

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROMANYETİK DALGALARIN YÜZEY DÜZENİ DEĞİŞTİRİLMİŞ
FOTONİK KRİSTALLERDEKİ DAVRANIŞI

Öznur ÇAPRAZ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

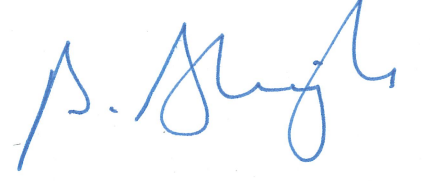
ANKARA
2017

Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

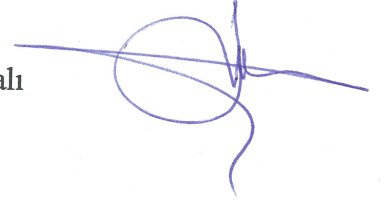
Öznur ÇAPRAZ tarafından hazırlanan “Elektromanyetik Dalgaların Yüzey Düzeni Değiştirilmiş Fotonik Kristallerdeki Davranışı” adlı tez çalışması 19/04/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

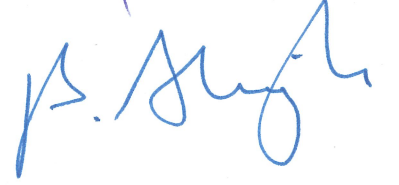


Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Mehmet PARLAK
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Doç. Dr. Şinasi Barış EMRE
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

19.04.2017



Öznur ÇAPRAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTROMANYETİK DALGALARIN YÜZEY DÜZENİ DEĞİŞTİRİLMİŞ FOTONİK KRİSTALLERDEKİ DAVRANIŞI

Öznur ÇAPRAZ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Fotonik kristaller yapay olarak tasarlanmış periyodik malzemelerdir. Dielektrik sabitinin periyodik değişmesi elektromanyetik dalgaların belirli yönlerde ve frekanslarda iletilebilmesine veya iletiminin yasaklanmasına neden olmaktadır. Dağılımın yapısal parametreler ile ayarlanabilir olması fotonik kristallerin önemli uygulama alanlarının olmasını sağlamaktadır. Bu uygulama alanlarından biri de yüzey düzeni değiştirilmiş fotonik kristaller kullanılarak hava ortamından dalga kılavuzu ortamına veya dalga kılavuzundan hava ortamına bağlaşan elektromanyetik dalgaların oranının artırılması ve dalga kılavuzundan çıkan elektromanyetik dalgaların doğrultularının değiştirilebilmesi olarak verilebilir. Bu tez çalışmasında fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışında kılavuzu çevreleyen örgü noktalarında yüzey kusuru oluşturularak elektromanyetik dalgaların ikiye veya üçe eşit oranda bölünmesi veya doğrultulması sağlanmıştır. Bu amaçla silisyum çubukların yarıçapı değiştirilmiş ve nokta kusurları oluşturulmuştur. Fotonik kristal giriş yüzeyine silisyum çubuklardan oluşturulan yüzey ve kırınım ağı tabakaları eklendiğinde, elektromanyetik dalgaların yüzey tabakaları aracılığıyla oluşturulan yüzey kiplerine bağlaşma verimliliklerinin ve dolayısıyla dalga kılavuzuna iletimin arttığı görülmüştür.

Nisan 2017, 79 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristaller, fotonik kristal dalga kılavuzları, zaman bölgesinde sonlu farklar bölgesi, fotonik bant aralığı, yüzey kipleri.

ABSTRACT

Master Thesis

THE BEHAVIOUR OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN PHOTONIC CRYSTALS WITH MODIFIED SURFACE ORDER

Öznur ÇAPRAZ

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

Supervisor: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Photonic crystals are artificially designed periodic materials. Periodic changes in dielectric constant causes the electromagnetic waves to be transmitted or prohibited in certain directions and frequencies. The fact that the dispersion is adjustable with the structural parameters ensures that the photonic crystals have important application areas. One of these applications is to increase the ratio of the electromagnetic waves that are coupled from the air environment to the waveguide environment or from the waveguide to the air environment by using surface-modified photonic crystals, and to change the directions of the electromagnetic waves that emerge from the waveguide. In this thesis study, a surface defect is created at the lattice points surrounding the waveguide at the exit of the photonic crystal waveguide, so that the electromagnetic waves are collimated or divided into two or three equal parts. For this purpose, the radius of the silicon rods is changed and point defects are created. When the surface and grating layers that form from the silicon rods are added to the entrance surface of the photonic crystal, it has been found that the coupling efficiencies of the surface electromagnetic waves and thus the transmission to the waveguide are increased.

April 2017, 79 pages

Key Words: Photonic crystals, photonic crystal waveguides, finite difference time domain method, photonic band gap, surface modes.

TEŞEKKÜR

Bu güncel ve ilginç çalışma konusunda beni yönlendiren, tezimin her aşamasında desteğini aldığım, çalışmalarım konusunda beni yüreklendiren, yeni araştırmalara teşvik eden tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Barış AKAOĞLU'na (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), önerileriyle ve ilgileriyle akademik anlamda gelişmemde bana büyük katkısı olan birlikte çalıştığım Sayın Araş. Gör. Dr. Fulya BAĞCI'ya (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) içtenlikle teşekkürlerimi sunuyorum.

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

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

Öznur ÇAPRAZ

Ankara, Nisan 2017

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGE DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. FOTONİK KRİSTALLER.....	2
2.1 Boyutlarına Göre Fotonik Kristaller.....	2
2.1.1 Bir boyutlu fotonik kristaller	3
2.1.2 İki boyutlu fotonik kristaller.....	6
2.1.3 Üç boyutlu fotonik kristaller	7
2.2 Brillouin Bölgeleri	8
2.3 Nokta ve Çizgi Örgü Kusuru	10
2.3.1 Bir boyutta örgü kusurunda yerelleşen kipler	12
2.3.2 İki boyutta örgü kusurunda yerelleşen kipler	13
2.4 Fotonik Kristal Dispersiyon Özellikleri	14
2.5 Fotonik Kristal Simetrisinin Bant Yapısına Etkisi	16
2.5.1 Simetrisinin azaltılmasının kare örgülü fotonik kristalin bant yapısına etkisi	19
3. MATERYAL VE METOD.....	20
3.1 Dielektrik Ortamda Elektromanyetik Dalgaların Yayılması	20
3.2 Düzlem Dalga Açılımı Yöntemi.....	24
3.3 Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD).....	25
3.3.1 Bir boyutta zamanda sonlu farklar yöntemi	27
3.3.2 Courent koşulu	31
3.3.3 FDTD yönteminin avantajları.....	32
4. ELEKTROMANYETİK DALGALARIN YÜZEY DÜZENİ DEĞİŞTİRİLMİŞ FOTONİK KRİSTALLERDE DAVRANIŞI	33
4.1 Giriş	33
4.2 Fotonik Kristal Bant Yapıları.....	35

4.3	Yüzey Düzeni Değiştirilmiş Fotonik Kristal ile Demetleme Özelliğinin İyileştirilmesi.....	38
4.3.1	Işığın fotonik kristal dalga kılavuzundan havaya bağlaştırılması.....	38
4.4	Fotonik Kristal Demet Bölücü Özelliğinin İncelenmesi	42
4.4.1	Fotonik kristal dalga kılavuzundan havaya bağlaşan demet bölücü akı profillerinin sensör konumuna bağlı değişimi	56
4.5	Işığın Çıkışta Yüzey Düzeni Değiştirilmiş Fotonik Kristal Dalga Kılavuzundan İletim Spektrumları.....	61
4.6	Işığın Fotonik Kristal Dalga Kılavuzu Girişine Bağlaştırılması.....	67
5.	SONUÇ.....	73
	KAYNAKLAR	77
	ÖZGEÇMİŞ.....	79

SİMGELER DİZİNİ

c	Işığın vakumdaki hızı
ϑ_G	Grup hızı
n_G	Grup indisi
ϵ	Dielektrik sabiti
λ	Dalga boyu
ρ	Yük yoğunluğu
μ	Manyetik alınganlık
$\vec{k}$	Dalga vektörü
$\vec{E}$	Elektrik alan vektörü
$\vec{H}$	Manyetik alan vektörü
ω	Açısal frekans
$\omega_n(k)$	Açısal frekans özdeğeri
Γ, X, M	Ters uzayda simetri noktaları

Kısaltmalar

EM	Elektromanyetik
PC	Fotonik kristal
PCW	Fotonik kristal dalga kılavuzu
FBA	Fotonik bant aralığı
TBA	Tam bant aralığı
PWE	Düzlem dalga açılımı yöntemi
FDTD	Zamanda sonlu farklar yöntemi
PML	Mükemmel uyumlu tabaka
TE	Enine elektrik
TM	Enine manyetik
SC	Süper hücre
GVD	Grup hızı dağılımı
NDBP	Normalize gecikme-bant genişliği çarpanı
N_y	$N_{yüzey}$
r_{yt}	Yüzey tabakası çubuklarının yarıçapı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.a. Bir boyutta periyodik, b. İki boyutta periyodik, c. Üç boyutta periyodik (Joannopoulos vd. 2008)	3
Şekil 2.2.a. Bir boyutlu fotonik kristal, b. GaAs/GaAlAs çok katmanlı filmin fotonik bant yapısı (Joannopoulos vd. 2008).....	4
Şekil 2.3 GaAs/GaAlAs çok katmanlı film için $k=0.5(2\pi/a)$ 'da a. $n=1$ no'lu kipin elektrik alanı, b. $n=2$ no'lu kipin elektrik alanı (Joannopoulos vd. 2008).....	5
Şekil 2.4 Üç farklı çokkatmanlı filmde fotonik bant yapıları, katmanlarda her bir tabaka $0.5a$ kalınlığında, her tabakada dielektrik sabiti 13, tabakaların dielektrik sabiti 13 ve 12 arasında (Joannopoulos vd. 2008)	5
Şekil 2.5 İki boyutta fotonik kristal yapısı (Joannopoulos vd. 2008)	6
Şekil 2.6 Hava içerisinde $r=0.2a$ yarıçaplı silisyum dielektrik çubuklu kare örgülü fotonik kristalin fotonik bant yapısı grafiği (Joannopoulos vd. 2008)	7
Şekil 2.7 Üç boyutlu fotonik kristal yapısı (Joannopoulos vd. 2008).....	8
Şekil 2.8.a. İki boyutlu kare örgü, b. İki boyutlu ters kare örgü, c. Daraltılamaz Brillouin bölgesi (Joannopoulos vd. 2008)	9
Şekil 2.9 Brillouin bölgelerinin gösterimi (Joannopoulos vd. 2008).....	9
Şekil 2.10 Tek boyutta kristal örgüsü ve brillouin bölgesi (Erdiven 2012).....	10
Şekil 2.11.a. Nokta örgü kusuru yapısı, b. Çizgi örgü kusuru yapısı.....	11
Şekil 2.12 Bir boyutlu fotonik kristal örgü kusurunda yerelleşen kip (Joannopoulos vd. 1995)	13
Şekil 2.13 Örgü kusurları ve yüzeyin iki boyutlu durumu (Soukoulis 1996)	14
Şekil 2.14 İki boyutlu fotonik kristal dispersiyon özellikleri (Erdiven 2012)	15
Şekil 2.15 Fotonik kristal içerisinde meydana gelen olağandışı kırılmalar (Erdiven 2012).....	16

Şekil 2.16.a. Kare örgülü silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal yapısı (Örgü sabiti a , silindirik çubuk yarıçapı $0,2a$ 'dır), b. Ters örgü uzayında simetri noktaları Γ , X ve M	17
Şekil 2.17.a. Kare örgülü silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal yapının TM kipi bant yapısı, b. TE kipi bant yapısı (Üstün 2011)	18
Şekil 2.18.a. Üçgen örgülü dizilmiş silindirik boşluklardan oluşan fotonik kristal yapısı (Örgü sabiti a , deliklerin yarıçapı $0,3a$ 'dır) b. Ters örgü uzayında simetri noktaları Γ , X ve M (Şekilde görülen paralelkenar hesap edilen hücredir)	18
Şekil 2.19.a. Üçgen örgüye dizilmiş silindirik boşluklardan oluşan TM kipi bant yapısı, b. TE kipi bant yapısı (Üstün 2011)	19
Şekil 3.1 $n > 0$ için dalga yönelimi	23
Şekil 3.2 $n < 0$ için dalga yönelimi	23
Şekil 3.3 Yee örgüsü içindeki TM ve TE dalgalarının 2 boyuttaki dizilimi	26
Şekil 3.4 Üç boyutlu Yee örgüsü (Taflove ve Hagness 2000)	27
Şekil 3.5 Elektrik alan ve manyetik alan düğüm noktalarının zamana ve konuma göre konumları belirlenen nokta için H_y güncelleme denklemi belirtilmiştir (Schneider 2011)	29
Şekil 3.6 Elektrik alan ve manyetik alan düğüm noktalarının zamana ve konuma göre konumlanması. Belirlenen nokta için E_z güncelleme denklemi belirtilmiştir	31
Şekil 4.1 Giriş yüzeyine yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal yapısı	34
Şekil 4.2 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulan fotonik kristal bant yapısı	35
Şekil 4.3 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulan yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal bant yapısı ve süper hücresi	36
Şekil 4.4 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulan yatay yönde sonlu uzunluktaki önüne yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal bant yapısı ve süper hücresi	36

Şekil 4.5 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulmuş yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal önüne $r_{yt}=0.1a$ ve $r_{yt}=0.14a$ yarıçaplarında yüzey tabakaları eklendiğinde bant yapısı	37
Şekil 4.6 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulmuş fotonik kristal dalga kılavuzu bant yapısı.....	38
Şekil 4.7 Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı.....	39
Şekil 4.8.a. Yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna $1.46\ \mu\text{m}$ dalgaboyunda elektromanyetik dalga gönderildiğindeki atma ilerleyiş profili b. Kare örgülü yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal önüne $r_{yt}=0.1\ a$ yüzey tabakası eklenmiş FK bant yapısı.....	39
Şekil 4.9.a. $r_{yt}=0.1a$ yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna $1.56\ \mu\text{m}$ dalgaboyunda elektromanyetik dalga gönderildiğindeki atma ilerleyiş profili, b. Kare örgülü yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal önüne $r_{yt}=0.1a$ ve $r_{yt}=0.14a$ yarıçaplarında yüzey tabakaları eklendiğinde bant yapısı.....	40
Şekil 4.10.a. $r_{yt}=0.1a$ yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna $2.7\ \mu\text{m}$ dalgaboyunda elektromanyetik dalga gönderildiğindeki atma ilerleyiş profili, b. Kare örgülü yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal dalga kılavuzu önüne $r_{yt}=0.1a$ yarıçapında yüzey tabakası eklendiğinde bant yapısı.....	41
Şekil 4.11 Çıkışına yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu	41
Şekil 4.12 Yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili	42
Şekil 4.13 $N_y=2$ fotonik kristal dalga kılavuzu atma profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı	43
Şekil 4.14 $N_y=2$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	44
Şekil 4.15 $N_y=2$ ve 1 boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı	44
Şekil 4.16 $N_y=2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	45

Şekil 4.17	$N_y=2$ kademeli, birinci Si çubuk $r=0.054$ ($0.1a$) μm , ikinci Si çubuk $r=0.081$ ($0.15a$) μm ve sonrasında bir boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı.....	46
Şekil 4.18	$N_y=2$ kademeli, birinci Si çubuk $r=0.054$ ($0.1a$) μm , ikinci Si çubuk $r=0.081$ ($0.15a$) μm ve sonrasında bir boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	46
Şekil 4.19	$N_y=3$ fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı	47
Şekil 4.20	$N_y=3$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	48
Şekil 4.21	$N_y=3$ ve 1 boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı	48
Şekil 4.22	$N_y=3$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	49
Şekil 4.23	$N_y=3$ kademeli birinci Si çubuk $r=0.054$ μm ikinci Si çubuk $r=0.054$ μm üçüncü Si çubuk $r=0.081$ μm ve sonrasında 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	50
Şekil 4.24	$N_y=3$ kademeli birinci Si çubuk $r=0.054$ μm ikinci Si çubuk $r=0.0675$ μm üçüncü Si çubuk $r=0.081$ μm ve sonrasında 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	50
Şekil 4.25	$N_y=3$ ve 2 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	51
Şekil 4.26	$N_y=4$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	51
Şekil 4.27	$N_y=4$ ve 1 boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı	52
Şekil 4.28	$N_y=4$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	53

Şekil 4.29 $N_y=4$ ve 2 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	53
Şekil 4.30 $N_y=5$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	54
Şekil 4.31 $N_y=5$ ve 1 boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesiti.....	55
Şekil 4.32 $N_y=5$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	55
Şekil 4.33 $N_y=2$ fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili	56
Şekil 4.34 $N_y=2$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 2 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	57
Şekil 4.35 $N_y=2$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	57
Şekil 4.36 $N_y=2$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 7 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	58
Şekil 4.37 $N_y=2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 3 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	58
Şekil 4.38 $N_y=2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	59
Şekil 4.39 $N_y=2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 5 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	59
Şekil 4.40 $N_y=2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 7 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	60
Şekil 4.41 Yüzey düzeni değişikliği yapılmamış fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı	61

Şekil 4.42 Fotonik kristal dalga kılavuzu iletim spektrumu	62
Şekil 4.43 Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı.....	62
Şekil 4.44.a. Yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu iletim spektrumu, b. Yüzey tabakaları eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu bant yapısı	63
Şekil 4.45.a. Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş olan fotonik kristal dalga kılavuzunun atma ilerleyiş profili, b.Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi.....	64
Şekil 4.46.a. Çıkışına sadece kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili, b. Sadece $D=2a$ kırınım ağı tabakası olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi	64
Şekil 4.47.a. Çıkışına yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili, b.Yüzey tabakası ve $D=2a$ olan kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi (kırınım ağı periyodu $2a$, $a=0.54 \mu\text{m}$, $r_{yt}=0.1a$).....	65
Şekil 4.48.a. Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu geçen net akı, b. Sadece $D=2a$ kırınım ağı tabakası varken yüzey tabakası yokken fotonik kristal dalga kılavuzu geçen net akı, c. yüzey tabakası ve $D=2a$ kırınım ağı tabakası olan fotonik kristal dalga kılavuzu geçen net akı (kırınım ağı periyodu $2a$, $a=0.54 \mu\text{m}$, $r_{yt}=0.1a$)	66
Şekil 4.49.a.Yüzey tabakası yokken $D=3a$ kırınım ağı tabakası olduğunda geçen net akı (kırınım ağı periyodu $3a$, $a=0.54 \mu\text{m}$), b. Yüzey tabakası varken $D=3a$ kırınım ağı tabakası eklendiğinde çizgi sensör boyunca geçen net akı (kırınım ağı periyodu $3a$, $a=0.54 \mu\text{m}$ $r_{yt}=0.1a$)	66
Şekil 4.50 Girişine yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı.....	68
Şekil 4.51 Hava ve fotonik kristalden oluşan yapının atma ilerleyiş profili.....	68
Şekil 4.52 Yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal yüzeye sahip yapının atma ilerleyiş profili	70

Şekil 4.53 Kırınım ağı ve yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal yüzeye sahip yapının atma ilerleyiş profili	70
Şekil 4.54 Işığın havadan, a eğrisi fotonik kristal dalga kılavuzuna, b eğrisi yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna, c eğrisi kırınım ağı ve yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna, d eğrisi kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna bağlaşma eğrileri	71



ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 4.1 TM ve TE polarizasyonunun özellikleri	6
---	---



1. GİRİŞ

Fotonik kristaller yapay olarak tasarlanmış periyodik malzemelerdir. Fotonik sayesinde ışığı meydana getiren fotonlar üretilebilmekte ve yönlendirilebilmektedir. Fotonik aynı zamanda ışığın madde ile olan etkileşimini, algılanmasını ve taşınmasını da inceleyen bir bilim alanıdır. Dielektrik sabitinin periyodik değişmesi elektromanyetik dalgalarının dağılım diyagramlarının önemli miktarda değişmesine neden olmaktadır. Dağılımdaki bu kuvvetli değişim fotonik kristallerin önemli araştırma konularından biri olmasının başlıca nedenlerinden biridir. Fotonik kristallerin birçok ilginç uygulamaları önerilmiş ve geliştirilmiştir. Yüzey düzeni değiştirilmiş periyodik yapılar yüzeyde yayılan elektromanyetik dalgaları destekler. Örneğin, kırınım ağı ile çevrelenmiş bir fotonik kristal yüzeyi üzerinde dalgaboyu altı ölçeğinde açıklığın olağandışı geçirgenlik sergilediği gözlenmiştir. Bunun nedeni fotonik kristal yüzeyindeki yüzey kiplerinin uyarılması ile açıklanmıştır. (Bulu vd. 2005)

Fotonik kristal yapılarda elektromanyetik (EM) dalgaların ilerlemesi bazı yönlerde ve bazı frekans aralıklarında sağlanamamaktadır. Bu sayede, ışık kılavuzlanabilmektedir. Periyodik dielektrik yapılarda ışığın geçmesinin mümkün olmadığı neredeyse tamamen yansıdığı dalga boyları aralığına yasak enerji bant yapısı denilmektedir. Yasak enerji bant aralığı diğer bir deyişle fotonik bant aralığı (FBA) olarak da adlandırılabilir. (Bulu vd. 2005)

Bu tez çalışmasında fotonik kristallerin elektromanyetik dalgaın geldiği taraftaki yüzey düzeni bozularak (Bulu vd. 2005) (örneğin, yüzeydeki Si çubukların yarıçapları değiştirilerek) geçirgenliğin artırılması hedeflenmektedir.

Ayrıca bu tez çalışmasında, elektromanyetik dalgaın çıktığı taraftaki yüzey düzeni bozularak (örneğin, çıkış yüzeyindeki Si dielektrik çubukların yarıçapları değiştirilerek) demetleme özelliğinin iyileştirilmesi incelenecektir.

2. FOTONİK KRİSTALLER

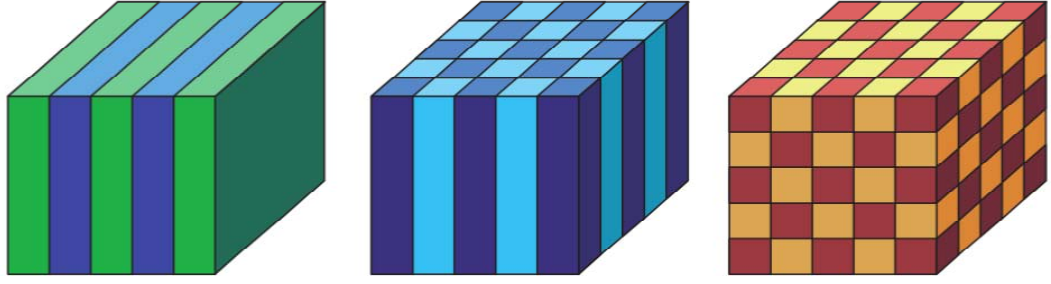
Bir kristal atom ve moleküllerin belirli bir periyodiklikte sıralanmasıyla oluşmaktadır ve içerisinde geçen elektron periyodik bir potansiyel altında hareket etmektedir. Kristalin enerji bandı yapısında belirli enerjilerde, belirli doğrultularda elektronun geçişinin yasak olduğu bant aralıkları bulunabilmektedir. Atomik kristallerin optikteki karşılığı fotonik kristallerdir.

Fotonik kristallerde atom ve moleküllerin yerini değişen dielektrik sabitli makroskobik bir ortam, periyodik potansiyelin yerini ise periyodik dielektrik fonksiyonu almaktadır. Fotonik kristali oluşturan malzemelerin dielektrik sabitlerinin oranı yeterince büyükse ve geçen ışığın soğurması en az düzeyde ise, ışığın tüm yüzeylerden girişim yaparak kırınımına uğramasıyla fotonik bant aralığı (FBA) oluşabilmektedir. Fotonların FBA'nı oluşturan frekans aralığında ve doğrultuda kristal içerisinde geçişi yasaktır. Fotonik kristaller, ışığı optik olarak kontrol etme, yönlendirme ve işleme imkanı veren malzemelerdir.

Fotonik kristaller çok çeşitli şekillerde kullanılabilmektedir. Lazer teknolojilerinde, fiber optik yapılarda, ışığı bükebilen meta malzemelerde, sensörlerde, optik çoklayıcı ve tekleyicilerde, güneş pillerinde vb. yapılarda fotonik kristaller kullanılmaktadır.

2.1 Boyutlarına Göre Fotonik Kristaller

Fotonik kristaller üç farklı boyutta tasarlanabilen periyodik dielektrik yapılardır. Bir, iki ve üç boyutlu periyodik yapılar oluşturulabilmektedir. Fotonik Kristal örnekleri şekil 2.1'de verilmiştir (Joannopoulos vd. 2008).

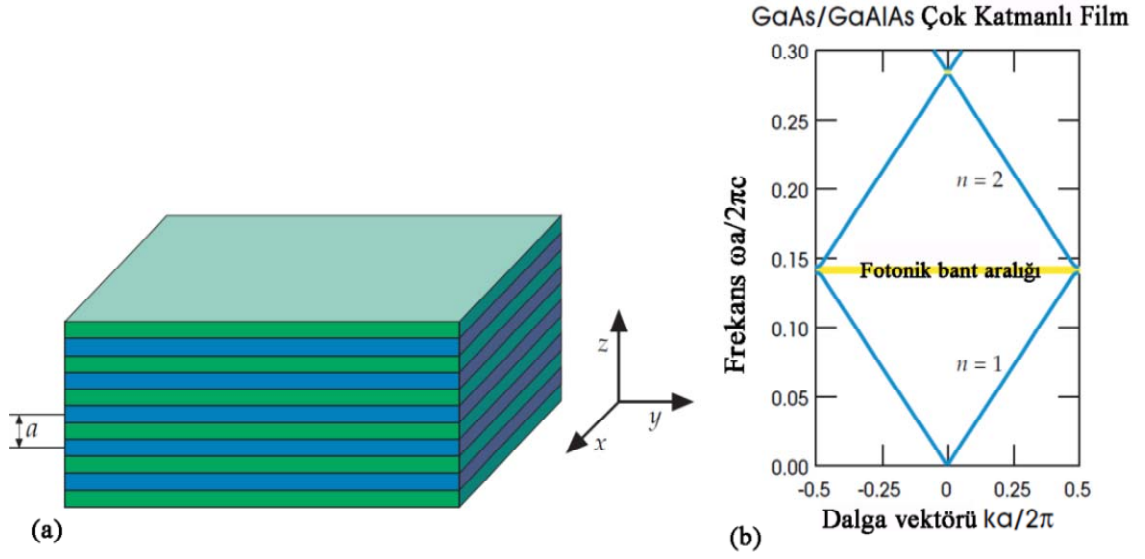


Şekil 2.1.a. Bir boyutta periyodik, b. İki boyutta periyodik, c. Üç boyutta periyodik (Joannopoulos vd. 2008)

Tasarlanması en kolay olan yapılar bir boyutlu olanlardır. Farklı yalıtkan tabakaların yan yana dizilmesi ile oluşturulurlar.

2.1.1 Bir boyutlu fotonik kristaller

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

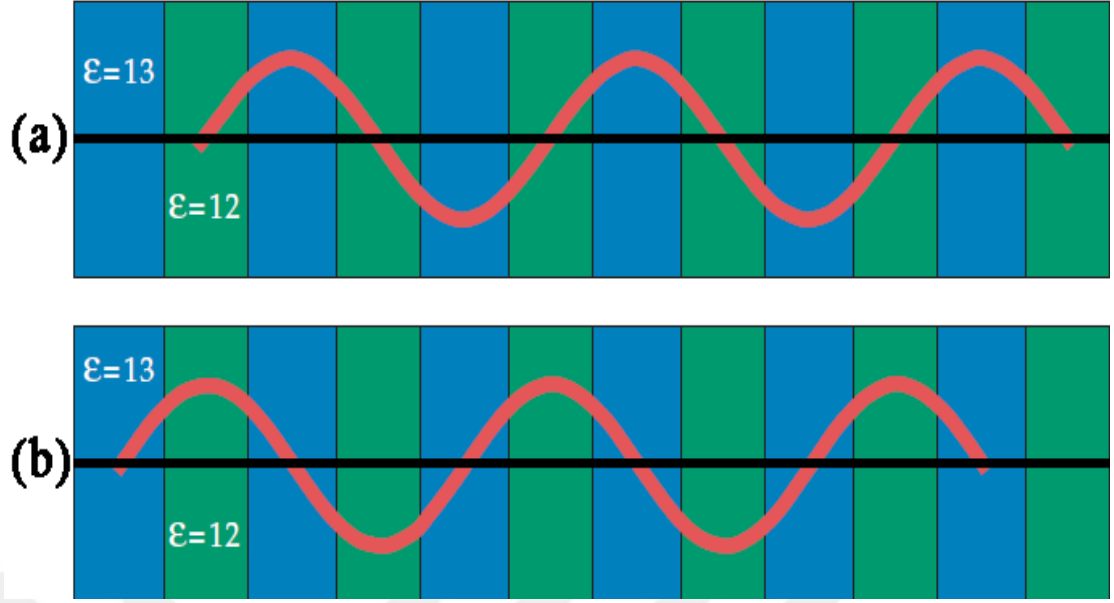


Şekil 2.2.a. Bir boyutlu fotonik kristal, b. GaAs/GaAlAs çok katmanlı filmin fotonik bant yapısı (Joannopoulos vd. 2008)

Şekil 2.2.a'daki yapının xy boyunca homojen olduğu fakat z doğrultusunda kesikli periyodiklik gösterdiği görülmüştür. Böylelikle kipler $k_{//}$ ve k_z olarak iki farklı şekilde incelenebilir. $k_{//}$ xy düzleminde süreklilik gösterirken tüm değerleri alabilir ama k_z z doğrultusunda kesikli öteleme simetrisinden dolayı sadece ilk Brillouin bölgesi sınırlarındaki $-\pi/a < k_z < \pi/a$ aralığına denk gelen değerleri alabilmektedir.

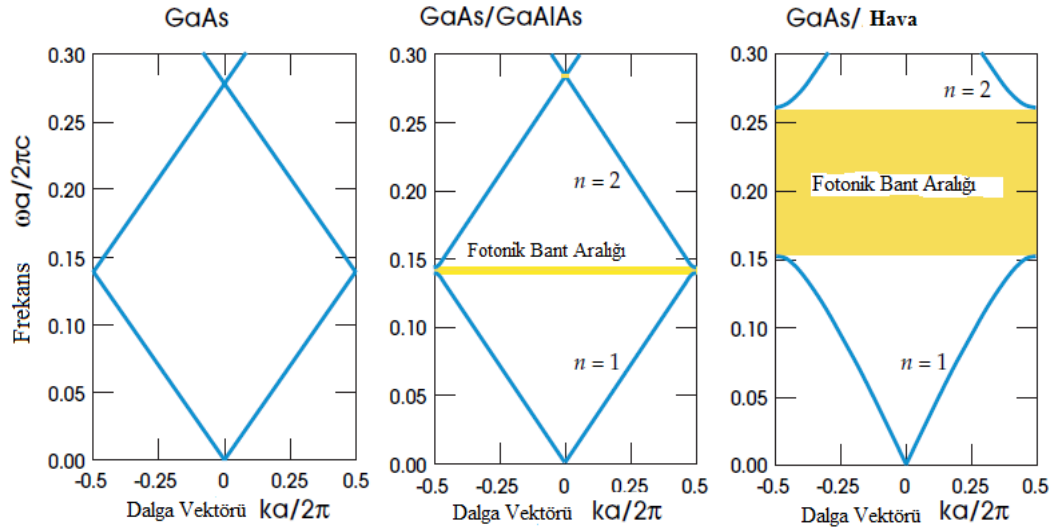
Şekil 2.2.b'de GaAs/GaAlAs çok katmanlı filme ait FBA yapısı verilmiştir. Her bir tabaka $0.5a$ kalınlıktadır. GaAlAs'ın dielektrik sabiti 12, GaAs'ın ise 13'dür. GaAs/GaAlAs oranı düşük olduğundan dolayı FBA dardır. FBA'nın üstündeki ve altındaki kiplerin elektrik alan profilleri incelenerek FBA oluşumu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

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



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

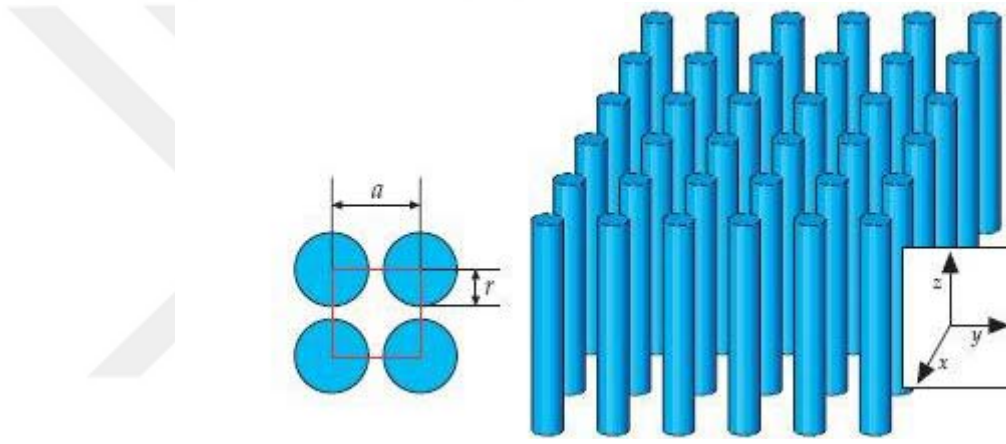
Şekil 2.4'de üç farklı çok katmanlı filmde fotonik bant yapılarının katmanlardaki her bir tabakanın dielektrik sabiti değişkenliğine bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Şekil 2.4 Üç farklı çokkatmanlı filmde fotonik bant yapıları, katmanlarda her bir tabaka $0.5a$ kalınlığında, her tabakada dielektrik sabiti 13, tabakaların dielektrik sabiti 13 ve 12 arasında (Joannopoulos vd. 2008)

2.1.2 İki boyutlu fotonik kristaller

Şekil 2.5’de iki boyutlu fotonik kristal periyodik örgünün yapısı gösterilmektedir. Şekil 2.5’de iki boyutlu yapı x ve y yönlerinde aynı örgü parametresi ile değişiklik gösterirken, z yönü boyunca değişmemektedir. Bu yapıda fotonik bant aralığı periyodik değişimin yaratıldığı xy boyunca oluşur. İki boyutlu fotonik kristal yapıya ait fotonik bant aralığına denk gelen frekanslarda ışığın ilerleyebileceği bir kip bulunmamaktadır. Böylelikle gelen elektromanyetik dalga 1D fotonik kristalde olduğu gibi yapı içerisinde yayılmadan geldiği gibi geri döner.

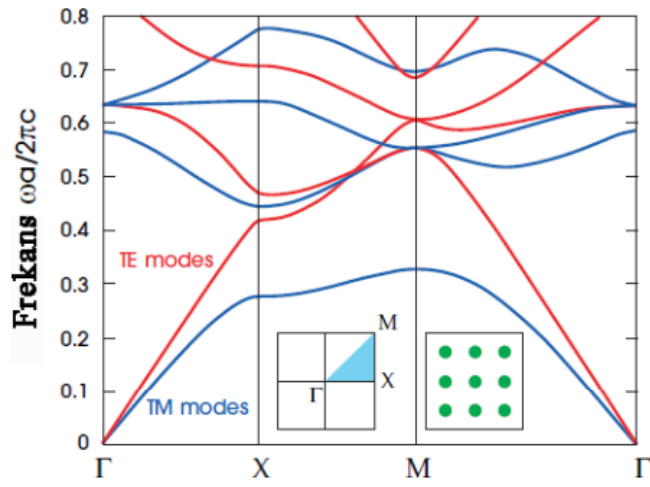


Şekil 2.5 İki boyutta fotonik kristal yapısı (Joannopoulos vd. 2008)

Kipler z yönü boyunca titreşir ve z doğrultusundaki dalga vektöründe (k_z) bir değişiklik olmaz. Dolayısıyla $k_z=0$ olduğunda ışık, xy düzlemine paralel ilerler. Bu şekilde xy düzleminde gerçekleşen yansımalarda değişiklik gözlemlenmez. Yani ayna simetrisinden kaynaklı harmonik kipler ikiye polarizasyona ayrılır: TM polarizasyonu (enine magnetik- E elektrik alanı düzlem dik) ve TE kutuplanması (enine elektrik- E elektrik alanı düzlem içinde). TM ve TE polarizasyonunun özellikleri aşağıdaki çizelge 4.1’de verilmektedir. Öncesinde de bahsedildiği şekilde TM kutuplu hava içerisinde periyodik dizilmiş dielektrik çubuklar için, TE kutupluda da dielektrik yapının içerisinde periyodik dizilmiş hava boşlukları yasak enerji bant genişliğine sahiptir (Joannopoulos vd. 1995). Şekil 2.6’da iki boyutlu fotonik kristal bant yapısı gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 TM ve TE polarizasyonunun özellikleri

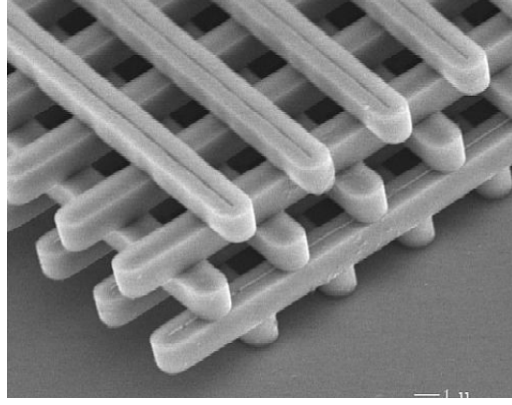
Polarizasyon	Elektrik Alanı (E)	Manyetik Alanı (H)
TM-Enine manyetik dalga	$E_x=0$ $E_y=0$ $E_z \neq 0$	$H_x \neq 0$ $H_y \neq 0$ $H_z=0$
TE-Enine elektrik dalga	$E_x \neq 0$ $E_y \neq 0$ $E_z=0$	$H_x=0$ $H_y=0$ $H_z \neq 0$



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

2.1.3 Üç boyutlu fotonik kristaller

Üç boyutlu periyodik örgü yapısı tasarlanması daha karışık ve zordur. Yasak enerji bant aralığına sahip üç boyutlu fotonik kristal yapının deneysel açıklaması 1991’de gerçekleştirilmiştir (Yablonovitch vd. 1991).



Şekil 2.7 Üç boyutlu fotonik kristal yapısı (Joannopoulos vd. 2008)

Fotonik kristaller periyodik yapılar olmasından kaynaklı simetri özelliğine sahiptirler. Öteleme (kesikli ve sürekli) simetrisi ve ayna simetrisi önemlidir. Öteleme simetrisine sahip bir sistem, d kadar yer değiştirme sonucunda değişmeden kalır. Her d için bir fonksiyon ($f(r)$) ve T_d kadar öteleme tanımlarsak, $f(r) = \epsilon(r)$ için

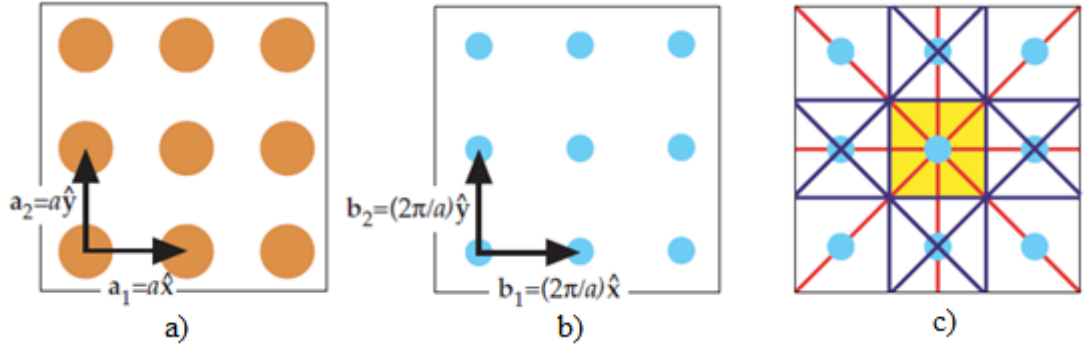
$$T_d \epsilon(r) = \epsilon(r + d) = \epsilon(r) \quad (2.1)$$

eşitliği elde edilir.

2.2 Brillouin Bölgeleri

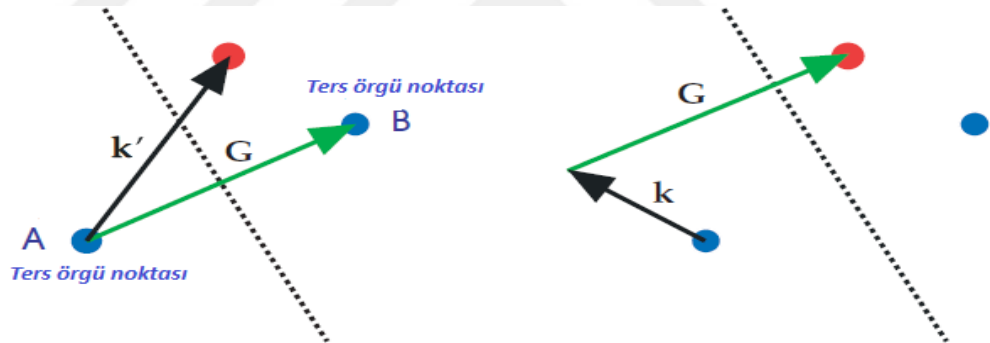
Brillouin bölgeleri ters uzayı bölgelere ayırır. Bloch teoremi elektronik sistemlerde $V(r) = V(r + R)$ potansiyel eşitliğine, fotonik yapılarda da $\epsilon(r) = \epsilon(r + R)$ dielektrik fonksiyonu aracılığıyla özdeğer problemleri çözülür. Fotonik kristaller $R = ba_x + ca_y + da_z$ vektörü ile tekrarlandığını kabul edersek a_x , a_y ve a_z x , y ve z doğrultusundaki periyot değerlerini belirtir. b , c ve d tam sayıları belirtir. Bu periyot (kare örgü için) değerleri $\frac{2\pi}{a_{x,y,z}}$ olur. Frekansın tekrarlanmadığı sifıra en yakın aralığa I. Brillouin

Bölgesi denir. Kare örgü içerisinde I. Brillouin Bölgesi $\left[\frac{-\pi}{a_{x,y,z}}, \frac{\pi}{a_{x,y,z}} \right]$ dır. Bu bölgenin simetri ile küçültülmesi mümkündür. Kare örgüde Brillouin bölgeleri şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8.a. İki boyutlu kare örgü, b. İki boyutlu ters kare örgü, c. Daraltılamaz Brillouin bölgesi (Joannopoulos vd. 2008)

Şekil 2.8.c’de sarı bölge en küçük hacme sahip “İndirgenemez Brillouin Bölgesi” dir. Bant yapısı oluşumunda Brillouin bölgesi önemli rol oynamaktadır. Fotonik kristal yansımalarını gösteren bütün dalga vektörleri Brillouin bölgeleri ile sınırlıdır. Bir hücreden diğer hücelere geçiş ters örgü vektörleri ile olmaktadır.



Şekil 2.9 Brillouin bölgelerinin gösterimi (Joannopoulos vd. 2008)

Bu şekilde ;

$$k' = k + G \quad (2.2)$$

k' yansıyan dalgaının vektörünü, G de ters örgünün vektörünü göstermektedir. Her ikisinin de karesi alınarak,

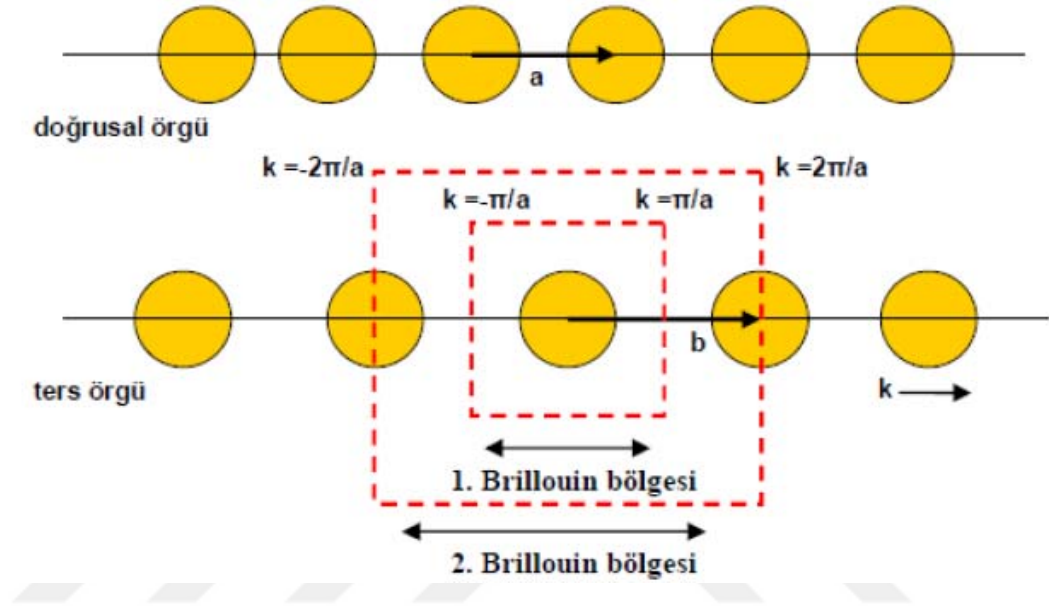
$$2k \cdot G = G^2 \quad (2.3)$$

$$k'^2 = k^2 + 2k \cdot G + G^2 \quad (2.4)$$

dalgaının esnek saçıldığı düşünülerek $k'^2 = k^2$ olur. (2.4) denklemi

$$2k \cdot G = G^2 \quad (2.5)$$

denkleminde dönüşür. (2.5) denkleminde göre k dalga vektörü, ters örgü vektörü G 'yi dik ikiye bölen düzlemde bulunuyorsa yansıma şartları sağlanmış olur. En çok yansıma Brillouin bölgesinin kenarlarında olmaktadır. Şekil 2.10'da tek boyutlu kristal örgünün ve ters örgünün yapısı gösterilmektedir. Sınırların $k = +\pi/a$ 'da 1.Brillouin bölgesi görülmektedir. 2. Brillouin bölgesi sınırları ise dielektrik çubuk üstünden geçmektedir.



Şekil 2.10 Tek boyutta kristal örgüsü ve brillouin bölgesi (Erdiven 2012)

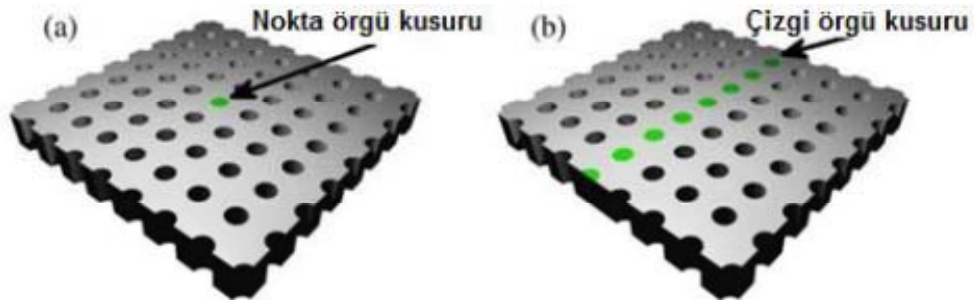
Ters örgü kristal periyodikliğinden kaynaklanmaktadır. Bu periyodiklik ile Brillouin bölgesindeki bantlar ve bu bantların kipleri saptanarak bant yapısı belirlenmiş olur (Şekil 2.10).

2.3 Nokta ve Çizgi Örgü Kusuru

Fotonik kristalde nokta kusurları oluşturulmasının iki amacı vardır: Birinci amaç, ışık ile madde etkileşiminin istenilen düzeye getirilmesidir. İstenilen düzeye getirilen bu etkileşimde verim olarak adlandırılmakta ve bu verimde, Q kalite faktörü ile gösterilmektedir. Kalite faktörü ışığın oyuk içindeki ne kadar zaman geçirdiği ile doğru ilişkilidir ve oyuk içinde tuzaklanan kiplin frekans değerinin fotonik bant aralığının genişliğine (spektral aralık) oranı ile tanımlanmaktadır. Oyuk içinde ışığın geçirdiği vakit arttıkça ışığın madde ile etkileşimi artar. Böylece birim hacimdeki kip yoğunluğu

artmaktadır. Fotonik kristal oyukların kompaktlığı tüm optik devreleri ile uyumunun göstergesidir. İkinci amaç, dar bir spektral aralığı (yani ışık ile madde arasındaki etkileşimin neredeyse hiç olmadığı) göstermektedir. Ama bu durumda, tüm optik devrelerinde yüksek frekans seçiciliği oluşmaktadır. Böylelikle oyuk, ışığı belirli dalga boyu değerlerinde filtrelemiş olmaktadır. Bu durumda haberleşme sistemlerinde kullanımına sebep olmaktadır.

Fotonik kristalde yüzey düzeni düzensizlikleri oluşturularak fotonik bant aralığı dalga boyunda ışığın ilerlemesi sağlanabilmektedir. Örgü kusuru yaratılmasının amacı, yasak enerji bant yapısındaki frekans değerlerinde kılavuzlu kip oluşturmaktır. Kristal örgüsü içinde yaratılan örgü kusurları, ışığın yansımalarını engelleyerek tutunmasına olanak sağlar. Örgü kusurları ikiye ayrılmaktadır: Nokta kusurlar ve çizgi kusurları. 2D fotonik kristallerde sütunların yer değiştirmesi, boşlukların kapatılması, sütun ve boşluk büyüklüklerinin değiştirilmesi örgü kusurları yaratır. Nokta kusurları, ışık tuzaklayıcı oyuk gibi, çizgi kusurlarıysa dalga kılavuzu gibi davranır. Şekil 2.11.a,b'de 2D fotonik kristal içerisindeki nokta ve çizgi örgü kusurları gösterilmektedir.



Şekil 2.11.a. Nokta örgü kusuru yapısı, b. Çizgi örgü kusuru yapısı

Örgü kusurlarının en belirgin özelliği, fotonik bant aralığına denk gelen frekans değerlerinde kılavuzlu kip oluşmasını sağlamaktır. Kristal örgü içindeki örgü kusurları, ışığın yansımalarını engelleyerek tutunmasını sağlar. Örgü kusurları iki türlü incelenebilmektedir: Nokta örgü kusuru ve çizgi örgü kusurları. Buna örnek olarak 2d fotonik kristallerde sütunların hareketi, boşlukların doldurulması, sütun ve boşluk büyüklüklerinin değişikliği örgü kusurlarının oluşumunu sağlar. Nokta kusurları, ışığı

tuzaklayan oyuk gibi, çizgi kusurlarıysa dalga kılavuzu davranışı sergiler. Fotonik bant aralığındaki dalga kipleri dalga kılavuzu içinde sınırlandırılır.

Yasak enerji bant aralığı dielektrik bant ile hava bandının arasında yer almaktadır. Fotonik bant aralığında hiçbir yerleşmiş kip mevcut değildir. Fakat, örgü kusurları fotonik bant aralığındaki frekans değerlerinde yerleşmiş kiplerin oluşmasını sağlamaktadır.

Band aralığının içindeki çözümler kompleks dalga vektörlerine sahiptirler. Örgü kusurlarının olduğu bu kompleks yerlerde üstel değişim olmaktadır. Aralık üzerindeki kip aralık içine alındığında üstel değişimden kaynaklı yeni bir kompleks çözüm gerekmektedir. Çünkü frekans kayması meydana gelmektedir. Frekans kayması dielektrik sabiti değişimi ile sağlanabilmektedir. Dielektrik sabiti değişimi $\Delta\epsilon$ 'nin negatif değerlerinde $\Delta\omega$ frekans kayması pozitif olmaktadır. Bu, dielektrik banda karşılık gelmektedir. $\Delta\epsilon$ arttıkça konum, aralığın içine ilerler. $\Delta\epsilon$ 'nin pozitif değerinde $\Delta\omega$ frekansı negatif olmaktadır. Bu da, hava bandı anlamına gelmektedir. Bu bölüm de aralığın içine düşmektedir. Frekansın kaymasıysa $\omega - \omega_0$ 'a eşit olmaktadır ve

$$\omega = \omega_0 + \alpha (k - k_0) \quad (2.6)$$

olarak yazılabilir. Aralık üzerinde ilk ilerleyen konum (k_0, ω_0) , α pozitif sayı ve ω_0 aşağıdaki frekans için aralık içindeki küçük $\Delta\omega$ için kompleks dalga vektörü

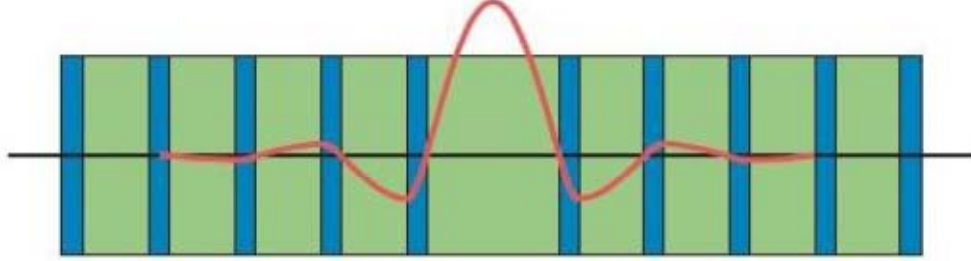
$$k = k_0 \pm i\sqrt{\Delta\omega/\alpha} \quad (2.7)$$

olarak yazılmaktadır. Bu da üstel zayıflamanın oranını gösteren sanal bölümün (fotonik bant aralığı içindeki bölüm) kompleks dalgasının vektörünü gösterir. Daha büyük bandın aralığında $\Delta\omega$ büyük olmakta ve böylelikle de daha kuvvetli bir yerleşme (daha hızlı alan zayıflaması) oluşmaktadır.

2.3.1 Bir boyutta örgü kusurunda yerleşen kipler

Bir boyutlu fotonik kristallerde sadece bir tabakanın genişliğinin ve kırıcılık indisi farklılığının olması kesikli dönüşümün simetrisini kırdığından örgü kusuru

oluşmaktadır. Örgü kusurunda iki kenardaki çok tabakalı film yapıları özel frekans aynası gibi davranarak ışığın sınırlandırılmış bir bölgede yerleşmesini sağlar.

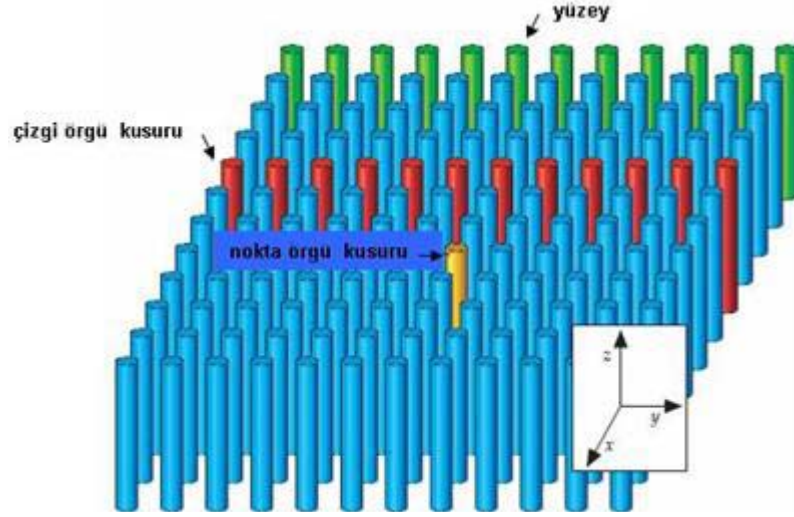


Şekil 2.12 Bir boyutlu fotonik kristal örgü kusurunda yerleşen kip (Joannopoulos vd. 1995)

Şekil 2.12’de gözlemlendiği üzere örgü kusur kalınlığı genişledikçe frekans azalmaktadır. Bunun sebebi de kiplin titreşebilmek için daha fazla uzaya ihtiyaç duyacak olmasındandır. Fotonik kristal örgünün kalınlık artışı hava bandından aralığın içine ardışık kesikli kipleri çekerek kiplerin tuzaklanmasını sağlar. Örgü kusurlarının kenarları yansıtıcı duvar özelliklerinden dolayı ışınan kip sızmaları engellenerek örgü kusurunun dışında elektrik alan büyüklüğünün zamanla azalmasına sebep olur. Başka bir açıdan kalınlığı sabit tutarak bir tek tabaka dielektrik sabitinin artışı veya azalışı frekansın artmasını veya azalmasını sağlar. Böylelikle hava ya da dielektrik bandından aralığın içine kipler çekilmiş olur. Örgü kusurunun yerleşme derecelerinden olan frekansın aralık merkezine yaklaştıkça büyüklüğü artacaktır.

2.3.2 İki boyutta örgü kusurunda yerleşen kipler

Şekil 2.13’de görüldüğü üzere iki boyutlu fotonik kristalde sadece bir sütunun çıkarılması ya da yerinin değiştirilmesi, boyutunun, şeklinin, dielektrik sabitinin değiştirilmesi örgü kusuru oluşmasını sağlar. Fotonik kristal band aralığına denk gelen frekans değerlerinde ışık yansımaya uğrar. Fotonik kristal yapıyı oluşturan çubuklardan biri çıkarılırsa yansıtıcı yüzeylerle çevrilmiş bir oyuk oluşturulmuş olur. Eğer oyukun boyutu ile kip desteklenebilecek büyüklükteyse ışık kaçamaz.



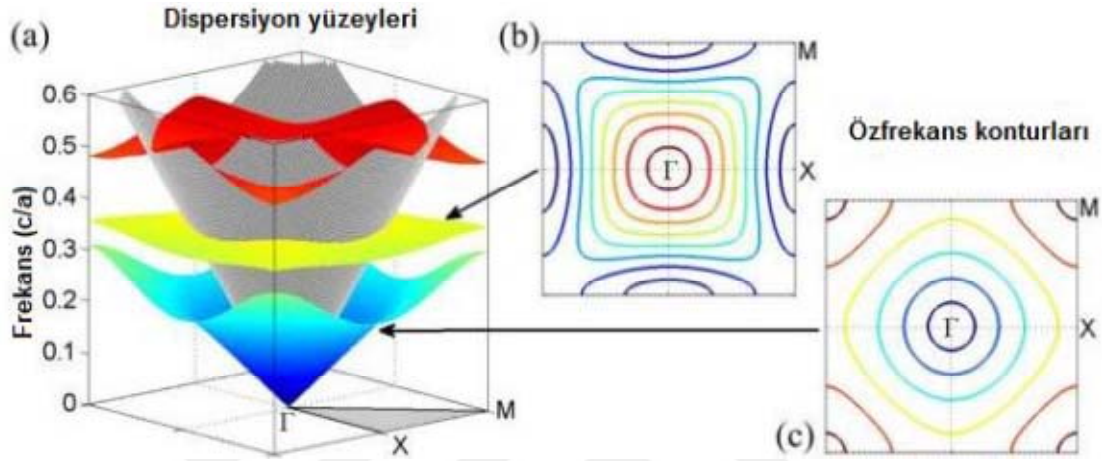
Şekil 2.13 Örgü kusurları ve yüzeyin iki boyutlu durumu (Soukoulis 1996)

Oyuk yansıtıcı yüzeylerle çevrili değilse kipi frekansı, band aralığında tuzağa düşmez; kipler, hava bandı düzeylerinin sürekli dizisi içerisine girer. Artık örgü kusurundan dolayı yerleşmiş kip oluşamaz. Böylelikle kip, örgü kusurunun yanındaki alanın enerjisi ile yoğunlaşmaktadır. Fakat kılavuzlu band, ışık konisinin kenarına varırsa rezonansın seviyesi hacimsel altyapıdan (background) uzakta sonsuza kadar küçük genlikte genişleme oluşur. Bunun oluşması için örgü kusuru ışımaya kipi sızmasını engelleyen yansıtıcı duvarlarla çevrili değildir. Bu durumda sızan kipe sızdırılan kip (leaky mode) veya rezonans kipi denir.

2.4 Fotonik Kristal Dispersiyon Özellikleri

Fotonik kristallerde meydana gelmekte olan karışık optik etkiler birçok araştırmanın nedenini oluşturmaktadır. Öncelikle fotonik kristal birinci Brillouin bölgesi içerisinde dispersiyon yüzeylerindeki optiksel etkiler gözlenmektedir. Şekil 2.14’de iki boyutlu fotonik kristal fotonik bant aralığı gösterilmektedir. Birinci ve ikinci bantların özfrekans konturları fotonik kipleri tanımlar. Γ , X ve M indirgenemez Brillouin bölgesi noktalarıdır. Özfrekans konturları ışığın fotonik kristaldeki yönünü gösteren bir ölçüttür. Bu konturlar aracılığıyla ışık ile madde arasındaki etkileşim belirlenmektedir. Işığın fotonik kristaldeki ilerleyişi ise ışığın kutuplanmasına bağlı olarak gelme açısı ve olağandışı kırılımına bağlıdır.

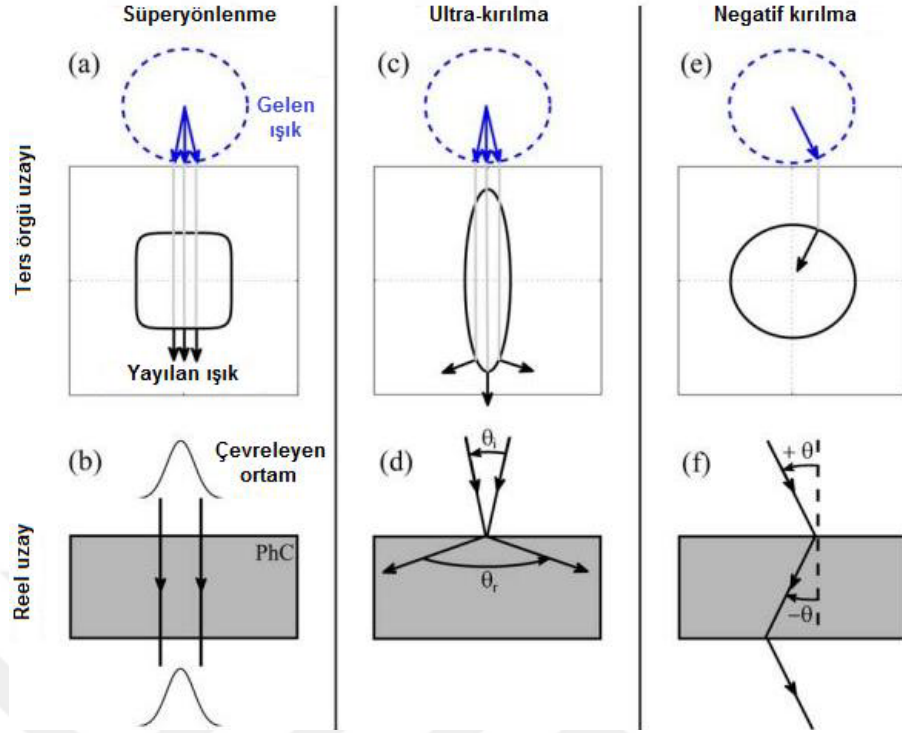
Dispersiyon özelliğine bağlı olarak ara yüzeydeki ışığın sıradışı kırılması dalganın vektör bileşenlerinden teğetsel olanın korunumuna göre gerçekleşmektedir. Bir renge sahip ışığın fotonik kristaldeki kırılımı özfrekans konturları ile belirlenmektedir. Şekil 2.14’de görüldüğü üzere özfrekans konturlarını anlayabilmek bazı kavramların açıklanması ile mümkün olmaktadır.



Şekil 2.14 İki boyutlu fotonik kristal dispersiyon özellikleri (Erdiven 2012)

Süperyönlenme denilen kendi kendine paralelleşme (kendiliğinden kılavuzlu), ters örgü uzayının özfrekans konturlarının sıfır yakınındaki herhangi bir eğrilik değerine sahip olması ile meydana gelir. Şekil 2.15’de birinci ve ikinci bantlara ait özfrekans konturları bükülme noktalarına denk gelen yerlerde kendi kendine kılavuzlu kiplere rastlanır. Düz özfrekans konturlarına göre ışık fotonik kristalin içerisinde saçılmadan yayılabilmektedir. Böylece bu özelliklere sahip kipler demet ayıraçlarına benzer şekilde dalga kılavuzlarının içerisinde kontrol edilir.

Ultra kırılma denilen süperprizma etkisinin özfrekans kontur eğriliği büyük olduğunda ortaya çıktığı görülmüştür. Işık değişik yönlerde yayılabilmektedir. Böylelikle, ışığın kuvvetli olarak saçılabildiği görülmektedir. Bu büyük eğrilikler fotonik bant aralığı bantlarının kenarlarında görülür. Bu eğriler dalga boyu değişimine hassastırlar. Fotonik kristallerdeki bu özellikler dalga boyu bölmeli çoğullamalı (wavelength division multiplexer) durumlardaki gibi kullanılmasına olanak sağlar.



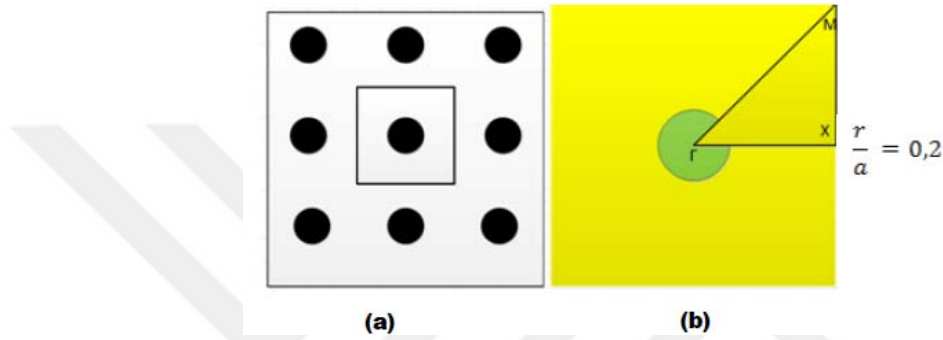
Şekil 2.15 Fotonik kristal içerisinde meydana gelen olağandışı kırılmalar (Erdiven 2012)

Negatif kırılma ise özfrekans konturlarının konveks olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu konturlar, Brillouin bölgesinin M noktası civarında görülmektedir.

2.5 Fotonik Kristal Simetrisinin Bant Yapısına Etkisi

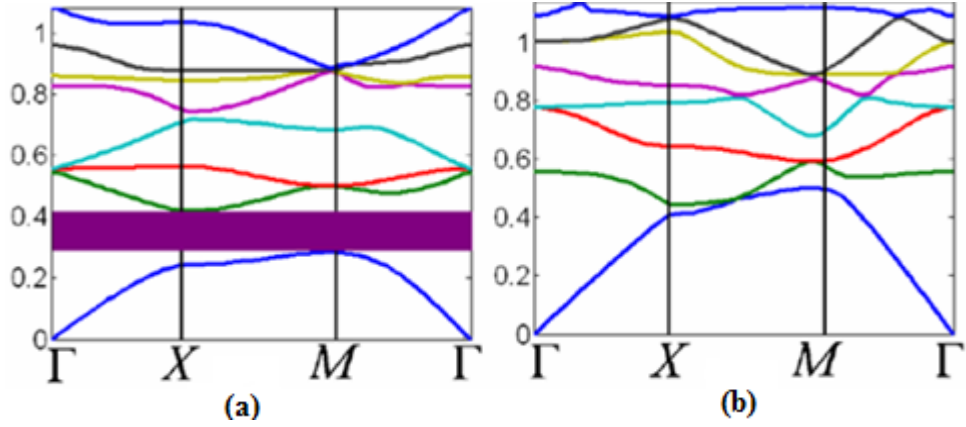
Bir fotonik kristalin örgü simetrisi küçültülerek fotonik bant aralığı genişletilebilmektedir. Fotonik kristalde yaratılan fotonik bant aralığı ne kadar büyükse ilerlemeye yasaklanan frekans aralığı o ölçüde geniş ve bant aralığının merkezindeki frekansın kristalin içerisine sızma olasılığı o kadar azdır. Simetrinin bant yapısındaki etkisi iki farklı örgü tipi, kare örgü ve hibrit üçgen-grafit örgü kullanılarak gözlemlenebilmektedir. Fotonik bant aralığı genişliği, frekans genişliği $\Delta\omega$ 'nın FBA'nın merkezindeki frekansa oranı olarak ve yüzde biçiminde tanımlanır. Bu tanım FBA'nın genişliğini fotonik kristalin boyutlarından bağımsız olarak verdiği için oldukça yaygın olarak kullanılır.

Şekil 2.16.a'daki kare örgülü fotonik kristal yapının ters uzay geometrisi şekil 2.16.b'de gösterilmiştir. Kare örgülü fotonik kristalin yasak enerji bant aralığı indirgenemez Brillouin bölgelerinin kenarlarına denk gelen k dalga vektörlerinde yapının harekete izin verdiği frekansları hesaplayarak bulunur. Bir bandın en küçük ve en büyük değerleri Brillouin alanının kenarlarında görülmektedir. Şekil 2.16.b'deki simetri noktalarından geçen üçgen boyunca frekans değerleri düzlem dalga metodu ile çözülebilmektedir (Johnson ve Joannopoulos 2001).



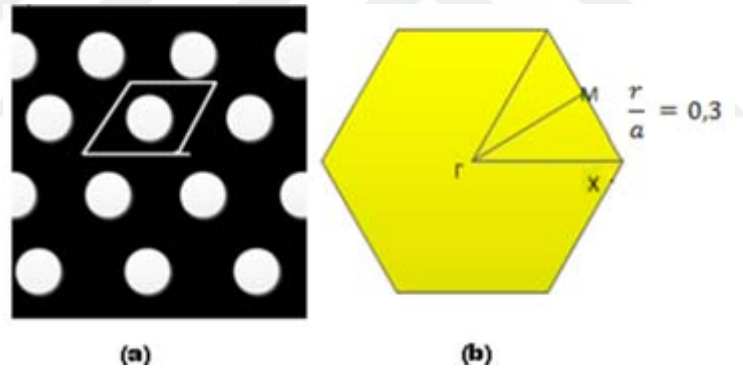
Şekil 2.16.a. Kare örgülü silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal yapısı (Örgü sabiti a , silindirik çubuk yarıçapı $0,2a$ 'dır), b. Ters örgü uzayında simetri noktaları Γ , X ve M

Şekil 2.17'de düzlem dalga metoduyla indirgenemez Brillouin alanı kenarlarındaki simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 2.17.a TM kipi için, şekil 2.17.b ise TE kipi için oluşturulan bant yapılarıdır. TM kipinde elektrik alan doğrultusu çubuklara paralelken, TE kipinde dik olmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere TM kipi için bant boşluğu oluşurken TE kipinde bant boşluğu oluşmamaktadır. TM kipleri fotonik kristale gönderildiğinde ışık bazı frekanslarda (fotonik bant aralığı içindeki frekanslarda) tam yansımaya uğrarken, fotonik bant aralığı dışındaki frekanslarda kırılarak geçmektedir. TM kipinde elektrik alan çubuklara paralel olduğu için yüksek yoğunlaşma olmaktadır (Joannopoulos vd. 2008). TE kipinde, elektrik alan bazı noktalarda, enerjisini dielektrik çubukların dışına doğru zorlamaktadır. Bu da yüksek yoğunlaşma faktörünün önüne geçmektedir. Bu sebeple TE kiplerinde bant aralığı gözlemlenmez.



Şekil 2.17.a. Kare örgülü silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal yapının TM kipi bant yapısı, b. TE kipi bant yapısı (Üstün 2011)

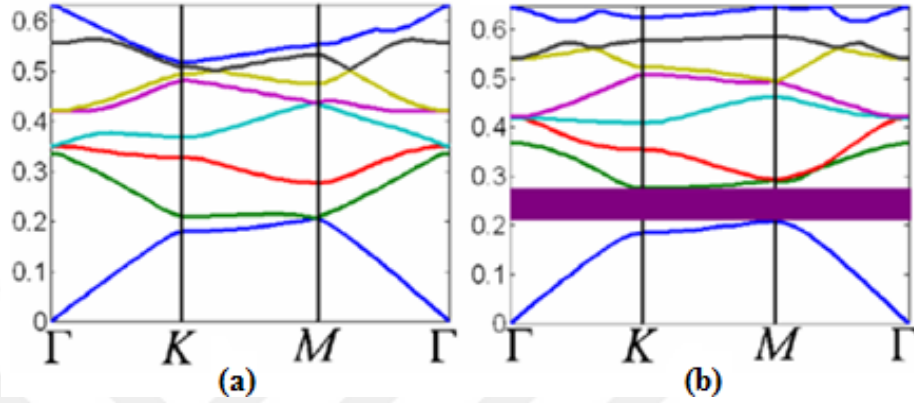
Üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapıyı gözlemleyelim. Bu yapı dielektrik plaka üzerinde oluşturulan silindirik hava boşluklarından oluşturulmuş bir yapı olsun (Şekil 2.18).



Şekil 2.18.a. Üçgen örgülü dizilmiş silindirik boşluklardan oluşan fotonik kristal yapısı (Örgü sabiti a , deliklerin yarıçapı $0,3a$ 'dır) b. Ters örgü uzayında simetri noktaları Γ , X ve M (Şekilde görülen paralelkenar hesap edilen hücredir)

Şekil 2.19'da düzlem dalga metoduyla indirgenemez Brillouin alanı kenarlarında yapılan simulasyonların sonuçları gösterilmektedir. Şekil 2.19.a TM kip için, şekil 2.19.b ise TE kip için oluşturulmuş bant yapılarıdır. Üçgen örgülü fotonik kristal TM kipinde bant boşluğu oluşmazken, TE kipinde bant boşluğu oluşur. TE kiplerinde manyetik alan çubuklara paralel iken elektrik alan çizgileri çubuklara diktir. TE kiplerinde ise gönderilen ışığın bir kısmı yansırken diğer kısım ışık kırılarak geçmektedir. Manyetik alan vektör değişimi hava boşlukları ile dielektrik alan

arasındaki yüzeye paralel olduğundan sürekliliğe sahiptir. Bu yüzden farklı yoğunlaşma faktörleri oluşur. Ancak TM kipinde manyetik alan ara yüzeye dik olduğundan yoğunlaşma faktörü engellenir. Bu yüzden dielektrik plaka üzerine açılmış üçgen örgülü silindirik hava boşluklu yapıda TM kipi için fotonik bant aralığı görülmez.



Şekil 2.19.a. Üçgen örgüye dizilmiş silindirik boşluklardan oluşan TM kipi bant yapısı, b. TE kipi bant yapısı (Üstün 2011)

2.5.1 Simetrinin azaltılmasının kare örgülü fotonik kristalin bant yapısına etkisi

TM ve TE kutuplu fotonik bant aralıkları (FBA) birbirini üstüne bindiği bölgelerde “tam” bant aralıkları elektromanyetik dalga ilerlemesinin kutuplanma doğrultusundan bağımsız bir şekilde yasaklanmasıdır. Böylelikle, tam bant aralığının genişlemesi TM ve TE kiplerinin kutuplanmış ışımaları birlikte yapan birçok iki boyutlu fotonik kristal temelli lazer ve optik dalga kılavuzu için önemlidir. Tam bant aralıkları oluşumu genellikle kırılma indis oranı veya kristalin geometrisi değiştirilerek yapılır. Kristalin geometrisinin simetrisi azaltılarak tam bant aralıkları genişletilebiliyor olması düşüncesi ilk önce Anderson (Anderson ve Giapis 1996) tarafından öne sürülmüştür. İki boyutta üçgen, kare veya altıgen örgülü fotonik kristallerin simetrisi küçültülerek tam bant aralıkları arttırılabilmektedir (Wang vd. 2001, Susa 2002).

3.MATERYAL VE METOD

3.1 Dielektrik Ortamda Elektromanyetik Dalgaların Yayılması

Elektromanyetik dalgalarla ve maddenin arasındaki etkileşim Maxwell eşitlikleriyle açıklanabilir. Elektromanyetik dalgaın elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin aralarındaki ilişki:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = \mu_0 \mu(\mathbf{r}) \mathbf{H}(\mathbf{r},t) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r},t) = \epsilon_0 \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r},t) \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r},t) = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r},t) = 0 \quad (3.4)$$

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{E}(\mathbf{r},t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r},t) \quad (3.5)$$

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{H}(\mathbf{r},t) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r},t) \quad (3.6)$$

$\mathbf{E}$: elektrik alanı, $\mathbf{H}$: manyetik alanı, $\mathbf{D}$: elektriksel yer değiştirme, $\mathbf{B}$: manyetik indüksiyonu ifade etmektedir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times (\mathbf{A}) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \mathbf{A}) - \vec{\nabla}^2 \mathbf{A} \quad (3.7)$$

Maxwell eşitlikleri, vektör özdeşliğiyle birleştirildiğinde

$$\vec{\nabla}^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} \quad (3.8)$$

$$\vec{\nabla}^2 \mathbf{H} = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{H} \quad (3.9)$$

denklemleri elde edilir. $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ve $\mu = \mu_r \mu_0$ denklemlerine göre ϵ_r malzeme elektriksel geçirgenliğini, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini, μ_r malzeme manyetik geçirgenliğini, μ_0 boşluk manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir. Eşitliklerin ikinci derece diferansiyel denklem çözümlerini

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m \exp [i.(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad (3.10)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_m \exp [i.(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Bu eşitlikte $\mathbf{k}$ dalgaının sayısını, w açısal frekansını gösterir.

Eşitlikler son halinde

$$\frac{1}{\varepsilon(r)} \vec{\nabla} \times \{ \vec{\nabla} \times E(r,t) \} = \left(\frac{w}{c} \right)^2 E(r,t) \quad (3.12)$$

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\varepsilon(r)} \{ \vec{\nabla} \times H(r,t) \} = \left(\frac{w}{c} \right)^2 H(r,t) \quad (3.13)$$

şeklinde yazılır. Elektromanyetik dalgaının yayılma hızını

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad (3.14)$$

olarak yazarız. Işığın vakum içerisindeki hızı ise $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ olarak bulunur. Birinci

bölge yani $\varepsilon_r > 1$ ve $\mu_r > 1$ olduğundaki ışık hızı vakumdaki ışık hızından küçüktür. $n = \frac{c}{v}$

bağıntısında ise kırılma indisi $n = \pm \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ şeklinde bulunur. Işık herhangi bir ortamdan diğerine geçiş yaparken hızında oluşan değişimse Snell yasası ile saptanır.

Snell yasası :

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (3.15)$$

Dalga hızı sinyal iletimindeki uygulamalarda önem taşır. Dalga paketlerinin faz ve grup hızları olmak üzere iki farklı hızları mevcuttur.

$$V_p = w/k = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda \cdot f \quad (\text{Faz hızı}) \quad (3.16)$$

$$V_g = \nabla_k w \quad v_g = \nabla_k w \quad (\text{Grup hızı}) \quad (3.17)$$

$$V_g = \frac{\partial w}{\partial k} \quad (\text{Grup hızının büyüklüğü}) \quad (3.18)$$

Elektromanyetik dalgada enerji akışının Poynting vektörü $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ ile ifade edilir. 1. bölgedeki elektromanyetik dalgaların yayılımı sağ el kuralı ile gerçekleşmektedir. Bu kurala göre

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{k} > 0 \quad (3.19)$$

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{V}_g > 0 \quad (3.20)$$

$$\mathbf{V}_k \cdot \mathbf{k} > 0 \quad (3.21)$$

$$\mathbf{V}_p \cdot \mathbf{k} > 0 \quad (3.22)$$

olarak bulunur. Buna göre Poynting vektörüyle dalga vektörü aynı yönlü ve Sağ el kuralı ile boş uzay Maxwell denklemleri :

$$\rho = 0 \quad (3.23)$$

$$D = \epsilon E \quad (3.24)$$

$$B = \mu H \quad (3.25)$$

$$J = \sigma E \quad (3.26)$$

Eşitliklerine göre

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.27)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.28)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \text{ (yük yokken, } \rho=0 \text{)} \quad (3.29)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.30)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitliklerde ρ hacimsel yük yoğunluğunu, $\mathbf{J}$ akım yoğunluk vektörünü, σ ortam iletkenliğini gösterir. Maxwell denklemlerinde $\mathbf{E}$ elektrik alanında ve $\mathbf{H}$ manyetik alanında $e^{i\omega t}$ zamana göre

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{H} = +i\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (3.31)$$

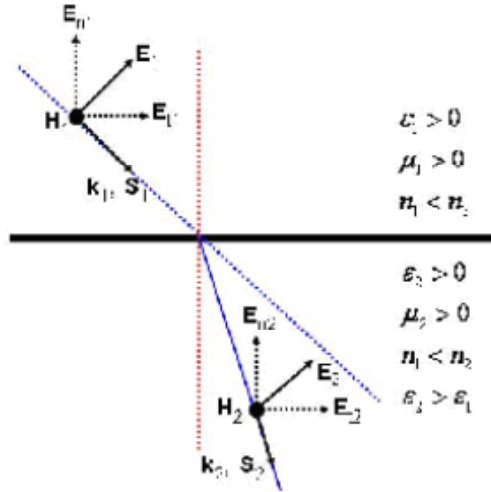
$$\vec{\nabla} \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H} \quad (3.32)$$

yazılı ve aşağıdaki eşitlikler bulunur.

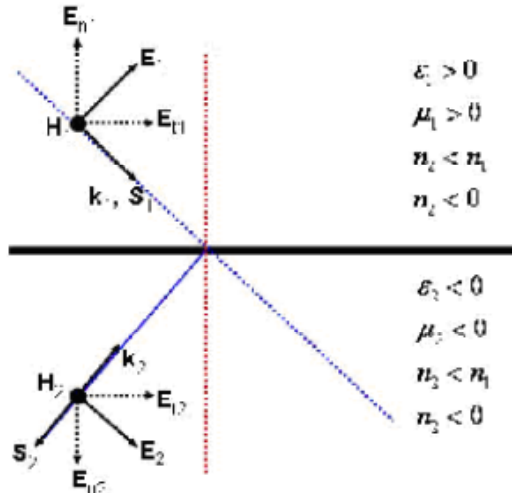
$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (3.33)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = +\omega\mu\mathbf{H} \quad (3.34)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (3.35)$$



Şekil 3.1 $n > 0$ için dalga yönelimi



Şekil 3.2 $n < 0$ için dalga yönelimi

Poynting vektörün, dalga vektörüyle, faz ve grup hızları arasındaki ilişki

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{k} < 0 \quad (3.36)$$

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{V}_g > 0 \quad (3.37)$$

$$\mathbf{V}_g \cdot \mathbf{k} < 0 \quad (3.38)$$

$$\mathbf{V}_p \cdot \mathbf{k} > 0 \quad (3.39)$$

olarak bulunur. Şekil 3.2’de ise $\epsilon_r < 0$ ve $\mu_r < 0$ olduğunda

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3.40)$$

$$n = \pm \sqrt{(-1)\epsilon_r (-1)\mu_r} \quad (3.41)$$

$$n = \sqrt{(-1)(-1)}\sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (3.42)$$

$$n = i\sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (3.43)$$

$$n = -\sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (3.44)$$

Sol el kuralına göre elektrik alan ve manyetik alan, Maxwell denklemlerine göre

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = +\omega|\epsilon| \mathbf{E} \quad (3.45)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = -\omega|\mu| \mathbf{H} \quad (3.46)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (3.47)$$

olarak yazılır. Şekil 3.1 - 3.2'deki durumlardaysa sınır şartları ile elektrik alan tanjant sal bileşeni değişmeyip, sadece elektrik alan normal üzerindeki bileşeni değişmektedir.

Manyetik alan bileşenlerinin tamamı tanjant saldır. Bundan dolayı süreklilik gösterir.

$$\mathbf{E}_{t1} = \mathbf{E}_{t2} \quad (3.48)$$

$$\mathbf{E}_{n1} \epsilon_{r1} = \mathbf{E}_{n2} \epsilon_{r2} \quad (3.49)$$

$$\mathbf{H}_{t1} = \mathbf{H}_{t2} \quad (\text{current free conditions}) \quad (3.50)$$

$$\mu_{r1} \mathbf{H}_{n1} = \mu_{r2} \mathbf{H}_{n2} \quad (3.51)$$

bulunmakta ve kırılma indisi negatif değer almaktadır. Kırılma indisi pozitif veya negatif olduğunda dalganın yayılma yönüne bağlı olarak faz hızı ve grup hızıyla Poynting vektör yönleri şekil 3.6'da gösterilmektedir. İkinci ve dördüncü bölgelerdeyse dielektrik sabiti ya da manyetik geçirgenlikten birisi pozitif diğeri negatifse kırıcılık indisi sanal değeri dolayısıyla bir yayılım ve enerji akışı oluşmamaktadır.

$$n = \pm\sqrt{\epsilon_r \times \mu_r} \quad (3.52)$$

$$n = \pm\sqrt{(-1)\epsilon_r(+1)\mu_r} \quad (3.53)$$

$$n = \sqrt{(-1)}\sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (3.54)$$

$$n = i\sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (3.55)$$

3.2 Düzlem Dalga Açılımı Yöntemi

Periyodik dielektrik yapıların ve bunların yasak enerji bant aralıklarının dağılımlarını belirlemek için kullanılan yöntemlerden biri de düzlem dalga metodu olarak

adlandırılmaktadır. PWM yöntemi öz-frekans ve bir yapının içerisindeki kiplerin öz alan değerlerini saptamak da yararlanılan bir frekans bölgesi (k , ω) tekniğidir.

Tüm yönler boyunca öz değer problemi Brillouin bölgesi sınırlarında çözümlenebilir. Brillouin bölgesi ters örgü uzayında örgünün tam simetrisini belirtir. İndirgenemez Brillouin bölgesi, Brillouin bölgesinin en küçük hacimli bölgesidir ve bu en küçük hacimli bölge içinde fotonik kristallerin dispersiyon özellikleri belirlenir.

Tez çalışmasında bant yapıları hesaplanırken Massachusetts Institute of Technology Üniversitesi tarafından hazırlanan MPB yazılım paketi (Johnson ve Joannopoulos 2001) ve ticari CrystalWave programının Band Çözümleyici modülü kullanılmıştır (<http://www.photond.com/products/crystalwave.htm>). MPB Maxwell denklemlerinin periyodik sınır koşulları özkipleri tamamen vektörel ve üç boyutlu yöntemlerle frekans bölgesinde düzlem dalga kapsamında öntanımlanmış konjuge-gradyent minimizasyon yöntemi ile hesaplayan serbest bir yazılım paketidir (Johnson ve Joannopoulos 2001). MPB özellikle fotonik kristaller için tasarlanmıştır ve Guile/Scheme tabanlı betik dili kullanılmaktadır.

3.3 Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD)

Klasik elektromanyetik teoride bir çok hesaplama için kullanılan simülasyon araçları mevcuttur. Bu hesap araçlarının en iyilerinden bir tanesi FDTD algoritmasıdır. FDTD algoritması Maxwell denklemlerini zamana bağlı çözümlemek için düzgün bir grid içinde uzaya ve zamana ayırır (Taflove ve Hagness 2000). Maxwell curl denklemleri birbirinin uzaysal değişim fonksiyonu olarak alanının zamandaki değişimine göre değişir (Zhang vd. 1990, Joannopoulos vd. 1995, Chuanjian 2006).

Maxwell eşitlikleri

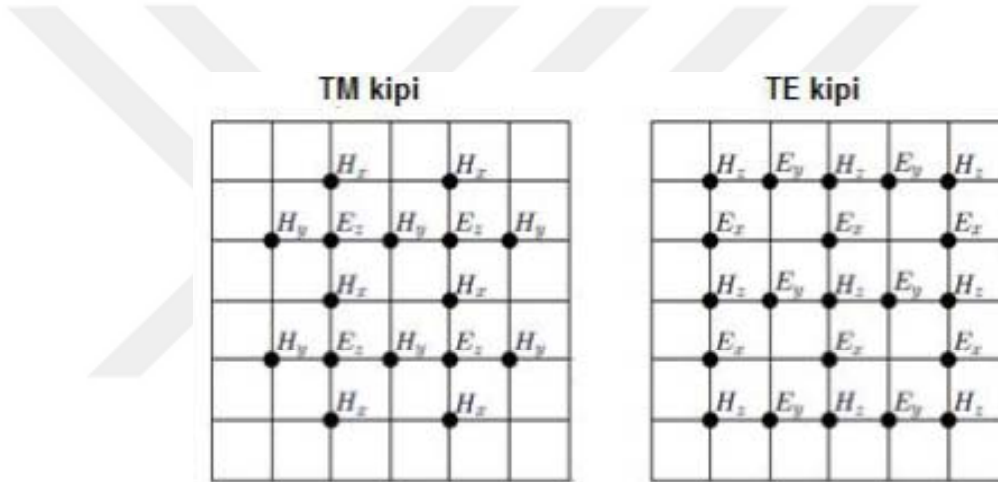
$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0 \mu} \nabla \times E \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \nabla \times H \quad (3.57)$$

Kartezyen ve silindirik eksenlere göre alanlar çözümlenir.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (3.58)$$

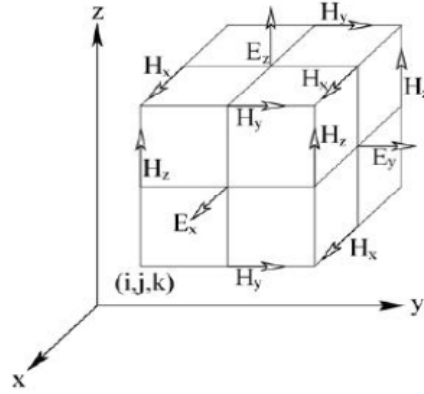
FDTD, uzay ve zamanın içerisinde elektriğin ve manyetik alanın çözümlemelerini hücrelere ayırarak ve bunların her birini yarım piksel alan kaydırıp farklı uzaysal alanlara dağıtırak ayırır. Buna Yee örgü ayrıklaştırılması (Yee grid discretization) denilir. Bu hücrelerin içindeki alanlar TM ve TE kutuplanmalarına bağlı olarak şekillenir. Şekil 3.3’de 2D Yee örgüsü içerisinde, EM dalga bileşenleri TM ve TE kutuplanmaları ile konumları gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Yee örgüsü içindeki TM ve TE dalgalarının 2 boyuttaki dizilimi

Yee örgüsü üç boyutta şekil 3.3’de görüldüğü gibidir. Şekilde gösterildiği üzere elektrik ve manyetik alan bileşenleri belirli bir düzen içinde dizilmektedir. Her bir elektrik alan bileşeni manyetik alanın dört bileşeni ile çevrilidir. Uzaysal hücreye ait bir birleşme noktası $(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ koordinatları ile gösterilir. Δx , Δy , Δz ise x , y , z doğrultularındaki uzaysal çoğalımları gösterir. Benzer olarak, zaman adımında $n = n\Delta t$ olarak ifade edilirken Δt zaman çoğalımını gösterir. Denklem (3.58), aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\frac{E_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \left(\frac{H_y \Big|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - H_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} - \frac{H_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+1}^n - H_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta z} \right) \quad (3.59)$$



Şekil 3.4 Üç boyutlu Yee örgüsü (Taflove ve Hagness 2000)

FDTD’de önemli noktalardan biri de sınır şartlarının belirlenmesidir. Sınır şartları belirtilirken mükemmel uyum tabakaları (Perfect Matched Layers-PML) yöntemi kullanılmaktadır (Berenger 1994). PML katmanının kalınlığı tüm simülasyon alanı içerisinde genellikle bir örgü sabitine denk gelmektedir. Önemli olan diğer bir noktaysa alanların uzayda hızlı değişimine sebebiyet veren yapıların ağ (mesh) yapma durumlarıdır. Bundan dolayı Δt zaman çoğalımı Δx , Δy , Δz uzaysal çoğalma cinsinden gösterilmektedir.

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (3.60)$$

Bu yaklaşımlar ile hesaplananlar, MEEP (MIT Electromagnetic Equation Programme) programı ile yapılmaktadır. MEEP, FDTD yönteminin kullanıldığı bir program çeşididir.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.61)$$

3.3.1 Bir boyutta zamanda sonlu farklar yöntemi

Elektromanyetik dalganın tek z bileşeni olduğunun ve x doğrultusu boyunca ilerlediğinin düşünüldüğünde Faraday ve Amper yasası eşitlik (3.62) ve eşitlik (3.63) de olduğu gibi yazılabilmektedir.

$$-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ \partial / \partial x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_z \end{vmatrix} = -a_y \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.62)$$

$$\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \vec{H} = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ \partial / \partial x & 0 & 0 \\ 0 & H_y & 0 \end{vmatrix} = a_z \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.63)$$

(3.62) ve (3.63) eşitlikleri tekrar düzenlendiğinde,

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.64)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.65)$$

sonucuna ulaşılır. (3.64) eşitliği manyetik alan zamana göre türevinin elektrik alan konuma göre türevi cinsinden, (3.65) eşitliği ise elektrik alan zamana göre türevinin manyetik alan konuma göre türevi cinsinden vermektedir. Zamanın ve konumun uzaylarının parçalı haline getirilmesinden öncesinde alanın konum ve zaman yerleri aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir :

$$E_z(x, t) = E_z(m\Delta x, q\Delta t) = E_z^q[m] \quad (3.66)$$

$$H_y(x, t) = H_y(m\Delta x, q\Delta t) = H_y^q[m] \quad (3.67)$$

Buradaki ardışık iki konum noktaları arası mesafedeyse, zamanda ardışık iki nokta arasındaki süreyi ifade eder. Köşeli parantezler içinde yazılabilen m konum adımlarını, üstel yazılan q ise zaman adımları sayısını göstermektedir. Şekil 3.5’de elektrik alan ve manyetik alan düğüm noktalarının zamanın ve konumun uzay eksenlerinde düzenlenişi bir boyutlu düzlem için gösterilmektedir. Burada kesikli çizgi $t=0$ anını göstermektedir. Altında kalan alan geçmiş, üstte kalan alan ise gelecek olarak düşünülebilir. Geçmiş bölgedeki bütün alanlar bilinmekte, gelecek bölgedekiler ise bilinmemektedir. Kesikli çizgi zaman bölgesinde ötelendikçe bilinmeyen alanlar bilinen olarak değişmektedir.

Elektrik ve manyetik alanları Faraday ve Amper yasalarını uygulayarak bir zaman aralığı için belirleyelim. Bu amaçla şekil 3.5’deki $\left(\left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta x, q\Delta t \right)$ konum-zaman

noktasını başlangıç olarak kabul ederek önce Faraday yasasını kullanarak yarım zaman aralığı ilerleyelim.

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \Big|_{(m+\frac{1}{2})\Delta x, q\Delta t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \Big|_{(m+\frac{1}{2})\Delta x, q\Delta t} \quad (3.68)$$

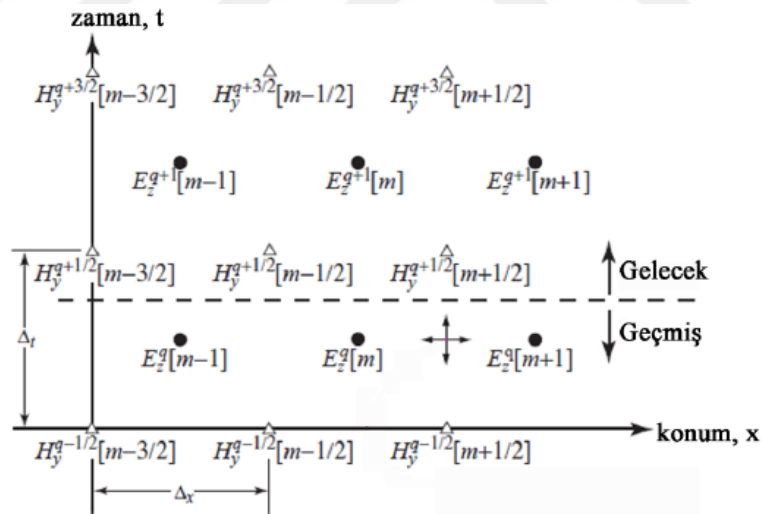
Yukarıdaki eşitlikteki türevleri sonlu farklar karşılıkları ile yazalım:

$$\mu \frac{H_y^{q+\frac{1}{2}} \left[m + \frac{1}{2} \right] - H_y^{q-\frac{1}{2}} \left[m + \frac{1}{2} \right]}{\Delta t} = \frac{E_z^q [m+1] - E_z^q [m]}{\Delta x} \quad (3.69)$$

Buradan $H_y^{q+\frac{1}{2}}$ değeri,

$$H_y^{q+\frac{1}{2}} \left[m + \frac{1}{2} \right] = H_y^{q-\frac{1}{2}} \left[m + \frac{1}{2} \right] + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} (E_z^q [m+1] - E_z^q [m]) \quad (3.70)$$

olarak belirlenir. H_z 'nin gelecekteki değeri geçmişteki değerine ve komşu elektrik alanlara bağlıdır. Her H_z bileşenine uygulandığında geçmişi ve geleceği birbirinden ayıran çizginin yarım zaman dilimi ilerlediği görülmüştür.



Şekil 3.5 Elektrik alan ve manyetik alan düğüm noktalarının zamana ve konuma göre konumları belirlenen nokta için H_y güncelleme denklemini belirtmiştir (Schneider 2011)

Manyetik alan güncellendikten sonra yeni konum-zaman uzayı konumlanması şekil 3.5’de gösterilmiştir. Amper yasasını benzer biçimde $\left(m\Delta x, \left(q + \frac{1}{2}\right)\Delta t\right)$ noktasına uygulayalım:

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \Big|_{(m\Delta x, (q+\frac{1}{2})\Delta t)} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \Big|_{(m\Delta x, (q+\frac{1}{2})\Delta t)} \quad (3.71)$$

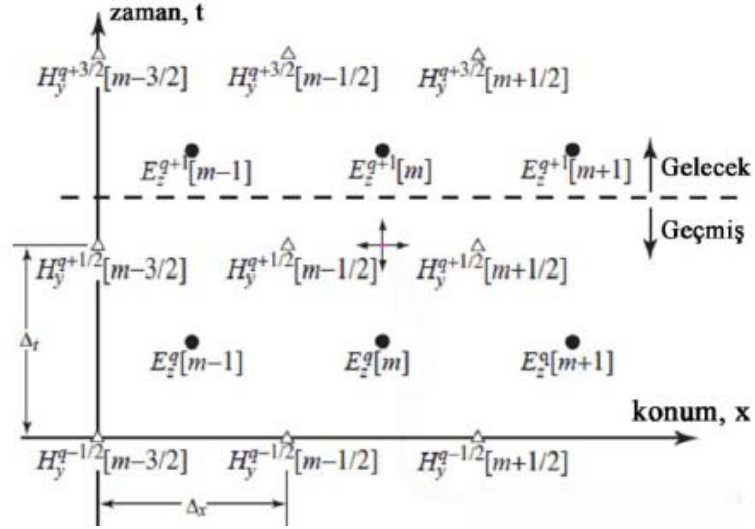
$$\varepsilon \frac{E_z^{q+1}[m] - E_z^q[m]}{\Delta t} = \frac{H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m + \frac{1}{2}\right] - H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m - \frac{1}{2}\right]}{\Delta x} \quad (3.72)$$

Buradan $E_z^{q+1}[m]$ değeri,

$$E_z^{q+1}[m] = E_z^q[m] + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} \left(H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m + \frac{1}{2}\right] - H_y^{q+\frac{1}{2}}\left[m - \frac{1}{2}\right] \right) \quad (3.73)$$

olarak bulunur. (3.73) eşitliği E_z elektrik alanı için revize denklemdir. Revize denklemlerinin indisleri genel ve her H_y ve E_z düğüm noktaları için aynıları geçerliliğini korur.

Manyetik alanın revize edilmiş eşitliğine benzer şekilde E_z ’nin yeni değeri geçmişteki değeri ile komşu manyetik alan değerlerine bağlıdır. (3.73) denklemi her elektrik alan düğüm noktasına uygulandığında geçmiş gelecekte ayıran çizginin yarım zaman aralığı kadar ilerlediği görülmüştür. Elektrik ve manyetik alan bileşenleri bu şekilde belirlenerek konum-zaman uzayındaki tüm elektrik alan ve manyetik alan değerleri çözümlenebilir.



Şekil 3.6 Elektrik alan ve manyetik alan düğüm noktalarının zamana ve konuma göre konumlanması. Belirlenen nokta için E_z güncelleme denklemi belirtilmiştir

3.3.2 Courent koşulu

FDTD yönteminde problemler uygun ızgara koordinat düzlemine yerleştirilmektedir. Izgaranın uzaysal çözünürlüğü Δx ve kesikli zaman adımı Δt ile verildiğinde FDTD yönteminin sayısal kararlılık koşulunu sağlaması için $\Delta t = \frac{\Delta x S_c}{c}$ biçiminde verilmelidir.

Bu denklemde S_c Courent çarpanı ve c ışığın boşluktaki hızıdır ($\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$). Fotonik

kristalin en küçük kırılma indisi $n_{\min}$ ise $S_c < n_{\min} / \sqrt{\#boyut}$ koşulunu sağlamalıdır. Tek boyutlu bir benzetim için S_c 1'dir. S_c 'nin alabileceği en yüksek değer 1 olduğundan FDTD denklemlerinin kararlı olabilmesinin şartı olmasıdır. Bu eşitlik enerjinin zaman içindeki her adımında bulunduğu konumdan bir adım daha fazla yayılamayacağını ifade etmektedir. FDTD yönteminin istikrarlı olması için belirlenen zaman diliminde dalganın en fazla ilerlemesi konum adımını geçmemelidir. Izgara çözünürlüğü ikiye katlandığında zaman adımlarının sayısı da iki kat artırılmalıdır.

İletim, yansıma ve saçılma durumlarının hesaplanması "açık" sınırları gerektirmektedir. Bu şu anlama gelir: İletilen, yansıyan veya saçılan alanlar sonlu hesaplama bölgesinin sınırlarına çarptığında yansıma yapmak yerine sonsuza doğru yol almalıdır. Hesaplama

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

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

3.3.3 FDTD yönteminin avantajları

- Fazlasıyla geniş frekans aralığında çözüm bulmasıdır.
- FDTD rezonans frekansı tam bilinmediğinde ya da istenilen geniş bandlı bulguların elde edilemediği durumlarda uygulanan bir yöntemdir.
- FDTD yöntemiyle istenilen yapılar çok daha kolay ve doğru modellenebilir.
- FDTD yöntemiyle elektriğin ve manyetik alanı oluşturan bileşenler uzayın her bir konumunda doğrudan bulunabilmektedir.

4. ELEKTROMANYETİK DALGALARIN YÜZEY DÜZENİ DEĞİŞTİRİLMİŞ FOTONİK KRİSTALLERDE DAVRANIŞI

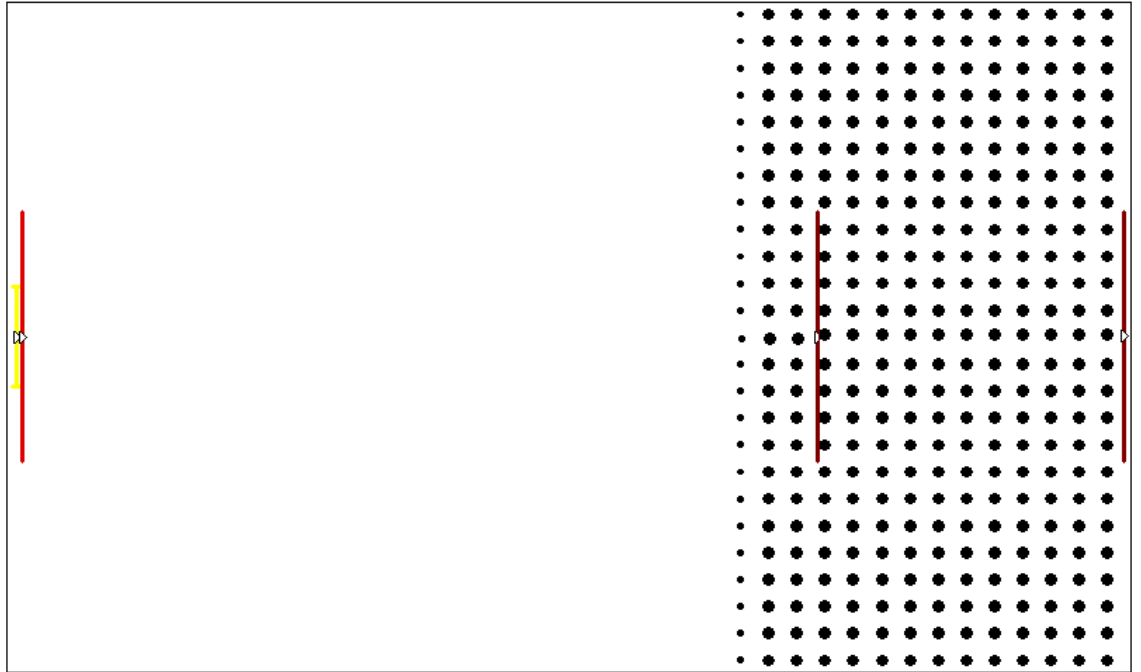
4.1 Giriş

Fotonik kristaller doğada bulunmayan, yapay olarak elde edilebilen, periyodik dielektrik veya metalik malzemelerdir. Periyodik yapıdaki değişiklikler elektromanyetik dalgaların dağıtımında değişikliklere neden olmaktadır. Dağıtımdaki bu değişiklikler fotonik kristallerdeki araştırmaların temelini oluşturmaktadır. Yüzey düzeni değiştirilmiş fotonik kristaller elektromanyetik dalgaların yüzeyde iletimine olanak sağlar. Yüzey düzeni değişikliği olağanüstü ışık iletimine olanak sağlamaktadır. Bu simülasyonda fotonik kristal yüzeyine eklenmiş örgü parametresi fotonik kristalden farklı olan periyodik yapıyı dalga kılavuzu yoluyla yüksek geçirgenlik spektrumu elde etmeyi amaçlıyoruz. Periyodik yüzey düzeni değişikliği fotonik kristalin çıkış yüzeyine eklendiğinde fotonik kristal dalga kılavuzu yolundan yayılan güç dar bir açısız bölgeye sınırlandırılır.

Sonlu fotonik kristaldeki modlar düzlem dalga açılımı yöntemiyle hesaplanmaktadır. Aynı yöntem yeterince büyük birim hücre kullanılarak sonlu büyüklükteki fotonik kristal modlarını tanımlamak için kullanılır. Bu yöntemle TM polarizasyonlu elektromanyetik dalgaları gözlemleyeceğiz. Çalışmalarımızda kullanacağımız fotonik kristal iki boyutlu yuvarlak silisyum çubuklarla kare dizilmiş periyodik bir yapıdır. Şekil 4.1’de fotonik kristali oluşturan çubukların yarıçapı $0.2a$ μm olarak tasarlanmış silisyumun dielektrik sabiti 9.61 ve fotonik kristalin örgü sabiti olan $a=0.54$ μm ’dir. Birim hücresi dikdörtgen bir geometriye sahip, y eksenini boyunca 40 tabakaya ve x eksenini boyunca 1 tabakaya sahiptir; bunun y eksenini boyunca 15 birim hücresi silisyum çubuklar içermektedir kalanı ise serbest uzaydır. Şekil 4.1’deki sonlu fotonik kristalin ve sonsuz fotonik kristalin bant yapılarını hesaplayacağız. Sonlu fotonik kristaldeki bant yapıları üç bölüme ayrılabilir: 1) Havada ve fotonik kristaldeki yayılan modlar, 2) havada yayılan ama fotonik kristalde sönümlenen modlar, 3) havada sönümlenen ama fotonik kristalde yayılan modlar. Sadece havada ve fotonik kristalde genişleyen modlar geçme spektrumunda gözlemlenir.

Fotonik kristal yüzeyi uygun bir yüzey düzeni değişikliği yüzeye eklendiğinde yüzey iletimini destekler. Yüzey düzeni değişikliği yüzeydeki silisyum çubukların yarıçapı küçültülerek sağlanabilir ya da farklı şekillerde silisyum çubuklarla sağlanabilir. Bu çalışmada fotonik kristal yüzeyindeki çubukların yarıçapını $0.2a$ μm 'den $0.1a$ μm 'ye ve aradaki yarıçap değerlerine düşürerek bant yapılarını, yansıma ve geçme spektrumlarını gözlemleyeceğiz. Fotonik kristal bant yapısı düzlem dalga açılımı yöntemiyle gözlemlenecektir.

EM dalgaların geliş yönündeki çubukların yarıçapları değiştirilmiş fotonik kristal yapısı şekil 4.1'de gösterilmiştir. Fotonik kristal bant yapıları şekildeki fotonik kristal yapısı üzerinden yapılmıştır. Çubukların yarıçapları $0.2a$ ile $0.1a$ μm arasında değiştirilerek sonuçlar gözlemlenmiştir. Yüzey tabakası Si çubuklarının yarıçapı $0.1a$ olarak belirlenmiştir.

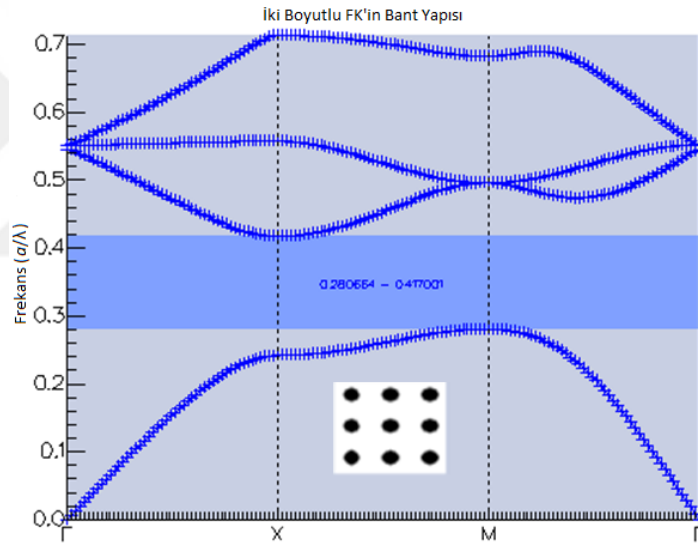


Şekil 4.1 Giriş yüzeyine yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal yapısı

4.2 Fotonik Kristal Bant Yapıları

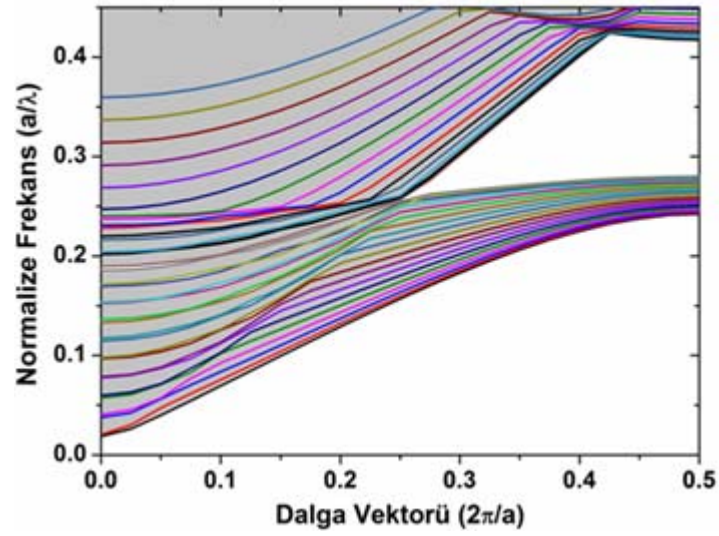
Fotonik kristallerin bant yapıları düzlem dalga yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Fotonik kristal yüzeyinde uygun bir yüzey düzeni değişikliği yaratılarak yüzeyde ilerleyen dalgalar arttırılabilir. Yüzey düzeni değişikliği yüzeydeki çubukların yarıçapı küçültülerek de sağlanabilir.

Şekil 4.2’de örgü parametresi $0.54 \mu\text{m}$ yarıçapı ise $0.2a$ olan Si çubuklarla oluşturulmuş kare örgülü fotonik kristalin yasak enerji bant yapısı verilmiştir. Yasak enerji bant aralığının a/λ değerlerinin 0.280 ile 0.417 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu da $1.3 \mu\text{m}$ ile $1.93 \mu\text{m}$ dalgaboyu aralığına denk gelmektedir.



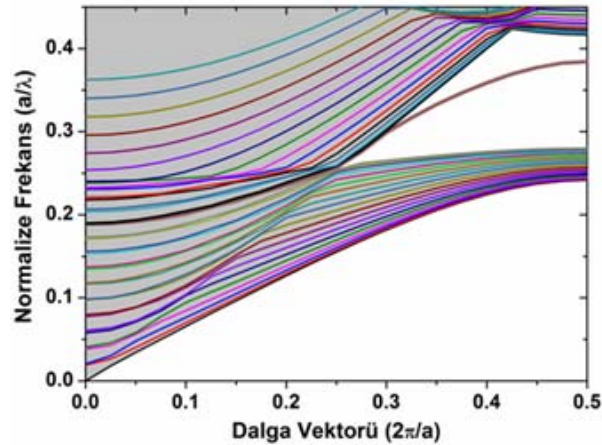
Şekil 4.2 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulan fotonik kristal bant yapısı

Şekil 4.3’de örgü parametresinin $0.54 \mu\text{m}$ yarıçapının ise $0.2a$ olduğu kare örgülü fotonik kristalin bant yapısı verilmiştir. $1a \times 40a$ ’lık dikdörtgen bir süper hücre seçildiğinde dalga kılavuzu ve yüzey düzeni değişikliğinin olmadığı durumlarda yasak enerji bant aralığında herhangi bir kip görülmemektedir.



Şekil 4.3 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulan yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal bant yapısı ve süper hücresi

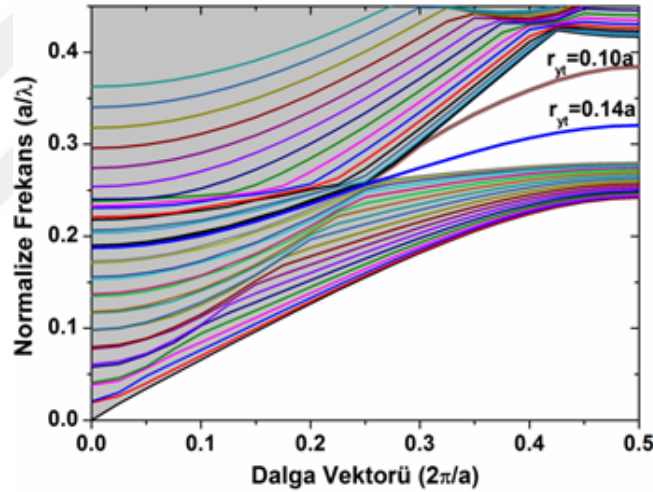
Aynı fotonik kristal yapısında yüzey düzeni değişikliği yapıldığında fotonik kristal yüzeyindeki çubukların yarıçapı $r=0.2a$ 'dan $r=0.1a$ 'ya değiştirildiğinde yasak enerji bant aralığında yüzey tabakasından kaynaklı iletim kiplerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu yapının oluşturduğu $1 \times 40a$ 'lık süper hücre ve bant diyagramı şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulan yatay yönde sonlu uzunluktaki önüne yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal bant yapısı ve süper hücresi

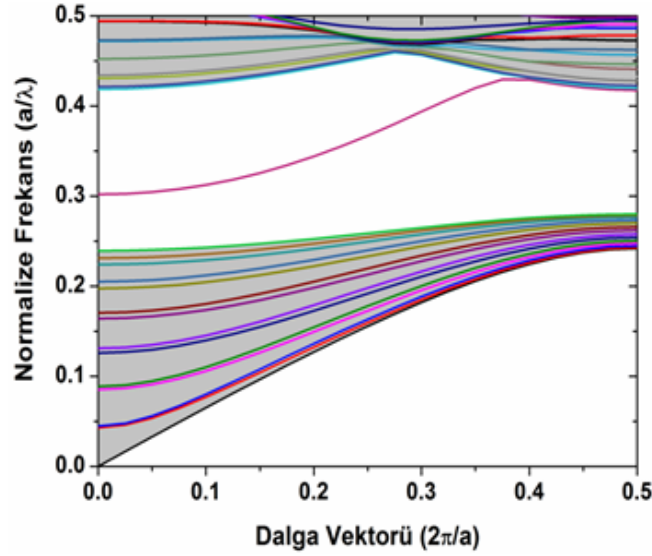
Fotonik kristal yapının bant diyagramlarını incelediğimizde sonsuz büyüklükteki fotonik kristalin TM polarizasyonlu bant yapısı, sonlu büyüklükteki fotonik kristalin bant yapısı ve yüzey düzeni değiştirilmiş fotonik kristal bant yapıları gözlemlenmektedir. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi yüzey düzeni değiştirilmiş fotonik kristal bant yapısının yasak enerji aralığında iletim kiplerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Aynı fotonik kristal yapısında farklı yüzey düzeni değişiklikleri yaratmak amacıyla fotonik kristal yüzeyindeki çubuklarının yarıçapı $r=0.2a$ ’dan $r=0.14a$ ve $r=0.10a$ ’ya azaltıldığında yasak enerji bant aralığında yüzey kiplerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu yapının oluşturduğu $1a \times 40a$ ’lık süper hücre ve bant diyagramı şekil 4.5’de verilmiştir. Yasak enerji bant aralığında oluşan iki farklı yüzey kipi modları da şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulmuş yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal önüne $r_{yt}=0.1a$ ve $r_{yt}=0.14a$ yarıçaplarında yüzey tabakaları eklendiğinde bant yapısı

Benzer şekilde örgü parametresi $0.54 \mu m$ yarıçapı ise $0.2a$ olan Si çubuklu fotonik kristal yapıda çizgi örgü kusuru ile oluşturulan dalga kılavuzunun bant yapısı şekil 4.6’da verilmiştir. Dielektrik çubukların yarıçapı $0.108 \mu m$ ($r=0.2a$) olduğunda $1.3 \mu m$ ($0.417(a/\lambda)$) ile $1.93 \mu m$ ($0.28(a/\lambda)$) arasında TM kutuplu dalgalar için bir fotonik bant aralığı oluşmaktadır. Bu fotonik kristal içerisinde bir çizgi kusuru oluşturularak bant aralığı içerisinde kılavuzlanmış bir kip yaratılmıştır.



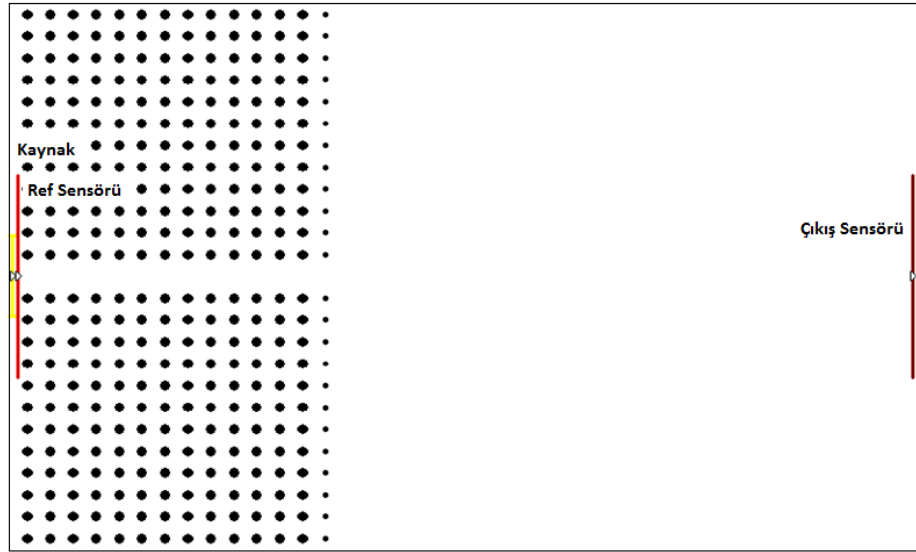
Şekil 4.6 Kare örgülü Si çubuklarla oluşturulmuş fotonik kristal dalga kılavuzu bant yapısı

4.3 Yüzey Düzeni Değiştirilmiş Fotonik Kristal ile Demetleme Özelliğinin İyileştirilmesi

4.3.1 Işığın fotonik kristal dalga kılavuzundan havaya bağlaştırılması

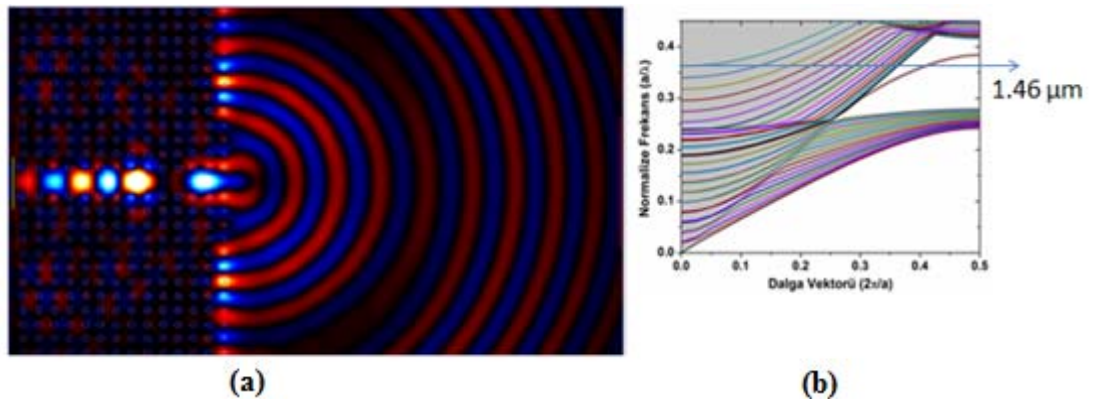
Periyodik yapıdaki değişiklikler elektromanyetik dalgaların dağıtımında değişikliklere neden olmaktadır. Fotonik kristal dalga kılavuzu çıkış yüzeyinde yaratılan yüzey düzeni değişikliği elektromanyetik dalgaların iletim spektrumunda değişikliklere neden olmaktadır. Bu çalışmada fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışındaki yüzey tabakasında yarıçap değerleri değiştirilerek elektromanyetik dalga'nın yüzey tabakasında iletimi sağlanmaktadır.

Şekil 4.7'de $0.2a$ yarıçaplı Si çubuklarla oluşturulmuş kare örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı çıkışına $0.1a$ yarıçaplı yüzey tabakası eklenen periyodik Si çubuk dizilimleri ile oluşturulmuş dalga kılavuzu yapısı görülmektedir. Analizlerimizin hepsinde çıkış sensör konumu $z = 12 \mu\text{m}$ 'de sabitlenerek ölçümler yapılmıştır.



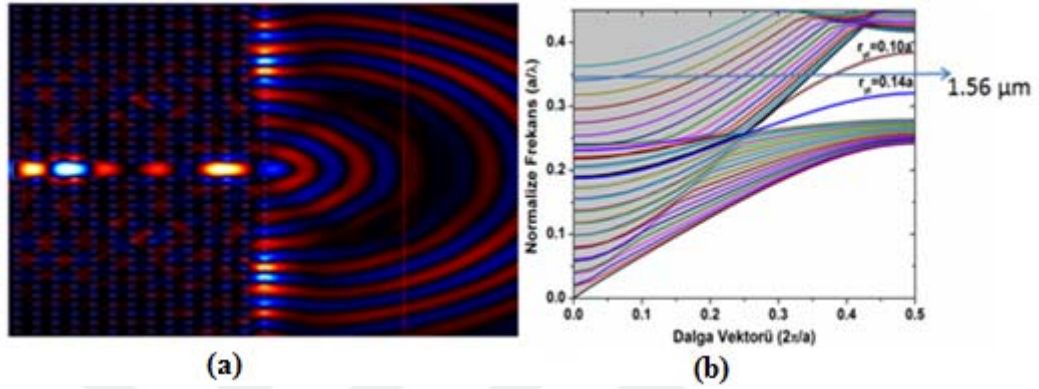
Şekil 4.7 Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı

Şekil 4.8’de fotonik kristal dalga kılavuzunda elektromanyetik dalga kaynak dalgaboyu $1.46 \mu\text{m}$, dalgaboyu kaynak genişliği $\Delta\lambda=1 \mu\text{m}$, yüzey tabakasına eklenen Si çubukların yarıçapı $0.1a$ olarak seçilmiştir. Yüzey mod frekansında elektromanyetik dalga gönderildiğinde dalga kılavuzu çıkış yüzeyindeki $r_{yt}=0.1a$ olan yüzey tabakasında yoğunlaştığı görülmektedir. Elektromanyetik dalga yüzeyde yoğunlaşarak yüzey iletimini sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8.a. Yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna $1.46 \mu\text{m}$ dalgaboyunda elektromanyetik dalga gönderildiğindeki atma ilerleyiş profili b. Kare örgülü yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal önüne $r_{yt}=0.1 a$ yüzey tabakası eklenmiş FK bant yapısı

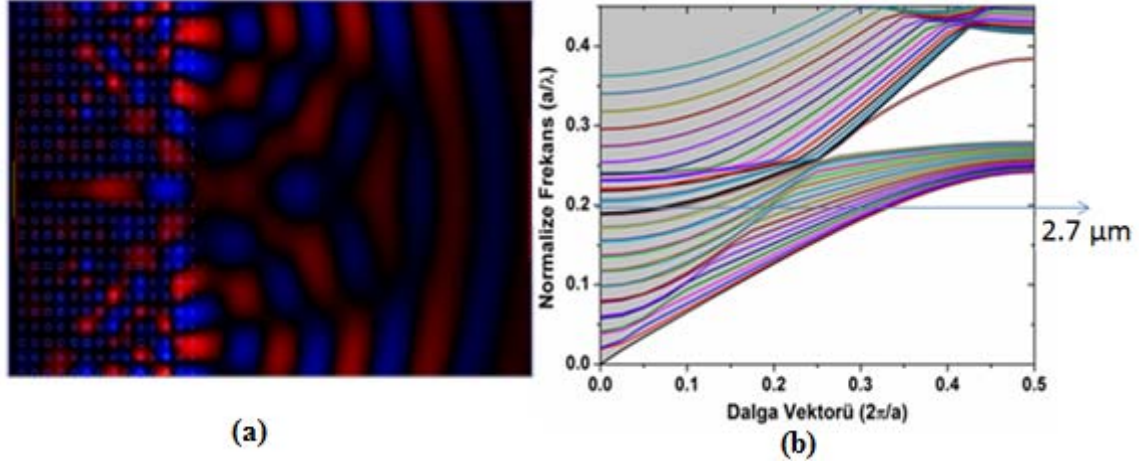
Şekil 4.9’da aynı fotonik kristal dalga kılavuzuna kaynak dalgaboyu $1.56 \mu\text{m}$ olan elektromanyetik dalga gönderildiğinde yüzeyde iletimin yine sağlandığı görülmektedir. $1.56 \mu\text{m}$ ’deki elektromanyetik dalga $1.46 \mu\text{m}$ ’de olduğu gibi yasak enerji bant aralığındaki yüzey düzeni değişikliğinden kaynaklanan yüzey kipini kestiği için yüzey iletimi gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.9.a. $r_{yt}=0.1a$ yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna $1.56 \mu\text{m}$ dalgaboyunda elektromanyetik dalga gönderildiğindeki atma ilerleyiş profili, b. Kare örgülü yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal önüne $r_{yt}=0.1a$ ve $r_{yt}=0.14a$ yarıçaplarında yüzey tabakaları eklendiğinde bant yapısı

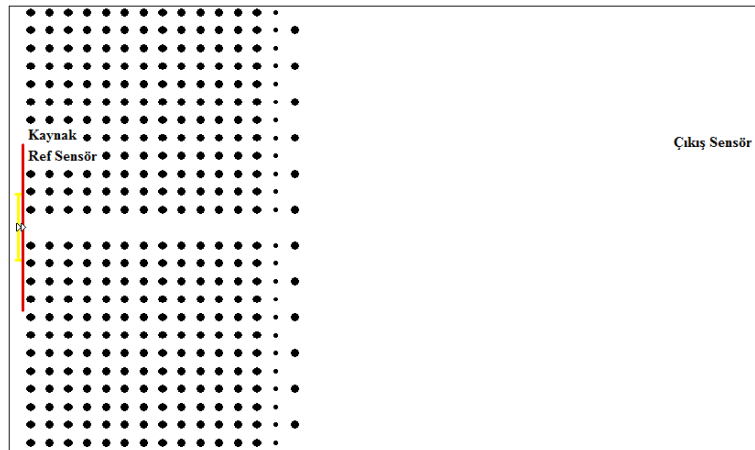
Şekil 4.10’da ise aynı fotonik kristal dalga kılavuzu yapısına kaynak dalgaboyu $2.7 \mu\text{m}$ olan elektromanyetik dalga gönderildiğinde atma ilerleyiş profili görülmektedir.

Şekil 4.10’daki fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profilinden gözlemlendiği üzere yüzey modu uyarılmadığı için elektromanyetik dalga yüzeyde yoğunlaşmamaktadır. Yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna yüzey modu frekansında ve bu değer altında elektromanyetik dalgaların gönderildiği durumlar karşılaştırıldığında yüzey iletiminin şekil 4.8-4.9’da net olarak gözlemlenebildiği görülmüştür. Yüzey mod frekansının altında elektromanyetik dalga gönderildiğinde ise yüzey iletiminin sağlanamadığı şekil 4.10’da görülmektedir. Yüzey iletiminin olduğu yapının atma ilerleyiş profili ışık tek bir kaynaktan yayılıyormuşçasına desen sergilemektedir. Yüzey modunun uyarılmadığı şekil 4.10’da ise yüzey modu uyarılmadığı için elektromanyetik dalga hem kılavuzlanamamakta hem de yüzeyde yoğunlaşmamaktadır.



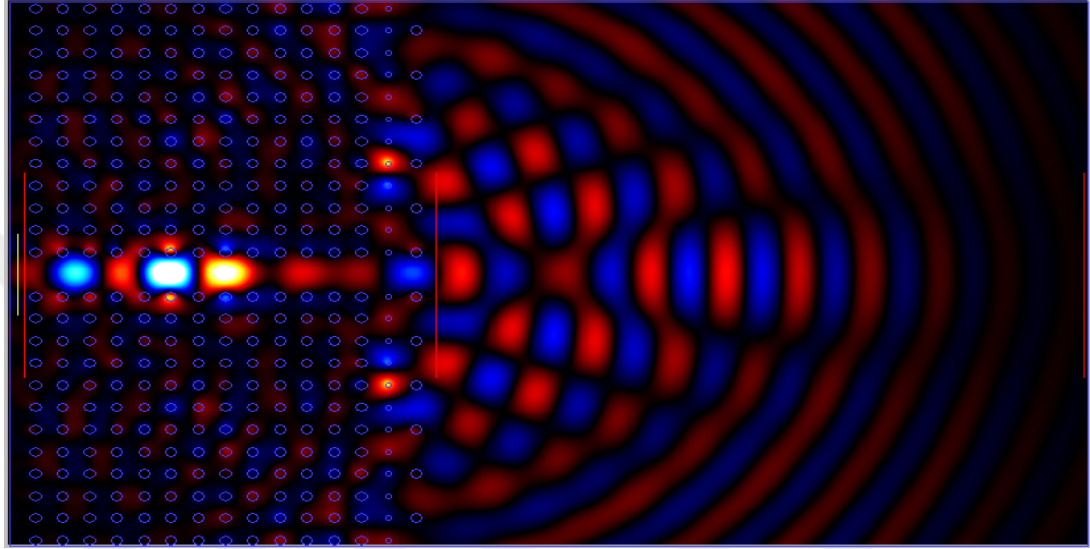
Şekil 4.10.a. $r_{yt}=0.1a$ yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna $2.7 \mu\text{m}$ dalgaboyunda elektromanyetik dalga gönderildiğindeki atma ilerleyiş profili, b. Kare örgülü yatay yönde sonlu uzunluktaki fotonik kristal dalga kılavuzu önüne $r_{yt}=0.1a$ yarıçapında yüzey tabakası eklendiğinde bant yapısı

Yüzey tabakası ile yüzeyde yoğunlaşan elektromanyetik dalgaların yüzey kipinde depolanan elektrik alanı fotonik kristal içinde ve havada sönümlüdür. Elektromanyetik dalgayı havaya bağlaştırmak için kırınım ağı görevi görecek bir tabakaya ihtiyaç bulunmaktadır. Bu amaçla şekil 4.11’de fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına yüzey tabakasının ardından kırınım ağı tabakası da eklenerek ışığın havaya bağlaştırılması amaçlanmaktadır.



Şekil 4.11 Çıkışına yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu

Fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına önce yüzey tabakası sonrasında da kırınım ağı tabakası eklendiğinde elektromanyetik dalga yüzeyde yoğunlaşabilmekte ve sonrasında da kılavuzlanabilmektedir. Böylelikle ışığın demetleme özelliği iyileştirilebilmektedir. Şekil 4.12'deki fotonik kristal atma ilerleyiş profili deseninde de ışığın demetlenebildiği gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.12 Yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili

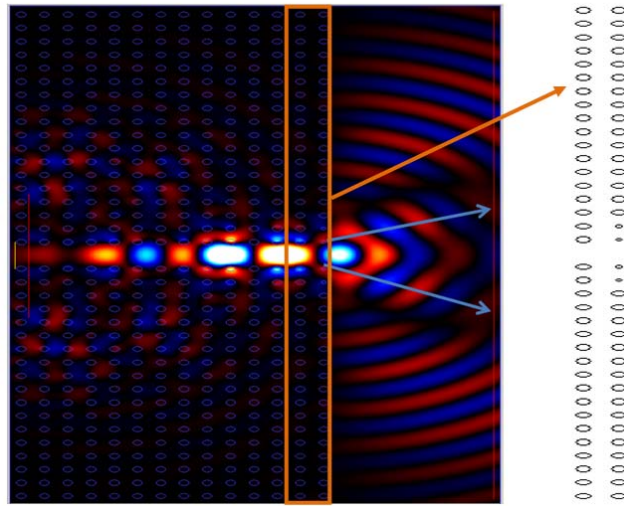
4.4 Fotonik Kristal Demet Bölücü Özelliğinin İncelenmesi

Bu çalışmada silisyum çubuklarla oluşturulan periyodik dielektrik yapılarda yüzey düzeni değişikliği yaratılarak, elektromanyetik dalgaların fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışından havaya demet saçılım profilleri incelenerek odaklayıcılar, 1x2, 1x3, 1x4, 1x5 veya 1x7'lik demet bölücüler tasarlanmıştır. Fotonik kristal dalga kılavuzunun çıkışındaki çubukların yarıçapları değiştirilerek ya da bazı örgü noktalarındaki Si çubukların çıkarılmasıyla nokta kusurları oluşturularak ışığın istenildiği gibi bölünebilmesi veya odaklanabilmesi sağlanabilmektedir.

Fotonik kristal dalga kılavuzu çıkış yüzeyinde dalga kılavuzunu çevreleyen silisyum çubuklarda yarıçap değişimi ile Si çubuk tamamen çıkarılarak nokta kusurları

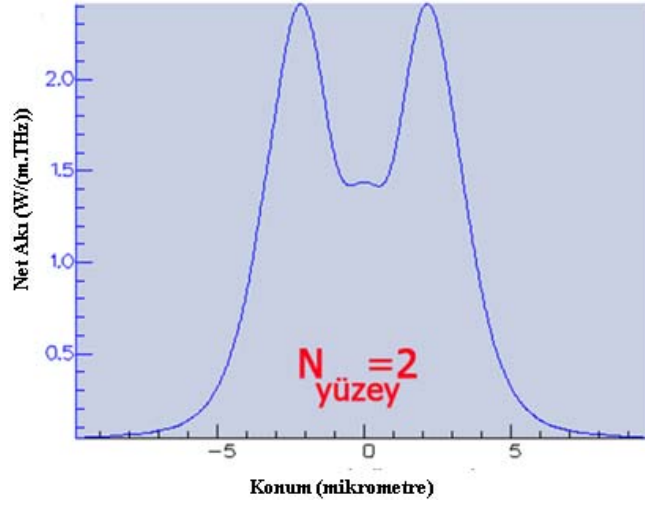
oluşturulduğunda elektromanyetik dalga'nın odaklanabildiği veya eşit güçlerde saçılabilirdiği görülmüştür.

Şekil 4.13'de örgü parametresi $0.54 \mu\text{m}$ olarak tasarlanmış, fotonik kristal yapıyı oluşturan Si çubukların yarıçapı ise $0.108 \mu\text{m}$ ($0.2a$) olarak oluşturulmuştur. Nokta örgü kusurları dalga kılavuzunun çıkışında karşılıklı kenarlarda merkezden başlayarak Si çubukların yarıçapının $0.054 \mu\text{m}$ 'ye ($0.1a$) küçültülmesiyle oluşturulmuştur. Yarıçap değişikliği yapılmış dalga kılavuzu çevresinde iki adet yüzey kusurlu çubuk olduğundan, $N_{\text{yüzey}}(N_y)=2$ olarak belirtilmiştir. Şekil 4.13'de fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışının iki kenarındaki ikişer adet Si çubukların yarıçapı değiştirilerek örgü kusurları oluşturulmuş ve atma ilerleyiş profilleri gözlemlenmiştir.



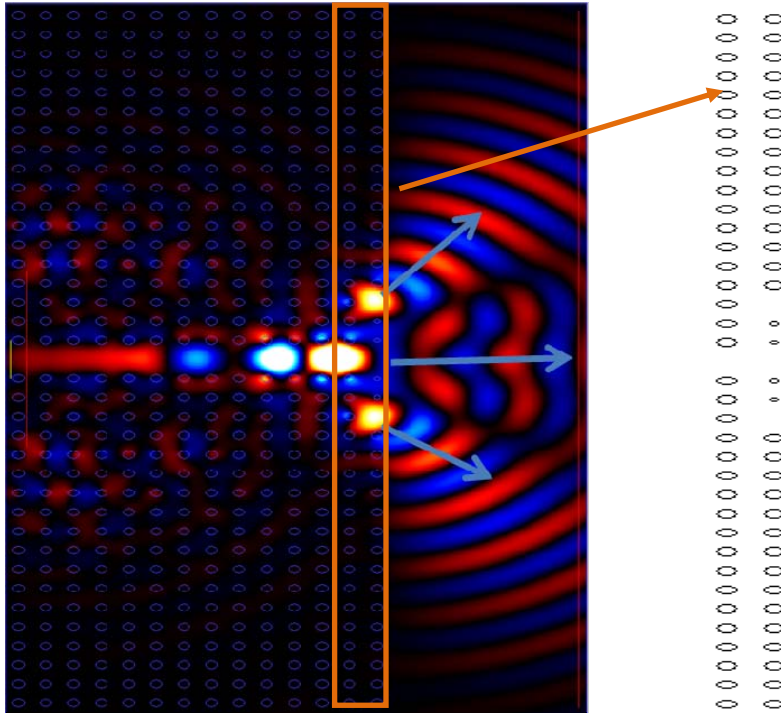
Şekil 4.13 $N_y=2$ fotonik kristal dalga kılavuzu atma profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı

Şekil 4.14'de fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışının kenarlarında ikişer nokta kusuru oluşturulduğunda çıkıştaki çizgi sensör boyunca konuma bağlı geçen net akının ikiye ayrıldığı gözlemlenmiştir. Fotonik kristal yapısı $z=8 \mu\text{m}$ 'de sonlanmakta sonrasında serbest uzay başlamaktadır. Analizlerimizin hepsinde çıkış sensör konumu $z=12 \mu\text{m}$ 'de sabitlenmiştir.



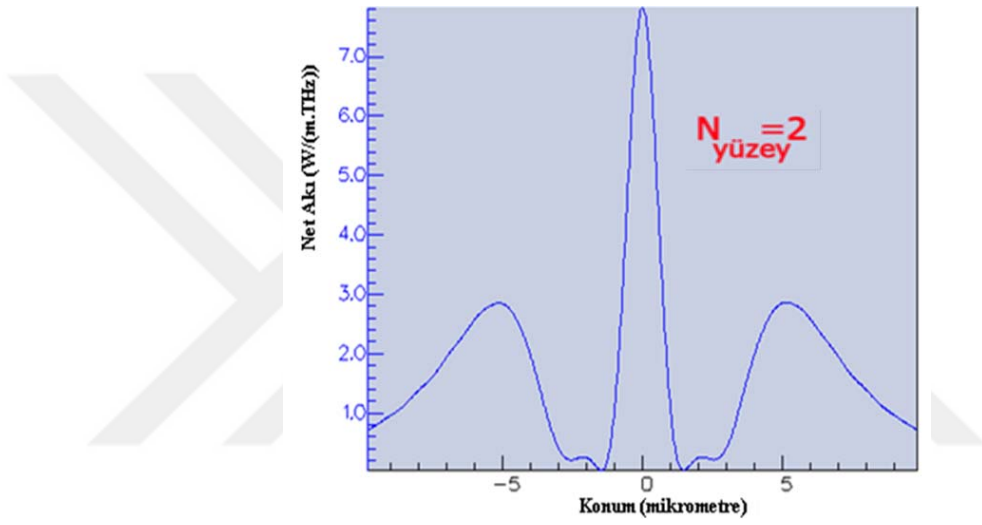
Şekil 4.14 $N_y=2$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.15’de ise fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışının iki kenarındaki ikişer adet Si çubukların yarıçapı değiştirilerek örgü kusurları oluşturulduktan sonra bir boşluk bırakılarak farklı bir örgü kusuru daha oluşturulduğunda atma ilerleyiş profilleri gözlemlenmiştir.



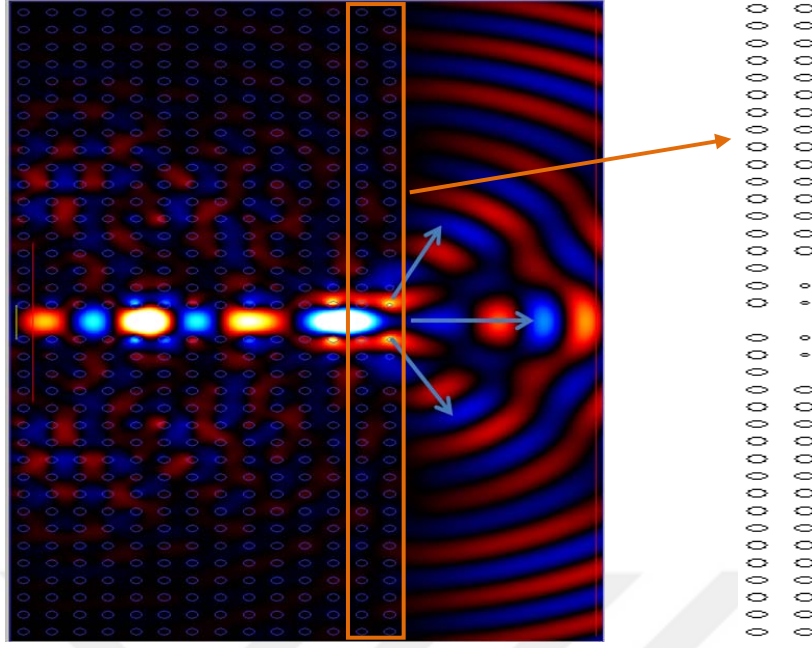
Şekil 4.15 $N_y=2$ ve 1 boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı

Şekil 4.16’da ise şekil 4.15’de atma ilerleyiş profili gözlemlenen yapının çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca geçen net akı değişimine bakıldığında, yarıçapı küçültülerek oluşturulmuş olan iki nokta kusurunun $N_y(N_{yüzey})=2$ ardından bir Si çubuk çıkarılarak boşluk bırakıldığında, bir önceki FK yapıda $N_y(N_{yüzey})=2$ fakat boşluksuz demet bölücü tasarımına göre merkezde geçen net akı değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Gelen elektromanyetik dalganın, merkezde doğrultularak şiddetinin oldukça arttığı ve boşluklu nokta kusurlarından kaynaklı merkez akı profilinin iki yanında birbirine eşit akı bantlarının oluştuğu gözlenmiştir.



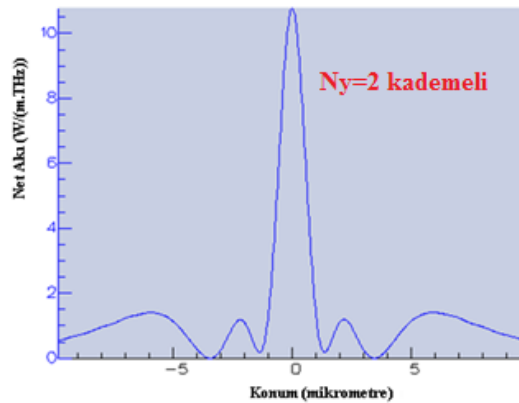
Şekil 4.16 $N_y = 2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.17’de aynı fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının çıkış kenarlarındaki ikişer adet Si çubukların yarıçapı kademeli olarak birinci Si çubuk $r=0.1a$ μm , ikinci Si çubuk $r=0.15a$ μm olarak değiştirildiğinde atma ilerleyiş profili görülmektedir.



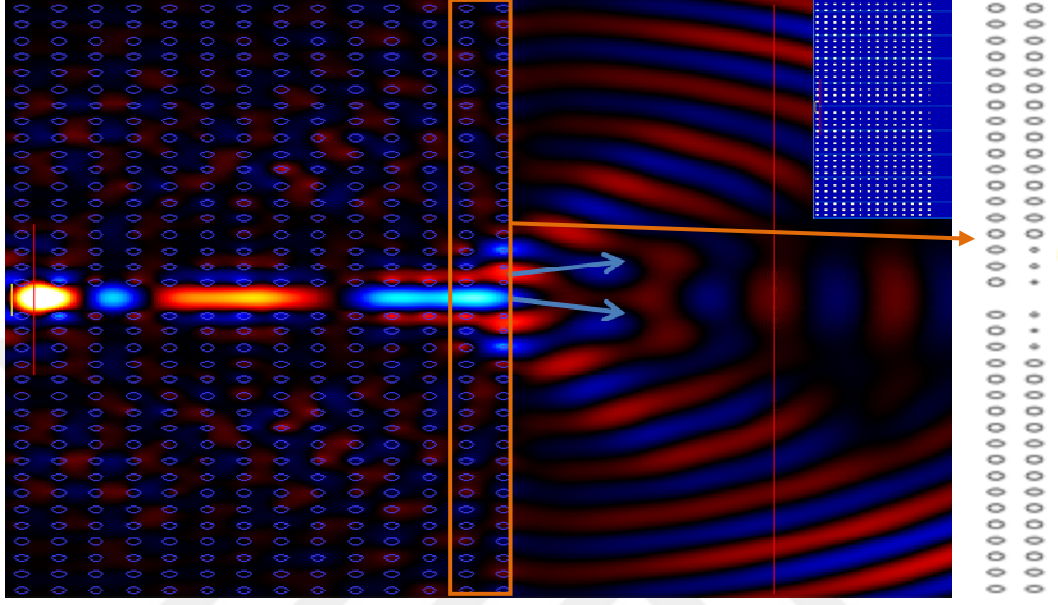
Şekil 4.17 $N_y = 2$ kademeli, birinci Si çubuk $r=0.054$ ($0.1a$) μm , ikinci Si çubuk $r=0.081$ ($0.15a$) μm ve sonrasında bir boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı

Şekil 4.18’de karşılıklı kenarlarda kademeli olarak birinci Si çubuk $r=0.054$ ($0.1a$) μm , ikinci Si çubuk $r=0.081$ ($0.15a$) μm ve sonrasında bir boşluk olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca geçen net akının, kademeli yüzey düzeni değişikliği olmayan yapıya göre daha da arttığı ve merkezdeki akı bandının daha fazla odaklanarak çıktığı görülmüştür.



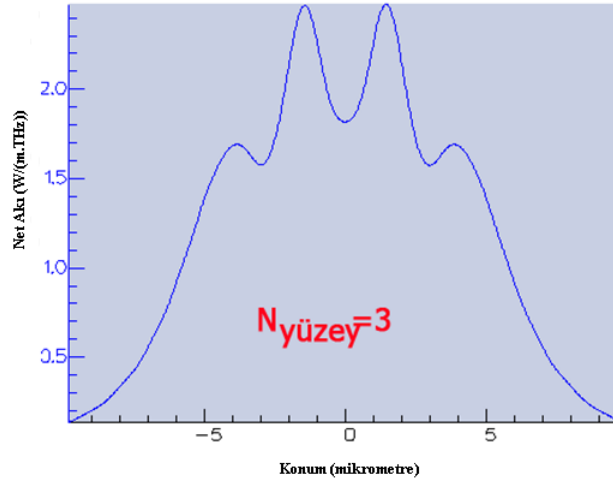
Şekil 4.18 $N_y = 2$ kademeli, birinci Si çubuk $r=0.054$ ($0.1a$) μm , ikinci Si çubuk $r=0.081$ ($0.15a$) μm ve sonrasında bir boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Benzer olarak şekil 4.19'daki yapıda fotonik kristal dalga kılavuzu kenarlarındaki yarıçapları $0.1a$ 'ya düşürülerek oluşturulan nokta kusurlu Si çubukların sayısı üçe arttırıldığında atma ilerleyiş profili gözlemlenmektedir.



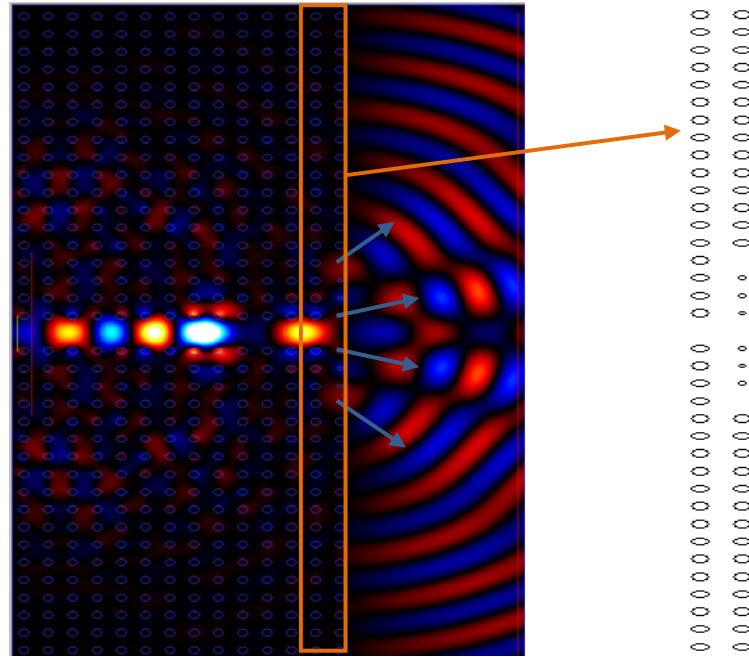
Şekil 4.19 $N_y=3$ fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı

Şekil 4.20'de $N_{yüzey}(N_y)=3$ nokta kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının konuma bağlı grafiğinde gelen elektromanyetik dalganın dörde bölündüğü gözlemlenmiştir. Geçen net akı değerinde ise, $N_y=2$ sonrasında boşluk bırakılmayan fotonik kristal dalga kılavuzu ile karşılaştırıldığında değişiklik olmadığı görülmüştür.



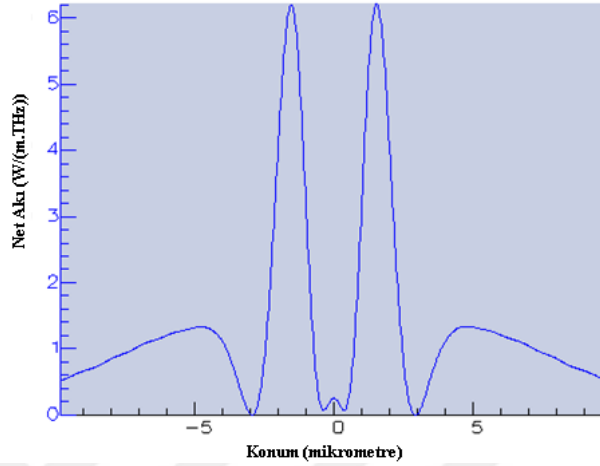
Şekil 4.20 $N_y=3$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.21’de daha önceki yapılarla aynı örgü parametrelerine sahip fotonik kristal dalga kılavuzunun kenarlarında üçer nokta kusuru ardından da birer boşluk bırakılarak oluşturulan periyodik yapı düzensizliklerinde atma ilerleyiş profili gözlemlenmiştir. Atma profilinden de görüldüğü üzere gelen elektromanyetik dalga dörde bölünebilmektedir.



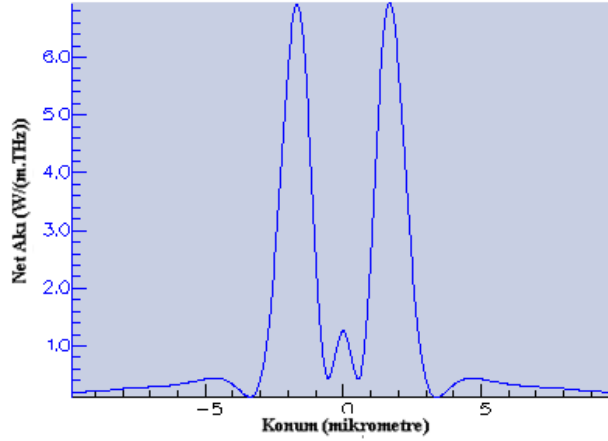
Şekil 4.21 $N_y=3$ ve 1 boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı

Şekil 4.22’de üçer örgü kusurunun ardından bir boşluk bırakılarak bir örgü kusuru daha oluşturulduğunda çıkış sensörüne ulaşan net akının aynı örgü kusuru sayısı fakat boşluksuz fotonik kristal dalga kılavuzu yapısına göre arttığı görülmüştür.



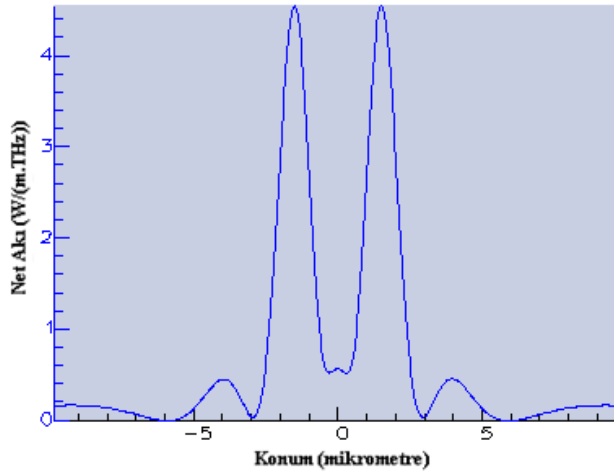
Şekil 4.22 $N_y=3$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.23’de benzer şekilde örgü parametresi 0.54 μm olarak tasarlanmış fotonik kristal yapıyı oluşturan Si çubukların yarıçapı ise 0.108 ($0.2a$) μm olarak belirlenmiş nokta örgü kusurlu dalga kılavuzunun çıkışında karşılıklı kenarlarda merkezden başlayarak Si çubukların yarıçapının kademeli olarak birinci ve ikinci Si çubuk yarıçapları 0.054 ($0.1a$) μm ’ye üçüncü Si çubuk yarıçapı ise 0.081($0.15a$) μm ’ye küçültülmesiyle oluşturulmuş yapının çıkış sensörü boyunca geçen net akısı gözlemlenmektedir. Karşılıklı kenarlarda üçer adet nokta kusuru oluşturulduktan sonra bir boşluk bırakılarak fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı tasarlanmıştır. Boşluksuz yapıya göre bir boşluk bırakılan fotonik kristal dalga kılavuzu yapısından geçen net akı değerinin arttığı görülmüştür. Fakat nokta kusurlarının kademeli olmasının aynı sayıdaki nokta kusurunun kademeli olan yapısına göre sensör boyunca gözlemlenen akı bantlarının, küçük bir mertebede arttığı ve doğrultulduğu görülmüştür.



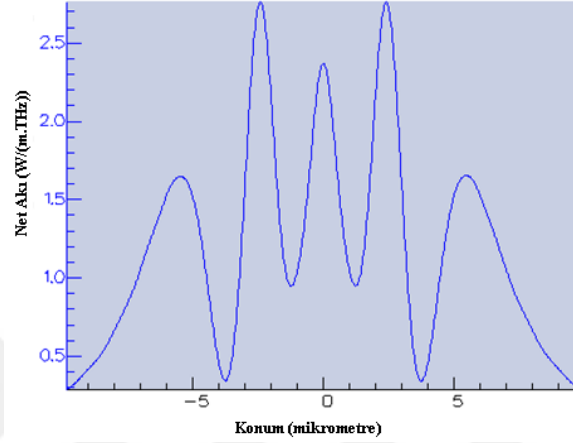
Şekil 4.23 $N_y=3$ kademeli birinci Si çubuk $r=0.054 \mu\text{m}$ ikinci Si çubuk $r=0.054 \mu\text{m}$ üçüncü Si çubuk $r=0.081 \mu\text{m}$ ve sonrasında 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4 \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.24’de fotonik kristal yapısındaki $N_y=3$ nokta kusurlarını oluşturan birinci Si çubuk $r=0.054$ ($0.1a$) μm , ikinci Si çubuk $r=0.0675$ ($0.125a$) μm iken, üçüncü Si çubuğun $r=0.081$ ($0.15a$) μm ’ye çıkarıldığında merkezdeki geçen net akının şekil 4.23’deki konuma bağlı geçen net akı grafiğine göre azaldığı görülmüştür. Yani şekil 4.23’deki yapıdan farklı olarak ikinci nokta kusurlu Si çubuğun yarıçapının $0.1a$ yerine $0.125a$ olduğu durumda geçen net akı değerinin düştüğü görülmüştür.



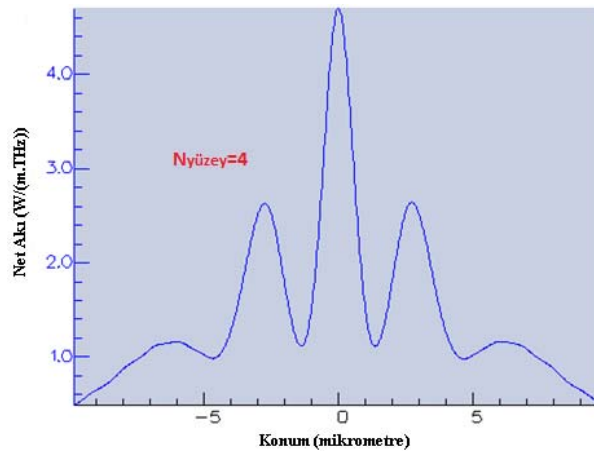
Şekil 4.24 $N_y=3$ kademeli birinci Si çubuk $r=0.054 \mu\text{m}$ ikinci Si çubuk $r=0.0675 \mu\text{m}$ üçüncü Si çubuk $r=0.081 \mu\text{m}$ ve sonrasında 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4 \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.25’de fotonik kristal dalga kılavuzunun kenarlarında üçer nokta kusuru ardından da ikişer boşluk bırakılarak oluşturulan periyodik yapı düzensizliklerinde sensörün uzunluğu boyunca konuma bağlı geçen net akı gözlemlenmiştir. Bu durumda da üçer nokta kusurundan sonra birer boşluk bırakılan yapıya göre demetin daha fazla sayıda bölünebildiği gözlemlenmiştir. Geçen net akı değerinin ise düştüğü görülmüştür.



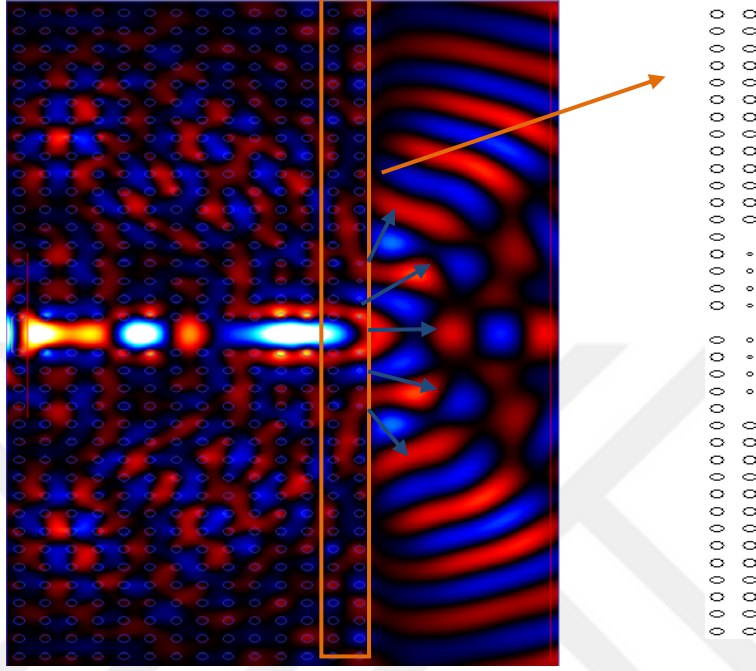
Şekil 4.25 $N_y=3$ ve 2 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.26’da dalga kılavuzu kenarlarındaki nokta kusuru sayısı dörde çıkarıldığında, boşluksuz üçer nokta kusurlu yapıya göre elektromanyetik demetin daha fazla bölündüğü ve merkezde sensöre ulaşan net akının arttığı görülmüştür.



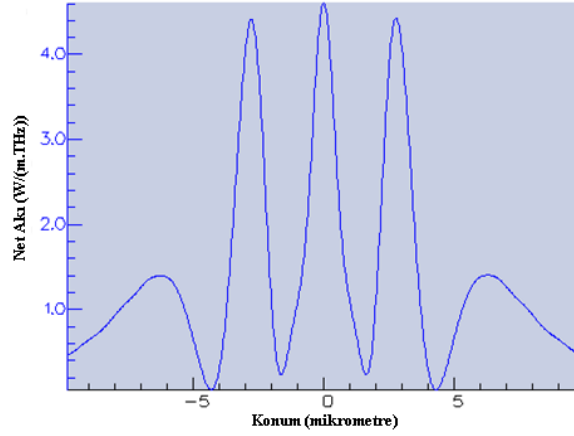
Şekil 4.26 $N_y=4$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.27’de aynı örgü parametreleri ve yarıçap değerlerine sahip fotonik kristal dalga kılavuzunun kenarlarında dörder nokta kusuru ardından da birer boşluk bırakılarak oluşturulan periyodik yapı düzensizliklerinde atma ilerleyiş profili gözlemlenmiştir.



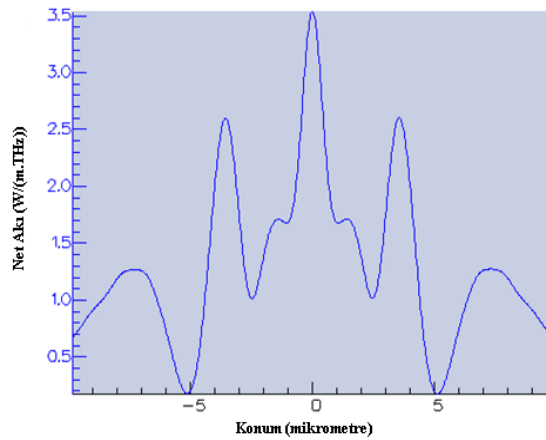
Şekil 4.27 $N_y=4$ ve 1 boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesitinin yapısı

Şekil 4.28’de şekil 4.27’de görülen atma ilerleyiş profilinin konuma bağlı geçen net akı değerlerinin grafiği görülmektedir. İkinci piklerdeki geçen net akı değerlerinin dörder nokta kusurlu boşluksuz yapıya göre arttığı merkez akı bandının değerinde bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Yani $N_y=4$ ’den sonra aynı doğrultuda iki kenarda da birer Si çubuk çıkarılarak nokta kusurları oluşturulduğunda merkezdeki üç akı bandının birbirine eşitlendiği gözlenmiştir.



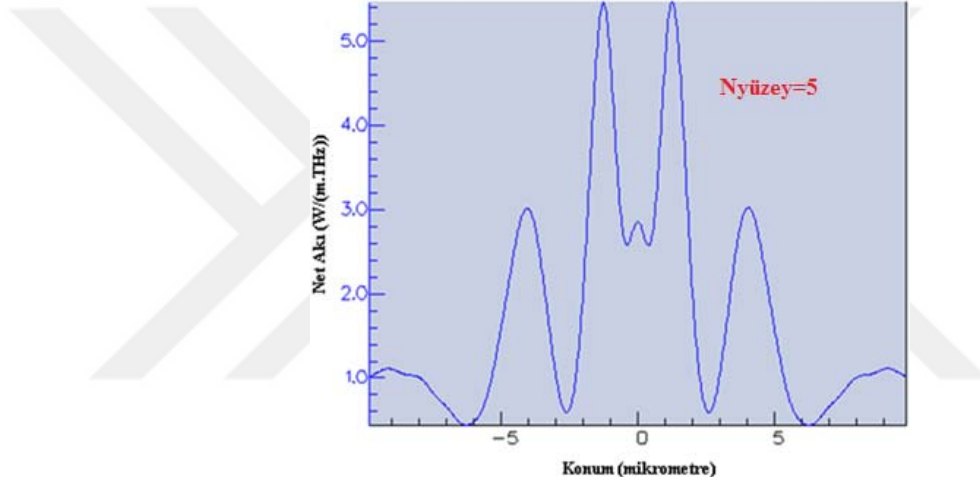
Şekil 4.28 $N_y=4$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.29’da fotonik kristal dalga kılavuzunun kenarlarında dörder nokta kusuru ardından da ikişer boşluk bırakılarak oluşturulan periyodik yapı düzensizliklerinde atma ilerleyiş profillerinin çıkış sensörü boyunca akı bantları gözlemlenmiştir. Nokta kusurlarından sonra birer boşluk bırakılan yapıya göre demetin daha fazla sayıda bölünebildiği ve çizgi sensör boyunca gözlemlenen net akı değerlerinin ise düştüğü görülmüştür. Demetin eşit bölünememesinin sebebi $2a$ kadarlık kaviteelerin elektromanyetik dalganın depolanabilmesine imkan vermemesi ve fazlaca geniş olmasından kaynaklanmaktadır. Boşluklu nokta kusur genişliği $2a$ olarak oluşturulduğunda elektromanyetik dalganın doğrultulması da gözlemlenememektedir.



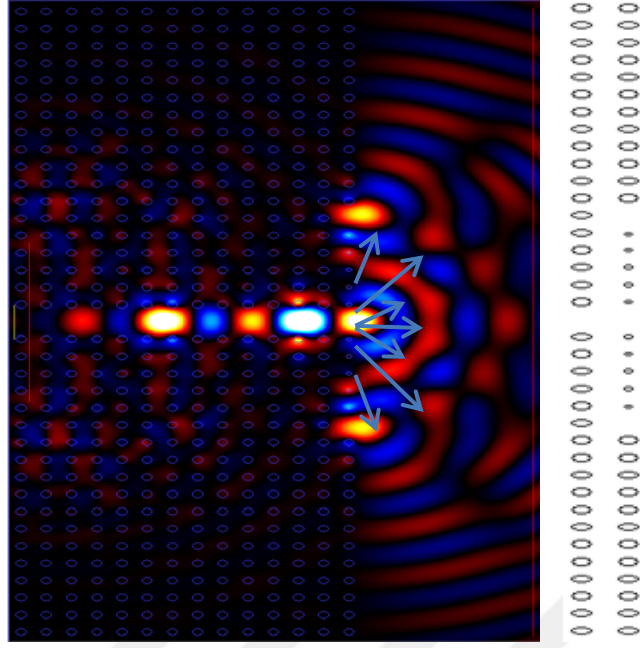
Şekil 4.29 $N_y=4$ ve 2 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.30’da fotonik kristal dalga kılavuzunun kenarlarında beşer nokta kusurlu periyodik yapı düzensizliklerinde konuma bağlı geçen net akı gözlemlenmiştir. Örgü parametresi $0.54\ \mu\text{m}$ olarak tasarlanmış fotonik kristal yapıyı oluşturan Si çubukların yarıçapı ise $0.108\ \mu\text{m}$ ($0.2a$) olarak oluşturulmuştur. Nokta örgü kusurları dalga kılavuzunun çıkışında karşılıklı kenarlarda merkezden başlayarak Si çubukların yarıçapının $0.054\ \mu\text{m}$ ’ye ($0.1a$) küçültülmesiyle oluşturulmuştur. Karşılıklı kenarlarda beşer adet nokta kusuru oluşturularak fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı tasarlanmıştır. Bu durumda çizgi sensör boyunca gözlemlenen akı bantlarının yediye ayrıldığı ve merkez akı değerinin kenarındakilere göre daha zayıf olduğu görülmüştür.



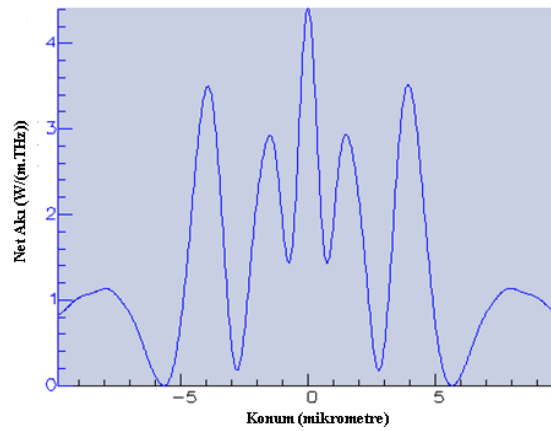
Şekil 4.30 $N_y=5$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.31’de fotonik kristal dalga kılavuzunun kenarlarında beşer nokta kusuru ardından da birer boşluk bırakılarak oluşturulan periyodik yapı düzensizliklerinde atma ilerleyiş profilleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.31 $N_y=5$ ve 1 boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili ve fotonik kristal kesiti

Şekil 4.32’de beş nokta kusurlu ve ardından bir boşluklu fotonik kristal dalga kılavuzu yapısında çizgi sensör boyunca konuma bağlı geçen net akı değerlerine bakıldığında merkezdeki akı bandı değerinin arttığı ama ikinci akı bandı değerlerinin azaldığı üçüncü piklerde önemli ölçüde bir değişim olmadığı görülmüştür. $N_y=5$ olması ile dalga kılavuzundan uzaklaştıkça sensöre ulaşan net akı değerlerinde azalış olmaktadır. N_y sayısı arttıkça demeti eşit olarak bölmenin güçleştiği sonucuna varılmıştır.

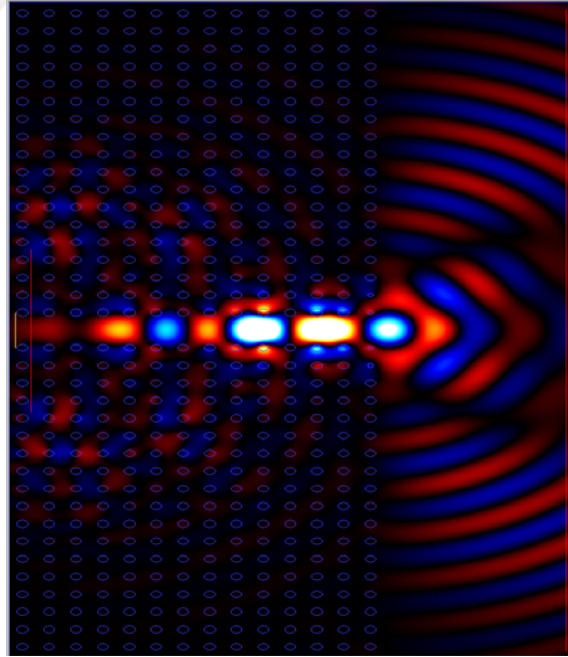


Şekil 4.32 $N_y=5$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

4.4.1 Fotonik kristal dalga kılavuzundan havaya bağlaşan demet bölücü akı profillerinin sensör konumuna bağlı değişimi

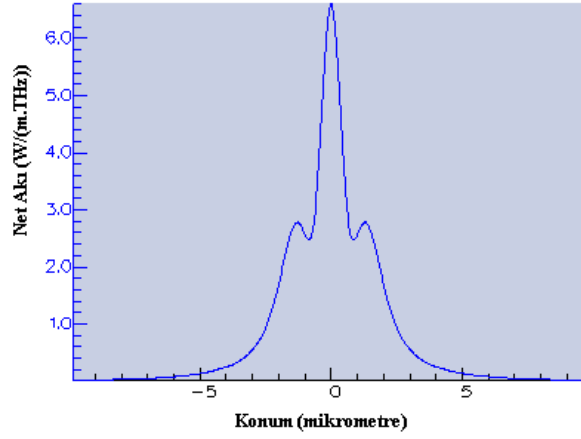
Fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına konumlandırılan sensörün yeri değiştirildiğinde konuma bağlı geçen net akı grafiklerindeki değişime bakılmıştır. Sensör fotonik kristal dalga kılavuzundan uzaklaştıkça geçen net akının da merkezden uzaklaştığı görülmüştür. Simülasyon ortamında tasarlanan fotonik kristal yapısı $z=8 \mu\text{m}$ 'de sonlanmaktadır. Fotonik kristalin belirli bir mesafe ilerisine çıkış sensörleri yerleştirilmiştir.

Sensör konumu analizi için aynı örgü parametresi, Si çubuk yarıçapı ve kusurlu Si çubuk yarıçapı kullanılarak dalga kılavuzu çevresinde iki adet yüzey kusurlu çubuk olan $N_{\text{yüzey}}(N_y)=2$ yapısı seçilmiştir. Şekil 4.33'de fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışının iki kenarındaki ikişer adet Si çubukların yarıçapı değiştirilerek oluşturulmuş örgü kusurları ve atma ilerleyiş profilleri gösterilmiştir.



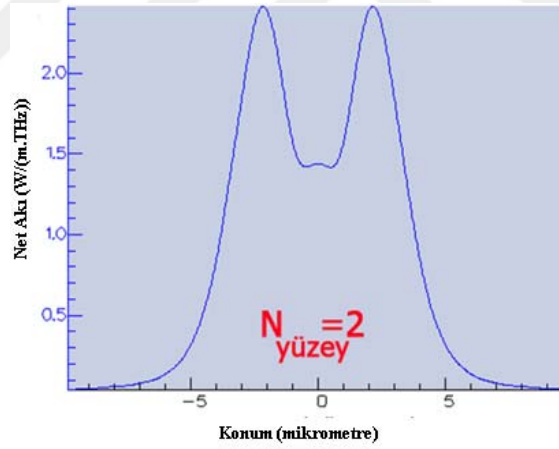
Şekil 4.33 $N_y=2$ fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili

Şekil 4.34'de ise sensör $z=10 \mu\text{m}$ 'de konumlandırıldığında geçen net akının merkez pikinde yoğunlaştığı görülmektedir.



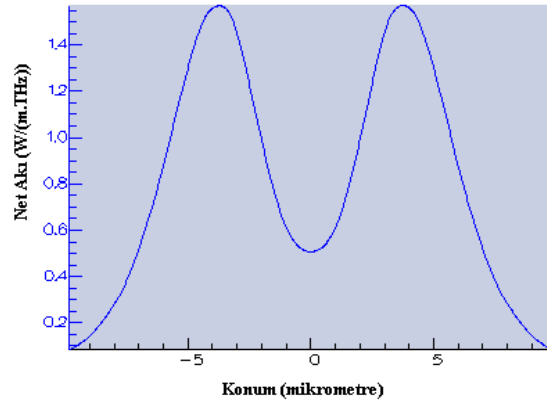
Şekil 4.34 $N_y=2$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $2\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.35’de ise $z=12\ \mu\text{m}$ de konumlandırılan sensörde geçen net akı değerleri görülmektedir. Sensör uzaklaştıkça merkez pik değerinin azaldığı ikincil piklerin arttığı, geçen net akının merkezden uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4.35 $N_y=2$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

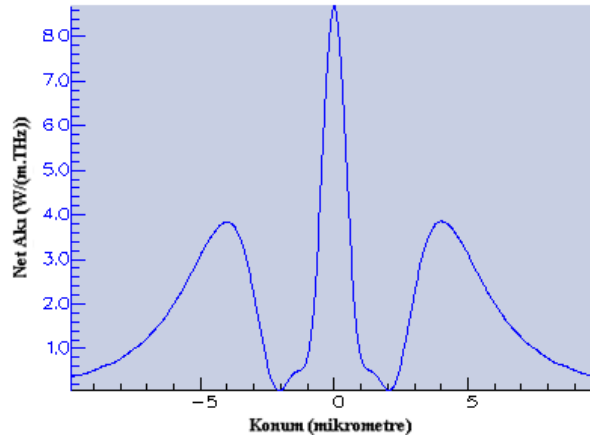
Şekil 4.36’da benzer şekilde sensör $z=15\ \mu\text{m}$ ’ye uzaklaştırıldığında ikiye ayrılmış olan akının merkezden uzaklaştığı ve sensöre ulaşan net akı değerinin düştüğü görülmüştür.



Şekil 4.36 $N_y=2$ olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $7\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

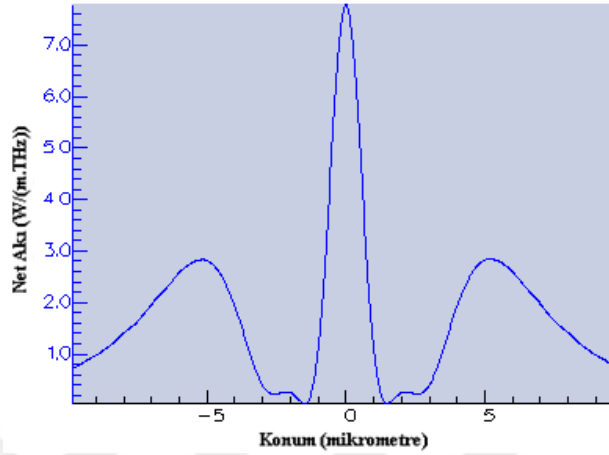
Sensörün bulunduğu yer değiştirilerek konuma bağlı net akı grafikleri karşılaştırıldığında sensör fotonik kristallerden uzaklaştıkça net akının azaldığı ve akı bant genişliğinin arttığı görülmüştür. Sensörün fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına en yakın konumlandırıldığı durumda doğrultmanın (kolimasyon) daha fazla olduğu saptanmıştır.

Aynı analiz $N_y=2$ ve ardından da bir boşluk bırakılarak oluşturulan periyodik yapı için tekrarlanmıştır. Şekil 4.37’de çizgi sensöre ulaşan net akı değerleri gösterilmiştir. Benzer şekilde sensör önce $z=11\ \mu\text{m}$ ’de konumlandırılmış ve sonrasında kademeli olarak uzaklaştırılmıştır.



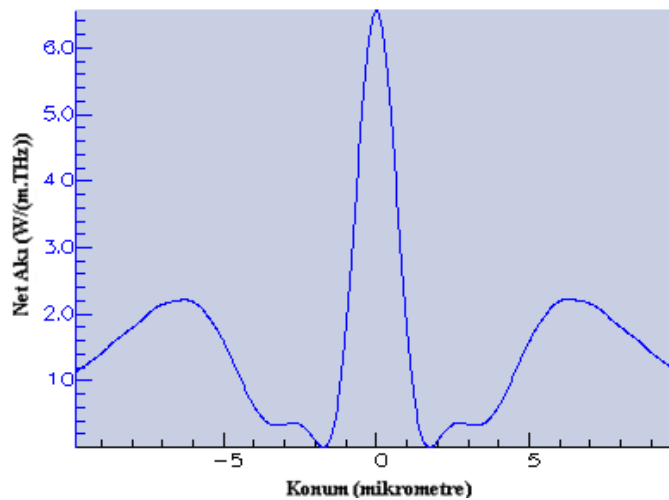
Şekil 4.37 $N_y=2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $3\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.38’de ise aynı fotonik kristal dalga kılavuzu yapısında sensör $z=12\ \mu\text{m}$ konumlandırılarak geçen net akı değerine bakıldığında ise sensöre ulaşan akının azaldığı ve merkezin çevresindeki yan akı bantlarının genişlediği görülmüştür.



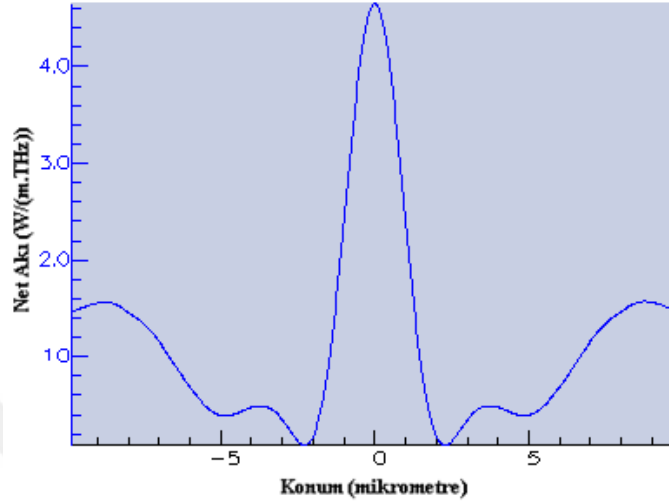
Şekil 4.38 $N_y = 2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $4\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.39’da aynı fotonik kristal yapıda sensör konumu $z=13\ \mu\text{m}$ ’ye uzaklaştırıldığında sensöre ulaşan net akı değerinin azaldığı ve yan akı bantlarının merkez çevresinde genişlediği daha çok görülmüştür.



Şekil 4.39 $N_y = 2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $5\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.40'da da aynı şekilde fotonik kristal dalga kılavuzu yapısından sensör $z=15 \mu\text{m}$ 'ye uzaklaştırıldıkça geçen net akının azaldığı ve konumun da genişlediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.40 $N_y=2$ ve 1 boşluklu olan fotonik kristal dalga kılavuzunun $7 \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Yüzey kusurlu yarıçaplar etrafında nokta kusuru oluşturulduğunda merkezdeki akı bandının daha az genişlemeye uğradığı görülmektedir. Nokta kusuru oluşturmanın hem demetin eşit biçimde bölünmesinde, hem de sensör konum değişikliğinden daha az etkilenmesinden ötürü faydalı olduğu görülmektedir.

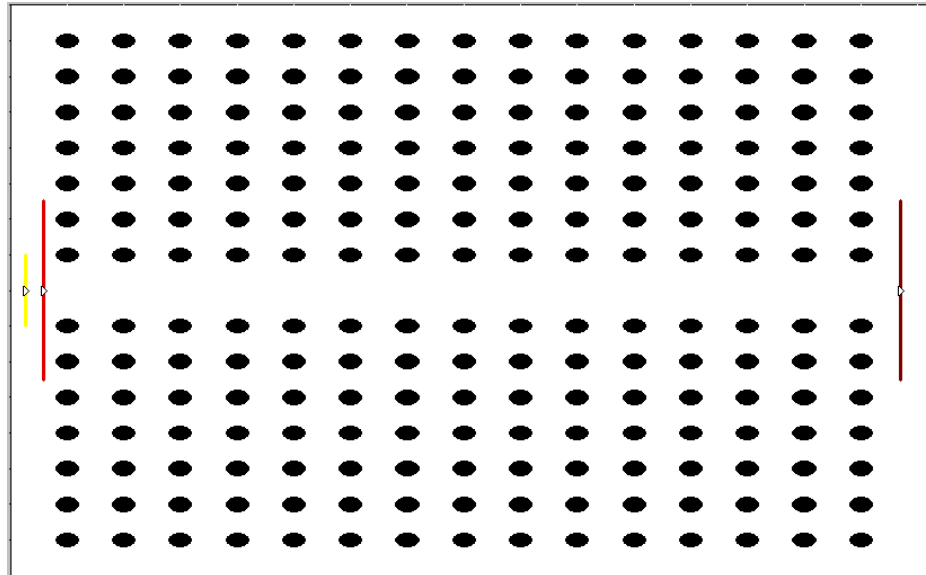
Sonuç olarak bu çalışmalarda yüzey düzeni değiştirilmiş fotonik kristalin yüzey modlarını kullanarak elektromanyetik dalganın doğrultulmasını ve yüzey modları uyarılarak elektromanyetik dalga iletiminin sağlanması gözlenmiştir. Fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına dalga kılavuzunu çevreleyecek biçimde ikişer, üçer veya dörder yüzey kusurlu ($r=0.1a$) Si çubuk yerleştirilip ardından aynı doğrultuda birer nokta kusuru oluşturulduğunda N_y-1 tane iletim bandının oluştuğu gözlenmiştir. $N_y=5$ ve daha yüksek N_y değerleri için ise eşit güçte N_y-1 adet iletim bantları oluşturulamamıştır. Yüzey kusurlu yarıçaplar etrafında nokta kusuru oluşturulduğunda merkezdeki akı bandının daha az genişlemeye uğradığı görülmektedir. Nokta kusuru oluşturmanın hem

demetin eşit biçimde bölünmesinde, hem de sensör konum değişikliğinden daha az etkilenmesinden ötürü faydalı olduğu saptanmıştır.

4.5 Işığın Çıkışta Yüzey Düzeni Değiştirilmiş Fotonik Kristal Dalga Kılavuzundan İletim Spektrumları

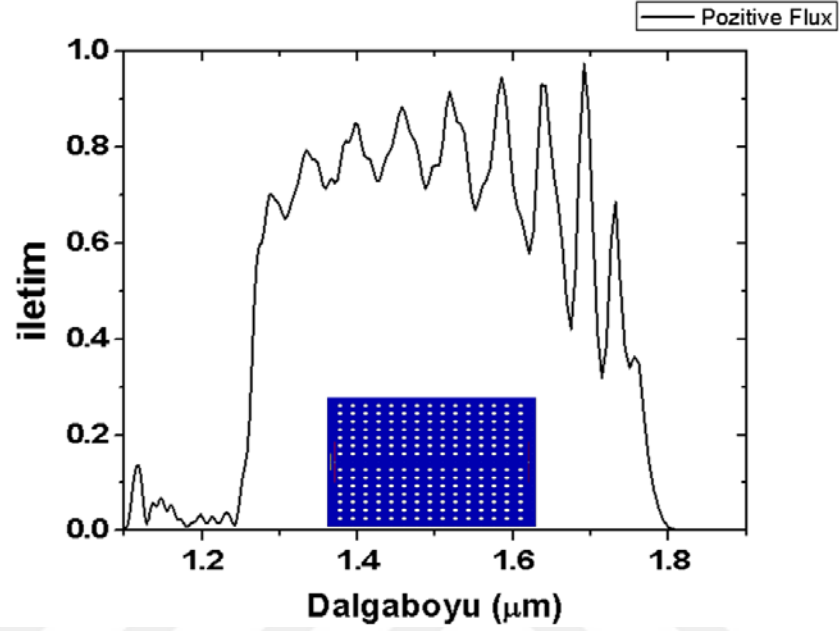
Bu çalışmada kare örgülü hava içinde Si dielektrik çubuklar kullanılarak bir demet bölücü tasarlanmıştır. Bu amaçla fotonik kristal dalga kılavuzu yüzeyinde yüzey kusurları oluşturularak meydana gelen yüzey modlarından yararlanılmıştır. Yüzey kusurları fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına yerleştirildiğinde ise farklı tasarımlarla gelen ışık demetinin odaklanması, eşit güçte olarak ikiye veya üçe ayrılması sağlanmıştır. Bu yapıların entegre optik devrelerde yüksek uygulama potansiyeli bulunmaktadır.

Şekil 4.41’de örgü parametresi $0.54\ \mu\text{m}$ olarak tasarlanmış fotonik kristal yapıyı oluşturan Si çubukların yarıçapı ise $0.108\ \mu\text{m}$ ($0.2a$) olarak oluşturularak fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı tasarlanmıştır.



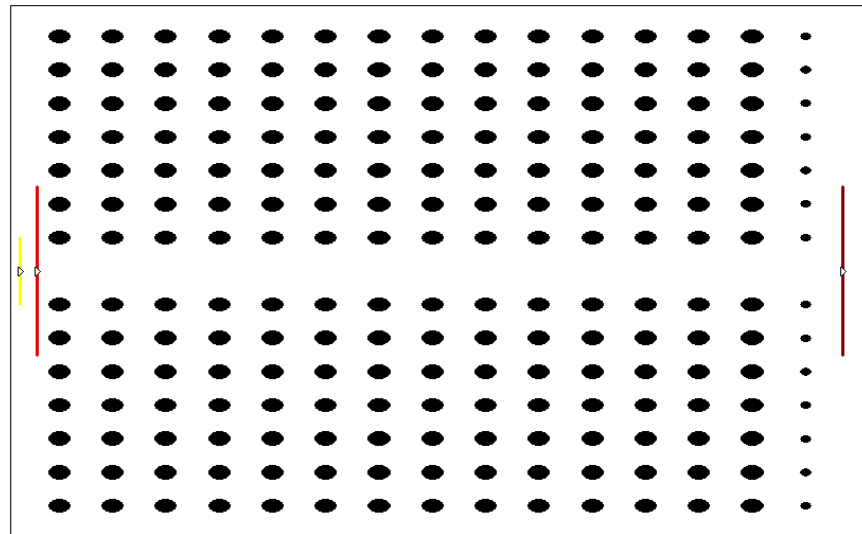
Şekil 4.41 Yüzey düzeni değişikliği yapılmamış fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı

Örgü parametresi $0.54\ \mu\text{m}$ olan fotonik kristal Si çubukların yarıçapı ise $0.2a$ olduğunda herhangi bir yüzey düzeni değişikliği yaratılmadığı durumda iletim spektrumu şekil 4.42’de olduğu gibidir.



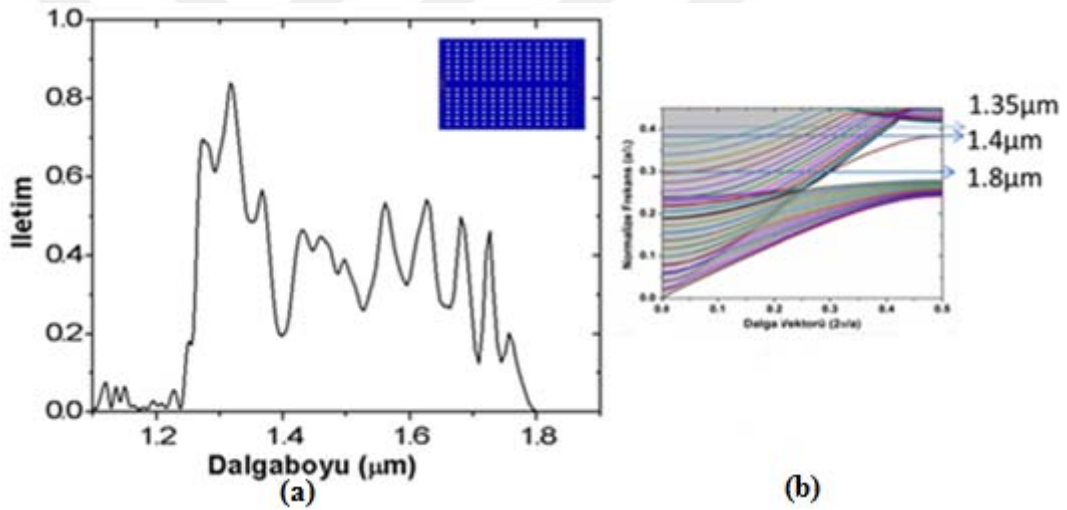
Şekil 4.42 Fotonik kristal dalga kılavuzu iletim spektrumu

Şekil 4.43’de ise çıkışına yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı görülmektedir.



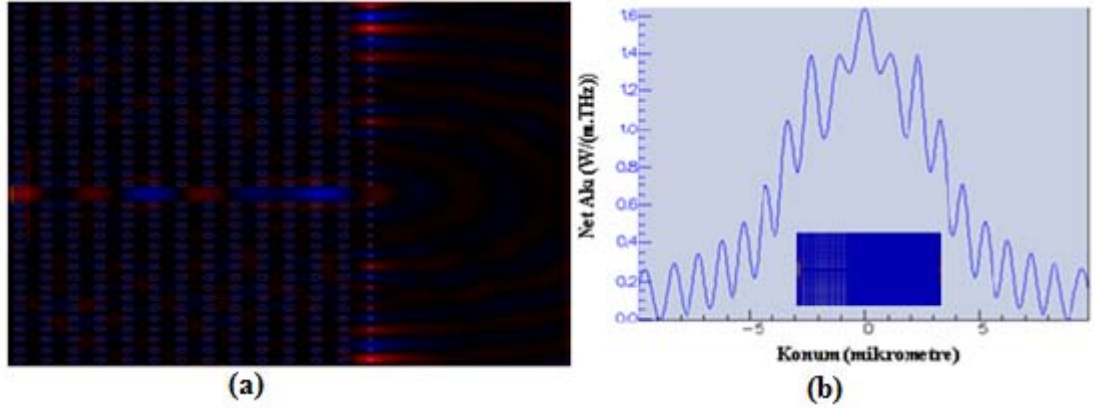
Şekil 4.43 Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı

Şekil 4.44.a'da benzer şekilde örgü parametresi $0.54 \mu\text{m}$ fotonik kristal Si çubukların yarıçapı ise $0.2a$ olduğunda yarıçapı $0.1a$ olan yüzey düzeni değiştirilmiş tabakanın fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına eklenmesi ile iletim spektrumunun değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.44.b'de fotonik kristal dalga kılavuzu yasak enerji bant yapısı sınırları 0.280 ile 0.417 arasında değişmektedir. Normalize frekans $a/\lambda=0.280$ a ise $0.54 \mu\text{m}$ olduğundan $\lambda_1=1.928 \mu\text{m}$ ile $a/\lambda=0.417$ olduğunda $\lambda_2=1.295 \mu\text{m}$ arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 4.44.a'da yasak enerji bant aralığında yüzey tabakasının oluşturduğu yüzey kipini kesen dalga boyuna denk gelen dalga boylarında elektromanyetik dalga gönderdiğimizde iletimin azaldığı gözlemlenmektedir. Gelen elektromanyetik dalganın çıkışta yüzey tabakasında ilerlemesinden kaynaklı iletimin azaldığı görülmektedir.



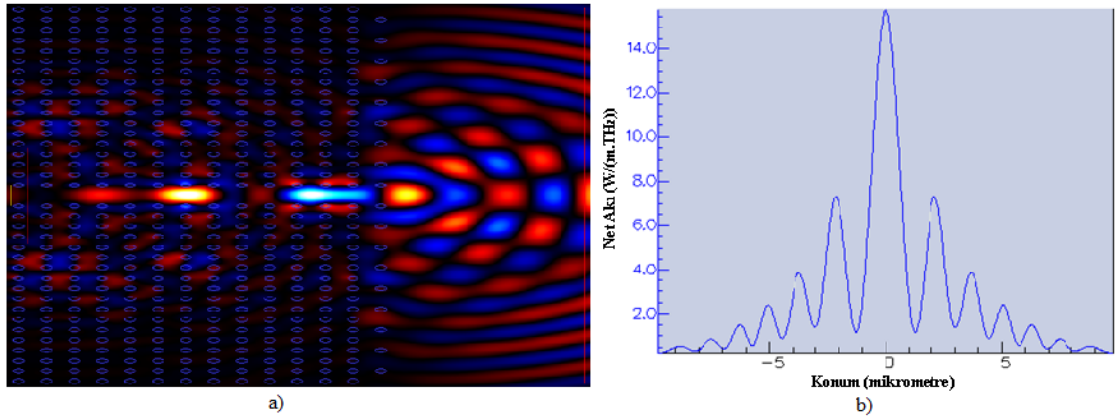
Şekil 4.44.a. Yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu iletim spektrumu, b. Yüzey tabakaları eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu bant yapısı

Şekil 4.45.a'da yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışında sadece yüzey tabakası varken çıkıştaki çizgi sensörünün uzunluğu boyunca geçen net akı değerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu da yüzey tabakasının olduğu durumdaki yüzey iletiminden kaynaklanmaktadır.



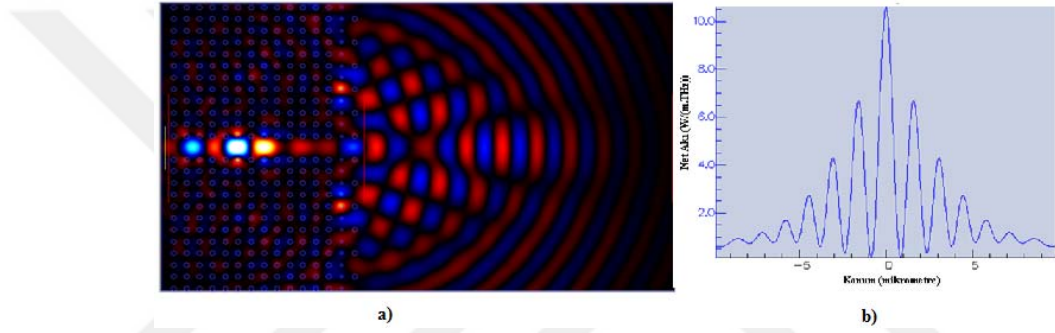
Şekil 4.45.a. Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş olan fotonik kristal dalga kılavuzunun atma ilerleyiş profili, b.Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.46.a’da çıkışına kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili, şekil 4.46.b.’de ise $D=2a$ kırınım ağı tabakası varken fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi gözlemlenmektedir. Çıkışında sadece kırınım ağı tabakasının olduğu fotonik kristal dalga kılavuzu yapısında çıkış sensör uzunluğu boyunca net akı değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



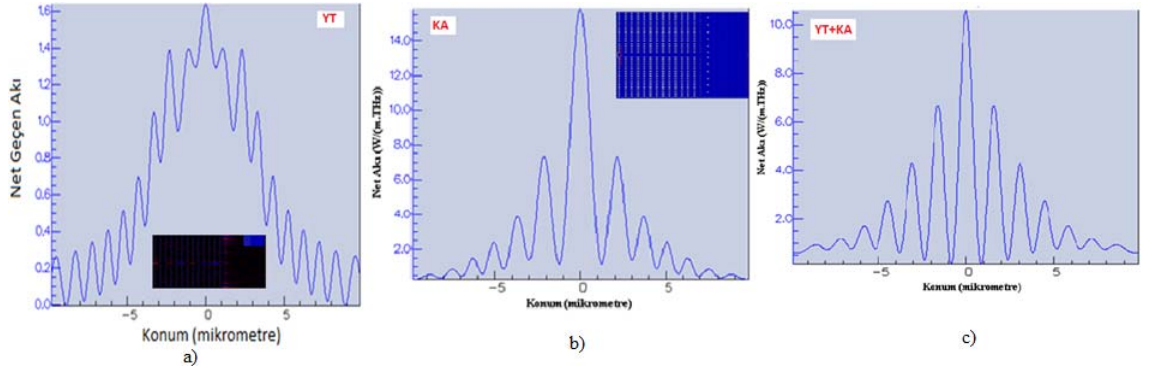
Şekil 4.46.a. Çıkışına sadece kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili, b. Sadece $D=2a$ kırınım ağı tabakası olan fotonik kristal dalga kılavuzunun 4 μm ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi

Şekil 4.47’de görüldüğü gibi yüzey tabakası kırınım ağı tabakası ile birlikte fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına eklendiğinde sadece kırınım ağı varken oluşamayan demetleme özelliği oluşmuştur. Bu durumda, kırınım ağı tabakası yüzeyde yayılan elektromanyetik dalgaları uyararak kılavuzlanmasını sağlamakta ve farklı yönlere iletimi desteklemektedir. Sadece kırınım ağı tabakasının olduğu fotonik kristal dalga kılavuzu yapısına kırınım ağı tabakasından önce yüzey tabakası da eklendiğinde geçen net akının düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi ise yüzey tabakasından kaynaklı yüzey iletimidir. FKD çıkışına yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası birlikte eklenmiş yapıda elektromanyetik dalganın demetleme özelliği göstermesi önemli bir sonuçtur.



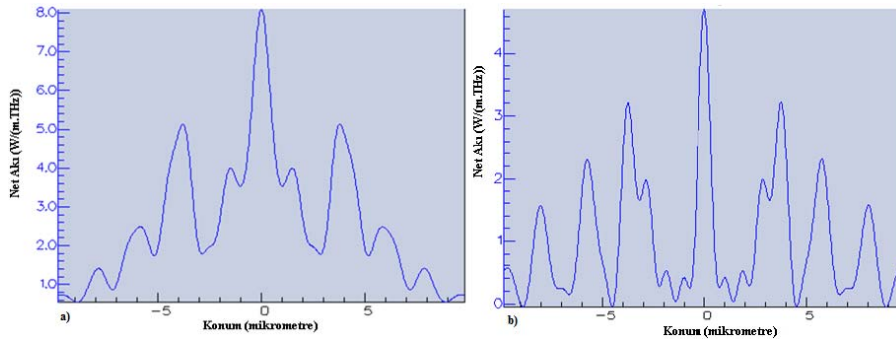
Şekil 4.47.a. Çıkışına yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu atma ilerleyiş profili, b.Yüzey tabakası ve $D=2a$ olan kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzunun $4\ \mu\text{m}$ ilerisine yerleştirilen çizgi şeklindeki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca net akı değişimi (kırınım ağı periyodu $2a$, $a=0.54\ \mu\text{m}$, $r_{yt}=0.1a$)

Şekil 4.48’de sadece kırınım ağı, sadece yüzey tabakası ve kırınım ağı ile yüzey tabakasının birlikte fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışına eklendiği durumlardaki çıkış sensörünün uzunluğu boyunca geçen net akı değerleri gözlemlenmektedir. Geçen akı en fazla sadece kırınım ağı tabakası varken en az ise sadece yüzey tabakası olduğunda görülmektedir.



Şekil 4.48.a. Çıkışına yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu geçen net akı, b. Sadece $D=2a$ kırınım ağı tabakası varken yüzey tabakası yokken fotonik kristal dalga kılavuzu geçen net akı, c. yüzey tabakası ve $D=2a$ kırınım ağı tabakası olan fotonik kristal dalga kılavuzu geçen net akı (kırınım ağı periyodu $2a$, $a=0.54 \mu\text{m}$, $r_{yt}=0.1a$)

Şekil 4.49’da ise aynı fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının çıkışına yüzey tabakasının olduğu ve olmadığı durumlardaki $D=3a$ periyodunda kırınım ağı tabakası eklendiğinde $4 \mu\text{m}$ uzaklığındaki sensör boyunca net akı değişimi gözlemlendiğinde benzer etkiler görülmektedir. Yani geçen akı şiddeti sadece kırınım ağı tabakası varken kırınım ağı ile yüzey tabakasının birlikte olduğu durumdakine göre daha fazladır. Işığın demetlenmesi özelliğinin ise kırınım ağının periyodu arttırıldıkça azaldığı, fotonik kristal dalga kılavuzundan geçerek çizgi sensörü boyunca gözlemlenen net akı değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum yüzey tabakasında ilerleyen elektromanyetik dalganın kırınım ağının periyodu $2a$ ’nın üzerine çıkarıldıkça havaya bağlaşma özelliğinin zayıflamasından kaynaklanmaktadır.



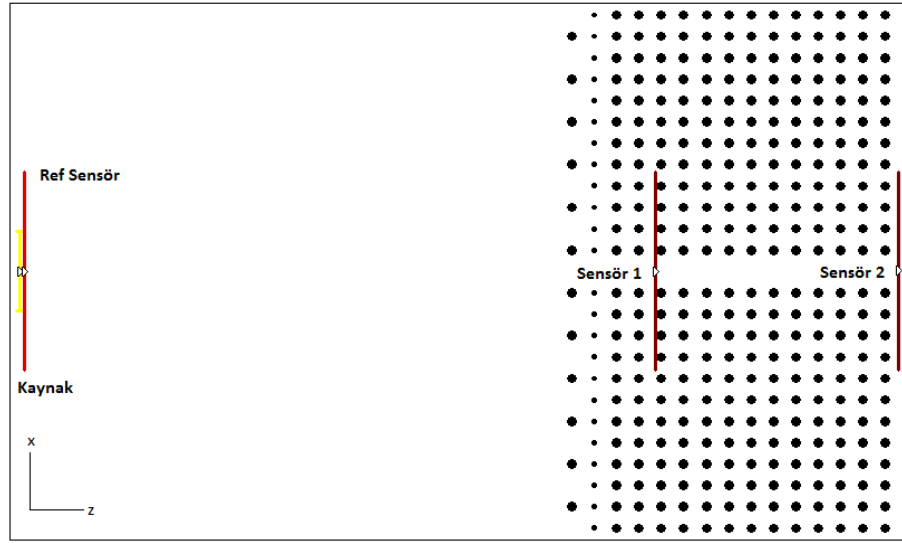
Şekil 4.49.a. Yüzey tabakası yokken $D=3a$ kırınım ağı tabakası olduğunda geçen net akı (kırınım ağı periyodu $3a$, $a=0.54 \mu\text{m}$), b. Yüzey tabakası varken $D=3a$ kırınım ağı tabakası eklendiğinde çizgi sensör boyunca geçen net akı (kırınım ağı periyodu $3a$, $a=0.54 \mu\text{m}$, $r_{yt}=0.1a$)

4.6 Işığın Fotonik Kristal Dalga Kılavuzu Girişine Bağlaştırılması

Fotonik kristal dalga kılavuzu girişinde yüzey düzeni değişikliği yaratılarak havadan fotonik kristale bağlaşım artırılabilir. Çalışmamızda ışığın fotonik kristal ile etkileşimini artırarak iletim spektrumunda değişiklik gözlemlenmesi hedeflenmektedir. Serbest uzaydan fotonik kristal dalga kılavuzuna elektromanyetik dalgaların bağlaşması sırasında saçılmadan kaynaklı kayıplar meydana gelmektedir. Bağlaşma verimini artırabilmek için yüzey kipinden yararlanılır. Bunu sağlayabilmek için FK yasak enerji bant aralığı içinde yüzey modları yaratılır. Örgü çubukları yarıçapından daha küçük yarıçaplı Si çubukları ile oluşturulan çizgi kusuru fotonik kristal giriş yüzeyine eklenerek yüzey kip oluşumuna bakılır.

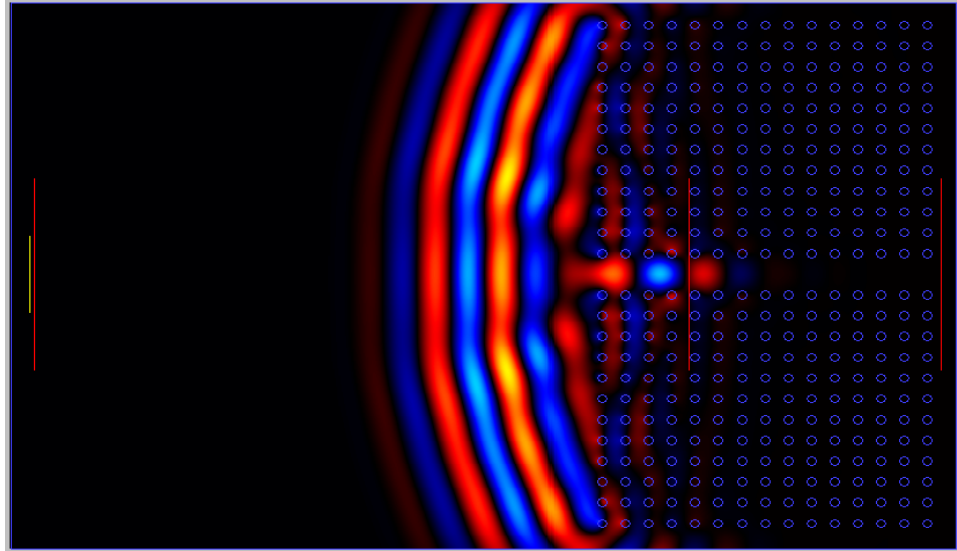
Fotonik kristal dalga kılavuzu girişine ışığın bağlaştırılması x ekseninde $40a$, y ekseninde $1a$ boyutlarında dikdörtgen biçiminde bir süper hücre kullanılmış, x eksenindeki $25a$ kadarlık mesafe serbest hava alanı bırakılarak ardına bir kusurlu FK çubuk ve 14 tane örgü çubukları eklenmiştir. FK yapısında kusurlu FK çubuk eklenmediğinde beklenildiği gibi bant aralığı içerisinde yüzey kipi yoktur. $r=0.2a$ yarıçaplı olan kare FK örgüsüne $r=0.1a$ yarıçaplı bir kusurlu FK çubuk eklendiğinde $k=0.5(2\pi/a)$ 'da $0.38(a/\lambda)$ normalize frekansında, $r=0.14a$ yarıçaplı kusurlu bir FK çubuk eklendiğinde ise $0.34(a/\lambda)$ normalize frekansta yüzey kipleri oluşmaktadır. $r=0.18a$ yarıçaplı kusurlu Si çubuk eklendiğinde ise yüzey kipi oluşmamaktadır. Çalışmamızda yüzey kipi oluşturmak için $r=0.1a$ yarıçaplı Si çubuklar kullanılmıştır.

Şekil 4.50'de fotonik kristal dalga kılavuzu örgü parametresi $a=0.54 \mu\text{m}$ fotonik kristali oluşturan Si çubukların yarıçapı ise $0.108 \mu\text{m}$ ($r=0.2a$) olarak belirlenmiştir. Fotonik kristal yüzeyindeki çubuklarının yarıçapı $r=0.2a$ 'dan $r=0.1a$ 'ya azaltılarak yüzey tabakası oluşturularak fotonik kristal dalga kılavuzu girişine eklenmiştir. Daha sonrasında da tekrar $0.2a$ yarıçapında Si çubuklarla $2a=1.08 \mu\text{m}$ örgü parametresine sahip kırınım ağı tabakası fotonik kristal dalga kılavuzu girişine eklenerek fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı tasarlanmıştır.



Şekil 4.50 Girişine yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı

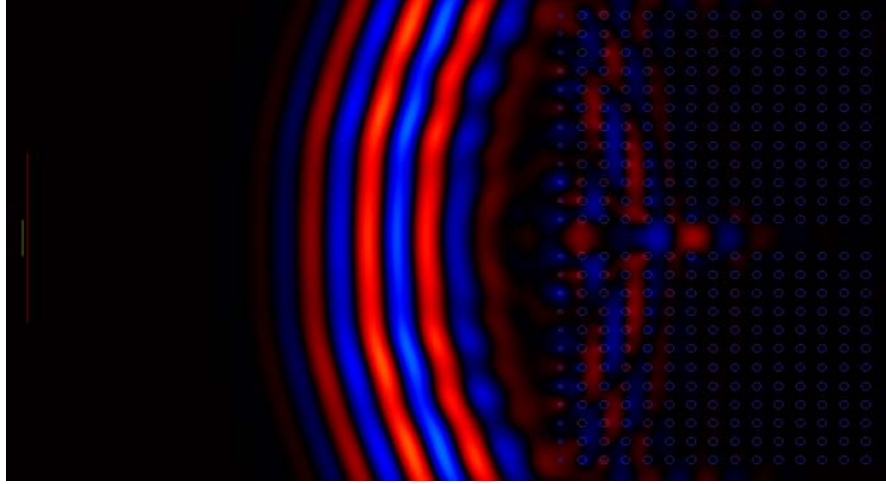
Şekil 4.51’de herhangi bir yüzey düzeni değişikliği yaratılmamış fotonik kristal dalga kılavuzu yapısında atma ilerleyiş profili gözlemlenmektedir. Daha sonrasında yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası ile yüzey düzeni değişikliği yaratılarak da atma ilerleyiş profilleri gösterilmiş ve karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 4.51 Hava ve fotonik kristalden oluşan yapının atma ilerleyiş profili

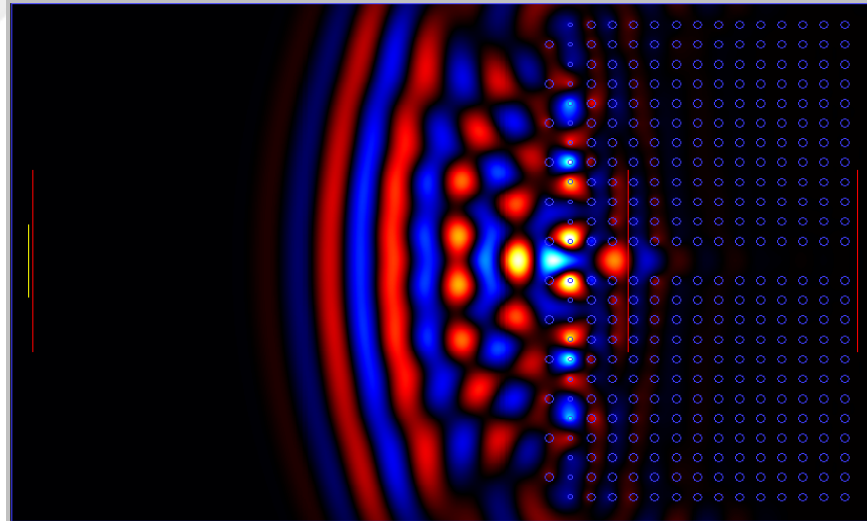
Şekil 4.52-4.53'deki periyodik yapıların atma ilerleyiş profilleri gözlemlendiğinde sadece yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzunda iletimin, ardarda eklenmiş yüzey ve kırınım ağı tabakalı fotonik kristal dalga kılavuzu yapısına göre daha zayıf olduğu görülmektedir. Fotonik kristal dalga kılavuzuna yüzey tabakası eklendiğinde bant yapısında yüzey modu oluşturulur, ama yüzey modu tek başına ışığın fotonik kristal dalga kılavuzuna bağlaşması için yeterli değildir. Fotonik kristal örgü parametresinin iki katı genişliğe sahip kırınım ağı tabakası fotonik kristal dalga kılavuzu yüzeyine eklendiğinde ışığın fotonik kristal yapıya çok daha iyi bağlaştığı ve iletimin arttığı gözlemlenmiştir.

FKD yapısının $25a$ kadar soluna merkeze $1.5 \mu\text{m}$ dalga boyunda bir düzlem dalga kaynak eklenerek sırasıyla FKD ve $r=0.1a$ yarıçaplı Si çubuklar eklenmiş FKD yapısında ilerleyişlerinin atma görüntüleri alınmış ve Şekil 4.52-4.53'de gösterilmiştir. FKD yapısı önüne yüzey kusurlu çubuklar eklenmediğinde atma tamamen FKD'nun ilk tabakasından yansımaya uğramaktadır. Yüzey tabakası eklendiğinde ise yüzey tabakasını oluşturan Si çubuklardan yansımaya uğramaktadır. Havada ilerleyen atmayı FKD içerisine bağlaştırmak için yüzey tabakası önüne bir kırınım ağı tabakası eklenmelidir. Örgü periyodu FK örgü periyodunun iki katı $2a=1.08 \mu\text{m}$ ve yarıçapı örgü yapısındaki gibi $r=0.2a$ olan bir kırınım ağı tabakası yüzey tabakası önüne eklenerek serbest hava alanında ilerleyen dalganın yüzey kiplerine bağlaşması sağlanmıştır. Bu durumdaki atma ilerlemesi şekil 4.53'de gösterilmiştir. Şekil 4.53, şekil 4.51 ve 4.52 ile karşılaştırıldığında ışığın yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklendiğinde yüksek oranda dalga kılavuzu içerisine bağlaştırılabildiği ve dalga kılavuzu içerisinde yol aldırılılabildiği görülmektedir.



Şekil 4.52 Yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal yüzeye sahip yapının atma ilerleyiş profili

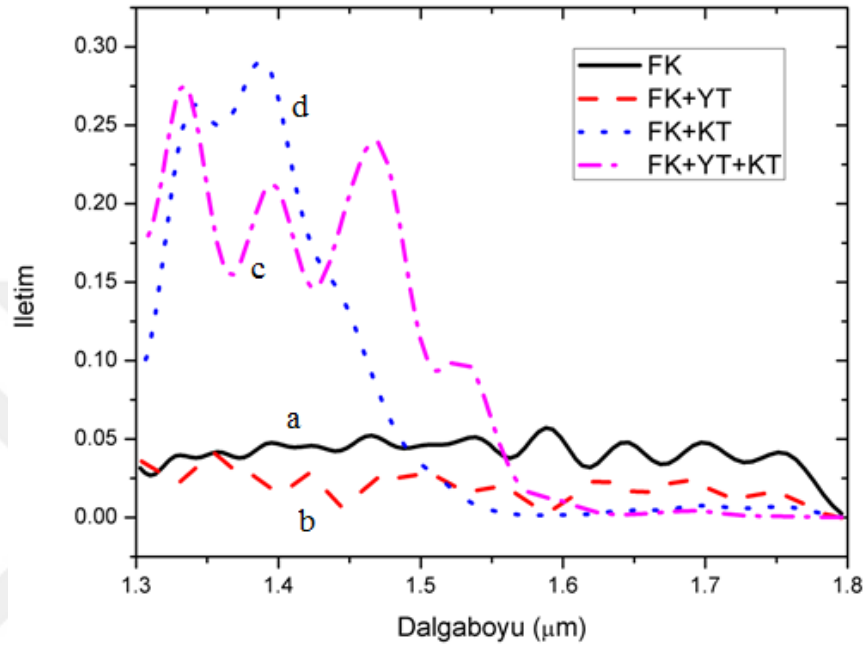
Şekil 4.53’de elektromanyetik dalganın fotonik kristal dalga kılavuzu girişindeki ilk tabaka kırınım ağı sonrasında da yüzey tabakası olarak tasarlandığında atma ilerleyiş profili görülmektedir.



Şekil 4.53 Kırınım ağı ve yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal yüzeye sahip yapının atma ilerleyiş profili

Şekil 4.50’de gösterilen serbest hava alanı ve FKD yapısı için sensör1’e gelen elektromanyetik akı referans sensöre bölünerek iletim grafikleri hesaplanmış ve şekil 4.54’de gösterilmiştir. Hesaplamalarda sensör 1’in konumu hep aynı tutulmuş, ama

FKD önüne sadece yüzey tabakası veya yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası birlikte eklenmiştir. Yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası birlikte eklendiğinde yüzey kipinin olduğu çalışma dalga boyumuz $1.5 \mu\text{m}$ 'de iletim, düz FKD yapısına göre artış göstermiştir.



Şekil 4.54 Işığın havadan, a eğrisi fotonik kristal dalga kılavuzuna, b eğrisi yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna, c eğrisi kırınım ağı ve yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna, d eğrisi kırınım ağı tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna bağlama eğrileri

Fotonik kristallerde yüzey düzeni değişikliği yaratılarak iletim ve yansıma spektrumları değiştirilebilir. Simülasyonda üç farklı fotonik kristal yapısında iletim spektrumu gözlemlenmiştir.

Fotonik kristalin tek başına olduğu ve fotonik kristal, yüzey tabakası ve ardından da kırınım ağı tabakası eklenmiş yapılarının iletim spektrumlarının karşılaştırılması sonucu yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklendiğinde $1.5 \mu\text{m}$ 'de fotonik kristale bağlama verimliliğinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.54’de fotonik kristal dalga kılavuzunun elektromanyetik dalganın geldiği taraftaki yüzeyine yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakasının eklenmesi ile iletim spektrumunda değişim gösterilmektedir. Yüzey düzeni değişikliği yaratılmamış fotonik kristal tabakanın iletim grafiği ile yüzey düzeni değişikliği eklenerek oluşturulan fotonik kristal tabakanın iletim grafikleri üst üste çizdirilerek değişim gözlemlendiğinde yüzey düzeni değişikliği yaratılan fotonik kristalden geçen net elektrik akısının kırınım ağı eklenmesiyle artmış olduğu görülmektedir.

Fotonik kristal dalga kılavuzunun iletim spektrumu yüzeye eklenmiş tabakalar aracılığıyla değiştirilebilir. Fotonik kristal dalga kılavuzunun giriş yüzeyindeki periyodik yapının örgü parametresi değiştirilerek iletim spektrumu arttırılabilir. Fotonik kristal dalga kılavuzunun giriş yüzeyine $0.1a$ yarıçapında yüzey tabakası eklenerek yüzey modları uyarılmıştır. Yüzey tabakası önüne $0.2a$ yarıçaplı ve örgü parametresi de $2a$ olan kırınım ağı tabakasının eklenmesi ile uyarılamayan yüzey modları hava modları ile eşleşerek uyarılabilir hale gelir ve iletim artar.

5. SONUÇ

Fotonik kristaller, ışığın dalga boyu ölçeğinde kontrolü için en uygun yapılardan biridir. Bu tez çalışmasının amacı, optik haberleşme alanına yönelik olarak fotonik kristallerin iletim, dağıtım özelliklerinden yararlanılarak bu yapılarda ışığın odaklanması, elektromanyetik dalgaların iletiminin artırılmasının ve yönlendirilmesinin sağlanmasıdır. Bu amaçla gerçekleştirilen sayısal hesaplamalarda düzlem dalga açılımı yöntemi ve zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi CrystalWave ticari yazılım programı aracılığıyla kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında fotonik kristalden çıkan elektromanyetik dalgaların doğrultulması veya eşit oranda bölünmesi sağlanmış ve hava ortamından fotonik kristale iletim, yüzey düzeni değişikliği yaratılarak artırılmıştır. Fotonik kristal çıkış yüzeyindeki örgü parametresi artırılarak ve silisyum çubukların yarıçapı azaltılarak iletim artırılabilmiştir. Benzer şekilde dalga kılavuzu çıkışında yüzey düzeni değişikliği oluşturulan fotonik kristal dalga kılavuzu yapılarında, çıkışına yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası birlikte eklenmiş yapının demetleme özelliğinin çıkışında sadece kırınım ağı tabakası olan FKD tasarımına göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Fotonik kristal giriş yüzeyindeki silisyum çubukların çapları değiştirilerek ve kırınım ağını oluşturan örgü parametreleri değiştirilerek, yasak enerji bant aralığında oluşturulmuş olan yüzey kipleri uyarılmış ve elektromanyetik dalgaların dalga kılavuzuna bağlaşımları artırılmıştır.

Bu çalışmada yüzey düzeni değişikliği yaratılmış fotonik kristallerin yüzey kip özelliğinden faydalanılarak elektromanyetik dalgaların bağlaştırıcı ve demet bölücü özellikleri gözlemlenmiştir. Bu amaçla, önce kare örgülü Si dielektrik çubuklardan 1.5 μm dalga boyunda dalgaların kılavuzlanmasını sağlayan fotonik kristal dalga kılavuzu tasarlanmıştır. Fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının girişine 1.5 μm dalga boyundaki yüzey kipini destekleyen 0.54 μm yarıçaplı ($r=0.1a$) Si çubuklardan oluşan yüzey tabakası ve ışığı serbest hava alanından yüzey kipine bağlaştırmak için örgü periyodunun iki katı periyotta Si çubuklardan oluşan bir kırınım ağı tabakası

eklendiğinde ışığın fotonik kristal dalga kılavuzu içerisine daha iyi bağlaştırdığı saptanmıştır. Herhangi bir fazladan bağlaştırmacı yapıya ihtiyaç duyulmadan Si çubuklar ile ışığın dalga kılavuzuna bağlaştırılması optik haberleşme dalga boyu olan 1.5 μm civarında çalışan optik entegre devrelerde kullanım açısından potansiyel öneme sahiptir.

Çalışmanın bir diğer kısmında fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışında dalga kılavuzunu çevreleyen belirli sayıdaki Si çubukların yarıçapı değiştirilerek fotonik kristal dalga kılavuzu çıkış yüzeyindeki demetin doğrultulması veya bölünmesi sağlanmıştır. Dalga kılavuzu etrafında sırasıyla ikişer, üçer, dörder veya beşer kusurlu Si çubuk ve sonrasında da bir boşluk bırakılarak nokta kusuru oluşturulmuş olup sırasıyla doğrultucu, 1×2, 1×3, 1×4 veya 1×5 demet bölücü tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Fotonik kristallerin demet bölücü özelliğinin incelenmesi çalışmalarında fotonik kristal dalga kılavuzunu çevreleyen Si çubukların sadece yarıçapları 0.2a'dan 0.1a'ya değiştirilerek ikişer nokta kusuru ($N_y=2$) oluşturulduğunda gelen elektromanyetik dalganın iki eşit şiddete bölünerek fotonik kristal dalga kılavuzundan havaya bağlaştığı gözlemlenmektedir. Aynı fotonik kristal tasarımına ikişer nokta kusurunun ardından birer nokta kusuru daha oluşturulduğunda gelen elektromanyetik dalganın dalga kılavuzu merkezi etrafında doğrulttuğu ve çizgi sensör boyunca akı değişim profilinin merkezde artıp kenarlarında azaldığı gözlemlenmiştir.

Aynı fotonik kristal tasarımında dalga kılavuzu kenarlarındaki yarıçap değişikliği ile oluşturulan nokta kusur sayısı üçe çıkarıldığında gelen elektromanyetik dalganın merkezde birbirine eşit iki ve onunda kenarlarında yine birbirine eşit ama daha düşük şiddette iki olmak üzere toplamda dörde bölündüğü gözlemlenmiştir. Dalga kılavuzu çıkış kenarlarındaki üçer yarıçap değişikliği ile oluşturulan nokta kusurunun ardından karşılıklı kenarlarda ilave birer boşluk bırakılarak nokta kusurları oluşturulduğunda ise merkezdeki eşit iki iletim bandının kenarlarındaki diğer iki zayıf şiddetteki bantlarda oldukça çok zayıflatılmıştır.

Yarıçap değişikliği ile oluşturulan nokta kusur sayısını dörde çıkarıp sonrasında boşluklu ve boşluksuz fotonik kristal dalga kılavuzu yapısından geçen elektromanyetik

dalga saçılım profilleri karşılaştırıldığında her iki durumda da gelen elektromanyetik dalganın beşe yarıldığı ama bir boşluklu yapıda merkezdeki üç yarılmanın şiddetinin birbirine eşitlendiği görülmüştür.

Dalga kılavuzunun çıkışındaki yarıçapı değiştirilmiş Si çubuk sayısı beşe çıkarıldığında, yine sonrasında bir boşluklu nokta kusurunun bırakıldığı ve bırakılmadığı yapılar birbiri ile karşılaştırıldığında, her iki durumda da elektromanyetik dalganın yediye bölündüğü fakat birer boşluklu yapıda merkezdeki pikin şiddetinin çok daha fazla olduğu, onun kenarlarındaki akı bantlarının ise şiddetinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, birer Si çubuk çıkararak nokta kusurları oluşturmak merkezdeki akı bandı/bantlarının etrafındaki yanal bantların şiddetini oldukça düşürerek demetin daha eşit biçimde bölünmesini sağlamıştır. N_y yüzey kusurlu ve birer boşluklu yapı için N_y yüzey değişikliği yaratılmış çubuk sayısından bir eksik sayıda demet bölünmesi gözlenmiştir. Bu durum $N_y=5$ 'e kadar gözlenmiş, $N_y=5$ için ise dalga kılavuzundan çok uzaklaşıldığından eşit güçte bölünme sağlanamamıştır.

Fotonik kristal dalga kılavuzunun çıkışında kenarlardaki yüzey kusurlu çubukların yarıçapları $0.2a$ 'dan $0.1a$ 'ya direk düşürülmek yerine kademeli olarak önce $0.1a$ sonra $0.15a$ veya üçer nokta kusurlu yapılarda da yarıçaplar, önce $0.1a$, $0.1a$ sonra $0.15a$ olarak ayarlandığında geçen elektromanyetik dalganın etrafındaki düşük güçteki yanal akı bantlarının şiddetinin oldukça azaltıldığı görülmüştür.

Fotonik kristal dalga kılavuzu demet bölücü tasarımlarında $N_{yüzey}=1, 2, 3, 4, 5$ nokta kusurlarından sonra iki boşluk bırakıldığı durumda merkezdeki demet saçılım profillerinin şiddetinin düştüğü, boşluklara denk gelen elektromanyetik dalga akı değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmalarda yüzey düzeni değiştirilmiş fotonik kristalin yüzey modlarını kullanarak elektromanyetik dalganın doğrultulmasını ve yüzey modları uyarılarak elektromanyetik dalga iletiminin sağlanması gözlenmiştir. Yüzey kusurlu

yarıçaplar etrafında nokta kusuru oluşturulduğunda merkezdeki akı bandının daha az genişlemeye uğradığı görülmektedir. Nokta kusuru oluşturma hem demetin eşit biçimde bölünmesinde, hem de sensör konum değişikliğinden daha az etkilenmesinden ötürü faydalı olduğu saptanmıştır.



KAYNAKLAR

- Anderson, C. M. and Giapis K.P. 1996. Larger two-dimensional photonic band gaps. *Physical Review Letters*, 77(14), 2949-2952.
- Bagci, F. and Akaoglu, B. 2012. Effects of structurally deformed sub-lattice points on the dispersion properties of 2D hybrid triangular-graphite photonic crystal. *Optics Communications*, 285(6), 1486-1493.
- Berenger, J. P. 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comput. Phys.*, 114(2), 185-200.
- Bulu, I. Caglayan, H. and Ozbay, E. 2005. Beaming of light and enhanced transmission via surface modes of photonic crystals. *Optics Letters*, 30(22), 3078-3080.
- Chuanjian S. 2006. Wave Propagation Through Photonic Crystals Slab. MSC PhD thesis, 08, 1570-1530.
- CrystalWave, PhotonDesign, <http://www.photond.com/>
- Erdiven, U. 2012. Fotonik kristaller optiksel devre ve sensör uygulamaları. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 109, Adana.
- Fan, S., Winn, J.N., Devenyi, J.C., Meade, R.D., Joannopoulos, J.D., 1995. Guided and defect modes in periodic dielectric waveguides. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 12, 1267.
- Joannopoulos J.D., Meade R.D., and Winn J.N., 1995. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton University Press. 15, Princeton.
- Joannopoulos, J.D., Maede, R.D. and Winn, J.N. 2008. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press, 286, New Jersey.
- Johnson, S.G. and Joannopoulos, J.D. 2001. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a plane-wave basis. *Optics Express*, 8(3), 190-1733.
- Karaaslan, M. 2009. Negatif Kırılma İndisli Metamalzemelerin Elde Edilmesi. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 117, Adana.
- Kurt, H., Üstün, K. and Ayas, L. 2010. Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides, *Optics Express* 18, 26, 26965-26977.
- Oskooi, A.F., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J.D. and Johnson, S.G. 2010. MEEP: A flexible free software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Computer Physics Communications*, 181, 687-702.
- Rayleigh, J. W. S. 1888. On the remarkable phenomenon of crystalline reflexion described by Prof. Stokes, *Philosophical Magazine*, 26, 256-265.
- Sakoda K. 1998. Numerical study on localized defect modes in two-dimensional triangular photonic crystals. *Journal of Applied Physics*, 84, 1210-1214.

- Saynatjoki, A., Mulot, M., Vynck, K., Cassagne, D., Ahopelto, J. and Lipsanen, H. 2008. Properties, applications and fabrication of photonic crystals with ring-shaped holes in silicon-on-insulator, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*. 6, 42-46.
- Schneider, J.B. 2011. *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method*.
- Shen, H. J. and Zhang, Q. L. 2011. Dispersionless slow light by photonic crystal slab waveguide with innermost elliptical air holes. *Optik* 122, 1174-1178.
- Soukoulis, C.M. 1996, *Photonic Bandgap Materials*. Kluwer Academic Publishers, 729, Boston.
- Susa, N. 2002. Large absolute and polarization-independent photonic band gaps for various lattice structures and rod shapes. *Journal of Applied Physics*, 91, 3501.
- Taflove, A. and Hagness, S.C. 2000. *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*. Artech House, 2. edition, 345, USA.
- Üstün, K. 2011. Fotonik kristallerde ışığın yavaşlatılması. Yüksek lisans Tezi. TOBB Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 61 s., Ankara.
- Wang, R., Wang, X.H., Gu, B.Y., and Yang, G.Z. 2001. Effects of shapes and orientations of scatterers and lattice symmetries on the photonic band gap in two-dimensional photonic crystals. *Journal of Applied Physics*, 90, 4307-4313.
- Wang Q., Zhang L., Li Q. 2010. Beam splitting at the output of photonic crystal waveguides with discrete surface point defects, *Opt. Express* vol. 18(23), 24245-24257.
- Yablonovitch, E. 1987. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Physical Review Letters* 58, 2059–2062.
- Yablonovitch, T.J. Gmitter, R.D. Meade, K.D. Brommer, A.M. Rappe, and J.D. Joannopoulos 1991, Donor and acceptor modes in photonic band structure. *Phys. Rev. Lett.* 67, 3380.
- Yee, K.S. 1966. Numerical solution of initial boundary value problem involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 14, 302-307.
- Yen, T.J., Padilla, W.J., Fang, N., Vier, D.C., Smith, D.R., Pendry, J.B., Basov, D.N. and Zhang, X., 2004. Infrared Spectroscopy and Ellipsometry of Magnetic Metamaterials. *Science*, 303, 1494.
- Zhai, Y., Tian, H. and Ji, Y. 2011. Slow light property improvement and optical buffer capability in ring-shape-hole photonic crystal waveguide. *Journal of Lightwave Technology* 29, 20, 3083-3090.
- Zhang Z. and Sashi S. 1990. Electromagnetics wave propagation in periodic structures: Bloch wave solutions of Maxwell's equations. *Phys. Rev. Lett.* 65, 2650.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Öznur ÇAPRAZ
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 1988
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Ankara Gazi Anadolu Lisesi (2006)
Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2011)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı
(Eylül 2012 - Nisan 2017)

Çalıştığı Kurum ve Yıl

Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı 2016 – ...