

FONKSİYONEL FOTONİK KRİSTAL AYGIT TASARIMLARI

DÖNE YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip CAMUŞCU

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Hamza KURT

Anabilim Dalı Başkanı

Döne YILMAZ tarafından hazırlanan FONKSİYONEL FOTONİK KRİSTAL AYGIT TASARIMLARI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hamza KURT

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Hatice DURAN

Üye : Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsrail BAHÇECİ

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Döne YILMAZ

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hamza KURT
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ağustos 2013

Döne YILMAZ

FONKSİYONEL FOTONİK KRİSTAL AYGIT TASARIMLARI

ÖZET

Fotonik kristaller kullanılarak birçok alanda uygulanabilir aygıt tasarımları yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında, farklı tasarıma sahip kare örgü fotonik kristaller kullanılarak entegre optikte kullanılacak çeşitli cihazlar önerilmiştir. İlk olarak fotonik kristal yapıda asimetrik ışık iletiminin deneysel ve numerik sonuçları sunulmuştur. Fotonik kristal birim hücrelerinin pozisyonlarının değiştirilmesi ile asimetrik ışık yayılımı elde edilmiştir. Dalga kılavuzunun çıkışında toplanan güç miktarı, ileri ve geri yayılma yönünde birbirinden farklı olmuştur. Çalışmada ayrıca gökkuşağı yakalama olarak adlandırılan başka bir fotonik kristal uygulaması da araştırılmıştır. Yeni tasarlanmış iki boyutlu fotonik yapıda gökkuşağı yakalama olayı nümerik sonuçlarla incelenmiştir. Yapı parametreleri ayarlanarak ışığın yapı içerisinde hapsolmesi sağlanmıştır. Geniş bantlı elektromanyetik dalga hapsolmesi için her birim hücrenin yapı içerisindeki konumu ve dielektrik doluluk oranı düzgün bir şekilde ayarlanmıştır. Önerilen yapının tamamen geçirgen dielektrik malzemedan oluşması efektif kırılma indisinin pozisyona bağlı olarak değişmesi ile farklı elektromanyetik bölgelerdeki ışığın hapsolmesini sağlanmıştır. Bu çalışmalara ek olarak tezde dereceli kırılma indisine sahip fotonik kristal yapı kullanılarak dalga boyu seçici bir ortam tasarlanmıştır. Hiperbolik sekant indeks profiline sahip tasarımda farklı dalga boyları farklı yollar izleyerek x-ekseni doğrultusunda yapıyı farklı pozisyonlarda terk etmiştir. Bu durum dalga boyu seçici ortam tasarımı için derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristallerin kullanılabildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristaller, Fotonik kristal dalga kılavuzları, Entegre optik, Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip ortam, Nanofotonik

University : **TOBB Economics and Technology University**
Institute : **Institute of Natural and Applied Sciences**
Science Programme : **Electrical and Electronics Engineering**
Supervisor : **Associate Professor Dr. Hamza KURT**
Degree Awarded and Date : **M.Sc. – August 2013**

Döne YILMAZ

FUNCTIONAL PHOTONIC CRYSTALS DEVICE DESIGNS

ABSTRACT

Devices which are applicable in many areas can be designed by using photonic crystals structures. In this thesis, numerical and experimental results of asymmetric light propagation in a different designed photonic crystal are presented. Asymmetric light propagation is achieved by changing the positions of the unit cells of photonic crystal. The amount of power collected at the output of the waveguide is different for the forward and backward propagation directions. Also another photonic crystal application which is called rainbow trapping is studied. Rainbow trapping in a newly designed two-dimensional photonic structure are investigated with numeric results. By adjusting the structure parameters, trapping of light in the structure is provided. For broadband electromagnetic wave trapping the position and dielectric filling factor of each unit cell in the structure are adjusted properly. Using completely transparent structure provides light trapping in different electromagnetic regions by the change of the effective refractive index depending on the position. In addition, a novel technique for spatial wavelength division using graded index photonic crystals is proposed. The different wavelengths follow different ways through the structure having hyperbolic secant index profile and leave the structure in different positions. Thus, light wave emanates from the graded index medium at different locations with different exit angles. This condition shows that the graded index photonic crystals can be used for the design of wavelength selective media.

Keywords: Photonic crystal waveguides, Photonic crystals, Integrated optics, Graded index medium, Nanophotonics

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bilgilerini ve engin deneyimlerini her zaman benimle paylaőan, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve ayrıca hayata yaklaőımıyla bana örnek olan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Hamza KURT'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teőekkürü bir borç bilirim.

Araőtırmalarım süresince bana her konuda yardımcı olan ve Nanofotonik Araştırma Laboratuvarı'nda birlikte çalıőtıęım ablam Nur ERİM'e ve laboratuvarda çalışan diğer arkadaşlara teşekkür ederim.

Bana her türlü desteği ve motivasyonu sağlayan, yardımını hiç esirgemeyen eőim Hasbi YILMAZ'a çok teşekkür ediyorum. Ayrıca beni ayrı bir motive eden doğmasını sabırsızlıkla beklediğim bebeğim Ömer YILMAZ'a da teőekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, beni bugünlere getiren ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen anne ve babama sonsuz minnet ve teőekkürlerimi sunarım.

Son olarak da yüksek lisans eğitimim boyunca sağladığı maddi desteğinden dolayı TÜBİTAK BİDEB'e teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. İki Boyutlu Yapılar İçin PWEM Metodu.....	4
1.3. İki Boyutlu Yapılar İçin FDTD Metodu.....	6
2. KADEMELİ FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARINDA ASİMETRİK İŞİK İLETİMİ	9
2.1. Giriş.....	9
2.2. Optik Diyot Benzeri Yapının Oluşturulması.....	11
2.3. Asimetrik Dalga İletiminin Fiziksel Açıklaması.....	16
2.4. Asimetrik Dalga İletiminin Deneysel Doğrulanması.....	19
2.5. Ek Açıklamalar.....	22
2.6. Sonuç.....	24
3. KADEMELİ TÜM DİELEKTRİK PERİYODİK YAPILAR KULLANILARAK GÖKKUŞAĞI YAKALAMA	25
3.1. Giriş.....	25

3.2. Gökkuşığı Hapsetme İçin Önerilen Yapı: Kademeli Fotonik Kristaller.....	26
3.3. Alternatif Bir Yapı.....	32
3.3. Sonuç.....	37
4. DERECELENDİRİLMİŞ KIRILMA İNSİNE SAHİP FOTONİK KRİSTALLER İLE DALGA BOYU SEÇİCİ ORTAM TASARIMI	38
4.1. Giriş.....	38
4.2. Sürekli Yapı ve Fotonik Kristal Yapının Geometrik Analizi.....	39
4.3. Nümerik Sonuçların Değerlendirilmesi.....	43
4.4. Sonuç.....	52
5. SONUÇ	54
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	62

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Çalışma Bölgelerinin Sayısal Sonuçları	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	Fotonik kristallerin 1, 2 ve 3 boyutta şematik gösterimi	1
Şekil 1.2.	İki boyutlu kare örgü fotonik kristal	2
Şekil 1.3.	İki boyutlu fotonik kristalde olası noktasal kusur çizgi kusuru ve yüzey kusurlarının şematik gösterimi [5]	3
Şekil 1.4.	Dielektrik çubukların yarı çapı 0.20a, dielektrik sabiti ise 8.9 olan fotonik kristal dalga kılavuzunun bant diyagramında ortaya çıkan dalga kılavuz modu [5]	4
Şekil 2.1.	Kademeli fotonik kristal dalga kılavuzunda asimetric dalga iletim mekanizmasının şematik gösterimi	11
Şekil 2.2.	(a) Kare örgü fotonik kristal dalga kılavuzunun şematik gösterimi. (b) Fotonik kristal dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı. (c) Dalga kılavuzunda gelen ışığın soldan sağa iletimi.	12
Şekil 2.3.	(a) Komşu sütunlar arasındaki mesafesi lineer olarak artan fotonik kristal dalga kılavuzu. (b) Kontrast oranının frekansa göre değişimi. Seçilen frekans mavi dikdörtgenle gösterilmiştir. (c) Işığın soldan sağa ilerleyişini resmeden anlık durum görüntüsü. (d) Yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (e) Yapının önündeki enine elektrik alan profili. (f) Işığın sağdan sola ilerleyişini resmeden anlık durum görüntüsü	14
Şekil 2.4.	(a) Diğer kademeli fotonik kristal dalga kılavuzu. Komşu sütunlar arasındaki mesafe parabolik olarak artırılmıştır. (b) Kontrast oranının frekansa göre değişimi. Seçilen frekans mavi dikdörtgenle gösterilmiştir. (c) Işığın soldan sağa ilerleyişini resmeden anlık durum görüntüsü. (d) Yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (e) Yapının önündeki enine elektrik alan profili. (f) Işığın sağdan sola ilerleyişini resmeden anlık durum görüntüsü	15
Şekil 2.5.	Asimetric dalga iletiminin gerçekleyen fotonik kristal yapının şematik gösterimi. (a) ve (b) sırasıyla soldan sağa ve sağdan sola iletimi göstermektedir. (a)'da gösterilen sarı dikdörtgenler ilerleme doğrultusu boyunca birim hücre değişimini göstermektedir.	17
Şekil 2.6.	(a) İleri ve (b) geri yönde dalga iletimi için tasarımdaki elektrik alan dağılımının detaylı gösterimi.	18
Şekil 2.7.	Yapının sonundaki alan dağılımları mikrodalga bölgesi için nümerik olarak elde edilmiştir. (a) Lineer yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (b) Lineer yapının önündeki enine elektrik alan profili. (c) Parabolik yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (d) Parabolik yapının önündeki enine	20

	elektrik alan profili.	
Şekil 2.8.	Önerilen yapılarda ölçülen alan profilleri. (a) Lineer yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (b) Lineer yapının önündeki enine elektrik alan profili. (c) Parabolik yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (d) Parabolik yapının önündeki enine elektrik alan profili	21
Şekil 2.9.	(a) Kırılma indisinin 3.46 olduğu durum için lineer yapının normalize olmayan iletim spektrumu. (b) Parabolik yapının normalize olmayan iletim spektrumu.	23
Şekil 3.1.	(a) Temel kare örgü fotonik kristal ve fotonik kristal dalga kılavuzu (b) Fotonik kristal dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı	27
Şekil 3.2.	(a) Dielektrik çubuk sütunları arasında $0.02a$ mesafe artışı olan fotonik kristalin şematik gösterimi (b) Fotonik kristal dalga kılavuzunun şematik gösterimi. Dalga kılavuzunun genişliği $0.2a$ 'dır.	28
Şekil 3.3.	Normalize frekans değeri $\omega a/2\pi c=0.16$ ve 0.30 arasında olan dalganın fotonik kristalde yapı içerisinde alan dağılımı gösterilmektedir. Hapsolan normalize frekansa denk gelen dalga boyları yapının sağ üst köşesinde gösterilmiştir. Sağ taraftaki renk çubuğu alan şiddet değişiminin minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir.	30
Şekil 3.4.	Normalize frekans değeri $\omega a/2\pi c=0.31-0.39$ arasında olan dalganın fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde alan dağılımı gösterilmektedir. Hapsolan normalize frekansa denk gelen dalga boyları yapının sağ üst köşesinde gösterilmiştir. Sağ taraftaki renk çubuğu alan şiddet değişiminin minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir.	31
Şekil 3.5.	Yapı içerisinde hapsolan farklı dalga boylarının periyoda göre pozisyonları. (a) ve (b) sırasıyla dalga kılavuzunun olmadığı ve olduğu durumları göstermektedir.	32
Şekil 3.6.	(a) Dielektrik çubukların yarıçapları ilerleme doğrultusunda lineer bir şekilde artan fotonik kristalin şematik gösterimi. (b) Merkezdeki dielektrik çubuk satırı ortadan kaldırılarak (a)'daki fotonik kristalden elde edilen dalga kılavuzu	33
Şekil 3.7.	(a) Normalize frekans değeri 0.18 ile 0.32 arasında olan ışığın yapı içerisinde ilerlemesi. (b) Aynı frekanslardaki ışığın dalga kılavuzu yapısında ilerlemesi.	34
Şekil 3.8.	Farklı frekansların hapsoldükleri pozisyondaki çubuk yarıçaplarını gösteren grafik. (a) ve (b) sırasıyla dalga kılavuzunun olmadığı ve olduğu durumu göstermektedir.	34
Şekil 3.9.	İkinci tasarım için çubuk yarıçapının $0.1a$ ve $0.34a$ olduğu durumların dispersiyon diyagramı (a) ve (b) sırasıyla dalga kılavuzunun olmadığı ve olduğu durumu göstermektedir.	35
Şekil 3.10.	Fotonik kristal yapıda farklı dalga boylarının hapsoldükleri	36

	pozisyonları gösteren şematik.	
Şekil 4.1.	(a) Kademeli sürekli ortamın şematiği ve (b) kırılma indis profili (c) Önerilen derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristalin şematik görünümü ve ilgili farklı dalga boylarının yapı içerisindeki ışın yolları. Fotonik kristalin uzunluğu l ve genişliği w , sırasıyla $140a$ ve $30a$ 'dır. (d) Fotonik kristal yapının 0.10 normalize frekans değerindeki hiperbolik sekant indeks profilinin ayrıık versiyonu	41
Şekil 4.2.	(a) Farklı dalga boyları için polar koordinatta yapının çıkışındaki güç akışı gösterilmektedir. Bölge-1'deki yedi dalga boyundan dört tanesi (1782.5, 1620.5, 1485.4, ve 1371.2 nm) gösterilmiştir. Örgü sabiti a 356.5 nm seçilmiştir. (b) Yansıma açısı θ ve x-ekseni üzerindeki kayma miktarı dalga boyu cinsinden çizilmiştir. Kesik çizgi ile çizilen grafik yansıma açısını, düz çizgi ile çizilen grafik ise kayma miktarını göstermektedir.	45
Şekil 4.3.	(a) Farklı dalga boyları için polar koordinatta yapının çıkışındaki güç akışı gösterilmektedir. Grafikte gösterilen dalga boyları 1636.1, 1577.7, 1523.3, ve 1472.5 nm'dir. Örgü sabiti a 441.8 nm seçilmiştir. (b) Yansıma açısı θ ve x-ekseni üzerindeki kayma miktarı dalga boyu cinsinden çizilmiştir. Kesik çizgi ile çizilen grafik yansıma açısını, düz çizgi ile çizilen grafik ise kayma miktarını göstermektedir.	47
Şekil 4.4.	(a) Farklı dalga boyları için polar koordinatta yapının çıkışındaki güç akışı gösterilmektedir. Karşılık gelen dalga boyları 1572.8, 1550.0, ve 1527.9 nm'dir. Örgü sabiti a 534.8 nm seçilmiştir. (b) Yansıma açısı θ ve x-ekseni üzerindeki kayma miktarı dalga boyu cinsinden çizilmiştir. Kesik çizgi ile çizilen grafik yansıma açısını, düz çizgi ile çizilen grafik ise kayma miktarını göstermektedir.	48
Şekil 4.5.	(a) Katmanlı sürekli ortamda 1636.1 nm dalga boyunun elektrik alan dağılımı (b) 1523.3 nm dalga boyunun sürekli ortamda elektrik alan dağılımı (c) 1636.1 nm dalga boyunun tasarlanan fotonik kristal yapıda elektrik alan dağılımı (d) fotonik kristal yapıda 1523.3 nm dalga boyunun elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. tüm analizler Bölge-2'de gerçekleştirilmiştir. Sarı oklar yapıdan çıkan dalganın ilerleme yönünü göstermektedir.	49
Şekil 4.6.	0.21 normalize frekansı için ilk TM bantlarına karşılık gelen üç farklı eş frekans eğrisi.	51

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

ARC	Yansıma Önleyici Tabaka
FDTD	Sonlu Farklar Zaman Düzlemi (Finite Difference Time Domain)
PWEM	Düzlemsel Dalga Açılım Metodu (Plane Wave Expansion Method)
TM	Enine Manyetik

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Örgü sabiti
ω	Frekans
c	Işık hızı
λ	Dalga boyu
k	Dalga vektörü
T_{+x}	+x yönündeki iletim
T_{-x}	-x yönündeki iletim
n	Kırılma indisi
E_z	z yönündeki elektrik alan
H_x	x yönündeki manyetik alan
H_y	y yönündeki manyetik alan
D_{ff}	Dielektrik doluluk oranı
θ	Çıkış açısı
$\Delta\lambda/\lambda$	Bant Genişliği
$\Delta\theta/\Delta\lambda$	Dispersiyon açısı oranı
θ_i	Gelme açısı

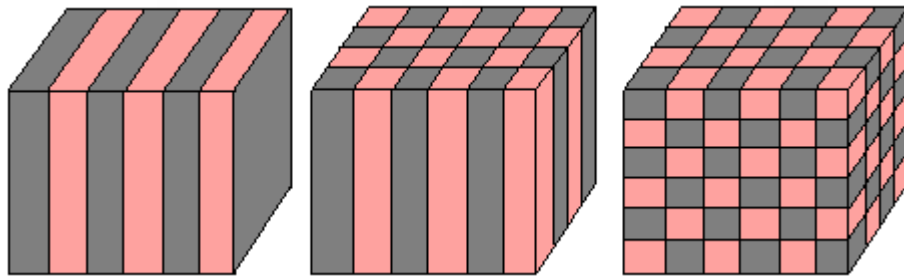
1.GİRİŞ

1.1. Giriş

Fotonik kristaller, farklı dielektrik sabitine sahip ortamlardan oluşan bir, iki ve üç boyutta üretilebilen periyodik yapılardır. Bu yapılar kullanılarak ışık akışı, ışığın hareket doğrultusu kontrol edilebilir. Fotonik kristaller optik filtrelerde, entegre kompakt cihazların tasarımında, telekomünikasyonda, kimyasal biyolojik sensör tasarımlarında, optik sinyal işleme alanında kullanılmaktadır.

Fotonik kristaller birçok farklı özelliklere sahiptir. Bunların en önemlisi yasaklı bant aralığının bulunmasıdır. Yasaklı bant aralığında bulunan elektromanyetik dalgalar fotonik kristal yapıya nüfuz edemezler. Bu frekanslar yapıda yansımaya uğrarlar. Lord Rayleigh çok katmanlı dielektrik ayna olarak adlandırılan yasaklı bant aralığına sahip tek boyutlu yapıları 1887’de sunmuştur [1]. Daha sonra ise bu özellik Yablonovitch ve John tarafından daha yüksek boyuttaki yapılarda çalışılmıştır [2, 3].

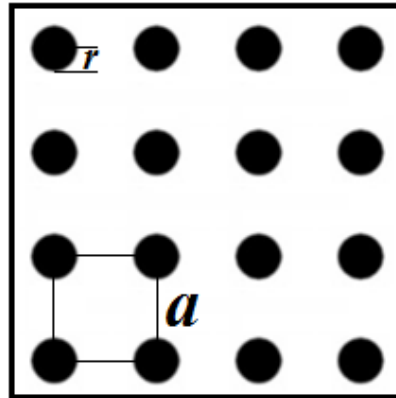
Tek boyutlu fotonik kristallerde dielektrik sabiti değişimi sadece tek boyutta gerçekleşir. İki boyutlu fotonik kristallerde ise periyodiklik iki boyutta mevcuttur. Üç boyutlu fotonik kristallerde ise üç boyutta da dielektrik sabiti periyodik olarak değişmektedir.



Şekil 1.1. Fotonik kristallerin 1, 2 ve 3 boyutta şematik gösterimi

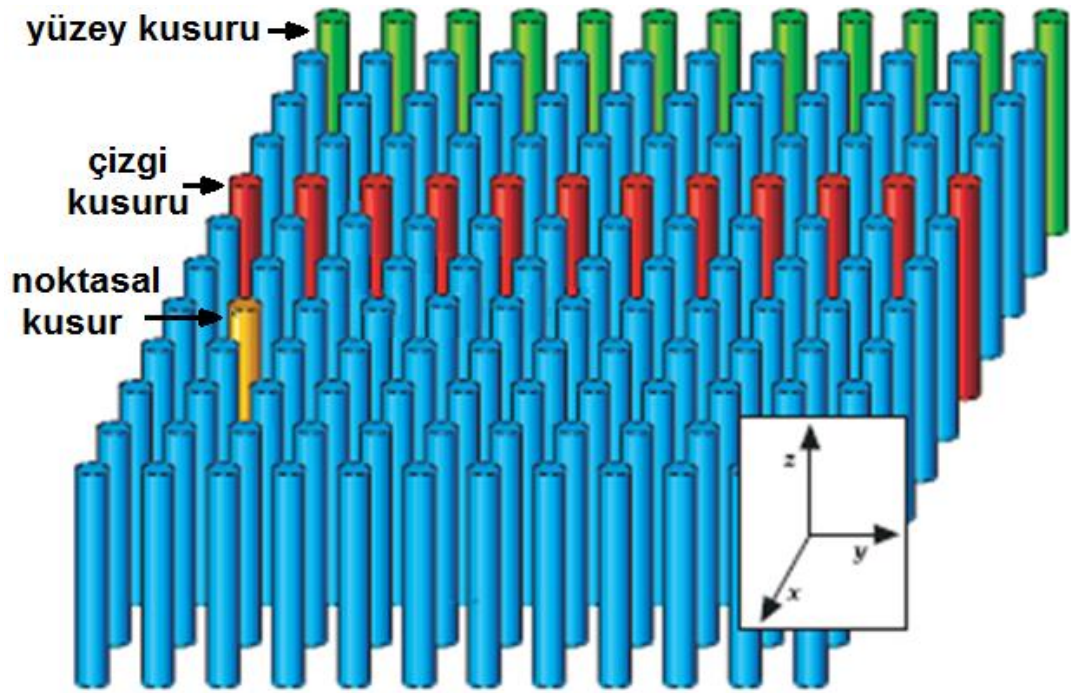
Tek boyutlu fotonik kristaller Şekil 1.1' de gösterildiği gibi farklı dielektrik sabitine sahip malzemelerin tabaka halinde periyodik dizilimi ile oluşurlar. Bu yapılar çok katmanlı film olarak da adlandırılır. Fotonik kristal yapı belirli bir frekans aralığı için ayna gibi davranabilir. Ayrıca yapısında bir kusur oluşması halinde ışığı hapsedme özelliğine sahiptir. Bu özellik optik filtre tasarımında ve dielektrik aynalarda kullanılmaktadır [4].

İki boyutlu fotonik kristaller iki eksen boyunca periyodik, üçüncü ekseninde ise homojen olan yapılardır. İki boyutlu fotonik kristal yapı bazı frekanslarda yasaklı bant aralığına sahiptir. Bu aralığa denk gelen frekanslar yapının her yönünden yansır, yapı içinde ilerleyemez. Fotonik kristal yapıda birbirini tekrar eden en küçük yapı birim hücre olarak isimlendirilir. Birim hücreler arası mesafe Şekil 1.2'de görüldüğü gibi a ile gösterilir ve örgü sabiti olarak adlandırılır. Dielektrik çubukların yarıçapı yapının boyutları gibi yapı parametreleri örgü sabiti a cinsinden ifade edilir. Yapının frekans düzlemindeki analizleri de örgü sabitine bağlı olarak elde edilir. Frekans, örgü sabitinin dalga boyuna oranı (a/λ) ile bulunur. Frekansın örgü sabitine bağımlı olması örgü sabiti değerinin değiştirilerek farklı frekans aralıklarında çalışma olanağı sağlamaktadır. Çalışılmak istenen dalga boyu aralığı ise yapının periyodu ile aynı seviyelerde olmalıdır.



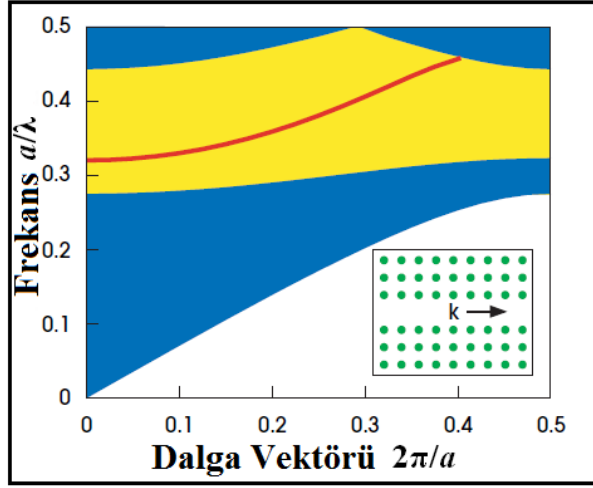
Şekil 1.2. İki boyutlu kare örgü fotonik kristal

İki boyutlu fotonik kristal yapı üzerinde bazı değişiklikler yapılarak yasaklı bant aralığında yapı içerisine nüfuz edebilecek modlar oluşturulabilir. Örneğin Şekil 1.3'te sarı renkle gösterilen dielektrik çubuğun yarı çapı ve ya dielektrik sabiti değiştirilerek ya da çubuk tamamen kaldırılarak yapıda noktasal kusur oluşturulur. Yapıdaki bu değişiklik ile bazı frekans değerleri yapı içerisinde hapsolabilir. Tek bir dielektrik çubuk yerine şekilde kırmızı ile gösterilen satırdaki tüm çubuklar kaldırıldığında veya yarıçapları, dielektrik sabitleri değiştirildiğinde ise yapıda çizgisel kusur oluşturulur. Oluşturulan yapı fotonik kristal dalga kılavuzu olarak adlandırılır. Yeni yapının bant diyagramında Şekil 1.4 ile gösterildiği gibi yasaklı bant aralığında dalga kılavuz modu ortaya çıkar. Bu moda karşılık gelen frekanslar yapı içerisinde dalga kılavuzu boyunca ilerleyebilir.



Şekil 1.3. İki boyutlu fotonik kristalde olası noktasal kusur, çizgi kusuru ve yüzey kusurlarının şematik gösterimi [5]

Fotonik kristal yapıda yüzeydeki çubukların yarıçapı ve dielektrik sabitinde bir değişiklik yapıldığında ise bant diyagramında yüzey modu ortaya çıkar ve bu moda denk gelen frekanslar yapının yüzeyinde ilerleyebilirler.



Şekil 1.4. Dielektrik çubukların yarı çapı $0.20a$, dielektrik sabiti ise 8.9 olan fotonik kristal dalga kılavuzunun bant diyagramında ortaya çıkan dalga kılavuz modu [5].

Fotonik kristallerin bu özellikleri kullanılarak yapılan küçük değişiklikler sonucu çok farklı özellikte yapılar tasarlanabilir. Bu tez çalışmasının amacı iki boyutlu fotonik kristallerin bu sıra dışı özelliklerini kullanarak optik alanında uygulanabilir kompakt cihazlar tasarlamaktadır. Bunun için standart kare örgü fotonik kristalde bazı modifikasyonlar yapılarak optik diyot benzeri yapı, optik bellek, filtre ve optik tampon olarak kullanılacak bir yapı ve son olarak dalga boyu seçici ortam tasarlanmıştır.

1.2. İki Boyutlu Yapılar İçin PWEM Metodu

Dielektrik sabiti iki boyutlu yapılarda dikey z yönünde değişmediği için bu doğrultuda dalga vektörünün herhangi bir bileşeni yoktur. Bu durumda E_z ve H_z bileşenleri Maxwell denklemleri ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir [5].

$$-\frac{1}{\varepsilon(r)} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} \vec{E}_z(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}_z(r) \quad (1.1)$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\varepsilon(r)} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\varepsilon(r)} \frac{\partial}{\partial y} \right\} \vec{H}_z(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}_z(r) \quad (1.2)$$

Burada $\vec{r} = xa_x + ya_y$ olarak kabul edilmiştir. $1/\varepsilon(r)$ ifadesi Fourier açılımı ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{\varepsilon(r)} = \sum_G K_G \exp(j\vec{G} \cdot \vec{r}) \quad (1.3)$$

$$K_G = \frac{1}{A} \iint_S \frac{1}{\varepsilon(r)} \exp(-j\vec{G} \cdot \vec{r}) dS \quad (1.4)$$

Formülde S birim hücreyi, A ise birim hücre alanını göstermektedir. Ters örgü vektörü $\vec{G} = g_1x + g_2y$ şeklinde ifade edilir. Kare örgü fotonik kristallerde $g_1 = 2\pi m/a$ ve $g_2 = 2\pi n/a$ olarak ifade edilirken, üçgen örgüde $g_1 = \frac{2\pi}{a}(y + x\sqrt{3})/2$ ve $g_2 = \frac{2\pi}{a}(y - x\sqrt{3})/2$ olarak ifade edilmektedir.

Fotonik kristal yapı z yönünde sonsuz kabul edildiği için bu yöndeki elektrik ve manyetik alanlar aşağıdaki gibi sonsuz sayıda düzlem dalganın toplamı şeklinde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \vec{H}_z(r) &= \sum_G h_{G,k} \exp[i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}] \\ &= \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) \sum_G h_{G,k} \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) v_k(\vec{r}) \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\vec{E}_z(r) = \sum_G e_{G,k} \exp[i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}]$$

$$= \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) \sum_G e_{G,k} \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) v_k(\vec{r}) \quad (1.6)$$

1.5 ve 1.6 formüllerinde geçen h ve e manyetik ve elektrik alanların Fourier bileşenlerini göstermektedir. Bu denklemler 1.1 ve 1.2'de yerine konulduğunda;

$$- \sum_G K_G (\vec{G} - \vec{G}') (\vec{k} + \vec{G}') \times \{ (\vec{k} + \vec{G}') \times \vec{E}_{z,kn}(\vec{G}') \} = \frac{\omega_{kn}^2}{c^2} \vec{E}_{z,kn}(\vec{G}) \quad (1.7)$$

$$- \sum_G K_G (\vec{G} - \vec{G}') (\vec{k} + \vec{G}') \times \{ (\vec{k} + \vec{G}') \times \vec{H}_{z,kn}(\vec{G}') \} = \frac{\omega_{kn}^2}{c^2} \vec{H}_{z,kn}(\vec{G}) \quad (1.8)$$

Bu denklemler kullanılarak tasarlanan yapıların bant diyagramları nümerik olarak hesaplanabilmektedir.

1.3. İki Boyutlu Yapılar İçin FDTD Metodu

Tasarlanan yapıların zaman düzleminde analizi Sonlu Farklar Zaman Düzlemi (FDTD) metodu kullanılarak elde edilmektedir. Bu metot 1966'da Kane S. Yee tarafından ortaya konulmuştur [6]. Yapının birim uzunluğu tüm eksenler boyunca istenilen sayıda eşit uzunluktaki parçalara bölünür. Parçaların başlangıç ve bitiş noktalarında ışığın yapı ile nasıl bir etkileşime girdiği Maxwell denklemleri sayesinde ortaya çıkarılır. FDTD metodu ile yapının frekans alanındaki iletim grafiği, dalganın zamana göre yapı ile etkileşimi ve bant diyagramı elde edilir.

Fotonik kristal yapıdaki herhangi bir nokta $(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ şeklinde tanımlanabilir. Herhangi bir zaman ve alan fonksiyonu ise $F^n(i, j, k) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)$ şeklinde tanımlanır. F fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir [6, 7]:

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - F^n\left(i-\frac{1}{2}, j, k\right)}{\delta} \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\delta t} \quad (1.10)$$

Maxwell denklemlerinin Kartezyen koordinatlardaki kıvrım operatörlerinden bazıları aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (1.12)$$

Denklem 1.9 ve 1.10, 1.11 ve 1.12'de yerine konulursa;

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) &= H_x^{n-1/2}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) \\ &+ \frac{\delta t}{\mu\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right)\delta} \left[\begin{array}{l} E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k+1\right) - E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) + \\ E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j+1, k+\frac{1}{2}\right) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) &= \left[1 - \frac{\sigma\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)\delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)} \right] E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \\ &+ \frac{\delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)\delta} \left[\begin{array}{l} H_z^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right) + \\ H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (1.14)$$

ifadeleri elde edilir. Bu ifadeler kullanılarak fotonik kristallerin zaman alanındaki analizleri yapılmaktadır.

Bu yöntemin doğru bir şekilde çalışması için hesaplanan noktalar arası mesafenin değişmesi durumunda elektromanyetik alanda önemli değişim olmaması gerekmektedir. Bu yüzden birim uzaklık değeri minimum dalga boyunun küçük bir kısmı kadar olmalıdır.

$$v_{maks}\Delta t \leq \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right)^{-1/2} \quad (1.15)$$

ifadesinde v_{maks} maksimum faz hızını göstermektedir. FDTD hesaplamalarında bu ölçüt göz önünde tutulmaktadır.

2. KADEMELİ FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARINDA ASİMETRİK IŞIK İLETİMİ

2.1. Giriş

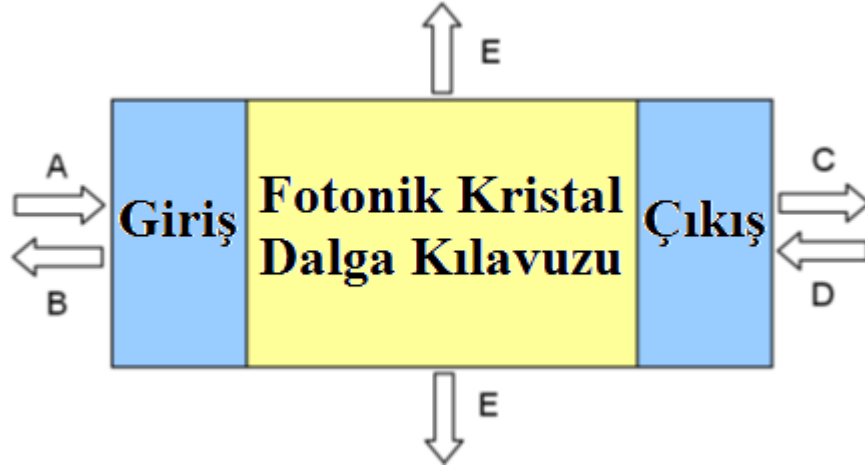
Optik darbeler için elde edilen tek yönlü dalga iletimi fotonik alanında çok fazla araştırma faaliyeti başlatmıştır [8-18]. Fotonik platformlarda ışığı yönlendirmek ve hapsedmek nispeten kolay olsa da, doğrultucu tip elektromanyetik dalga yayılımında optik dalga kılavuzlarının çift yönlü olmasından dolayı uygulamada büyük zorluklar ortaya çıkmaktadır. Elektronikte oldukça yaygın olarak kullanılan elektronik diyotun çalışma prensibine gösterdiği benzerlikten dolayı tek yönlü ışık iletimi oldukça önemlidir. Elektrik akımın kutbu pozitiften negatife değiştiğinde elektronik diyot sinyal iletimini bloke eder. Benzer şekilde, ışığın doğrultusu optik dalganın hangi yönden ilerleyeceğini belirler. Kullanışlı bir cihaz elde etmek için kompakt ve etkili yaklaşımlar gerekmektedir. İdeal durumda, tek yönlü dalga iletimi, ışığın bir taraftan iletimine izin verirken diğer taraftan iletimi engellemektedir.

Tek yönlü dalga iletimini elde etmek için önceki yaklaşımlar farklı yöntemler kullanmışlardır. Fakat önerilen yapıların büyük çoğunluğunda, ya lineer olmayan malzemeler ya da metalik/manyetik-optik malzemeler kullanılmıştır [8-10, 15-18]. Sistemde lineer olmayan malzeme kullanıldığında yüksek güçlü ışık kaynakları gerekmektedir. Çünkü duyarlılık katsayısı oldukça küçüktür ve lineer değildir. Ayrıca metal kullanımı optik kayıplara sebep olur ve ışık yayılımını azaltır. Bu yaklaşımların yanında, tek yönlü dalga iletiminin kısmi olarak gerçekleştirildiği farklı çözümler de olabilir. Örneğin, son zamanlarda yapılan çalışmalar asimetrik dielektrik ızgaraları kullanarak ışık yayılımını kontrol etmişlerdir. Asimetrik dalga iletimi için yüksek yan lobların (± 1 . kırınım dereceleri) oluşturulması ana lobun ortaya çıkmasını engelleyebilir. Karşı tarafta ise yüksek dereceli loblar olmadan sadece ana lob oluşmaktadır [11-14]. Ayrıca, asimetrik dalga iletimi sadece elektromanyetik dalgalar için değil ses dalgaları için de elde edilebilir [19, 20]. Ses dalgasının tek yönlü iletimi referans 19 ve 20'de sırasıyla sonik kristaller ve

asimetrik akustik ızgaraların kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Geleneksel yöntemler tek yönlü iletimi elde etmek için zaman karşılık simetriğini kırmaktadırlar. Dielektrik yapılarda, dispersiyon diyagramında $\omega(k) = \omega(-k)$ (k dalga vektörünü göstermektedir) olmaktadır.

Yapılan çalışmada, asimetrik dalga iletimi kademeli fotonik kristaller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fotonik kristal olarak adlandırılan periyodik dielektrik ortamlar kullanılarak düzenli fotonik kristal dalga kılavuzları elde edilebilir [22]. Dalga kılavuzu elde etmek için birim hücrenin şekli veya boyutu belirli bir doğrultu boyunca bozularak çizgisel kusur oluşturulur. Dalga kılavuzu modunun düzenlenmesi birim hücrelerin konumsal dağılımının ayarlanması ile gerçekleştirilir. Kademeli fotonik kristal dalga kılavuzundaki asimetrik dalga iletimini izaha kavuşturmak için alan profilleri hesaplanmıştır. Soldan sağa ve sağdan sola dalga iletimi farklı şekilde gerçekleşmektedir. Diğer bir deyişle, iletilen dalga karakteristiği gelen ışığın yönüne bağımlı hale gelmektedir.

Nonlineer optik ve anizotropik materyaller kullanılmadığı için yapılan çalışma uygulama için oldukça pratiktir. Tasarlanan yapıda optik darbenin izlediği özel yoldan dolayı asimetrik ışık yayılımı elde edilmiştir. Kademeli fotonik kristal dalga kılavuzunun optik cevabı asimetrik dalga iletiminde büyük rol oynamaktadır. Çalışmanın deneysel kısmı mikrodalga frekanslarında gerçekleştirilmiştir ve sonuçların nümerik sonuçlarla gayet uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.1. Kademeli fotonik kristal dalga kılavuzunda asimetrik dalga iletim mekanizmasının şematik gösterimi

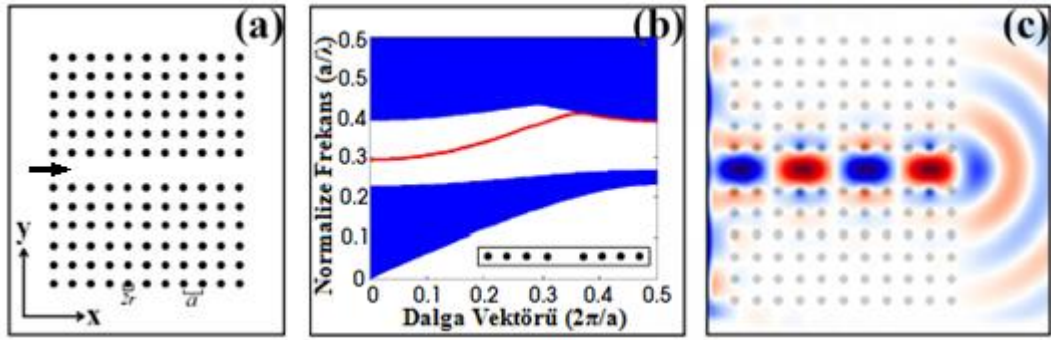
Şekil 2.1’ de asimetrik dalga iletiminin gerçekleştiği iki boyutlu fotonik yapı şematize edilmiştir. Soldan sağa iletim için A ışık kaynağı olarak seçildiğinde, B, E, C ile gösterilen sinyaller sıfırdan farklı, D ile gösterilen sinyal ise sıfır olur. Burada B toplam yansıyan ışığı, E sızıntı ışığı, C ise iletilen dalgayı göstermektedir. B ve E kayıp olarak isimlendirilir, anlamlı sinyal ise C’nin temsil ettiği iletilen ışıktır. Sağdan sola iletimde ise yapıyı uyaran sinyal D’dir. Bu durumda A sinyali sıfır olur, iletilen anlamlı sinyali B, yansıyan ışığı C ve sızıntıyı ise E göstermektedir. Farklı iletim doğrultuları için, B ve C sinyalleri alan profil dağılımı ve güç açısından farklılık göstermektedir. Çünkü her iki durum için sızan ve yansıyan ışıklar farklıdır.

2.2. Optik Diyot Benzeri Yapının Oluşturulması

Yapısal parametreleri Şekil 2.2(a)’ da gösterilen kare örgü fotonik kristal dalga kılavuzu optik diyot yapısının temel bileşenidir. Kullanılan dielektrik silindirlerin yarıçapı $0.22a$ ve kırılma indisi 3.46’dır. Burada a örgü sabitini göstermektedir. GX doğrultusu boyunca bir sıra çıkarılarak tek modlu dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Nümerik analizler TM polarizasyon (elektrik alan x-y düzlemine dik) için gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzunun çift yönlü doğasından dolayı ileri ve geri

yönde iletilen güç profilleri üst üste binmektedir. Bu durum, düzlemsel dalga açılım metodu [22] kullanılarak elde edilen dispersiyon diyagramı ile Şekil 2.2(b)' de gösterilmiştir.

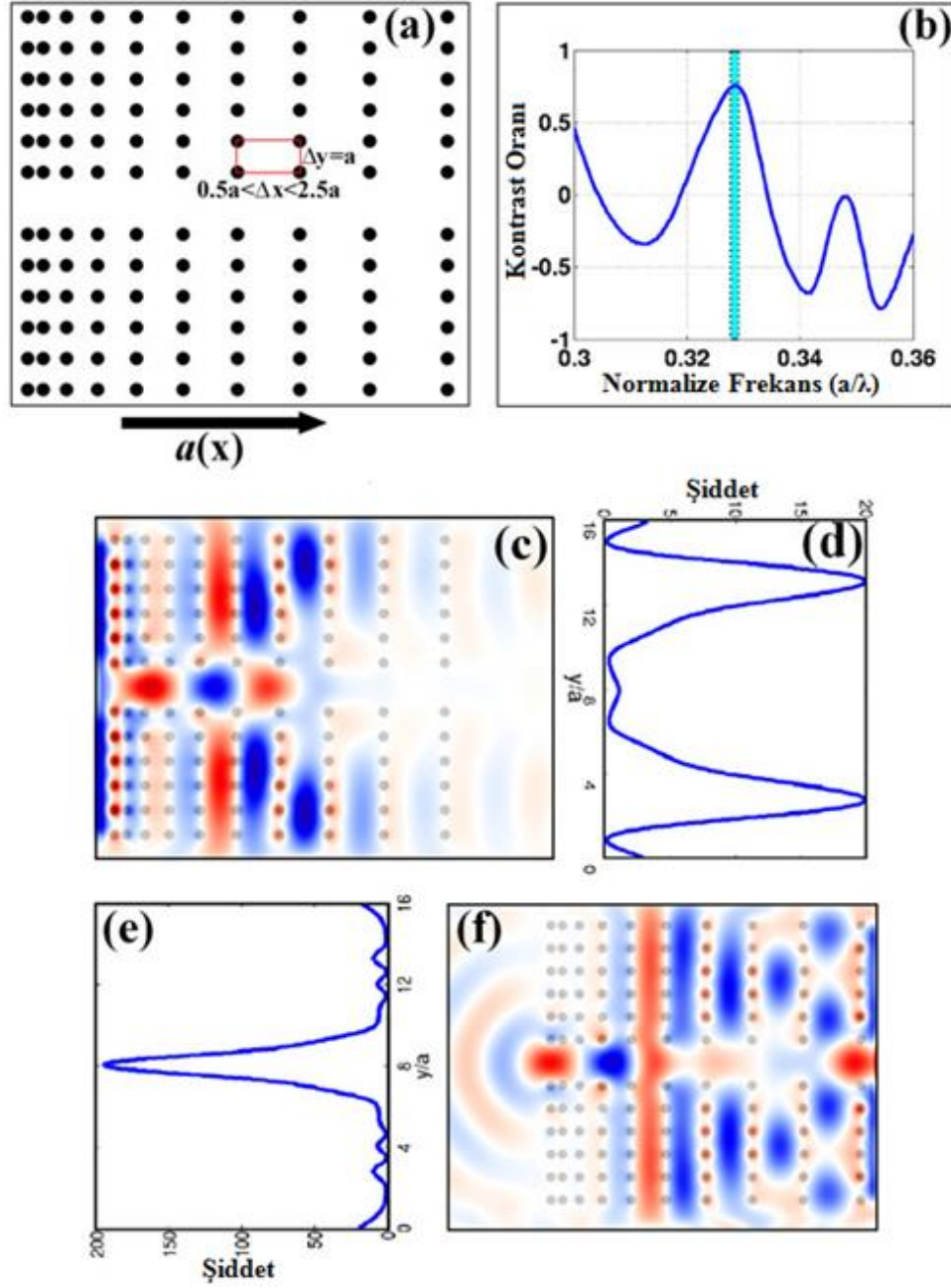
Şekil 2.2(c)' de yapının sol taraftan uyarıldığı durum gösterilmiştir. Kaynak sağ tarafa yerleştirilip hesaplamalar tekrar yapıldığında, çıkışta tam olarak aynı alan profilleri elde edilecektir. Bu durumda optik diyot özelliği gözlemlenmemiştir. Yapı gelen dalganın ilerleme doğrultusuna farklı tepki vermemiştir. Yasaklı bant aralığında dalga kılavuz moduna karşılık gelen frekanslar her iki doğrultuda da rahatça yol alır ve her iki taraftan iletilen güçler birbirinin aynısıdır.



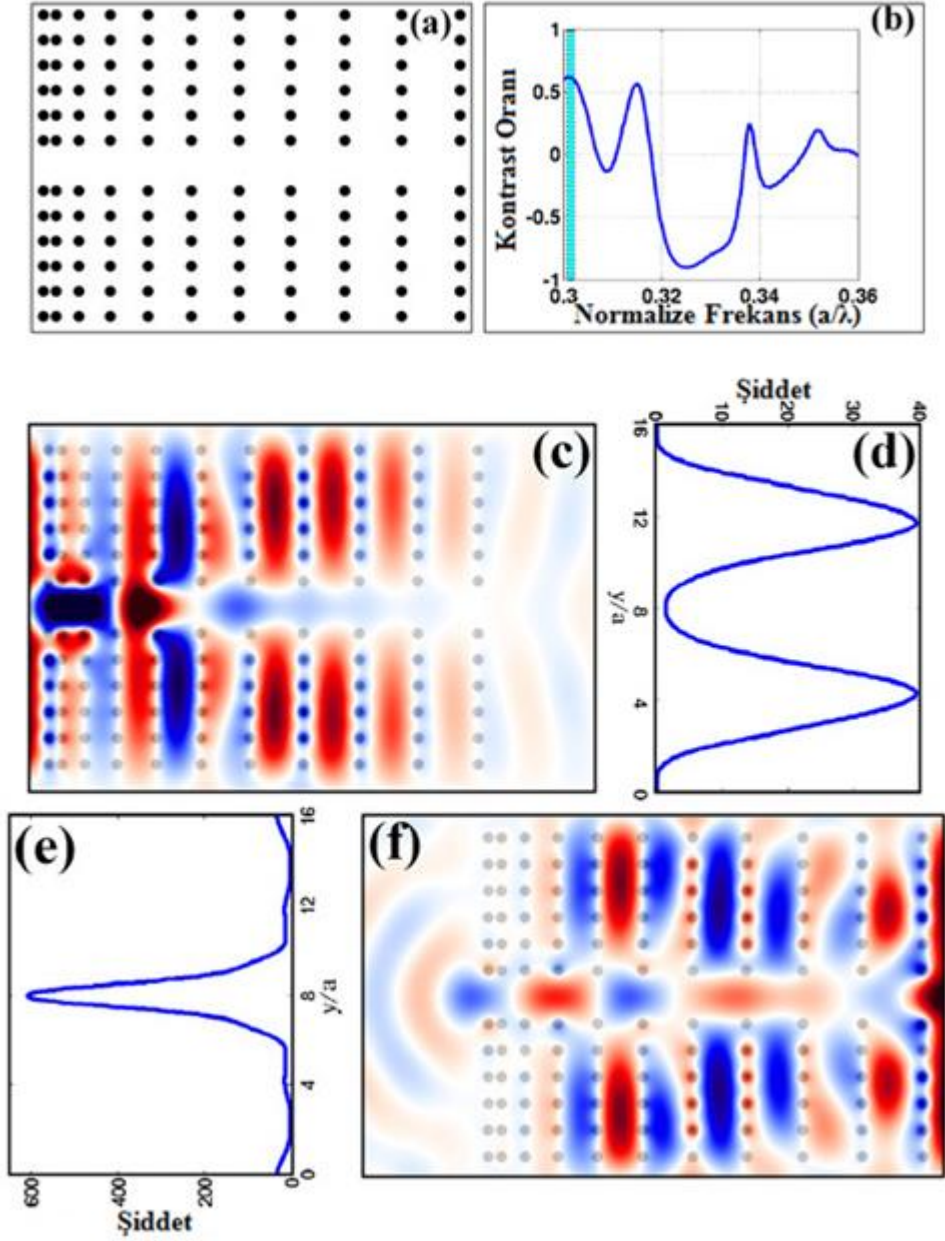
Şekil 2.2. (a) Kare örgü fotonik kristal dalga kılavuzunun şematik gösterimi. (b) Fotonik kristal dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı. (c) Dalga kılavuzunda gelen ışığın soldan sağa iletimi.

Yapısal simetriyi bozmak için, dielektrik silindirlerin her komşu sütun arasında mesafe artışı yapılmıştır. Bu yaklaşım Şekil 2.3(a)' da gösterilmiştir. y -ekseni boyunca her birim hücre arasındaki mesafe örgü sabiti a 'da sabit tutulurken ($\Delta y=a$), x -ekseni boyunca $a(x)$ ile gösterilen sütunlar arası mesafe lineer olarak artırılmıştır. Kademeli fotonik kristal dalga kılavuzunun toplam uzunluğu $16a$ ' dır ve mesafe değişimi $0.50a$ ile $2.5a$ arasındadır. Nümerik çalışmalar iki boyutlu sonlu farklar zaman düzlemi metodu (FDTD) kullanılarak yapılmıştır [23]. İlk olarak yapıda yöne bağlı iletim olup olmadığı araştırılmıştır.

Şekil 2.3(b) iki zıt doğrultuda ilerleyen dalgaların normalize iletim farkını göstermektedir. Normalize iletim farkı, kontrast oranı olarak tanımlanabilir ve aşağıdaki formülle elde edilmiştir. $T=(T_{-x} - T_{+x})/(T_{-x} + T_{+x})$, T_{-x} $-x$ yönünde (sağdan sola) iletilen gücü, T_{+x} ise $+x$ yönünde (soldan sağa) iletilen gücü göstermektedir. İki zıt yöndeki iletim farkı asimetrik güç dağılımına sebep olmaktadır. Kontrast oran grafiği incelendiğinde asimetrik dalga iletiminin gerçekleştiği frekans aralığı elde edilmiştir. Zıtlık oranının en yüksek olduğu $a/\lambda= 0.3288$ normalize frekansı çalışma frekansı olarak belirlenmiştir. Şekil 2.3(c) ve 2.3(f)' de iki farklı iletim doğrultusu için yapıdaki dalga ilerleyişinin zaman alanında anlık durum görüntüleri verilmiştir. Elektrik alan profillerinin enine kesitleri de Şekil 2.3(d) ve 2.3(e)' de gösterilmiştir. Bu grafiklerden önemli sonuçlar elde edilmiştir. Elektrik alan $+x$ doğrultusunda hareket ederken, ışık yönelimi yapının sonuna doğru kaybolur. Sonuç olarak ışık sızıntısı optik ekseninde zayıf bir elektrik alan genliği bırakır. Dalga kılavuz bölgesi hariç, yapının ön tarafı iletimi kısmen bloke eder. Işık ters yönde hareket ettiğinde ise elektrik alan aynı yolu takip eder ve merkez kısımda ve yan kenarlarda ilerleyen iki bileşen de yapının çıkışında orta kısımda birleşir. Böylece, $-x$ yönündeki iletimde yapının diğer tarafında güçlü bir elektrik alan profili elde edilir. Asimetrik dalga iletimini destekleyen elektrik alan profilleri Şekil 2.3(c) ve 2.3(f)' de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. (a) Komşu sütunlar arasındaki mesafesi lineer olarak artan fotonik kristal dalga kılavuzu. (b) Kontrast oranının frekansa göre değişimi. Seçilen frekans mavi dikdörtgenle gösterilmiştir. (c) Işığın soldan sağa ilerleyişini resmeden anlık durum görüntüsü. (d) Yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (e) Yapının önündeki enine elektrik alan profili. (f) Işığın sağdan sola ilerleyişini resmeden anlık durum görüntüsü



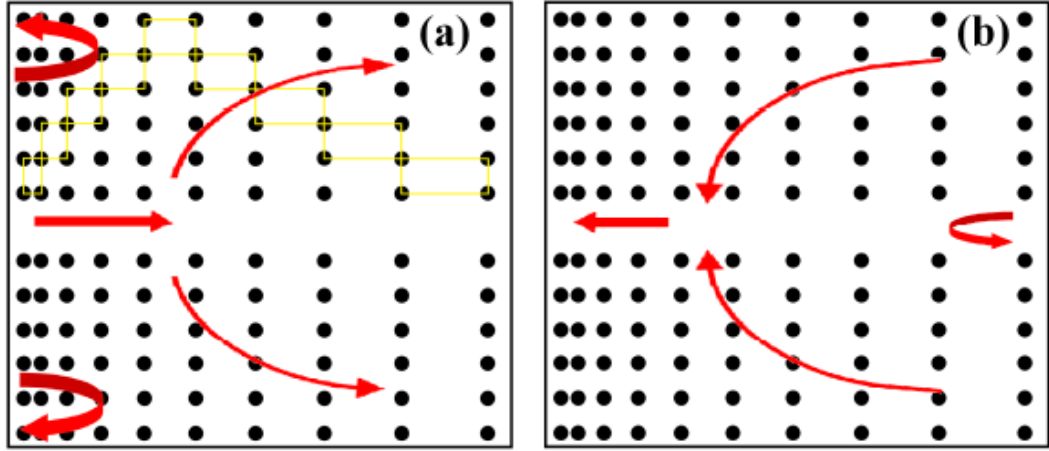
Şekil 2.4. (a) Diğer kademeli fotonik kristal dalga kılavuzu. Komşu sütunlar arasındaki mesafe parabolik olarak artırılmıştır. (b) Kontrast oranının frekansa göre değişimi. Seçilen frekans mavi dikdörtgenle gösterilmiştir. (c) Işığın soldan sağa ilerleyişini resmeden anlık durum görüntüsü. (d) Yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (e) Yapının önündeki enine elektrik alan profili. (f) Işığın sağdan sola ilerleyişini resmeden anlık durum görüntüsü

Komşu sütunlar arası mesafe parabolik olarak artırılarak elde edilen diğer tasarım Şekil 2.4(a)' da gösterilmiştir. Daha önce olduğu gibi, yapı y- ekseni doğrultusunda sabit tutulmuştur. Bu tasarımın toplam uzunluğu ise $16.89a$ 'dır. Bu yapının optik cevabında ortaya çıkan belirgin kontrast zirveleri olmuştur. Şekil 2.4(b) iki zıt doğrultunun kontrast oranını göstermektedir. Kontrast oran grafiğinin incelenmesi sonucunda bu durum için çalışma frekansı $a/\lambda = 0.2992$ olarak belirlenmiştir. Elektrik alan anlık durum görüntüleri Şekil 2.4(c) ve 2.4(f)' de gösterilmiştir. Işık yapıya soldan sağa doğru gönderildiğinde, yapının sonundaki elektrik alan profilinin kesiti optik eksende ana lob oluşmadan iki güçlü yan lobun oluştuğunu göstermektedir. Sağdan sola iletimde ise yapı sonundaki elektrik alan profilinde güçlü bir ana lob oluştuğu gözlemlenmiştir. İki durumun genlik karşılaştırılması yapıldığında, ileri yönde ışık yayılımının durdurulduğu, diğer yönde ise desteklendiği görülmüştür. Sonuç olarak farklı iki doğrultu için asimetrik dalga iletimi elde edilmiştir.

İki tasarım arasında karşılaştırma yapıldığında benzer dalga iletim mekanizmasının iki durum için de geçerli olduğu gözlemlenmiştir. Fakat ikinci durumda daha yüksek kontrast oranı elde edilmiştir.

2.3. Asimetrik Dalga İletiminin Fiziksel Açıklaması

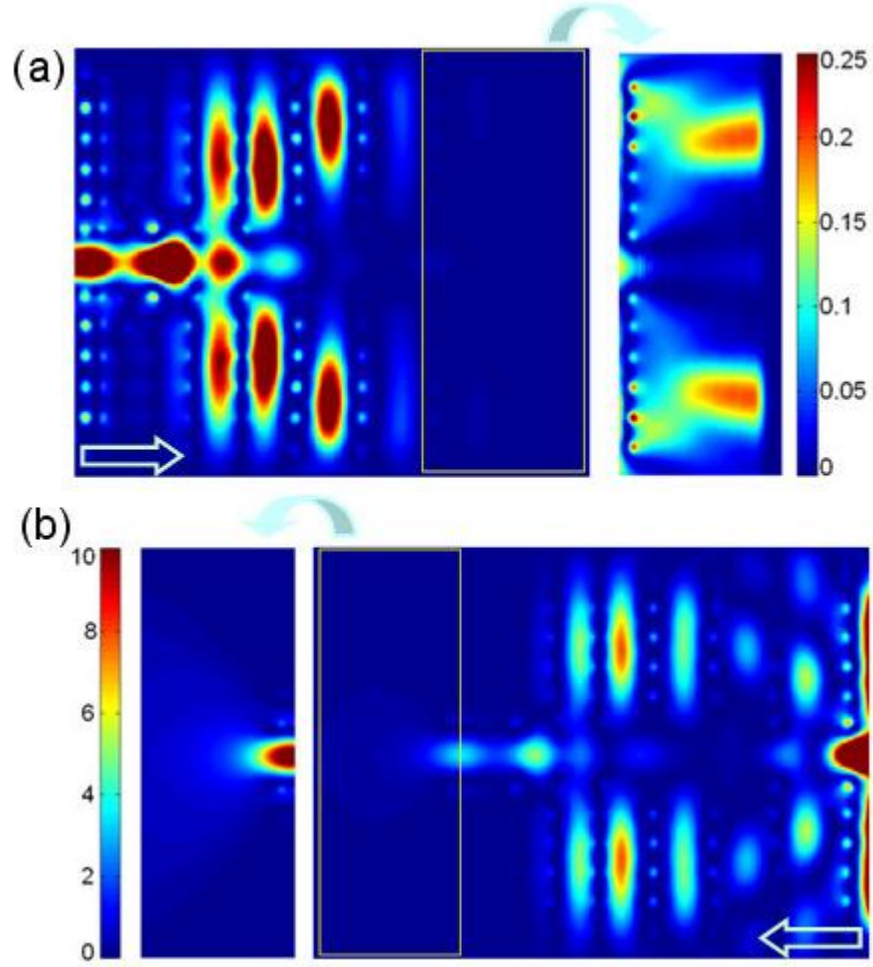
Elektronik diyot temelde lineer olmayan bir devre elemanıdır. Elektrik akımı sadece diyotun terminalleri arasında ileri yönde besleme olduğu durumda geçer. Işık iletiminin sadece bir yönde gerçekleşip diğer yönde engellenmesi bilginin optik işlemi açısından büyük potansiyel taşımaktadır.



Şekil 2.5. Asimetrik dalga iletiminin gerçekleyen fotonik kristal yapının şematik gösterimi. (a) ve (b) sırasıyla soldan sağa ve sağdan sola iletimi göstermektedir. (a)'da gösterilen sarı dikdörtgenler ilerleme doğrultusu boyunca birim hücre değişimini göstermektedir.

Şekil 2.5' te her iki yöndeki ışık akımı gösterilmektedir. Kırmızı oklar elektrik alanın önemli bileşenlerinin izlediği yolu göstermektedir. Şekil 2.5(a)' da gösterildiği gibi yapının sol tarafından dalga gönderildiğinde, gelen ışık ilk olarak merkezde ilerlemektedir. Yapının iç kısmına doğru ilerledikçe elektrik alan y doğrultusuna doğru sızmaya başlamaktadır. Yapı x eksenini boyunca giderek daha seyrekleşmektedir ve y-ekseninde ise latis aralığı sabit tutulmuştur. Elektrik alanın sızıntıya uğradıktan sonra tekrardan x eksenini doğrultusunda hareket etmeye başlar ve yapının sonuna ulaşır. Latis aralığının giderek artması, merkezdeki dalga kılavuz etkisinin kaybolmasına sebep olur. Işığın sağdan sola ilerleyişi Şekil 5(b)'de gösterilmiştir. Dalga kılavuzu çıkışında merkez lob güçlü bir şekilde belirmiştir.

Latis aralığı lineer olarak artan yapı için alan dağılımının yakından incelenmesi Şekil 2.6' da gösterilmiştir. Şekil 2.5(a)' da gösterilen ileri yönde iletim geri yönde iletimle karşılaştırıldığında ileri yön için dalga kılavuzu merkezine ulaşan ışık miktarı oldukça azdır. Şekil 2.6(a) ve 2.6(b)' nin son kısımları alan dağılımlarını daha ayrıntılı göstermek için tekrardan çizilmiştir.



Şekil 2.6. (a) İleri ve (b) geri yönde dalga iletimi için tasarımdaki elektrik alan dağılımının detaylı gösterimi.

Yapının ışığın ilerleme doğrultusuna farklı tepki vermesinin sebebi dalga kılavuzunun asimetrik yapılanmasıdır. Işık ağırlıklı olarak yapının ilk kısmında hapsolmüştür. Latis aralığı artırıldığında yani doluluk oranı azaltıldığında, dalga kılavuz modu yasaklı bant aralığının dışına doğru hareket eder. Dolayısıyla ışık sızmaya başlar ve dalga kılavuzunun merkez kısmında neredeyse boş bir alan bırakır. +x yönündeki iletimde, gelen ışığın çoğunluğu iki tane güçlü yan lob oluşturur. Tam ters doğrultuda ise ışık benzer yol izler. Işık fotonik kristale sağ taraftan gönderildiğinde merkez kısım engellenir ve ışık yapının merkezine doğru yan yollar

boyunca ilerler. Yapının sonuna doğru dalga kılavuzunun merkezine ulaşır ve dar bir açıklıktan yapıyı terk eder.

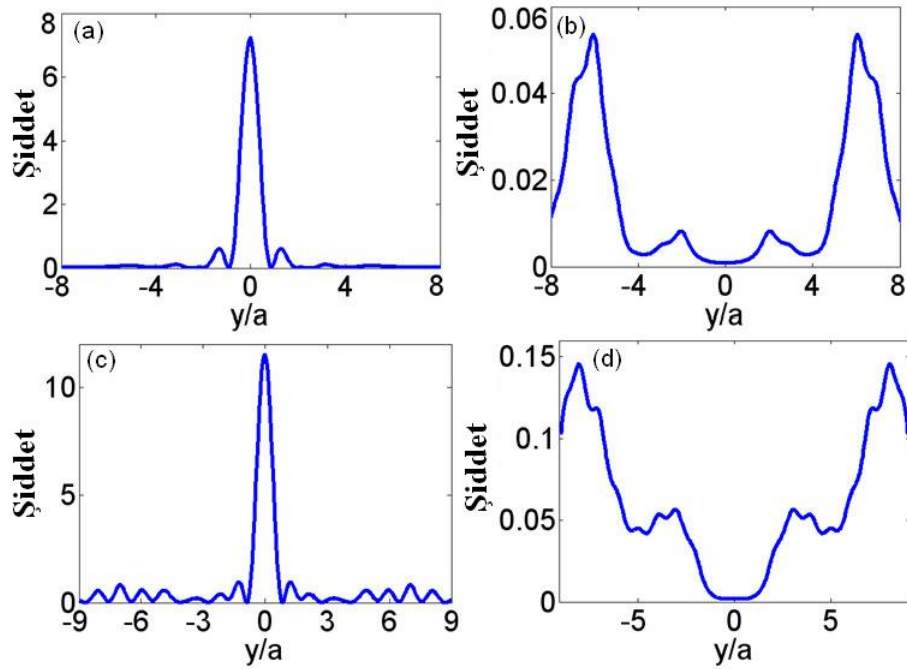
2.4. Asimetrik Dalga İletiminin Deneysel Doğrulanması

Elde edilen nümerik sonuçları doğrulamak için Anritsu 37369A şebeke analizörü kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yarıçapı 0.159 cm ve dielektrik sabiti 9.61 olan silindirik alümina çubuklar kullanılmıştır. Dalga kılavuzun üst ve alt taraflarına ek olarak iki sıra daha dielektrik çubuklar eklenmiştir. Yapının y-ekseni doğrultusundaki periyodu $a = 0.7227$ cm olarak ayarlanmıştır. Gelen ışığı fotonik kristal yapı içinde tutmak için dielektrik çubukların yüksekliği nispeten uzun tutulmuştur. Değişen kırılma indis değerinden dolayı, kontrast oranı ve asimetrik dalga iletiminin gerçekleştiği frekanslar tekrardan elde edilmiştir. İki farklı yapının da ileri ve geri yönde iletim spektrumu hesaplanmıştır. Lineer yapı için ilgili frekans 12.28 GHz, diğer yapı için ise 12.77 GHz 'dir. Şekil 2.7(a) ve 2.7(b) lineer yapı için ileri ve geri yönde ışık iletiminin enine alan profillerini göstermektedir. Diğer tasarım için aynı grafikler Şekil 2.7(c) ve 2.7(d)' de verilmiştir. Önceki durum ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan değişiklikler sonucunda mikrodalga bölgesinde asimetrik ışık yayılımı elde edilmiştir.

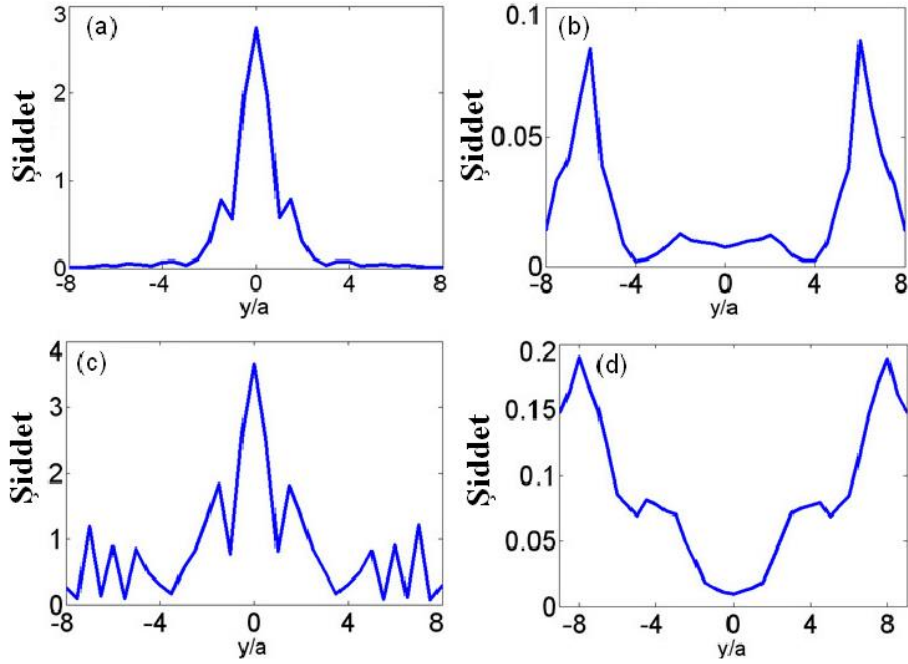
Önerilen yapının odaklama özelliğinden dolayı, periyodik fotonik kristal yapı karbon levhadan yapılmış emici bir tabaka ile kaplanmıştır. Emici tabakanın yerleştirilmesiyle, iletim anteninden gelen bütün dalganın algılanmasıyla antenin anlamlı kalibrasyonu sağlanır. İletim katsayısının hesaplanacağı çıkışa antenlerden biri yerleştirilir. Diğer anten ise yapının tüm yüzeyini uyaracak şekilde uygun mesafeye (antenler arası mesafe 50 cm'e ayarlanır) yerleştirilir.

Deneysel çalışmada, önerilen iki yapının da sonundaki iletim katsayıları hesaplanmıştır. Yapıları uyararak için iki farklı frekans kullanılmıştır. Lineer durum için 12.36 GHz diğer tasarım için ise 12.83 GHz frekansları kullanılmıştır. Alümina çubukların safsızlığından ve deneysel hatalardan dolayı nümerik frekansla arasında

küçük bir sapma gözlenmiştir. Fakat iletim spektrumundaki genel davranış yani asimetrik ışık iletimi deneysel çalışmada da gözlenmiştir. Giriş ve çıkış kanalları arasındaki iletim oranının maksimum olduğu değerler çalışma frekansı olarak belirlenmiştir. Daha sonra, alıcı antenin yeri $0.5a$ değiştirilerek yapının sonunda y -yönündeki alan dağılımını elde etmek için tüm yapı taranmıştır. y -ekseni doğrultusundaki alan dağılımı nümerik sonuçlarla benzer şekilde elde edilmiştir.



Şekil 2.7. Yapının sonundaki alan dağılımları mikrodalga bölgesi için nümerik olarak elde edilmiştir. (a) Lineer yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (b) Lineer yapının önündeki enine elektrik alan profili. (c) Parabolik yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (d) Parabolik yapının önündeki enine elektrik alan profili.



Şekil 2.8. Önerilen yapılarda ölçülen alan profilleri. (a) (a) Lineer yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (b) Lineer yapının önündeki enine elektrik alan profili. (c) Parabolik yapının sonundaki enine elektrik alan profili. (d) Parabolik yapının önündeki enine elektrik alan profili.

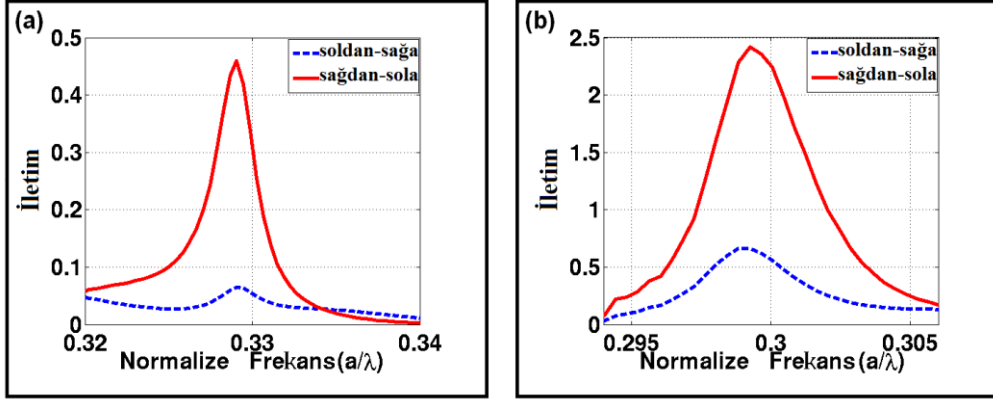
Giriş ve çıkış dalga kılavuzunun orta noktasındaki iletim oranı hesaplanmıştır ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 2.7(a) ve 2.7(b), Şekil 2.8(a) ve 2.8(b) ile karşılaştırıldığında, lineer yapı için deneysel ve nümerik sonuçlar arasında yakın bir uyum olduğu fark edilir. İkinci tasarım için ise Şekil 2.7(c) ve 2.7(d), Şekil 2.8(c) ve 2.8(d) birbiriyle karşılaştırılır. Bu durumda da nümerik sonuçlarda olduğu gibi ileri yön için iki yan lob, geri yön için ise güçlü merkezi lob olduğu görülür. Fakat merkezi lob daha geniştir ve yan loblar daha uzak mesafede oluşmuştur. Yüksek iletim oranına ek olarak mikrodalga bölgesinde asimetric iletim de elde edilmiştir. Deneysel sonuçların düzgün olmayan eğrilerinin sebebi detektör antenin sınırlı mekânsal tarama yapmasıdır. Yapılan taramanın adım boyutu küçültülerek çok daha düzgün eğriler elde edilebilir.

Çalışma frekanslarının genel karakteristiği nümerik çalışmalarla uyum gösterse de ölçümlerde iletim oranı daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi ise z-yönündeki kayıplar ve antenlerin kalibrasyon süresindeki tutarsızlıklar olabilir. İlk ve ikinci tasarım için kontrast oranı sırasıyla 24.8 dB ve 30.8 dB olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, deneysel çalışmada önerilen yapının her iki tarafındaki asimetrik güç dağılımı nümerik sonuçlarla uyumlu şekilde elde edilmiştir.

2.5. Ek Açıklamalar

Yapılan teorik çalışmalar iki boyutlu analize dayanmaktadır. Deneysel çalışmalar mikro dalga bölgesinde yapıldığı için, dielektrik çubukların boyu nispeten uzun alınabilir. Yani çoğu kez çubukların yüksekliği çalışma dalga boyundan daha büyüktür. Sonuç olarak, ideal iki boyutlu varsayım sağlanmış olur. Üç boyutlu analiz düzlem dışı kayıpların hesaba katılmasını sağlar. Fotonik kristal dalga kılavuzu ne kadar uzun olursa düzlem dışı kayıpların o kadar az olması beklenir. Ancak bizim çalışmada fotonik kristal dalga kılavuzu çok uzun değildir. İki boyutlu analiz yerine üç boyutlu analiz yapıldığında, asimetrik dalga iletimini sağlayan frekanslar değişecektir. Frekanslar daha yüksek değerlere çıkacaktır.

Yapılan çalışmada ilk olarak tasarlanan cihazın telekom bölgesinde çalışması hedeflenmekteydi. Bu yüzden dielektrik çubukların kırılma indisi 3.46 olarak alınmıştır. Deneysel çalışmalar da ise kırılma indisi 3.1 olan Alümina çubuklar kullanılmıştır. Bu yüzden yapılan çalışmalara ek olarak asimetrik iletimi sağlayan frekansları belirleyerek deneysel sonuçlarla karşılaştırmak için kırılma indisinin 3.1 olduğu durumun teorik çalışması da yapılmıştır.



Şekil 2.9. (a) Kırılma indisinin 3.46 olduğu durum için lineer yapının normalize olmayan iletim spektrumu. (b) Parabolik yapının normalize olmayan iletim spektrumu.

Şekil 2.3(b) ve 2.4(b)' de kontrast oranlarını verilmiştir. İletim spektrumunu vermek daha aydınlatıcı olacaktır. Bu yüzden iki karşıt doğrultu için normalize olmayan iletim spektrumları Şekil 2.9' da sunulmuştur. Fotonik kristal yapının genişliğinin sınırlı olmasından dolayı Şekil 2.3 ve 2.4' te görüldüğü gibi ışığın bir kısmı iletim doğrultusuna dik yönde sızıntıya uğrar. Bundan dolayı normalizasyon sürecinde bazı sıkıntılar ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, tasarlanan yapılar için normalize olmayan iletim spektrumu verilmiştir. Zıt yönlerde hareket eden ışığın dalganın iletim grafikleri karşılaştırıldığında, sağdan sola iletim soldan sağa iletimden daha fazla olduğu görülmüştür. Tasarlanan lineer ve parabolik yapıların kontrast oranlarının çok benzer olduğu görülmüştür. Fakat parabolik yapı lineer yapıya göre daha fazla ışığı iletmektedir. Parabolik artışlara dayanan ikinci tasarımın sunulmasındaki asıl amaç kontrast oranını ve iletimi iyileştirmektir. Daha önce bahsedildiği gibi lineer yapı için kontrast oranı yaklaşık 25 dB, parabolik yapı için ise yaklaşık 31 dB olarak ölçülmüştür. Tasarlanan ikinci yapı ile yaklaşık 6 dB'lik bir artış sağlanmıştır. Ayrıca parabolik yapıdaki sağdan sola iletim lineer yapıdaki sağdan sola iletime göre oldukça fazladır.

2.6. Sonuç

Sonuç olarak bu çalışmanın amacı fotonik kristal kullanarak optik diyot gibi çalışan yapı elde etmektir. Bunun için kare örgü fotonik kristalin komşu sütunlardaki çubukların arasındaki mesafe değiştirilmiştir. Standart fotonik kristal dalga kılavuzu yapının simetrik olmasından dolayı diyot benzeri bir özellik sergilememiştir. Optik dalga yapının her iki tarafından da aynı şekilde ilerlemiştir. Fakat nerilen yapılar da ışığın ilerlemesi ve iletimi iki zıt doğrultu için aynı değildir. Dalga fotonik kristalde ilerlerken farklı yönlerde asimetric iletim gerçekleşmiştir. Mikrodalga bölgesinde gerçekleştirilen deneysel çalışma ile de nümerik sonuçlar desteklenmiştir. Lineer optik konseptine dayanan bu tasarımlar asimetric dalga iletimi için pratik bir üzümdür. Sadece mesafelerdeki değişimle değil aynı zamanda çubukların yarıçapı ve kırılma indisindeki değişimler asimetric dalga iletim performansını artırabilir.

3. KADEMELİ TÜM DİELEKTRİK PERİYODİK YAPILAR KULLANILARAK GÖKKUŞAĞI YAKALAMA

3.1. Giriş

Son zamanlarda literatüre “gökkuşağı hapsedme” isimli bir terim girmiştir [24]. Bu terimin anlamı elektromanyetik dalganın mekânsal pozisyonlara lokalize olmasıdır. Özellikle görünür dalga boylarında gerçekleştiği için gökkuşağı yakalama olarak adlandırılır. Çeşitli mekanizmalarla hapsedilen optik darbeler, filtre, optik hafıza, veri işlemcisi gibi optik sinyal işleme cihazlarının sayısız uygulama potansiyeline sahip olduğu için fotonik alanında aktif bir şekilde araştırılmaktadır. Işık madde etkileşiminin geliştirilmesi optik sensörler gibi fotonun farklı alanlarına benzersiz avantajlar sağlar. Dalgaların grup hızı yavaşlatılarak ve değiştirilerek gökkuşağı hapsedme gerçekleştirilebilir [5, 25-36]. Son zamanda yapılan çalışmalarda farklı metotlarla görünür elektromanyetik spektrumun hapsedilmesi başarılmıştır. Örneğin metamalzeme dalga kılavuzları [24, 25], plazmonik dereceli metalik ızgaralar [26-28], plazmonik dalga kılavuzları [29-32] ve fotonik kristaller [33, 34] bir dalga paketini mekânsal ayırmada kullanılmıştır. Yeni yapılan bir çalışmada ise gelişmiş floresan emisyonu ile çip üstü spektroskopi konsepti uygulanmıştır [35-37].

Daha önceki çalışmalar kategorize edildiğinde, yaklaşımların çoğunda metalik veya metalik-dielektrik yapıların kullanıldığı görülmüştür. Metalik yapıların ise optik dalga boylarında kayıplı olduğu bilinmektedir. Geniş bir bant aralığı hapsedilmek istendiğinde ise başka önemli sıkıntılar ortaya çıkar. Metalik yapılar için bu iki durum göz önüne alındığında, geçirgen dielektrik malzeme kullanımının elektromanyetik dalgaları hapsedmede daha avantajlı olacaktır. Literatürde yapılan araştırma sonucunda, tamamen dielektrik malzeme kullanan çok az çalışma olduğu görülmüştür. Örneğin referans 34’ de gökkuşağı hapsedmesi için sadece tek boyutlu periyodik yapı kullanılmıştır. Fakat bu zamana kadar görünür ışığın mekânsal lokalizasyonu ve ayırımı için iki ya da üç boyutlu periyodik dielektrik yapı

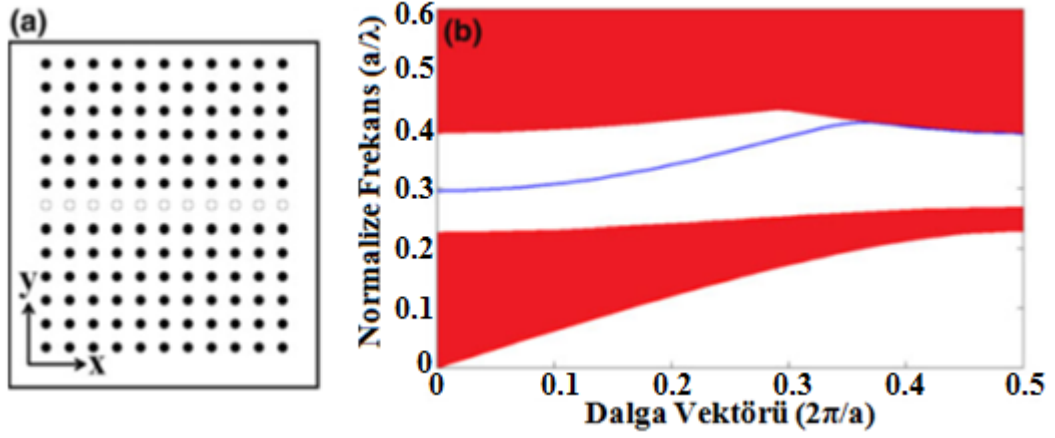
kullanılmamıştır. Periyodik kırılma indis değişimli dielektrik yapılar fotonik kristaller olarak adlandırılmaktadır [38].

Yapılan çalışmada, iki boyutlu fotonik kristal temel yapıyı oluşturmaktadır ve geniş bir bant aralığını hapsetmek için tamamen dielektrik malzeme kullanılmıştır. Önerilen farklı fotonik tasarımların ışık hapsetme mekanizması teorik olarak çalışılmıştır. İlgili frekans aralığı 450 nm ile 800 nm arasında değişmektedir. Önerilen yaklaşımın belirgin özellikleri malzemedeki kayıpların düşük olması, geniş dalga boyu aralığı ve yapısal konfigürasyonun basit olmasıdır.

3.2. Gökkuşuğu Hapsetme İçin Önerilen Yapı: Kademeli Fotonik Kristaller

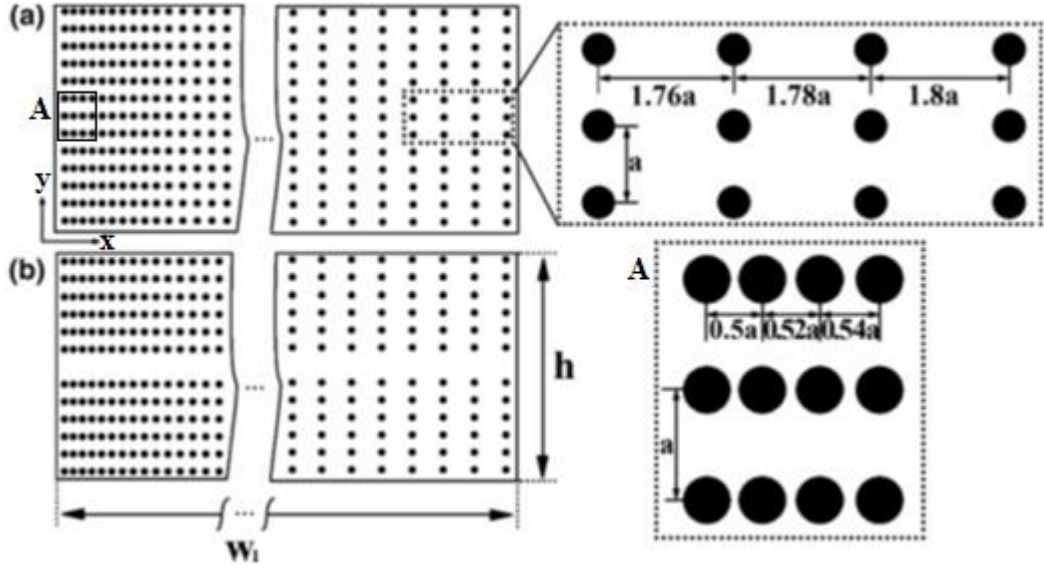
Temel kare örgü fotonik kristal yapısı farklı dalga boylarındaki optik darbeleri hapsetmek için modifiye edilmiştir. Dielektrik silindireler hava ortamında periyodik olarak iki boyutta yerleştirilmiştir. Kare örgü fotonik kristal TM polarize ışıkta (elektrik ve manyetik alan bileşenleri sırasıyla E_z , H_x ve H_y 'dir) tercih edilen dispersiyon özelliği sergilediği için TM polarize ışık kullanılmıştır. Eğer fotonik kristalin periyodik yapısı bozulmamışsa yasaklı bant aralığı ortaya çıkar ve bu aralığa denk gelen frekanslar yapıdan yansır. Yasaklı bant aralığını gösteren dispersiyon diyagramı hesaplamaların doğru yolu düzlem dalga açılım yöntemidir [22].

Şekil 3.1(a)' da gösterildiği gibi fotonik kristal yapıdan dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Periyodik yapı yeteri kadar bozulursa yasaklı bant aralığında yapay bir bant ortaya çıkar. ΓX simetri doğrultusundaki dielektrik silindirlerin tamamı yapıdan çıkarılarak dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Bu çubuklar Şekil 3.1(a)' da kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 3.1(b) ise kare örgü fotonik kristal dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramını göstermektedir. Kullanılan dielektrik çubukların yarıçapı $0.22a$, a örgü sabiti, ve kırılma indisi 3.46 'dır. Dispersiyon diyagramında geniş bir frekans aralığını tarayan güdümlü mod ortaya çıkar. İzin verilen bantların yukarı ve aşağı hareketi farklı ilerleme pozisyonlarında düşük grup hızları oluşmasını sağlar.



Şekil 3.1. (a) Temel kare örgü fotonik kristal ve fotonik kristal dalga kılavuzu (b) Fotonik kristal dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı

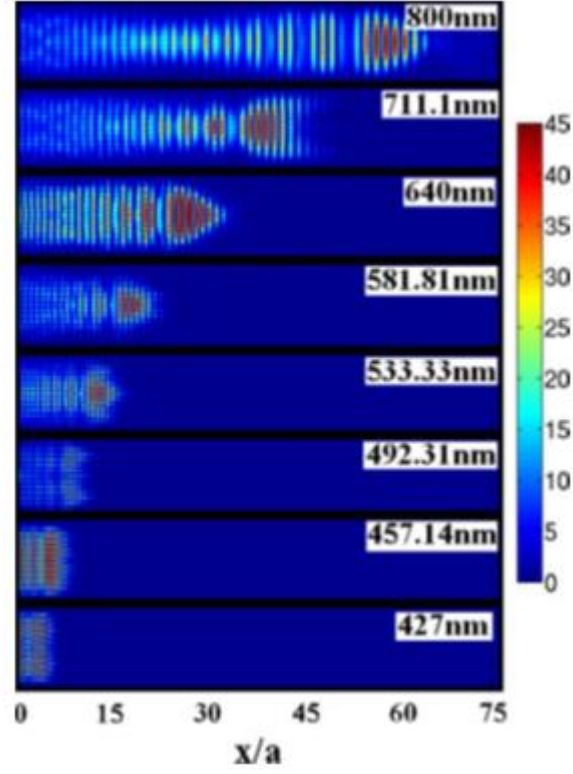
Gökkuşığı hapsetmesi için önerilen ilk yapı Şekil 3.2(a)' da gösterilen kademeli fotonik kristal yapısıdır. Dielektrik çubukların komşu sütunları arasındaki mesafe x-ekseni doğrultusunda $0.02a'$ lık adımlarla lineer olarak artırılmıştır. Sütunlar arası mesafe $0.50a'$ dan başlayıp $1.80a'$ ya ulaşmaktadır. Şekil 3.2(a)' nın sağ tarafında kademeli fotonik kristalin ön ve arka kısımları ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Yapının toplam uzunluğu, w_1 , $75a$ ve enine uzunluğu, h , ise $12a'$ 'dir. Yapının y-ekseni doğrultusundaki periyodu a' 'da sabit tutulmuştur. Daha önce bahsedildiği gibi nümerik hesaplamalarda TM polarize ışık kullanılmıştır. Şekil 3.2(a)' da görüldüğü gibi periyod artışı sadece ilerleme doğrultusunda yapılmıştır.



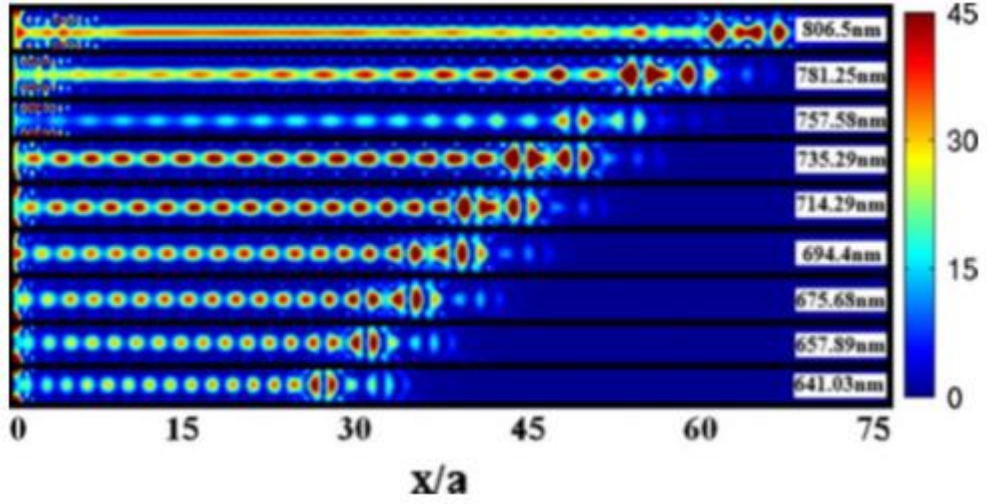
Şekil 3.2. (a) Dielektrik çubuk sütunları arasında $0.02a$ mesafe artışı olan fotonik kristalin şematik gösterimi (b) Fotonik kristal dalga kılavuzunun şematik gösterimi. Dalga kılavuzunun genişliği $0.2a$ 'dır.

Süper hücre tekniği ile ilişkilendirilmiş düzlem dalga genişletme metodu fotonik yapının bant diyagramının hesaplamak için kullanılan çok yönlü bir yaklaşımdır [22]. Fakat optik darbenin zaman alanında ilerlemesini görüntülemek için sonlu farklar zaman düzlemi (FDTD) yöntemi kullanılır [23]. Yapının sonlu boyutundan dolayı meydana gelen yansımaları engellemek için mükemmel uyumlu tabaka gibi uygun bir emici sınır koşulu teorik çalışmalara eklenmiştir. Zaman düzleminde yapılan analizlerde mekânsal bölümlenme $\Delta x = \Delta y = a/25$ olarak alınmıştır. Fotonik kristal yapıya farklı dalga boylarındaki ışık gönderilmiştir. Hapsedilen normalize frekans $\omega a/2\pi c = 0.16$ ve 0.30 aralığındadır. Her giriş sinyalinin mekânsal alan dağılımı Şekil 3.3' te resmedilmiştir. Alan dağılımları incelendiğinde farklı frekansların farklı pozisyonlarda lokalize olduğu görülmüştür. Normalize frekansı 0.16 'nın altında olan sinyaller fotonik kristal yapıya yavaşlamadan ve durmadan ilerlemektedir. Şekil 3.3'ün en üst kısmında gösterildiği gibi 0.16 normalize frekansına sahip ışık yapıya gönderildiğinde ışık yapı içinde yavaşlayarak durmaktadır ve yapının sonunda hapsedilmektedir. Alan dağılımı ışığın fotonik kristal içerisinde yayılımını

göstermektedir. Lokalizasyon noktalarında alan şiddeti artmaktadır. İleri yönde ışık iletiminin engellenmesinden dolayı ışık geri yönde hareket etmeye başlamaktadır. Normalize frekans değeri arttıkça yani dalga boyu azaldıkça ışığın hapsediği pozisyon yapının soluna doğru (-x yönünde) hareket etmektedir. Yapı ön tarafta birbirine daha yakın yerleştirilmiş dielektrik çubuklardan dolayı daha yoğundur bu yüzden küçük dalga boyları yapının ön kısmına daha yakın pozisyonlarda hapsedilmektedir. Işığın yavaşlaması ve durması yasaklı bant aralığının uç bölgelerine yakın yerlerden oluşur. Gelen ışığın dalga boyu yapının periyodu ile aynı mertebelerde olduğu durumda fotonik kristalin yasaklı bant özelliği ortaya çıkar. Yapının ön kısmı daha küçük periyoda sahipken arka kısmının periyodu daha büyüktür. Bu durum farklı dalga boylarının uygun pozisyonlarda hapsedilmesini etkiler. Her dalga boyunun fotonik kristal yapı içerisinde lokalize olduğu pozisyon ayırt edilebilir. Normalize frekansı 0.30' un üzerinde olan ışık yapıya nüfuz edememektedir. Şekil 3.2' de gösterilen yapı için örgü sabiti a 128 nm olarak seçilmiştir. Böylece dalga boyu 427 nm ile 800 nm arasında ayarlanarak görünür spektrumda çalışılmıştır. Dalga boyu azaldığında ışığın yapının daha küçük periyoda sahip olduğu ön kısımda hapsediği gözlemlenmiştir.



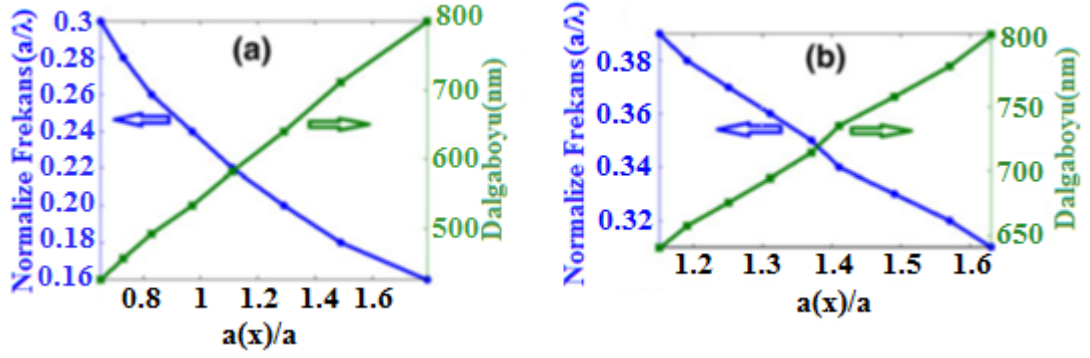
Şekil 3.3. Normalize frekans değeri $\omega a/2\pi c=0.16$ ve 0.30 arasında olan dalganın fotonik kristalde yapı içerisinde alan dağılımı gösterilmektedir. Hapsolan normalize frekansa denk gelen dalga boyları yapının sağ üst köşesinde gösterilmiştir. Sağ taraftaki renk çubuğu alan şiddet değişiminin minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.4. Normalize frekans değeri $\omega a/2\pi c=0.31-0.39$ arasında olan dalganın fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde alan dağılımını gösterilmektedir. Hapsolan normalize frekansa denk gelen dalga boyları yapının sağ üst köşesinde gösterilmiştir. Sağ taraftaki renk çubuğu alan şiddet değişiminin minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir.

Kademeli fotonik kristalde $2a$ boyutunda dalga kılavuzu oluşturulduğunda Şekil 3.2(b)' deki gibi bir konfigürasyon elde edilir. Bu yapı için de farklı dalga boylarının yayılım karakteristiği incelenmiştir. Şekil 3.4 fotonik kristal dalga kılavuzunda farklı dalga boylarının ilerlemesini göstermektedir. Yapının tüm parametreleri Şekil 3.2(a)' daki ile aynıdır. Frekans arttıkça $-x$ doğrultusunda ışıkların hapsedikleri pozisyonların kayması Şekil 3.3' te sunulan sonuçlarla benzerdir. Fakat önceki sonuçlarla karşılaştırıldığında bazı farklılıklar ortaya çıkmıştır. Örneğin gelen ışık dalga kılavuzu bölgesinde hareket etmektedir. Yapı içerisinde hapseden ışığın bant aralığı $\omega a/2\pi c = 0.16-0.30$ 'dan $0.31-0.39$ 'a değişmektedir. Bant aralığının daha büyük frekanslara kaydığı ve Şekil 3.3 ile karşılaştırıldığında bant aralığının daraldığı görülmektedir. Farklı dalga boyları farklı ayırıcı etkiler sergilemektedir. Örneğin 0.31 normalize frekansı yavaş ışığın dalga iletimini alan dağılımını sergilemektedir bu yüzden yüksek frekanslar kısa mesafeye yayılır. Görünür spektrumda çalışmak için bu yapıda örgü sabiti, a , 250 nm olarak seçilmiştir.

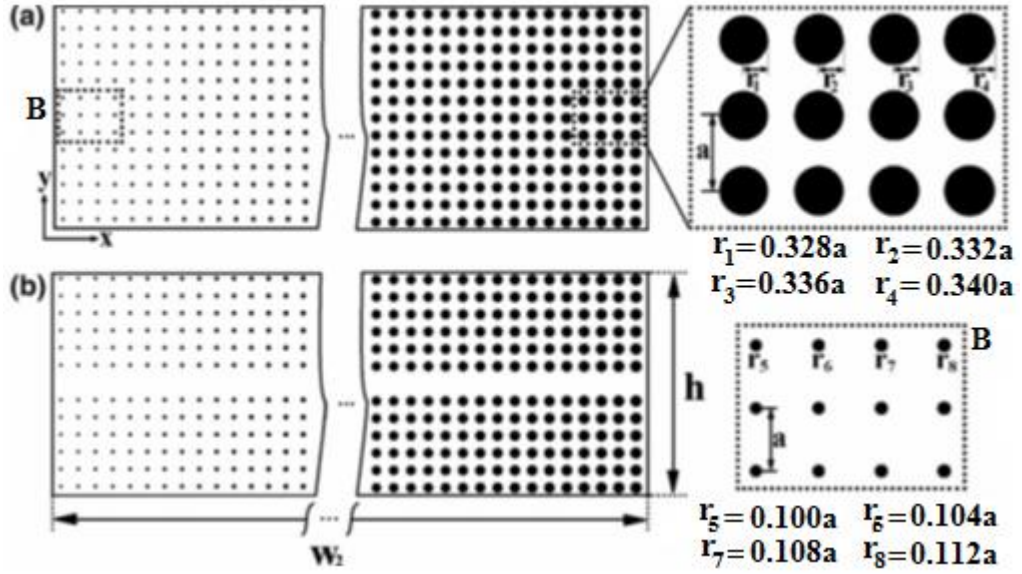
Şekil 3.5 iki fotonik kristal yapı için hapsolan sinyallerin periyoda göre spektral bölgesini göstermektedir. Şekilde nanometre cinsinden normalize dalga boyları gösterilmiştir. Şekil 3.5(a)' da önceki yapı için hapsolan elektromanyetik spektrum 800-427 nm olarak gösterilmiştir. İkinci durumda ise çalışma spektrumu 806.6-641.03 nm aralığına denk gelmektedir. Fotonik kristal yapı periyodu 64-230.4 nm aralığında ayarlamayı sağlar. Periyod dalga kılavuzu olan yapı için farklıdır. Bu durumda ise periyod 128 nm ile 450 nm aralığını kapsamaktadır. İki durum için de periyot ile dalga boyu arasında hemen hemen lineer bir ilişki olduğu görülmektedir.



Şekil 3.5. Yapı içerisinde hapsolan farklı dalga boylarının periyoda göre pozisyonları. (a) ve (b) sırasıyla dalga kılavuzunun olmadığı ve olduğu durumları göstermektedir.

3.3. Alternatif Bir Yapı

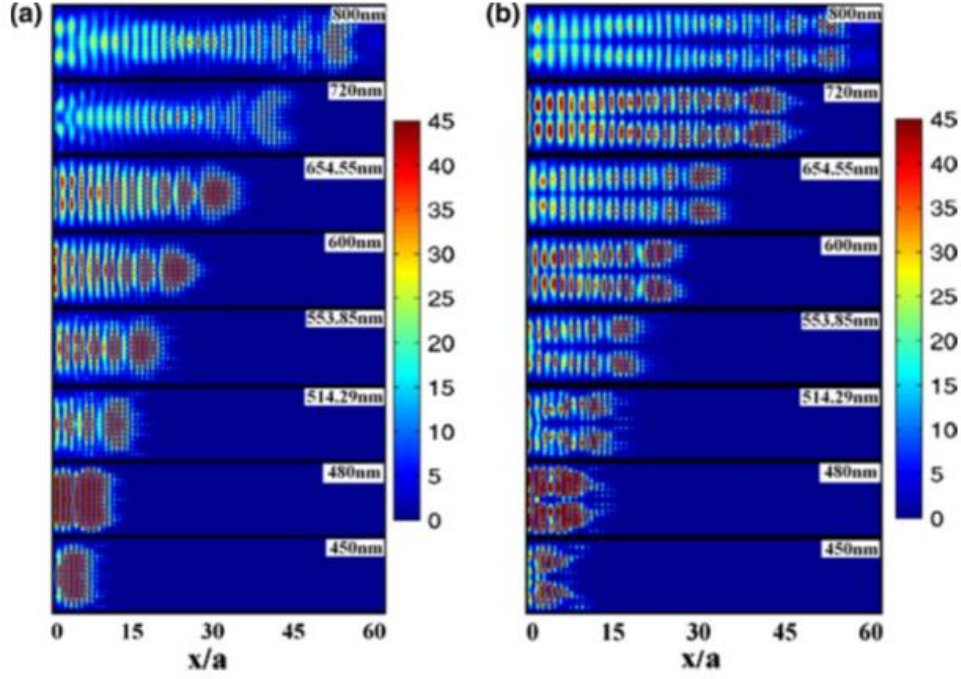
Önerilen farklı bir yapıda periyod yerine çubukların yarıçapları $0.01a'$ dan başlayarak $0.34a'$ ya kadar $0.04a'$ lık artışlarla iletim doğrultusunda lineer bir şekilde artırılmıştır. Dielektrik çubuklar arasındaki mesafe a' da sabit tutulmuştur. Silindirlerin yarıçapını artırmak her birim hücredeki dielektrik miktarının artmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.6' da sağ tarafta gösterilen iki ek kısım yapının başından ve sonundan alınan kısımların büyük halini göstermektedir.



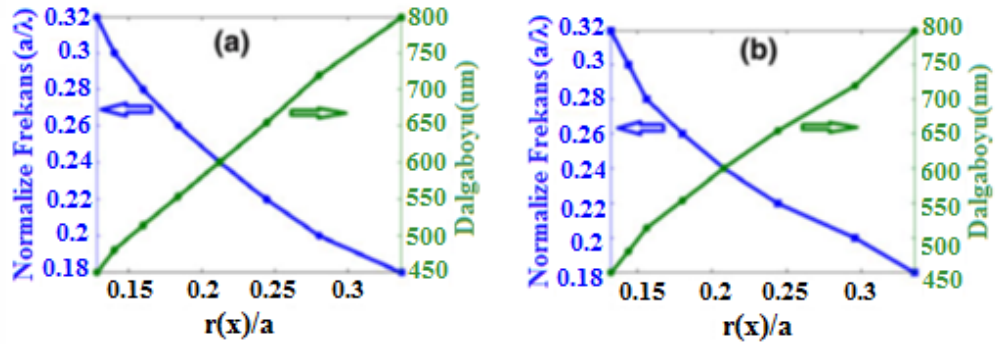
Şekil 3.6. (a) Dielektrik çubukların yarıçapları ilerleme doğrultusunda lineer bir şekilde artan fotonik kristalin şematik gösterimi. (b) Merkezdeki dielektrik çubuk satırı ortadan kaldırılarak (a)'daki fotonik kristalden elde edilen dalga kılavuzu

Tasarımın ikinci aşamasında dalga kılavuzunun olduğu ve olmadığı durumlar Şekil 3.6 (a) ve 3.6(b)' de tekrardan gözden geçirilmiştir. Bu durumda da diğer tasarım ile benzer süreçler izlenmiştir. Elektromanyetik spektrumun hapsolan bölgesi incelenmiştir ve 0.18-0.32 normalize frekans aralığı ışık lokalizasyonu için uygun bölge olarak seçilmiştir. Şekil 3.7(a) ve 3.7(b)' de gösterildiği gibi farklı frekanstaki optik darbeler farklı pozisyonlarda yapının içine hapsolmuştur. Her iki durum için de örgü sabiti a 144 nm seçildiğinde dalga boyu aralığı 800-450 nm aralığına denk gelmektedir. Birim hücrenin dielektrik doluluk oranı azaldığında frekans bantları yukarı kaymaktadır. Daha kısa dalga boylarının yavaşlaması ve lokalize olması dielektrik doluluk oranının daha küçük olduğu yerlerde gerçekleşmektedir. Şekil 3.7 farklı dalga boylarının yapı içerisinde alan dağılımlarını göstermektedir. Hapsolan dalgaların pozisyonları Şekil 3.7(a) ve 3.7(b)' deki alan dağılımları incelenerek çıkarılmıştır. İki farklı fotonik kristal yapı için elde edilen sonuçlar Şekil 3.8' de sunulmuştur. Bu tasarımlarda daha önce önerilen iki yapıya göre bant aralığı daha

geniştir. Şekil 3.8' e göre hapsolan dalga boyu ile yarıçap arasında hemen hemen lineer bir ilişki vardır.

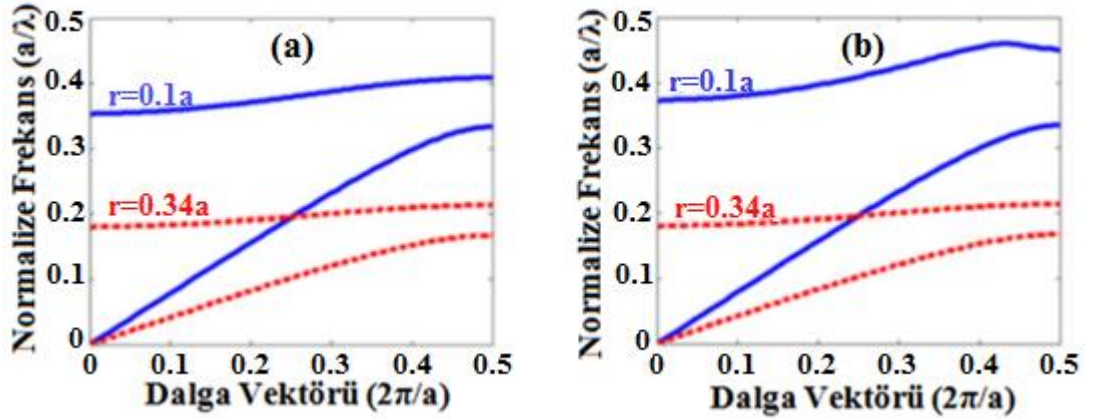


Şekil 3.7. (a) Normalize frekans değeri 0.18 ile 0.32 arasında olan ışığın yapı içerisinde ilerlemesi. (b) Aynı frekanslardaki ışığın dalga kılavuzu yapısında ilerlemesi.

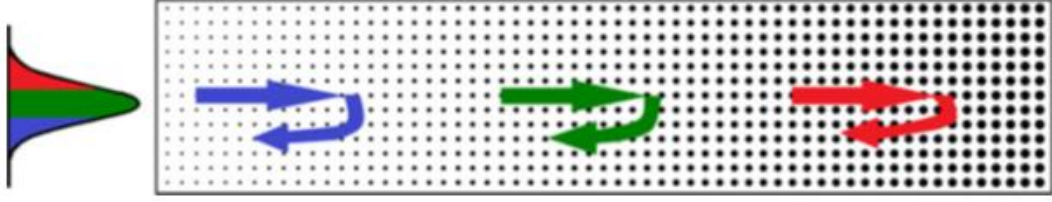


Şekil 3.8. Farklı frekansların hapsoldükleri pozisyondaki çubuk yarıçaplarını gösteren grafik. (a) ve (b) sırasıyla dalga kılavuzunun olmadığı ve olduğu durumu göstermektedir.

Fotonik yapılarda optik dalgalar, radyal frekans ve dalga vektörü arasındaki dispersiyon ilişkisine dayanarak yayılırlar. Işık hızı grup hızı kontrolü ile takip edilebilir. Dispersiyon grafiğinde grup hızının azaldığı özel bölgeler mevcuttur. Dielektrik doluluk oranı fotonik bant yapısını değiştirebilir. Örneğin, farklı bölgeler ışığın hızını azaltır ve ışığı bazı dalga boylarında hapseder. İkinci tasarım için sürekli dielektrik bant hareketi Şekil 3.9' da gösterilmiştir. Şekil 3.9(a) ve 3.9(b) sırasıyla dalga kılavuzu olmayan ve olan durumu göstermektedir. İki yapı için de benzer dispersiyon karakteristiği elde edilmiştir. Süper hücredeki çubukların yarıçapı arttığında bantlar aşağı doğru hareket etmektedir. Yani daha büyük yarıçaplı çubuklara sahip süre hücre daha büyük dalga boyuna sahip ışığın yayılmasına izin vermektedir. Farklı renklerin yapı içerisinde yansımaları ve durmaları Şekil 3.10' da şematik olarak gösterilmiştir. Kırmızı ışığın dalga boyu en uzun olduğu için yapı içerisinde en uzak mesafede lokalize olur. En kısa dalga boyuna sahip mavi ışık ise en yakın pozisyonda lokalize olmaktadır. Yeşil ışığın dalga boyu ise ikisinin ortasında olduğu için bu ışık diğer iki ışığın lokalize olduğu pozisyonlar arasında bir yerde yavaşlayıp geri dönmektedir.



Şekil 3.9. İkinci tasarım için çubuk yarıçapının 0.1a ve 0.34a olduğu durumların dispersiyon diyagramı (a) ve (b) sırasıyla dalga kılavuzunun olmadığı ve olduğu durumu göstermektedir.



Şekil 3.10. Fotonik kristal yapıda farklı dalga boylarının hapsedikleri pozisyonları gösteren şematik.

Farklı dalga boylarını farklı pozisyonlarda hapsetmek için iki farklı yapı önerilmiştir. Önerilen fotonik kristal yapıların ilkinde hapsedilen dalga boyu aralığı 427 nm'den 800 nm'e kadardır. İlk yapıda dalga kılavuzu oluşturulduğunda ise bu aralık 641.03 nm ile 806.5 nm arasına denk gelmektedir. İkinci tip fotonik kristal yapı için dalga kılavuzunun olduğu ve olmadığı durumlarda hapsedilen dalga boyu aralığı 450 nm ile 800 nm aralığına denk gelmektedir.

Gökkuşaağı hapsetmesi için dielektrik fotonik kristal kullanılmasının avantajları dielektrik yapıların metalik yapılara göre daha geniş bir bant aralığı için geçirgen olması ve daha az kayıplı (geçiş ve saçılma kayıpları hariç) olmasıdır. Dielektrik fotonik kristalin diğer bir avantajı ise önerilen diğer yapılara göre yapısal form açısından daha az karmaşık olmasıdır. Ayrıca bu metotla hapsedilen dalga boyu aralığı yapının boyu uzatılarak artırılabilir.

Tasarlanan her yapı için farklı dalga boylarının hapsolmesini göstermek için yapı sürekli bir kaynak tarafından uyarılmıştır. Bunun yerine farklı merkez frekanslarındaki Gauss kaynak da kullanılabilir. Farklı dalga boyları yapıyı aynı anda farklı ağırlıklarda uyaracağı için ortaya çıkan alan şiddeti tüm dalga boylarındaki alan şiddetinin toplamı şeklinde olacaktır. Bu durumda daha uzun mesafeye yayılarak yapının sonuna yakın yerde son bulan dalga boyu hariç diğer dalga boylarının lokalize oldukları pozisyonları belirlemek oldukça zordur. Süper pozisyon ilkesine göre alan dağılımı tüm dalga boylarının dağılımları toplamıdır.

3.3. Sonuç

Sonuç olarak bu çalışmanın amacı tamamen dielektrik fotonik kristalleri kullanarak geniş spektrumda ışığı hapsedmektir. Bunun için kare örgü fotonik kristalde dielektrik çubuk stnları arasındaki mesafe modifiye edilerek dereceli bir yapı elde edilmiştir. Ayrıca başka bir tasarımda iletim doğrultusu boyunca silindirlerin yarıçapları $0.10a$ ' dan $0.34a$ ' ya artırılmıştır. Önerilen tüm yapılarda farklı frekanstaki ışık yapı içerisinde farklı pozisyonlarda lokalize olmuştur. Tasarımların daha önce çalışılmış yapılara göre avantajı elektromanyetik dalga hapsolmasını geniş bir bantta gerçekleştirmesidir. Işığın hapsediğu pozisyon ile derecelendirme parametresi arasında hemen hemen lineer ilişki bulunması çeşitli dalga boylarının nerede lokalize olacağını doğru tahin etmeyi sağlamaktadır. Lineer optik konseptine dayanan tasarımlar optik tampon, spektrometre, veri işlemci ve optik bellek olarak kullanılabilir.

4. DERECELENDİRİLMİŞ KIRILMA İNSİNE SAHİP FOTONİK KRİSTALLER İLE DALGA BOYU SEÇİCİ ORTAM TASARIMI

4.1. Giriş

Dalga boyu bölme çoklayıcı sistemi yüksek kapasiteli optik ağların tasarımında önemli yer alır. Bu çoklayıcı cihazlarına optik entegre devrelerde gelen sinyali farklı dalga boylarına bölmek ve birleştirmek için ihtiyaç duyulur. Optik çoklayıcı cihazların tasarımı için Bragg ızgaraları [38], sıralı dalga kılavuz kafesleri [39], çok katmanlı ince filmler [40], fotonik kristal fiberler [41], dereceli indeks düzlemsel yapılar [42] kullanılan çeşitli tekniklerdir.

Fotonik kristaller yapay olarak bir, iki ve üç boyutta üretilebilen periyodik yapılardır [5]. Bu yapılar izin verilen frekans aralığında yüksek dispersiyon özelliği sergilemektedirler. Süper prizma ve süper lens olayları [43] fotonik kristallerin farklı özelliklerinden bazılarıdır. Kompakt fotonik entegre devrelerin gerçekleştirilmesi için fotonik kristal kullanılarak tasarlanan dalga boyu bölme çoklayıcıları önemli bir bileşen olarak kabul edilebilir. Literatürde rezonatörlere [44], negatif kırıcı lenslere [45], dalga kılavuzu elemanlarına [46], süper prizma [47] ve kolimasyon etkisine [48] dayanan fotonik kristal tabanlı dalga boyu bölme çoklayıcıları mevcuttur.

Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristaller ve olası uygulamaları son zamanlarda çalışılan konulardandır [49-58]. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristaller dalga boyu seçici ortam tasarımı için farklı bir yaklaşım olarak göz önünde bulundurulabilir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapılar birim hücrenin doluluk oranını, kırılma indisini ya da örgü periyodunu dereceli olarak değiştirerek elde edilebilir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli bir ortam tüm dalga boylarının iletirken Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapılar ayrık özelliğinden dolayı dalga boyu seçici gibi davranırlar.

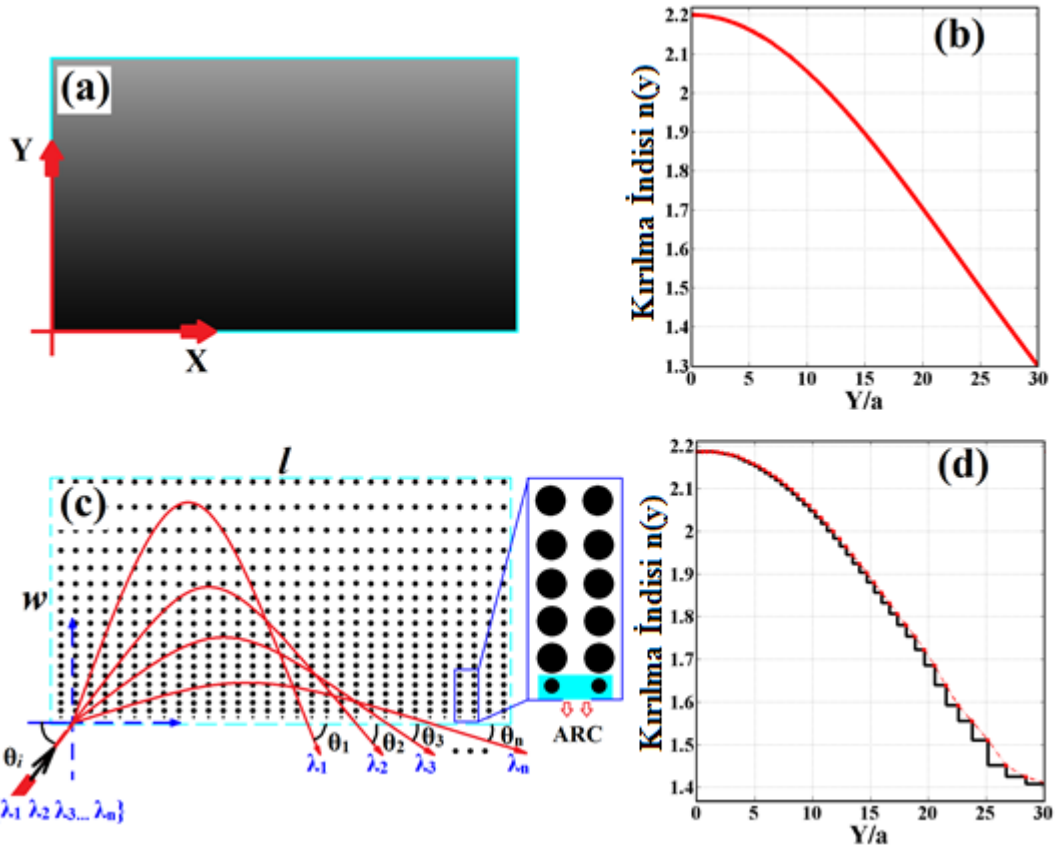
Referans 51-56'da belirtildiği gibi derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal çalışmalarının çoğunda odaklanma ve bağlanma etkileri araştırılmıştır. Gelen ışığın dikey doğrultuda yayılma karakteristiği daha önce incelenmiştir. Fakat derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristallerde ışığın yatay doğrultuda yayılması derinlemesine araştırılmamıştır. Bu çalışmada derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal kullanılarak dalga boyu bölücü için yeni bir teknik önerilmiştir. Tasarlanan yapı yatay doğrultuda dereceli ayna [59] görevi görmektedir. Bundan dolayı yapı gelen ışığı geniş bir bantta farklı derinliklerde yansıtır. Tasarlanan fotonik kristal yapı kademeli olarak değişen kırılma indisine sahip olduğu için yapı içerisine nüfuz eden ışık sürekli kırılmaya uğrar ve kırılma açısının 90° ye eşit olduğu yerde tam yansıma gerçekleşir. Farklı dalga boyları için tam yansıma farklı derinlikte gerçekleştiği için dalga yapıyı farklı çıkış açılarında terk eder. Yapının girişine ışık daha önce belirlenmiş açı ile eğik gönderildiğinde mekânsal dalga boyu ayırımı gerçekleşmektedir. Ayrıca fotonik kristalden oluşan ayrık ortam dağıtıcı özellik gösterdiği için fotonik kristal tabanlı tasarımlar oldukça dalga boyu seçicidir. Eğer indeks dağılımı ve ışığın gelme açısı optimize edilirse tasarlanan derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapı dalga boyu ayırıcı olarak kullanılabilir.

Sunulan çalışmada, yapının kristalli doğasından dolayı dalga boyuna bağlı mekânsal kayma beklenmektedir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli bir ortamda ise nümerik modellemede malzeme dispersiyonu göz önüne alınmadığı için yapının dalga boyu değişimine farklı cevap vermesi beklenmez. Fotonik kristal yapının dağıtıcı özelliği, sürekli yapı ile daha sonra karşılaştırılacaktır.

4.2. Sürekli Yapı ve Fotonik Kristal Yapının Geometrik Analizi

Bu çalışmada iki tip derecelendirilmiş kırılma indisine sahip ortam geometrik olarak tasarlanmıştır ve dalga boyu seçicilik performansları karşılaştırılmıştır. Bu ortamlardan birincisi değişen kırılma indisine sahip sürekli bir ortam diğeri ise uzun dalga boyu bölgesinde kırılma indisi sürekli ortamın kırılma indisine benzetilen

fotonik kristal tabanlı ayırık ortamdır. Şekil 4.1(a)' da sürekli ortam şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 4.1(b)' de ise ilgili kırılma indis profili gösterilmektedir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli ortamın kırılma indisi $n(y) = n_0 \operatorname{sech}(\alpha y)$, α sabit bir sayı ve n_0 , $y = 0$ 'daki (yapının alt yüzeyindeki) kırılma indisi, formülü ile ifade edilen hiperbolik sekant profiline sahiptir. Gradyan faktörü $0.0373a^{-1}$ olarak seçilmiştir, a örgü sabitini ifade etmektedir ve optik eksenindeki kırılma indisi $n_0=2.20$ alınmıştır. Yapının y-eksenindeki uzunluğu ise $30a$ ' dır. Şekilde görüldüğü gibi sadece y doğrultusunda indeks değişimi mevcuttur. Y-ekseni boyunca hareket edildiğinde yani yapının alt kısmında üst kısmına gidildikçe kırılma indisinin giderek azaldığı görülmektedir. Hiperbolik sekant indeks profiline sahip sürekli ortam Silika gibi malzemelerin katkılanması ile üretilebilir. Fakat fabrikasyon sürecinde indeks dağılımındaki sınırlamalar ve yapı içerisinde homojen katkılama gibi bazı sorunlar ortaya çıkabilir. Bu tip zorlukların üstesinden gelmek için fotonik kristal tabanlı derecelendirilmiş kırılma indisine sahip yapılar alternatif bir çözüm adayı olabilir.



Şekil 4.1. (a) Kademeli sürekli ortamın şematığı ve (b) kırılma indis profili (c) Önerilen derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristalin şematik görünümü ve ilgili farklı dalga boylarının yapı içerisindeki ışın yolları. Fotonik kristalin uzunluğu l ve genişliği w , sırasıyla $140a$ ve $30a$ 'dır. (d) Fotonik kristal yapının 0.10 normalize frekans değerindeki hiperbolik sekant indeks profilinin ayrık versiyonu

Gelen ışık demetini farklı dalga boylarına ayırmak için önerilen derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapı Şekil 4.1(c)'de şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca farklı dalga boylarının yapı içerisinde izlediği yollar da aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapıların sürekli ortamların indeks profilini taklit yeteneğine sahip olduğu bilinmektedir [49]. İstenen kırılma indis dağılımını elde etmek için uzun dalga boyu bölgesinde efektif ortam teorisi uygulanabilir. Bunun için dielektrik çubukların pozisyonları önceden tanımlanmış şekilde değiştirilerek istenen indeks değişimi

başarılı şekilde sağlanır. İlk olarak farklı yanal boyuta sahip fotonik kristal hücrelerinin dispersiyon diyagramları düzlem dalga genişletme metodu kullanılarak elde edilir. Daha sonra ilgili dispersiyon eğrisinin eğimi kullanılarak her bandın grup indisi hesaplanır. Düşük frekans değerleri için bantlar birbirine oldukça yakındır bu yüzden bu frekansların grup indisinde küçük bir değişme olur. Son olarak efektif ortam teorisinin geçerli olduğu 0.10 normalize frekansında istenen indeks dağılımının ayarlanması ile yatay doğrultuda fotonik kristal çubukların pozisyonları elde edilir. Fotonik kristal yapının detaylı spektral analizi referans 54' te yapılmıştır. 0.10 normalize frekansında fotonik kristal yapının hiperbolik sekant indeks profilinin tahmini ayrık versiyonu Şekil 4.1(d)' de gösterilmiştir. Fotonik kristal yapının kırılma indisi y doğrultusundaki periyodun artması sebebiyle yapının üst kısmına gidildikçe azalmaktadır. Bahsedilen algoritmaya uygun şekilde istenen derecelendirilmiş kırılma indisine sahip yapı dikdörtgen örgü fotonik kristal kullanılarak elde edilmiştir. Dielektrik çubuklar hava ortamında iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda yerleştirilmiştir. Çubuklar arası mesafe x -ekseni boyunca sabit tutulurken, y -ekseninde dereceli olarak değiştirilmiştir. Ek olarak geri yansımaları azaltmak için yapının alt kısmına Şekil 4.1(c)' de gösterildiği gibi yansıma önleyici tabaka (ARC) yerleştirilmiştir [60]. Yansıma önleyici tabakadaki silindirlerin yarıçapı $0.10a$ seçilirken fotonik kristal yapıdaki çubukların yarıçapları $0.20a$ ' da sabitlenmiştir. Tasarlanan yapının genişliği $30a$, uzunluğu ise $140a$ 'dır. Frekans ve zaman alanında yapılan nümerik çalışmalarda dielektrik çubukların kırılma indisi 3.13 olarak alınmıştır. Tasarlanan yapının önemli bir özelliği sabit kırılma indisine sahip çubuklar kullanılarak kırılma indisi $n(y = 0a)=2.20$ ' den $n(y = 30a)=1.40$ ' a değişen bir yapı elde edilmesidir. Önerilen fotonik kristal yapı tasarım frekansı ($a/\lambda = 0.10$) civarında çok katmanlı sürekli bir ortam gibi davranır. Dolayısıyla bu frekans civarında yapı dalga boyu seçici özelliği sergilemez. Fakat yüksek frekans bölgelerine ($a/\lambda > 0.20$) gidildikçe yapının kırılma indis profili dalga boyuna bağlı olmaya başlar ve orijinal hiperbolik sekant profilinden sapar. Dielektrik doluluk oranını hesaplamak için $D_{ff}(y) = \pi^2/(\Delta y - a)$ formülü kullanılmıştır. Burada $r = 0.20a$ ve Δy birim hücrenin yanal boyutudur. Bu ilişkiden çıkarılacağı gibi yanal boyut Δy azaldıkça birim hücredeki dielektrik malzeme oranı Şekil 4.1(d)'de

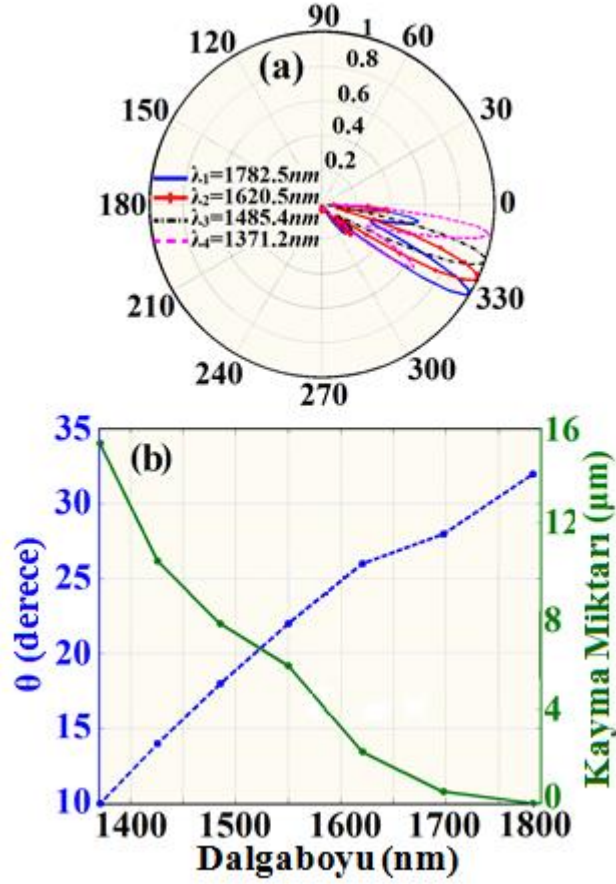
gösterilen kırılma indis profili ile benzer şekilde azalmaktadır. Dielektrik doluluk oranı analizinden yapı içine nüfuz eden ışığın aşamalı bir şekilde kırılarak tam yansıma uğrayacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca önerilen fotonik kristal yapı dağıtıcı olmayan malzeme içermesine rağmen tasarım dağıtıcı özellik yani dalga boyu seçici özelliği sergilemektedir. Fakat düzlemsel dalga kılavuzu yapıları farklı spektral bantları ayırmak için dağıtıcı malzeme kullanırlar [41].

4.3. Nümerik Sonuçların Değerlendirilmesi

Tasarlanan yapıların 2 boyutta nümerik analizi yapılmıştır ve sonlu fark zaman düzlem metodu kullanılarak performansları incelenmiştir [23]. Yapının sonlu olmasından kaynaklanan geri yansımaları önlemek için hesaplama alanının sınırları mükemmel uyumlu katman ile çevrilmiştir [61]. Sayısal analizler boyunca mekansal ayırıklaştırma $\Delta x = \Delta y = a/25$ olarak alınmıştır. Sürekli yapı ve fotonik kristal yapı ϕ_i gelme açısı ile enine polarize ışıkla sol alt köşeden uyarılmıştır. Sıfıra eşit olmayan elektrik ve manyetik alan bileşenleri sırasıyla E_z , H_x , ve H_y 'dir. Uzun dalga boyu bölgesinde, yayılan elektromanyetik dalgalar dielektrik çubuklarla anlamlı bir etkileşime girmeden yapı üzerinden geçerler. Yani gelen dalga yapıyı tasarım frekansı ($a/\lambda = 0.10$) etrafında efektif ortam gibi algılar. Bundan dolayı yapının dalga boyu seçici özelliğinin ortaya çıktığı kısa dalga boyu bölgesinde ($a/\lambda > 0.20$) çalışılmıştır. Ancak sürekli yapının indeks profili çıkış açısında frekansa bağımlı bir farklılık göstermez. Çünkü modellemede referans 40' taki gibi malzeme dispersiyonu göz önüne alınmamıştır. Referans 42'de Silikanın malzeme dispersiyon özelliği kullanılmıştır. Yapılan çalışmada ise dağıtıcı özellik fotonik kristal yapının kristalli doğasından dolayı ortaya çıkmaktadır.

Fotonik kristal yapının dalga boyu seçicilik performansını görüntülemek için sürekli ortamın ve fotonik kristal yapının elektrik alan dağılımları elde edilmiştir. Fotonik kristal yapı gauss profiline sahip sürekli kaynak ile uyarılmıştır. Işık kaynağı normalize frekansı 0.20 ile 0.35 arasında değişen sinyalleri içermektedir. Gelen ışık yapıya 15° açı ile gönderilmiştir. Bu açı 8° ile 75° arası taranarak yapının çıkışındaki

mekânsal kaymanın en yüksek olduğu değerde optimize edilmiştir. Tasarlanan yapı dalga boyu seçici özelliğinin ortaya çıktığı üç farklı frekans bölgesinde çalıştırılmıştır. İlk çalışma aralığı 0.20 ile 0.26 arası seçilmiştir. Bu aralığı Telekom dalga boylarına denk getirmek için örgü sabiti $a=356.5$ nm olarak ayarlanmıştır. Böylece 0.20 ile 0.26 arasında 0.01 adımlarla değişen normalize frekans değerleri 1782.5 nm ile 1371.2 nm arasındaki dalga boyu değerlerine karşılık gelmiştir. Bu aralık Bölge-1 diye adlandırılmıştır. Şekil 4.2(a)' da bu bölgeden seçilen 4 dalga boyunun çıkış açıları verilmiştir. Farklı dalga boyları Şekil 4.1(c)' de gösterilen derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapıdan farklı ilerleme açıları ile yansımıştır. Bu durum farklı dalga boyları için yapıdan çıktıktan sonra x-ekseninde mekânsal bir kaymaya sebep olmuştur. Ardışık dalga boyları arasındaki çıkış açısı farkı 4° olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.2(b)' de görüldüğü gibi çıkış açısı 32° ile 10° arasında değişmektedir. Bu bölge için dispersiyon açı oranı of $\Delta\theta/\Delta\lambda = 0.05348$ (derece/nm)'e karşılık gelmektedir. Polar koordinatta görülen ana loblar yapı içerisindeki yansımalarından kaynaklanmaktadır. Farklı dalga boylarına karşılık gelen çıkış açıları bu ana loblar göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Şekil 4.2(a)' dan anlaşılacağı gibi polar koordinattaki yan loblar yapının ön yüzünde meydana gelen yansımadan dolayı ortaya çıkmaktadır ve dalga seçiciliği analizinde kullanılmamışlardır.

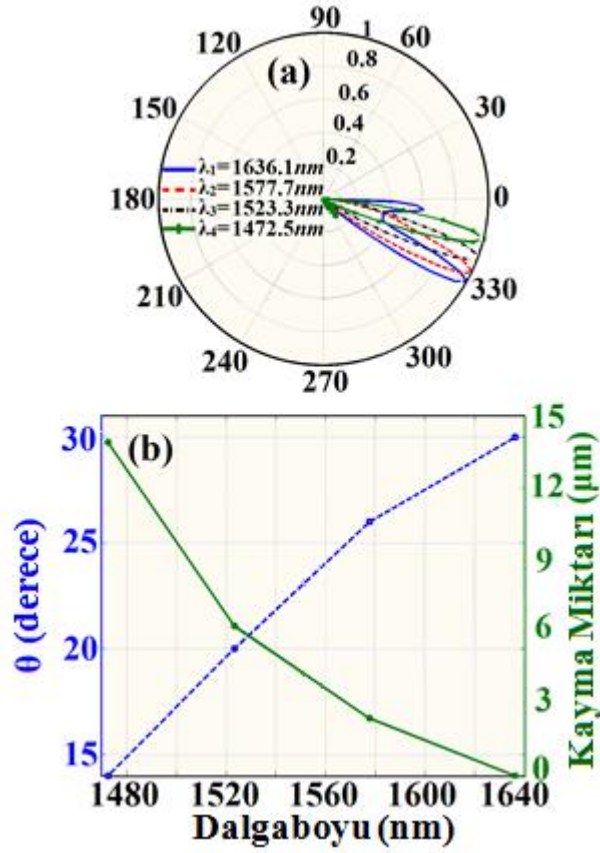


Şekil 4.2. (a) Farklı dalga boyları için polar koordinatta yapının çıkışındaki güç akışı gösterilmektedir. Bölge-1'deki yedi dalga boyundan dört tanesi (1782.5, 1620.5, 1485.4, ve 1371.2 nm) gösterilmiştir. Örgü sabiti a 356.5 nm seçilmiştir. (b) Yansıma açısı θ ve x-ekseni üzerindeki kayma miktarı dalga boyu cinsinden çizilmiştir. Kesik çizgi ile çizilen grafik yansıma açısını, düz çizgi ile çizilen grafik ise kayma miktarını göstermektedir.

Bölge-2 olarak adlandırılan başka bir frekans aralığına geçildiğinde ise Bölge-1'deki ile benzer şekilde analizler yapılmıştır. Bu bölgede frekans değerleri 0.27 ile 0.30 arasında 0.01 artışlarla değişmektedir. Çalışma aralığını telekom dalga boylarına ayarlamak için örgü sabiti $a=441.8$ nm olarak seçilmiştir. Böylece ilgili frekans değerlerine karşılık gelen dalga boyları 1472.5 nm ile 1636.1 nm arasında

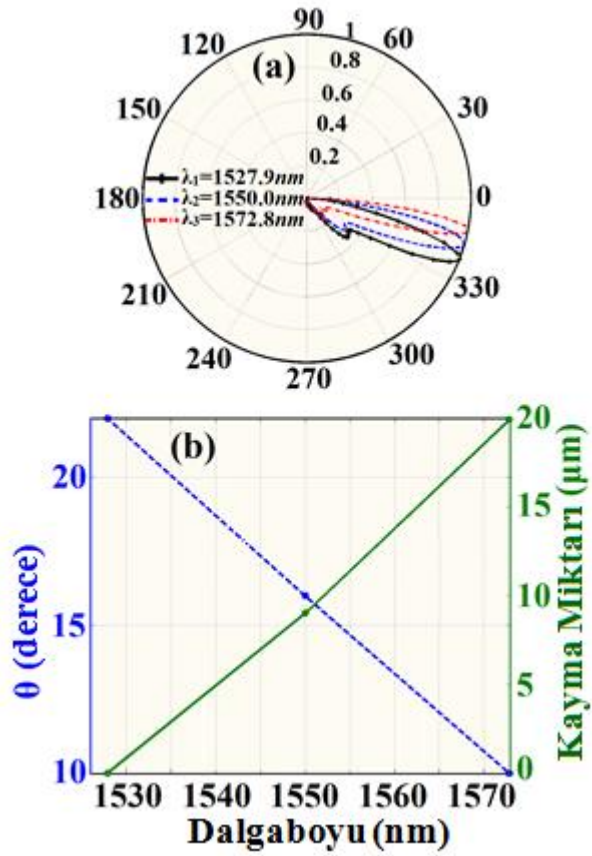
değişmektedir. Şekil 4.3(a) farklı dalga boylarının polar koordinat üzerinde güç akışını göstermektedir. Dalga boyuna göre ışığın yapıdan ayrılma açısı ve x-eksenindeki mekânsal kayması Şekil 4.3(b)'de gösterilmektedir. Bu bölge için çıkış açısı θ 30° ile 14° arasında değişmektedir ve dispersiyon oranı $\Delta\theta/\Delta\lambda = 0.098$ (derece/nm) olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3(a)'da görülen oldukça küçük yan lobların ana lob üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Bu analizlerden fotonik kristal yapının dalga boyu değişimine farklı tepki verdiği görülmektedir. Sonuç olarak önerilen yapı gelen ışığı farklı dalga boylarına ayırmak için kullanılabilir.

Son olarak Bölge-3 olarak adlandırılan $a/\lambda = 0.34-0.35$ frekans aralığında, tasarlanan fotonik kristal yapının performansı incelenmiştir. Örgü sabiti 534.8 nm seçilerek dalga boyu değerleri 1527.9 nm ile 1572.8 nm arasında ayarlanmıştır. Şekil 4.4(a)'da farklı dalga boyu değerlerinin çıkış güç akışı polar koordinatta gösterilmiştir. Farklı dalga boylarının çıkış açıları ve bunlara karşılık gelen mekânsal kaymalar Şekil 4.4(b)'de dalga boyu değişimine göre çizilmiştir. Çıkış açısı, θ , 22° 'den 10° 'ye değişmektedir. Bu bölge için dispersiyon oranı $\Delta\theta/\Delta\lambda = 0.267$ (derece/nm) olarak hesaplanmıştır. Diğer bölgelere daha yüksek dispersiyon oranına sahip olması Bölge-3'ün dalga boyu değişimine daha hassas olduğunu göstermektedir. Fakat diğer bölgelere göre daha dar bir bant genişliğine sahiptir. 1. Bölgeden 3. Bölgeye geçildiğinde normalize frekans değeri 1.34 katına çıkarken dalga boyu seçiciliğinin başarımlı ölçüsü 5 kat artmaktadır.



Şekil 4.3. (a) Farklı dalga boyları için polar koordinatta yapının çıkışındaki güç akışı gösterilmektedir. Grafikte gösterilen dalga boyları 1636.1, 1577.7, 1523.3, ve 1472.5 nm'dir. Örgü sabiti a 441.8 nm seçilmiştir. (b) Yansıma açısı θ ve x-ekseni üzerindeki kayma miktarı dalga boyu cinsinden çizilmiştir. Kesik çizgi ile çizilen grafik yansıma açısını, düz çizgi ile çizilen grafik ise kayma miktarını göstermektedir.

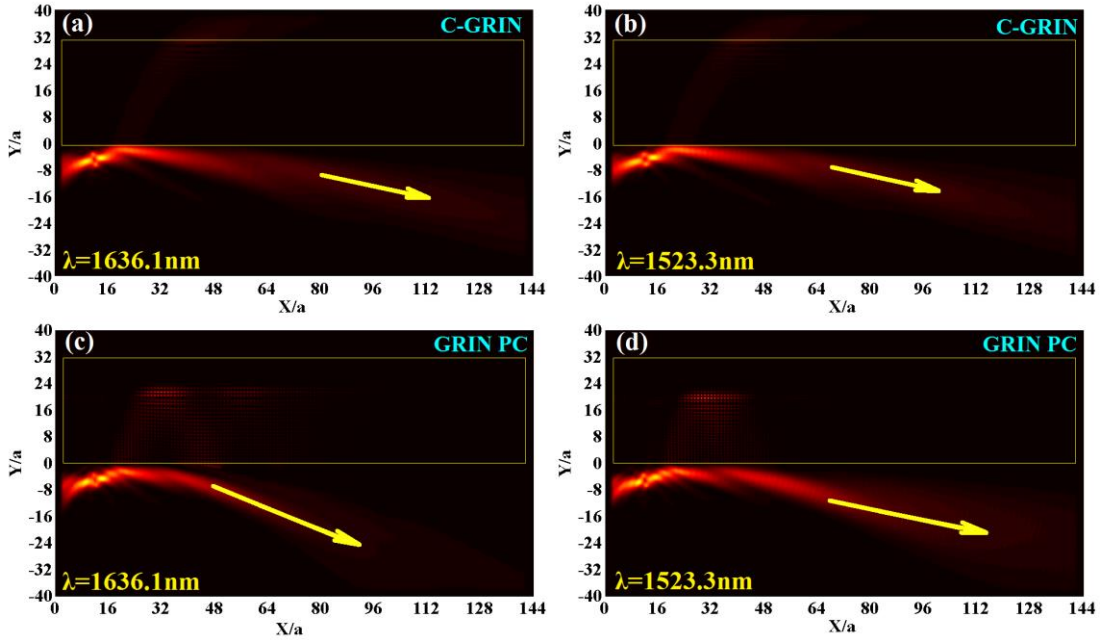
Her bölgenin duyarlılığı derecelendirilmiş kırılma indisine sahip ortamın dağıtıcı özelliğinden dolayı farklıdır. Sonuç olarak hemen hemen her bölgede çıkış açısı dalga boyu ile lineer bir ilişki sergilemektedir, fakat en doğrusal ilişki Bölge-3'te görülmektedir.



Şekil 4.4. (a) Farklı dalga boyları için polar koordinatta yapının çıkışındaki güç akışı gösterilmektedir. Karşılık gelen dalga boyları 1572.8, 1550.0, ve 1527.9 nm'dir. Örgü sabiti a 534.8 nm seçilmiştir. (b) Yansıma açısı θ ve x-ekseni üzerindeki kayma miktarı dalga boyu cinsinden çizilmiştir. Kesik çizgi ile çizilen grafik yansıma açısını, düz çizgi ile çizilen grafik ise kayma miktarını göstermektedir.

Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapı ve sürekli yapı için farklı dalga boylarında seçilen ışığın yayılımı karşılaştırılmıştır. Birkaç dalga boyu için karşılık gelen elektrik alan dağılımları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Şekil 4.5(a) ve 4.5(b) sırasıyla 1636.1 nm (normalize frekans değeri $a/\lambda = 0.27$) dalga boyu ve 1523.3 nm (normalize frekans değeri $a/\lambda = 0.29$) dalga boyu için sürekli ortamdaki elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Sürekli ortamda iki dalga boyu değeri için de çıkış açısı 15° olarak hesaplanmıştır. Beklendiği gibi sürekli ortamın farklı dalga

boylarına tepkisi aynı olmuştur. Farklı dalga boyları yapı içerisinde kırılarak yansımaya uğrar ve yapı içerisinde aynı yolu izleyerek yapıyı terk ederler. Böylece yapıdan çıkış açıları birbirine eşit olur. Fotonik kristal yapı kullanıldığında ise farklı dalga boyları yapıyı farklı pozisyonlardan farklı çıkış açıları ile terk etmektedir. Sürekli yapı ve fotonik kristal yapı bezer indeks dağılımına sahip olmasına rağmen yüksek frekans bölgesinde dalga boyu değişimine verdikleri cevap tamamen farklıdır. Şekil 4.5, 1636.1 nm dalga boyu ve 1523.3 nm dalga boyu için sürekli ortamdaki ve fotonik kristal yapıdaki elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Fotonik kristal yapıda 1636.1 nm ve 1523.3 nm dalga boyu için karşılık gelen çıkış açıları sırasıyla 30° ve 20° 'dir. Fakat bu dalga boyları için sürekli yapıdaki çıkış açıları ise birbirinin aynısıdır. Bu grafiklere dayanarak tasarlanan fotonik kristal yapının gelen ışığın dalga boyu değişimlerine duyarlı olduğu açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar fotonik kristal yapının dalga boyu seçici ortamın gerçekleştirilmesi için uygun olduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.5. (a) Katmanlı sürekli ortamda 1636.1 nm dalga boyunun elektrik alan dağılımı (b) 1523.3 nm dalga boyunun sürekli ortamda elektrik alan dağılımı (c) 1636.1 nm dalga boyunun tasarlanan fotonik kristal yapıda elektrik alan dağılımı (d)

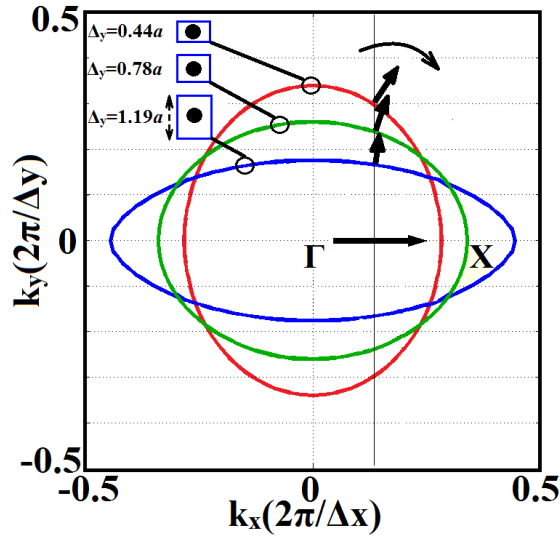
fotonik kristal yapıda 1523.3 nm dalga boyunun elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. tüm analizler Bölge-2’de gerçekleştirilmiştir. Sarı oklar yapıdan çıkan dalganın ilerleme yönünü göstermektedir.

Çizelge 4.1. Çalışma Bölgelerinin Sayısal Sonuçları

Bölgeler	λ (nm)	a (nm)	θ , (derece)	$\Delta\lambda/\lambda$ (%)	$\Delta\theta/\Delta\lambda$ (derece/nm)
B-1	1371.2	356.5	10	26	0.054
	1485.4		18		
	1620.5		26		
	1782.5		32		
B-2	1472.5	441.8	14	10	0.098
	1523.3		20		
	1577.7		26		
	1636.1		30		
B-3	1527.9	534.8	22	2.6	0.267
	1550		16		
	1572.8		10		

Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4’te sunulan nicel sonuçları bir araya getirmek için Çizelge 1 oluşturulmuştur. Çizelgede λ , a , θ , $\Delta\lambda/\lambda$, $\Delta\theta/\Delta\lambda$ sırasıyla dalgaboyunu, örgü sabitini, çıkış açısını, bant genişliğini ve dispersiyon açısı oranını göstermektedir. Ayrıca B-1, B-2 ve B-3 çalışma bölgelerini ifade etmektedir. Çizelgedeki veriler ışığında çalışmanın sayısal sonuçları kolayca karşılaştırılabilir ve değerlendirilebilir. Bilindiği kadarıyla literatürde fotonik kristal kullanılarak gerçekleştirilen dalga boyu bölme uygulamaları süper prizma olarak adlandırılan fotonik kristallerin dağıtıcı özelliğini kullanır [43]. Bu olay yüksek bantlardaki düzensiz dispersiyon eğrilerine göre birden fazla dalga boyu kanallarını farklı açılarla ayırmayı sağlar. Fakat süper prizma etkisi ile dalga boyu ayırmada dalga boyu sınırı vardır [62]. Referans 63’te Wu ve arkadaşları iki boyutlu üçgen örgü fotonik kristalde süper prizma etkisinin 0.5 derece/nm’lik dispersiyon oranı ve 1.53%’lük bant genişliği ile ışın yönlendirme yaptığını ortaya koymuştur. Bu çalışmaya kıyasla önerilen fotonik kristal yapı kısmen daha düşük dispersiyon oranı sergilemektedir. Fakat önerilen yapının Referans 63’ e göre avantajlı yanı birden fazla çalışma bölgesine sahip olmasıdır. 26% gibi oldukça yüksek bant genişliğine sahip bir çalışma bölgesi mevcuttur. Ayrıca süper prizma tabanlı dalga boyu seçici ortamlarda yapı içerisinde yayılan

dalgaının genişlemesi yapısal boyutlarında genişlemesini gerektirir [47,64]. Bu tip yapıların dezavantajı sadece düşük seviyedeki fotonik bantların kullanılabilmesidir. Başka bir çalışmada Gerken ve arkadaşları ince film tabakalarında grup hızı etkisini kullanarak dalga boyu çoklayıcı ve ayırıcı cihazları elde etmek için yeni bir konsept ortaya koymuştur. Bu yapıda çıkış yüzeyinde yüksek mekânsal kayma elde edilmesine rağmen, 1.67% gibi dar bir bant aralığında çalışılmıştır [65].



Şekil 4.6. 0.21 normalize frekansı için ilk TM bantlarına karşılık gelen üç farklı eş frekans eğrisi

Işın teorisi açıklamasına ek olarak, tasarlanan fotonik kristal yapının dalga boyu seçicilik özelliği eş frekans eğrilerinin yardımı ile de açıklanabilir. Eş frekans eğrilerinin elde edilmesinde düzlem dalga genişletme metodu kullanılmıştır [22]. Şekil 4.6, 0.21 normalize frekansı için ilk TM bantlarına karşılık gelen üç farklı eş frekans eğrisini göstermektedir. Üzerinde çalışılan birim hücre yapılandırmaları aynı şekilde inset olarak verilmiştir. Üç farklı genişliğe sahip birim hücrenin eş frekans eğrileri gösterilmektedir. Karşılık gelen birim hücrelerin y eksenindeki boyutları Δ_y , $0.44a$, $0.78a$ ve $1.19a$ 'dır. x eksenindeki örgü boyutu Δ_x ise $1.0a$ olarak belirlenmiştir. Şekildeki dikey çizgi ilerleme yönünü (grup hızını) belirlemek için kullanılan yorumlama çizgisidir. $\theta_i=15^\circ$ lik açı ile gelen ışık için eş frekans eğrileri

ile yorumlama çizgisinin bir kesişme noktası vardır. Her birim hücrede gelen ışığın ilerleme doğrultusu koyu renkli ok işaretleri ile gösterilmiştir. Grup hızı yavaş yavaş x eksenine paralel bir hal alır ve böylece fotonik kristal içerisinde yayılan ışığın kavisli bir yörünge izlediği ortaya çıkar. Şekil 4.6' da gösterilen ok işaretlerinin hareketine göre birim hücrelerin örgü boyutundaki değişiklikler fotonik kristal yapı içerisinde gelen ışığın ilerleme doğrultusunu değiştirdiği söylenebilir. Böylelikle fotonik kristal yapı içerisinde ışık bükme olayı elde edilebilir. Bu olgu, serap etkisi kavramı ile uyumludur. Literatürde, iki boyutlu fotonik kristal yapılarda serap etkisi ve süper bükme olayı 50, 66 ve 67 numaraları ile gösterilen referanslarda çalışılmıştır. Dispersiyon bantlarındaki anizotropi özelliği ve frekans seçiciliği kullanılarak ışık bükme ve ışının yanal kaydırılması söz konusu çalışmalarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların hepsi negatif kırılma özelliğine dayanmaktadır. Ayrıca, farklı spektrum aralıkları için dalga boyu seçicilik özelliği ayrıntılı bir şekilde araştırılmamıştır. Sürekli yapı ve fotonik kristal yapının frekans seçicilik performansları da karşılaştırılmamıştır. Yapılan bu çalışmada ise hiperbolik sekant indeks dağılımına sahip fotonik kristal yapı çalışılmıştır ve bu indeks profilini elde etmek için dielektrik çubukların konumları belirlenmiştir. Tüm bu kavramlar yapılan çalışmanın farklı ve yeni yönlerini ortaya koymaktadır.

4.4. Sonuç

Sonuç olarak fotonik kristallerin kullanımı yapısal dispersiyon özelliğinden dolayı olağanüstü fırsatlar sunmaktadır. Sürekli ortam, iyon değişim işlemi ve kimyasal buhar depozisyonu gibi fabrikasyon yöntemleri kullanılarak üretilebilir. Fakat daha önce belirtildiği gibi birçok zorlayıcı sorun ortaya çıkmaktadır. Bu tür zorlukların üstesinden gelmek için, sürekli ortam, farklı boyuttaki dikdörtgen fotonik kristal birim hücrelerin kullanımı ile taklit edilebilir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapının diğer bir özelliği ise kırılma indisi sabit dielektrik çubuklar kullanılarak istenen herhangi bir indeks varyasyonu elde edilebilir. Fotonik kristal yapı tek tip izotropik malzemedan oluşmasına rağmen düşük kayıplı performans yapının gerçekleştirilmesinde yüksek uygulanabilirlik sergiler. Ayrıca

fotonik kristal tabanlı derecelendirilmiş kırılma indisi sahip yapıların üstünlüğü dalga boyu değişimine duyarlı olmasıdır. Bu durum dalga boyu seçici ortamların tasarımında fotonik kristallerin kullanımını güçlendirir. Yapay olarak tasarlanan derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristaller, ayırık homojen olmayan ortamın dağıtıcı özelliğini ortaya çıkarmak için kısa dalga boyu aralığında uygulanmıştır. En yüksek hassasiyet en küçük bant aralığının en kısa dalga boyunda gerçekleşir.

5. SONUÇ

Tez çalışmasında farklı tasarımlara sahip iki boyutlu kare örgü fotonik kristaller kullanılarak asimetrik dalga iletimi, gökkuşağı hapsetme ve dalga boyu seçicilik elde edilmiştir.

Birinci bölümde standart kare örgü fotonik kristalden yola çıkılarak asimetrik ışık iletimini sağlayabilecek bir yapı önerilmiştir. İlk olarak kare örgü fotonik kristalin yasaklı bant aralığına karşılık gelen frekansların yapının içine nüfuz ederek yapıda ilerleyebilmesi için yapının tam orta sırasında bulunan dielektrik çubuklar kaldırılarak dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Böylelikle $a/\lambda=0.3-0.4$ normalize frekans aralığını kapsayan bir dalga kılavuzu modu oluşturulmuştur. Fotonik kristal dalga kılavuzunda asimetrik iletimi elde edebilmek için dielektrik çubuklar arası mesafe y eksenini boyunca sabit tutulurken x eksenini boyunca lineer bir şekilde artırılmıştır. Böylelikle yapının y eksenine göre simetrisi bozulmuştur. Yapıya y eksenine dik doğrultuda, yapının her iki tarafından da ışık gönderildiğinde, ışık farklı yönler için farklı özellikteki yapılarla karşılaşmaktadır. Asimetrik ışık iletiminin gerçekleştiği frekans değerini bulmak için yapıya soldan ve sağdan geniş bant aralığına sahip ışık gönderilerek her iki yöndeki iletim karşılaştırılmıştır. Daha sonra elde edilen iletimlerin farklarını toplamlarına oranı ile kontrast oranı elde edilmiştir. Kontrast oranının 1'e en yakın olduğu frekans değeri asimetrik iletimin gerçekleştiği frekansı vermektedir. Kontrast oranına göre asimetrik iletime en uygun frekans $a/\lambda=0.3288$ normalize frekansıdır. Bu frekanstaki ışık yapıya +x yönünde gönderildiğinde öncelikle dielektrik çubuklar arası mesafesi küçük olan kısımla karşılaşır ve yapı içerisinde ilerledikçe büyük periyoda sahip bölümlerle temas geçer. Işık bu yönde ilerlerken ilk olarak yapının merkezinde hareket etmektedir. Fakat yapı içlerine ilerledikçe dalga kılavuzundan y eksenini doğrultusunda iki tarafa sızmaya başlamaktadır. Böylece yapı çıkışındaki alan profiline bakıldığında dalga kılavuzuna karşılık gelen merkez kısımda ana lob oluşmadan iki yan lobun oluştuğu görülmüştür. Fakat ışık -x yönünde yapıya gönderildiğinde ise ilk olarak karşılaşacağı yapı x eksenini doğrultusunda dielektrik çubukları birbirinden uzak

mesafeye yerleştirilmiş fotonik kristal dalga kılavuzudur. Işık $-x$ yönünde ilerlerken ilk başta dalga kılavuzunda yansıma gerçekleşir ve dalga yan yollar boyunca ilerleyerek yapının sonuna doğru dalga kılavuzunun merkezine ulaşır. Bu durum için yapının sonundaki alan profili yan loblar oluşmadan merkezde güçlü bir ana lob oluştuğunu gösterir. Böylelikle fotonik kristal dalga kılavuzunda asimetrik iletim sağlanmış olur. Bu tasarım için geri yöndeki ($-x$ yönü) alan şiddeti ileri yöndeki ($+x$ yönü) alan şiddetinin yaklaşık 10 katı kadardır.

Zıt yönlerdeki alan şiddeti oranını artırabilmek için farklı tasarım önerilmiştir. Bu tasarımda fotonik kristal dalga kılavuzunda dielektrik çubuklar arası mesafe y eksenini boyunca sabit tutulurken x eksenini boyunca parabolik bir şekilde artırılmıştır. Bir önceki tasarımla aynı şekilde asimetrik iletimin gerçekleşeceği frekans belirlenmiştir. Bu yapı için çalışma frekansı $a/\lambda = 0.2992$ olarak seçilmiştir. Bu frekanstaki ışık yapıya $-x$ ve $+x$ yönünde gönderilmiş ve yapı sonundaki alan profilleri elde edilmiştir. Diğer yapı ile benzer alan profilleri elde edilmiştir. Fakat bu tasarımda her iki yöndeki alan şiddeti oranı 15 kat olarak hesaplanmıştır. Bu yapının tasarımı ile asimetrik iletim daha da güçlenmiştir.

Teorik çalışmaları doğrulamak için asimetrik iletimin deneysel çalışması yapılmıştır. Bunun için Alümina çubuklar kullanılmış ve tasarıma uygun şekilde dizilmiştir. Daha sonra yapı uygun frekansta dalga gönderen bir antenle uyarılmıştır. Alıcı olarak da yapının çıkışında bir anten kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar teorik sonuçlarla uyum göstermiştir. Fakat iletim oranı deneysel çalışmada daha düşük çıkmıştır. Antenlerin kalibrasyonu ve z yönündeki kayıplar bunun sebebi olabilir. Sonuç olarak asimetrik dalga iletimi deneysel çalışma ile doğrulanmıştır.

Tasarlanan optik diyot benzeri yapıların lineer optik konseptine dayanması ve kompakt olması bazı avantajlarındandır. Asimetrik dalga iletim performansı yapının birçok parametresindeki (çubukların yarıçapı ve kırılma indisi gibi) değişimle değil artırılabilir.

Çalışmanın ikinci bölümünde gökkuşağı yakalama için kare örgü fotonik kristaller kullanılarak farklı tasarımlar sunulmuştur. İlk tasarımda kare örgü fotonik kristalde dielektrik çubuklar arası mesafe y eksenini boyunca sabit tutulurken x eksenini boyunca 0.02a'lık adımlarla lineer bir şekilde artırılmıştır. Aynı yapıda dalga kılavuzu oluşturularak her iki durum için analiz yapılmıştır. Daha sonra yapılara farklı frekanstaki ışıklar gönderilerek yapı içerisinde ilerleyebildikleri pozisyonlar incelenmiştir. Dalga kılavuzunun olmadığı durumda $a/\lambda=0.16-0.30$ aralığındaki frekansların yapının içine nüfuz ederek yapıda hapsedildikleri görülmüştür. Dalga kılavuzu yapısında ise $a/\lambda=0.31-0.39$ frekansları yapı içerisinde ilerlemektedir. Dalga boyunu görünür spektruma ayarlamak için dalga kılavuzunun olmadığı ve olduğu durumlar için örgü sabiti a sırasıyla 128 nm ve 250 nm seçilmiştir. Böylelikle dalga boyu dalga kılavuzunun olmadığı yapı için 427 nm ile 800 nm arasında ayarlanmıştır. Diğer yapı için ise dalga boyu 641.03 nm ile 806.6 nm aralığına denk gelmektedir. Her iki durumda da kısa dalga boyları yapının başlangıç kısmına yakın mesafeye kadar ilerleyebilirken uzun dalga boylarının yapının iç kısımlarına ulaşabildiği görülmüştür. Yapı içerisinde farklı dalga boylarının farklı pozisyonlarda hapsedildiği gözlemlenmiştir.

Gökkuşağı hapsedilmesi için farklı bir yapı daha tasarlanmıştır. Bu yapıda fotonik kristalde dielektrik çubuklar arası mesafe yerine çubukların yarıçapları iletim doğrultusunda lineer bir şekilde artırılmıştır. İlk durumdaki gibi yapıda dalga kılavuzu oluşturularak bu durumun performansı da incelenmiştir. Dalga kılavuzunun olmadığı ve olduğu durum için $a/\lambda=0.18-0.32$ normalize frekanslarına sahip ışığın yapı içerisinde hapsedildiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde görünür dalga boyunda çalışmak için örgü sabiti a 144 nm seçilmiştir. Böylece dalga boyu 450 nm ile 800 nm aralığına denk gelmiştir. Bu tasarımlar için de farklı dalga boylarının farklı pozisyonlarda lokalize oldukları gözlemlenmiştir.

Yapılan bu çalışma ile lineer optikte çalışan tamamen dielektrik fotonik kristaller kullanılarak geniş spektrumda ışık hapsedilmiştir. Çalışılan yapıların tamamında farklı frekanstaki ışık yapı içerisinde farklı pozisyonlarda lokalize olmuştur. Önerilen tasarımlar optik tampon, spektrometre, veri işlemci ve optik bellek olarak kullanılabilir.

Üçüncü kısımda ise derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal ile sürekli yapının dalga boyu seçicilik açısından performansları karşılaştırılmıştır. Düşük frekans bölgesinde sürekli yapı ile aynı indeks dağılımına sahip fotonik kristal yapı tasarlanmıştır. Her iki yapıya da eğik açı ile farklı frekanstaki ışık gönderilmiştir. Sürekli yapı içerisinde farklı dalga boylarının aynı yolu izleyerek aynı noktada tam yansımaya uğradığı gözlemlenmiştir. Böylece farklı dalga boyları sürekli yapıyı aynı pozisyondan aynı açı ile terk etmektedir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip fotonik kristal yapıda ise farklı frekanslar yapı içerisinde farklı yollar izlemektedir. Gelen dalga yapı içerisinde sürekli kırılmaya uğrayarak dönüm noktasında tam yansıma gerçekleştirmiştir. Farklı frekanslar yapı içerisinde farklı noktalarda tam yansımaya uğrayarak yapıyı farklı yerlerden farklı çıkış açıları ile terk etmektedir. Fotonik kristal yapı ile sürekli yapı benzer indeks profiline sahip olmalarına rağmen dalga boyu değişimine farklı tepkiler vermiştir. Fotonik kristal yapı dalga boyu seçici ortam olarak kullanılabilirken sürekli ortam böyle bir özellik sergilememiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında farklı amaçlar için özgün fotonik kristal yapıları önerilmiştir. Önerilen yapılar optik diyot, optik tampon, spektrometre, veri işlemci, optik bellek ve dalga boyu ayırıcı olarak kullanılabilirler. Tasarımların lineer optik konseptine dayanması, kompakt olması ve tamamen dielektrik malzemedен oluştuıkları için az kayıplı olmaları üstün yanlarıdır. Yapılan tüm çalışmalarla özgün tasarımlar sonucu ilgili alanlara yenilikler kazandırılması ile tez amacına ulaşmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Rayleigh, L., On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure, *Phil. Mag. Series*, 5, 145–159, 1887.
- [2] Yablonovitch, E., Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics, *Physical Review Letters*, 58, 2059-2062, 1987.
- [3] John, S., Strong localization of photons in certain disordered dielectric Superlattices, *Physical Review Letters*, 58, 2486-2489, 1987.
- [4] Hecht, E., and Zajac, A., *Optics*, Third Edition Reading, MA: Addison Wesley, 1997.
- [5] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D., *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Second Edition, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2008.
- [6] Yee, K. S., Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14, 302–307, 1966.
- [7] Taflove, A., Brodwin, M. E., Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 23, 623–630, 1975.
- [8] Scalora, M., Dowling J. P., Bowden, C. M., and Bloemer, M. J., The photonic band edge optical diode, *Journal of Applied Physics*, 76, 2023–2026, 1994.
- [9] Tocci, M. D., Bloemer, M. J., Scalora, M., Dowling J. P., and Bowden C. M., Thin film nonlinear optical diode, *Applied Physics Letters*, 66, 2324–2326 1995.
- [10] Biancalana, F., All-optical diode action with quasiperiodic photonic crystals, *Journal of Applied Physics*, 104, 093113, 2008.
- [11] Serebryannikov, A. E., One-way diffraction effects in photonic crystal gratings made of isotropic materials, *Physical Review B*, 80, 155117, 2009.
- [12] Cakmak, A. O., Colak, E., Serebryannikov, A. E., and Ozbay, E., Unidirectional transmission in photonic-crystal gratings at beam-type illumination, *Optics Express*, 18, 22283–22298, 2010.
- [13] Lockyear, M. J., Hibbins, A. P., White, K. R., and Sambles, J. R., One-way diffraction grating, *Physical Review E*, 745, 056611, 2006.
- [14] Ye, M., Yuan, X. D., Guo, C. C., and Zen, C., Unidirectional transmission in non-symmetric gratings made of isotropic material, *Optics Express*, 18, 7590–7595, 2010.
- [15] Yu, Z., Veronis, G., Wang, Z., and Fan, S., One-way electromagnetic waveguide formed at the interface between a plasmonic metal under a static magnetic field and a photonic crystal, *Physical Review Letters*, 100, 023902, 2008.
- [16] Wang, Z., Chong, Y., Joannopoulos, J. D., and Soljacic, M., Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states, *Nature*, 461, 772–775, 2009.

- [17] Takeda, H., and John, S., Compact optical one-way waveguide isolators for photonic-band-gap microchips, *Physical Review A*, 78, 023804, 2008.
- [18] Yu, Z., and Fan, S., Complete optical isolation created by indirect interband photonic transitions, *Nature Photonics*, 3, 91–94, 2009.
- [19] Li, X. F., Ni, X., Feng, L., Lu, M. H., He, C., and Chen, Y. F., Tunable Unidirectional Sound Propagation through a Sonic-Crystal-Based Acoustic Diode, *Physical Review Letters*, 106, 084301, 2011.
- [20] He, Z., Peng, S., Ye, Y., Dai, Z., Qiu, C., Ke, M., and Liu, Z., Asymmetric acoustic gratings, *Applied Physics Letters*, 98, 083505, 2011.
- [21] Wang, C., Zhou, C. Z., and Li, Z. Y., On-chip optical diode based on silicon photonic crystal heterojunctions, *Optics Express* 19, 26948–26955, 2011.
- [22] Johnson, S., Joannopoulos, J., Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis, *Optics Express* 8, 173–190, 2001.
- [23] Oskooi, A. F., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, *Computational Physics Communications* 181, 687–702, 2010.
- [24] Tsakmakidis, K. L., Boardman, A. D., Hess, O., Trapped rainbow storage of light in metamaterials, *Nature*, 450, 397–401, 2007.
- [25] Kirby, E. I., Hamm, J. M., Tsakmakidis, K. L., Hess, O., FDTD analysis of slow light propagation in negative-refractive-index metamaterial waveguides, *Journal of Optics A Pure Applied Optics*, 11, 114027, 2009.
- [26] Gan, Q., Fu, Z., Ding, Y. J., Bartoli, F. J., Ultrawide-bandwidth slowlight system based on THz plasmonic graded metallic grating structures, *Physical Review Letters*, 100, 256803, 2008.
- [27] Gan, Q., Ding, Y. J., Bartoli, F. J., Rainbow trapping and releasing at telecommunication wavelengths, *Physical Review Letters*, 102, 056801, 2009.
- [28] Gan, Q., Bartoli, F. J., Surface dispersion engineering of planar plasmonic chirped grating for complete visible rainbow trapping, *Applied Physics Letters*, 98, 251103, 2011.
- [29] Chen, L., Wang, G. P., Gan, Q., Bartoli, F. J., Trapping of surfaceplasmon polaritons in a graded Bragg structure: frequencydependent spatially separated localization of the visible spectrum modes, *Physical Review B*, 80, 161106, 2009.
- [30] Chen, L., Wang, G. P., Gan, Q., Bartoli, F. J., Rainbow trapping and releasing by chirped plasmonic waveguides at visible frequencies, *Applied Physics Letters*, 97, 153115, 2010.
- [31] Chen L., Wang, G. P., Li, X., Li, W., Shen, Y., Lai, J., Chen, S., Broadband slow-light in graded-grating-loaded plasmonic waveguides at telecom frequencies, *Applied Physics B*, 104, 653–657, 2011.
- [32] Park, J., Kim, K. Y., Lee, I. M., Na, H., Lee, S. Y., Lee, B., Trapping light in plasmonic waveguides, *Optics Express*, 18, 599–623, 2010.
- [33] Shen, Y., Liu, H., Fu, J., Yu, G., Double rainbow trapping of light in one-dimensional chirped metallic–dielectric photonic crystals, *Journal of the Optical Society of America B* 28, 2444–2447, 2011.

- [34] Shen, Y., Fu, J., Yu, G., Rainbow trapping in one-dimensional chirped photonic crystals composed of alternating dielectric slabs, *Physics Letters A*, 375, 3801–3803, 2011.
- [35] Smolyaninova, V. N., Smolyaninov, I. I., Kildishev, A. V., Shalaev, V. M., Trapped rainbow techniques for spectroscopy on a chip and fluorescence enhancement, *Applied Physics B*, 106, 577–581, 2012.
- [36] Hu, Q., Zhao, J. Z., Peng, R. W., Gao, F., Zhang, R. L., Wang, M., Rainbow trapped in a self-similar coaxial optical waveguide, *Applied Physics Letters*, 96, 161101, 2010.
- [37] Smolyaninova, V. N., Smolyaninov, I. I., Kildishev, A. V., Shalaev, V. M., Experimental observation of the trapped rainbow, *Applied Physics Letters*, 96, 211121, 2010.
- [38] Keiser, G. E., A review of WDM technology and applications, *Optical Fiber Technology*, 5, 3–39, 1999.
- [39] H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi, Wavelength multiplexer based on SiO₂-Ta₂O₅ arrayed-waveguide grating, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 12, 989–995, 1994.
- [40] Gerken, M. and Miller, D. A. B., Multilayer thin-film structures with high spatial dispersion, *Applied Optics*, 42, 1330–1345, 2003.
- [41] Sharkawy, A., Shi, S., and Prather, D. W., Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals, *Applied Optics*, 40, 2247–2252, 2001.
- [42] Salameh, H. A. B. and Irshid, M. I., Wavelength-division demultiplexing using graded-index planar structures, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 24, 2401–2408, 2006.
- [43] Kosaka, H., Kawashima, T., Tomita, A., Notomi, M., Tamamura, T., Sato, T., and Kawakami, S., Superprism phenomena in photonic crystals, *Physical Review B*, 58, 10096–10099, 1998.
- [44] Fan, S., Villeneuve, P. R., Joannopoulos, J. D., and Haus, H. A., Channel drop tunneling through localized States, *Physical Review Letters*, 80, 960–963, 1998.
- [45] Baba, T., Asatsuma, T., and Matsumoto, T., Negative refraction in photonic crystals, *MRS Bulletin*, 33, 927–930, 2008.
- [46] Koshiba, M., Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 19, 1970–1975, 2001.
- [47] Matsumoto, T., Fujita, S., and Baba, T., Wavelength demultiplexer consisting of Photonic crystal superprism and superlens, *Optics Express*, 13, 10768–10776, 2005.
- [48] Turduev, M., Giden, I. H., and Kurt, H., Extraordinary wavelength dependence of self-collimation effect in photonic crystal with low structural symmetry, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 11, 123–131, 2013.
- [49] Kurt H. and Citrin D. S., Graded index photonic crystals, *Optics Express*, 15, 1240–1253, 2007.
- [50] Centeno, E. and Cassagne, D., Graded photonic crystals, *Optics Letters*, 30, 2278–2280, 2005.

- [51] Cakmak, O., Colak, E., Caglayan, H., Kurt, H., and Ozbay, E., High efficiency of graded index photonic crystal as an input coupler, *Journal of Applied Physics*, 105, 103708–103712, 2009.
- [52] Kurt, H., Colak, E., Cakmak, O., Caglayan, H., and Ozbay, E., The focusing effect of graded index photonic crystals, *Applied Physics Letters*, 93, 171108–171110, 2008.
- [53] Kurt, H. and Citrin, D. S., A novel optical coupler design with graded-index photonic crystals, *IEEE Photonics Technology Letters*, 19, 1532–1534, 2007.
- [54] Kurt, H., Oner, B., Turdnev, M., and Giden, I. H., Modified Maxwell fisheye approach for efficient coupler design by graded photonic crystals, *Optics Express*, 20, 22018–22033, 2012.
- [55] Vasic, B., Isic, G., Gajic, R., and Hingerl, K., Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime, *Optics Express*, 18, 20321–20333, 2010.
- [56] Gauffillet, F. and Akmansoy, E., Graded photonic crystals for graded index lens, *Optics Communications*, 285, 2638–2641, 2012.
- [57] Do, V. K., Roux, X. L., Caer, C., Morini, D. M., Izard, N., Vivien, L., and Cassan E., Wavelength demultiplexer based on a two-dimensional graded photonic crystal, *IEEE Photonics Technology Letters*, 23, 1094–1096, 2011.
- [58] Kurt, H., Yilmaz, D., Akosman, A. E., and Ozbay, E., Asymmetric light propagation in chirped photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 20, 20635–20646, 2012.
- [59] Matuschek, N., Kartner, F. X., and Keller, U., Theory of doublechirped mirrors, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron.*, 4, 197–208, 1998.
- [60] Lee, S. G., Choi, J. S., Kim, J. E., Park, H. Y., and Kee, C. S., Reflection minimization at two-dimensional photonic crystal interfaces, *Optics Express*, 16, 4270–4277, 2008.
- [61] Berenger, J. P., A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *Journal of Computational Physics*, 114, 185–200, 1994.
- [62] Baba, T., and Matsumoto, T., Resolution of photonic crystal superprism, *Applied Physics Letters*, 81, 2325–2327, 2002.
- [63] Wu, L., Mazilu, M., Karle, T., and Krauss, T. F., Superprism phenomena in planar photonic crystals, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 915–918, 2002.
- [64] Momeni, B. and Adibi A., Optimization of photonic crystal demultiplexers based on the superprism effect, *Applied Physics B*, 77, 555–560, 2003.
- [65] Gerken, M. and Miller, D. A. B., Wavelength demultiplexer using the spatial dispersion of multilayer thin-film structures, *IEEE Photonics Technology Letters*, 15, 1097–1099, 2003.
- [66] Centeno, E., Cassagne, D., and Albert, J. P., Mirage and superbending effect in two-dimensional graded photonic crystals, *Physical Review B*, 73, 235119–235123, 2006.
- [67] Lin, S. S. and Huang, T. J., Acoustic mirage in two-dimensional gradient-index phononic crystals, *Journal of Applied Physics*, 106, 053529–053533, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZ, Döne
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 08.06.1989 Amasya
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (541) 795 40 26
Faks : 0 (312) 292 40 91
e-mail : dyilmaz@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2011
Y. Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2013

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2013-	Turgut Özal Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce
Rusça

Yayınlar

[1] H. Kurt, D. Yılmaz, A. E. Akosman, and E. Ozbay, “Asymmetric light propagation in chirped photonic crystal waveguides,” Opt. Exp., vol. 20, no. 18, pp. 20635–20646, Aug. 2012.

[2] H. Kurt, D. Yilmaz, “Rainbow trapping using chirped all-dielectric periodic structures,” *Applied Physics B.*, vol. 110, no. 3, pp. 411–417, March 2013.

[3] D. Yilmaz, İ. H. Giden, M. Turduev, H. Kurt, “Design of a wavelength selective medium by graded index photonic crystals,” *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol. 49, no. 5, pp. 477–484, May 2013.