemlerinin temelini oluşturmaktadır (Tucker vd. 2005). En pratik arabellek sistemleri optik anahtarlar içeren fiber gecikme hatlarıdır. Fakat bu sistemlerin kullanımı ebatlarından ötürü pratik değildir. Fotonik kristal tabanlı sistemler ise çip üzerine entegre edilebilir olmaları bakımından oldukça kompakttır, oda sıcaklığında çalışırlar, ultra hızlı tepki gösterirler, düşük grup hızlı ayarlanabilir bant genişliklerine sahiptirler ve grup hız dağılımları düşüktür (Baba vd. 2008).

Bu çalışmada, delikleri kırılma indisi 1.6 olan elektro-optik bir polimer (Luo vd. 2006) ile dolu bir çizgi kusurlu Si fotonik kristal dilim ele alınmıştır ve çizgi kusuru çevresindeki ilk sıra delikler ışığın ilerleme doğrultusu boyunca kaydırılarak ışığın hızı yavaşlatılmıştır. Geniş bir aralıkta kaydırma yapılarak dağınım eğrisinin özellikleri incelenmiştir. Deliklerin $\delta x=0.22a$ ile $\delta x=0.27a$ arasında kaydırılması ile ortalama grup indisi değerleri 69 ile 339 arasında değişiklik gösteren yavaş ışık rejimi elde edilmiştir. Bu çalışmada öncelikli olarak üç boyutlu, delikleri polimer dolu havada asılı fotonik kristal dilimde yavaş ışık özellikleri optimize edilmiştir. İkinci olarak, yavaş ışık etkisi ile yerel alan etkisinin artırılması ve yerel alanın yarattığı kırılma indisi değişimi açığa çıkarılmıştır. Son olarak, gerilim uygulanması ile yavaş ışığın kiplenimi, frekansın kayması ve iletimin kontrolü açılarından incelenmiştir. Optik arabellek performansı, gecikme süresi, maksimum depolama kapasitesi ve depolanan bitin fiziksel boyutları açılarından incelenmiştir.

7.2 Optik Arabelleklerin Performansını Tanımlayan Parametreler

Işığın hızının yavaşlatılması yerel durum yoğunluklarını artırarak doğrusal olmayan optik süreçleri geliştirmektedir (Soljacic vd. 2004). Grup hızının azalması ile doğrusal

olmayan etkiler artış göstermektedir. Işığın hızının yavaşlatılması ile etkin ikinci dereceden alınganlık polimerin ikinci dereceden alınganlığından çok daha büyük değer almaktadır. Fotonik kristal içerisinde ışık yavaşlatılarak etkin ikinci dereceden alınganlık değeri oldukça artırılabilir. Fotonik kristal içindeki etkin ikinci dereceden alınganlık ile polimerin ikinci dereceden alınganlığı arasındaki ilişki,

$$\chi_{PC}^{<2>} = f^3 \chi_{polimer}^{<2>} \quad (7.1)$$

ile verilmektedir. Burada $\chi_{polimer}^{<2>}$ polimerin ikinci dereceden alınganlığı, f yerel alan çarpanıdır. f,

$$f = \sqrt{n_G^{PC} / n_G^{polimer}} \quad (7.2)$$

ile tanımlıdır. Pockels etkisinden dolayı dışardan uygulanan gerilim ile polimerin kırılma indisinde değişim gözlenmektedir. Bu değişim (Brosi vd. 2008),

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_{pol}^3 \gamma_{33} f^3 \frac{U}{d} \quad (7.3)$$

ile verilmektedir. Burada U modüle edilen gerilim, d elektrotlar arasındaki uzaklıktır. Fotonik kristal örgüsünün genişliği 8a olduğundan d mesafesi 6.42 μm olarak hesaplanmıştır. Denklem (7.3)'den anlaşıldığı gibi fotonik kristalin içerisinde ışık ne kadar yavaş hareket ederse grup indisi o kadar yüksek ve yerel alan çarpanında artış o kadar fazla olur. Bu da, gerilim uygulanması ile kırılma indisinde daha fazla değişim olduğu anlamındadır.

Optik arabelleklerin performansını gösteren gecikme süresi, arabellek kapasitesi, bit uzunluğu gibi bazı parametreler bulunmaktadır. Gecikme süresi (depolama süresi),

$$T_S = L n_G / c \quad (7.4)$$

ile verilir. Burada L fotonik kristal arabelleğin uzunluğu, c ışığın vakumdaki hızı, n_G ortalama grup indisidir.

Arabellek kapasitesi, maksimum depo edilebilen bit sayısıdır ve gecikme süresi ile bant genişliğinin çarpımına eşittir (Long vd. 2010):

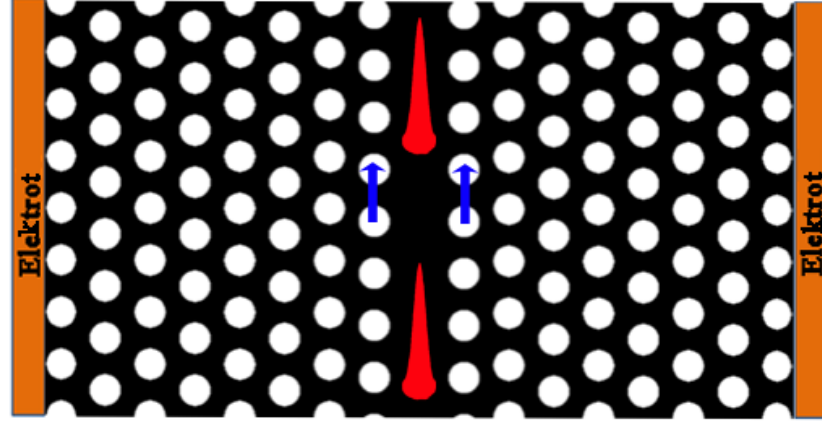
$$C = T_s B = \frac{L}{2a} n_G \Delta \omega \quad (7.5)$$

Diğer bir önemli parametre depolanan bitin fiziksel uzunluğudur ve $L_{\text{bit}}=L/C$ olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada grup indisleri çok yüksek, yüksek ve orta değerlerde olan üç farklı fotonik kristal tasarımı için yavaş ışık özellikleri incelenerek gerilim altında kiplenim performansı araştırılmış ve yapılar arasında karşılaştırma yapılmıştır.

7.3 Fotonik Kristal Dilimin Yapısı ve Modelleme

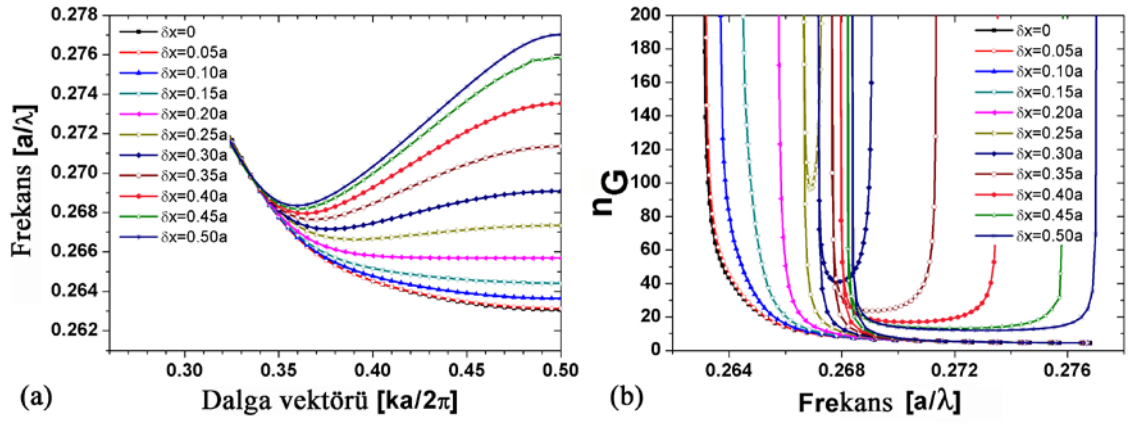
Üçgen örgülü W1 çizgi kusurlu fotonik kristal dilim yapısı ele alınmıştır ve deliklerin içi kırılma indisi 1.6 olan bir polimer ile doldurulmuştur (Luo vd. 2006). Elektrotlar fotonik kristal örgüsünün her iki yanına yerleştirildiğinde polimerin elektro-optik katsayısı $\gamma_{33}=150$ pm/V olarak verilmektedir (Luo vd. 2006). Deliklerin yarıçapı $0.30a$ ve fotonik kristal dilimin kalınlığı $0.53a$ alınmıştır (a , örgü sabiti= 415 nm). Çizgi kusuru etrafındaki ilk sıra delikler şekil 7.1’de mavi okla gösterilen doğrultu boyunca kaydırılarak ışığın hızı yavaşlatılmıştır. Bant diyagramları üç boyutlu düzlem dalga açılımı yöntemi ile hesaplanmıştır (Johnson vd. 2001).



Şekil 7.1 İncelenen fotonik kristal yapısı
Dalga kılavuzu boyunca ilerleyen atmalar kırmızı renkte gösterilmiştir.

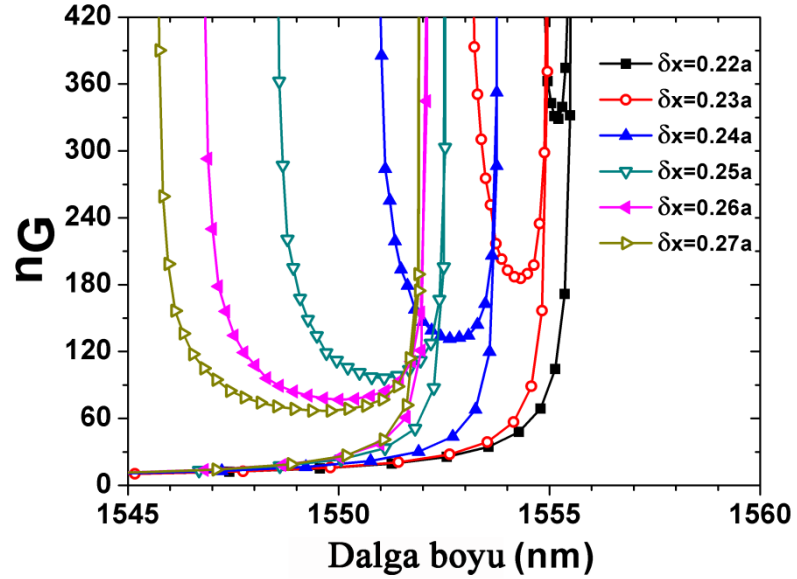
7.4 Fotonik Kristal Dilimin Yavaş Işık Performansı

Önerilen fotonik kristal dilim 415 nm’lik fotonik bant aralığında bir çift, bir tek olmak üzere iki kipe sahiptir. Işık çizgisi altında, $0.263(a/\lambda)$ ile $0.282(a/\lambda)$ frekansları arasında TE-tipi fotonik bant aralığı bulunmaktadır. Işığın hızının yavaşlatılması için çizgi kusuru çevresindeki ilk sıra delikler ışığın geliş doğrultusu boyunca kaydırılmıştır. Kaydırmalar “ δx ” harfi ile gösterilmiştir. Dalga kılavuzu eksenine boyunca simetri olduğundan “ δx ” 0 ile $0.50a$ arasında değiştirilmiştir. Kılavuz kip, indis ve bant aralığı kılavuzlu olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. İlk sıra delikler kaydırıldıkça bant aralığı kılavuzlu kısmın frekansı artmaktadır. $\delta x=0.20a$ için bant oldukça düzleşmekte, daha yüksek kaydırma değerlerinde bant aralığı kılavuzlu kısım yukarıya doğru bükülmektedir. Kayma miktarı arttıkça ortalama grup indisi değerleri artmakta, bant genişliği ise azalmaktadır.



Şekil 7.2.a “ δx ” kaymaları ile kılavuz kipin, b. grup indisi-frekans eğrisinin değişimi

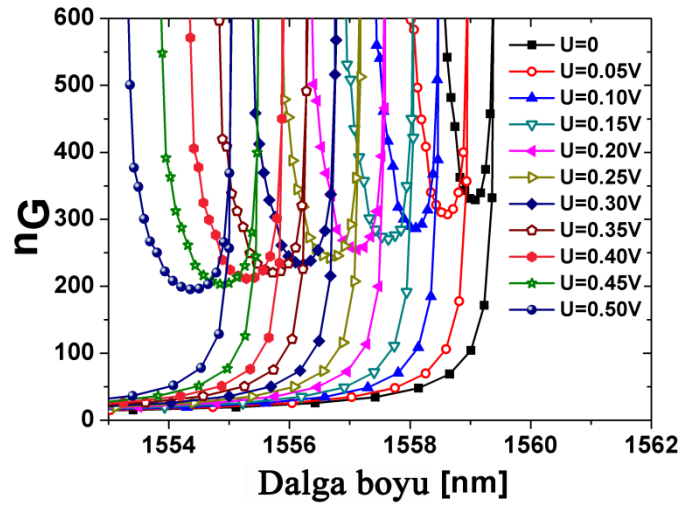
Yavaş ışık rejimi için en uygun bölge $\delta x=0.22a$ ile $\delta x=0.27a$ kaymaları arasına denk düşen bölgedir (Şekil 7.3). Bu bölgede grup indisi 69 ile 339 arasında, bant genişliği 0.4 nm ile 2.5 nm arasında değişmektedir. $\delta x=0.22a$ için normalize gecikme-bant genişliği çarpanı 0.085, $\delta x=0.27a$ için ise 0.114 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.3 $\delta x=0.22a$ - $0.27a$ kaymaları için grup indisi-dalga boyu eğrisinin değişimi

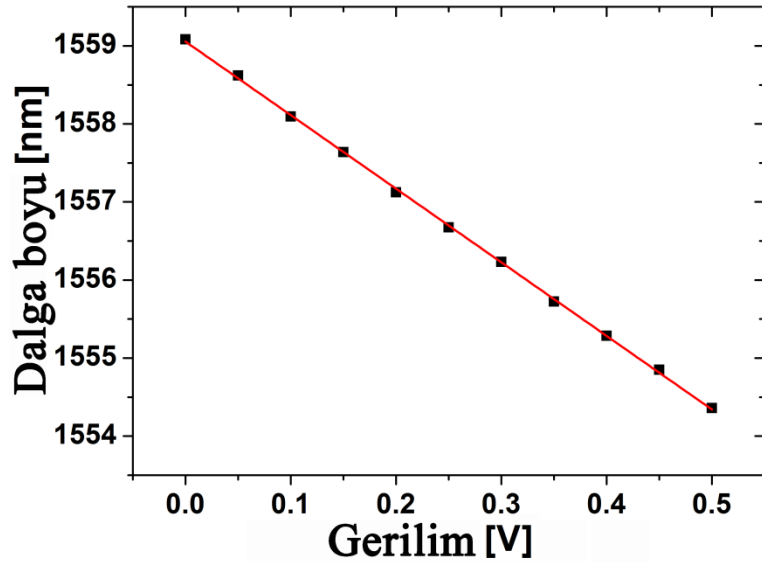
7.5 İlk Sıra Delikleri 0.22a Kaydırılmış Fotonik Kristal Dilimin Kiplenim Performansı

Ortalama grup indisi değeri 339 olan, çizgi kusuru etrafındaki ilk sıra delikleri $\delta x=0.22a$ kadar kaydırılmış fotonik kristal dilim için gerilim altında kiplenim karakteristiği bu bölümde incelenmiştir. Bu fotonik kristal yapısı için grup indisi değeri yüksek olduğundan yerleştirilmiş alan çarpanı değeri de yüksektir. Denklem (7.2)'ye göre f değeri 14.56 olarak elde edilmiştir. Uygulanan gerilim 0.5 V'a doğru arttıkça ortalama grup indisi değeri 201.5'e kadar azalmakta ve bant genişliği 0.8 nm'ye kadar artış göstermektedir (Şekil 7.4).



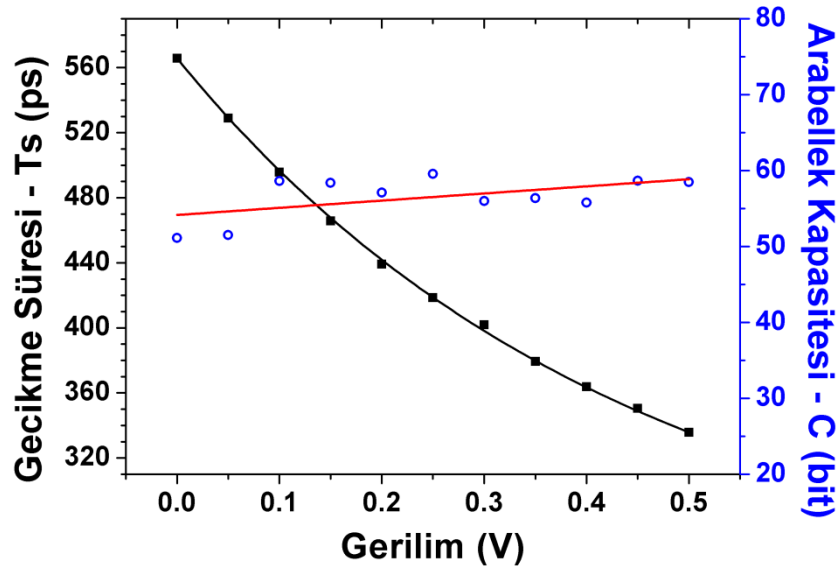
Şekil 7.4 Gerilim kiplenimi altında grup indisi karakteristikleri

Yavaş ışık bölgesindeki merkez dalga boyunun uygulanan gerilimle değişimi şekil 7.5'te verilmiştir. Uygulanan gerilim arttıkça merkez dalga boyunun spektral konumu doğrusal olarak azalmaktadır. Bu doğrunun eğiminden kiplenim duyarlılığı 9.45 nm/V olarak bulunmuştur. Bu duyarlılık değeri, çizgi kusuru etrafındaki polimer dolu delikleri optimize edilmiş FK dilim yapısından (Long vd. 2010) daha fazladır.



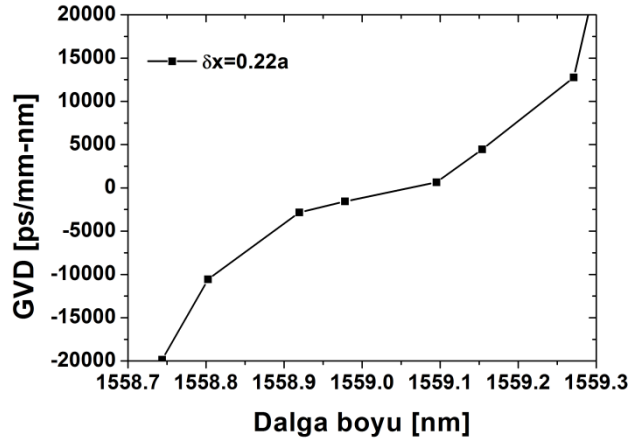
Şekil 7.5 Yavaş ışık bölgesinin merkez dalga boyunun gerilim ile değişimi

Uygulanan gerilim 0.5 V'a kadar artırıldığında, gecikme süresi Şekil 7.6'dan görüldüğü gibi 565.7 ps'den 335.8 ps'ye azalmaktadır. Bu azalış parabolik bir eğri biçimindedir. Bununla birlikte, optik arabellek kapasitesi ve bit uzunluğu gerilimle sırasıyla 55 bit ve 9 μm civarında kalmaktadır. Böylelikle, gecikme süresi artırılır veya azaltılırken optik arabellek kapasitesi ve bit uzunluğu neredeyse değişmemektedir.



Şekil 7.6 $\delta x=0.22a$ kaydırılmış delikler için gecikme süresi ve optik arabellek kapasitesinin gerilim ile değişimi

İlk sıra delikleri $\delta x=0.22a$ kaydırılmış çizgi kusurlu fotonik kristal dilim tasarımının grup hızı değeri oldukça düşük, elektro-optik kipleme duyarlılığı oldukça yüksektir. Bu tasarımın optik arabelleklerde etkin kullanımı için grup hız dağılımı özellikleri de incelenmelidir. Şekil 7.7’de bu tasarımın grup hız dağılımı spektrumu görülmektedir. Yavaş ışık bant aralığı olarak seçilen $\pm 10 n_{Gmin}$ sınırları olan 1558.8 nm ile 1559 nm aralığında grup hız dağılımı kabaca $\pm 10^5$ ps/(nm-mm) arasında değişmektedir. 0.18 nm aralığında bile grup hız dağılımı ± 3000 ps/(nm-mm) arasındadır. Bu elektro-optik kipleme tasarımının grup hız dağılımı değeri oldukça yüksek olduğundan, FK yapısının kaydırma oranı ve birim hücre parametresi değeri değiştirilerek kipleminin kullanılabilirliği artırılmaya çalışılmıştır⁷.

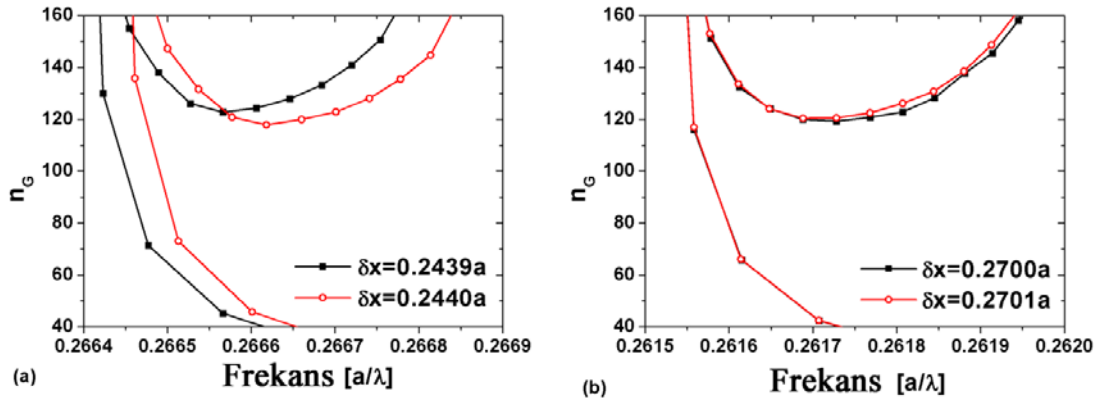


Şekil 7.7 $\delta x=0.22a$ kaydırılmış delikler için grup hız dağılımı spektrumu

7.6 İlk Sıra Delikleri 0.27a Kaydırılmış ve Örgü Parametresi Genişletilmiş Fotonik Kristal Dilimin Kiplenim Performansı

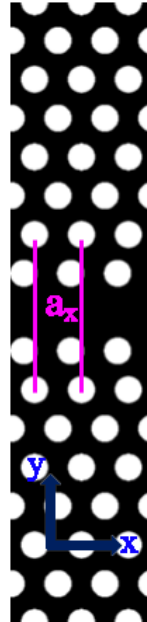
Ortalama grup indisi 122.26 olan $\delta x=0.244a$ konfigürasyonu elektro-optik kiplenim özelliklerinin incelenmesi için seçilmiştir. Fakat şekil 7.8.a'dan görüldüğü gibi bu kayma değerindeki grup indisi kayma miktarındaki ufak bir değişim altında oldukça çok değişmektedir. Dolayısıyla fabrikasyon hatalarına karşı toleransı çok düşüktür.

⁷Bu çalışma, SCI kapsamına giren uluslararası Acta Physica Polonica A adlı dergiye kabul edilmiştir.



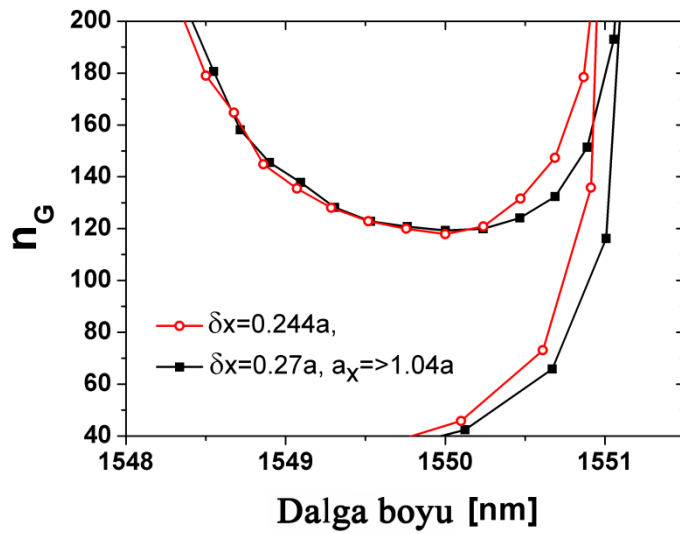
Şekil 7.8 İlk sıra delikleri a. $\delta x=0.244a$, b. $\delta x=0.27a$ kaydırılmış fotonik kristal yapısı için $\Delta\delta x=0.001a$ kayma değişimi altında grup indisi eğrileri

Fotonik kristalin birim hücresi ışığın geliş doğrultusu boyunca $0.04a$ kadar genişletilerek (şekil 7.9) aynı ortalama grup indisi değerine $\delta x=0.27a$ parametresi ile ulaşılmıştır. Süper hücrenin $1.04a$ genişletilmiş hali şekil 7.9’da verilmiştir. $\delta x=0.27a$ ve $a_x=1.04a$ için ise şekil 7.8.b’den görüldüğü üzere $\Delta\delta x=0.001a$ kayma altında frekansta ve bant genişliğindeki değişimler çok daha azdır. Bu durum süper hücreyi “x” doğrultusunda bir miktar genişletmenin avantajlı olduğunu göstermektedir.



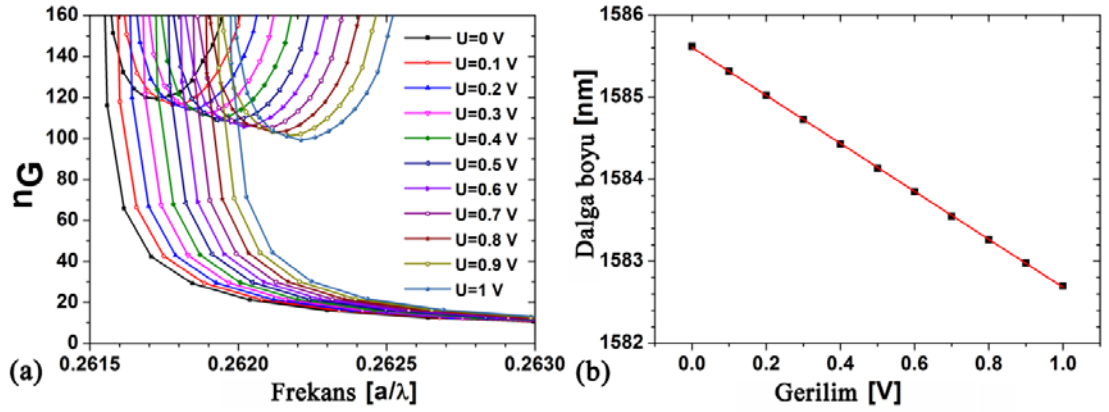
Şekil 7.9 $\delta x=0.27a$ kayma için birim hücresi (a_x) $1.04a$ ’ya genişletilmiş süper hücre yapısı

$\delta x=0.27a$, $a_x=1.04a$ yapısının fabrikasyon açısından daha elverişli olmasının yanında şekil 7.10'daki grup indisi-dalga boyu grafiğinden de görüldüğü gibi bant aralığı daha geniştir. Şekil 7.10'da grup indisi eğrilerinin üstüste çakışması için yavaş ışık bölgesindeki grup indisinin minimum değeri 1550 nm'de olacak biçimde örgü parametresi değeri ayarlanmıştır. Minimum grup indisinin ± 10 aralıkta değiştiği spektral genişlik bant aralığı olarak alındığında ve örgü parametresinin 415 nm olduğu hatırlandığında, $\delta x=0.244a$ için bant aralığı 1.21 nm iken $\delta x=0.27a$, $a_x=1.04a$ için 1.45 nm olarak bulunmuştur.



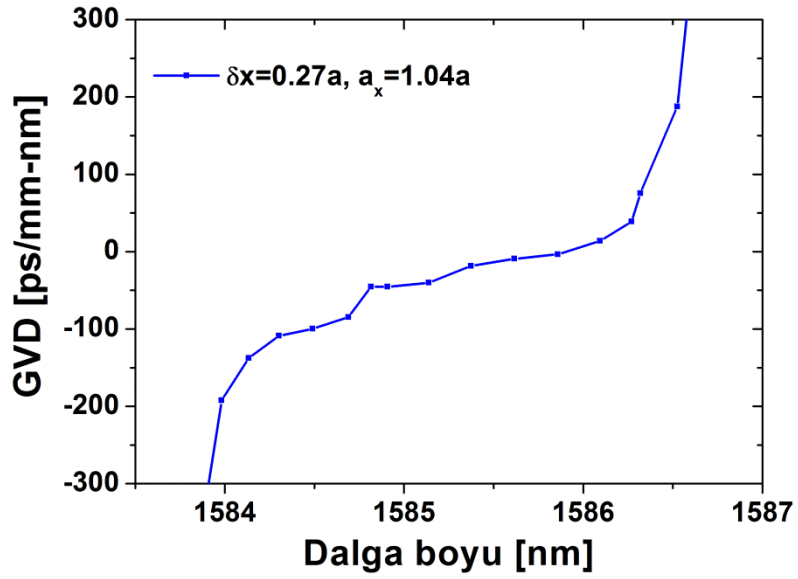
Şekil 7.10 İlk sıra delikleri $\delta x=0.244a$ ve $\delta x=0.27a$ ($a_x=1.04a$) kaydırılmış fotonik kristal yapısı için grup indisi-dalga boyu grafiği

Bu yapı için yerel alan çarpanı değeri 9.55 olarak hesaplanmıştır. Gerilim uygulandıkça kırılma indisi değeri azalmakta ve grup indisi eğrisinin merkezinin frekansı artış göstermektedir (Şekil 7.11.a). Yavaş ışık bölgesinin merkez dalga boyunun gerilim ile değişimi şekil 7.11.b'de gösterilmiştir. Bu değişim tamamen doğrusaldır, dolayısıyla herhangi bir gerilim değerinde ışığın ne kadar geciktirileceği kolayca belirlenebilir. Doğrunun eğiminden kiplenim duyarlılığı 2.92 nm/V olarak bulunmuştur. Bu duyarlılık değerinin, ilk sıra delikleri $\delta x=0.22a$ kaydırılmış elektro-optik aletten daha düşük olması beklenilir bir durumdur; çünkü ortalama grup indisi değeri daha düşüktür. İlerleyen dalgada gecikme yaratabilmek için bu konfigürasyonda daha yüksek gerilim uygulamak gerekmektedir.



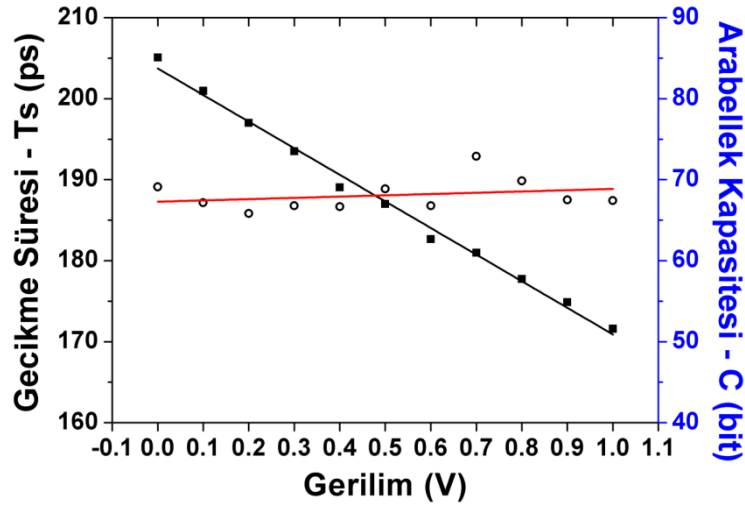
Şekil 7.11 İlk sıra delikleri $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı
a. Grup indisi-frekans grafiği, b. yavaş ışık bölgesinin merkez dalga boyunun gerilimle değişimi

Şekil 7.12’de ilk sıra delikleri $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ çizgi kusurlu fotonik kristal dilime ait grup hız dağılımı spektrumu gösterilmektedir. Grup hız dağılımının sıfır olduğu nokta grup indisinin minimum olduğu noktaya denk düşmektedir. Grup indisi değerinin yüksek olduğu dalga boylarında grup hız dağılımı da yüksektir. Bu fotonik kristal yapının $\pm 10 n_{Gmin}$ yavaş ışık aralığında, grup hız dağılımı ± 40 ps/(mm.nm) olarak değişim göstermektedir. Eğer $\beta_2=10^5(a/2\pi c^2)$ ultra düşük dağılım sınırı olarak seçilirse, bu değer Wang vd. (2011)’in atadığı değerden 10 kat daha düşüktür, $\lambda=1585$ nm alınıp $(2\pi c/\lambda^2)$ ile çarpıldığında ultra düşük dağılım ps/(mm.nm) cinsinden ± 55 ps/(mm.nm) olarak hesaplanır. $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı için ± 1.55 nm bant aralığında $D_\lambda \pm 55$ ps/(mm.nm) sınırları içerisindedir. Grup hız dağılımı spektrumu pozitif ve negatif GVD frekans aralığı içerdiğinden bu yapı dağılımın telafi edilmesi (Mori vd. 2007) uygulamasında da kullanılmaya elverişlidir.



Şekil 7.12 İlk sıra delikleri $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısının grup hız dağılımı spektrumu

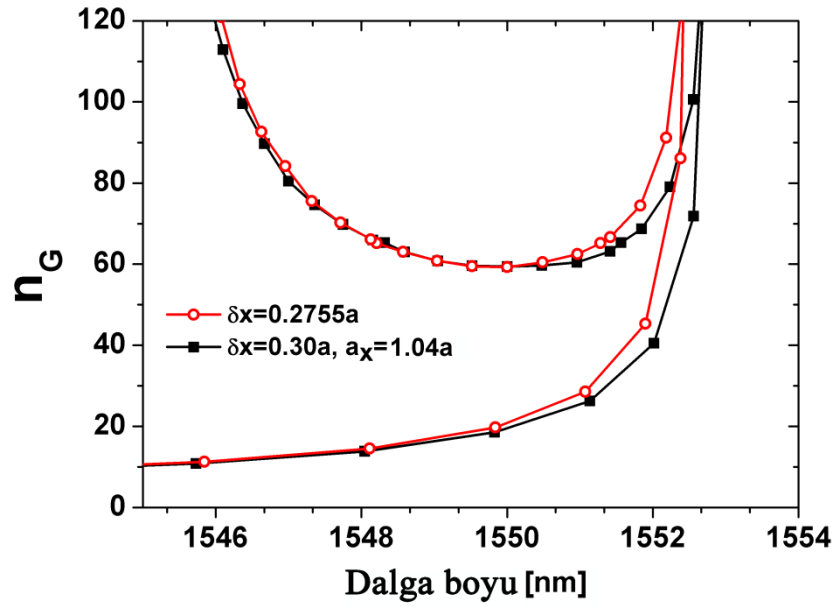
Her bir gerilim değerine ait ortalama grup indisi, ortalama bant genişliği ve normalize gecikme-bant genişliği çarpanı değerleri hesaplanarak gecikme süresi, arabellek kapasitesi ve bit uzunluğu değerleri bulunmuştur. Şekil 7.13'den görüldüğü gibi uygulanan gerilim 1 V'a kadar artırıldığında gecikme süresi doğrusal olarak azalmaktadır. Hiç gerilim uygulanmadığında gecikme süresi 205 ps iken gerilim uygulandıkça 171 ps'ye düşmektedir. Optik arabellek kapasitesi ve bit uzunluğu ise sırasıyla 70 bit ve 7.2 μm civarında değişim göstermektedir. Şekil 7.13 ile şekil 7.6 karşılaştırıldığında daha düşük grup indisine sahip yapılarda gecikme süresinin paraboloiden doğrusala değişim göstererek azaldığı göze çarpmaktadır.



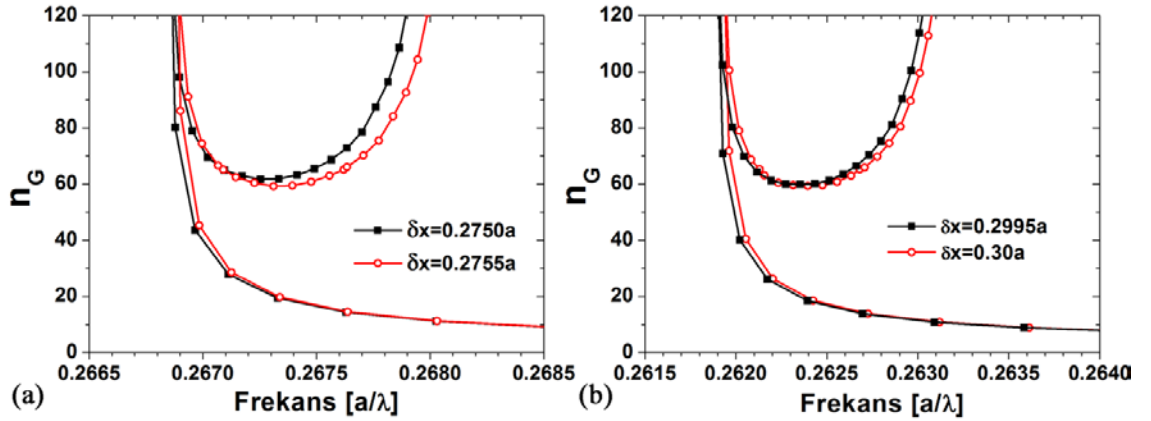
Şekil 7.13 $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı için gecikme süresi ve optik arabellek kapasitesinin gerilim ile değişimi

7.7 İlk Sıra Delikleri $0.30a$ Kaydırılmış ve Örgü Parametresi Genişletilmiş Fotonik Kristal Dilimin Kiplenim Performansı

Son olarak, ortalama grup indisi değeri kesim 7.6’da incelenmiş yapının yarısı olan ($\langle n_G \rangle = 61.3$), ilk sıra delikleri $\delta x=0.2755a$ kaydırılmış fotonik kristal yapısı elektro-optik kiplenim performansı açısından incelenmiştir. Burada da süper hücre “x” doğrultusu boyunca bir miktar ($0.04a$) genişletilmiştir. Bu durumda, ilk sıra delikleri $\delta x=0.30a$ kadar kaydırıldığında ve süper hücre “x” doğrultusunda $0.04a$ kadar uzatıldığında $\delta x=0.2755a$ yapısı ile aynı ortalama grup indisi değerine erişilmektedir (Şekil 7.14). Minimum grup indisinin $\pm 10\%$ aralıkta değiştiği spektral genişlik bant aralığı olarak alınırsa ve örgü parametresinin 415 nm olduğu hatırlandığında, $\delta x=0.2755a$ için bant aralığı 3.08 nm iken $\delta x=0.30a$, $a_x=1.04a$ için 3.74 nm olarak bulunmuştur. $\delta x=0.30a$, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı şekil 7.15’den görüldüğü gibi fabrikasyon hatalarına karşı daha az duyarlıdır.



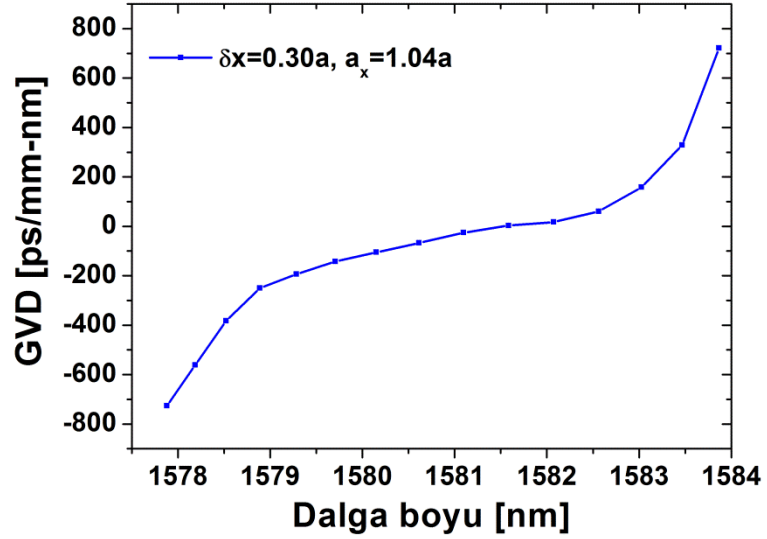
Şekil 7.14 İlk sıra delikleri $\delta x=0.2755a$ ve $\delta x=0.30a$ ($a_x=1.04a$) kaydırılmış fotonik kristal yapısı için grup indisi-dalga boyu grafiği



Şekil 7.15 İlk sıra delikleri a. $\delta x=0.2755a$, b. $\delta x=0.30a$ kaydırılmış fotonik kristal yapısı için $\Delta\delta x=0.005a$ kayma altında grup indisi eğrisinin değişimi

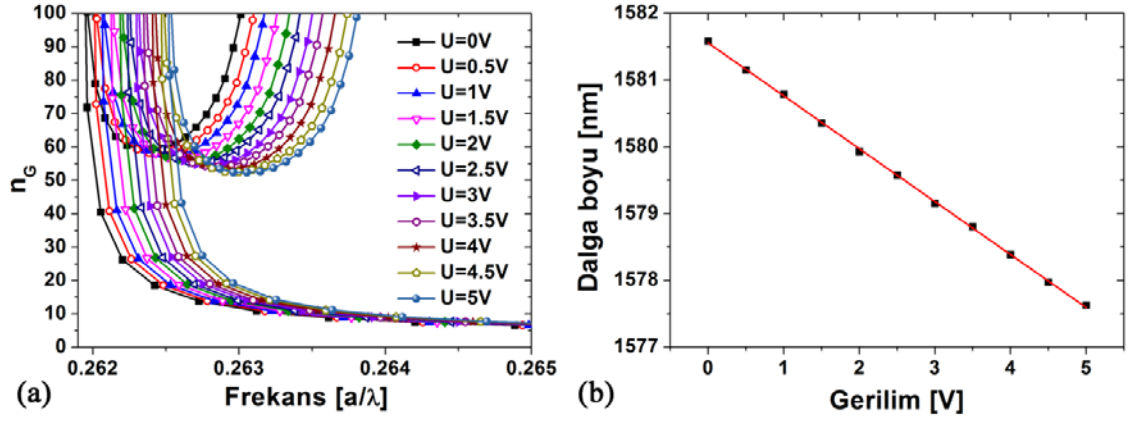
Şekil 7.16'da ilk sıra delikleri $\delta x=0.30a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal dilim yapısına ait grup hız dağılımı spektrumu görülmektedir. $\pm 10 n_{Gmin}$ olarak belirlenen 3.2 nm'lik yavaş ışık bölgesinde grup hız dağılımı ± 150 ps/(mm.nm) aralığında değişmektedir. Bu değer $\delta x=0.27a$, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısının yavaş ışık bölgesindeki grup hız dağılımından daha büyük olması $\delta x=0.30a$ FK yapısı için yavaş ışık bant aralığının daha geniş olmasından ötürüdür. 1.5 nm bant aralığı seçilirse, bu tasarım için $D_\lambda \pm 30$ ps/(mm.nm) aralığında değişim göstermektedir. $D_\lambda=\pm 55$

ps/(mm.nm) ultra düşük GVD sınırı olarak belirlenirse, bu yapı yavaş ışık bölgesi merkezi civarındaki 1.95 nm’lik bant genişliğinde ultra düşük dağınım göstermektedir. Grup hız dağınımı spektrumu pozitif ve negatif GVD frekans aralığı içerdiğinden bu yapı dağınımın telafi edilmesi (Mori vd. 2007) uygulamasında da kullanılabilir.



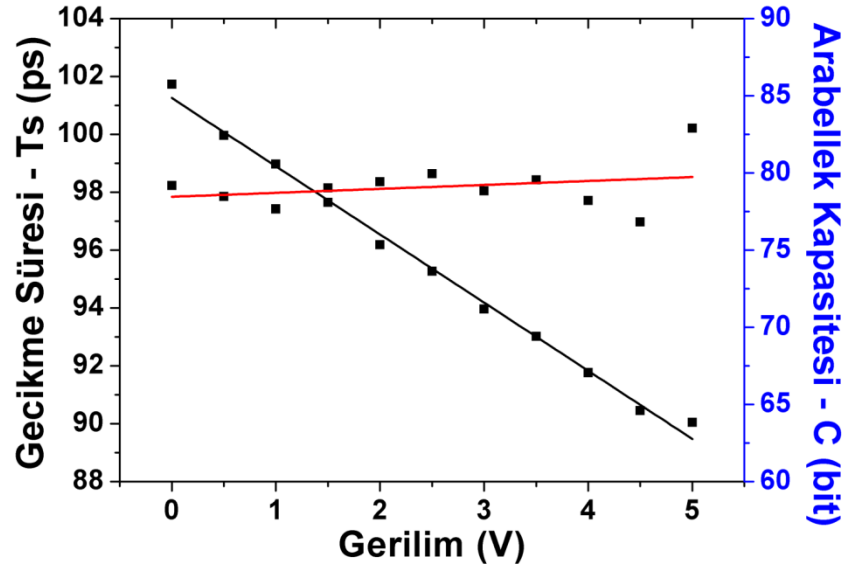
Şekil 7.16 İlk sıra delikleri $\delta x=0.30a$ kaydırılmış kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısının grup hız dağınımı spektrumu

Gerilim uygulandıkça grup indisi değeri azalmakta, bant genişliği ise artmaktadır (Şekil 7.17.a). Grup indisinin yavaş ışık bölgesindeki minimum olduğu dalga boyu gerilim ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Doğrunun eğiminden kiplenim duyarlılığı 0.79 nm/V olarak bulunmuştur (Şekil 7.17.b).



Şekil 7.17 İlk sıra delikleri $\delta x=0.27a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı için
a. grup indisi-frekans grafiği, b. yavaş ışık bölgesinin merkez dalga boyunun gerilimle değişimi

Şekil 7.18’den görüldüğü gibi ilk sıra delikleri $\delta x=0.30a$ kaydırılmış, $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı için gecikme süresi kiplenen gerilim ile doğrusal olarak azalmaktadır. Bu fotonik kristal tasarımının grup indisi daha düşük olduğundan gecikme süresi de daha azdır. Hiç gerilim uygulanmadığında gecikme süresi 102 ps iken gerilim uygulandıkça 90 ps’ye azalmaktadır. Fakat, bant genişliği daha fazla olduğundan $\delta x=0.30a$ tasarımı için optik arabellek kapasitesi $\delta x=0.22a$ ve $\delta x=0.27a$ tasarımlarına göre daha iyidir. Optik arabellek kapasitesi 78 bit, bit uzunluğu ise $6.2 \mu m$ civarında az bir değişim göstermektedir.



Şekil 7.18 $\delta x=0.30a$ kaydırılmış $a_x=1.04a$ fotonik kristal yapısı için gecikme süresi ve optik arabellek kapasitesinin gerilim ile değişimi

7.8 Sonuç

Delikleri $0.30a$ yarıçapında, dilim kalınlığı $0.53a$ olan Si çizgi kusurlu fotonik kristal dilim yapısında çizgi kusuru çevresindeki delikler ışığın ilerleme doğrultusu boyunca kaydırılarak yavaş ışık rejiminin olduğu bölge belirlenmiş, ortalama grup indisi, bant genişliği, normalize gecikme-bant genişliği çarpanı ve grup hız dağılımı değerleri bulunmuştur. Ortalama grup indisleri büyükten küçüğe sırasıyla 339, 122 ve 61 olan üç farklı fotonik kristal tasarımı yavaş ışık özellikleri ve elektro-optik kiplenim karakteristikleri açısından incelenmiştir. Süper hücrenin “x” doğrultusunda genişletilmesi ile aynı grup indisi değerine daha geniş bant aralığında erişildiği ve fabrikasyon açısından bu yapının çok daha toleranslı olduğu tespit edilmiştir. Grup hız dağılımı karakteristiği bakımından üç tasarım karşılaştırılırsa, en düşük grup hız dağılımını $\delta x=0.30a$, $a_x=1.04a$ yapısı göstermektedir. Grup indisi değeri arttıkça grup hız dağılımı da artış göstermektedir. Üç tasarıma ait gecikme süresi, arabellek kapasitesi ve bit uzunluğu değerleri kıyaslandığında, grup indisi değeri azaldıkça gecikme süresinin azaldığı, arabellek kapasitesinin arttığı ve arabellek kapasitesi ile ters orantılı olan bit uzunluğunun azaldığı gözlenmiştir. Yüksek grup indisi değerlerinde gecikme süresi parabolik olarak azalırken, daha düşük grup indislerinde bu azalış doğrusaldır. Grup indisi değeri yüksek olduğunda daha düşük gerilimle daha fazla gecikme sağlanabilir. Ortalama grup indisi 339 olan yapı için optik arabellekte sabit bir dalga boyunda optik verinin iletim-kesimi, nispeten daha düşük grup indisi değerlerine sahip elektro-optik modülatör tasarımlarında ise iletim-kesim veya geciktirmesi yapılabilir

8. SONUÇ

Günümüzde fotonik kristaller, ışığın dalga boyu ölçeğinde kontrolü için en uygun platformlardan biri olarak düşünülmektedir. Bu tez çalışmasının amacı, fotonik kristal temelli üstün nitelikli optik aletlerin geliştirilmesi ve bu yapılarda ışığın hızının azaltılmasının optik haberleşme alanında uygulamalarının gerçekleştirilmesidir. Bu amaçla gerçekleştirilen sayısal hesaplamalarda düzlem dalga açılımı yöntemi ve zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar tezin dördüncü bölümünde başlamaktadır. Bu bölümde fotonik kristal yapılarda örgü simetrisinin, örgü noktalarının doluluk oranı, çap oranı ve şeklinin fotonik bant yapısı üzerine etkisi ele alınmıştır. Çok sayıda serbestlik derecesi sunduğundan ötürü hibrit bir örgü yapısı ile çalışılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, yapısal değişiklik hibrit örgüyü oluşturan alt örgü noktalarından yalnız birine uygulanmıştır. Grafit örgüde geniş TE fotonik bant aralıkları, üçgen örgüde ise geniş TM fotonik bant aralıkları bulunmaktadır. Bu özelliklerden yararlanmak için üçgen örgü noktalarının grafit örgü noktalarının merkezine yerleştirildiği hibrit üçgen-grafit örgü yapısı ele alınmıştır. Seçilen doluluk ve çap oranı değerlerinde üçgen örgü noktaları halka şeklinde tasarlanarak iç ve dış deformasyon oluşturulmuştur. Dairesel delikli ve içi dairesele çubuklu hibrit üçgen-grafit örgü yapısında geniş bir doluluk ve çap oranı değerlerinde kutupluluktan bağımsız düz bantların bulunduğu tespit edilmiştir. Geniş bir k dalga vektörü bölgesinde bandın düzlüğünü koruması seçilen hibrit üçgen-grafit örgüyü, bandın düzlüğünün Brillouin bölgesi uçlarında korunduğu mikrolazer uygulamalarında kullanılan tipik fotonik kristal örgülerden üstün kılmaktadır. Bu sebeple incelenen yapı optik kazanç artırımı ve düşük eşikli lazerleme uygulamaları için oldukça elverişlidir.

Fotonik kristal içerisinde oluşturulan kusurlara ışığın bağlaştırılmasıyla, geleneksel optik aletlerin boyutunun $1/1000$ ile $1/10000$ 'i arasında değişen boyutlarda ultra küçük fotonik aletler geliştirilmektedir. Tez kapsamında çalışılan fotonik kristal temelli optik aletler tezin beşinci bölümünde ele alınmıştır. Çizgi kusurlu Si dilim FK yapısında bandın kesilim dalga boyu ile kırılma indisi arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanılarak

bir kırılma indisi algılayıcısı tasarlanmıştır. Sadece merkeze açılan optimize edilmiş çaptaki delikler sıvı ile doldurulduğunda kırılma indisi algılayıcısının duyarlılığı 5.3 kat artış göstermiştir. Bu sonuç sadece çizgi kusuru içerisinde delikler açarak seçici doldurma yapmanın tercih edilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Optik güç bölücüler optik entegre devrelerin temel yapı taşlarından biridir. Literatürde çalışılan $1 \times N$ güç bölücülerde ya T ve Y-eklemler veya yönlü bağlaştırmalar kullanılmıştır. Bu çalışmada ise bir Y-eklem ve iki yönlü bağlaştırmacı kullanılarak bir fotonik kristal 1×4 güç bölücü tasarlanmıştır. Çıkış kapılarında çapraz girişi azaltmak ve ışığı girişe paralel terk ettirmek için yönlü bağlaştırmaların ucuna 60° bükümlü dalga kılavuzları eklenmiştir. Oldukça yüksek iletimle (%88.5) ışık dört çıkışa eşit olarak bölünmüştür.

Işığın hızını azaltmak ışık-madde etkileşimi artırarak fotonik kristal temelli optik aletlerin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. Yavaş ışığın elektro-optik kipleme, optik anahtarlama, optik sinyal işleme vb. uygulamalarda oldukça avantajlı olduğu bilinmektedir. Fotonik kristal yapılarda ışığın hızını yavaşlatmanın bir yolu çizgi kusurunu çevreleyen örgü noktalarının özelliklerini değiştirmektir. Tezin altıncı bölümünde, ilk olarak, silika içine gömülü bir FKD yapısında çizgi kusurunu çevreleyen ilk ve ikinci sıra deliklerin kusura doğru ayrı ayrı veya beraber hareket ettirilmesinin yavaş ışık özellikleri üzerine etkisi detaylıca incelenmiştir. İkinci olarak, FKD yapısında halka şeklinde olan örgü noktaların sayısının, iç ve dış yarıçaplarının ve çizgi kusuruna doğru kaydırılmasının etkisi, çizgi kusurunun genişliği değiştirilmeden, ayrıntılı olarak incelenmiştir. Geniş bir bant aralığında, yüksek grup indisli ve düşük dağınımlı yavaş ışık FKD'ların geliştirilmesi için yapısal stratejiler ortaya konulmuştur. Bu bölümde ayrıca dielektrik içerisinde üçgen örgülü bir FK yapısı ele alınarak, süper hücrenin doğru tanımlanmamasının yavaş ışık özellikleri üzerine etkisi ortaya konulmuştur. Bu etkiler göz önüne alındığında, düzlem dalga açılımı yönteminde süper hücre tanımlanırken daha fazla dikkatin gösterilmesi gerektiği aşikârdır.

Optik haberleşme ağlarının ve bilgi işleme sistemlerinin temelini oluşturan optik gecikme hatları ve arabellekler, optik dalga paketlerini geçici olarak depolayarak

zamanlamayı ayarlayan aygıtlardır. Işığın yavaşlatıldığı ortamlarda etkin ikinci dereceden alınganlık değeri, elektro-optik malzemenin ikinci dereceden alınganlığından çok daha büyük bir değer almaktadır. Bu amaçla tezin yedinci bölümünde, önce 220 nm kalınlıklı dilim FKD yapısında çizgi kusuru çevresindeki delikler çizgi kusuru boyunca kaydırılarak ve birim hücre ışığın ilerleme doğrultusunda genişletilerek fabrikasyon hatalarına karşı dayanımlı ve düşük dağınımlı yavaş ışık rejimleri elde edilmiştir. Sonrasında, bu tasarımlar gecikme süresi, arabellek kapasitesi, bit uzunluğu gibi arabelleklerin performansını niteleyen parametreler açısından incelenmiştir. Ele alınan tasarımlardan grup indisi yüksek olan yapının optik arabelleklerde açma-kapama, daha düşük grup indisli yapıların ise açma-kapama ve geciktirme işlevleri için elverişli olduğu düşünülmektedir. Fotonik kristal yapılarda yavaş ışık araştırmalarının neticesinde geliştirilen optik aletler ile, anahtarlama, geciktirme, tamponlama, yönlendirme gibi işlemler çok düşük ebatlarda ve çok yüksek performansta gerçekleştirilebilecek ve bilgiyi taşıyan sinyal geniş bir bant aralığında en az bozulma ile işlenebilecektir.

KAYNAKLAR

- Anonymous. 2010. CrystalWave, PhotonDesign, <http://www.photond.com/>, Erişim Tarihi: 06.04.2012
- Anderson, C.M. and Giapis, K.P. 1996. Larger two-dimensional photonic band gaps. *Physical Review Letters*, 77,14, 2949-2952.
- Askari, M. 2011. High efficiency devices based on slow light in photonic crystals. Doktora tezi, Georgia Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, 145 s., Atlanta, A.B.D.
- Baba, T. 2008. Slow light in photonic crystals. *Nature Photonics* 2, 465-473.
- Badaoui, H., Feham, M. and Abri, M. 2012. Double bends and Y-shaped splitter design for integrated optics. *Progress in Electromagnetic Research Letters* 28, 129-138.
- Bougriou, F., Bouchemat, T., Bouchemat, M. and Paraire, N. 2011. Proceedings of the Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECFK) 1.
- Bowers, J., Burmeister, E. and Blumenthal, D. 2006. Optical buffering and switching for optical packet switching. *Photonics in Switching Conference* 1-3.
- Buswell, S.C., Wright, V.A., Buriak, J.M., Van, V. and Evoy, S. 2008. Specific detection of proteins using photonic crystal waveguides. *Optics Express* 16, 15949- 15957.
- Campbell, S.A. 2001. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*. 603 s., Minnesota, A.B.D.
- Carlsson, N., Ikeda, N., Sugimoto, Y., Asakawa, K., Takemori, T., Katayama, Y., Kawai, N. and Inoue, K. 2002. Design, nano-fabrication and analysis of near-infrared 2D photonic crystal air-bridge structures. *Optics and Quantum Electronics* 34, 123-131.
- Chang, K.P. and Yang, S.L. 2006. Photonic band gap of two-dimensional triangular photonic crystals with broken structural and rotational symmetries. *Journal of Applied Physics*, 100, 7, 073104 - 073104-6.
- Chung, K.B. and Yoon, J.S. 2003. Properties of a 1×4 optical power splitter made of photonic crystal waveguides. *Optical and Quantum Electronics* 35, 955-966.
- Dai, L. and Jiang, C. 2009. Ultrawideband low dispersion slow light waveguides, *Journal of Lightwave Technology* 27, 14, 2862-2868.
- Endo, T., Kerman, K., Nagatani, N., Takamura, Y. and Tamiya, E. 2005. Label-free detection of peptide nucleic acid–DNA hybridization using localized surface plasmon resonance based optical biosensor. *Analytical Chemistry* 77, 6976 - 6984.

- Fan, X., White, I. M., Shopova, S. I., Zhu, H., Suter, J.D. and Sun, Y. 2008. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review. *Analytica Chimica Acta* 620, 8–26.
- Frandsen, L.H., Lavrinenko, A.V., Fage-Pedersen, J. and Borel, P.I. 2006. Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties. *Optics Express* 14, 20, 9444-9450.
- Frascella, F, Ricciardi, S., Rivolo, P., Moi, V., , Giorgis, F., Descrovi, E., Michelotti, F., Munzert, P., Danz, N., Napione, L., Alvaro, M., and Bussolino, F. 2013. A fluorescent one-dimensional photonic crystal for label-free biosensing based on bloch surface waves. *Sensors* 13, 2011-2022.
- Galli, M., Bajoni, D., Patrini, M., Guizzetti, G., Gerace, D., Andreani, L.C., Belotti, M. and Chen, Y. 2005. Single-mode versus multimode behavior in silicon photonic crystal waveguides measured by attenuated total reflectance. *Physical Review B* 72, 125322-1-10.
- Ghaffari, A., Djavid, M., Monifi, F. and Abrishamian, M.S. 2008. Photonic crystal power splitter and wavelength multi/demultiplexer based on directional coupling. *Journal of Optics A: Pure Applied Optics* 10, 075203-1-7.
- Gomard, G., Drouard, E., Letartre, X., Meng, X., Kaminski, A., Fave, A., Lemiti, M. Garcia-Caurel, E. and Seassal, C. 2010. Two-dimensional photonic crystal for absorption enhancement in hydrogenated amorphous silicon thin film solar cells. *Journal of Applied Physics* 108, 123102-123110.
- Gomard, G., Meng, X., Drouard, E., Hajjam, K.E., Gerelli, E., Peretti, R., Fave, A., Orobitchouk, R., Lemiti, M. and Seassal, C. 2012. Light harvesting by planar photonic crystals in solar cells: the case of amorphous silicon. *Journal of Optics* 14, 024011-24022.
- Gomez-Iglesias, A, O'Brien, D., O'Faolain, L., Miller, A. and Krauss, T.F. 2007. Direct measurement of the group index of photonic crystal waveguides via Fourier transform spectral interferometry. *Applied Physics Letters* 90, 261107-261110.
- Hao, R., Cassan, E., Kurt, H., Roux, X.L., Marris-Morini, D., Vivien, L., Wu, H., Zhou, Z. and Zhang, X. 2010. Novel slow light waveguide with controllable delay-bandwidth product and ultralow dispersion. *Optics Express* 18,6, 5942-5950.
- Hou, J., Gao, D., Wu, H., Hao, R. and Zhou, Z. 2009. Flat band slow light in symmetric line defect photonic crystal waveguides. *IEEE Photonics Technology Letters* 21, 20, 1571-1573.
- Jiang, B., Zhou, W., Chen, W., Liu, A. and Zheng, W. 2012. Improved fake mode free planewave expansion and three planar-slab waveguides method, *Journal of Applied Physics* 111, 053103–53111.
- Joannopoulos, J.D., Maede, R.D and Winn, J.N. 2008. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, Princeton, NJ.

- John, S. 1987. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters* 58, 2486-2489.
- Johnson, S.G. and Joannopoulos, J.D. 2001. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a plane-wave basis. *Optics Express* 8, 3, 1733-190.
- Kang, C., Phare, C.T., Vlasov, Y.A., Assefa, S. and Weiss, S.M. 2010. Photonic crystal slab sensor with enhanced surface area. *Optics Express* 18, 27930-27937.
- Khurgin, J.B. 2005. Optical buffers based on slow light in electromagnetically induced transparent media and coupled resonator structures: comparative analysis. *Journal of Optical Society of America B* 22, 1062-1074.
- Kosaka, H., Kawashima, T., Tomita, A., Notomi, M., Tamamura, T., Sato, T. and Kawakami, S. 1998. Superprism phenomena in photonic crystals *Physical Review B*, 58, 16, R10 096-99.
- Krauss, T.F. 2007. Slow light in photonic crystal waveguides, *Journal of Physics D: Applied Physics* 40, 2666–2670.
- Krauss, T.F. 2008. Why do we need slow light?, *Nature Photonics* 2, 448-450.
- Kurt, H., Üstün, K. and Ayas, L. 2010. Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides, *Optics Express* 18, 26, 26965-26977.
- Li, J.T., White, T.P., O'Faolain, L., Gomez-Iglesias, A. and Krauss, T.F. 2008. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides. *Optics Express* 16, 6227-6232.
- Liang, J., Ren, L.-Y., Yun, M.-J., Han, X. and Wang, X.-J. 2011. Wideband slow light with ultralow dispersion in a W1 photonic crystal waveguide. *Journal of Applied Physics* 110, 063103-063111.
- Loncar, M., Doll, T., Vuckovic, J. and Scherer, A. 2000. Design and fabrication of silicon photonic crystal optical waveguides. *Journal of Lightwave Technology* 18, 10, 1402-1411.
- Lotfi, H., Granpayeh, N. and Schulz, S.A. 2012. Photonic crystal waveguides with ultra-low group velocity. *Optics Communications* 285, 2743-2745.
- Ma, J. and Jiang, C. 2008. Demonstration of ultra slow modes in asymmetric line-defect photonic crystal waveguides. *IEEE Photonics Technology Letters* 20, 1237-1239.
- McMillan, J.F., Yang X., Panoiu N.C., Osgood R.M, and Wong, C.W. 2006. Enhanced stimulated Raman scattering in slow-light photonic crystal waveguides. *Optics Letters* 31, 9, 1235-1237.

- Meade, R.D., Rappe, A.M., Brommer, K.M., Joannopoulos, J.D. and Alerhand, O.L. 1993. Accurate theoretical analysis of photonic bandgap materials. *Physical Review B* 1, 48, 8434–8437.
- Mekis, A., Chen, J.C., Kurland, I., Fan, S., Villeneuve, P.R. and Joannopoulos, J.D. 1996. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides. *Physical Review Letters* 77, 18, 3787-3790.
- Mori, D. and Baba, T. 2005. Wide band and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide, *Optics Express* 13, 23, 9398-9408.
- Notomi, N., Yamada, K., Shinya, A., Takahashi, T., Takahashi, C. and Yokohama, I. 2001. Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs, *Physical Review Letters* 87, 253902-1-4.
- O’Faolain, L., Yuan, X., McIntyre, D., Thoms, S., Chong, H., DelaRue, R.M. and Krauss, T.F. 2006. Low-loss propagation in photonic crystal waveguides. *Electronic Letters* 42, 1454-1455.
- O’Faolain, L., Schulz, S.A., Beggs, D.M., White, T.P., Spasenovi, M., Kuipers, L., Morichetti, F., Melloni, A., Mazoyer, S., Hugonin, J.P., Lalanne, P. and Krauss, T.F. 2010. Loss engineered slow light waveguides. *Optics Express* 18, 26, 27627-27638.
- Oskooi, A.F., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J.D. and Johnson, S.G. 2010. MEEP: A flexible free software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Computer Physics Communications* 181, 687-702.
- Park, Y., Drouard, E., El Daif, O., Letartre, X., Viktorovitch, P., Fave, A., Kaminski, A., Lemiti, M. and Seassal, C. 2009. Absorption enhancement using photonic crystals for silicon thin film solar cells, *Optics Express* 17, 16, 14312-14321.
- Petrov, A. and Eich, M. 2004. Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides, *Applied Physics Letters* 85, 21, 4866-4868.
- Pollock, C.R. 1995. *Fundamentals of Optoelectronics*, 596 s., Chicago, A.B.D.
- Qui, M. 2002. Effective index method for heterostructure-slab-waveguide-based two dimensional photonic crystals. *Applied Physics Letters* 81, 1163-1166.
- Rayleigh, J.W.S. 1888. On the remarkable phenomenon of crystalline reflexion described by Prof. Stokes, *Philosophical Magazine* 26, 256–265.
- Rezaei, B., Khalkhali, T.F., Vala, A.S. and Kalafi, M. 2009. Absolute band gap properties in two-dimensional photonic crystals composed of air rings in anisotropic tellurium background. *Optics Communications* 282, 2861–2869.
- Rindorf, L., Jensen, J.B., Dufva, M., Pedersen, L.H., Hoiby, P.E. and Bang, O. 2006. Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing. *Optics Express* 14, 8224 -8231.

- Sakoda K. 1998. Numerical study on localized defect modes in two-dimensional triangular photonic crystals. *Journal of Applied Physics* 84, 1210-1214.
- Saynatjoki, A., Mulot, M., Vynck, K., Cassagne, D., Ahopelto, J. and Lipsanen, H. 2008. Properties, applications and fabrication of photonic crystals with ring-shaped holes in silicon-on-insulator, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* 6, 42-46.
- Schneider, J.B. 2011. *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method*. 20s. Chicago, A.B.D.
- Schulz, S.A., O’Faolain, L., Beggs, D.M., White, T.P., Melloni, A. and Krauss, T.F. 2010. Dispersion engineered slow light in photonic crystals: a comparison. *Journal of Optics* 12, 104004-1-10.
- Settle, M.D., Engelen, R.J.P., Salib, M., Michaeli, A., Kuipers, L. and Krauss, T.F. 2007. Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth, *Optics Express* 15, 219-226.
- Shen, H.J. and Zhang, Q.L. 2011. Dispersionless slow light by photonic crystal slab waveguide with innermost elliptical air holes. *Optik* 122, 1174-1178.
- Susa, N. 2002. Large absolute and polarization-independent photonic band gaps for various lattice structures and rod shapes. *Journal of Applied Physics*, 91, 3501-3511.
- Taflove, A. and Hagness, S. C. 2000. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Artech House, 2. edition, A.B.D., 1-345.
- Topolancik, J., Bhattacharya, P., Sabarinathan, J. and Yu, P.C. 2003. Fluid detection with photonic crystal-based multichannel waveguides. *Applied Physics Letters* 82, 1143-1146.
- Troia, B., Paolicelli, A., De-Leonardis, F. and Passaro, V.M.N. 2013. *Photonic crystals for optical sensing: A review*. ISBN: 978-953-51-0954-9.
- Wang, R., Wang, X.-H., Gu, B.-Y., and Yang, G.-Z. 2001. Effects of shapes and orientations of scatterers and lattice symmetries on the photonic band gap in two-dimensional photonic crystals. *Journal of Applied Physics*, 90, 4307-4313.
- Wang, F.H., Ma, J. and Jiang, C. 2008. Dispersionless slow wave in novel 2D photonic crystal line defect waveguides. *Journal of Lightwave Technology* 26, 1381-1386.
- Wilson, R., Karle, T.J., Moerman, I. and Krauss, T.F. 2003. Efficient photonic crystal Y-junctions. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 5, S76–S80.
- Wu, X., Yamilov, A., Liu X., Li S., Dravid V.P., Chang R.P.H. and Cao, H. 2004. Ultraviolet photonic crystal laser. *Applied Physics Letters* 85, 17, 3657-3660.
- Vlasov, Y.A., O’Boyle, M., Hamann, H.F. and McNab, S.J. 2005. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides. *Nature* 438, 65-69.

- Vlasov, Y.A. and McNab, S.J. 2005. Coupling into the slow light mode in slab-type photonic crystal waveguides. *Optics Letters* 31, 1, 50-52.
- Yablonovitch, E. 1987. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Physical Review Letters* 58, 2059–2062.
- Yee, K.S. 1966. Numerical solution of initial boundary value problem involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 14, 302-307.
- Zhai, Y., Tian, H. and Ji, Y. 2011. Slow light property improvement and optical buffer capability in ring-shape-hole photonic crystal waveguide. *Journal of Lightwave Technology* 29, 20, 3083-3090.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fulya BAĞCI

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 1983

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Ankara Gazi Anadolu Lisesi 2001

Lisans : Ankara Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2005)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı
(2008)

Doktora : Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı
(Şubat 2008-Eylül 2013)

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl:

Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü 2005 – ...

Yayımları

- **F. Bağcı**, B. Akaoğlu. 2012. Effects of structurally deformed sub-lattice points on the dispersion properties of 2D hybrid triangular-graphite photonic crystal. Optics Communications 285, 1486–1493.
- **F. Bağcı**, B. Akaoğlu. 2013. Influences of supercell termination and lateral row number on the determination of slow light properties of photonic crystal waveguides. Optik 124, 21, 4739-4743.

- **F. Bağcı**, B. Akaoğlu. 2013. Enhancement of refractive index sensitivity in photonic crystal waveguide-based sensors by selective infiltration. *Acta Physica Polonica A* 124, 50-55.
- **F. Bağcı**, B. Akaoğlu. 2013. A 1x4 power-splitter based on photonic crystal Y-splitter and directional couplers. *Óptica Pura y Aplicada* 46 (3) 265-272.
- **F. Bağcı**, B. Akaoğlu. 2013. Enhanced electro-optic modulation performance in optical buffers by slowing light in optimized photonic crystal slab structures. *Acta Physica Polonica A*, yayına kabul edildi.
- **F. Bağcı**, B. Akaoğlu. 2011. Enhancement of slow light properties in photonic crystal waveguides with ring-shaped scatterers. *Balkan Physics Letters* 20, 201001,1-10.
- **F. Bağcı**, B. Akaoğlu. 2013. Tailoring slow light properties by shifting the innermost row of holes in photonic crystal waveguides with ring-shaped holes. (Değerlendirme aşamasında)
- **F. Bağcı**, B. Akaoğlu. 2013. A systematic analysis of hole size, hole-type and rows shifting on slow light characteristics of photonic crystal waveguides with ring-shaped holes. (Değerlendirme aşamasında)
- M. Yüksek, T. Ceyhan, **F. Bağcı**, H. G. Yaglıoğlu, A. Elmalı, Ö. Bekaroğlu. 2008. The nonlinear refraction and absorption dependence on the thermal effect for 4 ns pulse duration in binuclear Zn(II) phthalocyanine solution. *Optics Communications* 281, 3897-3901.
- S. Saydam, E. Yılmaz, **F. Bağcı**, H. G. Yaglıoğlu, A. Elmalı, B. Salih and Ö. Bekaroğlu. 2009. Synthesis, characterization and electrochemical and optical limiting properties of novel CoII, CuII and double-decker LuIII phthalocyanines. *European Journal of Inorganic Chemistry* 14, 2096-2103.