

**FOTONİK YAPILARDA YÜZEY MODUN BİYOSENSÖR VE DALGA
KILAVUZU UYGULAMASI**

MUHAMMED NECİP ERİM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip CAMUŐCU
Müdü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Hamza KURT
Anabilim Dalı Başkanı

Muhammed Necip ERİM tarafından hazırlanan FOTONİK YAPILARDA YÜZEY
MODUN BİYOSENSÖR VE DALGA KILAVUZU UYGULAMASI 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. A. Cafer GÜRBÜZ

Üye : Doç. Dr. Hamza KURT

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.

Muhammed Necip ERİM

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

Muhammed Necip ERİM

**FOTONİK YAPILARDA YÜZEY MODUN BİYOSENSÖR VE DALGA
KILAVUZU UYGULAMASI**

ÖZET

Bu tezde, öncelikle fotonik kristallerin yüzey modları kullanılarak polarizasyondan bağımsız (iki polarizasyonlu) dalga kılavuzunun tasarımı sunulmaktadır. Dalga kılavuzu yapısı hem TE hem de TM polarizasyon tarafından ortak olarak paylaşılan bir frekans aralığında çalışmaktadır. PWE ve FDTD metotlarına dayanan nümerik hesaplamalar TE ve TM modlarının ikisi için de hapsedme ve kılavuzlama sağlayan yüzey modlu bir dalga kılavuzunu tasarlamak ve göstermek için gerçekleştirilmiştir. İlgili modlar uygun bir şekilde uyarıldığı zaman yüzey modlu fotonik kristal dalga kılavuzu yüksek iletim verimliliği sağlanmış olmaktadır. Polarizasyondan bağımsız bir dalga kılavuzunun tasarımındaki zorluklar sunulan yapının fotonik entegre devre uygulamaları için önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca sadece TE polarizasyon için çalışan ve %28 gibi geniş bir bant aralığına sahip olan yüzey modlu bir fotonik kristal dalga kılavuzu da sunulmaktadır.

Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarımına ek olarak, düşük kırılma indisi değişimlerini algılamak için fotonik kristal yüzey modlarını içeren yeni bir biyosensör konsepti tasarlanmış ve sunulmuştur. Kare örgülü fotonik kristalin yüzeyi boyunca yer alan ve ilk olarak genişletilen sonra perfore edilen çubuklar tarafından optik yüzey modları oluşturulmaktadır. Fotonik kristal-hava ara yüzeyinde ilerlerken güçlü bir şekilde tutunan ve ilerleme doğrultusuna dik olarak sönümlenen mod numune ile etkileşime girmektedir. Ortamın indis değişiminden dolayı, iletim spektrumu geniş bir dinamik aralıkta doğrusal kaymaya maruz kalmaktadır. Yüzey bozukluklarının yerleşimlerinin değiştirilmesi biyosensörün hassasiyetini 8 nm/RIU değerinden 93 nm/RIU değerine yükseltmektedir. İkinci olarak araştırılan fotonik kristal yapısı üçgensel örgülü dağılıma sahiptir ve 117 nm/RIU hassasiyet değeri sağlamaktadır. Bu tasarımlara ek olarak, üçgensel örgülü fotonik kristalin yüzeyine yerleştirilmiş bir hava yarığı ile oluşturulan biyosensör yapısından bahsedilmektedir. Bu yapı ile elde edilen hassasiyet değeri 396 nm/RIU olmaktadır. Yapılan araştırmalar daha yüksek hassasiyet değerlerinin elde edilebileceği yönündedir.

Farklı hassasiyet değerleri, dispersiyon analizlerinden elde edilen ilgili modların farklı gurup hızlarına sahip olduklarını göstermektedir. Yüzey modlarına dayanan kompakt, hassas ve etiketsiz optik sensörler opto-akışkan teknolojisinin önemli bir parçası olma potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Fotonik Kristaller, Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu, Optik yüzey modları, Yüksek bant genişlikli dalga kılavuzu, Sensörler, Entegre optik.

University : **TOBB University of Economics and Technology**
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. – July 2013**

Muhammed Necip ERİM

**SURFACE MODE BIOSENSOR AND WAVEGUIDE IN PHOTONIC
STRUCTURES**

ABSTRACT

In this thesis, first of all, the design of a polarization-independent (dual-polarization) waveguide is presented by utilizing surface modes of photonic crystals. The waveguide structure operates in a frequency interval that is commonly shared by both TE and TM polarizations. The numerical calculations based on PWE and FDTD methods are carried out to design and demonstrate a surface mode waveguide that provides confinement and guiding for both TE and TM modes. Once the relevant modes are properly excited, the high transmission efficiency of the photonic crystal surface waveguide is ensured. The demand to have polarization-insensitive devices makes the proposed design an important component for the photonic integrated circuit applications. Moreover, a broadband surface mode photonic crystal waveguide is proposed with a bandwidth value of 28% for only TE polarization.

In addition to polarization insensitive waveguide design, a new bio-sensor concept that incorporates photonic crystal (PC) surface modes to sense small refractive index changes is designed and presented. The initial attempt creates optical surface modes by first enlarging and then perforating the radii of rods residing along the end surface of the square-lattice PC. The strongly confined mode which decays both evanescently along transverse to propagation direction interacts with the substance while propagating along the PC-air interface. Due to index change of the ambient medium, the transmission spectrum experiences linear shift with a large dynamic range. The relocation of the surface defects enhances the sensitivity of bio-sensor from ~ 8 to ~ 93 nm/RIU. The second type of investigated PC structure is based on triangular-lattice PC and it provides a surface state bio-sensor with a sensitivity of 117 nm/RIU. In addition to these designs, a final structure that incorporates air slot along one side of triangular-lattice PC is proposed. Succeeded sensitivity value is 396 nm/RIU. The investigation shows that even higher sensitivities can be achieved. The different RIU values are reminiscent of group velocity of the relevant modes which can be extracted from the dispersion analysis. Compact, sensitive and label-

free optical sensors based on surface modes may become part of the important applications in opto-fluidic technology and lab-on-a-chip.

Keywords: Photonic crystals, Polarization-insensitive waveguides, Optical surface modes, Wide bandwidth waveguides, Sensors, Integrated optics, Waveguides.

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 eőim Nur ERİM'e ve laboratuvarda çalışan diğer arkadaşlara teşekkür ederim.

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

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

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1. 1. Tanıtım	1
1. 2. İki Boyutlu Fotonik Kristaller ve Özellikleri	1
1. 3. İki Boyutlu Fotonik Kristallerde Optik Yüzey Modları.....	6
1. 4. İki Boyutlu Fotonik Kristaller İçin PWE Metodu.....	8
1. 5. İki Boyutlu Fotonik Kristaller İçin FDTD Metodu.....	10
2. İKİ POLARİZASYONLU DALGA KILAVUZU TASARIMI İÇİN FOTONİK KRİSTALLERİN OPTİK YÜZEY MODLARININ KULLANILMASI	13
2. 1. Giriş.....	13
2. 2. Polarizasyondan Bağımsız Yüzey Modlu Dalga Kılavuzunun Tasarımı.....	16
2. 3. Yapının İletim Karakteristiği	19
2. 4. İki Boyutlu Etkin Ortam Teorisinin Uygulanması.....	25
2. 5. Tek Polarizasyon İçin Geniş Bantlı Yüzey Mod Dalga Kılavuzu Tasarımı ..	27
2. 6. Sonuç.....	29
3. OPTİK YÜZEY MODLARININ KULLANILMASIYLA ELDE EDİLEN FOTONİK KRİSTAL BİYOSENSÖR KONFIGÜRASYONLARI	30
3. 1. Giriş.....	30

3. 2. Yüzey Modlu Fotonik Kristal Biyosensör Tasarımı	32
3. 3. Yüzey Modlu Optik Biyosensörün Algılama Mekanizması	34
3. 4. Yüzey Modlu Biyosensörün Hassasiyetinin Arttırılması.....	36
3. 5. Üçgensel Örgülü Fotonik Kristal Tabanlı Yüzey Mod Biyosensör	39
3. 6. Güç Spektrumu ve Grup İndisi Karşılaştırmaları.....	42
3. 7. Tartışmalar	46
3. 8. Sonuç.....	47
4. SONUÇLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	İki boyutlu fotonik kristal yapısının şematik görünümü [2].	2
Şekil 1.2.	İki boyutlu kare örgülü fotonik kristal yapısı için elde edilen dispersiyon diyagramı (TM polarizasyon).	3
Şekil 1.3.	İki boyutlu kare örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı için oluşturulan dispersiyon diyagramı.	4
Şekil 1.4.	İki boyutlu fotonik kristal kullanılarak elde edilen T şeklindeki dalga kılavuzunda ilerleyen ışık dalgasının elektrik alan dağılımı.	5
Şekil 1.5.	Yüzey modu için oluşturulan yapının dispersiyon diyagramı.	7
Şekil 1.6.	Optik yüzey modunun uyarılmasıyla elde edilen zaman alanı elektrik alan dağılımı.	8
Şekil 2.1.	Yüzey moduna dayalı polarizasyondan bağımsız yapının şematik gösterimi verilmiştir. Yapı kırılma indisi 3,46 olan dielektrik arka plandaki hava deliklerinden oluşmaktadır. Dış deliklerin çapı $d_o=0,80a$, içteki çubukların çapı $d_i=0,30a$ ve yüzeyde yer alan olukların çapı $d_c=0,60a$ olarak belirlenmiştir.	16
Şekil 2.2.	Alt kısımda gösterilen süper hücrenin dispersiyon diyagramı TE ve TM mod için sunulmuştur. Yüzeydeki delikte iç çubuk bulunmamaktadır.	17
Şekil 2.3.	Yüzeyinde yer alan delikte iç çubuk barındıran yapının dispersiyon diyagramı. Yapının süper hücresi yan tarafta verilmektedir.	18
Şekil 2.4.	Polarizasyondan bağımsız yüzey modlu yapının TE ve TM için iletim spektrumu verilmiştir. TM polarizasyon için (a) Giriş ve (b) Çıkış gücü dağılımıdır. TE polarizasyon için giriş ve çıkış güçleri sırasıyla (c) ve (d)'de gösterilmektedir.	20
Şekil 2.5.	TM ve TE modları için iletime karşılık normalize frekans grafiği. Mavi düz çizgi ve pembe kesikli çizgi sırasıyla TM ve TE polarizasyonları içindir.	21
Şekil 2.6.	(a) Yüzeydeki TM alan dağılımının zaman alanındaki görünümü. (b) PWE yöntemi ile elde edilmiş yapının TM alan profilini gösteren görüntü. TE polarizasyonun aynı sonuçları FDTD için (c) 'de ve PWE için (d) 'de verilmiştir.	22
Şekil 2.7.	Polarizasyondan bağımsız fotonik kristal yüzey modlu dalga kılavuzunun grup indisi dağılımları. Kare işaretli mavi çizgi TM polarizasyonu, çember işaretli pembe çizgi ise TE polarizasyonu göstermektedir.	23
Şekil 2.8.	(a) TM için ve (b) TE için t_1 anındaki zaman alanı görüntüleri. Bir süre sonra t_2 anında (c) TM için ve (d) TE için görüntüleri.	24
Şekil 2.9.	İki boyutlu etkin ortam teorisinin uygulanmasından sonra polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı.	27

Şekil 2.10.	(a) TE polarizasyon için geniş bantlı yüzey modlu dalga kılavuzunun şematik gösterimi. (b) Tasarlanan dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı.	28
Şekil 3.1.	(a) Yüzey modlu fotonik kristal biyosensörün şematik görüntüsü verilmiştir. Yatay ok dalga kılavuzu modunun ilerleme doğrultusunu göstermekte ve dikey oklar ise yüzey modunu temsil etmektedir. (b) Yüzey moduna karşılık gelen dispersiyon diyagramı sunulmaktadır. (c) Kesikli çizgi boyunca var olan elektrik alan dağılımı gösterilmektedir. Süper hücre şeklin alt tarafına yerleştirilmiştir. (d)-(f) Üç farklı zaman anlarında giriş sinyalinin zaman alanındaki görüntüleri verilmektedir ($t_1 < t_2 < t_3$).	33
Şekil 3.2.	(a) Referans durumu (hava, $n=1,0$) da içeren sinyallerin hepsi rezonans pik kaymalarının gözlemlenebilmesi için sunulmuştur. (b) Normalize frekansa karşılık kırılma indisi değişimi gösterilmektedir.	35
Şekil 3.3.	(a) Halka çubukların $0,50a$ değeri kadar kaydırılmasıyla oluşturulmuş yapının dispersiyon diyagramı gösterilmiştir. Üstte yer alan kutucuk yeni yüzey modunun (Düz çizgi) orijinal mod (Kesikli çizgi) ile birlikte yakından gösterimidir. Alt tarafta yer alan kutucuk ise hava-fotonik kristal ara yüzeyinde yer alan çubukların kaymalarını belirtmektedir. (b) Üç farklı kayma değerleri ($0,25a$, $0,50a$, $0,75a$) için normalize frekansın kırılma indisine göre grafiği gösterilmiştir.	37
Şekil 3.4.	(a) Fotonik kristal sensörün uç kısımları gösterilmektedir. (b) En iyi durum için çıkış gücünün normalize frekans değişimine göre grafiği verilmiştir. (c) Normalize frekans ve dalga boyunun kırılma indisine göre grafiği sunulmuştur. (d) Yüzey dalgalarının numune ile etkileşimi kutucuklar içerisinde gösterilmiştir.	38
Şekil 3.5.	(a) Üçgensel örgü yapısına sahip yüzey modlu fotonik kristal biyosensör yapısı gösterilmiştir. (b) Üçgensel örgülü fotonik kristalin yüzeyinde oluşturulan yüzey modunun dispersiyon diyagramı verilmiştir.	39
Şekil 3.6.	(a) Kırılma indisi değişimlerine göre elde edilen normalize çıkış gücünü gösteren grafik sunulmuştur. (b) Normalize frekansın kırılma indisine göre grafiği gösterilmiştir.	40
Şekil 3.7.	Üçgensel örgülü hava yarıklı yüzey modlu fotonik kristal sensör yapısı gösterilmektedir. Parametrelerin değerleri sağ tarafta verilmiştir.	41
Şekil 3.8.	Yapının yüzeyine hava yarığı eklenmesiyle elde edilen üçgensel örgülü fotonik kristalin dispersiyon diyagramı verilmiştir.	41

- Şekil 3.9. (a) Hava yarıklı yapı için normalize çıkış gücünün normalize frekansa karşılık gelen grafiği verilmiştir. (b) Normalize frekansın kırılma indisine göre grafiği sunulmuştur. 42
- Şekil 3.10. (a) Kare örgü yapısına sahip fotonik kristalin çıkış gücünün normalize frekansına göre grafiği verilmektedir. Kırılma indisi değeri 1,30'dan 1,80'e 0,10 aralıklarla değiştirilmiştir. (b) Üçgensel örgülü fotonik kristal için benzer grafik verilmiştir. (c) Aynı grafik yüzeyinde hava yarığı içeren yapı için verilmiştir. Kırılma indisi 1,40'tan 1,48'e 0,01 aralıklarla artırılmıştır. 43
- Şekil 3.11. Kare örgülü fotonik kristal yapısında $r_1= 0,3a$ ve $r_2=0,4a$ olduğu durumlar için yüzey modunun dispersiyon diyagramı gösterilmiştir. 44
- Şekil 3.12. (a) Kare örgülü fotonik kristal sensörün yüzey modunun grup indisi spektrumu gösterilmektedir (Mavi çizgi $r_1 = 0,20a$, $r_2 = 0,30a$ için ve pembe çizgi $r_1 = 0,30a$, $r_2 = 0,40a$ için). (b) Üçgensel örgülü fotonik kristal sensörün yüzey modunun grup indisi spektrumu gösterilmektedir ($r_1 = 0,30a$, $r_2 = 0,40a$ için). (c) Yüzeyinde hava yarığı bulunan fotonik kristal sensörün yüzey modunun grup indisi spektrumu gösterilmektedir. 45

KISALTMALAR

Kısaltma	Açıklama
a.u.	Keyfi Birim (Arbitrary Unit)
BW	Bant Genişliği (Bandwidth)
FDTD	Sonlu Farklar Zaman Düzlemi (Finite-Difference Time-Domain)
PWE	Düzlemsel Dalga Açılımı (Plane Wave Expansion)
PML	Kusursuz Uyuşan Katman (Perfectly Matched Layer)
RIU	Kırılma İndisi Birimi (Refractive Index Unit)
SOI	Yalıtkan Üzerine Silikon (Silicon on Insulator)
TE	Enine Elektrik (Transverse Electric)
TM	Enine Manyetik (Transverse Magnetic)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
c	Işığın Boşluktaki Hızı (3×10^8 m/s)
E	Elektrik Alan Şiddeti
G	Ters Örgü Vektörü
H	Manyetik Alan Şiddeti
k	Dalga Vektörü
n	Kırılma İndisi
n_g	Grup Kırılma İndisi
n_{pcs}	Fotonik Kristal Levhanın Kırılma İndisi
Δn	Kırılma İndisindeki Değişim
r	Yarıçap
t	Zaman
α	Örgü Sabiti
δ	Kayma
ϵ	Dielektrik Sabiti
λ	Dalga Boyu
$\Delta\lambda$	Dalga Boyundaki Değişim
ω	Açısal Frekans
ω_{pcs}	Fotonik Kristal Levhanın Açısal Frekansı

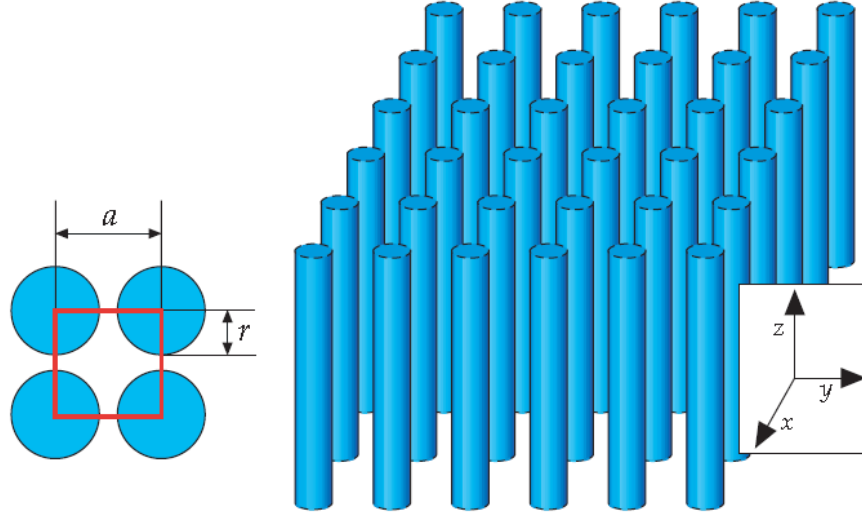
1. GİRİŞ

1. 1. Tanıtım

Fotonik kristaller ışık için düşük kayıplı periyodik dielektrik yapılardır [1,2]. Bu periyodiklik yapının bir, iki veya üç farklı yönde kırılma indisinin değişkenlik göstermesiyle belirlenir. Mesela ışık dalgasının ilerlediği sadece tek doğrultuda yapının kırılma indisi değişkenlik gösteriyorsa bu fotonik kristal yapısına bir boyutlu fotonik kristal denir. Bir boyutlu fotonik kristaller bir doğrultuda kırılma indisi değişen çok katmanlı ince filmlere benzetilebilir. Bu yapıların yüksek yansıtıcılığı bulunmaktadır. Bir diğer fotonik kristal çeşidi ise iki boyutlu fotonik kristallerdir. Bu yapılarda ışığın iki farklı ilerleme doğrultusu için yapının kırılma indisi değişmektedir. Bu tezde daha çok bu yapılar üzerinde durulmuş ve yapılan çalışmalar iki boyutlu fotonik kristaller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fotonik kristaller için son olarak üç boyutlu yapılar mevcuttur. Bu yapılar da diğerlerine benzer olarak bu sefer üç farklı doğrultuda yapının kırılma indisinin değişmesiyle elde edilmektedir. Fakat bu yapıların hem teorik olarak elde edilmesi ve hem de üretilmesi oldukça zordur. Bu kısa giriş yazısından sonra bu tezde kullanılan ve detaylı bir şekilde araştırılan iki boyutlu fotonik kristaller ve özellikleri anlatılacaktır.

1. 2. İki Boyutlu Fotonik Kristaller ve Özellikleri

İki boyutlu fotonik kristaller iki farklı doğrultuda (örneğin x ve y eksenleri) farklı kırılma indislerine sahip olup diğer doğrultuda (z eksen) homojen bir dielektrik malzeme dağılımına sahiptir. İki boyutlu fotonik kristaller kullanılarak birçok fotonik yapı tasarlanabilmektedir. Bu fotonik yapılara örnek olarak dalga kılavuzu [2], optik dalgayı 90 derece yön değiştirebilme [3], polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzları [4], optik biyosensör konfigürasyonları [5], yavaş ışık uygulamaları [6] ve yüksek kalite faktörüne sahip kaviteleler [2] gibi birden fazla fotonik kristal uygulaması sıralanabilir. İki boyutlu fotonik kristal yapısını temsil eden çizim Şekil 1.1'de verilmektedir.

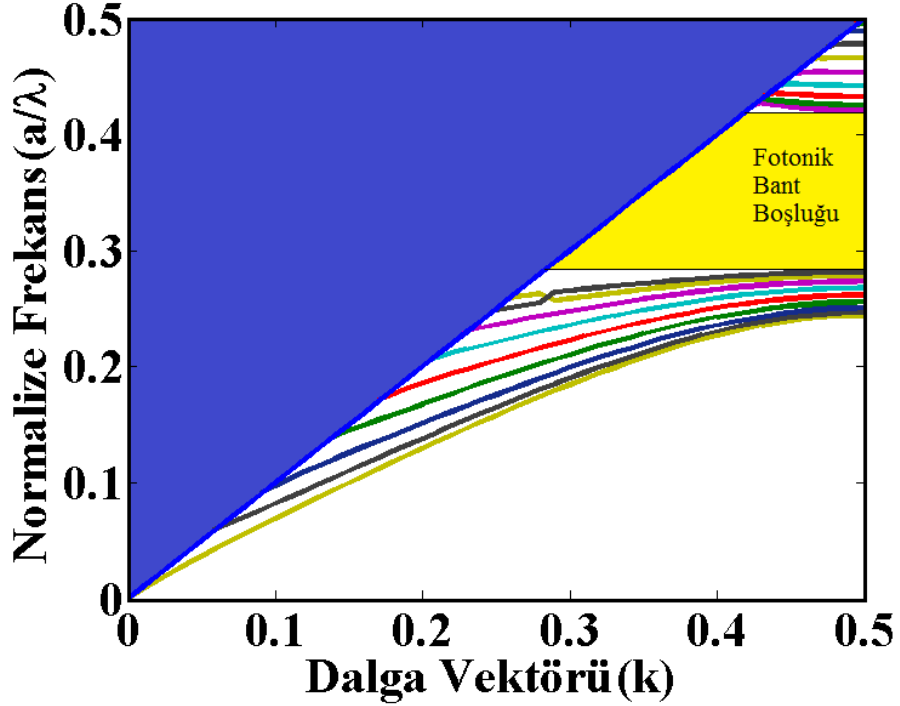


Şekil 1.1. İki boyutlu fotonik kristal yapısının şematik görünümü [2].

Şekil 1.1’de gösterilen iki boyutlu fotonik kristal yapısı belli bir dielektrik sabitine (ϵ) ve yarıçapa (r) sahip olan çubuk şeklindeki yapıların belli bir aralıkla (örgü sabiti, a) periyodik bir şekilde dizilmesiyle elde edilmektedir. Bu yapı kullanılarak ışık dalgasının x ve y eksenleri boyunca göstereceği hareketler incelenmektedir. Yine bu yapıda dizilen çubuklar kare örgü yapısına sahip olup etrafları hava ortamı ile çevrilmiştir. İki boyutlu fotonik kristal yapıları başka farklı dizilimlere sahip olacağı gibi dielektrik çubuklar yerine hava deliklerinin kullanılması ve etrafının dielektrik malzemeye kaplanmasıyla da elde edilebilir. Bu şekildeki yapılar üçgensel örgü yapısına sahiptirler.

İki boyutlu fotonik kristal yapılarının fotonik bant diyagramlarına bakılarak farklı konfigürasyonlar elde edilebilmektedir. Fotonik bant diyagramları diğer adıyla dispersiyon diyagramları fotonik kristallerin ne gibi özelliklere sahip olduğu konusunda fikir vermelerinin yanı sıra bu diyagramların özellikleri ile oynanarak çeşitli uygulamalar için farklı yapılar tasarlanabilmektedir. Şekil 1.1’de verilen yapı için elde edilecek olan dispersiyon diyagramı TM polarizasyona sahip ışık dalgası için çalışır. Çünkü bu yapının dispersiyon diyagramında sadece TM polarizasyondaki ışık dalgası için bant boşlukları bulunmaktadır. Şekil 1.1’de verilen yapının yarıçapı

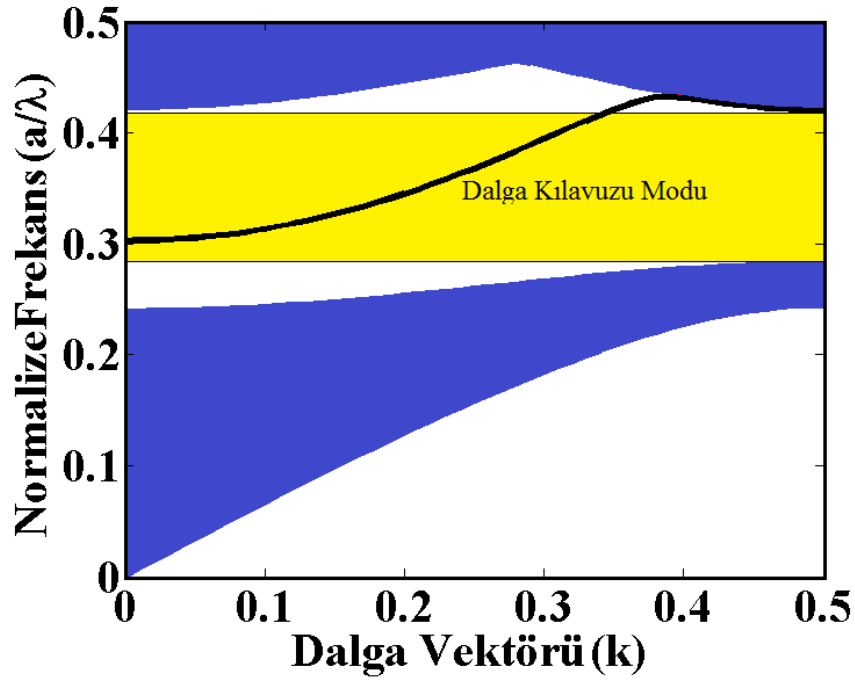
$r = 0,2a$ ve dielektrik sabiti $\epsilon=12$ olmasıyla elde edilen dispersiyon diyagramı Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. İki boyutlu kare örgülü fotonik kristal yapısı için elde edilen dispersiyon diyagramı (TM polarizasyon).

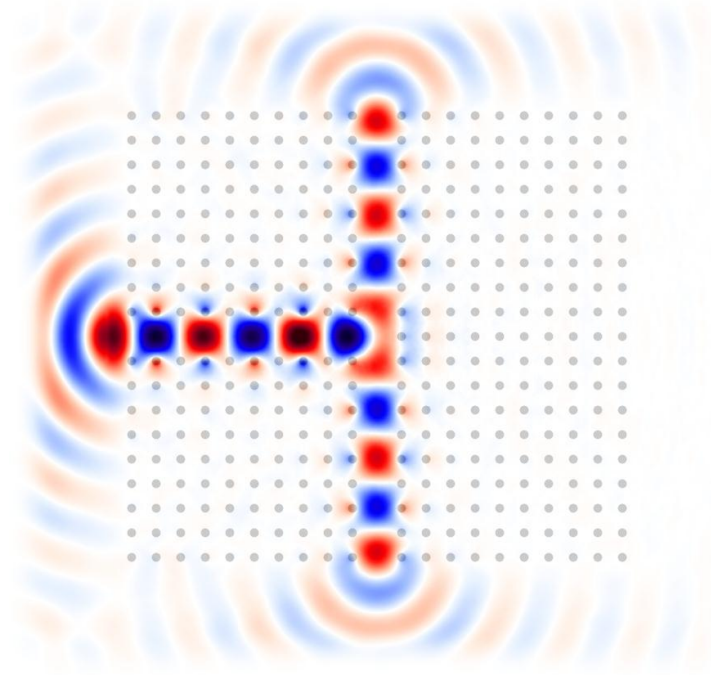
Şekil 1.2’de verilen dispersiyon diyagramı bir simülasyon programı yardımıyla elde edilmiş ve kullanılan program yapıyı PWE metoduna göre analiz etmiştir [7]. Burada iki bant arasında bulunan boşluk yasaklı bant aralığı (fotonik bant boşluğu) olarak adlandırılmaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere yasaklı bant aralığında herhangi bir mod bulunmamaktadır. Yani Şekil 1.2’de de görüldüğü gibi yaklaşık 0,28 ile 0,42 aralığındaki frekans içeriğine sahip bir ışık dalgası yapıya hangi yönde gelirse gelsin yapıda ilerleyemeyecek ve tamamen geri yansıtacaktır. Ayrıca bu diyagramda bulunan bant boşluğu yapının kare örgü dağılımından dolayı sadece TM polarizasyon için vardır. Bu yüzden TE polarizasyon için oluşturulan bantlar gösterilmemiştir. İki boyutlu fotonik kristal yapının periyodikliği eğer ki bir doğru boyunca bozulursa yani kare örgülü bir fotonik kristal yapısında yer alan çubukların bir sırası kaldırılırsa elde edilen yapı bir dalga kılavuzu olarak davranır. Şekil 1.2’de verilen dispersiyon

diyagramındaki bant boşluğunda (yasaklı bant aralığı) herhangi bir mod bulunmazken, yapıda meydana getirilen bu değişiklik sayesinde dalga kılavuzu modu yasaklı bant aralığında oluşmuş olmaktadır. Artık oluşturulan bu yapı bir dalga kılavuzudur ve bu dalga kılavuzunda belirli yönlerde ilerleyen ışık saçılmadan yoluna devam edebilmektedir. Bu durumu daha net bir şekilde ifade etmek adına dalga kılavuzu elde etmek için oluşturulan dispersiyon diyagramı Şekil 1.3'te gösterilmektedir.



Şekil 1.3. İki boyutlu kare örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı için oluşturulan dispersiyon diyagramı.

Şekil 1.3'te gösterilen dispersiyon diyagramında da görüldüğü gibi yapının yasaklı bant aralığında dalga kılavuzu modu oluşmuştur. Bu mod uygun frekanslarda uyarılırsa oluşturulan yapı içerisinde ilerleyen ışık dalgası yoluna herhangi bir yöne dağılmadan devam edecektir. Elde edilen bu dispersiyon diyagramına bakılarak uygun frekanslarda gönderilen ışık dalgasının yayılımını göstermek için yeni bir simülasyon yapılmış ve Şekil 1.4'te gösterilen durum elde edilmiştir.



Şekil 1.4. İki boyutlu fotonik kristal kullanılarak elde edilen T şeklindeki dalga kılavuzunda ilerleyen ışık dalgasının elektrik alan dağılımı.

Şekil 1.4'te verilen yapı dielektrik çubukların T şeklindeki bir sıra halinde kaldırılmasıyla elde edilen iki boyutlu fotonik kristal dalga kılavuzunun üstten görünümünü göstermektedir. Bu şekil bilgisayar ortamında bir simülasyon programı yardımıyla elde edilmiştir. Bu durumun gerçekleştirilmesi için FDTD metodu kullanılmıştır [8]. Yapının etrafı geri yansımaları önlemek adına PML ile çevrelenmiştir. Kaynak T şeklindeki dalga kılavuzunun başlangıç tarafına yerleştirilmiş ve dalga kılavuzu, dispersiyon diyagramına bakılarak uygun bir frekansta uyarılmıştır. Şekilde de görüleceği üzere kaynaktan yayılan ışık dalgası dalga kılavuzu boyunca dağılmadan ilerlemektedir. Bu durum fotonik kristallerin ışığı kılavuzlaması adına en önemli özelliklerinden biridir.

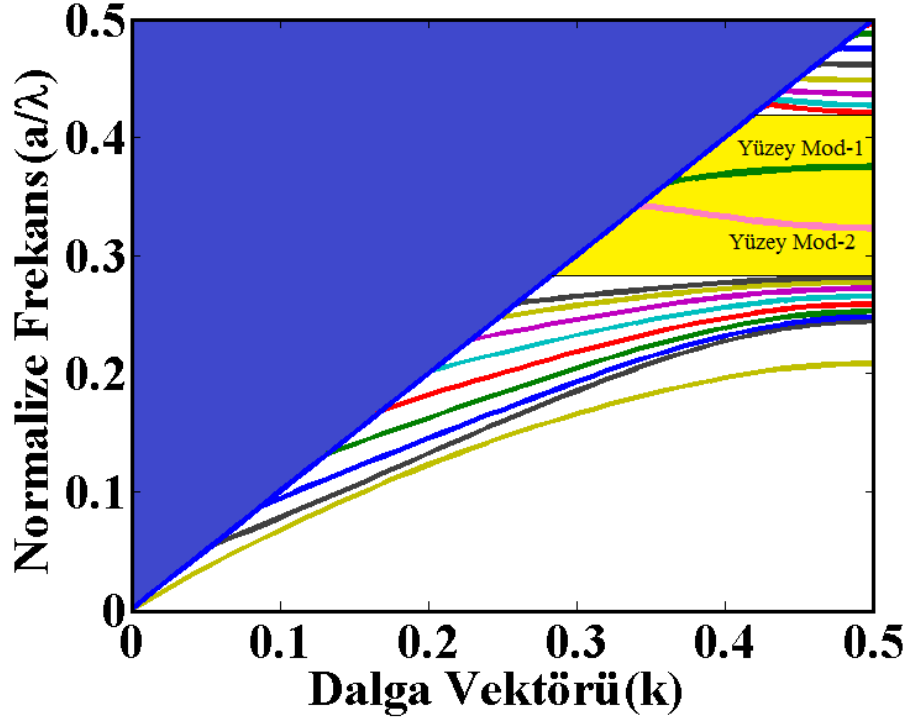
İki boyutlu fotonik kristallerin kullanılmasıyla yüksek kalite faktörüne sahip kavite de elde edilebilmektedir. Fakat bu durum tez için yapılan çalışmalarda yer almadığı için detaylı bir şekilde ele alınmamıştır. Dalga kılavuzu (çizgi bozukluğu) ve kavite (nokta bozukluğu) modları dışında iki boyutlu fotonik kristaller yüzey

modlarını da desteklemektedir. Bir sonraki kısımda yüzey modları detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

1. 3. İki Boyutlu Fotonik Kristallerde Optik Yüzey Modları

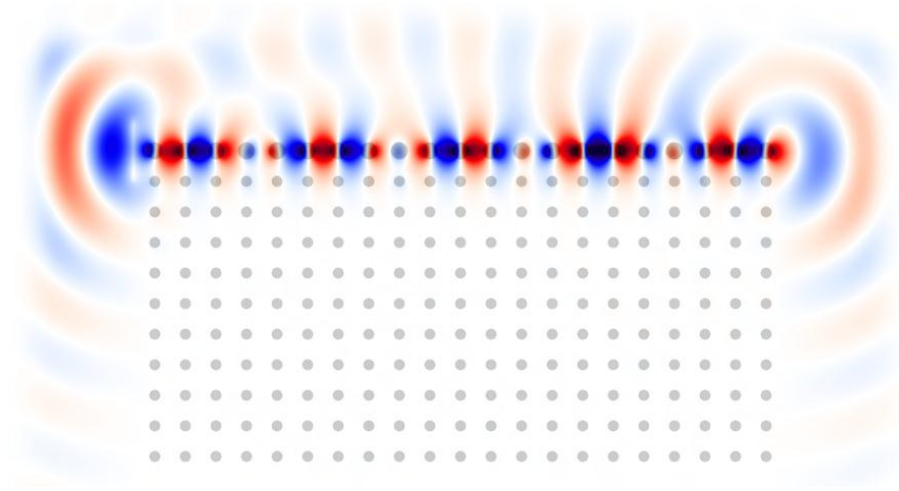
İki boyutlu fotonik kristal yapılarının yüzeyinde meydana getirilen çeşitli değişiklikler yapının yasaklı bant aralığında yüzey modlarının oluşmasını sağlamaktadır. Mesela kare örgü dağılımına sahip bir yapı için yüzeyde yer alan dielektrik çubukların yarıçapı, konumu veya kırılma indisi gibi parametrelerinde meydana gelen herhangi bir değişiklik yüzey modlarının yapı tarafından desteklenmesine neden olmaktadır. Optik yüzey modları kullanılarak birçok fotonik uygulama yapılabilmektedir. Bu tezde yer alan sonraki bölümlerde yapılmış olan çalışmaların temelini iki boyutlu fotonik kristallerin yüzey modları oluşturmaktadır. Optik yüzey modları detaylı bir şekilde incelenmiş olup iki farklı uygulamaya yer verilmiştir. Bu çalışmalardan ilki iki boyutlu fotonik kristallerin optik yüzey modlarını kullanarak her iki polarizasyon (TE ve TM) için de çalışabilen ve belli bir bant genişliğine sahip olan bir polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarımıdır. Yine aynı çalışmada geniş bir bant aralığına sahip ve sadece TE polarizasyon için çalışan bir dalga kılavuzu tasarımı da mevcuttur [4]. Diğer bir çalışmada ise yine iki boyutlu fotonik kristallerin optik yüzey modlarının kullanılmasıyla yüksek hassasiyet değerlerine sahip optik biyosensör tasarımı gerçekleştirilmiştir [5].

İki boyutlu fotonik kristallerin optik yüzey modlarının daha iyi anlaşılabilmesi adına önceki kısımlarda yer alan yapının ($r=0.2a$ ve $\epsilon=12$) yalnızca yüzeyinde yer alan dielektrik çubukların yarıçapları $0.3a$ 'ya çıkarılıp yapının yüzeyinde parametrik bir değişiklik yapılmıştır. Bu değişiklik yapıldıktan sonra optik yüzey modunun elde edileceği öngörülmüş ve Şekil 1.5'te verilen dispersiyon diyagramı hesaplanmıştır.



Şekil 1.5. Yüzey modu için oluşturulan yapının dispersiyon diyagramı.

Şekil 1.5'te de görüleceği üzere Şekil 1.2'deki yapıda herhangi bir değişiklik olmadan elde edilen dispersiyon diyagramından farklı olarak yasaklı bant aralığında iki ayrı mod oluşmuştur. İşte bu modlar bu tezde yer alan çalışmalarda da sık sık kullanılmış olan optik yüzey modunu temsil etmektedir. Elde edilen yeni yapı Şekil 1.5'teki modları içeren frekans aralığına sahip bir kaynak tarafından uyarılırsa ışık dalgası yapının yüzeyine tutunup dağılmadan ilerleyecektir. Bu durumun daha iyi anlaşılabilmesi için Yüzey Mod-2 olarak adlandırılan ikinci modun frekans içeriğine sahip bir kaynak ile oluşturulan yapı uyarılmış ve Şekil 1.6'da gösterilen sonuç elde edilmiştir.



Şekil 1.6. Optik yüzey modunun uyarılmasıyla elde edilen zaman alanı elektrik alan dağılımı.

Şekil 1.6’da gösterilen iki boyutlu fotonik kristal yapısının yüzeyindeki dielektrik çubukların yarıçapları arka kısımda bulunanlarınkinden daha büyüktür. Bu sayede yüzey modu elde edilmiş ve uygun bir frekansla uyarılmıştır. Kaynak bu sefer yapının yüzeyinin başlangıç tarafına yerleştirilmiştir. Bu şekilde uyarılan yüzey modu sayesinde yapının yüzeyinde yer alan bölgede olan ışık dalgası yüzeye tutunarak ilerleyebilmektedir. Dalga kılavuzu ve kavite modlarından farklı olarak birçok avantaj sunan optik yüzey modu sonraki bölümlerde daha detaylı bir şekilde ele alınacak ve bu konu hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilecektir.

1. 4. İki Boyutlu Fotonik Kristaller İçin PWE Metodu

İki boyutlu fotonik kristal yapıları analiz edilirken kırılma indisi iki yönde değiştiğinden düşey doğrultuda dalga vektörü, k , herhangi bir bileşene sahip değildir. Bu varsayım altında Maxwell denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [2].

$\vec{r} = xa_x + ya_y$ olarak kabul edilirse;

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

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

denklemleri E_z ve H_z için elde edilir. Denklem 1.1 ve 1.2’de verilen ifadelerde yer alan $\frac{1}{\varepsilon(r)}$ ifadesi fotonik kristalin periyodik bir kırılma indisi dağılımına sahip olmasından dolayı periyodik bir fonksiyondur. Periyodik fonksiyonların Fourier açılımı yapılabildiğinden $\frac{1}{\varepsilon(r)}$ fonksiyonunun Fourier açılımı,

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

olarak ifade edilir. Denklem 1.3’te yer alan K_G değeri ise,

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

ifadesine eşittir. Denklem 1.4’te verilen integralde yer alan S birim hücreyi, A ise fotonik kristal için birim hücrenin alanını ifade etmektedir. G ise ters örgü vektörüdür ve $\vec{G} = g_1 x + g_2 y$ şeklinde ifade edilir. Burada yer alan g_1 ve g_2 değerleri kare örgülü fotonik kristaller için $g_1 = \frac{2\pi m}{a}$ ve $g_2 = \frac{2\pi n}{a}$ şeklinde ifade edilirken üçgensel örgülü fotonik kristaller için $g_1 = \frac{2\pi}{a}(y + x\sqrt{3})/2$ ve $g_2 = \frac{2\pi}{a}(y - x\sqrt{3})/2$ olarak ifade edilmektedir. Birim hücre vektörleri ise kare ve üçgensel örgülü yapılar için sırasıyla $\vec{a} = a\hat{x} + a\hat{y}$ ve $\vec{a} = a(\hat{y} + \hat{x}\sqrt{3})/2 + a(\hat{y} - \hat{x}\sqrt{3})/2$ şeklinde ifade edilmektedir. Fotonik kristal yapısı analiz edilirken düşey eksendeki yapı sonsuz kabul edildiğinden E_z ve H_z değerleri sonsuz sayıdaki düzlem dalgaların toplamı şeklinde ifade edilebilir. O halde;

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

$$= \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) \sum_G h_{G,k} \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) v_k(\vec{r}) \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_z(r) &= \sum_G e_{G,k} \exp[i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}] \\ &= \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) \sum_G e_{G,k} \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) v_k(\vec{r}) \end{aligned} \quad (1.6)$$

olarak yazılabilmektedir. Denklem 1.5 ve 1.6'da yer alan h ve e değerleri ise sırasıyla manyetik ve elektrik alanların Fourier bileşenlerini temsil etmektedir. Bu denklemler 1.1 ve 1.2 denklemlerinde yerlerine yazıldığında aşağıdaki öz değer denklemleri elde edilmektedir.

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

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

1.7 ve 1.8 denklemleri nümerik olarak çözüldüğünde oluşturulan yapının bant diyagramı hesaplanabilmektedir.

1. 5. İki Boyutlu Fotonik Kristaller İçin FDTD Metodu

Fotonik kristalin uzaysal örgüsünde yer alan herhangi bir nokta $(i, j, k) = (i\delta, j\delta, k\delta)$ şeklinde tanımlanırsa, herhangi bir uzay ve zaman fonksiyonu da $F^n(i, j, k) = F(i\delta, j\delta, k\delta, n\delta t)$ olarak tanımlanabilir. Burada $\delta = \delta x = \delta y = \delta z$ terimleri uzaydaki artışı, δt terimi ise zamandaki artışı temsil etmektedir. Uzay ve zaman alanındaki türevler için sonlu fark ifadeleri sırasıyla yazılırsa [9];

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

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\delta t} + 0(\delta t^2) \quad (1.10)$$

ifadeleri elde edilir. Bu metodun Maxwell denklemlerine uygulanması amacıyla;

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

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

denklemleri kullanılacaktır. Denklem 1.9 ve 1.10'da yer alan ifadeler denklem 1.11 ve 1.12'de elektrik alan ve manyetik alan için uygulandığında;

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

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

ifadeleri elde edilmektedir. Elde edilen 1.13 ve 1.14 denklemlerinin nümerik olarak çözülmesi ile fotonik kristallerin zaman alanındaki analizleri ve bant diyagramları gibi birçok hesaplama yapılabilir. Hesaplanan sonuçların doğruluğunu garantilemek için δ değeri, minimum dalga boyunun küçük bir kısmı kadar

alınmalıdır. Böylelikle elektromanyetik alan uzaysal artışa bağı olarak fazla değışmez. Ayrıca δt 'nin 1.15 ile verilen koşulu sağlaması gerekmektedir.

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

İfadedeki v_{maks} dalğanın maksimum faz hızını göstermektedir. Ayrıca FDTD hesaplamalarında, yapının kenar kısımlarındaki geri yansımaları engellemek için yapının etrafına kusursuz uyuşan katman (PML) konulmalıdır. Başka bir deyişle sınır koşulları yapıya olan geri yansımaları engelleyecek şekilde ayarlanmalıdır.

2. İKİ POLARİZASYONLU DALGA KILAVUZU TASARIMI İÇİN FOTONİK KRİSTALLERİN OPTİK YÜZEY MODLARININ KULLANILMASI*

2. 1. Giriş

Fotonik kristaller çok boyutlu periyodik dielektrik yapılardır. Özellikle fotonik entegre devre uygulamalarında artan bir şekilde popüler olmaya başlamışlardır [1]. Fotonik kristalin periyodikliği iki farklı şekilde bozulabilir; kavite modu için dielektrik bir çubuğun ya da deliğin kaldırılmasıyla oluşacak bir nokta bozukluğu, dalga kılavuzu modu için bir dizi çubuk ya da deliğin bir doğru boyunca kaldırılmasıyla oluşacak bir çizgi bozukluğu. Bu ikisinin dışında yüzey modu için yapının yüzeyinde bulunan çubuk veya deliklerin parametrelerinin değiştirilmesiyle elde edilen yüzey bozukluğu bulunmaktadır [2]. Yapay bir şekilde oluşturulan tüm bu mod çeşitleri fotonik kristal yapısının dispersiyon diyagramlarına bakılarak belirlenebilmektedir. Işık dalgasının farklı yollarla hapsedilebilmesi amacıyla bu bozukluklar tanımlanabilir. Bu farklı yollar ışığı bir noktada hapsedmek, bir doğru boyunca kılavuzlamak ya da fotonik kristallerin yüzeyine hapsedmek şeklinde olabilmektedir. Yüzey modunun fark edilebilir özelliklerinden biri yapısal konfigürasyonun doğası gereği bant boşluğu kılavuzlanmış modu desteklemesidir. İlerleme yönüne dik olan durum asimetric bir profile sahiptir. Yani yarısı periyodik diğer yarısı homojen ortam şeklindedir.

Fotonik kristallerin kavite veya dalga kılavuzu modlarını destekleyen birçok örnek araştırma çalışması mevcuttur [2]. Fakat eğer periyodik ortamın dış sınırı uygun bir şekilde bozulursa fotonik kristallerin yüzey dalgalarını da desteklediği bilinmektedir [10-12]. Yüzey modu bölgesinin frekans aralığını içeren ışık dalgası fotonik kristal yapısı ile homojen hava ortamı arasında hapsedilebilir ve ilerletilebilir. Bu çalışmada, polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu için fotonik kristallerin yüzey

*Erim, M. N., Erim, N., Kurt, H., Optical surface modes of photonic crystals for dual-polarization waveguide, Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 11(2), 123-131, 2013.

modları dikkate alınmış ve kullanılmıştır. Polarizasyondan bağımsızlık burada ikili polarizasyon terminolojisine işaret eder ve dar genişlikteki SOI sırt dalga kılavuzlarındaki çift kırılmalı kompanzasyon fikri ile karıştırılmamalıdır. Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzları bant diyagramlarında TE ve TM modları için ortak frekans alanlarına sahiptirler ve bu belli frekans değerleri için TE ve TM polarizasyonlu ışık dalgaları ile çalışırlar. Son zamanlarda fotonik kristallerin yüzey modlarını konu alan birçok araştırma vardır. Mesela, yüzeyinde hava yarığı ile hava deliklerinin üçgensel dizilimi kullanılarak 396 nm/RIU maksimum hassasiyet değeri rapor edilmiş biyosensör konfigürasyonu güncel çalışmalara bir örnektir [5]. Fotonik kristallerin yüzey modu hakkında bir başka çalışma düşük dispersiyon özellikli yüzey modlu yavaş ışık dalga kılavuzudur [6]. Bunlara ek olarak, yazarların yüzey durumlarını analiz ettikleri ve bant yapısı, alan sınırlaması ve yüzey modlarının dalga kılavuzlama kabiliyeti üzerine bozuklukların etkisini tartıştıkları yüzey modlu dalga kılavuzları hakkında bir çalışma bulunmaktadır [13]. Aynı çalışmada yazarlar, kuplör ve yönlü emisyon gibi yüzey modlu dalga kılavuzlarının bazı uygulamalarına yer vermişlerdir. Başka bir çalışma yüzey modlu lazer araştırması yapmıştır [14]. Işık hızı hakkındaki bir çalışma ise yüzey oluklu fotonik kristalleri kullanmış ve artırılmış iletim hem teorik hem de deneysel olarak gösterilmiştir [15]. Ayrıca, fotonik kristallerin yüzey modlarını kullanarak yüksek kalite faktörüne sahip kaviteyi içeren bazı çalışmalar mevcuttur [16,17].

Öte yandan [13] numaralı referansta yapılan çalışmada iki boyutlu fotonik kristallerin desteklediği yüzey modları bir optik dalga kılavuzu olarak sunulmuş ve sadece TM polarizasyon ele alınmıştır. Fakat polarizasyondan bağımsızlık veya ikili polarizasyon bazı fotonik uygulamalar için çok önemli ve gerekli bir özelliktir [18-25]. Bunun sebebi dalga kılavuzu boyunca ilerleyen bir optik sinyalin polarizasyon durumunun zamanla değişebilmesidir. Bu yüzden polarizasyondan bağımsız fotonik kristaller ve fotonik kristal dalga kılavuzları fotonik bant aralıkları ve kılavuzlanan modları her iki polarizasyon yani TE ve TM polarizasyonları için desteklemeleri adına önerilmektedir. TE ve TM mod tarafından paylaşılan bir frekans aralığını bulmak oldukça zorlayıcı bir işidir. Tüm fotonik bant boşluğu oluşturmak daha az zorlayıcı olmasına rağmen TE ve TM mod için ortak bir dalga kılavuzu oluşturmak

basit değildir. Ayrıca ilgili frekans bölgesi içerisinde, çoklu mod tarafından etkilenmemesi gereken tek mod şartı tasarımı bir kısıtlama koymaktadır. Sonuç olarak birinci mertebeden TE ve TM modları destekleyen bir dalga kılavuzu hedeflemek üstesinden gelinmesi nispeten zor bir durum olmaktadır.

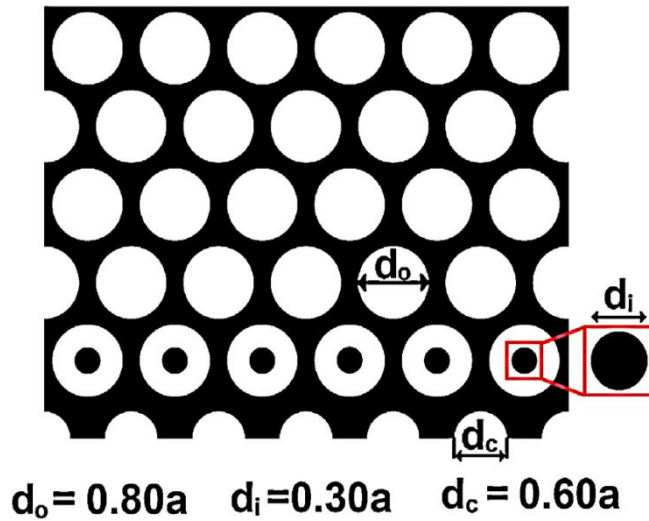
Bilindiği kadarıyla polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarımı açısından yüzey modları üzerine yoğunlaşan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu yapmak için yüzey modlarının kullanılması önceki yaklaşımlara göre bazı önemli avantajlar elde edilmesini sağlamaktadır. Diğerlerine göre şu anki yöntemin birinci avantajı homojen bir hava tarafının varlığının olmasıdır. Işığı dış hava tarafından fotonik kristal yapısının yüzeyine enjekte etmek mümkündür. Bu bakımdan ışığın yüzeye bağlantısı daha az problem oluşturmaktadır. Tasarlanan yapının bir diğer avantajı dispersiyon diyagramlarına bakılarak anlaşılabilir. Mesela [19,20] numaralı referanslardaki çalışmalarda, TE ve TM mod eşleştirilmiş fakat aynı frekans bölgesinde başka modlar görülmüştür. Bu durum çoklu mod yapısına neden olmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan yapının dispersiyon diyagramlarında, TE ve TM modlar diğer modlardan çok iyi bir şekilde izole edilmiştir. Başka bir deyişle TE ve TM modların ikisini birden içeren frekans aralıklarında başka hiçbir mod bulunmamaktadır. Bu yüzden yaklaşık olarak %4,60 bant genişliğine sahip olan tek modlu bir polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarlanmış olmaktadır. Bütün bunlara ek olarak, TE ve TM modlar düşük frekans bölgelerinde yer almakta ve ışık çizgisinin altında yer almaktadırlar. Bu da yapının düzlem dışı radyasyon kaybına daha toleranslı olduğunu göstermektedir.

Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarımı çalışmasına ek olarak, geniş bir bant genişliğine sahip olan diğer bir yüzey modlu dalga kılavuzu üzerinde çalışılmıştır. Fakat bu geniş bantlı dalga kılavuzu sadece doğrusal dispersiyon eğrisine sahip TE polarize edilmiş ışık dalgası için çalışmaktadır. Literatürde diğer yöntemlerin kullanılmasıyla elde edilen birçok geniş bantlı dalga kılavuzu örneği mevcuttur [26-32]. Ama bant genişlikleri çalışmamızda tasarlanan dalga kılavuzu kadar iyi değildir. Örneğin [26, 28, 30] numaralı referanslarda rapor edilen bant genişlikleri sırasıyla 170 nm, %13 ve 60 nm şeklindedir. Bu değerlere bakıldığında

%28 (yaklaşık 590 nm) bant genişliği değeri önceki çalışmalara nazaran iki kat daha yüksek bir gelişmeyi göstermektedir. Ayrıca tasarlanan bu dalga kılavuzu tek modlu ve yüksek geçirgenlidir.

2. 2. Polarizasyondan Bağımsız Yüzey Modlu Dalga Kılavuzunun Tasarımı

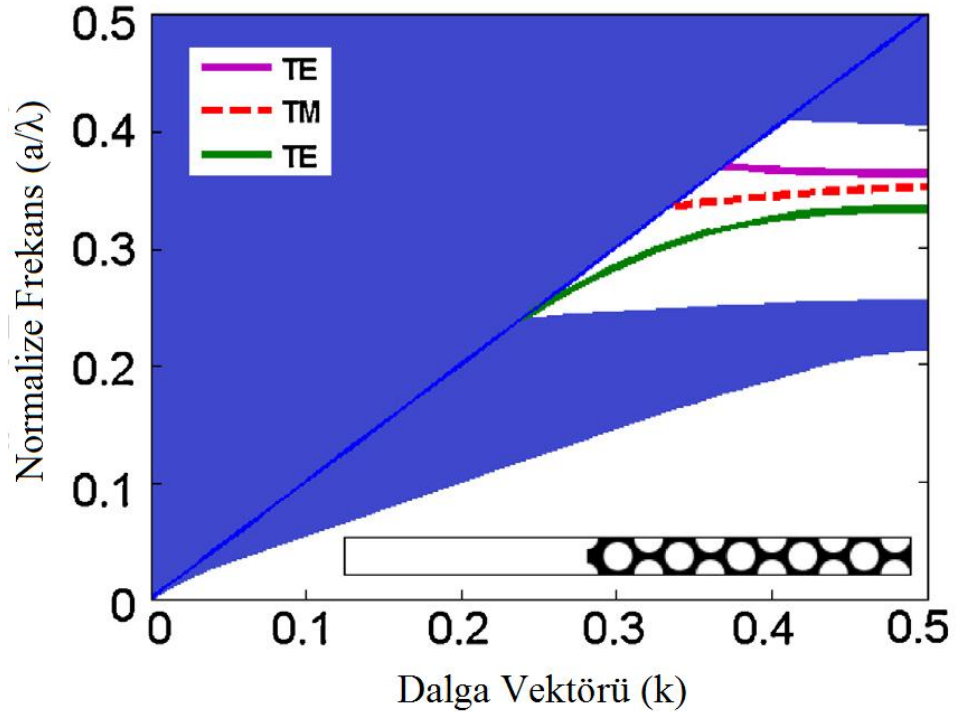
Fotonik kristaller genel olarak kare ve üçgen örgü konfigürasyonlarına dayalı iki önemli örgü dağılımına sahiptir. Dielektrik çubukların kare örgü dağılımına sahip fotonik kristaller dispersiyon diyagramlarındaki TE bant boşluğunun olmayışından dolayı TM polarizasyonuna sahip ışık için uygundur. Hâlbuki hava deliklerinin üçgensel örgü dağılımına sahip olanlar dielektrik parametresinin bağlı dağılımından dolayı genelde TE polarize ışık dalgasını destekler [2]. Bu çalışmada polarizasyondan bağımsız yüzey modlu dalga kılavuzunun oluşturulması için hava deliklerinin üçgensel örgüsüne dayalı fotonik kristal kullanılmıştır. Hava delikleri ve dielektrik arka plandan oluşan yapının bir parçası Şekil 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Yüzey moduna dayalı polarizasyondan bağımsız yapının şematik gösterimi verilmiştir. Yapı kırılma indisi 3,46 olan dielektrik arka plandaki hava deliklerinden oluşmaktadır. Dış deliklerin çapı $d_o=0,80a$, içteki çubukların çapı $d_i=0,30a$ ve yüzeyde yer alan olukların çapı $d_c=0,60a$ olarak belirlenmiştir.

Arka planın kırılma indisi 3,46’dır. Şekil 2.1 ‘den de görüleceği üzere, $d_o=0,80a$, $d_c=0,60a$ ve $d_i=0,30a$ çaplarına sahip iki farklı hava deliği ve bir tek tip dielektrik

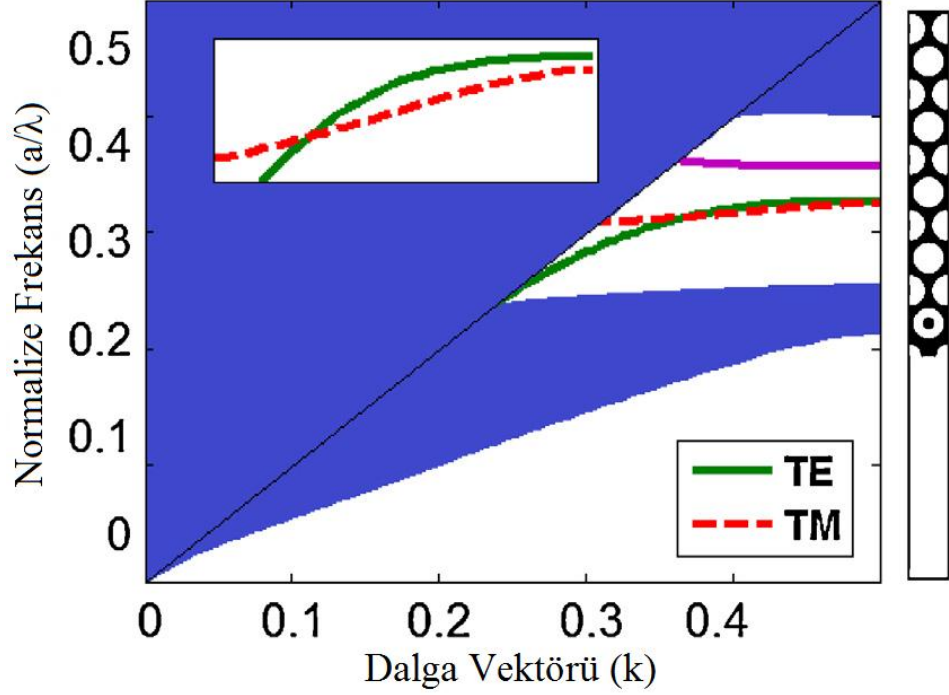
çubuk vardır. Buradaki a örgü sabitidir ve değeri 500 nm'ye sabitlenmiştir. Üçgensel örgü yapısının yüzeyi oluk delikleri (d_o) şeklinde adlandırılan daha küçük yarı hava delikleri ile modüle edilmiştir. Oluk bölgesinin arkasındaki hava deliklerinin içerisine yerleştirilen dielektrik çubuklar iç çubuk (d_i), diğer hava delikleri dış delik (d_o) olarak adlandırılmıştır. İç çubukların etkisini anlayabilmek için yüzeyde herhangi bir dielektrik çubuk bulunmayan yapının dispersiyon diyagramı oluşturulmuş ve Şekil 2.2 'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Alt kısımda gösterilen süper hücrenin dispersiyon diyagramı TE ve TM mod için sunulmuştur. Yüzeydeki delikte iç çubuk bulunmamaktadır.

Diyagramın alt köşesinde verilen süper hücrenin dispersiyon eğrisi düzlem dalga açılımı (PWE) [7] metoduyla üretilmiştir. Şekil 2.2'de bulunan düz çizgiler TE modları temsil ederken kesikli olan çizgi ise TM modu göstermektedir. Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu yapmak için bu modları örtüştürmek gerekir. Gördüğümüz üzere yüzey deliklerinin içinde bir iç çubuk bulunmadan TE ve TM modları arasında herhangi bir frekans eşleşmesi bulunmamaktadır. Bu handikabın üstesinden gelmek için yüzey tabakası boyunca deliklerin içine çubuklar

yerleştirilmiştir ve Şekil 2.3' te TE ve TM modlar için dispersiyon diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.3. Yüzeyinde yer alan delikte iç çubuk barındıran yapının dispersiyon diyagramı. Yapının süper hücresi yan tarafta verilmektedir.

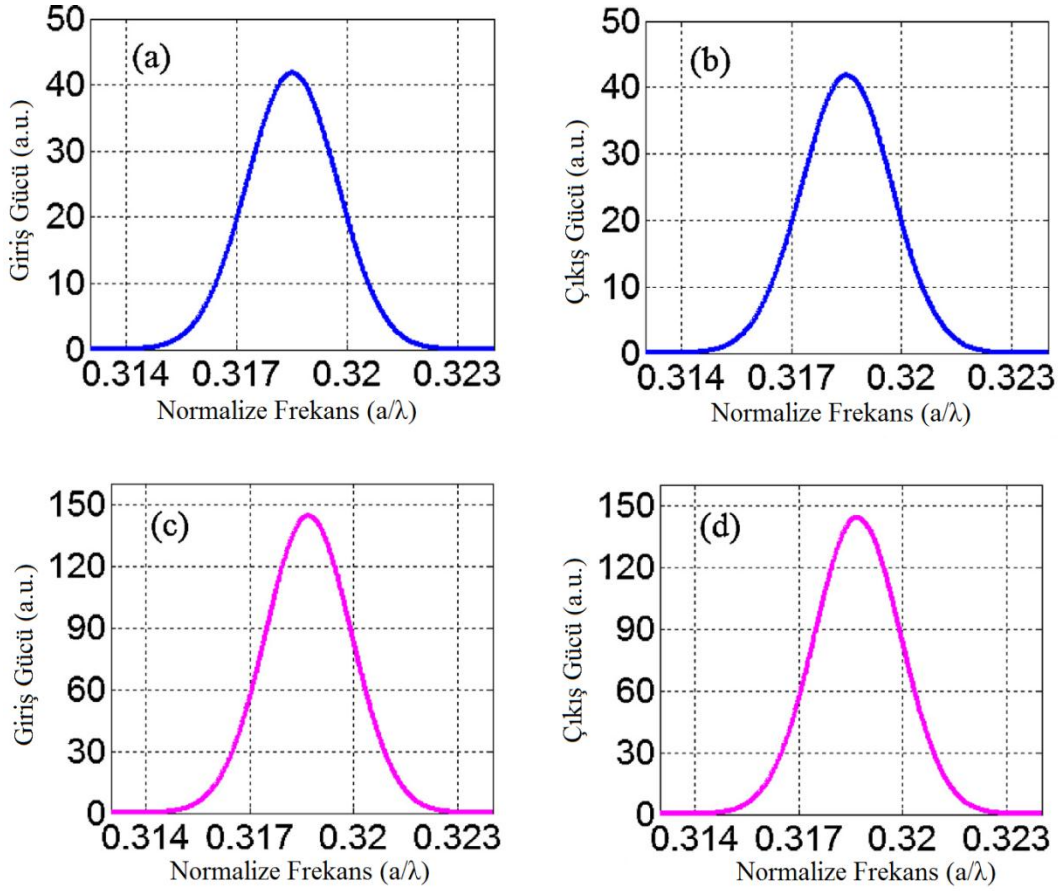
Diyagramdaki küçük resim bazı belli frekans aralıklarında frekans örtüşmesinin olduğunu göstermektedir. Diyagramdan elde edilen bilgiye göre bu frekans aralığında polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu yapılabilir. Bu sonuçlara göre yüzey modlu polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarlanmıştır.

Geometrik parametreleri (d_o , d_c , d_i) seçme kriteri şu şekildedir. Birinci parametre (d_o) fotonik kristalin bant aralığı bölgesini belirler. Daha büyük değerler oldukça geniş bant aralıkları üretmektedir. Yüzey modunun bu bant boşluğunun içinde yer alması gerekmektedir. Bu kriterler uyan değer $0,40a$ olduğu belirlendi. İkinci (d_c) ve üçüncü (d_i) parametreler her iki polarizasyon için yüzeyde tutunan Bloch modunun sağlanması rolündedirler. d_c genel olarak TE yüzey modunu etkilerken geri kalan d_i ise TM modu etkiler. Üçgensel örgülü fotonik kristal TM moddan ziyade TE

polarizasyona sahip bant aralığı ve yüzey modu oluşturmasını daha kolay desteklemekte olduğu bilinmektedir. Bu yüzden d_c değerinin $0.60a$ olarak seçilmesinden sonra muhtemel d_i değerinin kontrol edilmesi daha önemlidir. Bir dizi d_i değeri sadece bant genişliği bölgesi örtüşmesi için değil ilgili gurup indeks spektrumu açısından kontrol edilmiştir. Sonuç olarak d_i değeri iki polarizasyon için de daha geniş bant genişliği örtüşmesi sağlayan ve neredeyse eşit gurup indeks değeri veren $0,30a$ olarak seçilmiştir.

2. 3. Yapının İletim Karakteristiği

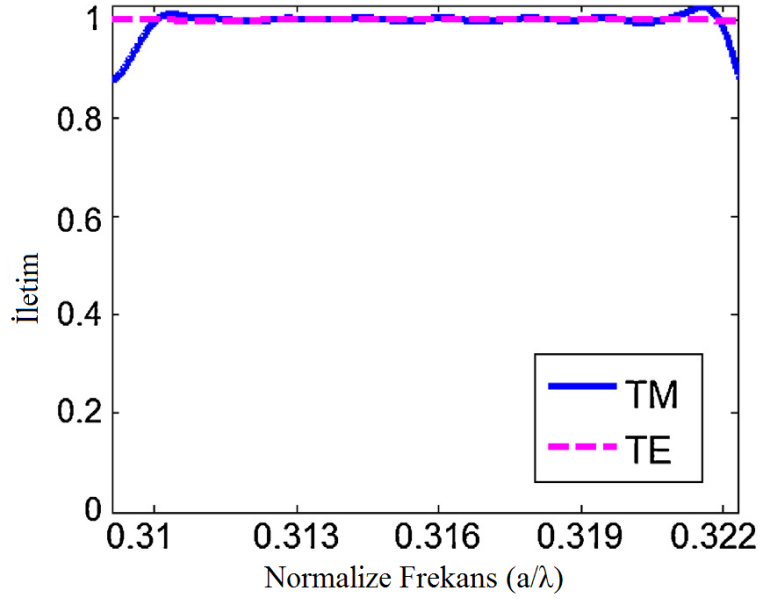
Dalga kılavuzunun geçirgenliği FDTD yöntemi [8] kullanılarak yapının verimliliğini yargılamak adına hesaplanmıştır. Giriş kaynağının tasarlanan dalga kılavuzuna verimli bir şekilde bağlanması için empedans ve mod eşleşmesinin sağlanması gerekmektedir. Bu iş şu anki çalışmanın kapsamı dışında bulunmaktadır. Bu yüzden değerlendirme yüzey modunun giriş bağlantı kayıplarının ihmal edilmesiyle sağlanmıştır. Buna binaen yüzey boyunca yapı içerisinde iki ölçüm noktası alınarak Şekil 2.4 hazırlanmıştır.



Şekil 2.4. Polarizasyondan bağımsız yüzey modlu yapının TE ve TM için iletim spektrumu verilmiştir. TM polarizasyon için (a) Giriş ve (b) Çıkış gücü dağılımıdır. TE polarizasyon için giriş ve çıkış güçleri sırasıyla (c) ve (d)'de gösterilmektedir.

İki ölçüm noktası arasındaki uzaklık $30a$ olarak sabitlenmiştir. Işık yapıya bağlantı yaptıktan ve ilgili yüzey modu uyarıldıktan sonra neredeyse mükemmel iletim sağlanmıştır. Bu amaçla Gauss kaynağının uygun merkez frekansı ve bant genişliği tasarlanan dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramına bakılarak seçilmiştir. Dalga kılavuzuna gönderilen ışık dalgasının belli bir kısmı yapının yüzeyine bağlanmıştır ve işte bu mod ilgili yüzey modudur. Giriş kaynağı (çift uzaysal profilli temel moda sahip) ve yüzey Bloch modu arasındaki mod bağlantısı yapının ön tarafındaki geçiş bölgesinde olmaktadır. İlgili yüzey durumlarının yüzeyde tutunması sağlandıktan sonra kayıpsız ilerlemeleri incelenmiştir. İki farklı konumdaki TM modu ilerlemesi Şekil 2.4a ve Şekil 2.4b'de gösterilmiştir. TE polarizasyon için benzer çizimler Şekil 2.4c ve Şekil 2.4d'de verilmiştir. Şekil 2.4'te yer alan eğrilere bakıldığında her iki

mod için de dalga kılavuzu boyunca bozulmadan ilerleme olduğu kolayca görülebilmektedir. Optik sinyaller aynı genlikte aynı frekans aralıklarında olmakla birlikte ilerleme süresince ciddi bir dispersiyon durumu bulunmamaktadır. Sonuç olarak tasarımı düşük kayıplı ve düşük dispersiyonlu bir polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzudur. Öte yandan TE güç spektrumu ikinci algılama noktasında hafifçe asimetric bir profile sahiptir. Bu durumun dağılma etkisinin (uyarılmış modun yüzeyde ilerledikçe bozulmaya uğraması) bir göstergesi olduğu sonradan gösterilecektir. Şekil 2.4'teki grafiklerin kullanılmasıyla giriş ve çıkış güç spektrumlarının hassas ve temiz karşılaştırmasının yapılması basit değildir. İletim performansının daha iyi açıklanması amacıyla Şekil 2.5'te verilen eğriler hazırlanmış olup bunlar TE ve TM modları için çıkış giriş oranını göstermektedir.

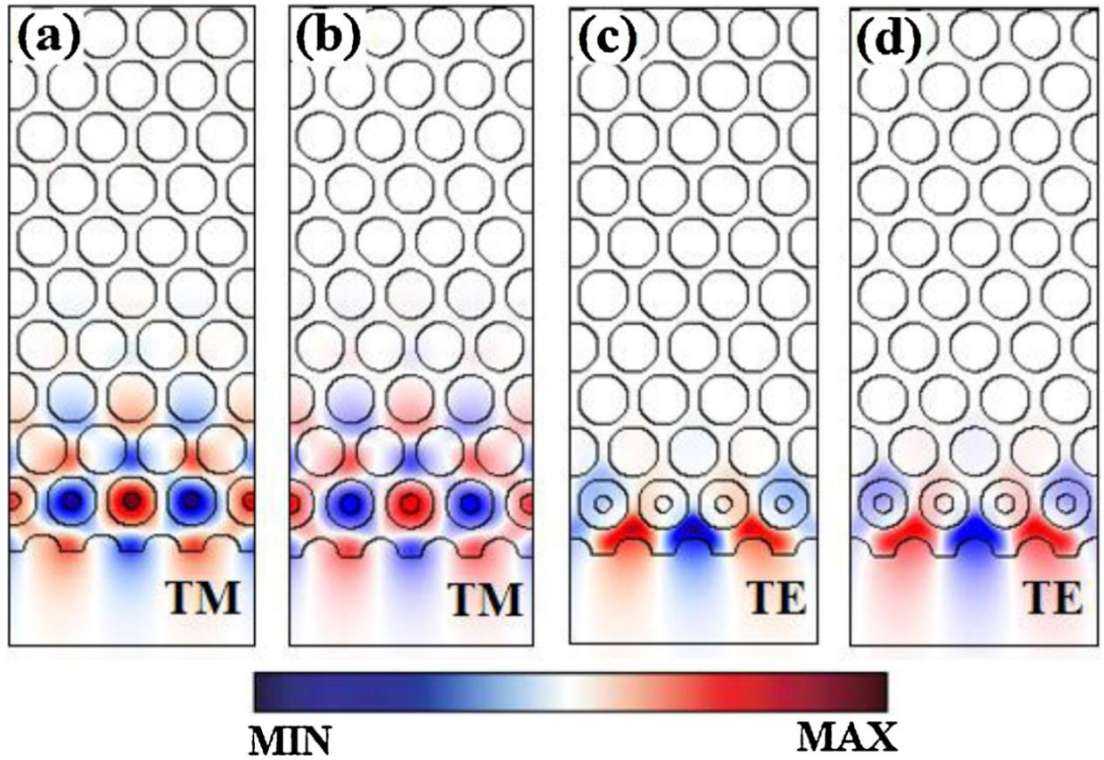


Şekil 2.5. TM ve TE modları için iletim karşılık normalize frekans grafiği. Mavi düz çizgi ve pembe kesikli çizgi sırasıyla TM ve TE polarizasyonları içindir.

Bu grafiğe bakıldığında iletimin bazı belli frekans değerleri için çok yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Sunulan spektrum grafikleri bağlantı verimliliğine ve tutunan yüzey modlarına karşılık gelmektedir. Giriş ve çıkış bağlantı verimliliği ihmal edilmiştir. Yapının içerisinde yer alan iki algılama noktasının gözlemlenmesiyle optik sinyalin ilerlemesi izlenmiştir. Buradaki amaç uygun giriş ve çıkış

bağlantılarının ve uyarılmış yüzey modlarının varlığını farz ederek yapının yüzeyi boyunca neredeyse mükemmel iletimin olabirliğini göstermektedir.

İletim verimliliğinin araştırılmasının ardından FDTD ve PWE metotlarının sonuçları arasındaki uyumu göstermek adına analizler yapılarak Şekil 2.6 hazırlanmıştır.

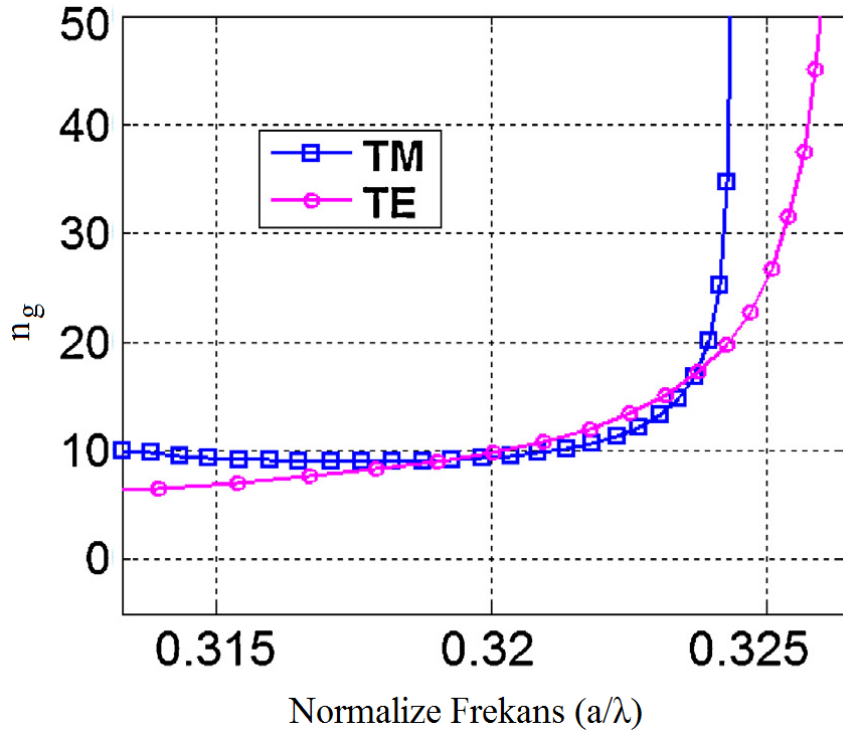


Şekil 2.6. (a) Yüzeydeki TM alan dağılımının zaman alanındaki görünümü. (b) PWE yöntemi ile elde edilmiş yapının TM alan profilini gösteren görüntü. TE polarizasyonunun aynı sonuçları FDTD için (c) 'de ve PWE için (d) 'de verilmiştir.

Şekil 2.6'da elektrik ve manyetik alan dağılımlarının hesaplanmasıyla ilerleme boyunca iki polarizasyonun yakın denetimleri sağlanmıştır. İki nümerik yöntem (FDTD ve PWE) istenilen alan dağılımlarını sağlayabilmektedir. TM mod daha çok fotonik kristal yapısının içine nüfuz etmiştir. Fakat TE mod ara yüze yakın sınırlanmış bir şekilde yerleşmiş ve ilerlemeye dik doğrultuda hızlıca azalmıştır. Şekil 2.6b TM mod için frekans alanı sonuçlarını gösterirken Şekil 2.6a zaman alanı sonuçlarını göstermektedir. Aynı ilişki TE mod için Şekil 2.6c ve d 'de gözlemlenebilir. Şekil 2.6'dan yapılan gözlemler iki yöntem arasında TE ve TM

polarizasyonlarının ilerleme davranışlarının incelenmesi adına güçlü bir tutarlılığın olduğunu kanıtlamaktadır.

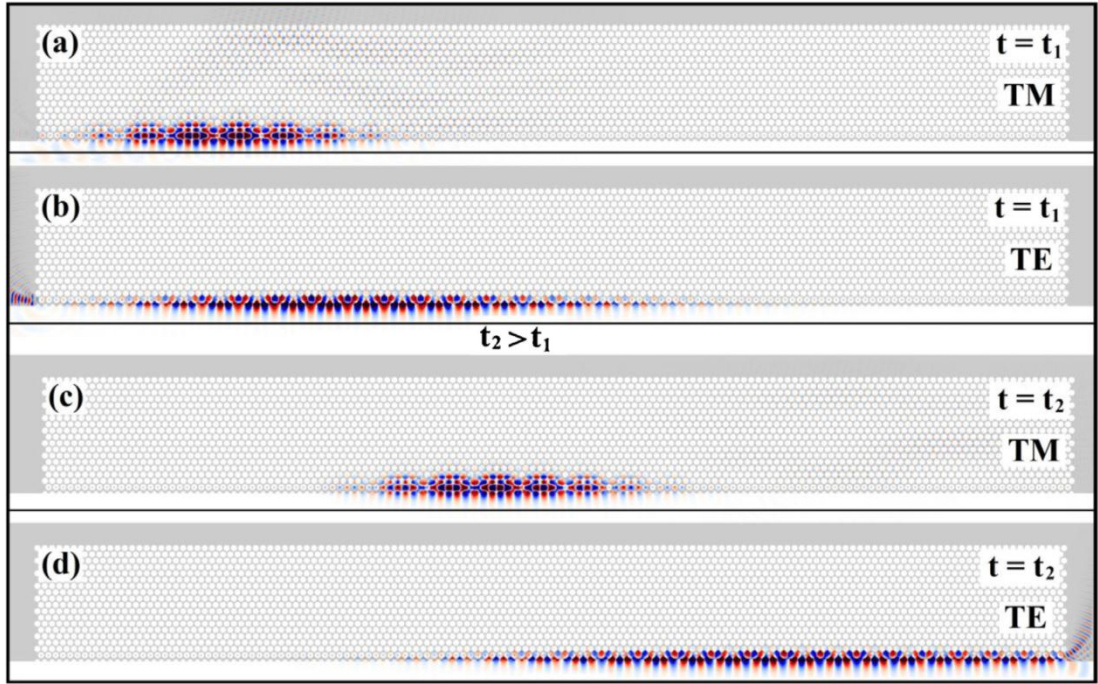
Her iki polarizasyonun alan profillerinin araştırılmasından sonra iki modun grup indislerinin (ya da grup hızlarının) araştırılması yapılmıştır. İki polarizasyonun dispersiyon diyagramlarından Şekil 2.7 hesaplanmıştır.



Şekil 2.7. Polarizasyondan bağımsız fotonik kristal yüzey modlu dalga kılavuzunun grup indisi dağılımları. Kare işaretli mavi çizgi TM polarizasyonu, çember işaretli pembe çizgi ise TE polarizasyonu göstermektedir.

Her iki TE ve TM mod ilgili frekans aralığında yaklaşık 10 değerinde grup indisine sahiptir. Bu çizimden çıkarılması gereken önemli sonuçlar vardır. İlk olarak TM polarizasyon TE ile karşılaştırıldığında daha sabit bir grup indisi profiline sahiptir. Sonuç olarak bu durum TM polarizasyonu TE'den daha az dispersiyonlu kılmaktadır. İkinci gözleme göre grup indisi değerleri birbirlerine yakın olmasına rağmen iki eğri belirli bir frekansta kesişmektedirler. Bu sonuç gösteriyor ki TE ve TM modları bu frekansta aynı hızda ilerlemektedirler. Son olarak yüksek frekans tarafında her iki

mod için de dispersiyonlu bölgeler mevcuttur. Bir sinyal bu yüksek frekans içeriğini taşıdığı zaman dalga kılavuzunda ilerlerken dağılabilmektedir. Her iki mod için sadece kılavuzlama önemli değil dispersiyonlu ve dispersiyonsuz mod ilerlemeleri de önemlidir. Bu yüzden iki polarizasyonun zamanın farklı anlarındaki görüntülerini göstermek için çeşitli analizler yapılarak Şekil 2.8 hazırlanmıştır.



Şekil 2.8. (a) TM için ve (b) TE için t_1 anındaki zaman alanı görüntüleri. Bir süre sonra t_2 anında (c) TM için ve (d) TE için görüntüler.

TM polarizasyona sahip optik sinyalin bozulmadan ilerlediği çok açık iken TE polarizasyon modun dispersiyon doğasından dolayı uzaya saçılmıştır. İki modu da uyarmak için merkez frekansı $a/\lambda = 0,3185$ olan aynı giriş kaynakları kullanılmıştır. Dikkat edilmelidir ki Şekil 2.6 ve Şekil 2.8 arasında alan dağılımları açısından iyi bir tutarlılık vardır. Benzer bir şekilde Şekil 2.7'den grup indisi spektrumu analiziyle modların dispersiyon doğası hakkında çıkarılan sonuç Şekil 2.8 tarafından da desteklenmiştir.

İletim karakteristiğine ek olarak hesaplamalarda kullanılan yapının iki boyutlu özelliğinin etkisi rapor edilmiştir. İki boyutlu analizler dalga kılavuzunun düzlem

dışına (üçüncü boyuta) çıkma karakteristiğini ihmal etmektedir. İki modun da ışık çizgisi altında bulunmasına rağmen (böylece düzlem dışı kayıplarının düşük olması gerekir) fotonik kristalin kısıtlı plaka kalınlığından dolayı başka değişmelerin olması mümkündür. Üç boyutlu analizin sonuçlarına hitap eden bir yol etkin ortam teorisidir. Bir sonraki bölümde böyle bir analiz yapılmış ve bazı önemli sonuçlar elde edilmiştir.

2. 4. İki Boyutlu Etkin Ortam Teorisinin Uygulanması

Üzerinde çalışılan yapıya (asimetrik katman tabakası, sırasıyla SiO₂ alt taş ve hava kılıfı tarafından alttan ve üstten kaplanmış) iki boyutlu etkin ortam teorisinin uygulanması için basit ve kullanışlı özelliklerinden dolayı doğrusal olmayan denklem metodu [33] kullanılmıştır.

$$k_1(\omega_{pcs}/c)h = m\pi + \tan^{-1} k_2 + \tan^{-1} k_3 \quad (\text{TE mod için}) \quad (2.1)$$

$$k_1(\omega_{pcs}/c)h = m\pi + \tan^{-1} [(n_{2D}^2/n_2^2)k_2] + \tan^{-1} [(n_{2D}^2/n_3^2)k_3] \quad (\text{TM mod için}) \quad (2.2)$$

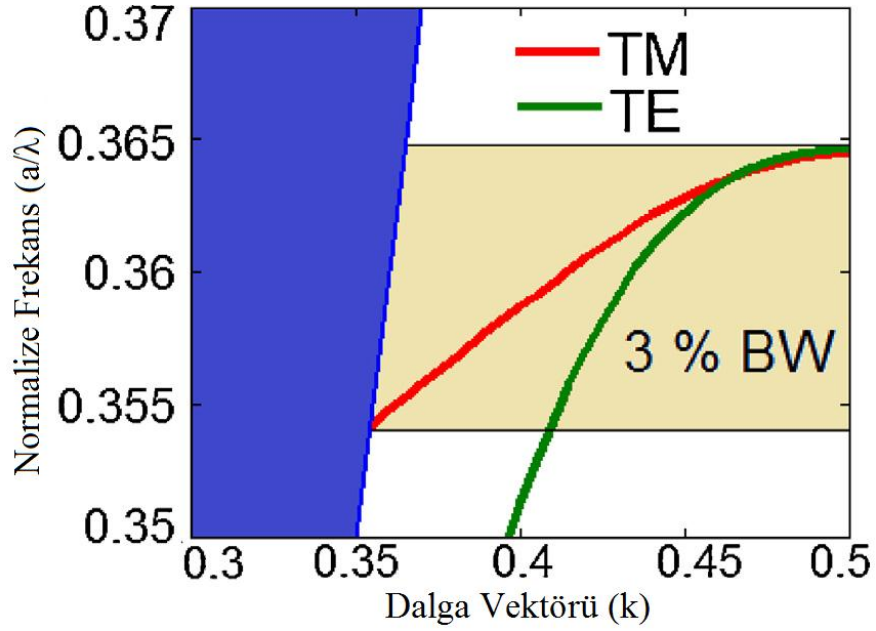
$$k_1 = \sqrt{n_{2D}^2 - n_{pcs}^2} \quad (2.3)$$

$$k_2 = \sqrt{(n_{pcs}^2 - n_2^2)/(n_{2D}^2 - n_{pcs}^2)} \quad (2.4)$$

$$k_3 = \sqrt{(n_{pcs}^2 - n_3^2)/(n_{2D}^2 - n_{pcs}^2)} \quad (2.5)$$

Referans [33] 'den alınan yukarıdaki denklemlere göre TE ve TM modlar üç boyutlu uygulamada aynı etkin indise (n_{pcs}) ve aynı açısız frekansa (ω_{pcs}) sahip olmaları durumunda farklı uzunluklara (h) sahip olmaları gerekmektedir. Tasarlanan polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzunun benzersiz yapısından dolayı yapının iç ve dış kısımları aynı h değerine sahip olmalıdırlar. Dahası aynı frekans aralığına sahip olmak için denklem 2.1 ve 2.2'de yer alan ω_{pcs} değerleri her iki TE ve TM mod için eşit olmak zorundadır. Bu yüzden değişken parametrenin denklem 2.3, 2.4 ve 2.5'te yer alan n_{pcs} olması gerekmektedir. Bu kısıtlamalar ile dalga kılavuzu yapısının yüksekliğinin $0,75a$ olması gerektiği bulunmuştur. Ayrıca alt taşın kırılma indisi (n_2) ve dış kılıfın kırılma indisi (n_3) sırasıyla 1,46 ve 1 seçilmelidir. Denklemden bulunan m parametresi mod sıra numarasını gösterir ve temel mod için bu değer sıfıra eşittir. Buna ek olarak iki boyutlu fotonik kristalin etkin indisini temsil eden n_{2D} değeri 3,46 olarak belirlenmiştir. Bütün bu değerler birinci denkleme yazıldığında TE ve TM modları için (n_{pcs})² değerleri sırasıyla 10,17 ve 8,887 şeklinde bulunur.

Fakat bu değişiklikler uygulandığı zaman TE ve TM modlar istenilen frekans aralığında örtüşmemektedirler. Bu iki modun frekans pencerelerini örtüştürmek için fotonik kristal yapısında bazı ek değişiklikler yapılmıştır. Öncelikle yapının yüzeyinde yer alan deliklerin çapları istenilen örtüşme durumu sağlanana kadar ayarlanmıştır. Bu yüzden bu deliklerin çapı $0,80a$ 'dan $0,90a$ 'ya ayarlanmıştır. Ayrıca yüzey çubuklarının çapları $0,30a$ 'dan $0,34a$ 'ya değiştirilmiştir. Aynı zamanda arka plan hava deliklerinin büyüklükleri ve yüzey oluk delikleri değiştirilmemiştir. Bu değişiklikleri yaptıktan sonra dispersiyon diyagramları hesaplanmış ve Şekil 2.9 hazırlanmıştır.



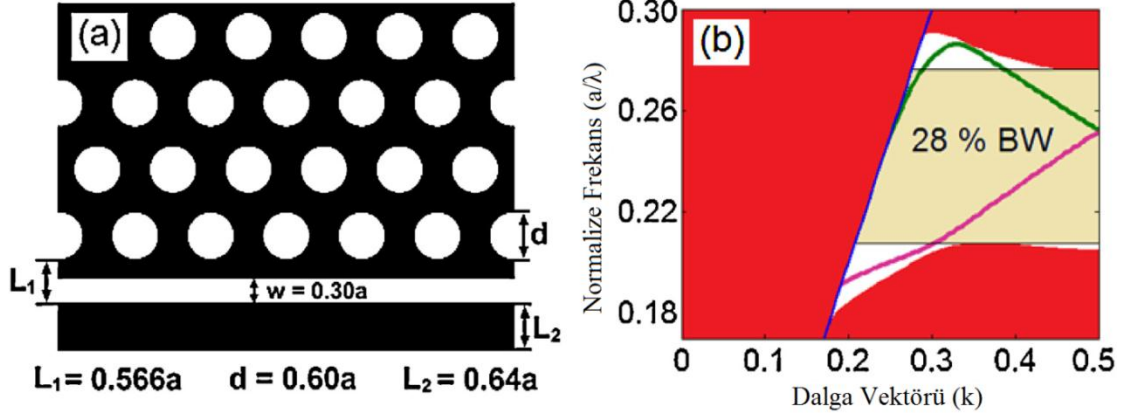
Şekil 2.9. İki boyutlu etkin ortam teorisinin uygulanmasından sonra polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı.

Şekil 2.9'da da görüldüğü üzere TE ve TM modlar ortak bir frekans alanına sahip olmakta fakat polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzunun bant genişliği %4,60'tan %3,0'a düşmektedir. Dahası öncekine göre örtüşülen frekans aralığı daha yüksek bir frekans bölgesine kaymaktadır. Dikkat edilmelidir ki bant genişliğindeki azalma levhanın boyunun optimize edilmesiyle de ayarlanabilir [34]. Bilindiği üzere fotonik kristal levha yapıları TE ve TM modlar için farklı yüksekliklerde optimum bant boşluğu sağlarlar. Önceki yapı nispeten ince levhaya gereksinim duyarken sonraki yapı daha geniş bant boşluğu bölgesi sağlamak için genellikle kalın levhaya sahiptir.

2. 5. Tek Polarizasyon İçin Geniş Bantlı Yüzey Mod Dalga Kılavuzu Tasarımı

Çalışmanın önceki bölümlerinde her iki polarizasyon için sağlanan dalga kılavuzu yapısı üzerinde durulmuştur. Eğer tek tip bir polarizasyon varsa bu dalgayı geniş bir bantta yönlendirmek kritik bir öneme sahiptir. Bu yüzden fotonik kristal dalga kılavuzları hakkındaki çalışmaların çoğunda geniş bir bantta tek mod elde etmek için birçok yöntem mevcuttur [35, 36]. Bu çalışmada Şekil 2.10a'da gösterilen fotonik

kristalin yüzeyi boyunca yerleştirilen hava yarığında oluşan bir fotonik yapı üzerinde çalışılmıştır.



Şekil 2.10. (a) TE polarizasyon için geniş bantlı yüzey modlu dalga kılavuzunun şematik gösterimi. (b) Tasarlanan dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı.

Bu hava yarığının genişliği $0,30a$ 'ya sabitlenmiş ve konumu Şekil 10a'da gösterilmiştir. Buna ek olarak arka plandaki hava delikleri $0,60a$ değerinde çapa ve üçgensel örgü dağılımına sahiptirler. Dielektrik ortam 12 değerinde geçirgenliğe sahip tek bir malzemedendir. Işık dalgası yapının yüzeyi boyunca yüzey modunun eşliğinde ilerlemektedir. Şekil 2.10b'de dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı verilmektedir. Şekil 2.10b'de de görüleceği üzere yüzey modlu dalga kılavuzunun bant genişliği %28 ve en önemlisi yüzey modu ışık çizgisinin altında bulunan frekans aralığını kapsamaktadır.

Belirtildiği üzere yüzey modu iki banda sahip ama eğimleri neredeyse aynı ve sabittir. Ters eğimlere sahip iki eğri arasında bir boşluk bulunmamaktadır. Bu yüzden bu durumlar tasarlanan dalga kılavuzunu tek modlu yapmaktadır. Ayrıca yüzey modu yapının tüm bant boşluğunu kapsayan geniş bir frekans aralığını tutmakta ve bu frekans aralığında grup hızı neredeyse sabit olmaktadır. Değişken olmayan grup indisi profilinden dolayı ışık dalgası yüzey boyunca sabit grup hızıyla ve bozulmadan ilerlemektedir. Yapısal parametrelerin değiştirilmesi eninde sonunda geniş bir frekans aralığını kapsayan uygun bir mod üretmektedir. Arka plandaki hava

deliklerinin yarıçapları arttırıldığında dalga kılavuzunun bant genişliği %38'e ulaşmakta ama dalga kılavuzunun gurup indisi artık sabit bir davranış sergilememektedir. Bu yüzden tasarım parametrelerinin istenilen özellikler için optimum değerler olduğu sonucuna varılmıştır.

2. 6. Sonuç

Bu çalışmada fotonik kristallerin optik yüzey modu kullanılarak polarizasyondan bağımsız ya da ikili polarizasyonlu dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzlarının tasarımında ilk kez yüzey modları kullanılmıştır. Bildirilen %4,60'lık bant genişliği literatürle karşılaştırılabilecek seviyededir ve yüzey delikleri ile iç çubukların boyutları değiştirilerek yapılacak olan bir optimizasyon süreci ile daha da arttırılabilir. Yüzey modlarının iletim karakteristiği ve dispersiyon düzenlemesi yapılmıştır. İki modun neredeyse aynı kırılma indisi değerine sahip olması dikkat çekici bir özellik olmuştur. Fakat farklı alan dağılımlarına ve farklı dispersiyon karakteristiğine sahip oldukları görülmüştür. Buna ek olarak TE mod yüzeyde güçlü bir tutunmaya sahipken TM mod için bu durum zayıf kalmıştır. Ayrıca iki boyutlu etkin ortam teorisinin uygulanması ve sonuçları gösterilmiştir. Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzuna ek olarak geniş bantlı TE mod bir dalga kılavuzu daha tasarlanmıştır. Yapının geometrik parametreleri ve dispersiyon diyagramları yapının geniş bir bant genişliğine sahip olduğunu göstermek için verilmiştir. Bu iki tip dalga kılavuzları fotonik entegre devre uygulamalarının bir parçası olabilir.

3. OPTİK YÜZEY MODLARININ KULLANILMASIYLA ELDE EDİLEN FOTONİK KRİSTAL BİYOSENSÖR KONFIGÜRASYONLARI[†]

3. 1. Giriş

Bir optik biyosensörün çalışma prensibi algılanması istenen hedef malzeme ile ışık dalgasının etkileşimine dayanmaktadır. Işık dalgası biyomoleküller, kimyasal maddeler veya gaz molekülleri gibi hedef malzemeler ile karşılaştığında rezonatörün rezonans frekansı ya da dalga kılavuzu sisteminin iletim frekans aralığı malzemenin kırılma indisinin değişiminden dolayı kaymaktadır. Farklı algılama mekanizmalarını kullanan biyokimyasal sensörlerin birçok değişik versiyonu bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı yeni bir fotonik kristal tabanlı sensör önermek ve araştırmaktır. Fotonik kristallerle biyosensör tasarımı düşüncesi araştırmacılar için büyük bir ilgi uyandırmıştır [37-49]. Fotonik kristaller ışık dalgalarını ilerleten ve güçlü bir ışık madde etkileşimi için ortam sağlayan periyodik dielektrik yapılardır [2]. Güçlü alan hapsi fotonik bant aralığında yer alan mesela dispersiyon diyagramlarındaki yasaklı frekans aralığındaki optik modlara karşılık gelmektedir. Bu özellik küçük miktarlardaki numunelerin algılanması amacıyla kullanılabilir [40, 46, 47, 49]. Fotonik kristallerin biyosensör uygulaması açısından bir diğer önemli özelliği bu yapıların kompakt olmalarından gelmektedir. Işık maddeyle güçlü bir etkileşime girdiğinde, malzemenin kırılma indisindeki herhangi bir değişiklik hem yansıyan hem de iletilen ışığın optik güç spektrumunun gözlenmesiyle izlenebilmektedir.

Fotonik bant aralığındaki frekans içeriğine sahip gelen ışık dalgaları fotonik kristaller tarafından tümüyle yansıtılmaktadır. Bir doğru boyunca belli bir tür bozulma olduğunda fotonik bant boşluğundaki frekanslara sahip olan ışık dalgaları bu tanımlanan dalga kılavuzu yolunu takip ederek ilerleyebilmektedir. Işık dalgasını hapsetmek için kullanılabilen ve kavite olarak adlandırılan bir noktasal bozulma çeşidi de mevcuttur. Kavite konfigürasyonuna sahip fotonik kristal tabanlı sensörler pik rezonans dalga boyu kaymasına bakılarak değerlendirilirler. Kavitenin yüksek

[†]Kurt, H., Erim, M.N., Erim, N., Various photonic crystal biosensor configurations based on optical surface modes, Sensors and Actuators B: Chemical 165, 68–75, 2012.

kalite faktörü değerlerinden dolayı yüksek hassasiyetli biyosensörler elde edilebilmektedir [50, 51]. Öte yandan dalga kılavuzu konfigurasyonu ile iletim penceresinin kesim bant kenarı hareketini gözlemlemek mümkündür [37, 38, 42]. Özet olarak biyolojik algılama amacıyla fotonik kristallerin yaygın olan iki araştırma alanı kavite ve dalga kılavuzu konfigurasyonlarıdır.

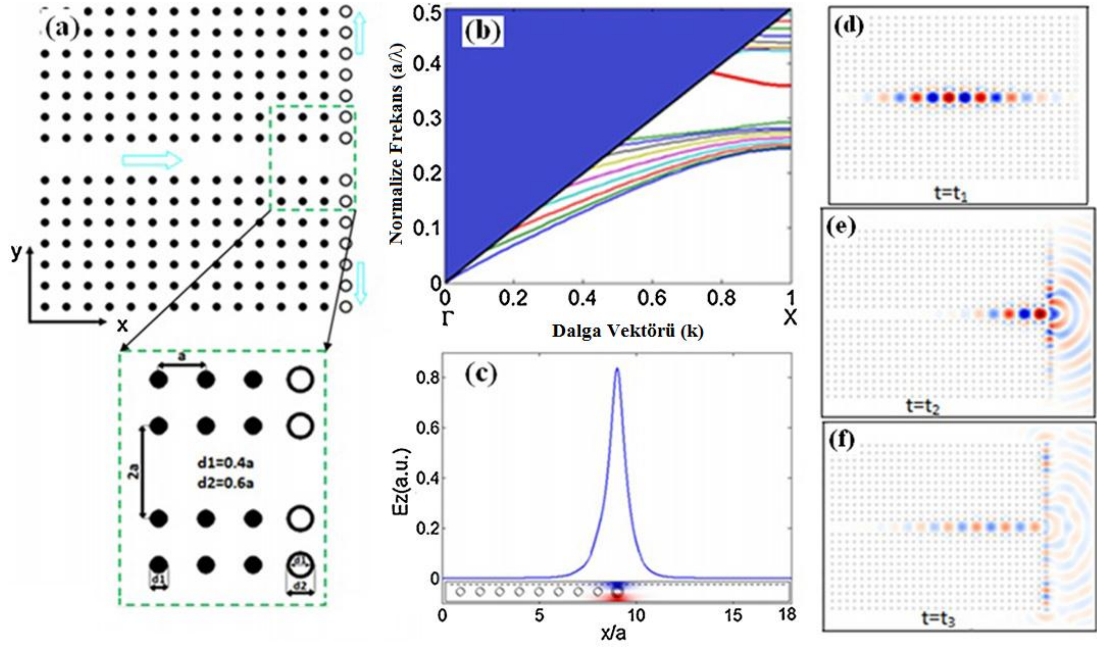
Fotonik kristaller ayrıca yüzey boyunca yerleştirilen bazı bozulmalar tarafından meydana gelen yüzey modlarını da desteklemektedir [2, 13, 14, 17, 52]. Bu modlar fotonik kristal ve hava gibi homojen ortam arasındaki ara yüzeye hapsedilmiş ilerleyen elektromanyetik dalgalarıdır. Bu çalışmada yüzey modlarının biyosensör uygulaması üzerinde durulmakta ve optik yüzey dalgaları tabanlı iki boyutlu fotonik kristallerin büyük potansiyelini gösterme amacı taşınmaktadır. Ölçüm kriteri çıkış gücünün nispeten geniş rezonans dalga boyundaki pik kaymalarına dayanmaktadır. Algılama ortamı havadan bazı sıvı türlerine değiştiği zaman kırılma indisi değişimi enjekte edilen maddenin türüne bağlı olmaktadır. Kırılma indisi değişimi için araştırılan aralık 1,3'ten 1,80'e doğru alınmıştır.

Eğer bu çalışma ile öncekiler arasında bir karşılaştırma yapılırsa şimdiki yöntemin bazı avantajları sıralanabilir. Yüzey modlu biyosensör, numunenin küçük deliklere veya hava yarığı bölgesine enjekte edilmesi şeklinde daha az algılama alanına gereksinim duymaktadır. Diğer yöntemlerin bazıları kırılma indisi değişimlerine doğrusal olmayan bir bağımlılık göstermeye başlamaktadır. Ama bu çalışmadaki hassasiyet geniş, doğrusal ve dinamik bir davranış göstermektedir. Sonuç olarak geniş bir aralıkta farklı sıvıların algılanması mümkündür. Sunulan sensör farklı sıvı enjekteleri olduğu zaman iletilen ışığın dalga boyundaki kaymanın gözlemlenmesiyle çalışmaktadır. Delinmiş çubukların içindeki sıvının varlığı algılanabilir dalga boyu değişimiyle sonuçlanmaktadır. Elektromanyetik dalganın işleme derinliği sönümlenen dalga sensörlerinin hassasiyetini belirlemede önemli bir rol oynar. Sönümlenen dalga yerine bu çalışmada direkt ışık-madde etkileşimi kullanılmıştır. Son olarak bu çalışma aynı anda benzer iki algılama dalga kılavuzu kollarına ayrılmaktadır. İlerde bu kolların miktarı kolayca ikiden daha fazla olarak arttırılabilir.

İki farklı fotonik kristal yapısı için rapor edilmiş en yüksek hassasiyet değerleri kare ve üçgen örgü için sırasıyla 93 ve 396 nm/RIU olarak bulunmuştur. Hassasiyet değeri açısından sunulan sensörün literatürle performans karşılaştırılmasının sağlanması yararlı olacaktır. Referans [45]'de nano yarıklı fotonik kristal kavite konfigürasyonu ile 410 nm/RIU değeri hassasiyet olarak rapor edilmiştir. Benzer bir şekilde referans [46]'de kırılma indisi hassasiyeti değeri 200 nm/RIU olarak gösterilmektedir. Dahası referans [47]'de RIU hassasiyet başarımı 1500 nm/RIU olarak verilmektedir. Orta seviyede değerler [48, 49] numaralı referanslarda sırasıyla 90 ve 100 nm/RIU olarak ifade edilmektedir. Bütün bu önceki çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda daha yüksek RIU hassasiyet değerleri rezonatör tipi yapıların kalite faktörleriyle orantılı olduğunun vurgulanması gerekmektedir. Daha düşük RIU değerleri genellikle hem düşük kalite faktörlü hem de dalga kılavuz tipi konfigürasyonlar ile ilişkilidir. Bu açıdan bu çalışmada rapor edilen yüzey modlu sensörün hassasiyet değerleri literatürdeki önceki çalışmalarla karşılaştırılabilecek seviyede olduğu anlaşılmaktadır.

3. 2. Yüzey Modlu Fotonik Kristal Biyosensör Tasarımı

Kare örgü yapısına sahip fotonik kristal biyosensörün tasarlanan ilk türünün yapısal parametrelerini anlatmak için Şekil 3.1a hazırlanmıştır. Çizimden de görülebileceği üzere yapı kırılma indisi 3,46 olan dielektrik çubuklardan ve hava arka planından oluşmaktadır. Çubuklar kare örgülü bir şekilde periyodik olarak dağıtılmış ve bu periyodikliğin örgü sabiti a olarak verilmiştir. Bu değer 500 nm'ye sabitlenmiş ve çubuğun çapı ise 200 nm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3. 1. (a) Yüzey modlu fotonik kristal biyosensörün şematik görüntüsü verilmiştir. Yatay ok dalga kılavuzu modunun ilerleme doğrultusunu göstermekte ve dikey oklar ise yüzey modunu temsil etmektedir. (b) Yüzey moduna karşılık gelen dispersiyon diyagramı sunulmaktadır. (c) Kesikli çizgi boyunca var olan elektrik alan dağılımı gösterilmektedir. Süper hücre şeklinin altına yerleştirilmiştir. (d)-(f) Üç farklı zaman anlarında giriş sinyalinin zaman alanındaki görüntüleri verilmektedir ($t_1 < t_2 < t_3$).

Fotonik kristalin periyodikliği ilk olarak ΓX doğrultusunda bir çizgi kusuru tanımlanarak bozulmuştur. Bu şekilde bir yapısal bozukluğun sonucu fotonik bant boşluğu etkisiyle sınırlanmış bir dalga kılavuzu modunun ortaya çıkmasıdır. Bu boşluktaki frekansa sahip bir ışık dalgası dalga kılavuzu boyunca kolayca ilerleyebilmektedir. Bu standart dalga kılavuzu algılama bölgesine giriş sinyalini ulaştırmak için uygulanmıştır.

Eğer yüzeyde belli bir türde bozukluk tanımlanırsa yüzey mod fotonik kristal ve hava ara yüzeyi boyunca oluşturulabilmektedir. Biyokimyasal sensör uygulaması dikkate alınarak yüzey boyunca sıralanmış olan çubuklar önce genişletilip ardından perfore edilmiştir. Bu yüzden halka şeklinde ve iç ve dış çapları sırasıyla $d_1 = 200$ nm ve $d_2 = 300$ nm olan bir yapı oluşturulmuştur. Bu modifiye edilmiş çubukların yüzey modunu desteklemesi beklenmekte ve ışık dalgası bu ara yüzeye uygun frekansla

geldiğinde elektrik alanın yüzeye güçlü bir şekilde bağlanması gerekmektedir. Fotonik yapının dispersiyon diyagramı düzlemsel dalga açılımı metoduyla (PWE) elde edilmiştir [7]. Şekil 3.1b 'de sonuçlar gösterilmiştir ve fotonik bant boşluğu bölgesinde yer alan kalın ve düz çizgi yüzey modunu temsil etmektedir. Buna göre yüzeydeki mod tek modlu ve sürekli hava ile dielektrik bantlarından çok iyi izole edilmiştir. Bu durum ara yüzeyde güçlü bir alan konsantrasyonunun varlığı göstermektedir. Bu şekilde görünen ışık çizgisi üstünde kalan alan boyanmıştır.

Ara yüzeyin her iki tarafında bulunan ilgili modun elektrik alan dağılımı Şekil 3.1c 'de gösterilmektedir. Bu mod pik değerini perfore edilmiş çubukların merkezlerinde almaktadır. Şekilde sönümlenerek azalan bir davranış görülmektedir. Üstelik x yönünde her iki doğrultuda sönümlenerek azalmasına rağmen azalma oranları fotonik kristal ve homojen hava ortamı gibi tamamen iki farklı ortam nedeniyle birbirlerinden farklıdır. Yüzey modlu biyosensörün zaman karakterizasyonu zaman alanı analiziyle sonraki bölümde sunulacaktır.

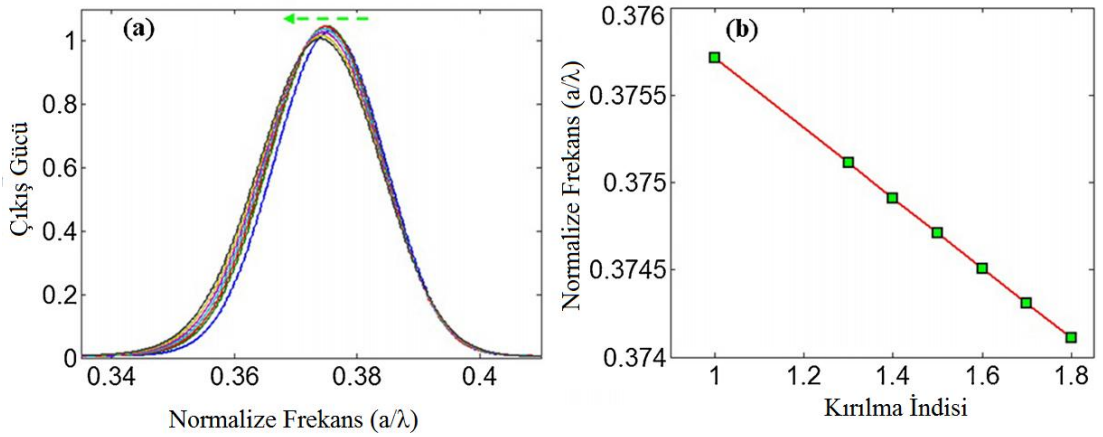
3. 3. Yüzey Modlu Optik Biyosensörün Algılama Mekanizması

Zaman alanı analizi iki boyutlu sonlu-fark zaman-alanı (FDTD) metoduyla yapılmıştır [8]. Hesaplama alanı sınırlardan geri yansımaya önlemek için mükemmel eşleşmiş katmanlarla sınırlanmıştır. FDTD'nin uzaysal çözünürlüğü 30 değerine ayarlanmıştır. Farklı kırılma indisleriyle doldurulmuş olan dalga kılavuzlarının iletim spektrumu ölçülmüştür.

Yüzey modunu uyarmak için yüzey modunun frekans aralığını kapsayan bir bant genişliğine sahip Gauss profilli sinyal kullanılmıştır. Fotonik kristal dalga kılavuzunun girişinde yer alan kaynak kare örgülü yapılarda bant boşluğunun sadece TM polarizasyona sahip kaynak için oluşmasından dolayı TM polarizasyona sahiptir. TM polarizasyonun elektromanyetik alan bileşenleri H_x , H_y ve E_z şeklindedir. Işık dalgası standart dalga kılavuzu boyunca ilerlemekte ve sona ulaştığında iki parçaya ayrılmıştır. Şekil 3.1d-f'de farklı yerlerdeki optik sinyallerin seçilmiş üç tane

durumunun zaman alanı görüntüleri verilmektedir. Bu üç farklı durum dalga kılavuzu içinde, köşe çevresinde ve fotonik kristalin yüzeyi boyunca şeklinde sıralanabilir.

Bu görüntülerden anlaşılıyor ki ışık fotonik kristal dalga kılavuzu ve fotonik kristal-hava ara yüzeyi boyunca hapsolmaktadır. Yüzey modunun uyarılması dalga kılavuzunun kavşak bölgesinden kaynaklanan geri yansımalar olmasına rağmen verimli olmaktadır. Işığın birazı da ileri yöne doğru yayılmaktadır. Daha verimli yüzey modu uyarımı başarılabilir ama bu durum şu anki çalışmanın amaçları dışında tutulmuştur. Yüzey moda bağlanan ve yüzeyin sonuna ulaşan sinyal gücünün görüntülenmesi için ölçüm noktası perfore edilmiş yüzey çubuklarının dışına yerleştirilmiştir. Başlangıçta yapının çıkış gücü deliklerin kırılma indisi 1 değerine eşitlenmesi ve bunun referans olarak kabul edilmesiyle çizilmiştir. Sinyalin merkez pik değeri $\omega a/2\pi c = 0,3757$ değerine eşitlenmiştir. Kırılma indisi 1 'den 1,3 değerine yükseltildiğinde rezonans frekans 0,37512 değerine kaymaktadır. Sonraki durumda kırılma indisi 1,8 'e doğru 0,1 aralıklarla arttırılarak rezonans frekans kaymaları gözlemlenmiştir. Referans durum dâhil olmak üzere tüm sinyaller Şekil 3.2a 'da gösterilmektedir.



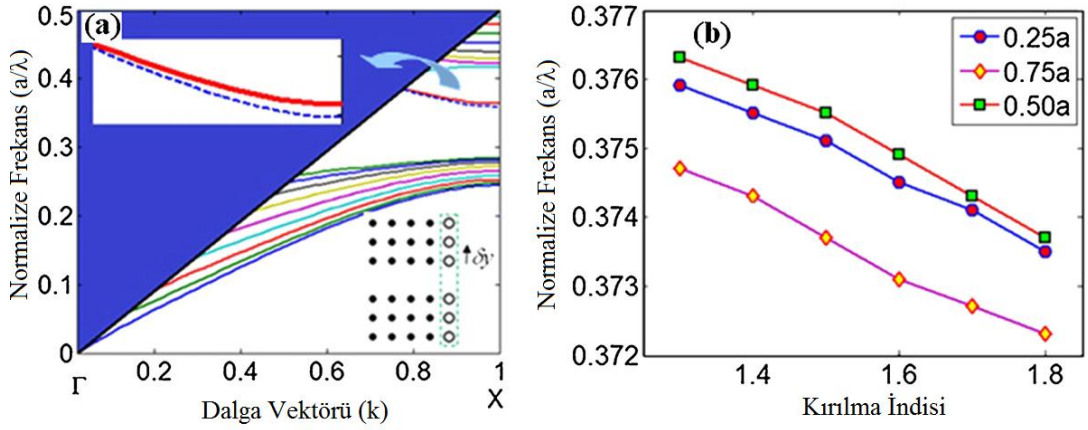
Şekil 3. 2. (a) Referans durumu (hava, $n=1,0$) da içeren sinyallerin hepsi rezonans pik kaymalarının gözlemlenebilmesi için sunulmuştur. (b) Normalize frekansa karşılık kırılma indisi değişimi gösterilmektedir.

Bu şekilden de görülebileceği üzere bütün sinyaller kırılma indisini artmasıyla kendi rezonans frekanslarına göre daha düşük frekanslara doğru belirli bir kaymaya sahiptirler. Şekil 3.2b bu durumu özetlemektedir. Sinyalin rezonans kayması ile kırılma indisi değişimi arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.

Tasarlanan yüzey modlu sensörün performansını yargılamak adına uygun bir karşılaştırma kriteri belirlemek kullanışlı olabilmektedir. Bu yüzden karşılaştırma kriteri olarak $(\Delta\lambda/\Delta n)$ belirlenmiştir. Buradaki $\Delta\lambda$ ve Δn sırasıyla dalga boyu ve kırılma indisi değişimlerini temsil etmektedir. Şekil 3.2b 'den elde edilen karşılaştırma kriteri değeri 7,957 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Buradaki RIU kırılma indisi standart birimidir. Belirtilmelidir ki bu değer kavite ve fotonik kristal dalga kılavuzu gibi diğer konfigürasyonların kullanıldığı biyosensörlerin hassasiyetlerinden daha düşük olabilir. Fakat bu beklenen bir durumdur çünkü burada rezonans konfigürasyonda herhangi bir yapı kullanılmamıştır. Öte yandan farklı yollarla şu anki sensörün hassasiyeti arttırılabilir. Örneğin perfore edilmiş çubukların yarıçapları d_1 ve d_2 optimize edilebilir ya da yapının yüzeyine kaviteler yerleştirilebilir. Sonuç olarak daha yüksek hassasiyet değerlerinin bulunması beklenebilir.

3. 4. Yüzey Modlu Biyosensörün Hassasiyetinin Arttırılması

Halka şeklindeki çubuklar üç adımda uzunlamasına kaydırılmıştır. Şekil 3.3a 'da verilen küçük resimde bu kayma miktarları δy ile gösterilmiş ve $0,25a$, $0,50a$ ve $0,75a$ değerlerine eşittir.

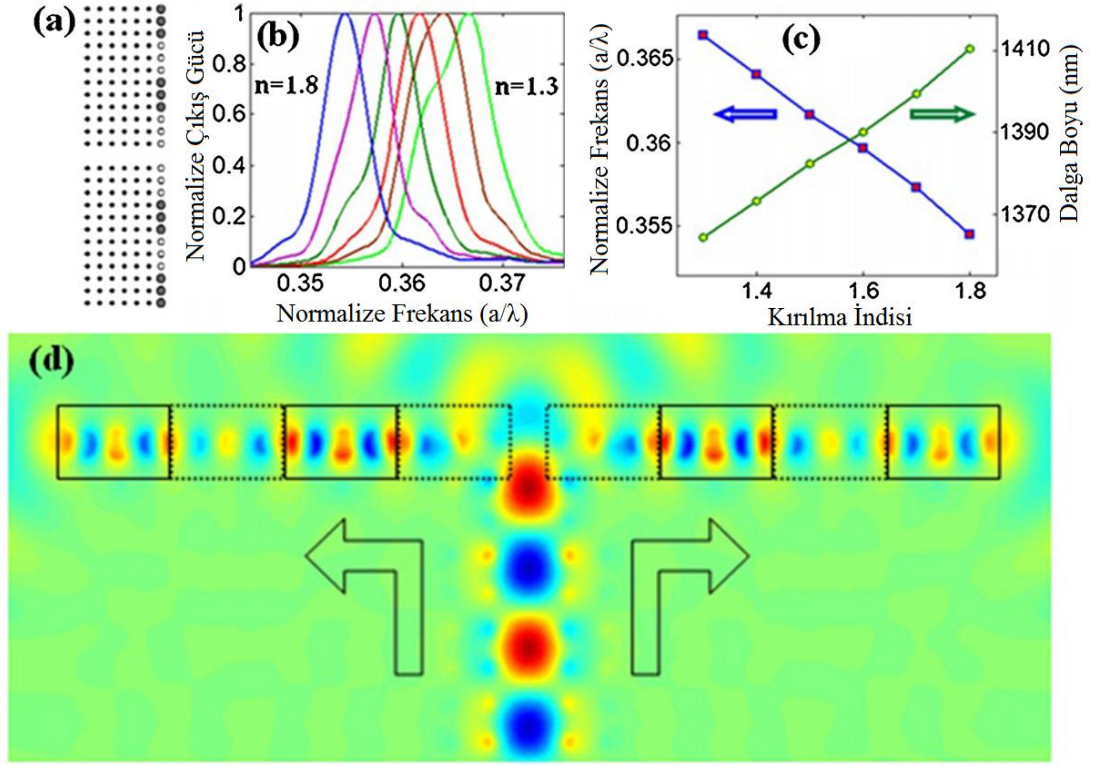


Şekil 3. 3. (a) Halka çubukların $0,50a$ değeri kadar kaydırılmasıyla oluşturulmuş yapının dispersiyon diyagramı gösterilmiştir. Üstte yer alan kutucuk yeni yüzey modunun (Düz çizgi) orijinal mod (Kesikli çizgi) ile birlikte yakından gösterimidir. Alt tarafta yer alan kutucuk ise hava-fotonik kristal ara yüzeyinde yer alan çubukların kaymalarını belirtmektedir. (b) Üç farklı kayma değerleri ($0,25a$, $0,50a$, $0,75a$) için normalize frekansın kırılma indisine göre grafiği gösterilmiştir.

Dispersiyon diyagramı y doğrultusu boyunca uzanan yüzey çubuklarının pozisyon değişikliğinden etkilenmiştir. Sonuç olarak kırılma indisi değişimine yüzey modunun verdiği cevap da değişmiştir. En üstteki resimde yer alan iki yüzey modu (düz ve kesikli çizgi) sırasıyla $0,50a$ ve $0a$ 'lık kaymalara karşılık gelmektedir. Şekil 3.3b 'de normalize edilmiş frekansın kırılma indisine göre grafiğinin güncellenmiş versiyonu bulunmaktadır. Yeni hassasiyetler bu grafiğe bakılarak hesaplanabilir ve bu eğrilerin eğimlerinin ilk tasarımdakine göre iki veya üç kat kadar daha iyi olduğu görülebilir. Burada elde edilen bulgular kare örgü yapısına sahip fotonik kristal için hassasiyet değerinin artırılabilir olması savını desteklemektedir.

Burada sensör hassasiyetinin daha fazla yükseltilmesi için gerekli olan prosedürlerin bazıları kısaca beyan edilmekte ve diğer birçok durumlar arasında bulunan belirli bir konfigürasyon için en yüksek hassasiyet değeri sunulmaktadır. İlk olarak perfore edilmiş çubuklar belli bir miktarda x eksenini boyunca da kaydırılabilir. Buna ek olarak y eksenini boyunca halka şeklindeki çubuklar tekrar yerleştirilebilir. Bunun sonucunda x ve y eksenindeki konumlar aynı anda değiştirilebilir. Alternatif olarak yapının yüzeyindeki çubukların yer değiştirmesi ya da genişletilmesiyle kavite etkisi

oluşturulabilir. Bu prosedürlerin detayları atlanmış ve ileriki bölümlerde sunulmuştur. Kare örgü yapısına sahip fotonik kristalin bulunan en yüksek hassasiyet değeri için Şekil 3.4a'da gösterilen düşük kalite faktörlü kavite tipi bir konfigürasyon eklenmiştir.



Şekil 3. 4. (a) Fotonik kristal sensörün uç kısımları gösterilmektedir. (b) En iyi durum için çıkış gücünün normalize frekans değişimine göre grafiği verilmiştir. (c) Normalize frekans ve dalga boyunun kırılma indisine göre grafiği sunulmuştur. (d) Yüzeysel dalgalarının numune ile etkileşimi kutucuklar içerisinde gösterilmiştir.

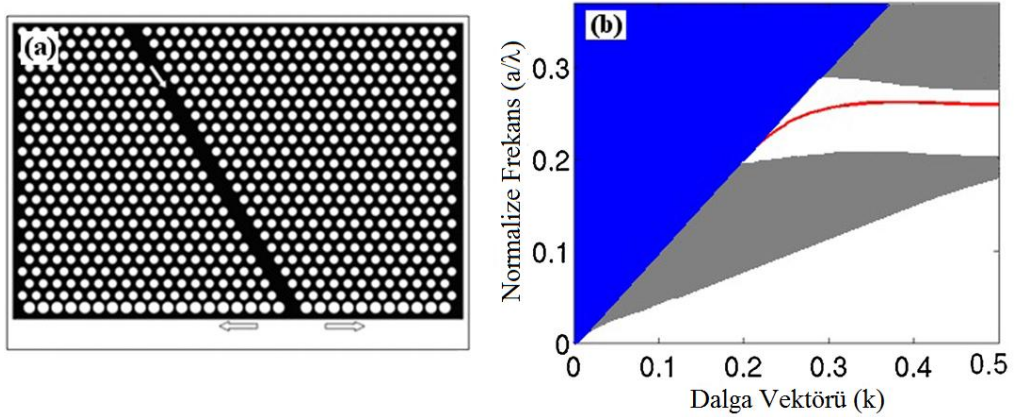
Daha geniş çubukların iç ve dış yarıçapları sırasıyla 0,30a ve 0,40a olarak belirlenmiştir. Şekilde gösterilen fotonik kristalin algılama bölgesinde yer alan gri bölgeler sıvı ile doldurulmuş deliklere karşılık gelmektedir. Kırılma indislerinin değişiminden sonraki güç spektrumunda oluşan kayma Şekil 3.4b 'de gösterilmektedir. Bu durumda elde edilen hassasiyet değeri öncekilere göre daha yüksek bulunmuş ve Şekil 3.4c'den yaklaşık olarak 93 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.4d'de fotonik kristal-hava ara yüzeyi boyunca yüzey

dalgasının hapsolması ve ilerlemesi 1,5 değerinde kırılma indisine sahip numuneyle doldurularak gösterilmiştir. Kutucukların içinde yer alan ve numune içeren bölgelerdeki elektrik alan komşu yerlerdekine göre daha yüksektir. Son olarak tasarımdaki iki aynı algılama kolları görünmektedir.

3. 5. Üçgensel Örgülü Fotonik Kristal Tabanlı Yüzey Mod Biyosensör

Kare örgü yapıları fotonik kristalin karşı konfigürasyonu üçgensel örgülü yapıdır. Çalışmanın bu bölümünde bu tipteki fotonik kristalin yüzey modu özellikleri incelenmiş ve daha yüksek hassasiyetler elde edilmiştir. Yapısal değişime ek olarak polarizasyonun TM 'den TE 'ye dönüştürülmesi gerekmektedir. TE polarizasyon bileşenleri E_x , E_y ve H_z şeklindedir. TM polarizasyondan TE polarizasyona geçme sebebi üçgensel yapının fotonik bant boşluğunun TE polarizasyon için elde edilebilmesidir [2].

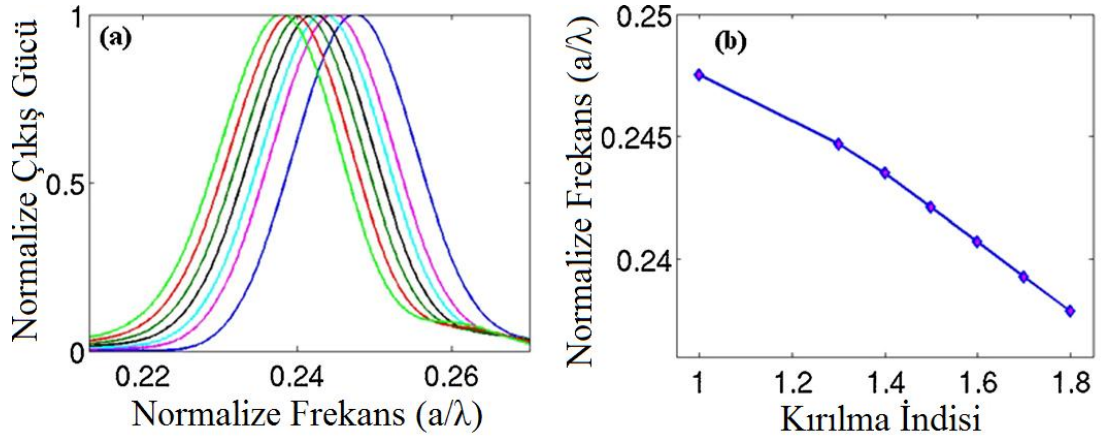
Yapının şematik görünümü Şekil 3.5'te verilmektedir. Hava deliklerinin yarıçapları $0,30a$ olarak alınmıştır. Yüzey modu yüzey boyunca uzanan deliklerin yarıçaplarının $0,40a$ olarak seçilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 3. 5. (a) Üçgensel örgü yapısına sahip yüzey modlu fotonik kristal biyosensör yapısı gösterilmiştir. (b) Üçgensel örgülü fotonik kristalin yüzeyinde oluşturulan yüzey modunun dispersiyon diyagramı verilmiştir.

İlk olarak W1-tip dalga kılavuzu FK doğrultusu boyunca hava deliklerinin kaldırılmasıyla oluşturulmuştur. Üst taraftaki ok yüzey modlarının uyarım mekanizmasını temsil etmektedir. Daha sonra iki aynı kola ayrılmaktadır. Yatay oklar zıt yönde ilerleyen uyarılmış yüzey modlarını göstermektedir. Uyarılmış yüzey modunun hassasiyeti yüzey boyunca ilerleyen modların zaman alanı davranışını görüntülenmesiyle hesaplanmaktadır.

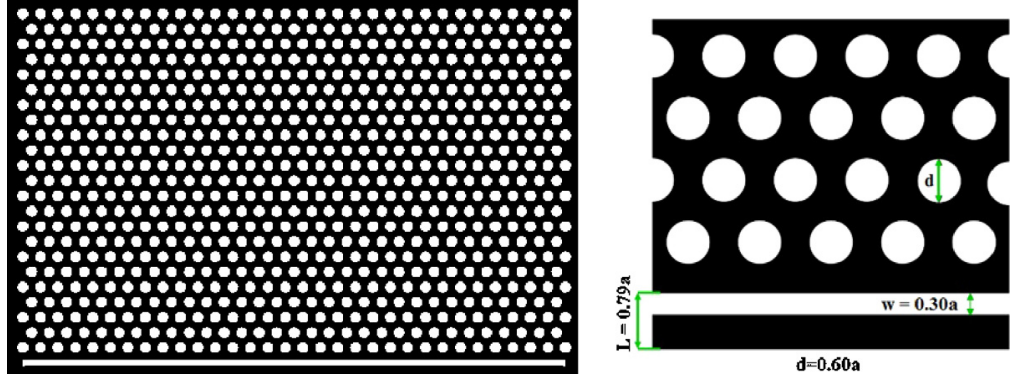
Yeni fotonik yapının optik yüzey modları benzer olarak PWE metodu kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 3.5b'de gösterilmektedir. Dispersiyon diyagramından görüleceği üzere fotonik bant boşluğu bölgesi tarafından çevrelenmiş ve yasaklı bant aralığında tek bir yüzey modu oluşmuştur. Önceden belirlenen değerlendirme kriterini (hassasiyet) belirlemek için kırılma indisindeki değişimler sonucu çıkış gücü spektrumundaki değişimler araştırılmış ve Şekil 3.6a 'da verilmiştir. Şekil 3.6b 'de bulunan eğrinin eğimi 117 nm/RIU olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. 6. (a) Kırılma indisi değişmelerine göre elde edilen normalize çıkış gücünü gösteren grafik sunulmuştur. (b) Normalize frekansın kırılma indisine göre grafiği gösterilmiştir.

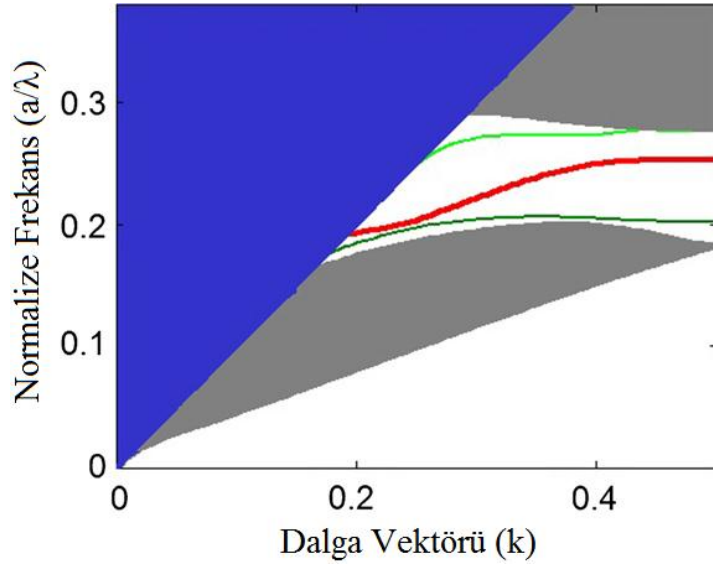
Üçgensel örgülü yüzey mod sensörün bir diğer çeşidi hava delikleri yerine yüzey boyunca hava yarığı eklenmesiyle oluşturulabilir. Oluşturulan bu yapının şematik görünümü Şekil 3.7'deki gibidir. Yüzey modu yüzeye bir hava yarığı eklenmesiyle oluşturulmuştur. Yarığın genişliği $w = 0,30a$ olarak belirlenmiştir. Kaynağın yeri

değiştirilerek hava yarığının başlangıcına yerleştirilmiştir. Işık dalga yüzey boyunca ilerlemekte ve yüzeyin bitimine ulaşmaktadır.

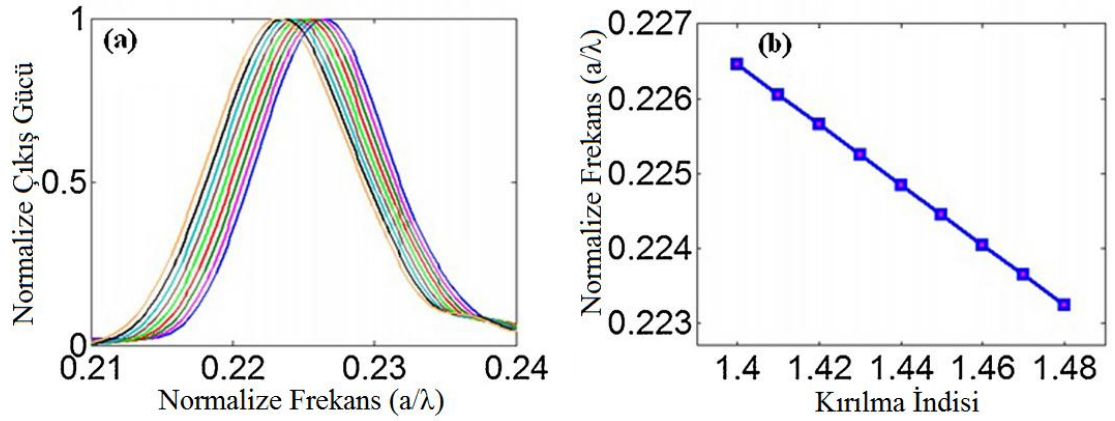


Şekil 3. 7. Üçgenel örgülü hava yarıklı yüzey modlu fotonik kristal sensör yapısı gösterilmektedir. Parametrelerin değerleri sağ tarafta verilmiştir.

Fotonik yapının optik yüzey modları yine PWE metoduyla hesaplanmış ve Şekil 3.8 'de verilmektedir. Yarığın kırılma indisinin değiştirilmesinin ardından elde edilen çıkış gücü spektrumu Şekil 3.9a'da gösterilmektedir. Yüzey modunun hassasiyet değeri 396 nm/RIU'ya ulaşmış ve Şekil 3.9b'de verilmiştir.



Şekil 3. 8. Yapının yüzeyine hava yarığı eklenmesiyle elde edilen üçgenel örgülü fotonik kristalin dispersiyon diyagramı verilmiştir.



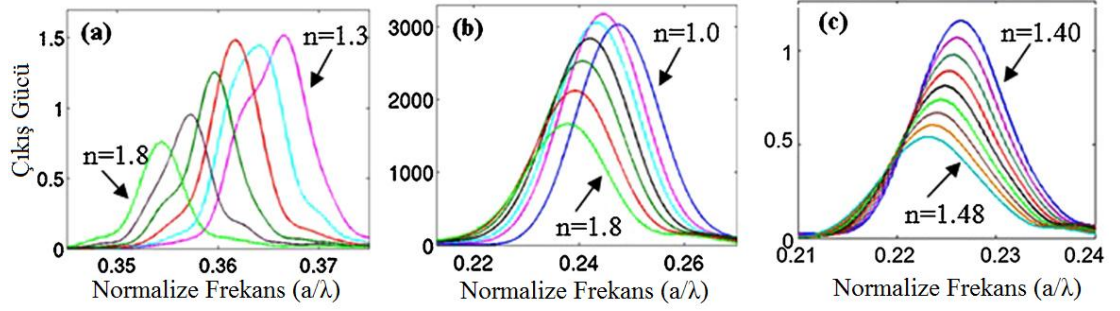
Şekil 3. 9. (a) Hava yarıklı yapı için normalize çıkış gücünün normalize frekansa karşılık gelen grafiği verilmiştir. (b) Normalize frekansın kırılma indisine göre grafiği sunulmuştur.

Kare örgülü fotonik kristalin aksine üçgensel örgülü fotonik kristalin hassasiyet değerleri daha yüksek bulunmuştur. Bu fark kare ve üçgensel örgülü fotonik kristallerin dispersiyon diyagramlarının incelenmesiyle açıklanabilir. Üçgensel örgülü fotonik kristal için Şekil 3.5b ve Şekil 3.8'de bulunan yüzey modlarının küçük eğimleri gözlemlenmiştir. Bu da alan-numune etkileşimini için daha uzun süre olduğunun göstergesidir. Sonuç olarak üçgensel örgülü fotonik kristal için daha hassas biyosensör davranışı olduğunu göstermektedir. Sonraki bölümde hassasiyet karşılaştırması hakkında daha fazla tartışma sağlanacaktır.

3. 6. Güç Spektrumu ve Grup İndisi Karşılaştırmaları

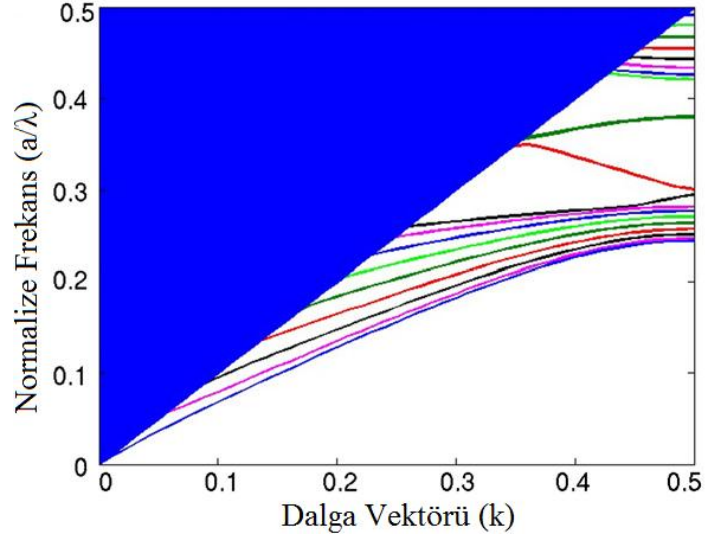
Kırılma indisi değişimine göre çıkış gücünün merkez frekans kaymalarını kolayca bulabilmek için iletim grafikleri birim değere normalize edilmiştir. Rezonans pik değerinin kayması aygıtın hassasiyetinin belirlenmesi için tek başına bir kriter değildir. Genişleme ve asimetri oluşumu gibi rezonansa oluşabilecek herhangi bir değişiklik de sensörün karakteristiği açıklamak için kullanılabilir. Eğer değerlendirme kriteri olarak diğer bir bileşen kullanılacaksa aynı grafiklerin normalize edilmemiş halleri kullanılabilir. Üstelik iletilen gücün miktarı gibi ek bilgiler spektrumdan sayısal olarak elde edilebilir. Bu sebeplerden dolayı

kare ve üçgenel örgülü fotonik kristallerin yüzey modlarının normalize edilmemiş çıkış spektrumları Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



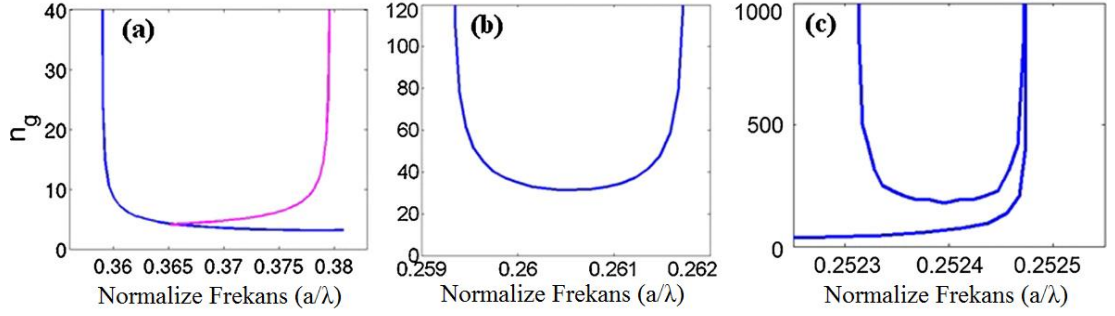
Şekil 3. 10. (a) Kare örgü yapısına sahip fotonik kristalin çıkış gücünün normalize frekansına göre grafiği verilmektedir. Kırılma indisi değeri 1,30'dan 1,80'e 0,10 aralıklarla değiştirilmiştir. (b) Üçgenel örgülü fotonik kristal için benzer grafik verilmiştir. (c) Aynı grafik yüzeyinde hava yarığı içeren yapı için verilmiştir. Kırılma indisi 1,40'tan 1,48'e 0,01 aralıklarla arttırılmıştır.

Bu çizimlerden de görüldüğü üzere çıkış gücü spektrumları deliklerin kırılma indisleri değiştirildiğinde düşük frekanslara doğru kaymaktadır. Başka bir deyişle kırılma indislerinin değeri arttıkça düşük frekanslara kaymaktadır. Şekil 3.10'a bakıldığında çıkarılması gereken önemli gözlemlerden biri kırılma indisinin artmasıyla çıkış gücü miktarının azalmasıdır. Buna ek olarak temiz bir dalga kılavuzu modunun spektral şekli Şekil 3.10a ile karşılaştırıldığında Şekil 3.10b ve Şekil 3.10c'de görünmektedir. Bu özellik kare örgülü fotonik kristalin çoklu mod doğasına atfedilebilir. $r_1 = 0,30a$ ve $r_2 = 0,40a$ durumları için oluşturulan dispersiyon diyagramları Şekil 3.11'de verilmektedir. Rezonansların bazılarının asimetrik görünümü de kare örgülü fotonik kristalin çoklu mod doğasına bağlanabilir.



Şekil 3. 11. Kare örgülü fotonik kristal yapısında $r_1=0,3a$ ve $r_2=0,4a$ olduğu durumlar için yüzey modunun dispersiyon diyagramı gösterilmiştir.

Yüzey modlu biyosensörün hassasiyeti her yüzey durumunun grup indisinin karşılaştırılmasıyla incelenebilmektedir. Daha yüksek grup indisi demek daha küçük dispersiyon eğrisi eğimi anlamına gelmektedir. Bu da yüzey durumu için dar spektral genişlik ya da daha yüksek kalite faktörü değeri sağlar. Bundan dolayı incelenen konfigürasyonların grup indisi karşılaştırmasını içeren Şekil 3.12 hazırlanmıştır. Şekil 3.12a kare örgülü fotonik kristalin ($r_1 = 0,20a$, $r_2 = 0,30a$) ve ($r_1= 0,30a$, $r_2 = 0,40a$) şeklindeki iki durumunu göstermektedir. Grup indisleri dispersiyon eğrileri kullanılarak çıkarılmıştır. Dispersiyon eğrisinin grup indisi değeri ışığın ortamla etkileşiminin açısı ile ilgilidir. Bu da daha büyük grup indisinin düşük grup hızıyla ilgili olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 3. 12. (a) Kare örgülü fotonik kristal sensörün yüzey modunun grup indisi spektrumu gösterilmektedir (Mavi çizgi $r_1 = 0,20a$, $r_2 = 0,30a$ için ve pembe çizgi $r_1 = 0,30a$, $r_2 = 0,40a$ için). (b) Üçgensel örgülü fotonik kristal sensörün yüzey modunun grup indisi spektrumu gösterilmektedir ($r_1 = 0,30a$, $r_2 = 0,40a$ için). (c) Yüzeyinde hava yarığı bulunan fotonik kristal sensörün yüzey modunun grup indisi spektrumu gösterilmektedir.

Şekil 3.12a'da verilen iki durum karşılaştırıldığında ikinci durumun daha büyük kırılma indisine ve daha yüksek hassasiyet değerine sahip olduğu görülmektedir. Kare örgülü fotonik kristal için daha yüksek hassasiyet değeri sağlayan diğer bir mekanizma bağlı kavite konfigürasyonunun kullanılmasıdır. Üç tane perfore edilmiş çubuktan oluşan her kavite daha küçük boyutlara sahip delikler tarafından çevrelenmiştir. Bu da ışığın komşu kavitelerle etkileşimini en aza indirgeyerek optik sinyalin yavaşça transferini sağlamaktadır.

Kare ve üçgensel örgülü fotonik kristalin grup indislerini karşılaştıran benzer bir bakış açısı bu çalışmada rapor edilen farklı hassasiyet değerlerinin yorumlanmasına yardımcı olabilir. Bu nedenle üçgensel örgülü fotonik kristal-hava ve fotonik kristal-hava yarığı için yüzey modunun grup indisi spektrumları sırasıyla Şekil 3.12b ve Şekil 3.12c'de gösterilmektedir. Grup indisi spektrumundan üçgensel örgülü fotonik kristalin yüzey modu kare örgülü fotonik kristalinkinden daha büyük grup indisine sahip olduğu sonucuna varılabilir. Bu yüzden bu konfigürasyonların yüzey durumları farklı hassasiyet değerleri sağlamaktadır (sırasıyla 8, 93, 117 ve 396 nm/RIU). Bu gerçek göz önünde bulundurulmalıdır ki algılama bölgelerindeki alanlar tüm durumlar için farklı ve yüzey modları farklı frekanslarda olmaktadır. Eğer genişlik ve yarığın pozisyonu gibi hava yarığı parametreleri hassas bir şekilde

ayarlanırsa son sunulan yapının hassasiyet değerini daha da arttırmak m¼mk¼n olacaktır.

3. 7. Tartışmalar

Bu sens¼r tasarımıının arkasında yatan algılama prensibi algılama b¼lgesi içindeki kırılma indisi değişimi olduğu zaman iletilen çıkış g¼ spektrumunu tespit etme şeklinededir. Sıvı enjektisinin elektrik alan yoğunluğunun g¼l¼ olduğu yerler olan perfore edilmiş çubuklar, hava delikleri ya da hava yarığının içine yapıldığı kabul edilmiştir. Bu ayarlamanın sonucu olarak ışık ve maddenin direkt etkileşiminden dolayı hassas kimyasal sens¼rler oluşturulabileceği beklenmektedir. Sens¼r¼n cevabı geniş bir kırılma indisi değişimi aralığında doğrusal olmaktadır. Bu da aynı yapının farklı t¼rdeki numunelerin analizinde kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Sınırlı algılama b¼lgesi içteki hava deliklerinin çapları arttırılarak geliştirilebilir. Bu sayede sens¼r¼n y¼zey alanı arttırılmış olur. Algılama yapacak olan ışık s¼n¼mlenmeli algılama durumuna benzer olarak ilerleme y¼n¼ne dik doğrultuya n¼fuz etme zorunda değildir. Kavite modlu biyosens¼r için g¼z ¼n¼nde bulundurulması gereken şey bazı durumlarda tek modlu kavite elde etmenin zor olduğudur. Üstelik y¼ksek kalite fakt¼r¼ne sahip çok hassas biyosens¼rler sıcaklık dalgalanmalarına daha duyarlıdırlar [53]. Y¼ksek kalite fakt¼r¼ne sahip olan rezonat¼rler için giriş sinyalinin kaviteye sokma problemi de başka bir zorluk olarak g¼sterilebilir. Bu çalışmada yer alan tasarımın frekans alanındaki rezonansı farklı y¼zey modu konfig¼rasyonları kullanılarak daha keskin yapılabilir. ¼rneęin y¼ksek kalite fakt¼r¼ne sahip eşli kavite t¼r¼ etkileşimi daha y¼ksek hassasiyet değerlerine ulaşmayı sağlayabilir.

Fotonik kristal ile hava arasında yer alan ara y¼zey boyunca yer alan perfore edilmiş çubuklar, hava delikleri ya da hava yarığının d¼zenlemesi ¼nemli bir rol oynamaktadır. Belli hava deliklerinin ya da hava yarığının seçici doldurulması ışığın numune ile etkileşimine imk¼n sağlamaktadır. Ayrıca mod boşluğu kaymaları dispersiyon diyagramlarıyla uyumludur. Çalışma s¼resince zaman ve frekans alanı sonuçları arasında g¼l¼ bir uyum olduğu g¼zlemlenmiřtir. Son bir açıklama olarak

homojen kısımdaki tekdüze ara yüzey yapısal bozukluklara karşı sensörün fabrikasyon toleranslarını geliştirebilir.

3. 8. Sonuç

İki boyutlu fotonik kristal ve havanın ara yüzeyindeki yüzey modları kullanılarak yeni bir biyosensör fikri geliştirilmiştir. İlk yapı kare örgülü dielektrik çubukların hava ortamına gömülmesi ile oluşmaktadır. Kare örgülü fotonik kristal ve hava ara yüzeyi boyunca perfore edilmiş çubuklar bant boşluklarında yüzey modunu desteklemektedir. Gelen ışık dalgasının yüzeydeki maksimum iletimi perfore edilmiş çubukların kırılma indisinin değiştirilmesiyle kayabilen belli bir frekansta yer alan bir pik değerine sahiptir. İkinci fotonik kristal konfigürasyonu delikler ve ara yüzeyde yüzey modu oluşturmak için yüzeyinde hava yarığı içeren üçgensel örgülü yapı içermektedir. Farklı yüzey mod mekanizmalarıyla orta ve yüksek hassasiyet değerleri elde edilmiştir (8, 93, 117 ve 396 nm/RIU). Hassasiyet gelişimi düşük grup hızı özelliğiyle ilgilidir. Fotonik yapılara dayalı kompakt, hassas ve düşük maliyetli biyosensörler sensör uygulamalarının işlevsel bir parçası haline gelecektir [54, 55].

4. SONUÇLAR

Bu tezde yapılan çalışmaların ana konusu iki boyutlu fotonik kristallerin yüzey modlarının kullanılması ve uygulamaları olmuştur. Literatürde yapılan birçok çalışmada genel olarak nokta (kavite) ve çizgi (dalga kılavuzu) bozukluklarıyla elde edilen yapılar olması bu çalışmanın diğer çalışmalar arasındaki yerini ayrı kılmaktadır. Çünkü bu çalışmada yapılan çizgi bozukluğu yapının içinde değil yüzeyi boyunca oluşturulmuştur. Fotonik yapının yüzeyinde oluşturulan çeşitli değişiklikler sonucunda biyosensör ve her iki polarizasyonda da çalışabilen bir dalga kılavuzu yapısı tasarlanmış ve detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Önceki bölümlerde de bahsedilen çalışmalardan ilki, iki boyutlu fotonik kristallerde üçgensel örgülü hava deliklerinin dielektrik malzeme ile çevrenmesinden oluşan yapı kullanarak polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu uygulamasını içermektedir. Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzlarının tasarımında ilk kez yüzey modları kullanılarak literatüre önemli bir yenilik kazandırılmıştır. Elde edilen bant genişliği diğer yöntemlerle elde edilmiş olan önceki çalışmalar ile karşılaştırılabilecek seviyede olduğu görülmüş ve detaylı bir şekilde yapılacak olan yapı parametrelerinin optimizasyonu ile yüksek bant genişliklerinin elde edilebileceği görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen dalga kılavuzu yapısının zaman alanında iletim karakteristiği analizi yapılmıştır. Bununla birlikte fotonik yapının frekans alanında dispersiyon düzenlemesi adına çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. TE ve TM modları için ayrı ayrı yapılan analizler sonucu grup kırılma indisleri hesaplanmış ve bu iki modun hemen hemen aynı grup kırılma indisi dağılımına sahip olduğu gösterilmiştir. Öte yandan elektrik ve manyetik alan profillerinin farklı dağılımlar ve farklı dispersiyon karakteristiği gösterdiği anlaşılmıştır. Bunların yanı sıra TE polarizasyona sahip ışık dalgası yapının yüzeyine güçlü bir şekilde tutunurken, TM polarizasyonlu için bu durumun daha farklı olduğu görülmüştür. Ayrıca iki boyutlu oluşturulan bu yapının üç boyutlu olduğunda nasıl bir davranış sergileyeceğini göstermek adına iki boyutlu etkin ortam teorisinin uygulanmış ve sonuçları detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur. Gerekli olan tüm analizlerin yapılması ile elde edilen polarizasyondan bağımsız yüzey modlu fotonik kristal dalga kılavuzunun birçok uygulamada

kullanılması ışık dalgasının dalga kılavuzu içerisinde ilerlerken polarizasyonun değişmesi problemini gidereceği düşünülmektedir. Bu dalga kılavuzuna ek olarak geniş bant aralığına sahip ve TE polarizasyon için çalışabilen bir dalga kılavuzu yapısı tasarlanmıştır. Yapının analiz edilmesi için gerekli olan tüm çalışmalar yapılmış ve elde edilen yapının geometrik parametreleri ve dispersiyon diyagramları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Oluşturulan bu geniş bantlı dalga kılavuz da yine birçok uygulamada kullanılabileceği ve çok geniş bantlı bilgileri taşıyabileceği için büyük bir önem arz etmektedir. Bu yapılar analiz edilirken yüzeye bağlantı kayıpları ihmal edilmiştir. İleride yapılabilecek bir çalışma ile bu dalga kılavuzu yapıları için bir kuplör tasarımı geliştirilebilir.

Yapılan diğer çalışmada ise yine iki boyutlu fotonik kristal ve dışında bulunan hava ara yüzeyindeki yüzey modları kullanılarak çeşitli kırılma indisi değerlerine sahip biyokimyasal numunelerin algılanması için biyosensör tasarlanmıştır. Bu çalışmada tek bir yapı değil birçok yapı üzerinde durularak farklı hassasiyet değerlerine sahip sensör tipleri geliştirilmiştir. Bu yapılardan ilki kare örgülü dielektrik çubuklar kullanılarak etrafının hava ortamı ile kaplanması sonucu elde edilmekte ve kare örgülü fotonik kristal ve hava ara yüzeyi boyunca delinmiş çubuklar yüzey modunu desteklemektedir. Yapının yüzeyine gönderilen ışık dalgasının maksimum iletiminin olduğu frekans değeri yüzeyde yer alan perfore edilmiş çubukların kırılma indisinin değiştirilmesiyle belli bir hassasiyetle kaydırılabilmektedir. Diğer bir fotonik kristal yapısı ise yüzeyinde hava yarığı içeren üçgensel örgülü bir konfigürasyona sahiptir. Farklı yapı konfigürasyonlarıyla elde edilen farklı yüzey mod mekanizmalarıyla çeşitli hassasiyet değerleri elde edilmiş ve 396 nm/RIU değerine ulaşılmıştır. Hassasiyet gelişiminin düşük grup hızı özelliğiyle ilintili olduğu anlaşılmış ve detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Fotonik kristallerle elde edilen bu biyosensör yapılarının çeşitli sensör uygulamaları için uygun ve hassas bir seçenek oluşturmaları önemli bir husustur. Bu çalışmanın daha ileriki safhalarında aynı anda birden fazla numunenin algılanmasını sağlayabilecek çoklu algılama yönteminin geliştirilmesi üzerinde çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yablonovitch, E., Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Physical Review Letters*, 58, 2059–2062, 1987.
- [2] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D., *Photonic Crystals Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2007.
- [3] Kurt, H., Giden, İ. H., Üstün, K., Highly efficient and broadband light transmission in 90 nanophotonic wire waveguide bends, *Journal of Optical Society of America B*, 28(3), 495-501, 2011.
- [4] Erim, M. N., Erim, N., Kurt, H., Optical surface modes of photonic crystals for dual-polarization waveguide, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 11, 123-131, 2013.
- [5] Kurt, H., Erim, M. N., Erim, N., Various photonic crystal biosensor configurations based on optical surface modes, *Sensors and Actuators B: Chemical* 165,68–75, 2012.
- [6] Kurt, H., Erim, N., Üstün, K., Slow light based on optical surface modes of two-dimensional photonic crystals, *Journal of the Optical Society of America B*, 29, 1187–1193, 2012.
- [7] Johnson, S., Joannopoulos, J., Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a plane wave basis, *Optics Express*, 8, 173–190, 2001.
- [8] 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, *Computer Physics Communications*, 181, 687–702, 2010.
- [9] 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.
- [10] Meade, R. D., Brommer, K. D., Rappe, A. M., Joannopoulos, J. D., Electromagnetic Bloch waves at the surface of a photonic crystal, *Physical Review B*, 44,10961–10964, 1991.
- [11] Chen, H., Tsia, K. K., Poon, A. W., Surface modes in two dimensional photonic crystal slabs with a flat dielectric margin, *Optics Express*, 14, 7368–7377, 2006.
- [12] Enoch, S., Popov, E., Bonod, N., Analysis of the physical origin of surface modes on finite-size photonic crystals, *Physical Review B*, 72, 155101, 2005.
- [13] Rahachou, A., Zozoulenko, I., Waveguiding properties of surface states in photonic crystals, *Journal of the Optical Society of America B*, 23,1679–1683, 2006.
- [14] Lu, T., Lu, S., Chiu, L., Lee, P., Square lattice photonic crystal surface mode lasers, *Optics Express*, 18, 26461–26468, 2010.
- [15] Bulu, I., Caglayan, H., Ozbay, E., Beaming of light and enhanced transmission via surface modes of photonic crystals, *Optics Letters*, 30, 3078–3080, 2005.
- [16] Xiao, S., Qiu, M., Optical microcavities based on surface modes in two-dimensional photonic crystals and silicon-on-insulator photonic crystals, *Journal of the Optical Society of America B*, 24, 1225–1229, 2007.

- [17] Lu, T., Hsiao, Y., Ho, W., Lee, P-T., High-index sensitivity of surface mode in photonic crystal hetero-slab-edge microcavity, *Optics Letters*, 35, 1452–1454, 2010.
- [18] Hou, J., Gao, D., Wu, H., Zhou, Z., Polarization insensitive self-collimation waveguide in square lattice annular photonic crystals, *Optics Communication*, 282, 3172–3176, 2009.
- [19] Lidorikis, E., Povinelli, M. L., Johnson, S. G., Joannopoulos, J. D., Polarization-independent linear waveguides in 3D photonic crystals, *Physical Review Letters*, 91, 023902, 2003.
- [20] Çiçek, A., Ulug, B., Polarization-independent waveguiding with annular photonic crystals, *Optics Express*, 17, 18381– 18386, 2009.
- [21] Turduev, M., Giden, I., Kurt, H., Modified annular photonic crystals with enhanced dispersion relations: polarization insensitive self-collimation and nanophotonic wire waveguide designs, *Journal of the Optical Society of America B*, 29, 1589–1598, 2012.
- [22] Wu, H., Jiang, L. Y., Jia, W., Li, X. Y., Imaging properties of an annular photonic crystal slab for both TM-polarization and TE-polarization, *Journal of Optics*, 13, 095103, 2011.
- [23] Shen, X., Han, K., Yang, X., Shen, Y., Li, H., Tang, G., Guo, Z., Polarization-independent self-collimating bends and beam splitters in photonic crystals, *Chinese Optics Letters*, 5, 662–664, 2007.
- [24] Chen, X., Qiang, Z., Zhao, D., Li, H., Qiu, Y., Yang, W., Zhou, W., Polarization-independent drop filters based on photonic crystal self-collimation ring resonators, *Optics Express*, 17, 19808–19813, 2009.
- [25] Jiang, L.-Y., Wu, H., Jia, W., Li, X.-Y., Polarization-independent negative refraction effect in SiO₂-GaAs annular photonic crystals, *Journal of Applied Physics*, 111,023508, 2012.
- [26] Hou, J., Gao, D., Wu, H., Zhou, Z., Compact and broadband waveguide taper based on partial bandgap photonic crystals, *Chinese Optics Letters*, 7, 309–311, 2009.
- [27] Atabaki, A., Hosseini, E., Momeni, B., Adibi, A., Enhancing the guiding bandwidth of photonic crystal waveguides on silicon-on-insulator, *Optics Letters*, 33, 2608–2610, 2008.
- [28] Lau, W. T., Fan, S., Creating large bandwidth line defects by embedding dielectric waveguides into photonic crystal slabs, *Applied Physics Letters*, 81, 3915, 2002.
- [29] Moghadam, M. K., Mirsalehi, M. M., Attari, A. R., Design of a novel wideband single-mode waveguide in a photonic crystal slab structure, *Photonics and Nanostructures—Fundamentals and Applications*, 6, 142–147, 2008.
- [30] Jafarpour, A., Chow, E., Reinke, C. M., Huang, J. D., Adibi, A., Grot, A., Mirkarimi, L. W., Girolami, G., Lee, R. K., Xu, Y., Large bandwidth ultra-low-loss guiding in bi-periodic photonic crystal waveguides, *Applied Physics B*, 79, 409, 2004.
- [31] Wu, N., Soltani, M., Momeni, B., Javanmard, M., Adibi, A., Xu, Y., Lee, R. K., General methods for designing single-mode planar photonic crystal waveguides in hexagonal lattice structures, *Optics Express*, 11, 1371, 2003.

- [32] Jafarpour, A. A., Adibi, A., Xu, Y., Lee, R. K., Mode dispersion in biperiodic photonic crystal waveguides, *Physical Review B*, 68, 23310, 2003.
- [33] Gao, D., Zhou, Z., Nonlinear equation method for band structure calculations of photonic crystal slabs, *Applied Physics Letters*, 88, 163105, 2006.
- [34] Johnson, S. G., Fan, S., Villeneuve, P. R., Joannopoulos, J. D., Guided modes in photonic crystal slabs, *Physical Review B*, 60, 5751, 1999.
- [35] Loncar, M., Vuckovic, J., Scherer, A., Methods for controlling positions of guided modes of photonic-crystal waveguides, *Journal of the Optical Society of America B*, 18, 1362, 2001.
- [36] Yamada, K., Morita, H., Shinya, A., Notomi, M., Improved line defect structures for photonic-crystal waveguides with high group velocity, *Optics Communication*, 198, 395, 2001.
- [37] Nair, R. V., Vijaya, R., Photonic crystal sensors: an overview, *Progress in Quantum Electronics*, 34, 89–134, 2010.
- [38] Skivesen, N., Têtu, A., Kristensen, M., Kjems, J., Frandsen, L. H., Borel, P. I., Photonic crystal waveguide biosensor, *Optics Express*, 15, 3169–3176, 2007.
- [39] Kurt, H., Citrin, D. S., Photonic crystals for biochemical sensing in the terahertz region, *Applied Physics Letters*, 87, 41108, 2005.
- [40] Kang, C., Weiss, S. M., Photonic crystal with multiple-hole defect for sensor applications, *Optics Express*, 16, 18188, 2008.
- [41] Hsiao, F., Lee, C., Computational study of photonic crystals nano-ring resonator for biochemical sensing, *IEEE Sensors Journal*, 10, 1185–1191, 2010.
- [42] Buswell, S. C., Wright, V. A., Buriak, J. M., Van, V., Evoy, S., Specific detection of proteins using photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 16, 15949–15957, 2008.
- [43] Kurt, H., Citrin, D. S., Coupled-resonator optical waveguide for biochemical sensing of nano liter volumes of analyte in the terahertz region, *Applied Physics Letters*, 87, 241119, 2005.
- [44] Lee, M. R., Fauchet, P. M., Two-dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection, *Optics Express*, 15, 4530–4535, 2007.
- [45] Kita, S., Hachuda, S., Nozaki, K., Baba, T., Nano slot laser, *Applied Physics Letters*, 97, 161108, 2010.
- [46] Chow, E., Grot, A., Mirkarimi, L. W., Sigalas, M., Girolami, G., Ultracompact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity, *Optics Letters*, 29, 1093–1095, 2004.
- [47] Di Falco, A., O’Faolain, L., Krauss, T. F., Chemical sensing in slotted photonic crystal heterostructure cavities, *Applied Physics Letters*, 94, 063503, 2009.
- [48] Prabhathan, P., Murukeshan, V. M., Jing, Z., Ramana, P. V., Compact SOI nanowire refractive index sensor using phase shifted Bragg grating, *Optics Express*, 17, 15330–15341, 2009.
- [49] Kang, C., Phare, C. T., Vlasov, Y. A., Assefa, S., Weiss, S. M., Photonic crystal slab sensor with enhanced surface area, *Optics Express*, 18, 27930–27937, 2010.
- [50] Loncar, M., Scherer, A., Qiu, Y., Photonic crystal laser sources for chemical detection, *Applied Physics Letters*, 82, 4648–4650, 2003.

- [51] White, I. M., Fan, X., On the performance quantification of resonant refractive index sensors, *Optics Express*, 16, 1020–1028, 2008.
- [52] Xiao, S., Qiu, M., Optical microcavities based on surface modes in two dimensional photonic crystals and silicon-on-insulator photonic crystals, *Journal of the Optical Society of America B*, 24, 1225–1229, 2007.
- [53] Hu, J., Sun, X., Agarwal, A., Kimerling, L. C., Design guidelines for optical resonator biochemical sensors, *Journal of the Optical Society of America B*, 26, 1032–1041, 2009.
- [54] Mortensen, N. A., Xiao, S., Pedersen, J., Liquid-infiltrated photonic crystals – enhanced light-matter interactions for lab-on-a-chip applications, *Microfluidics and Nanofluidics*, 3, 117-127, 2007.
- [55] Mandal, S., Erickson, D., Nanoscale optofluidic sensor arrays, *Optics Express*, 16, 1623–1631, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ERİM, Muhammed Necip
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 26/03/1989 - Eleşkirt
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (554) 934 17 00
Faks : 0 (312) 295 50 05
e-mail : mnerim@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2011
Y. Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2013

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-2012	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı	Uzman Yardımcısı

Yabancı Dil

İngilizce

Rusça

Yayınlar

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Kurt, H., Erim, M. N., Erim, N., Various photonic crystal biosensor configurations based on optical surface modes, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 165, 68–75, 2012.

Erim, M. N., Erim, N., Kurt, H., “Optical surface modes of photonic crystals for dual-polarization waveguide,” *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 11, 123-131, 2013.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceeding) basılan bildiriler

Erim, N., Erim, M. N., Kurt, H., Polarization-Insensitive Waveguide with Optical Surface States, 12th Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2012), İstanbul, Türkiye, Eylül 2012.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

Kurt, H., Erim, M. N., Erim, N., A novel surface mode photonic crystal bio-sensor, 7. Türkiye Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı (NANOTR), İstanbul, Türkiye, Haziran 2011.