

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**İKİ BOYUTLU FOTONİK KRİSTALLERDE BANT
YAPILARININ İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Pelin ALTINKAYA**

**Danışman
Prof. Dr. Sedat ÖZSOY**

Yüksek Lisans Tezi

**Ocak 2016
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**İKİ BOYUTLU FOTONİK KRİSTALLERDE BANT
YAPILARININ İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Pelin ALTINKAYA**

**Danışman
Prof. Dr. Sedat ÖZSOY**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Birimi tarafından FBY-09-919 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ocak 2016
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Pelin ALTINKAYA

İmza :

YÖNERGEYE UYGUNLUK

İki Boyutlu Fotonik Kristallerde Bant Yapılarının İncelenmesi adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Pelin ALTINKAYA

Danışman

Prof. Dr. Sedat ÖZSOY

Fizik ABD Başkanı

Prof. Dr. Ayhan GÜLDESTE

Prof. Dr. Sedat ÖZSOY danışmanlığında **Pelin ALTINKAYA** tarafından hazırlanan “**İki Boyutlu Fotonik Kristallerde Bant Yapılarının İncelenmesi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

14 /01 / 2016

(Tez savunma sınav tarihi yazılacaktır.)

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN

Üye : Doç. Dr. Bayram DEVİREN

Üye : Prof. Dr. Sedat ÖZSOY

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 26.02.2016 tarih ve 2016/11-42sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / /

Prof. Dr. Kâzım KEŞLİOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Bu tezde yapılan çalışma boyunca gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karşılaştığım problemlerin çözümünde deneyimlerinden yararlandığım tez danışmanım sayın Prof. Dr. Sedat ÖZSOY' a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasını, sonsuz bir fedakârlık, şefkat, merhamet ve sevgi ile hayatımın her anında çok kıymetli sevgili aileme teşekkür ederim.

Pelin ALTINKAYA

Kayseri, Ocak 2016

İKİ BOYUTLU FOTONİK KRİSTALLERDE BANT YAPILARININ İNCELENMESİ

Pelin ALTINKAYA

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2016
Danışman: Prof.Dr. Sedat ÖZSOY

ÖZET

Bu çalışmada, fotonik kristallerin özellikleri, kullanım alanları ve iki boyutlu fotonik kristallerin bant yapıları incelenmiştir. Farklı optik malzemeler kullanılarak tasarlanan kare ve üçgen örgülü iki boyutlu fotonik kristallerin bant yapıları, Düzlem dalga açılımına dayanan BandSOLVE (RSoft Design Group) yazılımı kullanılarak simüle edilmiş ve enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) modlar için fotonik bant aralıkları elde edilmiştir.

Hava içindeki dielektrik sütunlar düzenlemesinde, SiO₂ hariç, kullanılan malzemeler için, genellikle, $r/a \leq 0,40$ oranları için TE modunda çok sayıda bant aralığı elde edilirken TM modunda daha az sayıda aralık elde edilmiştir. SiO₂ için ise kare düzenlemede her iki mod için de hiçbir bant aralığı elde edilmezken, üçgen örgüde sadece $r/a = 0,30$ için TE modunda bir aralık elde edilmiştir. TE ve TM modlarının üst üste bulunduğu tam bant aralıkları elde edilememiştir. Dielektrik dilim içindeki hava sütunları düzenlemesinde, SiO₂ hariç, kullanılan malzemeler için kare ve üçgen örgü düzenlemelerinde, genellikle daha büyük $r/a (\geq 0,40)$ bölgesinde az sayıda TE modu için; daha küçük $r/a (\leq 0,45)$ bölgesinde ise daha fazla sayıda TM modu için bant aralığı tespit edilmiştir. SiO₂ için ise her iki mod için herhangi bir örgüde hiçbir bant aralığı elde edilememiştir. TE ve TM modlarının üst üste bulunduğu tam bant aralıkları ise sadece üçgen örgüde ve bir veya iki tane elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotonik Kristaller, Fotonik Bant Aralığı, TE ve TM modu.

INVESTIGATION OF THE BAND STRUCTURES IN TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS

Pelin ALTINKAYA

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, January 2016

Supervisor: Prof.Dr. Sedat ÖZSOY

ABSTRACT

In this study, properties and application areas of photonic crystals, and band structures of the two-dimensional photonic crystals are examined. The band structures of the two-dimensional photonic crystals with triangular and square lattice designed by employing different optical materials are simulated by a commercial software based on plane-wave expansion method (BandSOLVE-RSoft Design Group) and their photonic bandgaps are obtained for transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) modes.

In the case of the arrangement of dielectric columns in air, except for SiO₂, for the materials used, larger number of bandgaps for TE modes are obtained than that of TM modes at the ratios $r/a \leq 0,40$. For SiO₂, any bandgaps for both types of modes are not obtained in the square lattice, but in the triangular lattice, one bandgap is obtained only for TE mode. In this arrangement, complete bandgaps, in which TE and TM modes are superposed, are not obtained.

In the case of air columns in dielectric slab, except for SiO₂, for the materials used, in the square and triangular lattice configurations, a small number of bandgaps are obtained for TE modes, generally, in the range of larger $r/a (\geq 0,40)$; but larger number of bandgaps for TM modes are obtained in the range of smaller $r/a (\leq 0,45)$. For SiO₂, any bandgaps for both types of modes and for both types of lattice are not obtained in the square lattice. In this arrangement, one or two complete bandgaps are obtained only for the triangular lattice.

Keywords: Photonic Crystals, Photonic Crystal Bandgaps, TE and TM modes.

İÇİNDEKİLER

İKİ BOYUTLU FOTONİK KRİSTALLERDE BANT YAPILARININ İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL ONAY	iii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1

BÖLÜM 1

FOTONİK KRİSTALLER

1.1 Giriş	2
1.2 Fotonik Kristaller ve Fotonik Bantlar	7
1.3 Fotonik Kristallerin Genel Özellikleri	9
1.3.1 Fotonik Kristal Türleri	9
1.3.2 Bir Boyutlu Fotonik Kristaller	10
1.3.3 İki Boyutlu Fotonik Kristaller.....	13
1.3.4 İki Boyutta Bloch Seviyesi	15
1.3.5 Kristallerin Elektronik ve Fotonik Özellikleri Arasında Karşılaştırma	17
1.3.6 Brillouin Bölgeleri	18
1.3.7 Maxwell Denklemleri	25

BÖLÜM 2

İKİ BOYUTLU FOTONİK KRİSTALLERİN BANT YAPILARI

2.1 Giriş	28
2.2 Düzlem Dalga Açılımı Yöntemi	28
2.2.1 Teorik Model.....	28
2.3 Galyum Arsenik (GaAs)	32
2.3.1 Hava İçindeki Silindirik GaAs Çubukların Kare Örgüsü için Bant Yapısı	34
2.3.2 Hava İçindeki Silindirik GaAs Çubukların Üçgen Örgüsü için Bant Yapısı.....	37
2.3.3 GaAs Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Kare Örgüsü için BantAralıkları.....	39
2.3.4 GaAs Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Üçgen Örgüsü için Bant Aralıkları.....	42
2.4 Silisyum (Si)	44
2.4.1 Hava İçindeki Silindirik Si Çubukların Kare Örgüsü için Bant Aralıkları.....	45
2.4.2 Hava İçindeki Silindirik Si Çubukların Üçgen Örgüsü için Bant Aralıkları.....	47
2.4.3 Si Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Kare Örgüsü için Bant Aralıkları.....	50
2.4.4 Si Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Üçgen Örgüsü için Bant Aralıkları.....	52
2.5 Silika (SiO₂)	54
2.5.1 Hava İçindeki Silindirik SiO₂ Çubukların Kare Örgüsü için Bant Aralıkları.....	55
2.5.2 Hava İçindeki Silindirik SiO₂ Çubukların Üçgen Örgüsü için Bant Aralıkları.....	56

2.5.3 SiO ₂ Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Örgüsü için Bant Aralıkları.....	57
2.6 Alumina (Al ₂ O ₃)	57
2.6.1 Hava İçindeki Silindirik Alumina(Al ₂ O ₃) Çubukların Kare Örgüsü için Bant Aralıkları	58
2.6.2 Hava İçindeki Silindirik Alumina(Al ₂ O ₃) Çubukların Üçgen Örgüsü için Bant Aralıkları.....	60
2.6.3 Alumina(Al ₂ O ₃) Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Kare Örgüsü için Bant Aralıkları.....	63
2.6.4 Alumina(Al ₂ O ₃) Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Üçgen Örgüsü için Bant Aralıkları.....	65

BÖLÜM 3

TARTIŞMA VE SONUÇ

3.1 Kare Örgülü Fotonik Kristaller.....	67
3.2 Üçgen Örgülü Fotonik Kristaller.....	68
3.3 Tüm Kutuplanmalar İçin Tam Bant Aralığı	68
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	72

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>
FBA	Fotonik Bant Aralığı
FK	Fotonik Kristaller
1B	Bir Boyutlu
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
VCSELs	Dikey Kovuklu Yüzey Yayıcı Lazerleri
TD	Tümleşik Devreleri
TE	Enine Elektrik
TM	Enine Manyetik
$k_{//}$	xy düzlemi içindeki dalga vektörü
k_z	z yönündeki dalga vektörü
n	Bant sayısı
λ	Dalga boyu
n_1	Kırılma indisi
n_2	Kırılma indisi
W_m	Frekans aralığının ortalama değeri
d_1	Tabakaların kalınlığı
d_2	Tabakaların kalınlığı
$\epsilon(z)$	Dielektrik fonksiyonu

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. GaAs'in özellikleri	32
Tablo 2.2. GaAs'in dalga boyu ve kırılma indisi	34
Tablo 2.3. Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü için bant aralıkları.	36
Tablo 2.4. Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü için bant aralıkları	39
Tablo 2.5. GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsü için bant aralıkları	41
Tablo 2.6. GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü için bant aralıkları	44
Tablo 2.7. Silisyum'un özellikleri	45
Tablo 2.8. Si'nin dalga boyu ve kırılma indisi	45
Tablo 2.9. Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsü için bant aralıkları.....	47
Tablo 2.10. Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsü için bant aralıkları	49
Tablo 2.11. Si dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsü için bant aralıkları	51
Tablo 2.12. Si dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü için bant aralıkları	53
Tablo 2.13. SiO ₂ (kuvars) için dalga boyu ve kırılma indisi	55
Tablo 2.14. Hava içindeki silindirik alumina(Al ₂ O ₃) çubukların kare örgüsü için bant aralıkları.	60
Tablo 2.15. Hava içindeki silindirik alumina(Al ₂ O ₃) çubukların üçgen örgüsü için bant aralıkları.....	62
Tablo 2.16. Alumina(Al ₂ O ₃) dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsü için bant aralıkları.....	64
Tablo 2.17. Alumina(Al ₂ O ₃) dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü için bant aralıkları.....	66

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Üç boyutlu bir fotonik kristal örneği. (a) Bir tam bant aralığına sahip ilk fotonik kristal, (b) Alüminyum çubukların yığılmasıyla elde edilen bir fotonik kristal. Bant aralığı 12-14 GHz.	5
Şekil 1.2.	InP/ GaIn/InP heteroyapı içinde üretilmiş iki boyutlu bir fotonik kristal aygıtın (a) üstten görünüşü, (b) yandan görünüşü.....	6
Şekil 1.3.	Fotonik kristallerin uygulama alanları	7
Şekil 1.4.	Bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristaller	10
Şekil 1.5.	Bir boyutlu fotonik kristal	10
Şekil 1.6.	Bir boyutta dağıtkanlık bağıntısı ve durgun dalgalar	12
Şekil 1.7.	Bir boyutlu fotonik kristalde bant yapısı.....	13
Şekil 1.8.	İki boyutlu fotonik kristalde düzlem dalğanın bant yapısı ve konturlar	14
Şekil 1.9.	İki boyutlu fotonik kristal örnekleri. (a) Etrafı havayla çevrili dielektrik çubuklar, (b) Etrafı dielektrik ile çevrili boşluklar	14
Şekil 1.10.	Üç boyutlu fotonik kristal örneği. Fotonik bant aralığına sahip ilk üç boyutlu kristal.....	15
Şekil 1.11.	Dielektrik sütunların kare örgüsü	16
Şekil 1.12.	Kesikli öteleme simetrisine sahip dielektrik plaka.....	17
Şekil 1.13.	Wigner-Seitz ilkel hücresi	18
Şekil 1.14.	(a) İki boyutlu kare örgü, (b) İndirgenemez Brillouin bölgesi	20
Şekil 1.15.	(a) Kare örgü şeklinde dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal (Örgü sabiti a , silindirik çubukların yarıçapı $0,2a$ 'dır), (b) Ters uzayda simetri noktaları Γ , X ve M' dir.	20
Şekil 1.16.	(a) Üçgen örgü şeklinde dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal (örgü sabiti a , silindirik çubukların yarıçapı $r = 0,3a$ 'dır), (b) Ters uzayda simetri noktaları Γ , K ve M' dir.	21
Şekil 1.17.	Eksen-üzeri yayılma için fotonik bant yapıları.	22
Şekil 1.18.	Kristallerin fotonik özelliklerini gösteren genel fotonik bant yapısı.....	24
Şekil 1.19.	Bant aralığı içerisindeki dalga boylarında dalgalar	25

Şekil 1.20.	Bant aralığı içerisinde olmayan dalga boylarında dalgalar.	25
Şekil 2.1.	Yapay iki boyutlu sonsuz bir fotonik kristal. Fotonik kristal fiberin enine kesitine karşılık gelen birim hücre birim faktörler gösterilmektedir. 28	28
Şekil 2.2.	GaAs'de iletimin dalga boyuna göre değişim grafiği	33
Şekil 2.3.	Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü	34
Şekil 2.4.	Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü ($r/a=0.20$).....	35
Şekil 2.5.	Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü ($r/a=0.35$).....	35
Şekil 2.6.	Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü ($r/a=0.45$).....	36
Şekil 2.7.	Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü	37
Şekil 2.8.	Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0.20$)	37
Şekil 2.9.	Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0.30$)	38
Şekil 2.10.	Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0.45$)	38
Şekil 2.11.	GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsü.....	39
Şekil 2.12.	GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü $r/a=0.35$)	40
Şekil 2.13.	GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0.45$).....	40
Şekil 2.14.	GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0.50$).....	41
Şekil 2.15.	GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü	42
Şekil 2.16.	GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.30$) ..	42
Şekil 2.17.	GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.40$) ..	43
Şekil 2.18.	GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.50$) ..	43
Şekil 2.19.	Si'de iletimin dalga boyuna göre değişim grafiği	45
Şekil 2.20.	Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsü ($r/a=0.20$)	46
Şekil 2.21.	Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsü ($r/a=0.30$)	46
Şekil 2.22.	Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsü ($r/a=0.40$)	47
Şekil 2.23.	Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0.20$).....	48
Şekil 2.24.	Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0.30$).....	48
Şekil 2.25.	Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0.45$).....	49
Şekil 2.26	Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0.35$).....	50

Şekil 2.27. Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0.45$).....	50
Şekil 2.28. Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0.50$).....	51
Şekil 2.29. Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.30$)	52
Şekil 2.30. Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.40$)	52
Şekil 2.31. Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.45$)	53
Şekil 2.32. Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.50$)	53
Şekil 2.33. SiO ₂ 'de iletimin dalga boyuna göre değişim grafiği.....	55
Şekil 2.34. Hava içindeki silindirik SiO ₂ çubukların kare örgüsü $r/a=0.20$	56
Şekil 2.35. Hava içindeki silindirik SiO ₂ çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0.30$)	57
Şekil 2.36. Hava içindeki silindirik Al ₂ O ₃ çubukların kare örgüsü ($r/a=0.25$)	58
Şekil 2.37. Hava içindeki silindirik Al ₂ O ₃ çubukların kare örgüsü ($r/a=0.30$)	59
Şekil 2.38. Hava içindeki silindirik Al ₂ O ₃ çubukların kare örgüsü ($r/a=0.35$)	59
Şekil 2.39. Hava içindeki silindirik Al ₂ O ₃ çubukların üçgen örgüsü($r/a=0.20$)	61
Şekil 2.40. Hava içindeki silindirik Al ₂ O ₃ çubukların üçgen örgüsü($r/a=0.30$)	61
Şekil 2.41. Hava içindeki silindirik Al ₂ O ₃ çubukların üçgen örgüsü($r/a=0.40$)	62
Şekil 2.42. Al ₂ O ₃ dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0.40$).....	63
Şekil 2.43. Al ₂ O ₃ dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0.45$).....	63
Şekil 2.44. Al ₂ O ₃ dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0.50$).....	64
Şekil 2.45. Al ₂ O ₃ dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.30$)..	65
Şekil 2.46. Al ₂ O ₃ dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.40$)..	65
Şekil 2.47. Al ₂ O ₃ dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0.50$)..	66

GİRİŞ

Son yıllarda, ışığın kontrol edilerek istenilen değişikliklerin yapılmasını ve farklı optik uygulamaların ortaya çıkmasını sağladığı için fotonik kristaller (FK), modern teknolojinin gelişiminde oldukça önem kazanmıştır. Fotonik, ışık ve madde arasındaki etkileşimi inceleyen bir bilim dalıdır. Işık ve madde arasındaki etkileşimin incelendiği materyallerden birisi de fotonik kristallerdir. Fotonik kristaller dielektrik sabitinin periyodik olarak değiştiği yapılardır. Düzenli değişen periyodik dielektrik yapılarda, elektromanyetik dalgaların yayılımı belirli yönlerde ve belirli bir frekans aralığında yasaklanabilir. Bu benzerlik nedeniyle, FK'in güçlü yansıma sergilediği bu dalga boyları bölgesi (yasaklı frekans bölgesi), “fotonik bant aralığı” (FBA) olarak adlandırılır.

Bu çalışmada, iki boyutlu fotonik kristallerle elektromanyetik dalgalar arasındaki etkileşim incelenmiştir. Bandlarla ilgili teorik hesaplamalar BandSOLVE (RSoft Design Group) paket yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu incelemede, malzeme olarak galyum arsenik, silisyum, silika ve alümina seçilmiştir.

Birinci bölüm, fotonik kristallerle ilgili temel kavramları içermektedir.

İkinci bölümde, kare ve üçgen örgülü iki boyutlu fotonik kristallerin TE ve TM modları için bant yapıları elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde, tartışma ve sonuç kısmına yer verilmiş ve elde edilen fotonik kristallerin bant yapıları yorumlanmıştır.

BÖLÜM 1

FOTONİK KRİSTALLER

1.1 Giriş

Fotonik, ışığı oluşturan fotonların üretilmesi, yönlendirilmesi, ışığın madde ile olan etkileşimi, algılanması ve taşınması ile uğraşan bir alandır. Fotonik kristaller, dielektrik sabitinin periyodik olarak değiştiği yapılardır. Düzenli değişen dielektrik yapı, elektromanyetik dalgaların belirli yönlerde ve belirli frekans aralığında ilerlemesini engeller. Bu yüzden *optiksel yalıtkan* olarak adlandırılabilirler. Geçtiğimiz on yıl boyunca, Fotonik Bant Aralıklı (FBA) yapılar ya da diğer adıyla Fotonik Kristaller (FK) yoğun çalışmaların konusu olmuştur ve bilim toplumunda artan bir ilgi çekmişlerdir [1-2].

Fotonik kristaller başlangıçta yapay maddeler olarak düşünülmesine rağmen, doğada da var oldukları bulunmuştur [3,4]. Opaller (panzehirtaşları) doğal fotonik kristallerin en iyi bilinen örnekleridir. Bir opaller, çapları mikrometre-altı bölgede olan silis kürelerin üç boyutlu bir örgü düzenidir [5]. Opallerin güzel renkleri onların doğal fotonik kristal olmalarının doğrudan bir sonucudur. Aynı zamanda fotonik kristallerin biyolojide de yer aldığı keşfedilmiştir. Bazı kelebekler ve güvelerin güzel yanardöner kanatları, gerçekte renk pigmentleri içermemelerine rağmen, kanatlarının yüzeylerinde fotonik kristal bulunması nedeniyledir [3-6]. Doğada böyle periyodik yapıların yarattığı etkiye rastlamak mümkündür. Bir kelebeğin kanadı veya bazı kristal mineraller gibi, parlak farklı iki maddenin belli bir doğrultuda periyodik olarak yerleştikleri mikroskobik katmanlar mevcuttur. Katmanlar üzerine ışık ışını geldiğinde “fotonik bant aralığı” tarafından ışık yansıtılır. Katmanlar arasındaki doğal optik sabit küçük olduğundan bant aralığı dardır ve sadece bir özel renk parlak bir şekilde gözlenir. Gelen ışığın açısı değiştikçe belli yöndeki periyodiklik değişir ve bant aralığı ışığın dalga boyuna göre değişime uğrar. Böylece, farklı açılarda farklı renkler oluşur. Lord Rayleigh [7], bu tür bir kristal mineral üzerine odaklanmış ve tam bir teorisini türetmiştir [8], ancak daha sonra bu konudaki çalışmasına devam etmemiştir. Bir boyutlu (1B) periyodik ortamlar

için genel çözümü veren Bloch-Floquet teoremini türetmek üzere olduğu sonradan anlaşılmıştır. Uzun yıllar boyunca, periyodik ortamda dalgaların birbirini yok etme olasılığı bilim adamlarının ilgisini çekmemiştir.

FBA veya yaygın olarak kullanılan ismiyle FK'ler düşüncesi ilk kez 1987 yılında Sajejev John [9] ve Eli Yablonovitch'in [1] ışığın yerelleştirilmesi ve "kendiliğinden yayma" hakkındaki fikirleri doğrultusunda ortaya çıkmıştır. Böylece, fotonik kristallerin optik özelliklerinin kontrolü amaçlanarak ışık yayılımını yasaklayan ya da sadece belli frekanslarda belli yönlerde izin veren ve hatta özel alanlarda ışığı yerelleştiren malzemeler üzerine odaklanılmıştır. Yablonovitch [1], bir dizi deney sonucunda, silikon ve diğer yarıiletkenlerin elektrik devrelerinin kontrolünü sağlaması gibi, özel bir kristal yapının ışık ışınını kontrol edebileceğini ve optoelektronikte devrim yaratacağını savunmuştur. İlk başarılı fotonik kristal (Yablonovite kristali), kovukların kesişen dizilerinin seramik malzeme blokları içine sokulmasıyla biçimlendirilmiştir [10]. Deneysel olarak böyle bir kristalin var olabileceğinin gösterilmesini takip eden yıllarda, araştırmacılar bu disiplinlerarası araştırma alanına yoğunlaşmışlar ve özellikle lineer-optik, lazer teknolojisi ve kuantum optiği gibi alanlarda hızlı gelişmeler sağlamışlardır [11,12].

FK'lerin teorik altyapısı, katıhal fiziğine ve elektromanyetik teoriye dayalıdır. Bu yapılarda elektromanyetik dalgaların davranışı, doğal kristallerde elektron dalgalarının davranışına [13] benzetilerek açıklanır [14]. Doğal bir kristal, atom veya moleküllerin periyodik dizilmesiyle oluşur ve bir kristal örgü, atom veya moleküllerin blok oluşturduğu küçük bir baz uzayında kendini tekrar etmesiyle meydana gelir. Böylece kristal, elektron yayılımı için periyodik potansiyele sahiptir. Bu tür periyodik potansiyeller, kristal katılarda ve heteroyapılarda kendini gösterir [15]. Doğal bir kristaldeki atomik potansiyeller, elektronların dalga fonksiyonlarını etkiler ve elektron bantlarının oluşumuna sebep olur. Böyle bir elektronun öz seviyeleri Bloch seviyeleri olarak bilinir. Brillouin bölgeleri sınırında Bragg yansımasının bir sonucu olarak elektron enerji spektrumunda boşluklar görülür. Bu boşluklarda elektronların belli yönlerde yayılımı yasaktır. Verilen bir elektronik bant yapısının nitelikleri, yapının periyodiklik özelliklerine bağlıdır ve farklı kristal katılarda farklı bant yapıları mevcuttur. Örgü potansiyeli yeterince güçlü ise boşluk "tam bant aralığı" oluşturacak şekilde genişler

(örneğin bir yarıiletken, değerlik ve iletkenlik bantları arasında tam bant aralığı görülür).

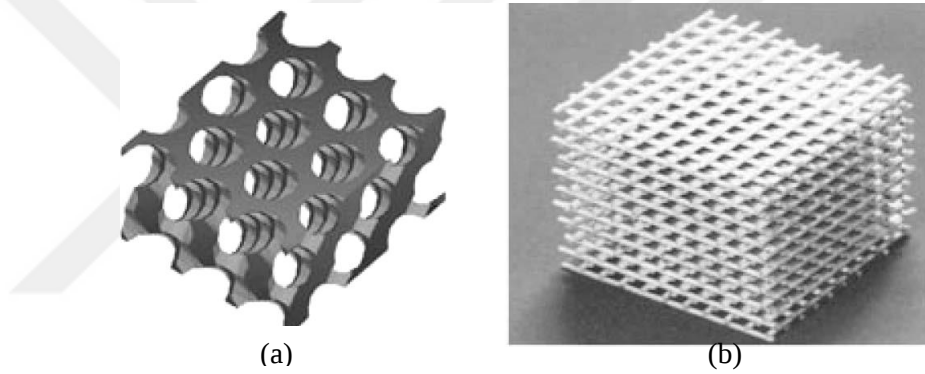
FK'ler, bir birim hücre boyutu, kızılötesi veya görünür bölgedeki dalga boyu mertebesinde olacak şekilde periyodik biçimde yapılandırılmış dielektrik katılar olarak da düşünülebilir. Fotonik kristallerin olağanüstü optik özellikleri, bu yapıların oldukça fazla ilgi çekmelerine neden olmuştur. Bu olağanüstü optik özelliklerin başında da, periyodik yapılarının, ışığın dağınımını (dispersiyon), teorik olarak fotonik bant yapılarıyla tanımlanan çok özel bir tarzda kontrol edebilmeleri gelir [16].

FBA'nın temel özelliği, 1990'ların başlarında deneysel olarak gösterilmiştir [5]. Bu gelişme büyük bir ilgi uyandırmış ve fotonik alanındaki çalışmaları oldukça güçlendirmiştir. Gösterilen bu büyük ilginin birkaç sebebi vardır. İlki; fotonik kristallerin elektromanyetik teori, nano-üretim, yarıiletken teknolojisi, madde bilimi, biyoteknoloji gibi bilim dallarını içeren pek çok araştırmanın hızla artmasını sağlamalarıdır. Diğer sebep, yeni uygulamalar ve aletler için eşsiz özellikler meydana getirecek ve büyük fiziksel boyutlar, oldukça düşük işlevsellik ve yüksek maliyetler gibi fotonikte istenmeyen konuların bir kısmını ortadan kaldırmaya katkıda bulunacak fotonik kristallerin, tüm dünyada oldukça fazla beklentilere neden olmasıdır.

Fotonik aletlerin performansındaki heyecanlandırıcı gelişmeler nedeniyle fotonik kristaller üzerine yapılan araştırmalar geçtiğimiz son birkaç yılda artmıştır. FK'ler, dielektrik sabitinin bir, iki ve üç boyutta periyodik olarak değişimine uygun biçimde bir-, iki- ve üç-boyutlu olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir [2]. Bir-boyutlu FK'lerin, iyi bilinen bir-boyutlu Bragg kafeslerinin benzerleri olarak ele alınmasına karşın, boyutlar bir'den ikiye çıkarıldığında (ve sonunda üç boyuta) yeni olayların ve olanakların varlığı ortaya çıkar. Ayrıca, bir-boyutlu fotonik kristaller, yüksek yansıtıcı aynalar ve optik filtreler gibi pek çok uygulamaya sahiptir. Dikey kovuklu yüzey-yayıcı lazerleri (VCSELs) içeren modern yarıiletken lazerlerin çoğu bir-boyutlu fotonik kristallerden faydalanır. Dağınım ve bant aralığı mühendisliği bir-boyutlu yapılarda da yapılabilmesine rağmen, boyutlandırmayı iki ve üç boyuta arttırmak yeni özellikler ve aletin yapısal olanaklarının geniş bir spektrumunu sunar [5]. Örneğin, yapay olarak oluşturulmuş FK'ler, fotonik bant aralığına sahip oldukları için, kendiliğinden yayınımı ayarlamada kullanılabilirler [17].

Başlangıçta, kendiliğinden yayınımlı önlemede fotonik kristalleri kullanmak önerilmiştir; fakat bunun yanı sıra FK'ler, kendiliğinden yayınımlı artırmada da kullanılabilirler.

Şaşırtıcı olarak, dielektrik ortamların iki ve üç boyutlu periyodik yapıları, kendiliğinden yayınımlı yasaklanması [17] ve foton yerelleştirilmesi [9] için bu yapıların incelendiği 1987'ye kadar ciddi bir şekilde göz önüne alınmamıştır [5]. Bazı tartışmalardan sonra, 13 ile 15 GHz arasında değişen mikrodalga bölgesinde tam bir fotonik bant aralığına sahip üç boyutlu fotonik bir kristalin ilk deneysel açıklaması 1991'de yapılmıştır [18]. Üretilen fotonik kristal Şekil-1.1 (a)'da gösterildiği gibi yüzey merkezli kübik bir yapıdır ve bu yapı, katı bir dilimin üst yüzeyinde dikeyle 35.26° lik açı yapan üç oyuk takımı açılarak yapılmıştır.



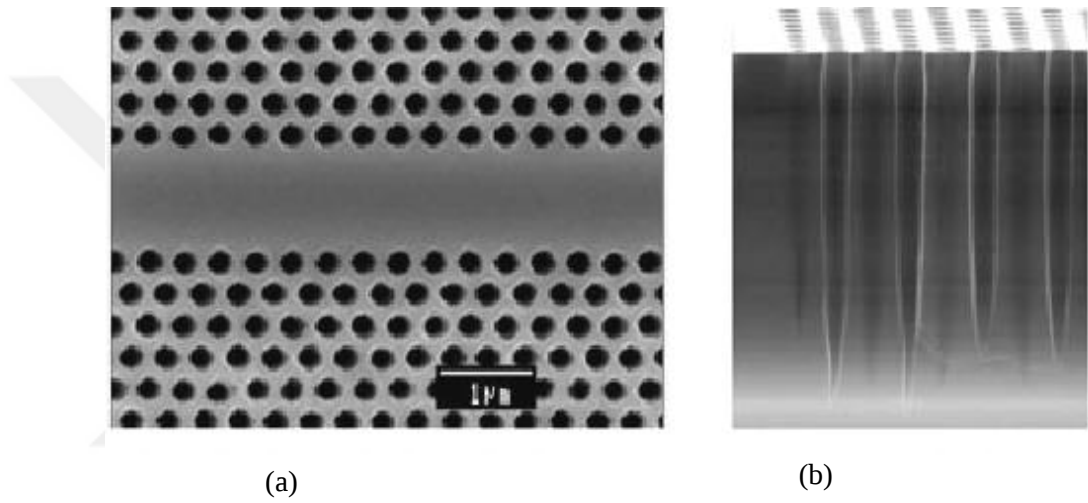
Şekil 1.1. Üç boyutlu bir fotonik kristal örneği. (a) Bir tam bant aralığına sahip ilk fotonik kristal, (b) Alüminyum çubukların yığılmasıyla elde edilen bir fotonik kristal [18].

Bundan sonra, üç boyutlu (3B) fotonik kristallerin diğer çeşitlerini elde etmek için özellikle optik bölgede önemli gayretler olmuş; ancak, optik bölge için 3B fotonik kristal yapımının çok karmaşık ve zor olduğu görülmüştür. Fotonik kristallerin boyutları ayarlanabilir olduğundan, bir yaklaşım, modern nano-üretim teknolojisini kullanarak, mikrodalga bölgesinde uygun şekilde çalışan bu yapıları optik bölgeye kaydırmaktır [5]. Şekil-1.1 (b)'de gösterilen örnek yapı “tabakalı yapı” olarak adlandırılır ve benzer yapılar, önce mikrodalga bölgesindeki [19] daha sonra kızılaltı bölgedeki [20,21] ve son olarak yakın kızılaltı bölgedeki [22] fotonik bant aralığı için üretilmiştir [23,24].

İki boyutlu (2B) fotonik kristallerin uygun şekilde kontrollü üretimleri ve gelecekte düzlemsel fotonik tümleşik devreler için potansiyelleri nedeniyle, iki boyutlu fotonik kristal çalışmalarında yoğun çabalar gösterilmiştir [18]. Optik bölgede (kızılötesi

bölgede) 2B fotonik kristalin ilk deneysel gösterimi 1995’de yapılmıştır [25]. Buradaki fotonik kristal gözenekli silikon içinde oluşturulan “sonsuz derinlikli” (birkaç yüz mikron derinlikli; örgü sabiti sadece birkaç mikrondur) bir yapıdır.

GaAs tabanlı bir yapıda iki boyutlu bir fotonik kristalin ilk deneysel gösterimi 1996’da Krauss tarafından gerçekleştirilmiştir [18]. Benzer yapılar aynı zamanda InP tabanlı yapılarda da gözlenilmiştir [26]. Şekil-1.2, bir InP/GaIn-AsP/InP heteroyapı içinde gözlenilen iki boyutlu bir fotonik kristal örneğini göstermektedir.

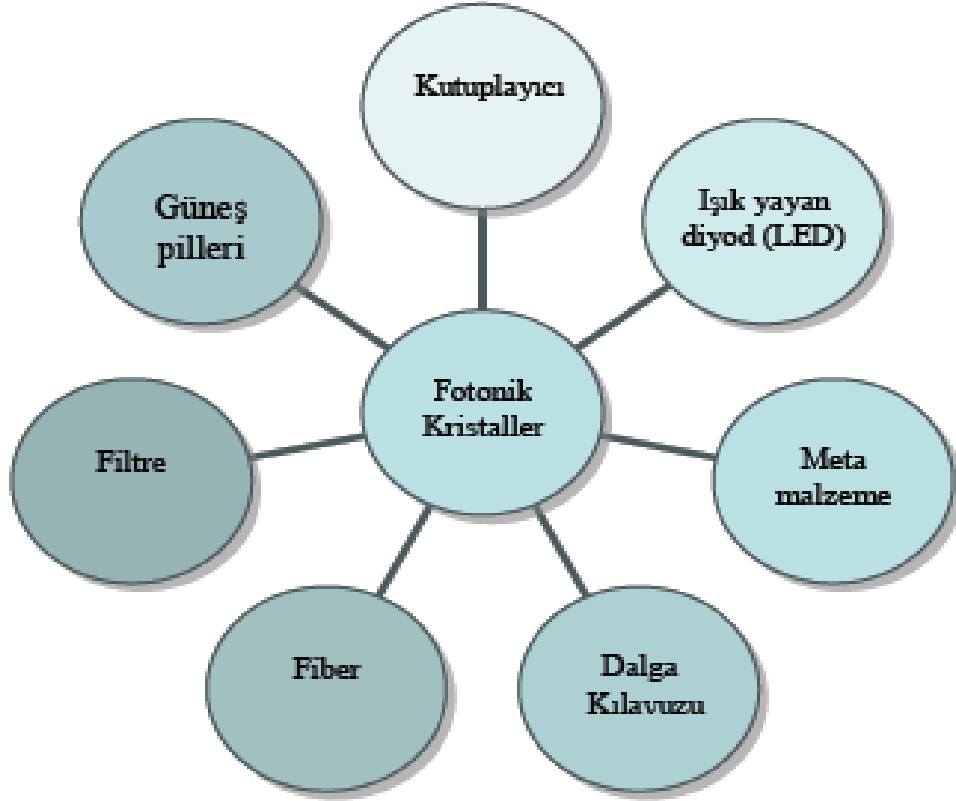


Şekil1.2. InP/ GaIn/InP heteroyapı içinde üretilmiş iki boyutlu bir fotonik kristal aygıtın (a) üstten görünüşü, (b) yandan görünüşü [26].

Metalik fotonik bant aralıklı sistemler ise dielektrik fotonik kristallerden daha az ilgi çekmiştir [5]. Bununla birlikte, periyodik metalik yapıların da önemli uygulamalarının olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Chan ve çalışma arkadaşları [27], dielektrik özlü, metal kaplamalı ve dış yalıtım tabakası olan küreler şeklinde metalik “fotonik atomlar” dan yapılmış üç boyutlu bir fotonik kristal tasarlamışlardır (birbirine dokunmayan katı metal kürelerden yapılmış bir sistem, nitel olarak benzer davranışlara sahip olacaktır). Eğer küre doldurma oranı eşik değeri aşarsa, güçlü bir fotonik bant aralığı, yüzey merkezli kübik, cisim merkezli kübik, elmas yapı ve hatta basit kübik yapı gibi herhangi bir periyodik yapı içinde mevcut olur [5].

Yukarıda özetlendiği gibi, son yıllarda optik sistemler için fotonik kristaller, teorik ve pratik çalışmalar açısından büyük bir ilgi alanı oluşturmuştur ve fotonik, geleceğin

teknolojisi olarak görülmektedir. Fotonik kristallerin pek çok kullanım alanı vardır. Lazer teknolojisinde, fiber optik yapılarda, yüksek hızlı optiksel bilgisayarlarda, mikroçiplerde, ışığı bükebilen meta-malzemelerde, ışık yayan diyotlarda, güneş pillerinde vb. kullanılabilir. Fotonik kristallerin kullanım alanları Şekil 1.3’de özetlenmiştir.



Şekil 1.3. Fotonik kristallerin uygulama alanları.

1.2 Fotonik Kristaller ve Fotonik Bantlar

Atomlar ya da moleküllerin uzayda kendilerini tekrarladıkları desen kristal örgüsünü oluşturur.. Kristal, içinde yayılan bir elektrona periyodik bir potansiyel gösterir ve hem kristalin kompozisyonu hem de örgünün geometrisi kristalin iletim özelliklerini belirler.

Elektronlar, dalgalar gibi yayılırlar ve belli ölçütleri sağlayan dalgalar saçılmadan periyodik bir potansiyelden geçebilirler (kusurlar ve safsızlıklar tarafından saçılacak olsalar bile). Bununla birlikte örgü, belli dalgaların yayılmasını önemli oranda yasaklayabilir. Kristalin enerji bant yapısı içinde **aralıklar** bulunabilir; bu demektir ki

elektronların belli enerjilerle belli doğrultularda yayılması yasaklanmıştır. Eğer örgü potansiyeli yeterince kuvvetli ise aralık, mümkün bütün yayılma doğrultularını kapsayacak şekilde genişleyebilir ki bu da bir **tam bant aralığı** sonucunu doğurur. Örneğin, bir yarıiletken değerlik ve iletim enerji bantları arasında bir tam bant aralığına sahiptir.

Yarıiletkenlerin optik benzeri **fotonik kristal**dir. Bu durumda atomlar ve moleküller farklı dielektrik sabitli makroskopik ortamlarla, periyodik potansiyel ise periyodik bir dielektrik fonksiyonla (veya eşdeğer olarak, bir periyodik kırılma indisi ile) yer değiştirmiştir. Eğer kristaldeki maddelerin dielektrik sabitleri yeteri kadar farklı ve maddeler tarafından ışığın soğurulması minimum ise, o zaman farklı bütün ara yüzeylerdeki saçılmalar ve kırılmalar, atomik potansiyelin elektronlar için oluşturduğu olayların pek çoğunu **fotonlar** (ışık modları) için oluşturabilir. Böylece, düşük kayıplı, periyodik dielektrik bir ortam olan *FK*, optik kontrol ve optik işleme amaçlı bir düzen olarak kullanılabilir. Özellikle, belirli frekanslarla (yani, ışığın belli bir dalga boyu bölgesi veya renkler) ışığın belirli yönlerde yayılımını engelleyen **fotonik bant aralıklarına** sahip *FK*'ler tasarlanabilir ve imal edilebilir. Ayrıca, bir fotonik kristalin alışılmışın dışında ve kullanışlı yollarla yayılmayı mümkün kılabilirdiği görülmüştür.

Bu kavramı geliştirmek için, metalik dalga kılavuzları ve kovukların fotonik kristallerle nasıl bir ilişki içinde olduklarına bakalım. Metalik kovuklar ve dalga kılavuzları mikrodalga yayılımını kontrol etmek için yaygın olarak kullanılırlar. Bir metalik kovuğun duvarları, belli bir eşik frekansın altındaki frekanslara sahip elektromanyetik dalgaların yayılmasına izin vermez; bir metalik dalga kılavuzu ise sadece kendi eksen boyunca yayılıma izin verir. Bu özelliklerin her ikisi de oldukça kullanışlı olup görünür ışık gibi mikrodalga bölgesi dışındaki frekanslarda da kullanılabilir. Bununla birlikte, görünür ışık enerjisinin metalik elemanlarda hızlı şekilde zayıflatılması, bu optik kontrol yöntemini genelleştirmeyi imkânsızlaştırır. Fotonik kristaller, sadece kovuk ve dalga kılavuzu özelliklerini göstermezler, aynı zamanda geniş bir frekans bölgesi için ölçeklendirilebilir ve uygulanabilirlerdir. Böylece mikrodalga kontrolü için milimetre boyutlarında veya kızılaltı kontrol için mikron boyutlarında belli bir geometriye sahip fotonik kristal yapılabilir.

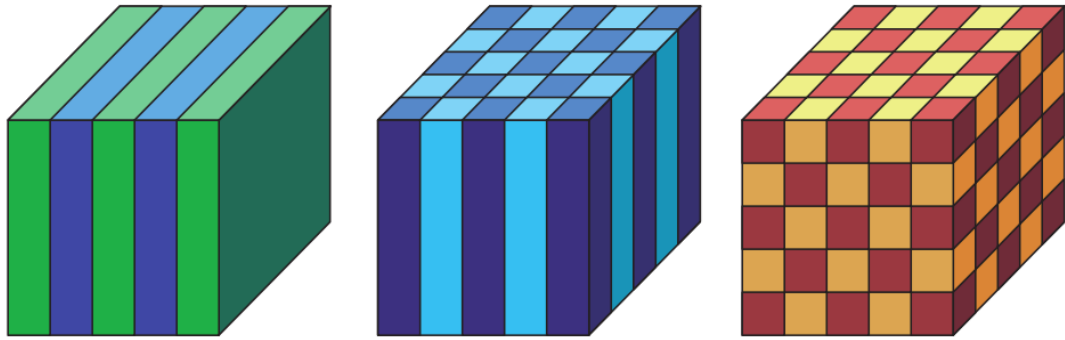
Yaygın olarak kullanılan bir diğer optik cihaz, farklı dielektrik madde tabakalarının değişimli olarak yığılmasıyla oluşan, *çeyrek-dalga yığını* gibi çok-tabakalı bir dielektrik aynadır. Uygun dalga boylarındaki ışık, böyle tabakalı bir maddeye geldiğinde tamamıyla yansıtılır. Bunun sebebi, ışık dalgasının her tabaka ara yüzeyinde kısmen yansımadır ve eğer tabaka aralıkları periyodikse, gelen dalganın çoklu yansımaları, ileri yönde yayılan dalgayı yok edecek şekilde yıkıcı girişim yaparlar. İlk kez 1887'de Lord Rayleigh tarafından açıklanan bu iyi bilinen etki, dielektrik aynalar, dielektrik Fabry-Perot filtreleri ve dağıtılmış geri beslemeli lazerleri (Distributed Feedback Lasers) içeren pek çok aletin temelini oluşturur. Bunların tamamı, bir boyutta periyodik olan düşük kayıplı dielektrikleri yani, bizim tanımlamamızla *bir-boyutlu fotonik kristalleri* kapsar. Bu en basit fotonik kristaller bile şaşırtıcı özelliklere sahiptirler. Yansımanın sadece normale yakın geliş için düzenlenebileceği yaygın kanaatine rağmen, çok-tabakalı ortamlar, herhangi bir kutuplanmayla ve herhangi bir açıyla gelen ışığı yansıtacak şekilde (her-yönlü yansıtıcı) tasarlanabilir.

Eğer bir fotonik kristal, bir frekans bölgesi için, *herhangi* bir kaynaktan *herhangi* bir doğrultuda gelen, *herhangi* bir kutuplanmaya sahip elektromanyetik dalgaların yayılmasını yasaklıyorsa, o zaman o kristalin bir **tam fotonik bant aralığına** sahip olduğunu söyleriz. Tam bant aralıklı bir kristal açıkça her-yönlü bir yansıtıcı olacaktır, fakat bunun tersi doğru değildir. Genellikle, bir tam bant aralığı oluşturmak için, dielektrik örgü üç eksen boyunca periyodik olacak şekilde düzenleme yapılmalıdır; bu *üç-boyutlu* bir fotonik kristal oluşturur. Ancak, istisnalar vardır. Periyodikliği bozacak olan küçük bir düzensizlik bir bant aralığını bozmaz [28-29].

1.3 Fotonik Kristallerin Genel Özellikleri

1.3.1 Fotonik Kristal Türleri

Fotonik kristaller bir, iki ya da üç boyutta periyodik yalıtkan (dielektrik) yapılardır. Fotonik kristal örnekleri Şekil 1.4'de verilmiştir.



Bir boyutta periyodik

İki boyutta periyodik

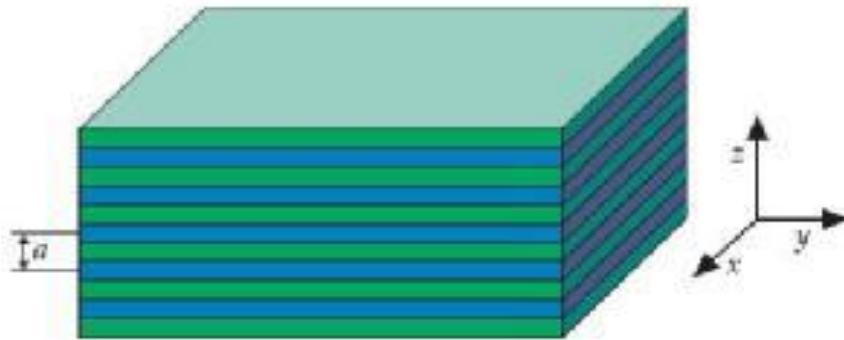
Üç boyutta periyodik

Şekil 1.4. Bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristaller [30].

1.3.2 Bir Boyutlu Fotonik Kristaller

En basit ve en kolay şekilde yapılan fotonik kristaller bir boyutlu fotonik kristallerdir ve farklı dielektrik tabakaların üst üste yerleştirilmesi ile oluşturulur (Şekil 1.5). 1B fotonik kristal, Bragg aynası olarak adlandırılır. Bir boyutlu fotonik kristallerle, yüksek yansıtıcı aynalar ve optik filtreler gibi uygulamalar yapmak mümkündür.

Düzlem dalga her ara yüzeyde yansımaya ve kırılmaya uğrar. Bunun sonucunda iki boyutta elektromanyetik kipleri tanımlayabilmek için yine simetrier kullanılır.



Şekil 1.5. Bir boyutlu fotonik kristal [30].

Dielektrik fonksiyonu $\epsilon(z)$ sadece z yönünde değişir, x ve y yönünde değişmezdir. Kristal xy doğrultusunda sürekli öteleme simetrisine sahiptir. z doğrultusunda ise kesikli periyodiklikten dolayı kesikli öteleme simetrisi vardır. Kipleri (modları) sınıflandırmak

için xy düzlemi içindeki dalga vektörü $k_{//}$, z yönündeki dalga vektörü k_z ve bant sayısı n kullanılır. Frekans arttıkça bant sayısı artar. Kipler Bloch biçiminde yazılırsa,

$$H_{n,k_z,k_{//}}(r) = e^{ik_{//}\rho} e^{ik_z z} u_{n,k_z,k_{//}}(z) \quad (1.1)$$

ifade edilir. $u(z)$ fonksiyonu periyodiktir. $k_{//}$ ise tabakaların arakesit yüzeylerine paralel olan dalga vektörüdür. Kristal xy düzleminde sürekli öteleme simetrisine sahip olduğu için, $k_{//}$ dalga vektörü herhangi bir değer alabilir. Fakat k_z dalga vektörü bir boyutta Brillouin bölgesinde sınırlıdır.

Sırasıyla n_1, n_2 kırılma indisli ve d_1, d_2 kalınlıklı tabakaların a -periyodu ile yerleştirildiği bu yapıda bant aralığı, ters örgünün Brillouin kenarlarında ya da bölgenin merkezindedir. Bant diyagramları dalga vektörleri ve frekansa göre çizilir. Bant aralığı büyüklüğü, frekans aralığının frekans aralığı içindeki minimum ve maksimum değerlerin ortalamasına oranı ile bulunur. Bu frekans ve dalga vektörü boyutsuz birimlerle $\frac{wa}{2\pi c}$ ve

$\frac{ka}{2\pi}$ 'ye eşittir. Boyutsuz frekans $\frac{a}{\lambda}$ ve $\lambda = \frac{2\pi c}{w}$ dir. Frekans aralığının ortalama değeri

$$w_m = \frac{n_1 + n_2}{4n_1 n_2} \frac{2\pi c}{a} \quad (1.2)$$

ile verilir. Dalga boyu ise

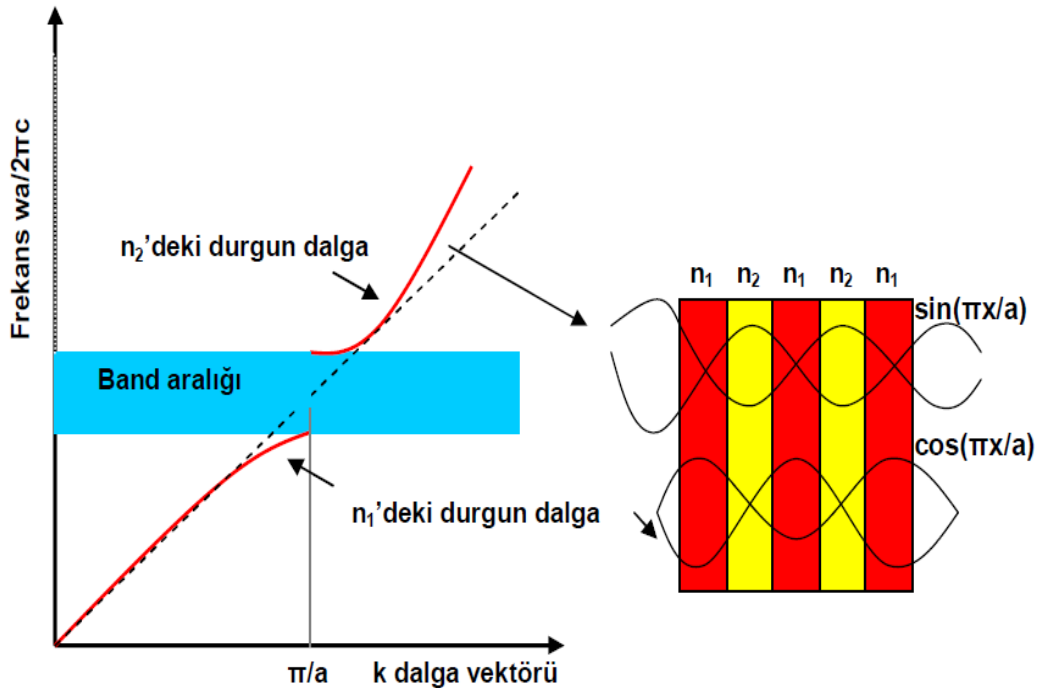
$$\begin{aligned} \lambda_m &= \frac{2\pi c}{w_m} \\ \frac{\lambda_m}{n_1} &= 4d_1 \\ \frac{\lambda_m}{n_2} &= 4d_2 \end{aligned} \quad (1.3)$$

olur. Her tabaka çeyrek dalga boyu kalınlığındadır. Bu yüzden, bir boyutlu fotonik kristaller çeyrek-dalga yığını olarak tanımlanır. Bu durumda, frekans aralığındaki her tabakadan yansıyan dalgalar aynı fazda olur. Çeyrek dalga yığınının ilk iki bandı arasındaki aralık için frekans aralığının, frekans aralığının ortalamasına oranı

$$\frac{\Delta w}{w_m} = \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{|n_1 - n_2|}{n_1 + n_2} \right) \quad (1.4)$$

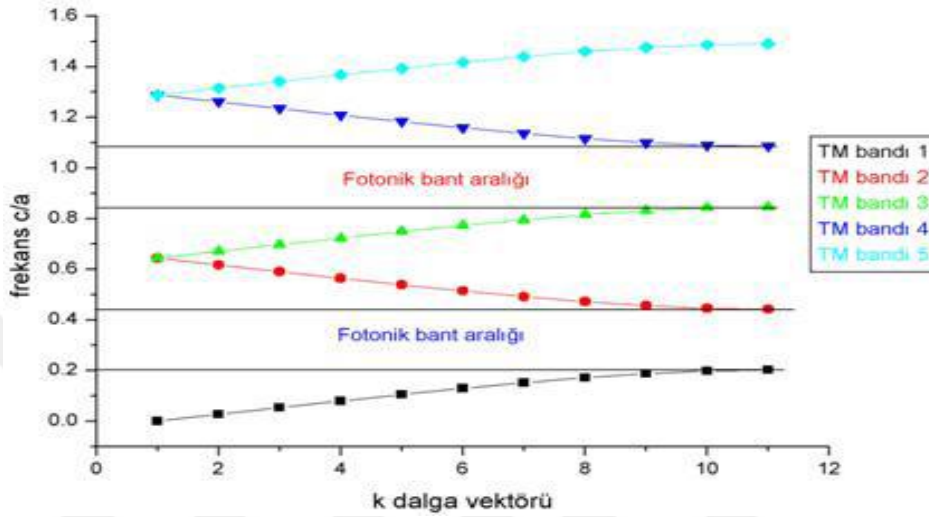
ile verilir.

1B fotonik kristallerinde fotonik bant aralığı tek boyutta oluşur. Şekil 1.6’da gösterildiği gibi, tek boyutta yüksek ve düşük kırıcılık indisine sahip dielektrik ortamlar periyodik olarak ayarlanmıştır. Dalgaların ilerleme yönü dielektrik ortamların periyodik olarak değiştiği yöndedir. Fotonik bant aralığı da bu yönde oluşacaktır. Çünkü ışık farklı bir ortama geçtiğinde iki farklı kutuplanmaya ayrılır. Işığın elektrik alan bileşeni, $E(x) = \exp\left(\frac{\pm i\pi x}{a}\right)$ lineer bileşimleri olan $e(x) = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$ olağandışı dalgalar ve $o(x) = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$ olağan dalgalar şeklinde yazılabilir. İki dalgaın kutuplanması birbirine diktir. Bu durumda farklı titreşim potansiyeli oluşur. $e(x)$ alanı yüksek dielektrik bölgesinde yoğunlaşırken, düşük frekans bandı oluşturmakta; $o(x)$ alanı düşük dielektriğe sahip bölgede yoğunlaşırken, yüksek frekans bandı oluşturmaktadır.



Şekil 1.6. Bir boyutta dağıtıcılık bağıntısı ve durgun dalgalar.

Şekil 1.7’de bir boyutlu fotonik kristale ait bant yapısı verilmektedir. Band diyagramı $k = 0$ ve $k = \left(\frac{\pi}{a}\right)$ aralığındadır. Daha yüksek dalga vektörlerine ait bantlar kesikli dönüşüm simetrisine bağlı olarak $k = 0$ ve $k = \left(\frac{\pi}{a}\right)$ aralığına katlanmıştır.



Şekil 1.7. Bir boyutlu fotonik kristalde bant yapısı.

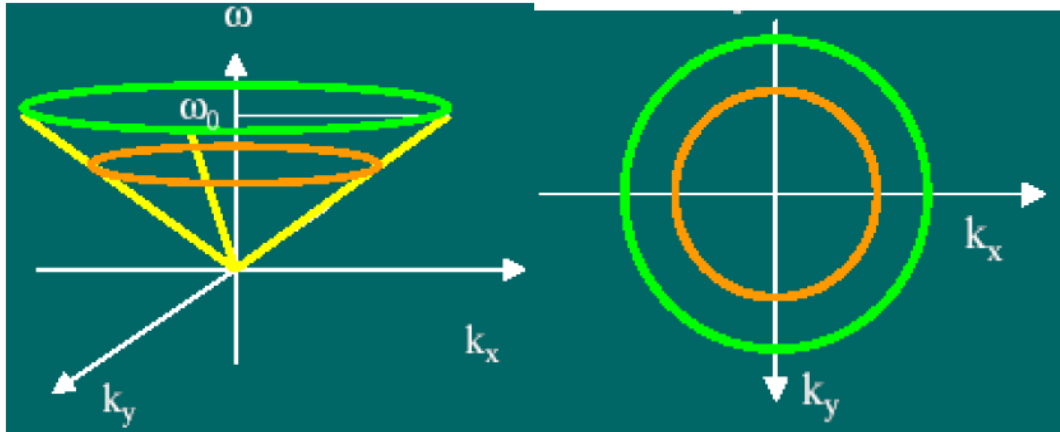
1.3.3 İki Boyutlu Fotonik Kristaller

Bu durumda fotonik bant aralıkları periyodik düzlem içinde görünür. Bu düzlem içinde ışığın yayılması için harmonik kipler iki bağımsız kutuplanmaya ayrılır ve harmonik kiplerin her birisinin kendine özgü bant yapısı vardır. Işık kiplerini yerelleştirmek için örgü kusurları üretilebilir, ancak bu durumda kip iki boyutta yerelleşebilir. Boyutların birden ikiye ve üçe çıkması ile yeni durumlar ortaya çıkar. Farklı şekillerde 2B fotonik kristal oluşturmak mümkündür.

1B fotonik kristallerde bir ışık çizgisi düşünülürken, 2B fotonik kristallerde ışık konisi düşünülür. Verilen w frekansı için bu koni çember olur. Bu ışık konisi hacimsel bir temelde mümkün bütün frekanslarının sürekli bölgesini gösterir. 2B bir sistemde açılal frekans

$$w = c\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (1.5)$$

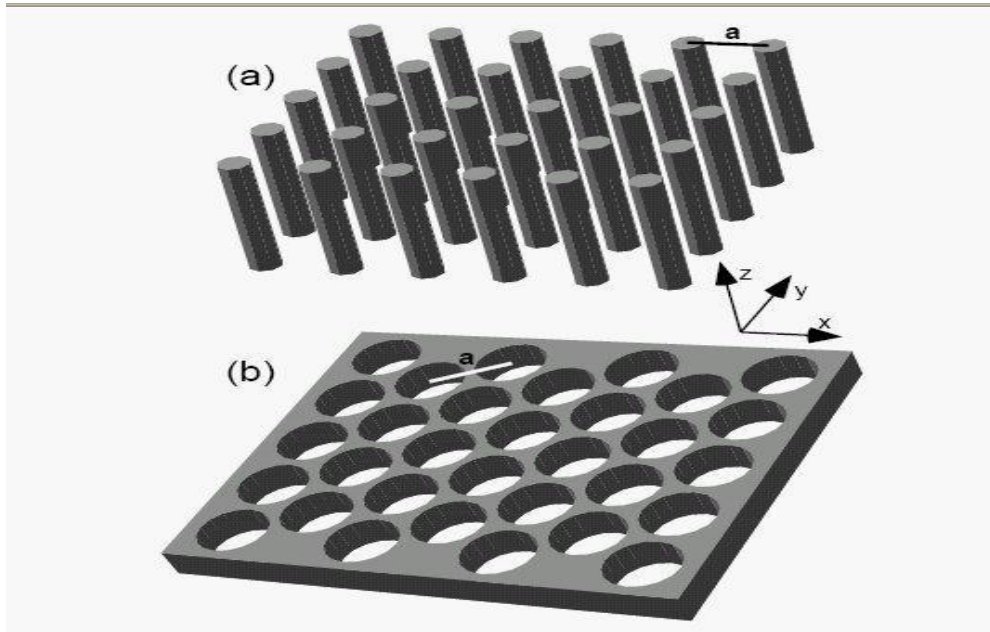
şeklinde ifade edilir. (1.5) denklemi Şekil 1.8’de verildiği gibi bir koniyi yansıtmaktadır.



Şekil 1.8.İki boyutlu fotonik kristalde düzlem dalgaının bant yapısı ve konturlar.

2B fotonik kristali iki şekilde oluşturmak mümkündür: Birincisi, hava içindeki dielektrik çubukların kare örgüsü ile ve ikincisi, dielektrik plaka içindeki hava boşluklarının altıgen örgüsü ile (Şekil 1.9).

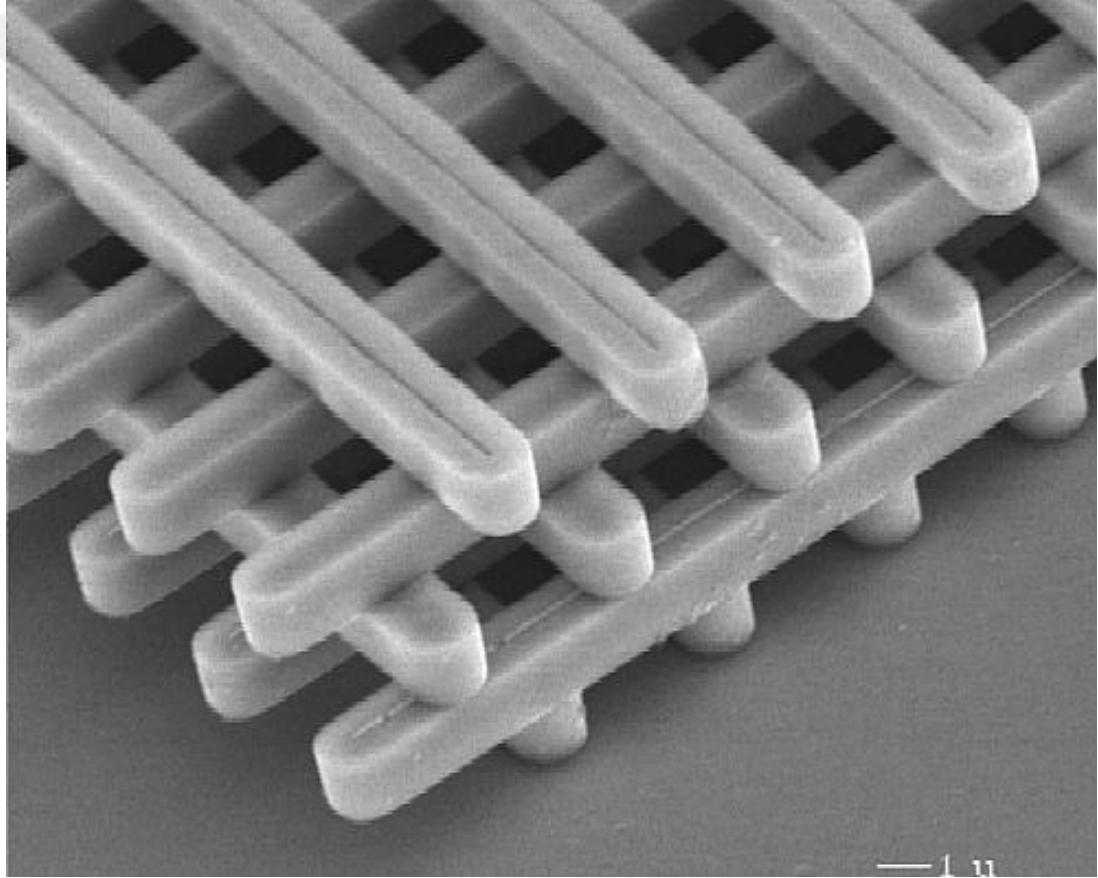
Hava içindeki dielektrik çubukların kare örgüsü ve dielektrik plaka içindeki hava boşluklarının altıgen örgüsü bunlardan bazılarıdır. Şekil 1.9a’ da birbirine paralel dik sütunlar z yönündedir ve xy düzlemine diktir. xy düzlemi boyunca gönderilen ışık xy düzleminde periyodiktir ve z yönünde serbestçe yayılabilir.



Şekil 1.9. İki boyutlu fotonik kristal örnekleri. (a) Etrafı havayla çevrili dielektrik çubuklar, (b) etrafı dielektrik ile çevrili boşluklar [8].

İki boyutlu fotonik kristaller, düzlemsel optik tümleşik devrelerde (TD) uygulamaları bakımından önemlidir. Optik tümleşik terimi ilk defa 1960'ların sonlarında kullanılmıştır [18]. Fotonik tümleşmede yeni gelişen yaygın örnekler; dalga kılavuzu, kırınım ağı, çoklayıcı (multiplexer) veya tekleyici (demultiplexer) gibi elemanlardır [5]. Optik bölgede (kızılaltı bölgede) iki boyutlu fotonik kristalin ilk deneysel gösterimi 1995'de yapılmıştır [31].

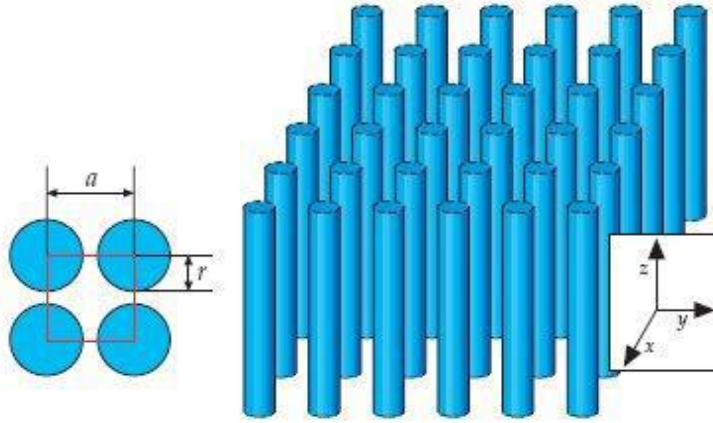
Üç boyutlu fotonik kristal üretimi ise çok daha karmaşık ve zordur. Fotonik bant aralığına sahip üç boyutlu fotonik bir kristalin ilk deneysel açıklaması 1991'de yapılmıştır [14].



Şekil 1.10. Üç boyutlu fotonik kristal örneği. Fotonik bant aralığına sahip ilk üç boyutlu kristal [30].

1.3.4 İki Boyutta Bloch Seviyesi

İki boyutlu fotonik kristallere örnek olarak Şekil 1.11'de gösterilen yapı verilebilir.



Şekil 1.11. Dielektrik sütunların kare örgüsü.

Şekil 1.11’de yarıçapı r ve dielektrik sabiti ϵ olan dielektrik sütunların kare örgüsü verilmektedir. Bu materyal z doğrultusu boyunca sürekli dönüşüm simetrisine sahiptir. a örgü sabitiyle x ve y boyunca periyodiktir. Sol tarafta kare örgünün üstten görünümü ile kare içindeki birim hücre verilmektedir. Fotonik bant aralığı xy düzlemi içindedir.

Elektromanyetik kipleri tanımlayabilmek için kristalin simetrisi kullanılır. z doğrultusu içinde sistem sürekli dönüşüm simetrisine sahip olduğundan kipler bu yönde iki farklı kutuplanmaya ayrılacaktır. Ancak sistem xy düzleminde kesikli dönüşüm simetrisine sahiptir. $\epsilon(r) = \epsilon(r + R)$ ve R , $a\hat{x}$ ve $a\hat{y}$ ilkel örgü vektörlerinin herhangi bir doğrusal birleşimidir. Brillouin bölgesi içinde olan k_l ‘nin değerleri üzerinde Bloch teoremi uygulanabilmektedir. Artan frekanslar sırasına göre kipleri sınıflandırmak için n bant sayısı kullanılır. Bloch seviyeleri,

$$H(n, k_z, k_l)(r) = \exp(ik_l \rho) \cdot \exp(ik_z z) \cdot u_{(n, k_z, k_l)}(\rho) \quad (1.6)$$

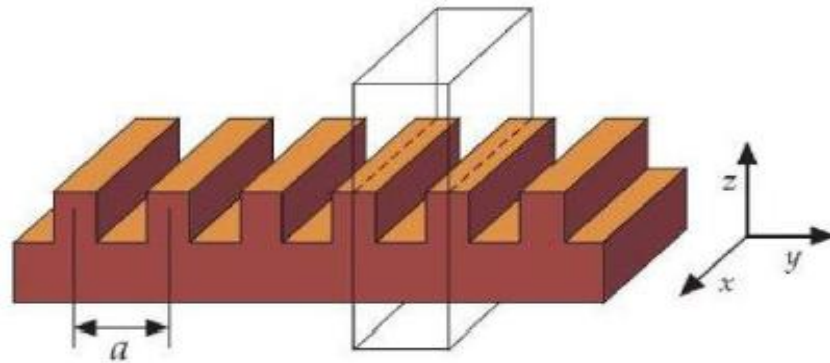
Bu denklemdeki ρ , r ‘nin xy düzlemindeki izdüşümüdür. Bütün örgü vektörleri R için periyodik bir $u(\rho)$ fonksiyonu, $u(\rho) = u(\rho + R)$, yazılabilir. Kesikli dönüşüm simetrisindeki dalga vektörü k_l Brillouin bölgesi içinde sınırlandırılırken, sürekli dönüşüm simetrisi içindeki k_z sınırlandırılmaz. $u(\rho)$ düzlem içinde kesikli periyodikliğe sahip iken z doğrultusunda sürekliliğe sahiptir. Kipleri sınıflandırmak için, ayna simetrisi, kipleri iki farklı kutuplanmaya ayırır.

Fotonik kristaller periyodik dielektrik yapılar olduğu için simetri özelliklerinden bahsetmek gerekmektedir. Öteleme (kesikli ve sürekli) simetrisi ve ayna simetrisi oldukça 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

$$T_d \epsilon(r) = \epsilon(r + d) = \epsilon(r) \quad (1.7)$$

eşitliği elde edilir.

Sürekli öteleme simetrisine sahip yapı belli bir yönde herhangi bir mesafede ötelendiğinde değişmeden kalır. Fotonik kristaller sürekli öteleme simetrisine sahip değildir, bunun yerine kesikli öteleme simetrisine sahiptirler. Şekil 1.12’de x -doğrultusunda sürekli öteleme simetrisi varken, y -doğrultusunda kesikli öteleme simetrisi vardır. Temel adım uzunluğu a örgü sabitidir ve ilkel örgü vektörü olarak adlandırılır.



Şekil 1.12. Kesikli öteleme simetrisine sahip dielektrik plaka [30].

Fotonik kristaller ayna simetrisine de sahiptir. Ayna simetrisi oldukça önemlidir. Şekil 1.12’ ye göre sistem yz ve xz -düzlemlerindeki ayna yansımaları altında değişmezdir.

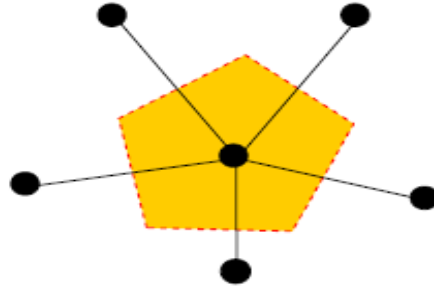
1.3.5 Kristallerin Elektronik ve Fotonik Özellikleri Arasında Karşılaştırma

Fotonik kristaller, örgü yapısı ve bant yapısını oluşturmak bakımından diğer kristallerle benzer özellikler taşır. Fotonik kristaller, diğer tüm kristallere benzer şekilde iki ayrı parçadan meydana gelmiş gibi düşünülebilir: Örgü ve baz. Tüm kristallerin yapısı bir örgü ile tanımlanabilir. Örgü, uzayda dizilmiş noktalar kümesidir. Bunun iki boyuttaki

karşılığı ağıdır. Örgünün her düğüm noktasında bulunan dielektrik çubuklar grubuna baz denir. Bu bazın uzayda tekrarlanmasıyla fotonik kristal oluşur.

Örgü + Baz = Fotonik Kristal

Bir örgü $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ üç temel öteleme vektörüyle tanımlanır. Bu vektörlere ilkel öteleme vektörleri denir. Kristalin yapıtaşı olan en küçük hücre, ilkel öteleme vektörleriyle oluşur. Bu hücre ilkel hücre olarak adlandırılır. İlkel hücre minimum hacimli bölgedir. Bu hücreyi ötelemek suretiyle kristal tüm uzayı doldurur. İlkel hücre seçimi için en uygun yol, bir örgü noktasını en yakın komşularına birleştiren doğruların orta dikmelerinin tanımladığı kapalı hacmi belirlemektir. İlkel hücre seçimi için en uygun yol şekil 1.13'da görüldüğü gibi Wigner-Seitz hücresidir.



Şekil 1.13. Wigner-Seitz ilkel hücresi.

1.3.6 Brillouin Bölgeleri

Fotonik kristallerde elektromanyetik dalga ile madde arasındaki etkileşim, kristalin ters örgüsünde anlaşılabilir. Çünkü elektromanyetik dalgalar kristal içerisinde yansır ve yansıyan dalgalar bir girişim deseni oluşturur. Bu girişim deseni kristalin ters örgü vektörleri üzerinde oluşur. Ters örgü vektörü kristalin Fourier uzayındaki örgüsüdür. Dalga vektörleri daima Fourier uzayında çizilir. Böylece Fourier uzayındaki her noktada dalganın özellikleri tanımlanabilir. Bu durum kristalin periyodikliğinin bir sonucudur. Bu periyodikliğe bağlı olarak fotonik kristalin bant yapısı ortaya çıkar. Bant yapısının oluşturulmasında Brillouin bölgeleri önemlidir. Çünkü FK'lerde yansımaları veren tüm dalga vektörleri Brillouin bölgesi içerisinde sınırlandırılır. Bir Brillouin bölgesi, ters

örgüde Wigner-Seitz ilkel hücresi olarak tanımlanır. Bu hücre en küçük hacimli bölgedir. Bu yüzden, bu bölge içerisinde en küçük öz durum (girişim desenindeki en küçük frekanslı kip) elde edilir. En küçük öz durumun elde edildiği bu bölge birinci Brillouin bölgesidir. Daha sonraki öz durum ikinci Brillouin bölgesinde olur. Bir hücreden diğer bir hücreye geçiş ters örgü vektörleri yardımıyla sağlanır. Brillouin bölgeleri ters uzayı bölgelere ayırırken kullanılır. Bloch teoremi ile elektronik yapılarda $V(r) = V(r + R)$ potansiyeline göre, fotonik yapılarda ise $\varepsilon(r) = \varepsilon(r + R)$ dielektrik fonksiyonuna göre özdeğer denklemleri çözülür. Fotonik kristallerin $R \equiv ba_x + ca_y + da_z$ vektörüyle tekrarlandığını varsayarsak, a_x , a_y ve a_z x, y ve z yönündeki periyotları gösterir. b, c ve d

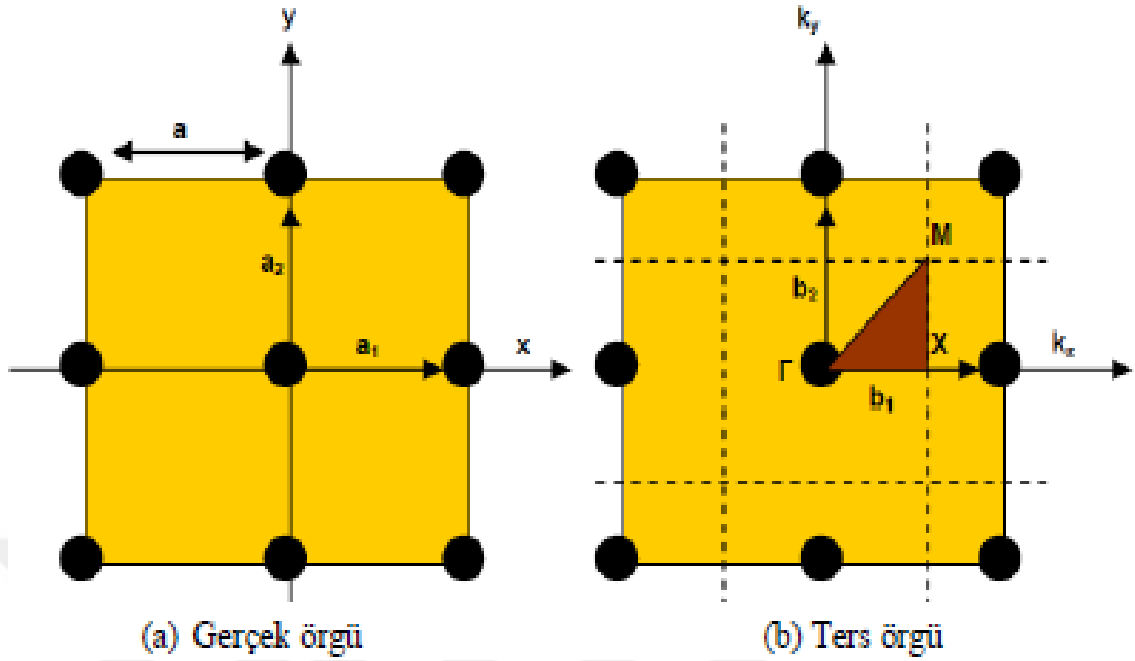
ise rastgele verilmiş tamsayılardır. Bu periyot (kare örgü için) $\frac{2\pi}{a_{x,y,z}}$ olur. Frekansın

kendini tekrarlamadığı sifıra en yakın aralığa I. Brillouin Bölgesi denir. Kare örgü için bu

aralık $\left[\frac{-\pi}{a_{x,y,z}}, \frac{\pi}{a_{x,y,z}} \right]$ dir. Brillouin bölgesi simetriden dolayı küçültülebilir. Kare örgü için

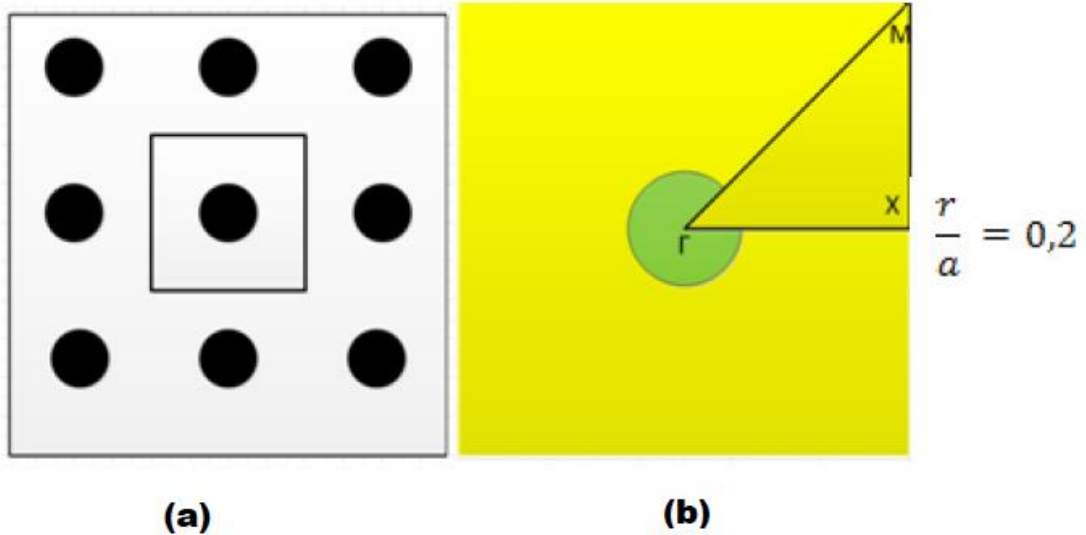
Brillouin bölgesi Şekil 1.14'deki gibidir. (a)'da yapının gerçek uzaydaki a aralıklı kare örgüsü verilmektedir. Örgü vektörleri $\vec{a}_1$ ve $\vec{a}_2$ ile gösterilmektedir. (b)'de ise kare örgünün $2\pi/a$ aralıklarıyla oluşturulmuş ters örgüsü verilmektedir. Ters örgünün eksen vektörleri $\vec{b}_1$ ve $\vec{b}_2$ ile gösterilmektedir. Noktalı çizgiler ters örgü vektörlerine dik açıortaydır. Bu çizgiler en yakın ters örgü noktalarıyla merkez noktasını (Γ noktası) birleştirmektedir. Bu çizgilerle kapatılmış bölge ilk Brillouin bölgesini kapsamaktadır. Taralı bölge ise en küçük hacimli indirgenemez Brillouin bölgesini vermektedir. M ve X noktaları ise Brillouin bölgesinin kenarlarını göstermektedir. Bu kenarlarda dalga paketinin hızı sıfırdır. (b)'deki taralı bölge en küçük hacimli "İndirgenemez Brillouin Bölgesi" dir. Bant yapısının oluşturulmasında Brillouin bölgeleri önemlidir. FK'lerde yansımaları veren tüm dalga vektörleri Brillouin bölgesinde sınırlandırılır. Bir hücreden diğer bir hücreye geçiş ters örgü vektörleriyle olur.

Kare örgüye göre dizilmiş dielektrik çubuklardan oluşan 2B bir fotonik kristal Şekil 1.14a'daki gibidir. Şekil 1.14b'de bu yapının ters örgüsü verilmiştir.

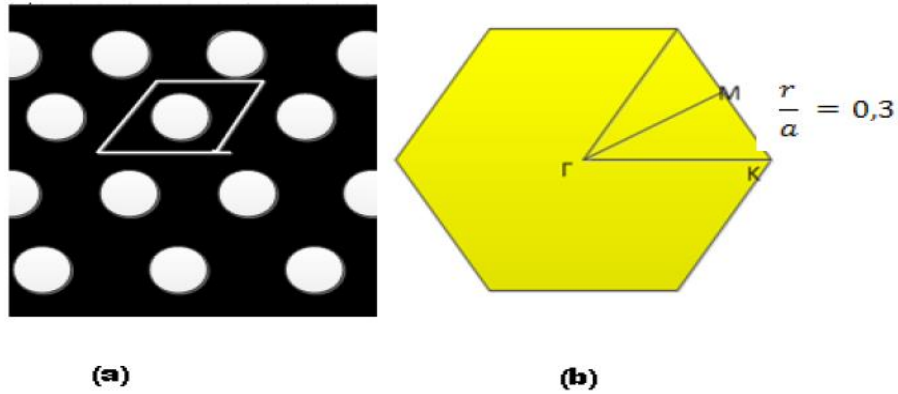


Şekil 1.14. (a) İki boyutlu kare örgü, (b) İndirgenemez brillouin bölgesi.

İki boyutlu kare örgü için farklı bir gösterim Şekil-1.15a ve b’de verilmiştir. Şekil 1.16a ve b’de ise üçgen örgülü iki boyutlu fotonik kristal yapısı ve ters örgüsü gösterilmiştir.



Şekil 1.15. (a) Kare örgü şeklinde dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal (Örgü sabiti a , silindirik çubukların yarıçapı $0,2a$ ’dır), (b) Ters uzayda simetri noktaları Γ , X ve M ’ dir.



Şekil 1.16. (a) Üçgen örgü şeklinde dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal (örgü sabiti a , silindirik çubukların yarıçapı $r = 0,3a$ 'dır), (b) Ters uzayda simetri noktaları Γ , K ve M' dir.

Bu yapıların yasaklı bant aralığını hesaplayabilmek için indirgenemez Brillouin alanlarının kenarlarına denk gelen $\vec{k}$ dalga vektörlerinde yapının harekete izin verdiği frekansları hesaplamak gerekir. Bir bandın minimum ve maksimumları, neredeyse her zaman bu Brillouin alanının uçlarında görülür. Ters örgülerdeki simetri noktalarından geçen üçgen boyunca frekansları düzlem dalga metodu ile çözmek mümkündür [30, 32].

Buna göre,

$$\vec{k}' = \vec{k} + \vec{G} \quad (1.8)$$

$\vec{k}'$ burada yansıyan dalganın dalga vektörü, $\vec{G}$ ise ters örgü vektörüdür. Her iki tarafın karesi alındığında,

$$k'^2 = k^2 + 2\vec{k} \cdot \vec{G} + G^2 \quad (1.9)$$

Dalganın esnek saçıldığı düşünülüğünde $k'^2 = k^2$ olur. (1.9) denklemi

$$2\vec{k} \cdot \vec{G} = G^2 \quad (1.10)$$

şeklinde yazılır. Bu denkleme göre $\vec{k}$ dalga vektörü, örgü vektörü $\vec{G}$ 'yi dik olarak ikiye bölen düzlemde bulunuyorsa, yansıma şartları sağlanmış olur. Maksimum yansıma Brillouin bölgesi kenarlarında olur.

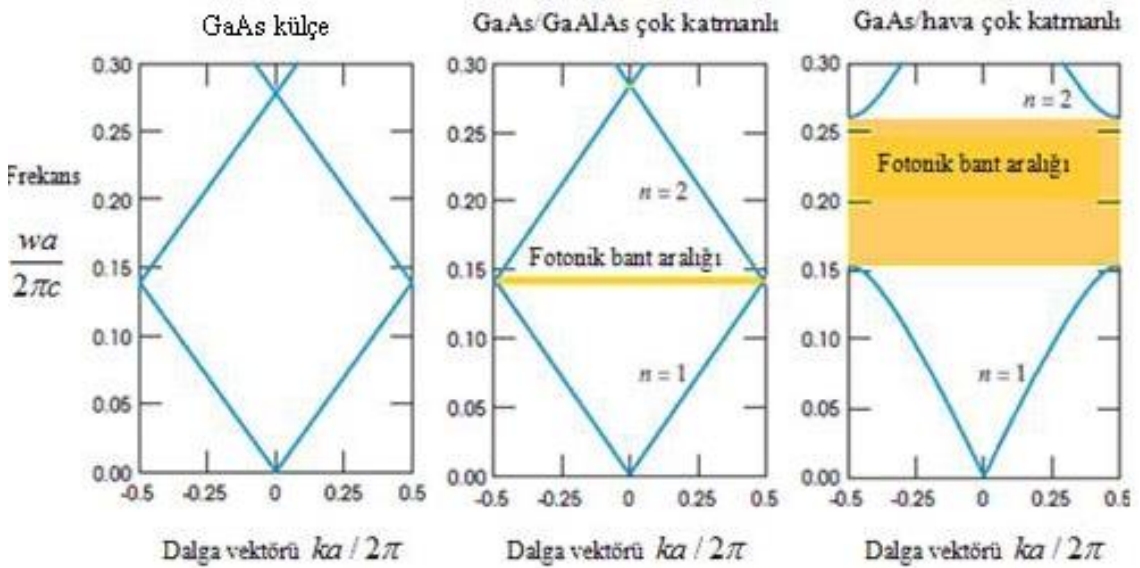
Ters örgü kristalin periyodikliğinin bir sonucudur. Bu periyodiklik sayesinde Brillouin bölgelerindeki bantlar ve bantlara ait modlar belirlenerek bant yapısı ortaya çıkarılır. Yapı periyodik olduğundan indirgenemez Brillouin bölgesini aşan bantlar ilk Brillouin bölgesine katlanır. Bu durumda, fotonik kristallerin diğer kristallere benzer özellik taşıdığı noktalardan birisi olan bant yapısı ortaya çıkar.

Şimdilik, dielektrik tabakalarına dik gelen, tamamıyla z-doğrultusunda yayılan ışığı göz önüne alalım. Bu durumda, $\mathbf{k}_{\parallel} = 0$ olduğu için dalga vektörünün sadece k_z bileşeni önemli olur. Karıştırma ihtimali olmaksızın, k_z , k olarak alınabilir.

Şekil-1.17’de, üç farklı çok tabakalı film için $\omega_n(k)$ çizilmiştir [30]. Soldaki çizimde, tabakaların tamamı aynı dielektrik sabitine sahiptir, böylece ortam tamamen tekdüzedir (uniform). Ortadaki çizim, dielektrik sabiti alternatif olarak 13 ve 12 olan bir yapı için; sağdaki çizim ise, dielektrik sabitleri 1 ile 13 olan daha yüksek dielektrik zıtlığına sahip yapı içindir. Soldaki çizim, keyfi olarak a kadarlık bir periyodikliğe sahip şekilde düzenlenen türdeş bir dielektrik ortam içindir. Fakat türdeş bir ortamda ışığın hızının kırılma indisi oranında azaldığını biliyoruz. Modlar,

$$\omega(k) = \frac{ck}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1.11)$$

eşitliği ile verilen ışık-çizgisi boyunca uzanırlar.



Şekil 1.17. Eksen-üzeri yayılma için fotonik bant yapıları [30].

Hepsi de aynı genişlikli tabakalara sahip olan üç farklı çok tabakalı film için çizilmiştir. Soldaki: Her tabaka aynı dielektrik sabitine sahiptir. Merkezdeki: Yüksek ve düşük- ε 'lu tabakalar (düşük zıtlıklı) değişimli olarak yer almıştır. Sağdaki: Yüksek ve düşük- ε 'lu tabakalar (yüksek zıtlıklı) değişimli olarak yer almıştır.

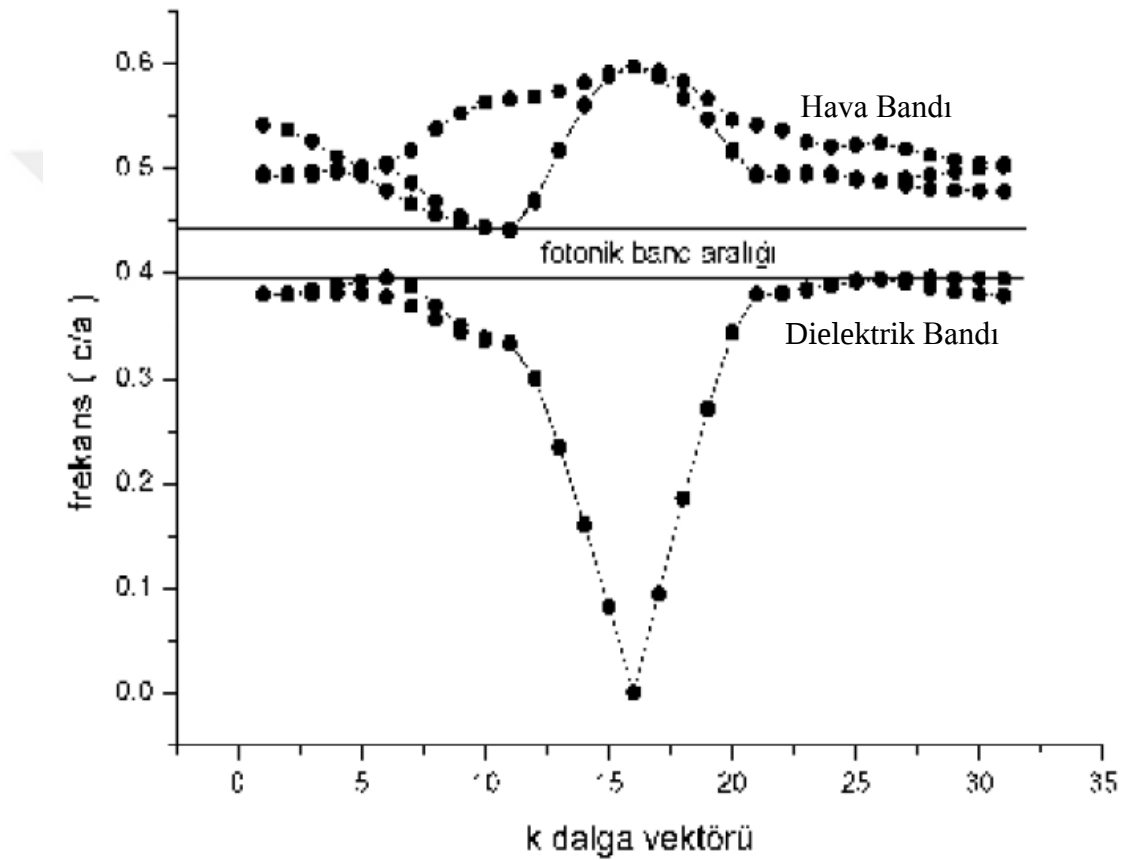
k 'nın Brillouin bölgesi dışında kendisini tekrar etmesini dayattığımız için, ışık çizgisi bir kenara eriştiğinde bölge içine geri katlanır. Bu durum basitçe, k ile $k+2\pi/a$ 'nın yer değiştirdiği, çözümleri yeniden etiketlemenin alışılmamış bir yolu olarak görülebilir. Yaklaşık-türdeş bir ortam için olan ortadaki şekil, önemli bir farkla türdeş (homojen) duruma benzer: Çizgilerin üst ve alt kolları arasında bir frekans aralığı vardır. k 'nın değeri ne olursa olsun, kristal içinde bu aralıktaki frekansa sahip olan hiçbir izinli mod yoktur. Böyle bir aralığı fotonik bant aralığı olarak adlandırırız. Sağdaki şekilde görebileceğimiz gibi, dielektrik zıtlık (kontrast) artırıldığında aralık önemli ölçüde genişler.

İki ve üç boyutlu fotonik kristallerin umut verici uygulamalarının pek çoğu, fotonik bant aralıklarının konumuna ve genişliğine bağlıdır. Örneğin, bant aralıklı bir kristal sadece aralık içindeki frekansların hepsini reddederek, çok iyi bir dar bantlı filtre oluşturabilir. Bir fotonik kristal içinde oluşturulan rezonans kovuğu, bant içindeki frekanslar için mükemmel yansıtıcı duvarlara sahip olacaktır.

Doğal olarak aklımıza şöyle bir soru gelecektir: Fotonik bant aralığı niçin ortaya çıkar? Aralığın hemen yukarısındaki ve hemen aşağısındaki durumlar için elektrik alan mod profillerini göz önüne alarak aralığın fiziksel kaynağını anlayabiliriz. $n=1$ ve $n=2$ bantları arasındaki aralık, $k = \pi/a$ daki Brillouin bölgesi kenarında oluşur. Şimdilik, tekdüze sistemin küçük bir pertürbasyonu olan konfigürasyona karşılık gelen, Şekil-1.17'de ortadaki çizimde yer alan bant yapısına yoğunlaşalım. $k = \pi/a$ için, modlar, kristalin örgü sabitinin iki katı ($2a$) dalga boyuna sahip duran dalgalardır.

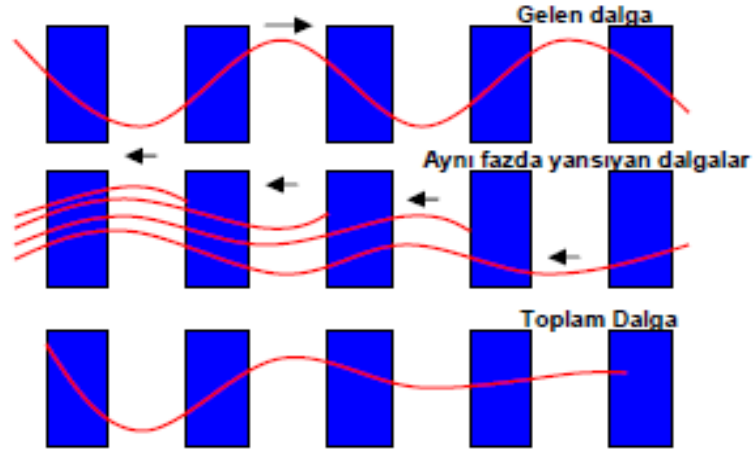
Kristallerin elektronik özellikleri incelendiğinde, elektronlar değerlik ve iletkenlik bandında bulunur. Bu bantlarda elektronlara ait durum yoğunlukları vardır. Değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasında, elektronların bulunmalarının yasak olduğu (durum yoğunluğu sıfır) bant aralığı vardır. Benzer şekilde, fotonik kristallerde fotonlar değerlik bandına benzer “dielektrik bant” ve iletkenlik bandına benzer “hava bandı” içerisinde yer alırlar. Dielektrik bant ve hava bandı arasında fotonların bulunmalarının yasak olduğu

bölgeye “fotonik bant aralığı” denir (Şekil 1.18). Elektromanyetik dalga tek boyuttaki periyodik yapı boyunca, bant aralığı aşağısındaki frekanslarda dielektrik bant içerisinde olduğundan, dielektrik çubuklara bağlı olarak; bant aralığı yukarısındaki frekanslarda hava bandı içerisinde olduğundan dielektrik çubuklara bağlı olmadan yayılabilmektedir. Ancak fotonik bant aralığı içerisindeki frekanslarda elektromanyetik dalga fotonik kristal içerisinde yayılamaz ve tamamen geri yansır.



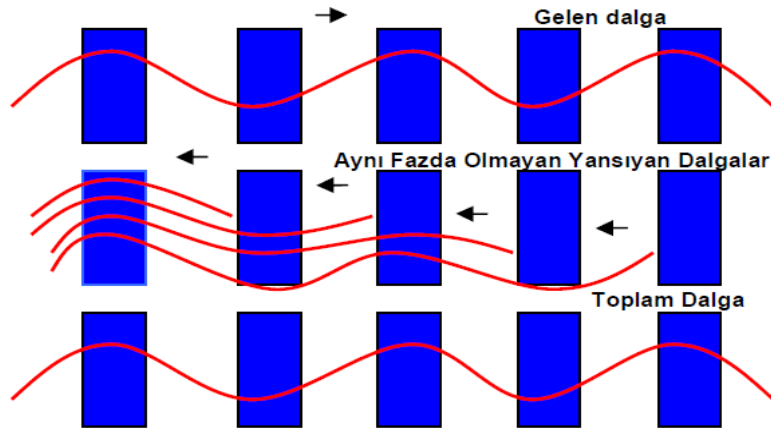
Şekil 1.18. Kristallerin fotonik özelliklerini gösteren genel fotonik bant yapısı.

Bant aralığı içindeki dalga boyundaki dalgalar Şekil 1.19’da gösterildiği gibi yapının her bir tabakasında geri yansır. Yansıyan dalgalar aynı fazdadır ve birbirlerini kuvvetlendirirler. Ancak gelen dalgalar ile yansıyan dalgalar arasında zıt faz vardır. Bu yüzden yansıyan dalgalar gelen dalgaları sönmüleyerek malzeme boyunca ilerlemeyen duran dalgalar oluşmasını sağlar.



Şekil 1.19. Bant aralığı içerisindeki dalga boylarında dalgalar [1].

Şekil 1.20’de ise, bant aralığı içerisinde olmayan (dielektrik bant ve hava bandı içerisinde olan) dalga boylarında yansıyan dalgalar zıt fazlıdır ve birbirlerini söndürürler. Bu yüzden yansıyan dalgalar gelen dalga ile birleşemez. Gelen dalga bir miktar sönmülerek malzeme boyunca yayılır.



Şekil 1.20. Bant aralığı içerisinde olmayan dalga boylarında dalgalar [1].

1.3.7 Maxwell Denklemleri

Bu kesimde fotonik kristallerde elektromanyetik dalga hareketi incelenecektir [30]. Elektromanyetik alanın bir ortam içerisindeki hareketi Maxwell denklemleri ile ifade edilir. Temel elektrik ve manyetizma yasaları kullanılarak elde edilmiş olan dört ana

Maxwell denklemi bulunmaktadır. Fotonik kristallerde elektromanyetik dalga çözümlerinin bulunabilmesi bu denklemlerin çözülmesiyle mümkündür. Maxwell denklemleri (SI birim sisteminde),

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.11)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.12)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} - \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} = 0 \quad (1.13)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} = J \quad (1.14)$$

şeklindedir. İlk iki eşitlik sırasıyla manyetik alan ve yer değiştirme alanı için Gauss yasaları olarak adlandırılır. Son iki eşitlik sırasıyla, Faraday ve Amper yasaları olarak bilinir. Bu denklemlerde $\vec{E}$ ve $\vec{D}$, sırasıyla, elektrik alan ve elektriksel yer değiştirme; $\vec{H}$ ve $\vec{B}$ ise, sırasıyla, manyetik alan ve manyetik indüksiyona karşılık gelmektedir. ρ ve J ise sırasıyla ortamdaki serbest yüke ve serbest akım yoğunluğuna karşılık gelmektedir. Yer değiştirme ve alanlara ait ortam denklemleri ise,

$$\vec{B}(r) = \mu_0 \mu(r) \vec{H}(r) \quad (1.15)$$

$$\vec{D}(r) = \epsilon_0 \epsilon(r) \vec{E}(r) \quad (1.16)$$

formundadır. Bağıl elektrik ve manyetik geçirgenlikler $\epsilon(r)$ ve $\mu(r)$ ile, vakum değerleri ise ϵ_0 ve μ_0 ile gösterilmiştir. Bu denklemlerin zamanca harmonik çözümleri,

$$\vec{E}(r) = \vec{E}(r) e^{i\omega t} \quad (1.17)$$

$$\vec{H}(r) = \vec{H}(r) e^{i\omega t} \quad (1.18)$$

şeklindedir. Faraday ve Amper yasaları zamanca harmonik çözümler için,

$$\vec{\nabla}_x \vec{E}(r) + j\omega\mu_0 \vec{H}(r) = 0 \quad (1.19)$$

$$\vec{\nabla}_x \vec{H}(r) - j\omega\mu_0 \vec{D}(r) = 0 \quad (1.20)$$

şeklini alır ($\mu(r) = 1$ kabul edilmiştir). Amper yasasında, (1.14) denkleminde tanımlanan kurucu ilişki kullanılır. Eşitliğin sol tarafının önce ile $1/\varepsilon(r)$ çarpılması ve rotasyonel ($\vec{\nabla}_x$) operatörünün etki edilmesiyle (1.20) denkleminde

$$\vec{\nabla}_x \left[\frac{1}{\varepsilon(r)} \vec{\nabla}_x \vec{H}(r) \right] + j\omega\varepsilon_0 \vec{\nabla}_x \vec{E}(r) = 0 \quad (1.21)$$

elde edilir. (1.19) eşitliğinin kullanılması ile de

$$\vec{\nabla}_x \left[\frac{1}{\varepsilon(r)} \vec{\nabla}_x \vec{H}(r) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(r) \quad (1.22)$$

“özdeğer denklemi” elde edilir. Burada $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ dir. Eşitliğin sol tarafındaki

$$\vec{\nabla}_x \left[\frac{1}{\varepsilon(r)} \vec{\nabla}_x \right] \text{ operatörünün } \vec{H}(r) \text{ öz fonksiyonlarına etki etmesinden özdeğerleri } \frac{\omega^2}{c^2}$$

elde edilmektedir.

Bu bölümde fotonik kristallerin genel özellikleri ve fotonik bant yapıları hakkında bilgiler verildi. Gelecek bölümde ise farklı malzemeler kullanılarak iki farklı örgü türü (kare örgü ve üçgen örgü) için iki boyutlu fotonik kristallerin bant yapıları incelenecektir.

BÖLÜM 2

İKİ BOYUTLU FOTONİK KRİSTALLERİN

BANT YAPILARI

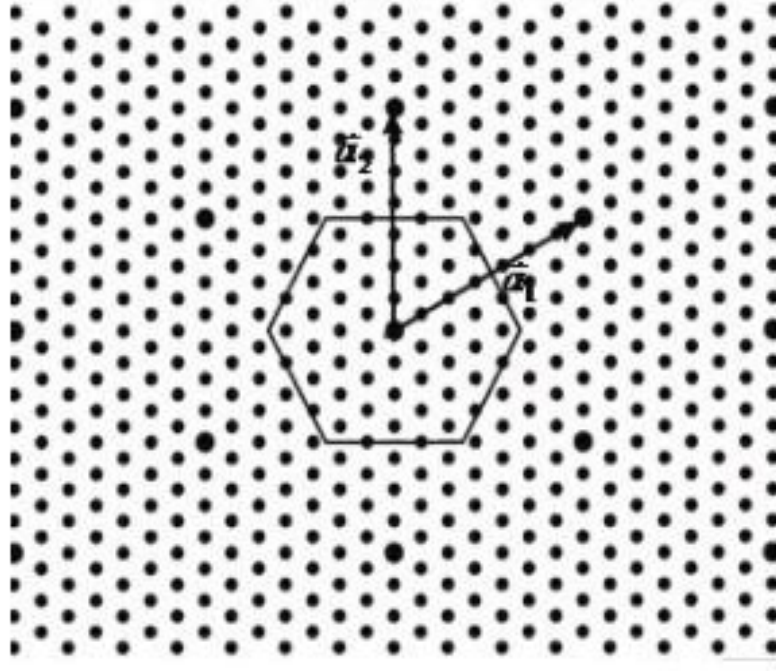
2.1 Giriş

Bu bölümde farklı optik malzemeler kullanılarak tasarlanan kare ve üçgen örgülü iki boyutlu fotonik kristallerin bant yapıları incelenmiştir. Simülasyonlarda Düzlem Dalga Açılımına dayanan BandSolve (RSoft Design Group) paket yazılımı kullanılmıştır.

2.2 Düzlem Dalga Açılımı Yöntemi

Gerçek kristallerdeki elektronlar için bilinen terminolojinin tamamı (birim hücre, ters uzay, Brillouin bölgeleri vb. gibi) bu yapay sistemlerdeki elektromanyetik dalga yayılımını analiz etmede kullanılabilir.

Manyetik alan için tam vektörel dalga denklemini çözen düzlem dalga yöntemi [31, 32, 33], adında da anlaşılacağı gibi, alan ve konum bağımlı dielektrik sabitinin Fourier dönüşümüne eşdeğer olan düzlem dalga açılımına dayanır. Bu ise, fotonik kristal fiberlerin mod alanı dağılımını ve fotonik bant yapısını ve böylece fotonik bant aralıklarının mümkün varlıklarını, genişlik ve konumlarını hesaplamaya izin verir. Periyodik dielektrik sabitinin düzlem dalga açılımı basittir. Fakat çok fazla zaman gerektirir; çünkü kesin doğruluk için alan ve dielektrik sabitinin düzlem dalga yöntemi ile açılımında çok fazla sayıda terim gereklidir [34].



Şekil 2.1. Yapay iki boyutlu sonsuz bir fotonik kristal. Fotonik kristal fiberin enine kesitine karşılık gelen birim hücre birim faktörler gösterilmektedir.

2.2.1 Teorik Model

Fotonik kristal fiberlerde elektromanyetik dalga yayılımını incelemek için, Maxwell eşitlikleri ρ ve $\vec{J} = 0$ şartları altında çözülür [2]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0, \quad \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = 0, \quad \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

Zamana bağlılık $\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r})e^{(i\omega t)}$ şeklinde alınır ve fotonik kristal fiber, z eksenini boyunca öteleme değişmezliğine sahip bir sistem olduğu için $\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}(x, y)e^{(i\beta z)}$ 'dir. Burada β , z yönü boyunca yayılma sabitidir. Eğer alanlar

$\vec{H}(\vec{r}) = (\vec{H}_t(x, y) + H_z(x, y)\hat{z})e^{i\beta z}$ şeklinde fiber eksenine paralel ve enine bileşenlerine ayrılırsa, Maxwell eşitliklerinden $\vec{H}$ manyetik alanı için enine denklem elde edilir [2, 33]:

$$\left[\nabla_t^2 + \varepsilon(x, y)k_0^2 + \left(\frac{\nabla_t \varepsilon(x, y)}{\varepsilon(x, y)} \right) x \nabla_t x \right] \vec{H}_t(x, y) = \beta^2 \vec{H}_t(x, y) \quad (2.3)$$

bu eşitlikte, $\vec{\nabla}_t = x \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) + y \left(\frac{\partial}{\partial y} \right)$ ve $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ olup λ_0 elektromanyetik dalganın dalga

boyudur. Denk. (2.3), z yönü boyunca yayılma sabiti β için bir özdeğer denklemdir. Bu eşitliği çözmek için, fotonik kristal fiberin enine kesiti, büyük iki boyutlu bir birim hücre olarak alınır ve sonsuz yapay bir sistem oluşturulur. Şekil 2.1’de bu yöntemle elde edilen sonsuz, iki boyutlu sistem gösterilmiştir. Buradaki sonsuz sistem, $\vec{R} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$ iki boyutlu öteleme vektörleri ile verilen örgü noktalarının periyodik bir düzenlemesi olarak tanımlanır. Her bir örgü noktasına bağlı olarak, $\vec{p}_i = x_i\vec{a}_1 + y_i\vec{a}_2$ ($0 \leq x_i, y_i < 1$) konumlarında “atom”ların bir takımı vardır. Bu sonsuz yapay sistemi oluşturarak, “atom”ların tekrarlayan hücrelerinde bir kusur elde edilir. Fiberde merkezi boşluğun yokluğu, fiberin özü olarak görev yapan sonsuz sistemdeki daha büyük bir kırılma indisine sahip olan bir kusur olarak düşünülebilir. İki boyutlu periyodiklik nedeniyle, sistemin özfonksiyonları Bloch teoreminden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{H}_t(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} \hat{H}_t(\vec{G}) e^{i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}} \quad (2.4)$$

burada $\vec{r}$, $\vec{k}$ ve $\vec{G}$, sırasıyla periyodiklik düzleminde iki boyutlu konum, dalga ve ters örgü vektörleri olmak üzere,

$$\varepsilon(x, y) = \sum_{\vec{G}} \hat{\varepsilon}(\vec{G}) e^{i\vec{G} \cdot \vec{r}}, \quad \ln(\varepsilon(x, y)) = \sum_{\vec{G}} \hat{\varepsilon}'(\vec{G}) e^{i\vec{G} \cdot \vec{r}} \quad (2.5)$$

ifadeleri enine dalga denkleminde kullanılırsa,

$$\sum_{\vec{G}'} \left[-(\vec{k} + \vec{G}) \cdot (\vec{k} + \vec{G}') \delta_{\vec{G}, \vec{G}'} + k_0^2 \hat{\epsilon}(\vec{G} - \vec{G}') \right] \hat{H}_t(\vec{G}') - \sum_{\vec{G}} \hat{\epsilon}(\vec{G} - \vec{G}') \left[(\vec{G} - \vec{G}') \times \left[(\vec{k} - \vec{G}') \times \hat{H}_t(\vec{G}') \right] \right] = \beta^2 \hat{H}_t(\vec{G}) \quad (2.6)$$

Elde edilir. $\vec{k} = 0$ alınırsa, Denk. (2.6) fotonik kristal fiberin ekseni boyunca yayılan elektromanyetik modlar için yayılma sabitini verir. Bu, yayılma sabiti β^2 için geleneksel tekniklerle çözülebilen bir özdeğer eşitliğidir. Bu eşitlik sadece, elektromanyetik dalganın dalga boyuna $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ve sırasıyla $\epsilon(x, y)$ ve $\ln(\epsilon(x, y))$ fonksiyonlarının Fourier katsayıları $\epsilon(\vec{G})$ ve $\epsilon(\vec{G}')$ 'ye bağlıdır. $A_c = \sqrt{3}a^2/2$ süper hücrenin alanı olmak üzere Fourier katsayıları $\epsilon(\vec{G})$ ve $\epsilon(\vec{G}')$, aşağıdaki gibi verilir [2]:

$$\epsilon(\vec{G}) = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} \epsilon(x, y) e^{-i\vec{G} \cdot \vec{r}} d\vec{r}, \quad \epsilon(\vec{G}') = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} \ln(\epsilon(x, y)) e^{-i\vec{G}' \cdot \vec{r}} d\vec{r} \quad (2.7)$$

burada $\vec{a}$, $\vec{a}_1$ ve $\vec{a}_2$ birim vektörlerinin büyüklüğüdür. Bu Fourier katsayılarını değerlendirmek için, $\vec{p}_i$, $i=1, \dots, n$ konumlarına yerleşmiş sonlu sayıda atoma ve enine kesitli keyfi bir şekle sahip olan bir birim hücre alınır. Şekil 2.1 ile karşılaştırılırsa atomların, z ekseni boyunca yerleştirilmiş boşluk silindirler olabileceği görülür. Eğer merkezi boşluk yoksak, öz, boşluklarla aynı yarıçaplı ve arka alan ile aynı dielektrik sabitine sahip olan bir silindir gibi düşünülebilir. Bu durumda dielektrik sabiti aşağıdaki değerlere sahiptir:

$$\epsilon(x, y) = \left\{ \begin{array}{ll} \epsilon_i, & A_i \text{'nin içinde} \\ \epsilon_b, & A_i \text{'nin dışında} \end{array} \right\} \quad i=1 \dots n$$

Bu fonksiyon ile, $\vec{p}_i$ konumlarına yerleşmiş, keyfi şekilli ve farklı dielektrik sabitli n tane atomdan oluşan bir birim hücre üzerinden tanımlı dielektrik sabitin Fourier katsayıları

elde edilir. $\vec{G} = 0$ için, $\varepsilon(0)$ Fourier katsayısı, basitçe birim hücre üzerinden dielektrik sabitinin ortalamasıdır.

$$\vec{G} = 0, \hat{\varepsilon}(0) = \frac{1}{A_c} \left[\sum_i \varepsilon_i A_i + \varepsilon_b \left(A_c - \sum_i A_i \right) \right] \quad (2.8)$$

$$\vec{G} \neq 0, \hat{\varepsilon}(\vec{G}) = \frac{1}{A_c} \sum_i (\varepsilon_i - \varepsilon_b) e^{-i\vec{G} \cdot \vec{p}_i} \int e^{-i\vec{G} \cdot \vec{r}_i} d\vec{r}_i \quad (2.9)$$

Aynı ε_a ($\varepsilon_a = 1$) dielektrik sabitli ve r_0 yarıçaplı dairesel hava atomlarının özel durumu için aşağıdaki ifadeler geçerlidir [2]:

$$\vec{G} = 0, \hat{\varepsilon}(0) = F + (1 - F)\varepsilon_b \quad (2.10)$$

$$\vec{G} \neq 0, \hat{\varepsilon}(\vec{G}) = 2f(1 - \varepsilon_b) \frac{J_1(Gr_0)}{Gr_0} \sum_i e^{-i\vec{G} \cdot \vec{p}_i} \quad (2.11)$$

Burada $F = \sum_i f = \sum_i \pi r_0^2 / A_c$, birim hücrede hava boşlukları tarafından oluşturulan toplam dolma kesridir ve $J_1(Gr_0)$, birinci dereceden Bessel fonksiyonudur. $\ln(\varepsilon(x, y))$ 'nin Fourier katsayıları $\hat{\varepsilon}(\vec{G})$ 'ler, $\varepsilon_i \rightarrow \ln(\varepsilon_i)$ olarak önceki eşitlikten elde edilir. β özdeğerleri ve $\hat{H}(\vec{G})$ özvektörleri elde edildiğinde, Denk. (2.4) kullanılarak enine manyetik alan hesaplanır ve $H_z(i/\beta) \vec{\nabla}_t \cdot \vec{H}_t$ 'den manyetik alanın boyuna bileşeni elde edilir. Denk. (2.6)'dan $\hat{H}(\vec{G})$ manyetik alanının Fourier bileşenleri için sonsuz bir denklem seti elde edilir. Nümerik hesaplamalarda, sonlu sayıda ters örgü vektörünü içermek için sonsuz olan bu denklem seti bir yerde kesilmelidir. Düzlem dalga açılımını kullanan pek çok hesaplamada, denklemlerin sayısı dielektrik sabitini açmak için kullanılan ters örgü vektörlerinin sayısına eşittir.

2.3 Galyum Arsenik (GaAs)

GaAs, galyum ve arseniğin birleşiminden elde edilen önemli bir yarıiletkenidir. Mikrodalga frekansındaki tümleşik devrelerde, kızılötesi ışık yayın diyotlarda, lazer diyotlarında ve güneş pillerinde kullanılır.

GaAs, zinc blende kristal yapısına sahiptir. İki içi içe geçmiş yüzey merkezli kübik (fcc) örgüden oluşur. Atomların ayarlanması elmas kübik yapıdaki gibidir. Moleküler şekli doğrusaldır.

GaAs, değerlik bandı üzerindeki iletkenlik bandı minimum demek olan “doğrudan bant aralığına” sahiptir. Değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasındaki geçişler enerjideki değişime bağlıdır, momentumunda değişime gerek yoktur. GaAs’in bu niteliği çok önemlidir. Işık yayan diyotlar ve yarıiletken lazerlerinde oldukça kullanışlıdır. GaAs’in bazı özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

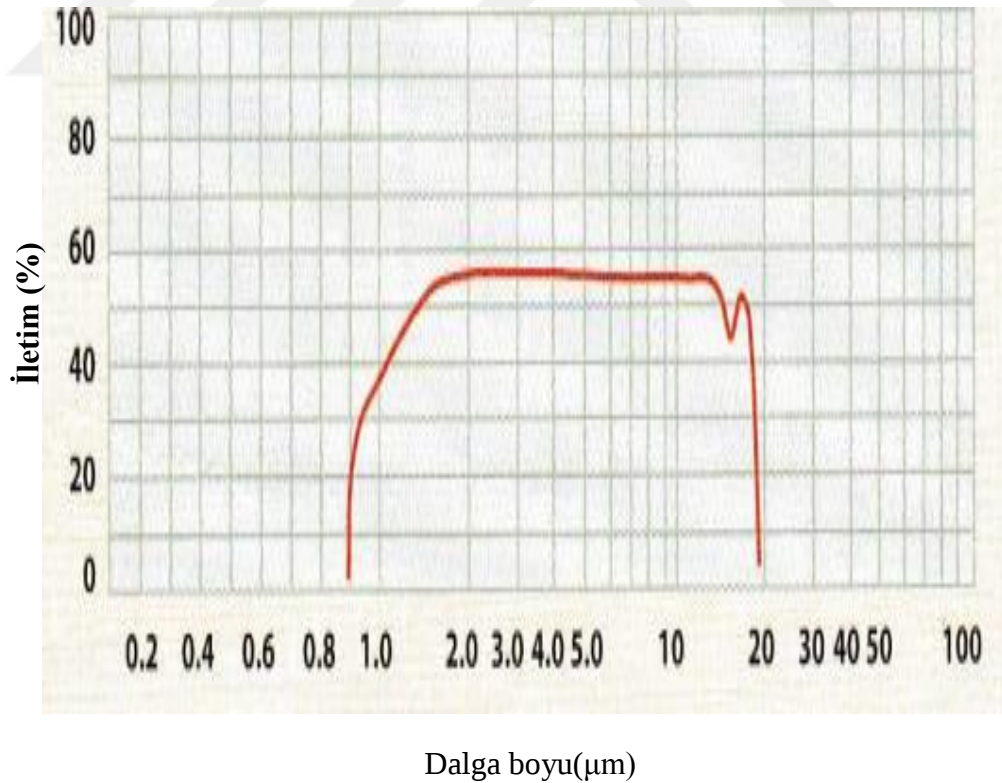
Tablo 2.1. GaAs’in özellikleri

Özellikler	Parametreler
Kristal yapısı	Zincblende (Çinko sülfür)
Örgü sabiti	5,65 Å ⁰
Yoğunluk	5,31 g/cm ³
Kırılma indisi	3,307- 4 µm 3,278-10 µm 3,251-14 µm
İletim Aralığı	2-15 µm
Termal Genleşme Katsayısı	6x10 ⁻⁶ / K
Genleşme katsayısı	5,8x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Örgü termal iletkenliği	0,55 W/cm- ⁰ C
Dielektrik sabiti	13
Band aralığı	1,42 ev
Bağıl dielektrik geçirgenlik	13
Elektron hareketliliği	8500 cm ² /V-s

GaAs'in etkin kütlesi çok küçük olduğundan elektrik alan etkisi altında serbest elektronlar çok yüksek hızda taşınabilir. GaAs'in diğer bir özelliği alt tabaka (substrate) olarak kullanılabilmesidir. Örgü içerisinde oluşturulacak verici ve alıcılar GaAs için oldukça uygundur. Çünkü GaAs doğrudan fotonik bant aralığına sahiptir. GaAs'in bant yapısı optiksel nitelikleri bakımından ışıltama (fotoluminesans) özelliklerine sahiptir.

Termal görüntüleme ve CO₂ lazer sistemlerinde kullanılır. Lenslerde, prizmalarda ve camlarda imal edilmektedir.

Günümüzde silisyum teknolojisi yerini galyumarsenit (GaAs) teknolojisine terk etmektedir. Bu teknoloji, yarıiletken laser'lerin ilk günlerinden beri, yeni bir kavram olan kuantum çukuru ve süper kafes yapılarına kadar, optoelektronik gelişiminde önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Şimdiye kadar tıpkı elektronik teknolojisinde silisyumun sağladığı hâkimiyet gibi, GaAs de yeniden şekillenmeye başlayan optoelektronik teknolojisinde kendi ağırlığını hissettirmeye başlamış bulunmaktadır.

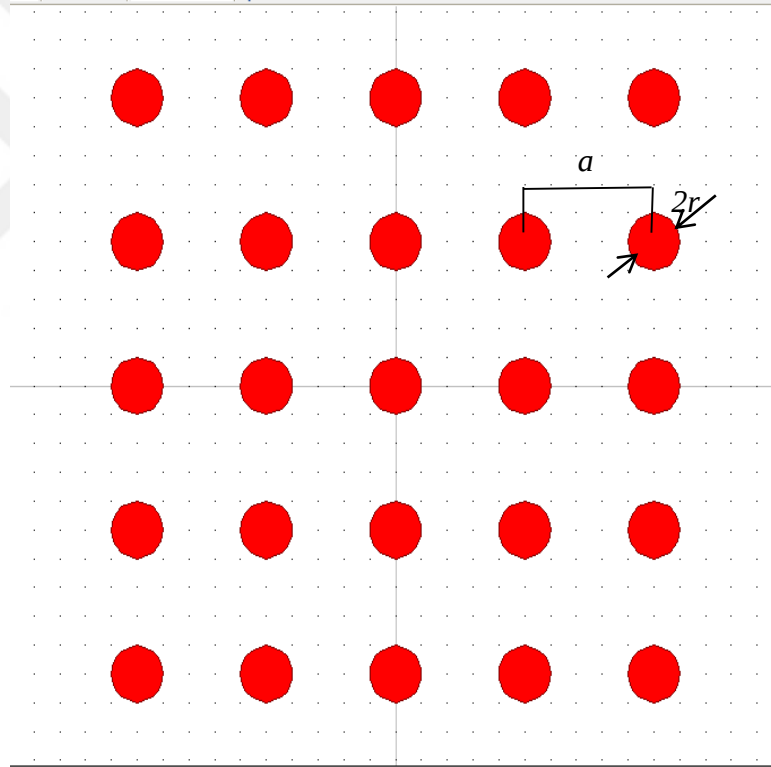


Şekil 2.2. GaAs'de iletimin dalga boyuna göre değişim grafiği.

Tablo 2.2. GaAs'in dalga boyu ve kırılma indisi

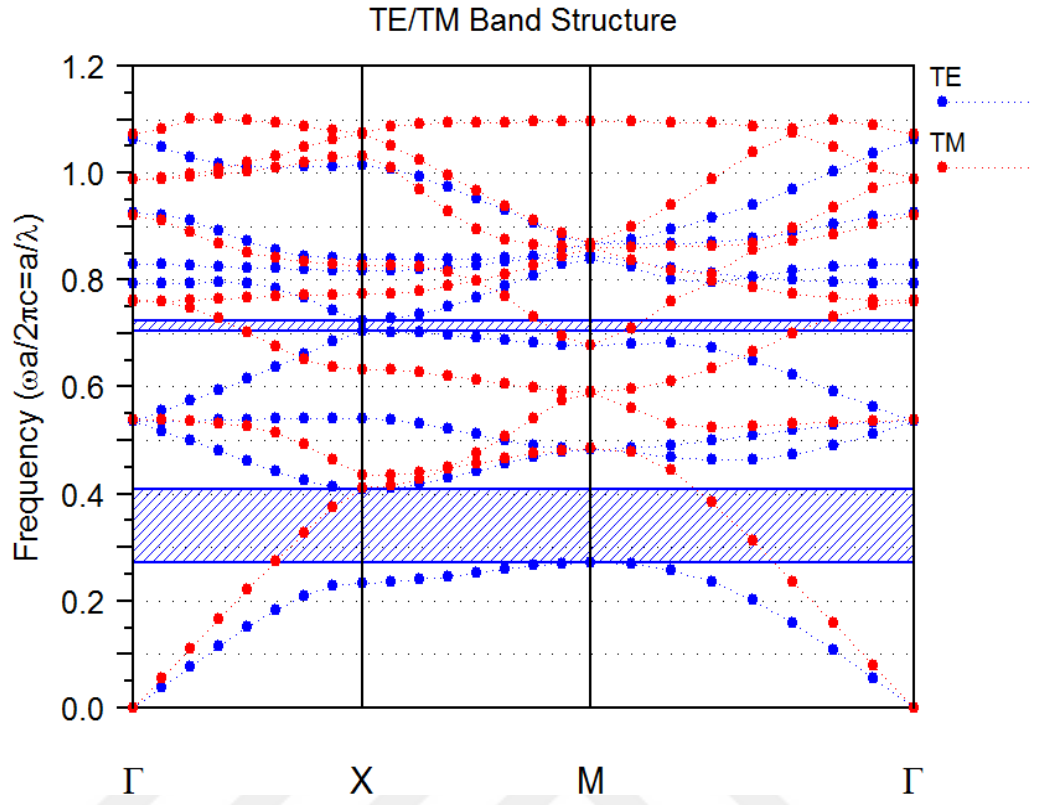
λ (μm)	n	λ (μm)	n	λ (μm)	n
3,1	3,31	10,0	3,28	17,0	3,23
4,1	3,30	11,0	3,27	20,7	3,18
8,0	3,29	13,8	3,25	-	-

2.3.1 Hava İçindeki Silindirik GaAs Çubukların Kare Örgüsü İçin Bant Yapısı

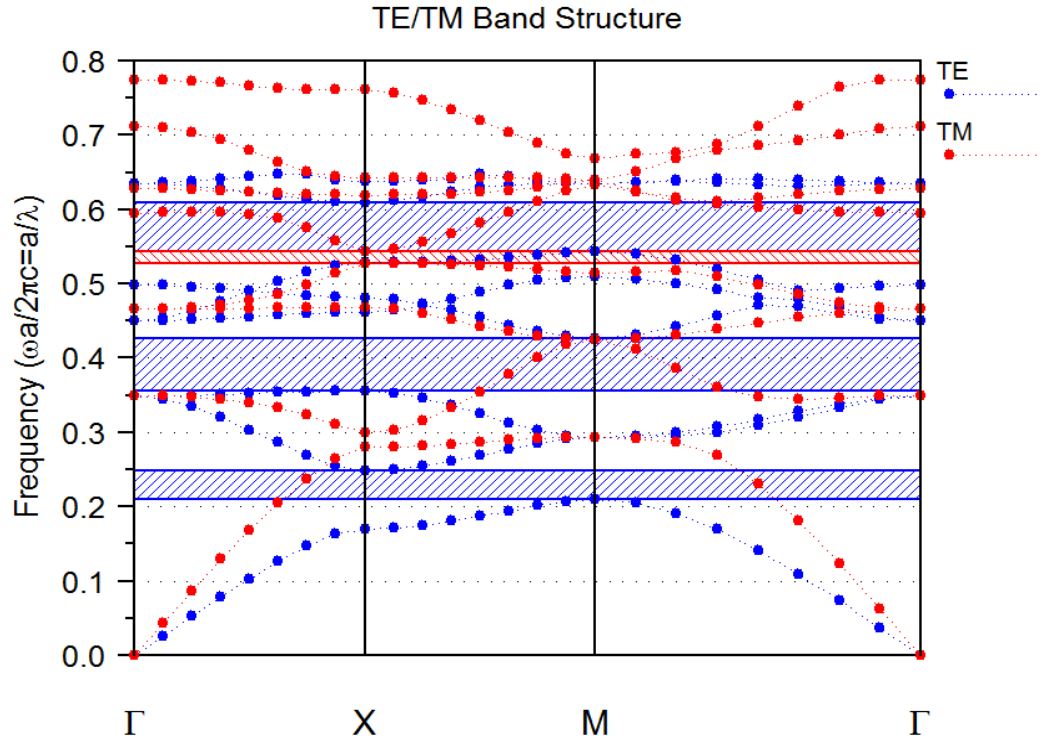


Şekil 2.3. Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü.

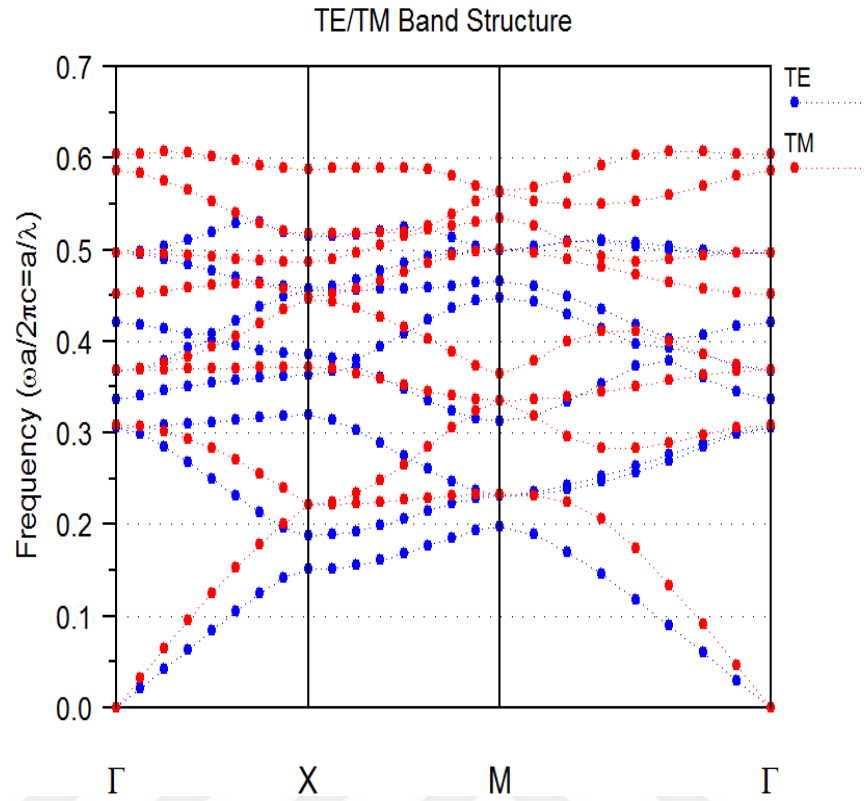
Silindirik kesitli çubukların katı çubukların hava içinde iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar kare örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.4, 5 ve 6'de, bant aralıkları ise Tablo 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.4.Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü ($r/a=0,20$).



Şekil 2.5.Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü ($r/a=0,35$).



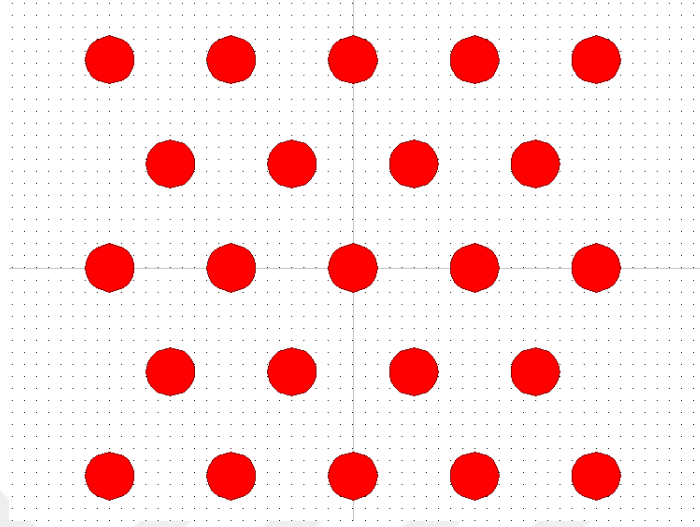
Şekil 2.6.Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü ($r/a=0,45$).

Tablo 2.3.Hava içindeki silindirik GaAs çubukların kare örgüsü için bant aralıkları

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	0,272	0,408	0,136	-	-	-	-	-
	0,701	0,725	0,024	-	-	-	-	-
0,25	0,238	0,346	0,108	-	-	-	-	-
0,30	0,220	0,288	0,068	-	-	-	-	-
0,35	0,207	0,250	0,043	0,526	0,542	0,016	-	-
	0,353	0,428	0,125	-	-	-	-	-
	0,542	0,609	0,067	-	-	-	-	-
0,40	0,201	0,216	0,015	0,482	0,499	0,017	-	-
0,45	-	-	-	-	-	-	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	-

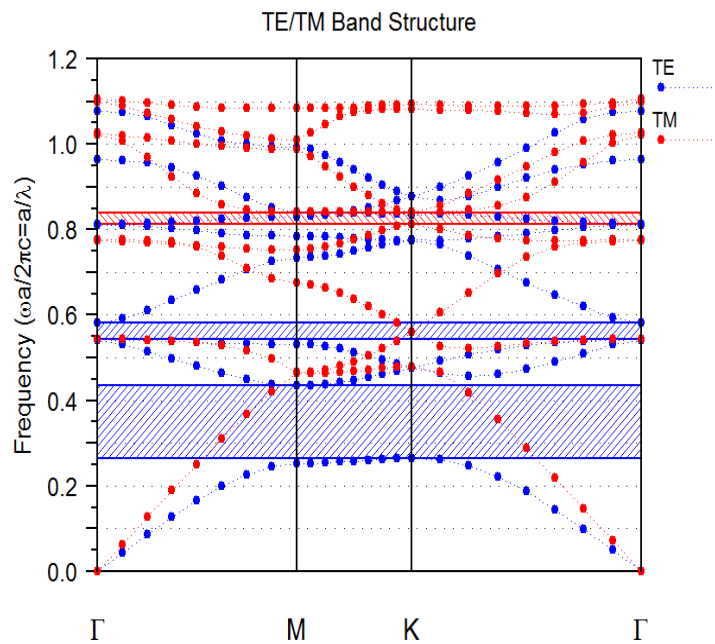
Hava içindeki silindirik GaAs çubuklarının kare örgüsüne ait incelemede $r/a= 0,20-0,40$ aralığında TE modları için band aralıkları oluşurken 0,35 ve 0,40 için hem TM modu için band aralıkları elde edilmiştir. Fakat $r/a= 0,45$ ve 0,50 için herhangi bir mod band aralığı elde edilmemiştir. Ayrıca tam band aralığı da ortaya çıkmamıştır.

2.3.2 Hava İçindeki Silindirik GaAs Çubukların Üçgen Örgüsü İçin Bant Yapısı

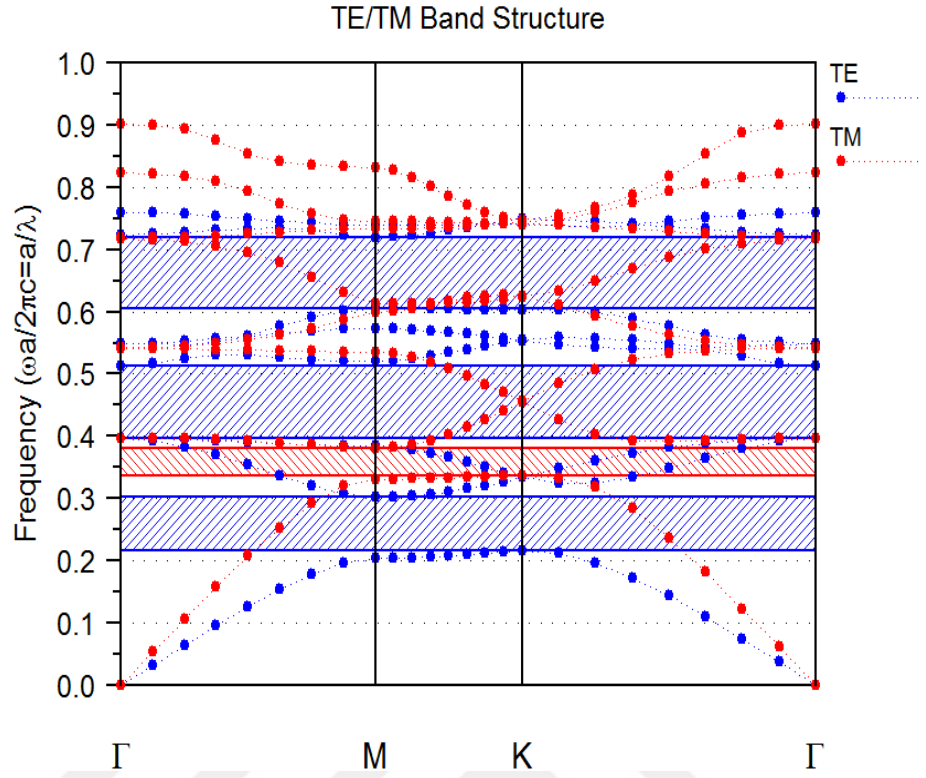


Şekil 2.7. Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü.

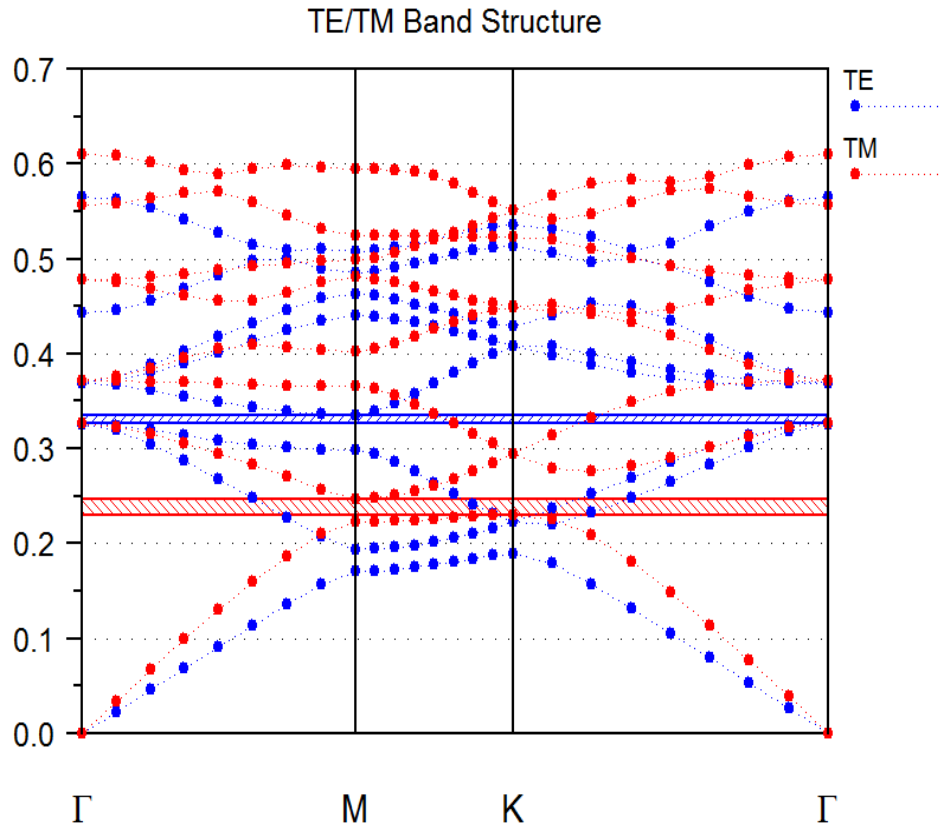
Silindirik kesitli çubukların katı çubukların hava içinde iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar için üçgen örgüsü incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.8, 9 ve 10'da, bant aralıkları ise Tablo 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0,20$).



Şekil 2.9.Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0,30$).



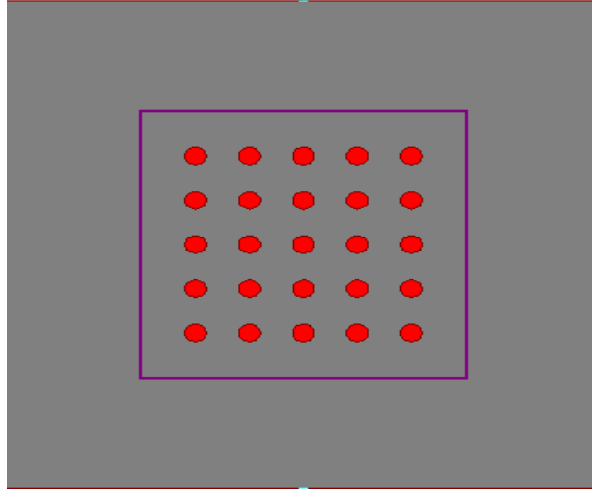
Şekil 2.10.Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0,45$).

Tablo 2.4.Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsü için bant aralıkları

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	0,265 0,540	0,436 0,581	0,171 0,041	0,809 -	0,840 -	0,031 -	- -	- -
0,25	0,337	0,558	0,221	0,396	0,422	0,026	-	-
0,30	0,215	0,302	0,087	0,337	0,381	0,044	-	-
	0,395	0,513	0,118	-	-	-	-	-
	0,602	0,719	0,117	-	-	-	-	-
0,35	0,202	0,258	0,056	0,293	0,338	0,045	-	-
0,40	0,195	0,221	0,026	0,258	0,295	0,037	-	-
0,45	0,325	0,336	0,011	0,230	0,246	0,016	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	-

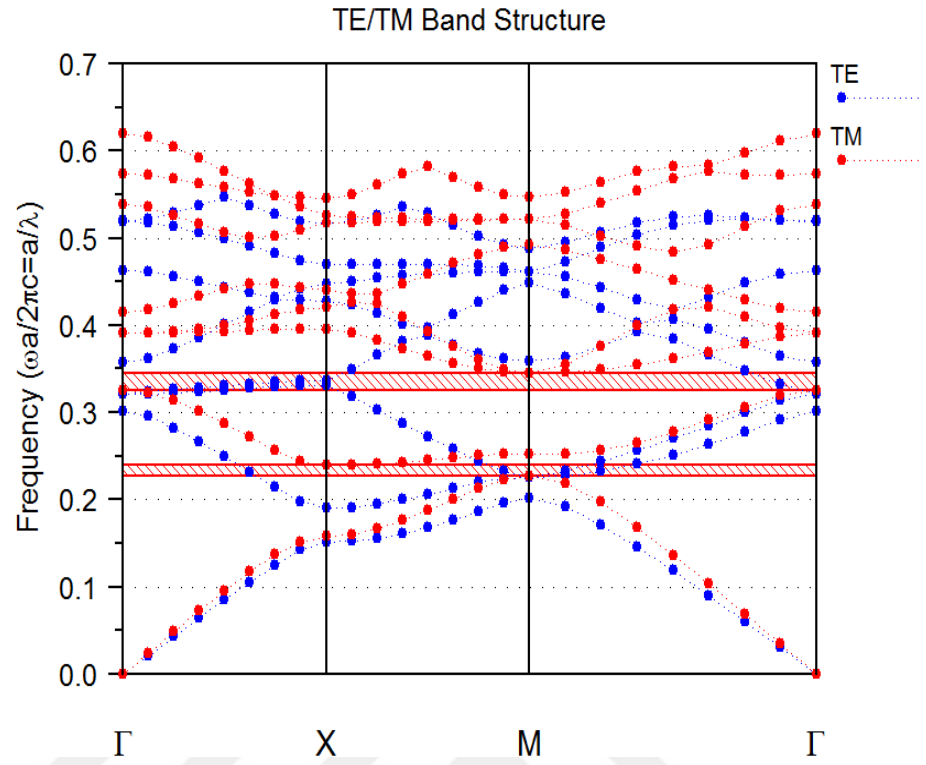
Hava içindeki silindirik GaAs çubukların üçgen örgüsüne ait incelemede $r/a=0,20-0,45$ aralığında TE ve TM modları için band aralıkları elde edilmiştir. Fakat $r/a= 0,50$ için ne TE ne de TM modu elde edilmemiştir. Ayrıca $r/a= 0,20-0,50$ aralığında herhangi bir mod için tam band aralığı ortaya çıkmamıştır.

2.3.3 GaAs Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Kare Örgüsü İçin Bant Aralıkları

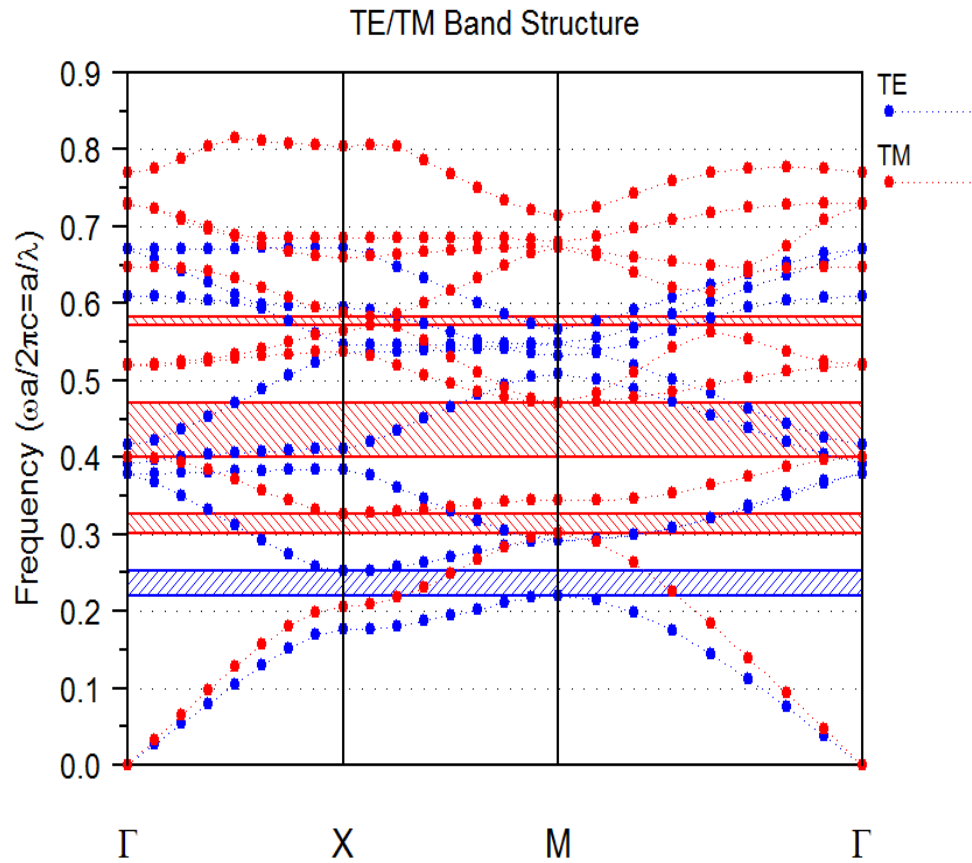


Şekil 2.11. GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsü.

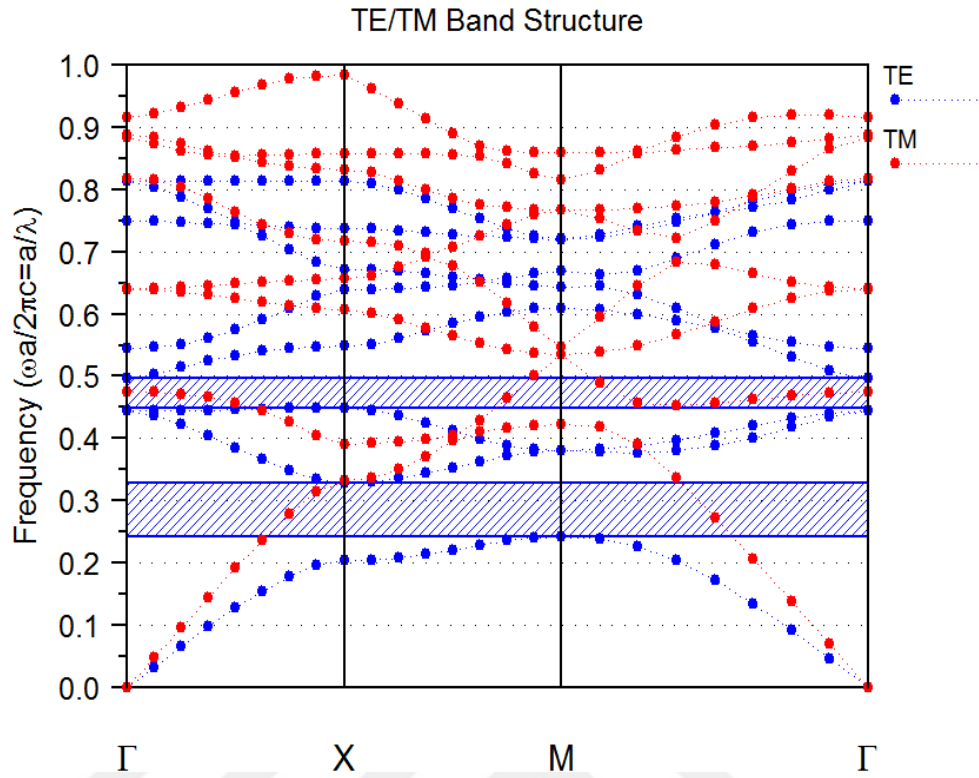
GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının iki boyutta periyodik düzenlemesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar kare örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.12, 13 ve 14’de, bant aralıkları ise Tablo 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.12. GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü $r/a=0,35$).



Şekil 2.13. GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0,45$).



Şekil 2.14. GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0,50$).

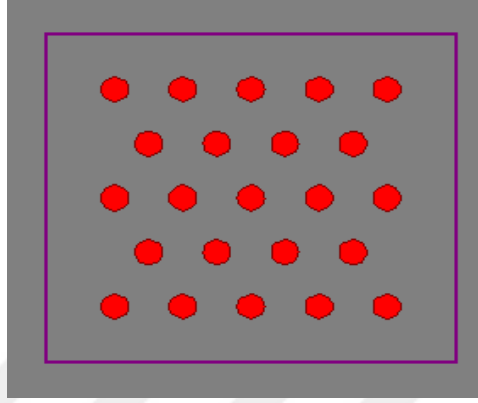
Tablo 2.5. GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsü için bant aralıkları

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-
0,30	-	-	-	-	-	-	-	-
0,35	-	-	-	0,226 0,323	0,240 0,345	0,014 0,022	-	-
0,40	-	-	-	0,250	0,278	0,028	-	-
0,45	0,220 -	0,251 -	0,031 -	0,300 0,397	0,327 0,472	0,027 0,075	-	-
0,50	0,241 0,447	0,328 0,498	0,087 0,051	-	-	-	-	-

GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsüne ait incelemede $r/a= 0,20$ - $0,35$ aralığında TE modları için 0,20, 0,25, 0,30 ve 0,50 için TM modları için bant

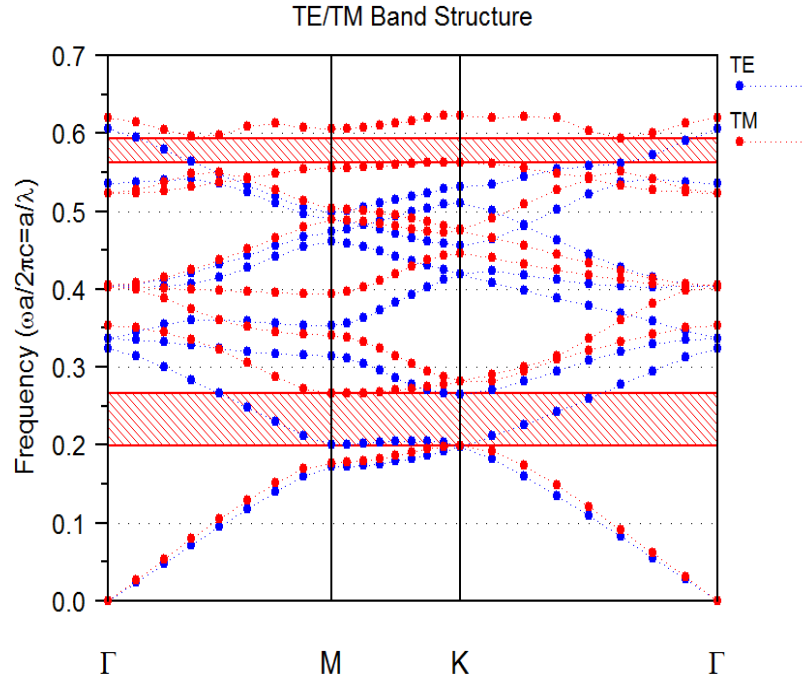
aralıkları elde edilmemiştir. Fakat $r/a = 0,45$ ve $0,50$ için TE modu, $r/a=0,35-0,45$ aralığı için TM modu elde edilmiştir. Ayrıca herhangi bir r/a değeri için tam band aralığı elde edilmemiştir.

2.3.4 GaAs Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Üçgen Örgüsü İçin Bant Aralıkları

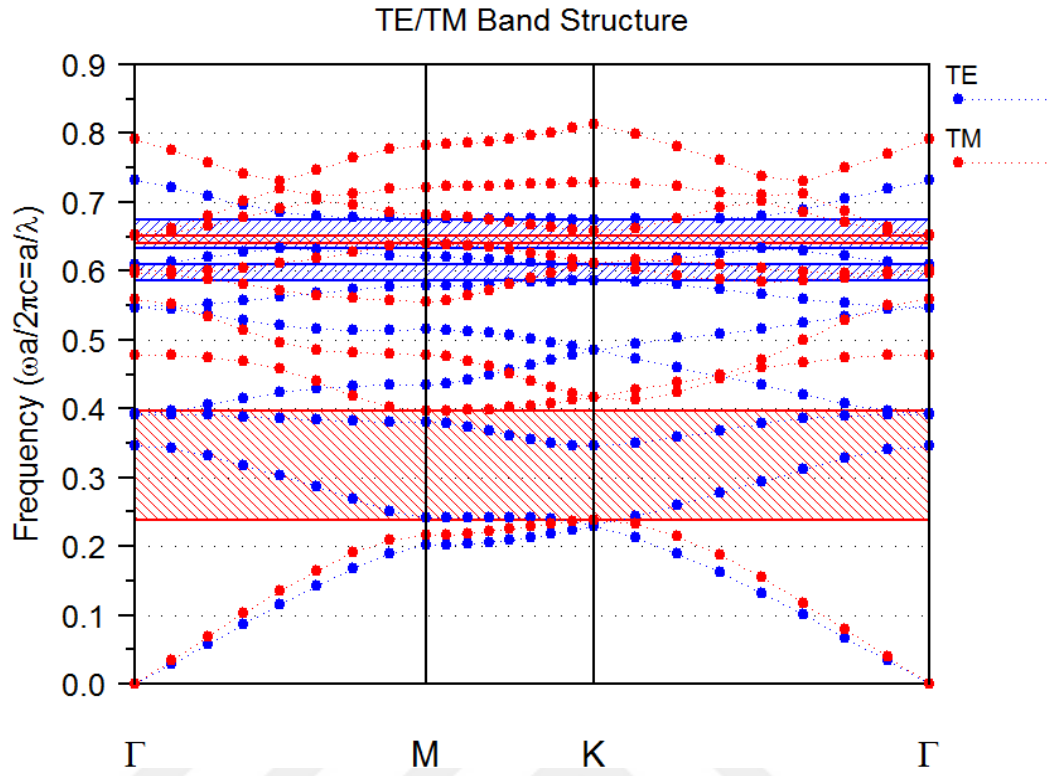


Şekil 2.15. GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü.

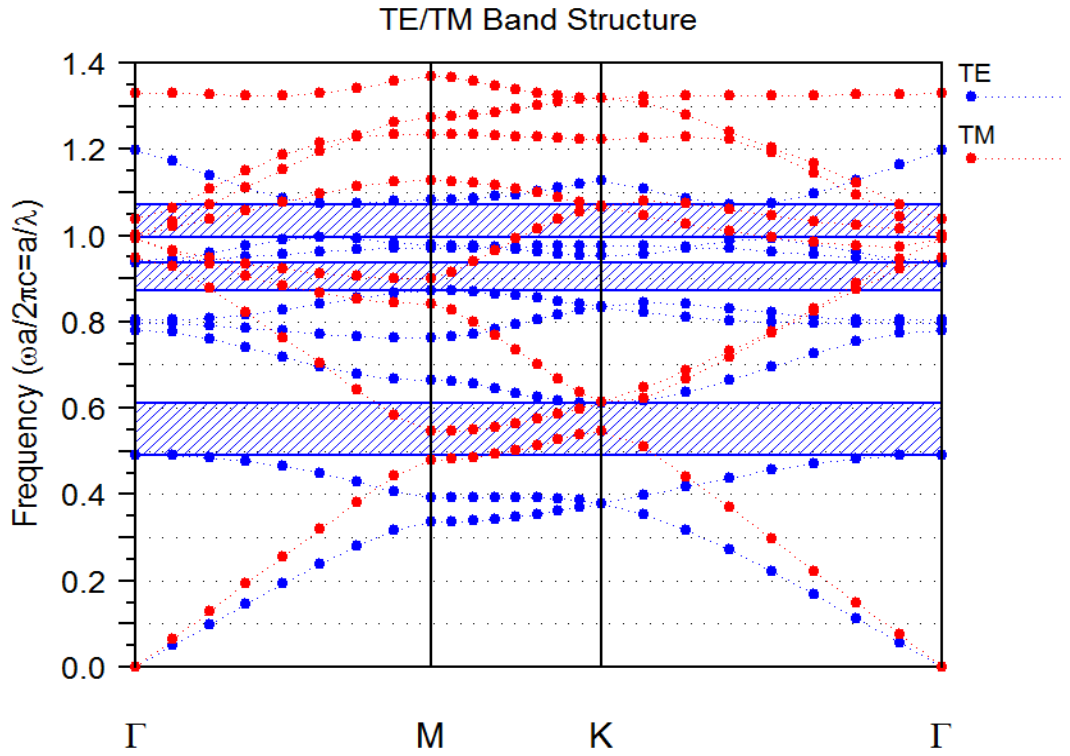
GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının iki boyutta periyodik düzenlemesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar üçgen örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.16, 17 ve 18’de, bant aralıkları ise Tablo 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.16. GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,30$).



Şekil 2.17. GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,40$).



Şekil 2.18. GaAs dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,50$).

Tablo 2.6. GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü için bant aralıkları

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu		
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)
0,20	-	-	-	0,188	0,200	0,012	-	-	-
0,25	-	-	-	0,191	0,228	0,037	-	-	-
0,30	-	-	-	0,200	0,266	0,066	-	-	-
0,35	-	-	-	0,562	0,594	0,032	-	-	-
0,40	-	-	-	0,212	0,321	0,109	-	-	-
0,40	0,586	0,609	0,023	0,238	0,398	0,160	0,638	0,651	0,013
0,45	0,637	0,652	0,015	0,629	0,676	0,047	-	-	-
0,45	0,387	0,425	0,038	0,291	0,486	0,195	0,387	0,425	0,038
0,50	0,492	0,610	0,118	-	-	-	-	-	-
0,50	0,866	0,939	0,073	-	-	-	-	-	-
0,50	0,995	1,071	0,076	-	-	-	-	-	-

GaAs dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü için bant aralıklarını incelemede $r/a=0,20-0,35$ aralığında TE modu için ve $r/a= 0,50$ değerinde TM modu için bant aralığı elde edilmemiştir. Fakat $r/a= 0,40$ ve $0,45$ değeri için tam band aralığı elde edilmiştir.

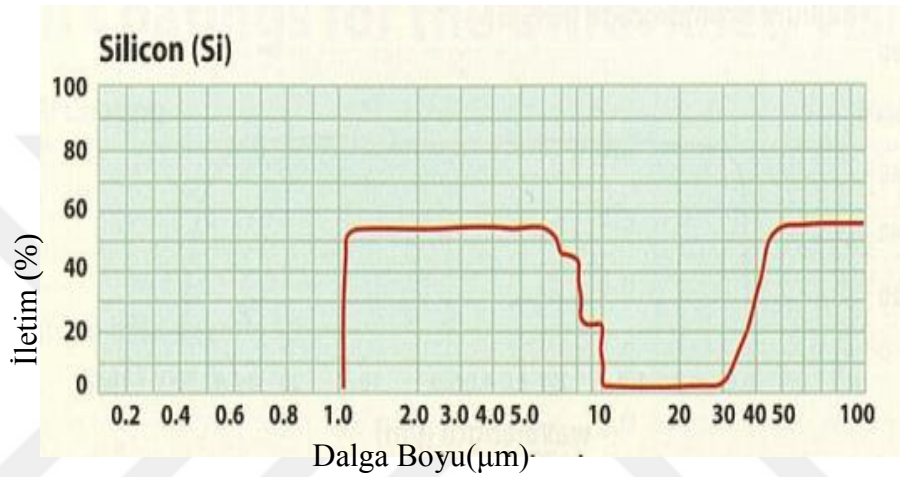
2.4 Silisyum (Si)

Silisyum, yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biridir. Yarı iletken özelliğe sahip oluşu ve doğada, ormanda doğal yaşamda çok bulunması, transistör, diyot ve hafızalarda kullanılabilmesinin pratik hızlı oluşu, entegre devrelerin ve bilgisayarların silisyum teknolojisi üzerine inşa edilmesini sağlamıştır. Bugünlerde ise, “Silikon Vadisi” denilen dev endüstrinin adı bir silisyum bileşiği olan silikondan gelmektedir.

Atom numarası (proton sayısı) 14'tür. "Si" simgesi ile gösterilmektedir. Oda sıcaklığında katı haldedir. Kararlı yapıya sahip değildir (nötr halde). Silisyum sert, kırılkan, metal görünümünde bir katıdır. 1410 °C'de erir. Elmas yapısında kristaller oluşur. Silisyum, düşük sıcaklıklarda havadan, sudan ve asitlerden etkilenmez. Diyamanyetik bir elementtir. Kumda, kilde, cam yapımında ve yapı malzemelerinde kullanılır. Ek olarak metalik silisyum; çelik, bakır, bronz gibi maddelerin eldesinden oksijen alıcı olarak ve aside dayanıklı birçok alaşımın yapımında kullanılır. Çok saf silisyum, transistörlerde, redresörlerde (alternatif akımı doğru akıma çevirici) ve güneş pili yapımında kullanılır.

Tablo 2.7. Silisyum'un Özellikleri

Bağıl dielektrik geçirgenlik	12
İletim aralığı	1,2-7 μm
Yoğunluğu	2,329 g/cm^3
Kırılma indisi	3,4289-4 μm
Dayanaklığı	1150
Kopma modülü	18000 psi
Termal genleşme katsayısı	$2,55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$



Şekil 2.19. Si'de iletimin dalga boyuna göre değişim grafiği.

Tablo 2.8. Si'nin dalga boyu ve kırılma indisi

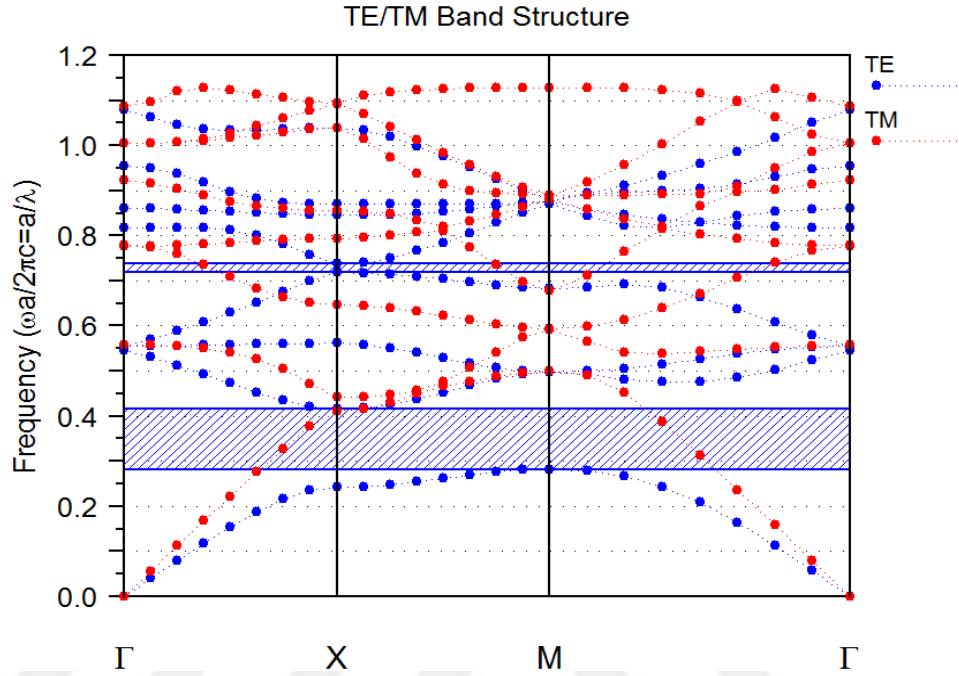
λ (μm)	n	λ (μm)	n	λ (μm)	n
1,40	3,49	1,82	3,46	3,30	3,43
1,50	3,48	2,05	3,45	6,00	3,42
1,66	3,47	2,50	3,44	-	-

2.4.1 Hava İçindeki Silindirik Si Çubukların Kare Örgüsü İçin Bant Aralıkları

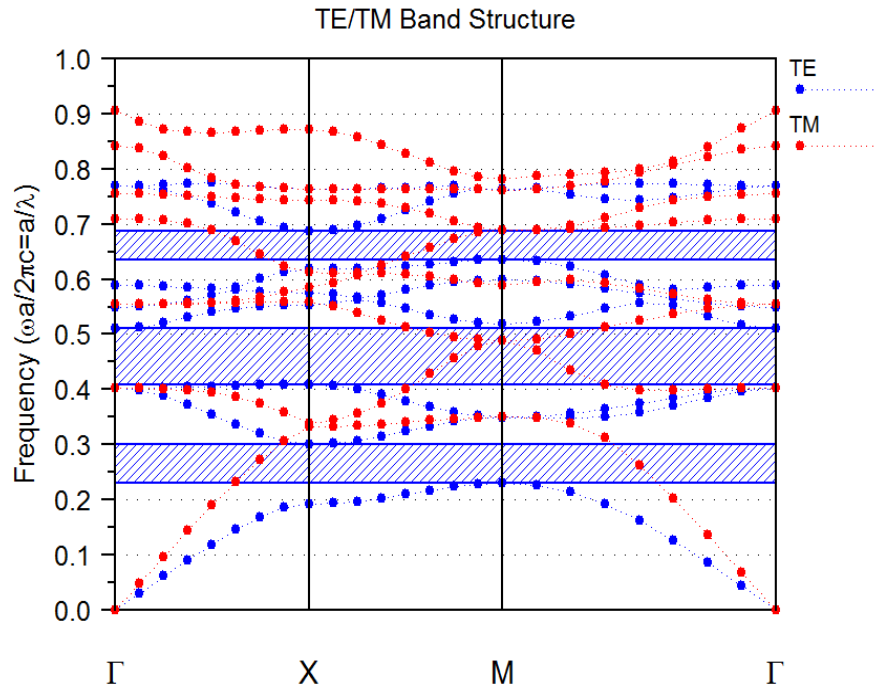
Burada Si'nin hava içindeki çubukların kare örgüsü için bağıl dielektrik geçirgenliği 12 alınarak bant yapısı hesaplandı.

Silindirik kesitli çubukların katı çubukların hava içinde iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar kare örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen

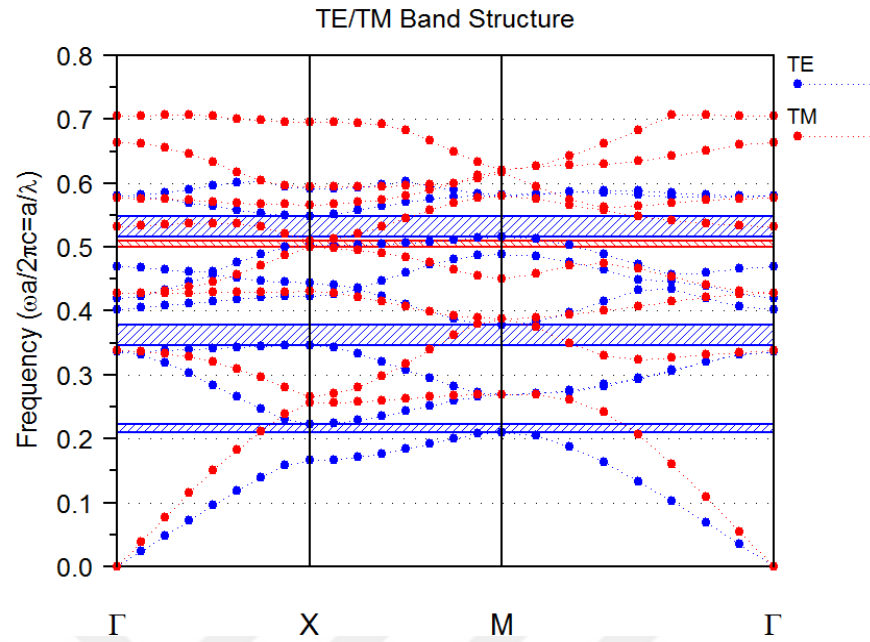
fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.20, 21 ve 22’de, bant aralıkları ise Tablo 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.20.Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsü ($r/a=0,20$).



Şekil 2.21.Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsü ($r/a=0,30$).



Şekil 2.22.Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsü ($r/a=0,40$).

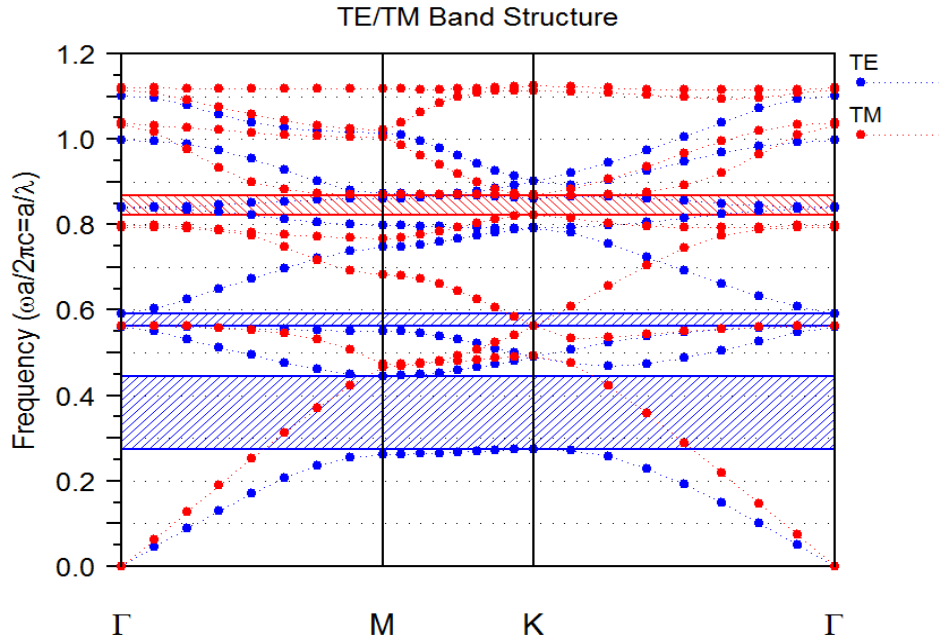
Tablo 2.9. Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsü için bant aralıkları

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	0,281	0,415	0,134	-	-	-	-	-
	0,715	0,739	0,024	-	-	-	-	-
0,25	0,247	0,355	0,108	-	-	-	-	-
0,30	0,227	0,299	0,072	-	-	-	-	-
	0,407	0,510	0,103	-	-	-	-	-
	0,633	0,688	0,055	-	-	-	-	-
0,35	0,216	0,256	0,040	-	-	-	-	-
0,40	0,209	0,223	0,014	0,500	0,509	0,009	-	-
	0,344	0,378	0,034	-	-	-	-	-
	0,516	0,548	0,032	-	-	-	-	-
0,45	-	-	-	-	-	-	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	-

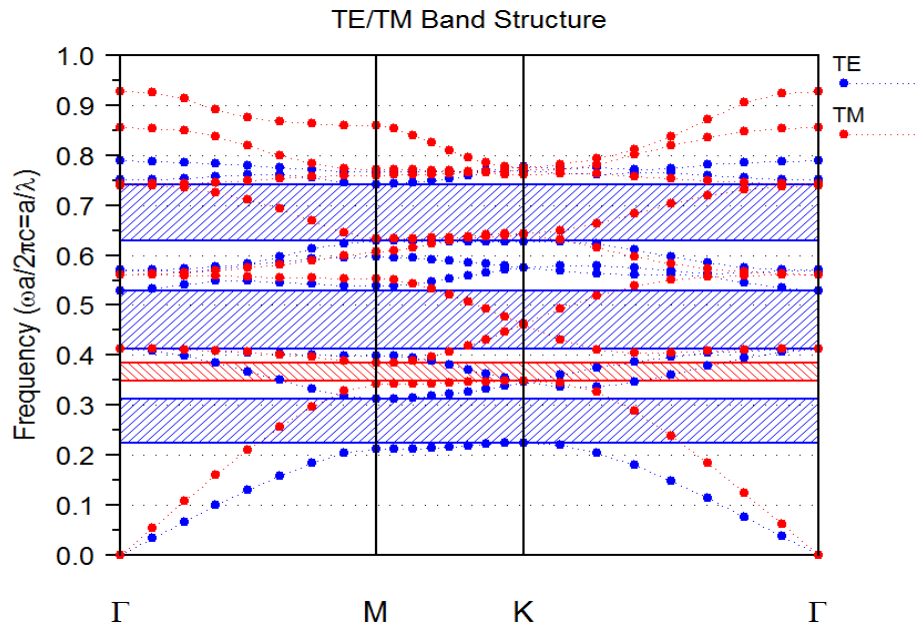
Hava içindeki silindirik Si çubukların kare örgüsüne ait incelemede $r/a= 0,45$ ve $0,50$ değerinde TE modu için band aralığı oluşmamıştır. Fakat $r/a= 0,40$ için TM modu band aralığı oluşmuştur. Ayrıca herhangi bir r/a değeri için tam band aralığı ortaya çıkmamıştır.

2.4.2 Hava İçindeki Silindirik Si Çubukların Üçgen Örgüsü İçin Bant Aralıkları

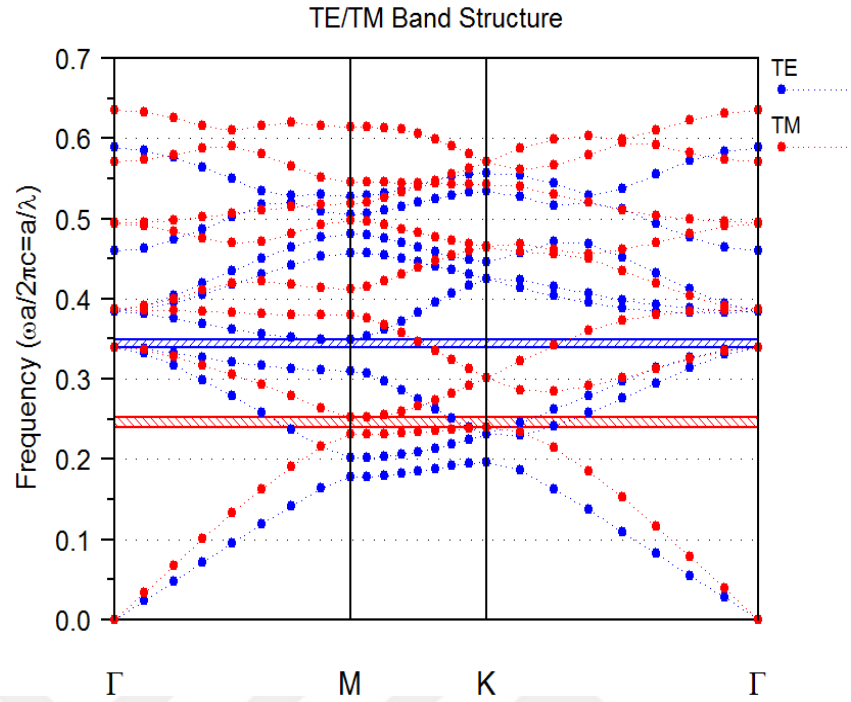
Silindirik kesitli çubukların katı çubukların hava içinde iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar üçgen örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.23, 24 ve 25’de, bant aralıkları ise Tablo 2.10’de verilmiştir.



Şekil 2.23.Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0,20$).



Şekil 2.24.Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0,30$).



Şekil 2.25.Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0,45$).

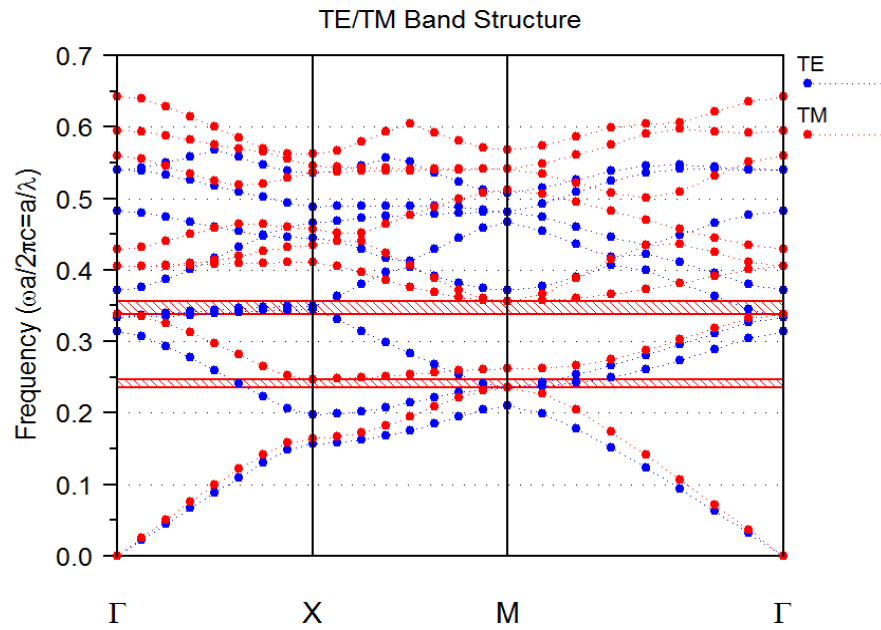
Tablo 2.10. Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsü için bant aralıkları

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	0,272	0,446	0,174	0,823	0,869	0,046	-	-
	0,560	0,591	0,031	-	-	-	-	-
0,25	0,243	0,371	0,0128	0,406	0,422	0,016	-	-
0,30	0,221	0,311	0,090	0,346	0,381	0,035	-	-
	0,410	0,530	0,012	-	-	-	-	-
	0,625	0,739	0,114	-	-	-	-	-
0,35	0,209	0,265	0,056	0,300	0,339	0,039	-	-
0,40	0,202	0,228	0,026	0,265	0,300	0,035	-	-
0,45	0,338	0,350	0,012	0,238	0,252	0,114	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	-

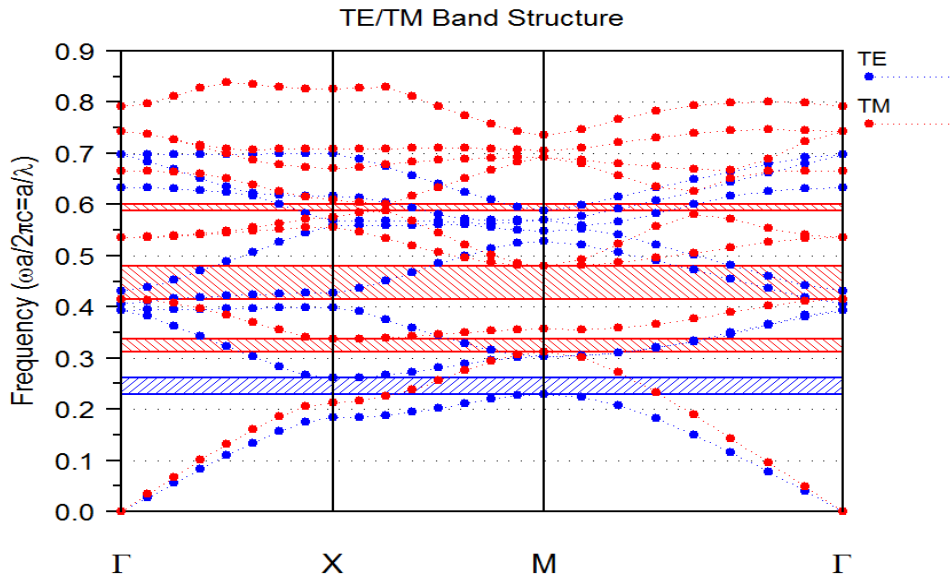
Hava içindeki silindirik Si çubukların üçgen örgüsüne ait incelemede $r/a=0,20- 0,45$ aralığında TE ve TM modları için band aralıkları elde edilmiştir. Fakat $r/a= 0,50$ için hem TE hem de TM modu için band aralığı elde edilmemiştir. Ayrıca herhangi bir r/a için tam band aralığı ortaya çıkmamıştır.

2.4.3 Si Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Kare Örgüsü İçin Bant Aralıkları

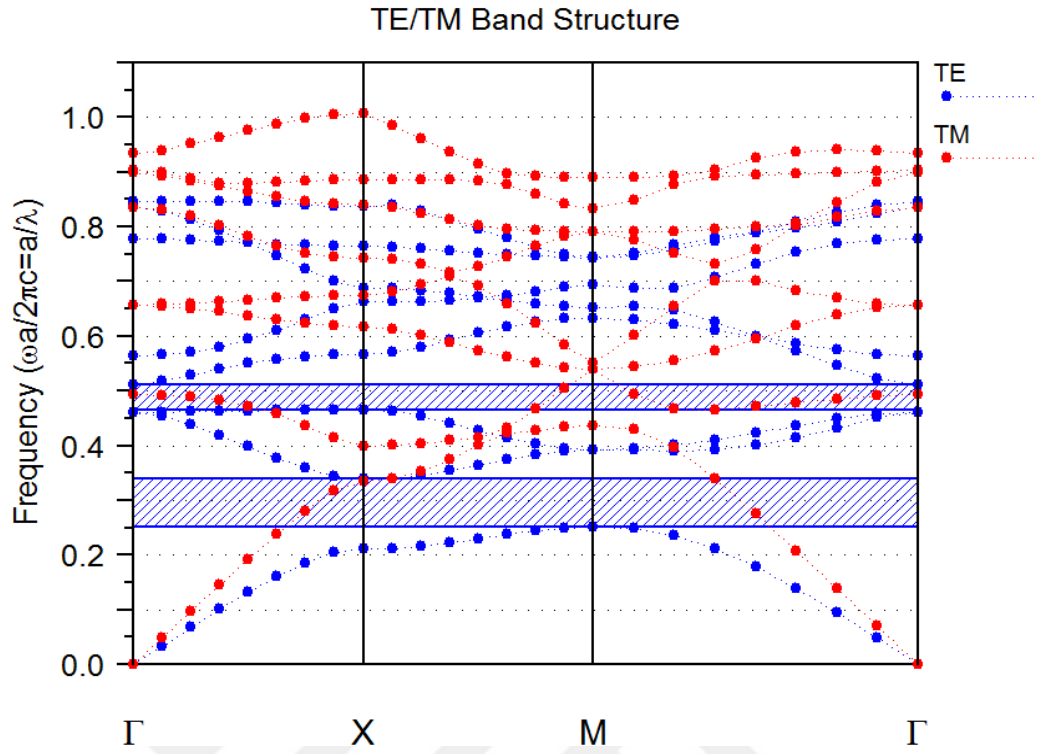
Si dilim içindeki silindirik hava sütunlarının iki boyutta periyodik düzenlemesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar kare örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.26, 27 ve 28’de, bant aralıkları ise Tablo 2.11’de verilmiştir



Şekil 2.26.Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0,35$).



Şekil 2.27.Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0,45$).



Şekil 2.28.Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0,50$).

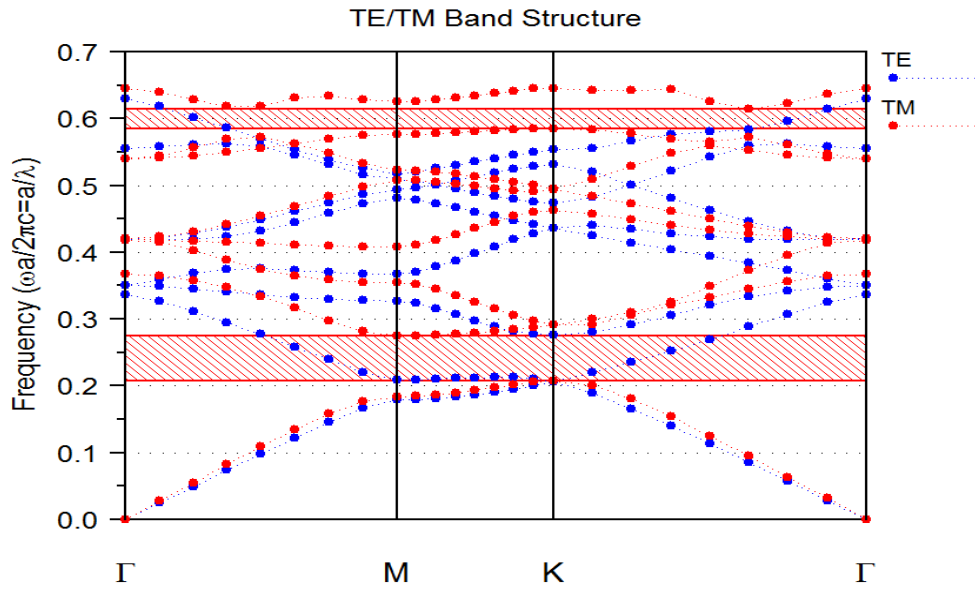
Tablo 2.11.Si dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsü için band aralıkları

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-
0,30	-	-	-	-	-	-	-	-
0,35	-	-	-	0,234	0,248	0,014	-	-
				0,337	0,355	0,018	-	-
0,40	-	-	-	0,260	0,286	0,026	-	-
0,45	0,228	0,262	0,034	0,309	0,337	0,028	-	-
	-	-	-	0,413	0,480	0,067	-	-
	-	-	-	0,585	0,600	0,015	-	-
0,50	0,249	0,339	0,009	-	-	-	-	-
	0,463	0,511	0,048	-	-	-	-	-

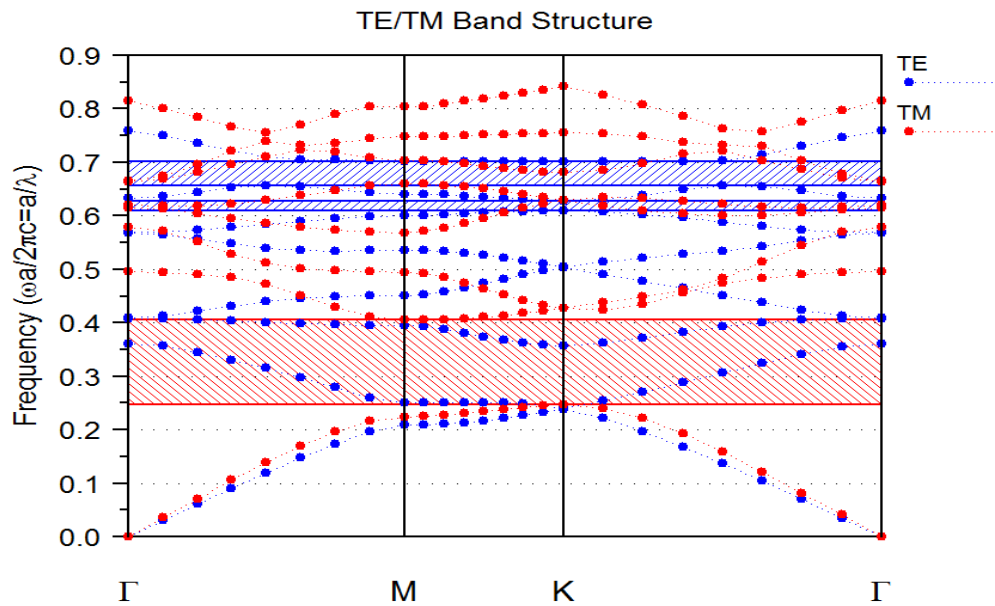
Si dilimi içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsüne ait incelemede $r/a= 0,45$ ve $0,50$ için TE band aralığı ve $r/a= 0,35-0,45$ aralığında TM band aralığı elde edilmiştir. Fakat herhangi bir r/a değeri için tam band aralığı ortaya çıkmamıştır.

2.4.4 Si Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Üçgen Örgüsü İçin Bant Aralıkları

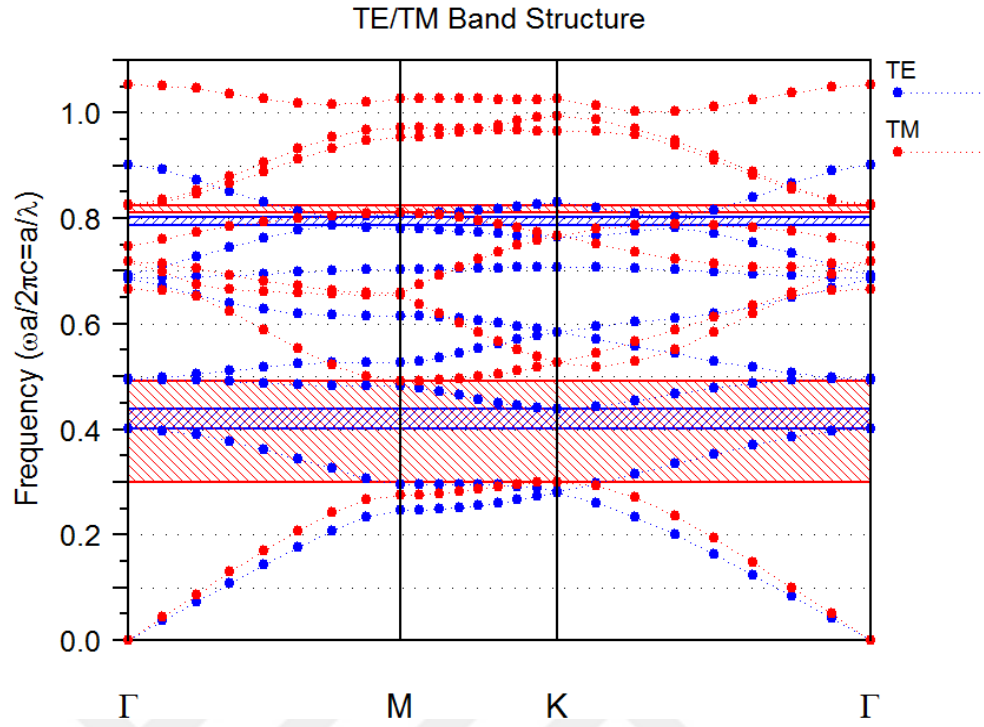
Si dilim içindeki silindirik hava sütunlarının iki boyutta periyodik düzenlemesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar üçgen örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.29, 30, 31 ve 32’da, bant aralıkları ise Tablo 2.12’da verilmiştir.



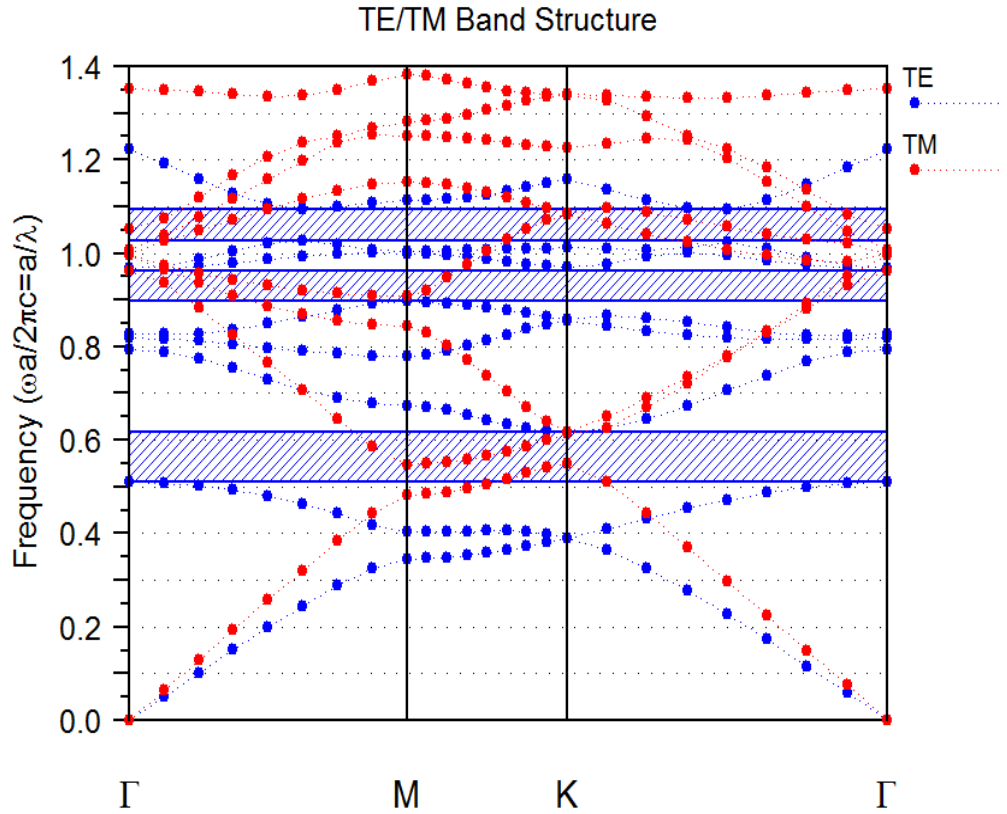
Şekil 2.29.Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,30$).



Şekil 2.30.Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,40$).



Şekil 2.31.Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,45$).



Şekil 2.32.Si dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,50$).

Tablo 2.12. Si dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü için bant aralıkları

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu		
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)
0,20	-	-	-	0,193	0,209	0,016	-	-	-
0,25	-	-	-	0,200	0,236	0,036	-	-	-
0,30	-	-	-	0,205	0,275	0,070	-	-	-
	-	-	-	0,584	0,616	0,032	-	-	-
0,35	-	-	-	0,219	0,330	0,111	-	-	-
0,40	0,607	0,625	0,018	0,243	0,405	0,162	-	-	-
	0,655	0,701	0,046	-	-	-	-	-	-
0,45	0,396	0,441	0,045	0,297	0,492	0,195	0,396	0,441	0,045
	0,785	0,800	0,015	0,807	0,823	0,016	-	-	-
0,50	0,505	0,619	0,114	-	-	-	-	-	-
	0,890	0,963	0,073	-	-	-	-	-	-
	1,023	1,091	0,068	-	-	-	-	-	-

Si dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsüne ait incelemede $r/a= 0,40-0,50$ aralığında TE modu ve $r/a= 0,20- 0,45$ aralığında TM modu için bant aralığı elde edilmiştir. Ayrıca $r/a= 0,45$ değerinde tam bant aralığı ortaya çıkmıştır Diğer r/a değerleri için bant aralığı elde edilememiştir.

2.5 Silika (SiO₂)

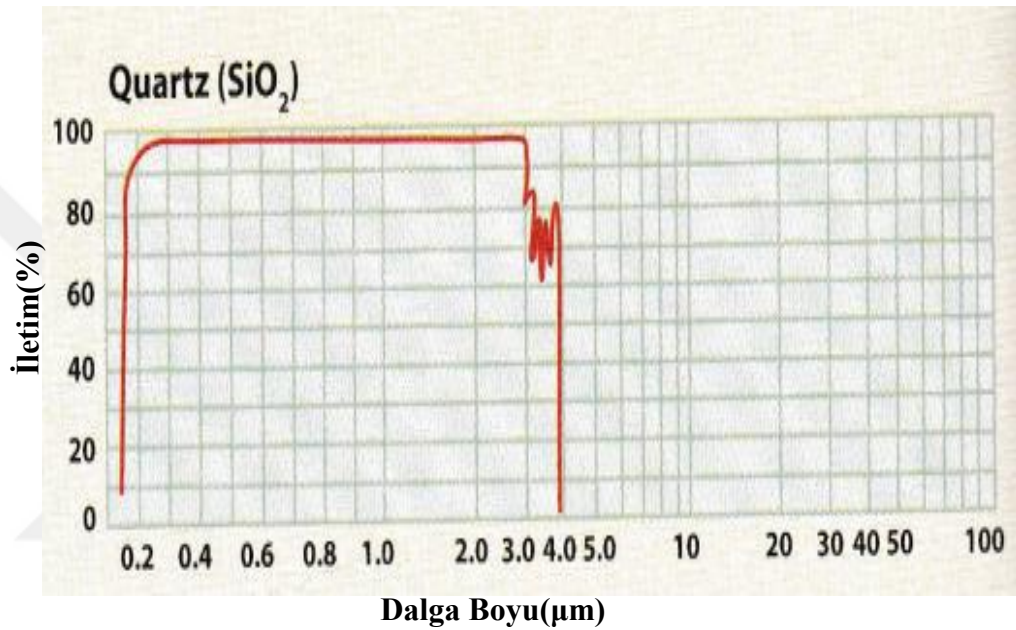
Silisyum, yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biridir. Doğada siliksat asidi ($m\text{SiO}_2.n\text{H}_2\text{O}$) ve tuzları halinde bulunur.

Silisyum dioksit (SiO₂) ise doğada kum ve kuvars şeklinde bulunur. Silisyum ve O₂ dünyada en çok bulunan elementlerdendir ve birlikte Silika'yı, dünyada kaya formunda bulunan üç minerale birini oluşturur.

Silika 3 ana kristal formunda bulunur. En çok mineral kuvars formunda bulunur. Fakat bu cevher aynı zamanda kristobolit ve tridimit halindedir. Bu cevherler sıcaklığa ve kimyasal etkilere karşı çok dayanıklıdır.

Oldukça saf silisyum dioksit (SiO₂) kristallerine verilen addır. Doğada kum, kuvars, kristal ya da amorf halde bulunur. İçindeki yabancı maddelerin cins ve miktarına göre, saydam, renkli, ya da yarı saydam durumdadır. Optikçe aktif olup, mineral yapılarındaki Si-O bağları çok kuvvetli olduğundan çok da sert bir maddedir diyebiliriz

Kuvars piezoelektrik bir taştır. Üzerine uygulanan belli bir mekanik basınç etkisiyle (sıkışma, esneme, burma) kristal yüzeyleri arasında bir elektriksel gerilim üretir. Bu özelliği sayesinde aynı zamanda kuvars saatlerde kullanılır. Önemli optik özellikleri renksiz, ender olarak ideal kristal şekline sahiptir. Özgül ağırlığı 2.65g/cm^3 , mohs sertlik cetvelinde 7 sertlik değeri bulunan kuvarsın son derece dayanıklı bir fiziksel forma sahi olduğu söylenebilir. Bağlı dielektrik geçirgenliği 2'dir.



Şekil 2.33. SiO₂'de iletimin dalga boyuna göre değişim grafiği.

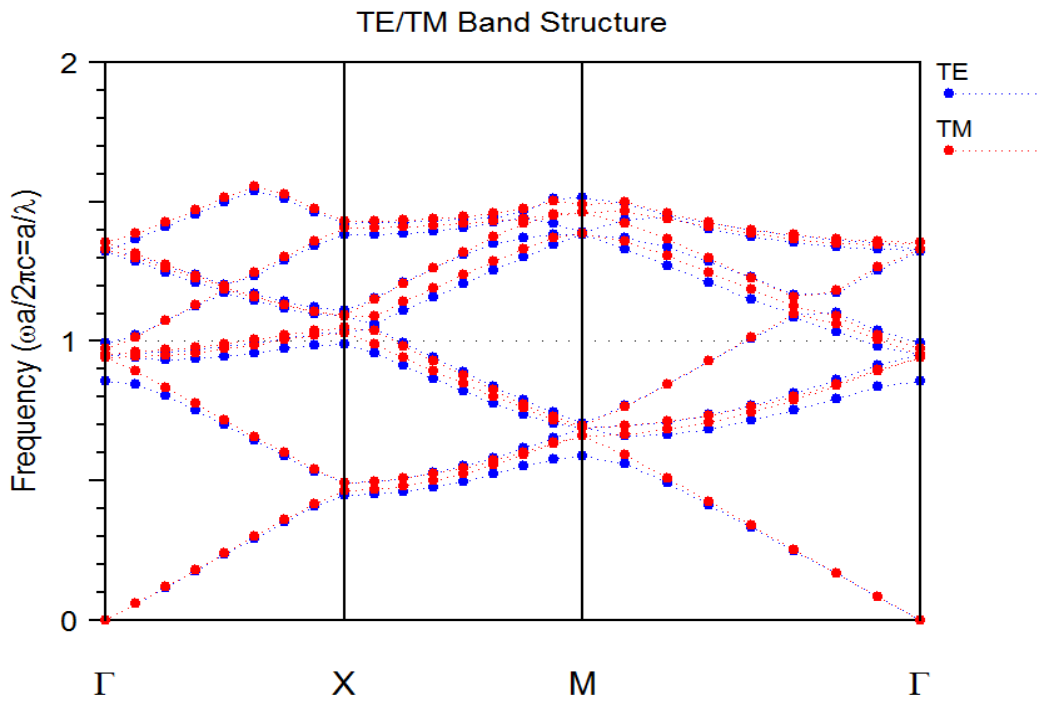
Tablo2.13. SiO₂ (kuvars) için dalga boyu ve kırılma indisi

λ (μm)	n_e	n_o	λ (μm)	n_e	n_o
0,20	1,66	1,65	0,31	1,59	1,58
0,21	1,65	1,64	0,33	1,58	1,57
0,22	1,64	1,63	0,38	1,57	1,56
0,23	1,63	1,62	0,49	1,56	1,55
0,24	1,62	1,61	0,77	1,55	1,54
0,25	1,61	1,60	1,30	1,54	1,53
0,27	1,60	1,59	2,05	1,53	1,52

2.5.1 Hava İçindeki Silindirik SiO₂ Çubukların Kare Örgüsü İçin Bant Aralıkları

Burada SiO₂'nin hava içindeki çubukların kare örgüsü için bağıl dielektrik geçirgenliği 2 sabiti kullanarak bant yapısı hesaplandı.

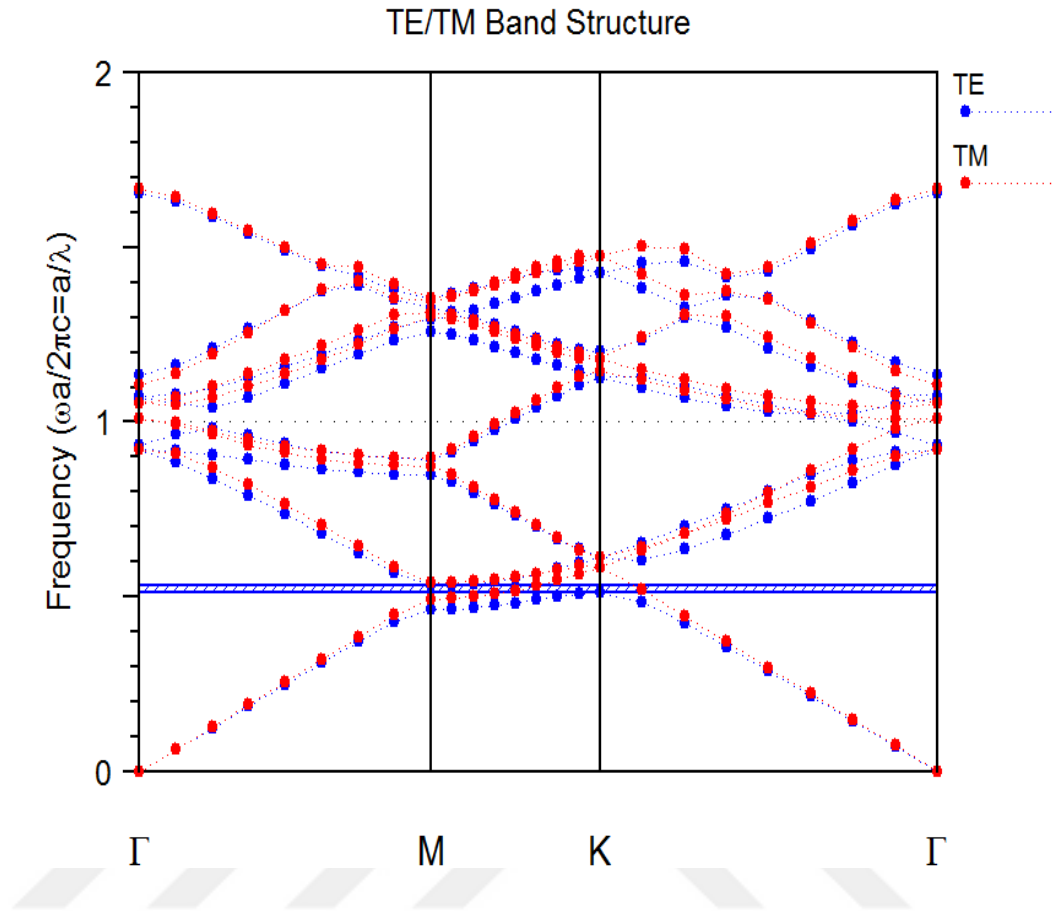
Silindirik kesitli çubukların katı çubukların hava içinde iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar için kare örgüsü incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından birisi Şekil 2.34'de verilmiştir. Bu yapı ve malzeme için hiçbir TE ve TM fotonik bant aralığı oluşmamıştır.



Şekil 2.34.Hava içindeki silindirik SiO₂ çubukların kare örgüsü $r/a=0,20$.

2.5.2 Hava İçindeki Silindirik SiO₂ Çubukların Üçgen Örgüsü İçin Bant Aralıkları

Silindirik kesitli çubukların katı çubukların hava içinde iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar için üçgen örgüsü incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından birisi Şekil 2.35'de verilmiştir. Bant yapısı incelemelerinden, sadece $r/a=0,30$ için $(a/\lambda)_{\min}=0,506$ ve $(a/\lambda)_{\max}=0,535$ aralığında TE moduna ait bir bant aralığı gözlenmiştir.



Şekil 2.35.Hava içindeki silindirik SiO₂ çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0,30$).

2.5.3 SiO₂ Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Örgüsü İçin Bant Aralıkları

SiO₂ dilim içindeki silindirik hava sütunlarının iki boyutta periyodik düzenlemesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modları, kare ve üçgen örgü için incelenmiş fakat her iki örgü için de hiçbir bant aralığı tespit edilememiştir.

2.6 Alumina (Al₂O₃)

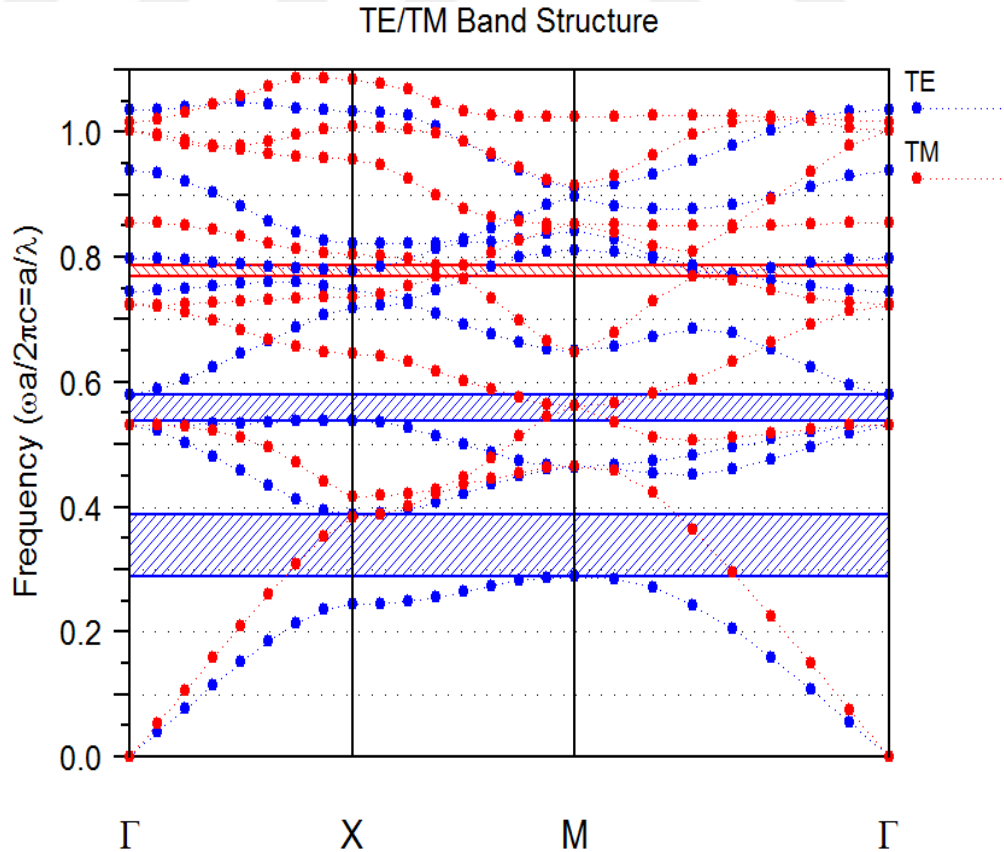
Alumina, dünyada en çok kullanılan oksit maddeleri arasındadır. Alumina, alüminyum metalinin oksitlenmiş halidir. İlk olarak buji ve laboratuvar malzemelerinde kullanılmıştır. Günümüzde ise bu alanlar oldukça yaygındır. Erime sıcaklığı 1200 °C civarı olan alüminyum oksit, düşük sıcaklıklarda mekanik ve kimyasal bozunmaya karşı en dayanıklı refrakterlerden birisidir. Alumina, düşük sıcaklıklarda birden fazla kristal yapıda bulunabilir.

Bugün alumina özellikle yüksek sıcaklık fırınlarında, kesici takım uçlarında, yatak malzemesi, tekstil endüstrisinde iplik kılavuzu ve elektronik endüstrisinde geniş çapta kullanılan bir malzemedir. Son yıllardaki gelişmelerden sonra ise alumina savunma sanayisinde zırh olarak ve tıpta implant ve protezlerde kullanılmaktadır.

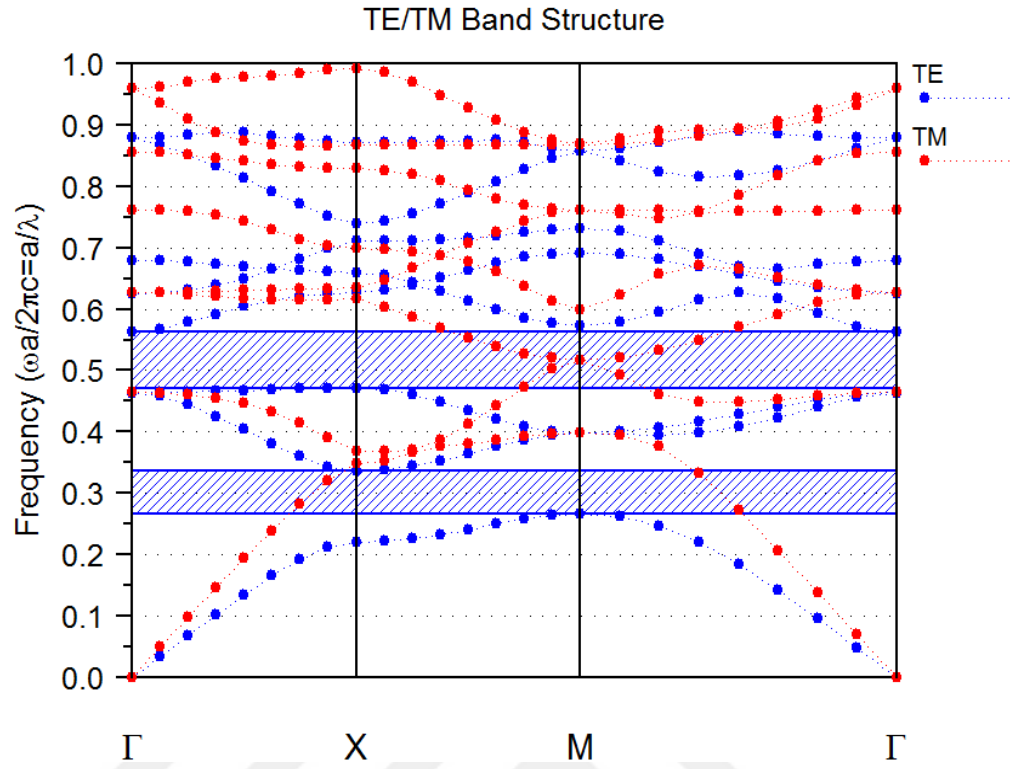
2.6.1 Hava İçindeki Silindirik Alumina(Al_2O_3) Çubukların Kare Örgüsü İçin Bant Aralıkları

Burada alumina(Al_2O_3)'nin hava içindeki çubukların kare örgüsü için bağıl dielektrik geçirgenliği 8,9 sabiti kullanarak bant yapısı hesaplandı.

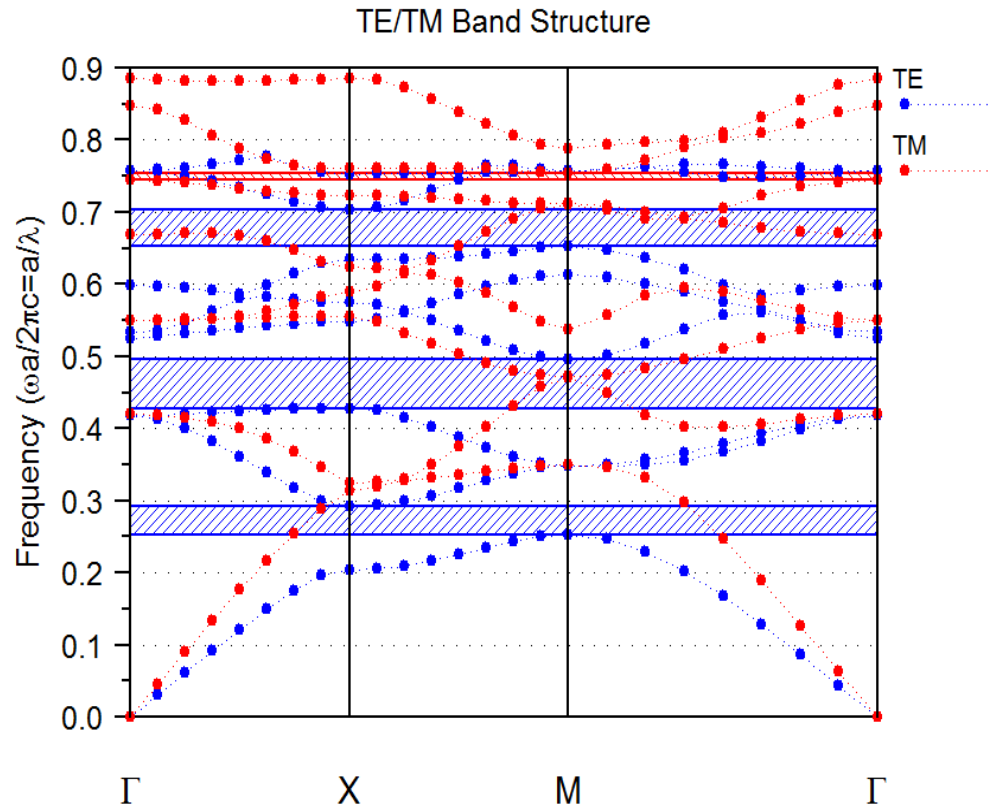
Silindirik kesitli çubukların katı çubukların hava içinde iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar için kare örgüsü incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.36, 37 ve 38'de, bant aralıkları ise Tablo 2.14'da verilmiştir.



Şekil 2.36.Hava içindeki silindirik Al_2O_3 çubukların kare örgüsü ($r/a=0,25$).



Şekil 2.37. Hava içindeki silindirik Al_2O_3 çubukların kare örgüsü ($r/a=0,30$).



Şekil 2.38. Hava içindeki silindirik Al_2O_3 çubukların kare örgüsü ($r/a=0,35$).

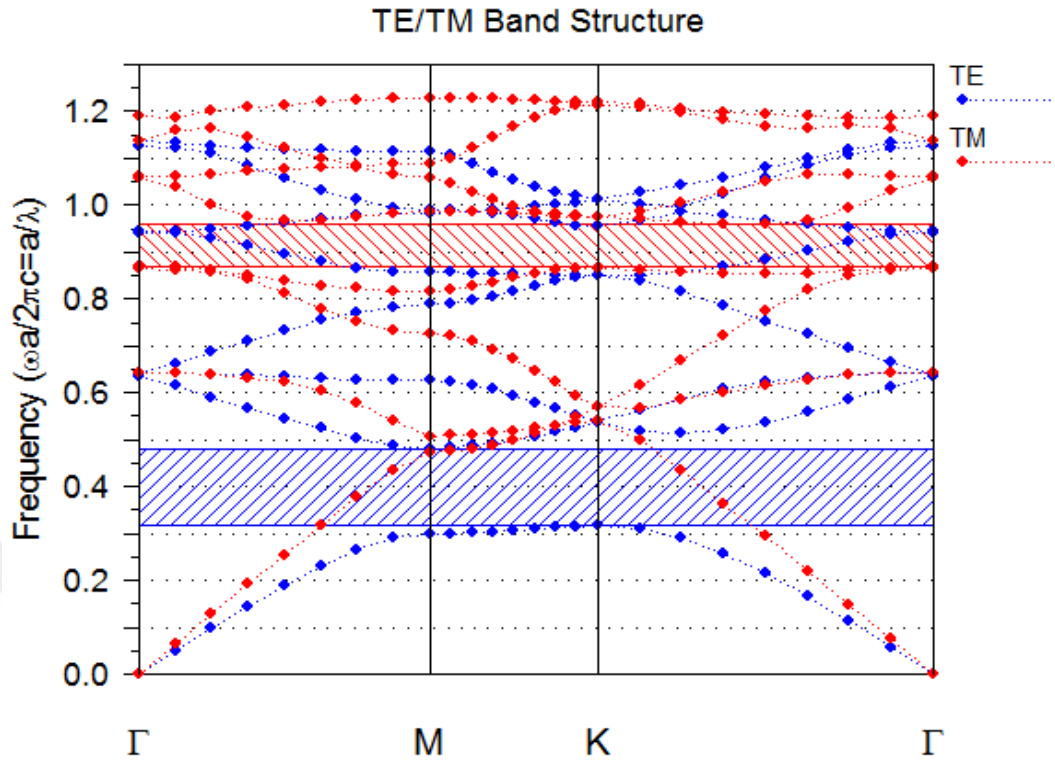
Tablo 2.14. Hava içindeki silindirik alümina (Al_2O_3) çubukların kare örgüsü için bant aralıkları.

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	0,325	0,442	0,117	0,967	0,982	0,015	-	-
0,25	0,291	0,387	0,096	0,771	0,787	0,016	-	-
	0,536	0,580	0,044	-	-	-	-	-
0,30	0,267	0,337	0,070	-	-	-	-	-
	0,470	0,562	0,092	-	-	-	-	-
0,35	0,254	0,293	0,039	0,743	0,753	0,010	-	-
	0,425	0,495	0,070	-	-	-	-	-
	0,650	0,704	0,054	-	-	-	-	-
0,40	0,243	0,254	0,011	-	-	-	-	-
0,45	-	-	-	-	-	-	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	-

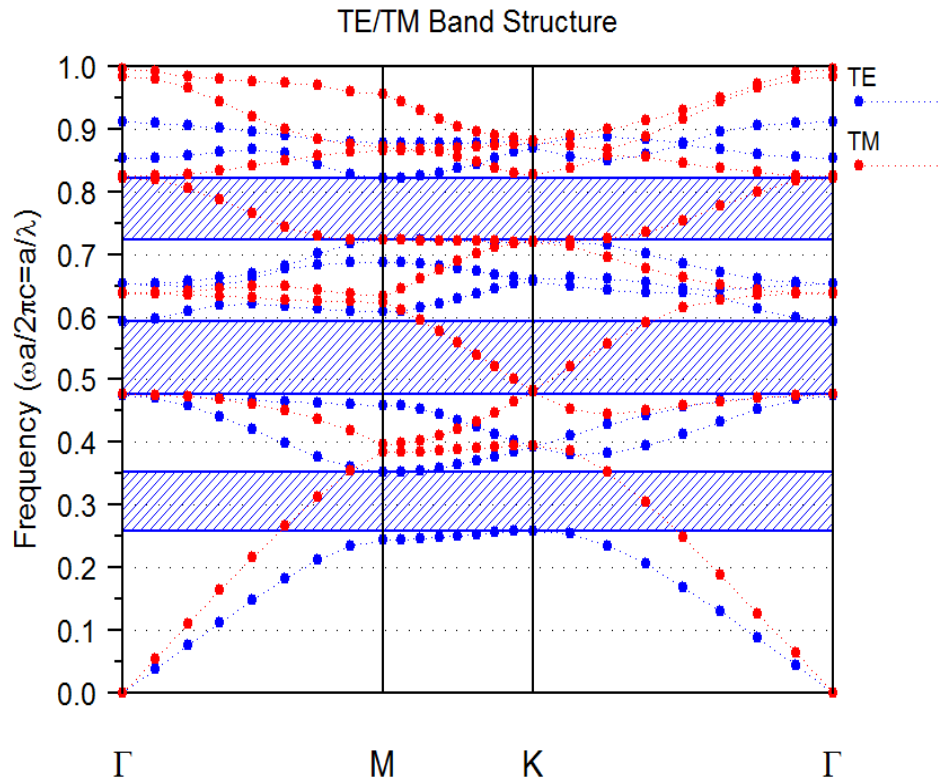
Hava içindeki silindirik alumina çubuklarının kare örgüsüne ait incelemede $r/a=0,20-0,40$ aralığında TE modu için ve $r/a= 0,20, 0,25$ ve $0,35$ değerleri için TM modu için bant aralıkları elde edilmiştir. Ayrıca herhangi r/a değerleri için TE ve TM bant aralıkları ortaya çıkmamıştır.

2.6.2 Hava İçindeki Silindirik Alumina (Al_2O_3) Çubukların Üçgen Örgüsü İçin Bant Aralıkları

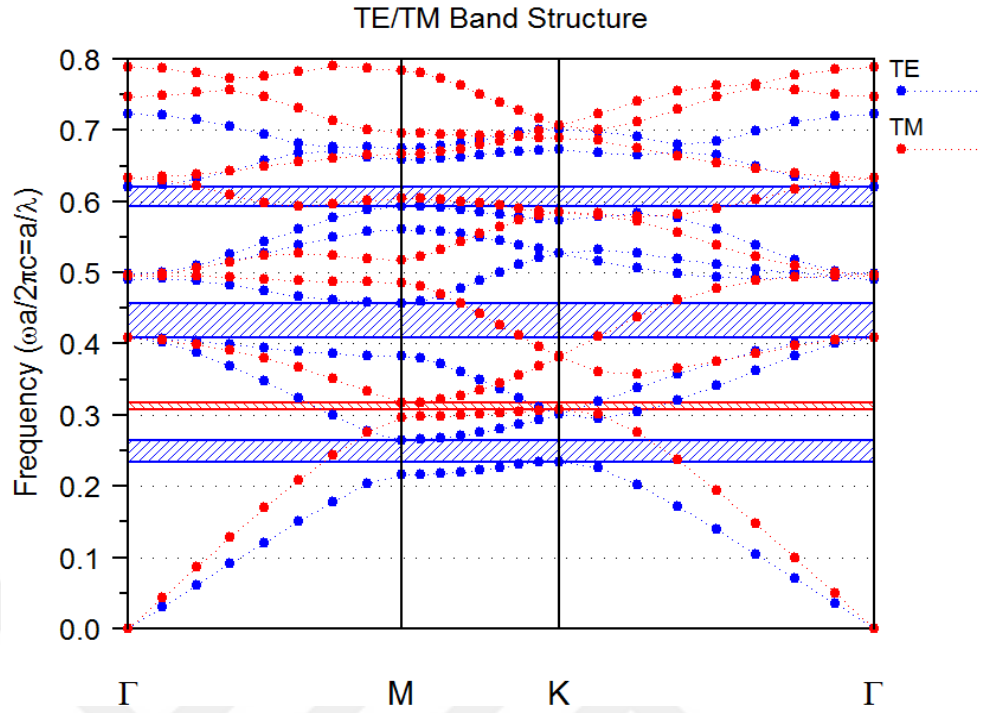
Silindirik kesitli çubukların katı çubukların hava içinde iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar için üçgen örgüsü incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.39, 40 ve 41’de, bant aralıkları ise Tablo 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2.39.Hava içindeki silindirik Al_2O_3 çubukların üçgen örgüsü($r/a=0,20$).



Şekil 2.40.Hava içindeki silindirik Al_2O_3 çubukların üçgen örgüsü($r/a=0,30$).



Şekil 2.41. Hava içindeki silindirik Al_2O_3 çubukların üçgen örgüsü ($r/a=0,40$).

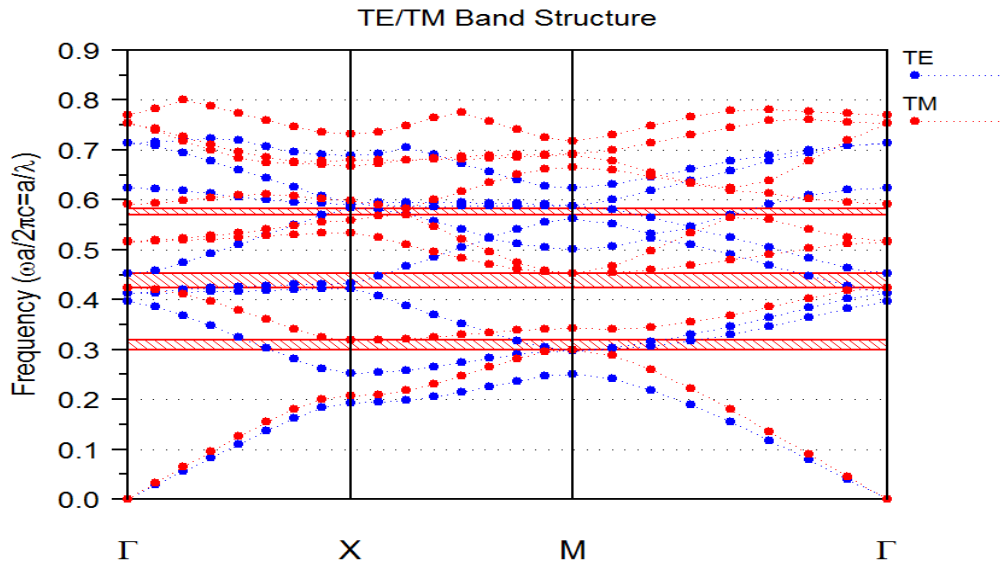
Tablo 2.15. Hava içindeki silindirik alümina (Al_2O_3) çubukların üçgen örgüsü için bant aralıkları.

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	0,317	0,480	0,163	0,869	0,960	0,091	-	-
0,25	0,282	0,411	0,129	-	-	-	-	-
0,30	0,259	0,352	0,093	-	-	-	-	-
	0,473	0,593	0,120	-	-	-	-	-
	0,719	0,822	0,103	-	-	-	-	-
0,35	0,243	0,301	0,058	0,345	0,358	0,213	-	-
0,40	0,235	0,265	0,030	0,307	0,316	0,009	-	-
	0,406	0,458	0,052	-	-	-	-	-
	0,591	0,621	0,030	-	-	-	-	-
0,45	0,395	0,402	0,007	-	-	-	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	-

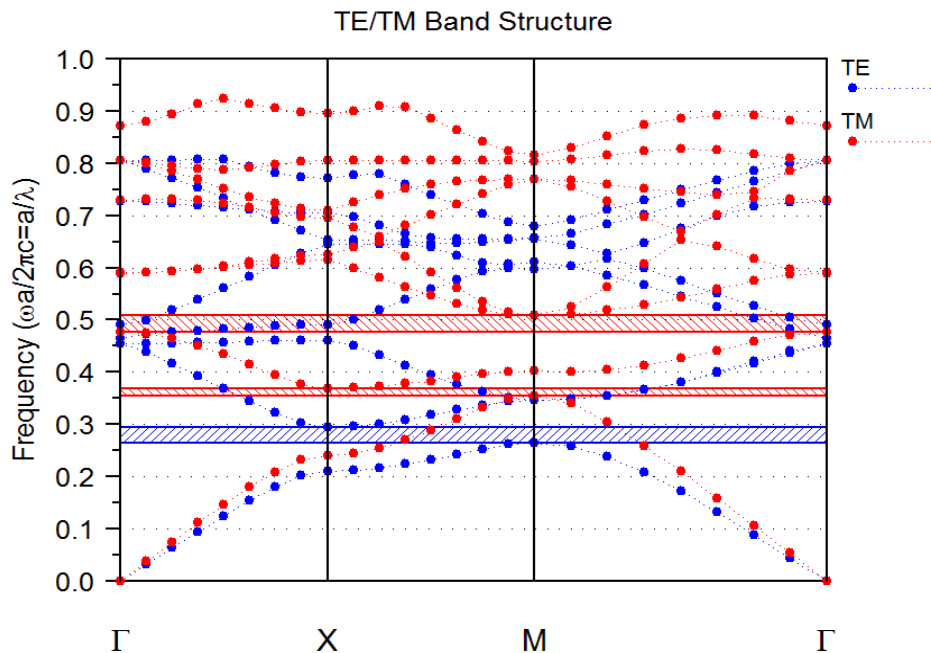
Hava içindeki silindirik alumina çubuklarının kare örgüsüne ait incelemede $r/a= 0,20$ - $0,45$ aralığında TE modları için ve $r/a= 0,20$, $0,35$ ve $0,40$ değerleri için TM modları bant aralığı elde edilmiştir. Ancak herhangi r/a değerleri için tam bant aralığı ortaya çıkmamıştır.

2.6.3 Alumina (Al_2O_3) Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Kare Örgüsü İçin Bant Aralıkları

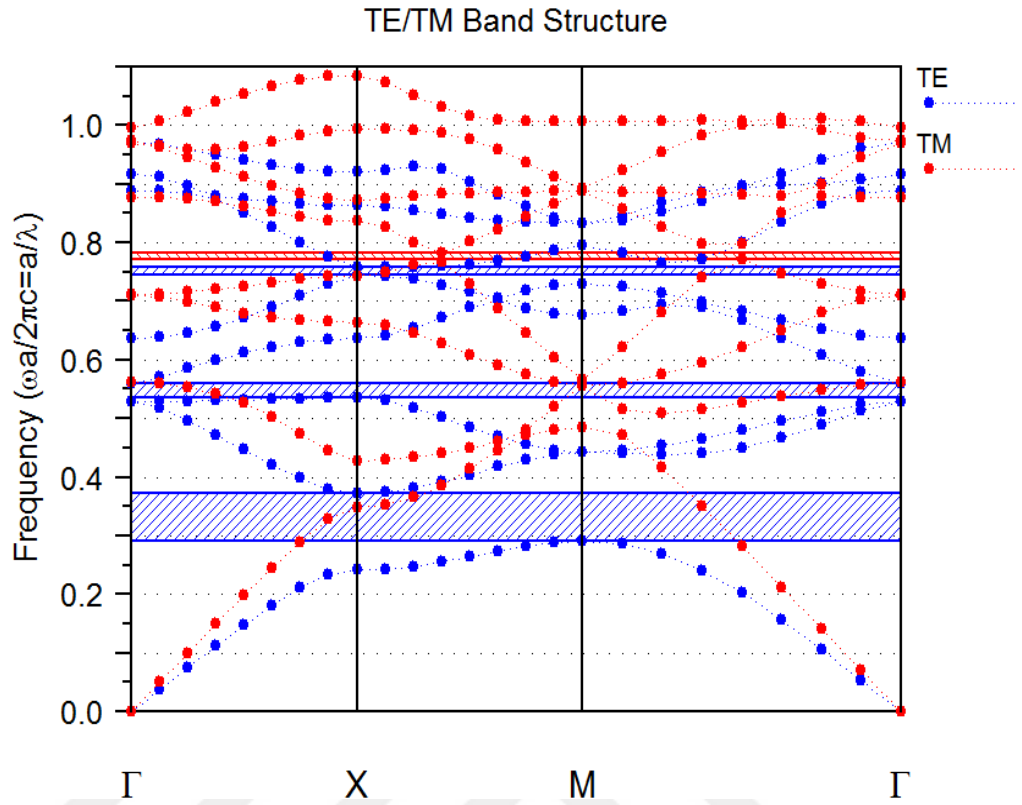
Alumina(Al_2O_3)dilim içindeki silindirik hava sütunlarının iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar kare örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.42, 43 ve 44’de, bant aralıkları ise Tablo 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.42. Al_2O_3 dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0,40$).



Şekil 2.43. Al_2O_3 dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0,45$).



Şekil 2.44. Al_2O_3 dilimi içindeki silindirik hava sütunların kare örgüsü ($r/a=0,50$).

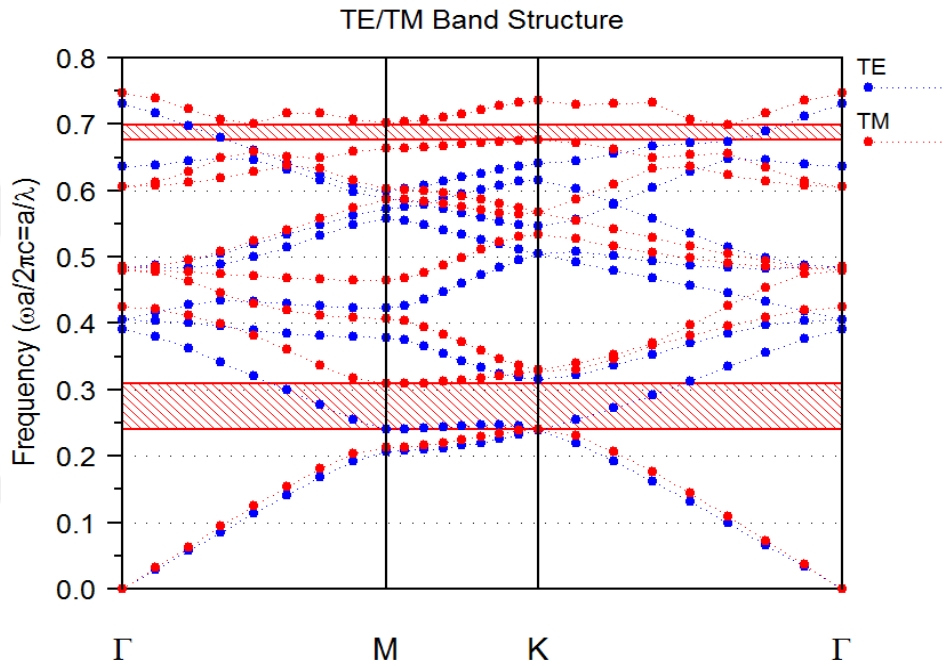
Tablo 2.16. Alumina (Al_2O_3) dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsü için bant aralıkları.

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu	
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$
0,20	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-
0,30	-	-	-	-	-	-	-	-
0,35	-	-	-	-	-	-	-	-
0,40	-	-	-	0,300	0,319	0,019	-	-
	-	-	-	0,420	0,454	0,034	-	-
	-	-	-	0,567	0,583	0,016	-	-
0,45	0,265	0,294	0,029	0,355	0,369	0,014	-	-
	-	-	-	0,476	0,507	0,031	-	-
0,50	0,291	0,371	0,080	0,770	0,780	0,010	-	-
	0,534	0,561	0,027	-	-	-	-	-
	0,744	0,760	0,016	-	-	-	-	-

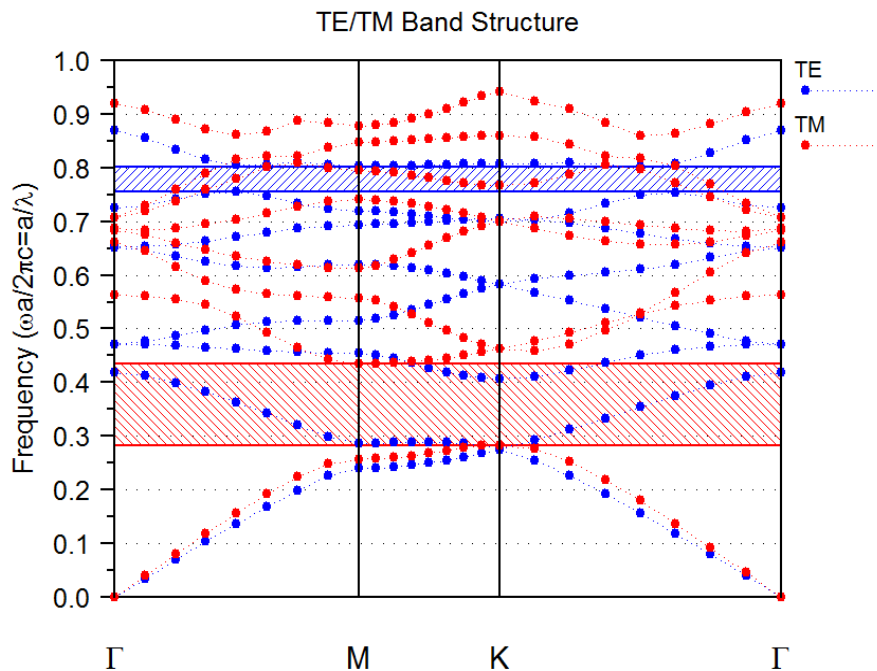
Alumina dilim içindeki silindirik hava sütunlarının kare örgüsüne ait incelemede $r/a=0,45$ ve $0,50$ için TE ve $r/a=0,40-0,50$ aralığında TM modu için bant aralıkları elde edilmiştir. Ayrıca herhangi r/a değerleri için tam bant aralığı ortaya çıkmamıştır.

2.6.4 Alumina (Al_2O_3) Dilim İçindeki Silindirik Hava Sütunlarının Üçgen Örgüsü İçin Bant Aralıkları

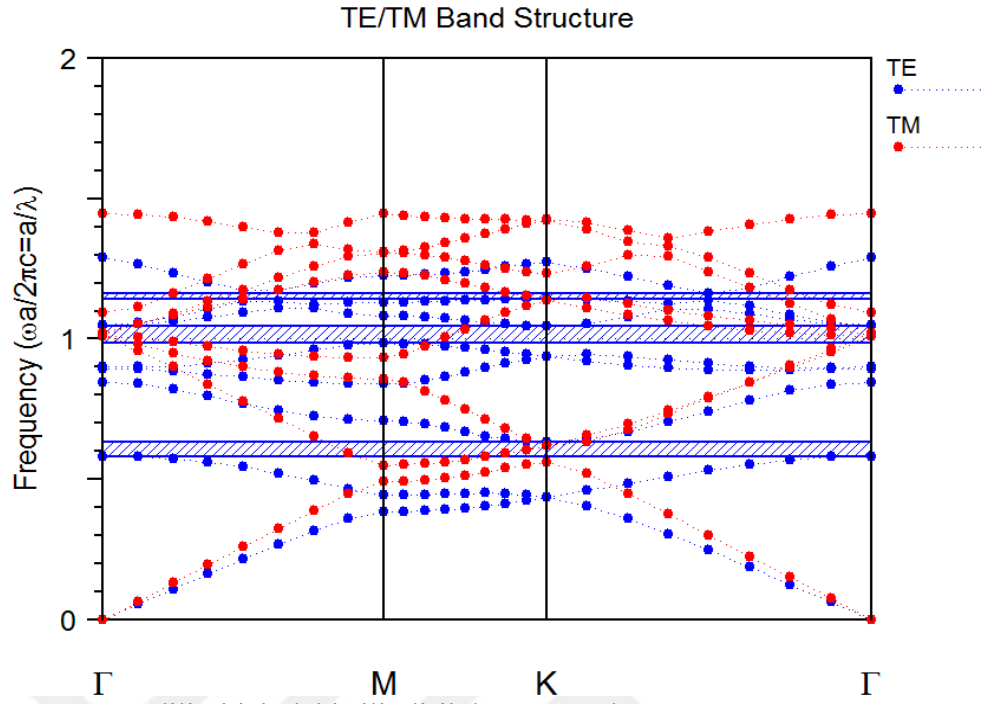
Alumina (Al_2O_3)dilim içindeki silindirik hava sütunlarının iki boyutta periyodik düzenlenmesinden oluşan fotonik kristalinin hem TE (enine elektrik) hem de TM (enine manyetik) modlar üçgen örgüsü için incelenmiştir. Farklı r/a değerleri için elde edilen fotonik bant yapılarından bazıları Şekil 2.45, 46 ve 47’de, bant aralıkları ise Tablo 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.45. Al_2O_3 dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,30$).



Şekil 2.46. Al_2O_3 dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,40$).



Şekil 2.47. Al_2O_3 dilimi içindeki silindirik hava sütunların üçgen örgüsü ($r/a=0,50$).

Tablo 2.17. Alumina(Al_2O_3) dilim içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü için bant aralıkları.

r/a	TE Modu			TM Modu			TE+TM Modu		
	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)	$(a/\lambda)_{\min}$	$(a/\lambda)_{\max}$	Band Genişliği (a/λ)
0,20	-	-	-	0,228	0,239	0,011	-	-	-
0,25	-	-	-	0,232	0,268	0,036	-	-	-
0,30	-	-	-	0,239	0,309	0,070	-	-	-
	-	-	-	0,674	0,700	0,026	-	-	-
0,35	-	-	-	0,256	0,364	0,108	-	-	-
0,40	0,756	0,802	0,046	0,282	0,433	0,151	-	-	-
0,45	0,464	0,492	0,028	0,342	0,506	0,164	0,464	0,492	0,028
0,50	0,581	0,634	0,053	-	-	-	-	-	-
	0,980	1,043	0,063	-	-	-	-	-	-
	1,140	1,163	0,023	-	-	-	-	-	-

Alumina dilimi içindeki silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsüne ait incelemede $r/a=0,40-0,50$ aralığında TE modları için ve $r/a=0,20-0,45$ aralığında TM modları için band aralıkları elde edilmiştir. Ayrıca $r/a=0,45$ için hem TE hem de TM modları için tam band aralığı ortaya çıkmıştır.

BÖLÜM 3

TARTIŞMA VE SONUÇ

Sonuçları üç başlık altında tartışmak uygun olacaktır.

3.1 Kare Örgülü Fotonik Kristaller

İki boyutlu fotonik kristallerin bant yapısı hesaplamalarında bantlar iki şekilde incelendi. TE bant yapısı ve TM bant yapısı. TE bant yapısında elektrik alan çizgileri dielektrik çubuklara dik, manyetik alan ise paraleldir. TM bant yapısında ise elektrik alan dielektrik çubuklara paralel, manyetik alan diktir. TE bant yapısında elektrik alan çizgileri kesikli dönüşüm simetrisine sahip iken, manyetik alan sürekli dönüşüm simetrisine sahiptir. Buna göre elektrik alan eksen-üzerinde yayılırken, manyetik alan eksen-dışında yayılır. TM bant yapısında ise tam tersi bir durum vardır.

Fotonik bant aralığı içindeki frekanslarda gelen dalgalar ile birbirini kuvvetlendirerek yansıyan aynı fazlı dalgalar birbirini sönümler. Periyodik yapı içinde ilerleyemez. TM kipi için elektrik alan çubuklara paralel olduğundan yüksek yoğunlaşma faktörü mümkündür. TE kipinde ise, elektrik alan çizgileri bazı noktalarda, elektrik alan enerjisini dielektrik çubukların dışına doğru zorlayan sınırlarla karşılaşır. Bu da yüksek yoğunlaşma faktörünü engeller. Bu yüzden TE kiplerinde bant aralığı görülmez. Fotonik kristallerde fotonlar, değerlik bandına benzer dielektrik bant, iletkenlik bandına benzer hava bandı içerisinde yer alır. Dielektrik bant ve hava bandı arasında fotonların bulunmalarının yasak olduğu bölgede fotonik bant aralığı oluşmuştur. Periyodik yapı boyunca elektromanyetik dalga, bant aralığı aşağısındaki frekanslarda dielektrik bant içerisinde olduğundan, dielektrik çubuklara bağlı olarak; bant aralığı yukarısındaki frekanslarda, hava bandı içerisinde olduğundan, dielektrik çubuklara bağlı olmadan yayılabilmektedir. Ancak, fotonik bant aralığı içerisindeki frekanslarda elektromanyetik dalga fotonik kristal

içerisinde yayılamaz ve tamamen geri yansır. Fotonik bant aralıkları elde ettiğimiz grafiklerde yatay ekseninde bulunan Γ , M, X noktaları yüksek simetri noktaları olarak bilinir. Ters örgü noktalarıyla merkez noktasını (Γ -noktası) birleştirmektedir. M ve X noktaları ise Brillouin bölgesinin kenarlarını göstermektedir. Bu kenarlarda dalga paketinin hızı sıfırdır. Üç özel nokta Γ , X ve M sırasıyla $k// = 0$, $k// = \pi/a$ ve $k// = \pi/a + \pi/a$ değerlerine karşılık gelir. Düşey eksen frekansı ($\omega \rightarrow \omega a / 2\pi c = a/\lambda$ boyutsuz parametre cinsinden) göstermektedir.

Hava içindeki silindirik dielektrik çubuklar için $r/a=0,20$ ve artan değerleri için TE modu için bant aralıkları oluşurken, TE ve TM mod için tam bant aralıkları oluşmamıştır. Ayrıca bazı r/a değerleri için bazı TM bant yapıları elde edilmiştir.

Dielektrik dilim içindeki hava sütunlarının kare örgüsüne ait incelemede, hava içindeki silindirik dielektrik çubuklara benzer bant aralıkları elde edilmiştir. Ama $r/a= 0,35$ ve sonrası değerlerde TE modu için ve TM modu için bant aralıkları ortaya çıkmıştır. Bu r/a değerleri için de TE ve TM modları için tam bant aralığı oluşmuştur.

3.2 Üçgen Örgülü Fotonik Kristaller

Silindirik hava sütunlarının üçgen örgüsü için fotonik kristalde TM modu için bant aralığı oluşmamışken, TE modu için bir bant aralığı oluşmuştur. Benzer şekilde TE modu için bant aralığı oluşmamış iken TM modu için bant yapısı elde edilmiştir.

Hava içindeki dielektrik çubukların üçgen örgüsünde hem TE hem de TM bant yapısı elde edilmiştir. TE bant yapısı oluşurken TM bant yapısı da oluşmuştur. Ancak tam fotonik bant aralığı elde edilememiştir.

3.3 Tüm Kutuplanmalar İçin Tam Bant Aralığı

Her iki kutuplanma için bant aralıklarına sahip bir fotonik kristal tasarlanabilir. Örgünün boyutlarını ayarlayarak bant aralıklarının üst üste binmeleri sağlanabilir ve böylece, tüm kutuplanma durumları için bir **tam bant aralığı** elde edilir.

Rehber kuralımız, yalıtılmış yüksek- ϵ 'lu bölgelerin bir örgüsünün TM bant aralıklarını, bağlantılı bir örgünün ise TE bant aralıklarını desteklemesidir.

Dielektrik malzemenin hem yalıtılmış noktalarına hem de bağlantılanmış bölgelerine sahip bir fotonik kristal düzenlemesi mümkün görünmemektedir. Cevap bir tür uzlaşmadır: Hem pratik olarak izole edilmiş hem de dar damarlarla bağlantılanmış olan yüksek- ϵ 'lu bölgelere sahip kristaller düşünebiliriz. Düşünce, yüksek- ϵ 'lu bir ortam içine düşük- ϵ 'lu sütunların üçgen bir örgüsünü yerleştirmektir. Eğer sütunların yarıçapları yeteri kadar büyükse, sütunlar arasındaki noktalar (spot) yüksek- ϵ 'lu sınırlandırılmış bölgelere benzerler; bunlar da sütunlar arasındaki dar bölgeden geçerek komşu noktalara bağlanırlar.

İnlemelerimizde, bazı düzenlemeler için hem TE hem de TM modları için fotonik tam bant aralığı elde edilmiştir. Alumina (bağlı dielektrik geçirgenliği $\epsilon = 8,9$) $r/a = 0,45$ için fotonik tam bant aralığı elde edilmiştir. Benzer şekilde GaAs ve Si çubukları için $r/a = 0,45$ değerleri için fotonik tam bant aralığı ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, hava içindeki dielektrik sütunlar için, SiO_2 hariç, kullanılan malzemeler için, genellikle, $r/a \leq 0,40$ oranları için TE modunda çok sayıda bant aralığı elde edilirken TM modunda daha az sayıda aralık elde edilmiştir. SiO_2 için ise kare düzenlemede her iki mod için de hiçbir bant aralığı elde edilmezken, üçgen örgüde sadece $r/a = 0,30$ için TE modunda bir aralık elde edilmiştir. TE ve TM modlarının üst üste bulunduğu tam bant aralıkları elde edilememiştir. Dielektrik dilim içindeki hava sütunları için SiO_2 hariç, kullanılan malzemeler için kare ve üçgen örgü düzenlemelerinde, genellikle daha büyük $r/a (\geq 0,40)$ bölgesinde az sayıda TE modu için; daha küçük $r/a (\leq 0,45)$ bölgesinde ise daha fazla sayıda TM modu için bant aralığı tespit edilmiştir. SiO_2 için ise her iki mod için herhangi bir örgüde hiçbir bant aralığı elde edilememiştir. TE ve TM modlarının üst üste bulunduğu tam bant aralıkları ise sadece üçgen örgüde ve bir veya iki tane elde edilmiştir. Sadece TE veya TM modunda bir bant aralığı elde etmek için, uygun r/a oranları seçilerek herhangi bir malzeme ve örgü düzenlemesi kullanmak mümkündür. Tam bir bant aralığının eldesi, dielektrik dilim içinde hava sütunlarının sadece üçgen örgüsü kullanılarak ve büyük $r/a (0,40-0,45)$ değerleri için mümkündür.

İleri çalışmalar olarak fotonik kristallerin sensör uygulamalarına yönelik incelemeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Yablonovitch, E., (1994). Photonic Crystals, **J. Mod. Opt.**, **41**, 173-194.
2. Arriaga, J., Knight, J. C., Russell, P. St. J., (2004). Modeling The Propagation of Light in Photonic Crystal Fibers, **Physica D**, **189**, 100-106.
3. Vukusic, P., Sambles, J. R., Photonic Structures in Biology, Nature, 424, 852,2003.
4. Tayeb, G., Gralak, B., Enoch, S., (2003). Structural Colors in Nature and Butterfly-Wing Modeling, Opt. Photonic News, 14, 38.
5. Thylén, L., Qiu, M., Anand, S., (2004). Photonic Crystals-A Step Towards Integrated Circuits For Photonics, **Chem. Phys. Chem.**, **5**, 1268-1283.
6. Ghiradella, H., (1991). Light and Color on The Wing: Structural Colors in Butterflies and Moths, **Appl. Opt.**, **30**, 3429.
7. Lord Rayleigh. (1887). **Phil. Mag.** S.5, 24(147), 145-59.
8. Johnson S. G. (2001) Photonic Crystals: From Theory to Practice. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Physics, Cambridge, 155 p.
9. John S. (1987) Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. **Phys. Rev. Lett.** **58**: 2486-2489.
10. Pendry J. B. (1996) Calculating photonic band structure. **J. Phys. Condensed Matter**, **8**: 1085-1108.
11. Öttl A. W. (2001) Ultra-Refractive Photonic Crystals, Colloidal Opals, and Photonic Band Gaps in the THz-Range. PhD Thesis, Fakultät für Physik Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, 133 p.
12. O'Brien J, Kuang W, Lee P, Cao J R, Kim C and Kim W. (2004) Photonic crystal lasers. **Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology**, **8**: 1–12.
13. Ashcroft N. W. and Mermin N. D. (1976) *Solid State Physics*. Saunders College Publishers, Orlando, Florida, 826 p.
14. Yablonovitch E. (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, **Phys. Rev. Lett.** **58**: 2059-2062.

15. Alferov Z. I. (1997) The history and future of semiconductor heterostructures. **Semiconductors**, **32** (1): 1-14.
16. Hillebrand, R., Hergert, W., (2004). Scaling Properties of A Tetragonal Photonic Crystal Design Having A Large Complete Band Gap, **Photonic and Nanostructures Fundamentals and Applications**, **2**, 33-39.
17. Ozbay, E., et al., (1994). Measurement of Three-Dimensional Band Gap in New Crystal Structure Made of Dielectric Rods, **Phys. Rev. B**, **50**, 1945.
18. Gruning, U., Lehmann, V., Engelhart, C. M., (1995). Two-Dimensional Infrared Photonic Band Gap Structure Based on Porous Silicon, **Appl. Phys. Lett.**, **66**, 3254.
19. Wanke, C. M., et al., (1997). Laser CVD Rapid Processing of Ceramic photonic Band Gap Microstructures, **Science**, **275**, 1284.
20. Lin, S. Y., et al., (1998). A Three-Dimensional Photonic Crystal Operating at Infrared Wavelengths, **Nature**, **394**, 251.
21. Noda, S., et al., Full Three-Dimensional Photonic Band Gap Crystals at Near-Infrared Wavelengths, *Science*, 289, 604, 2000.
22. Ho, K. M., et al., (1994). Photonic Band Gap in Three Dimension: New Layer-by-Layer Periodic Structures, **Solid State Commun.**, **89**, 413.
23. Sozuer, H., Dowling, J., (1994). Photonic Band Calculations For Woodpile Structures, **J. Mod. Opt.**, **41**, 231.
24. Krauss, T. F., De La Rue, R. M., Brand, S., (1996). Two-Dimensional Photonic Band Gap Structures Operating at Near-Infrared Wavelengths, **Nature**, **383**, 699.
25. Mulot, M., et al., (2003). Low-Loss InP-Based Photonic Crystal Waveguides Etched With Ar/Cl₂ Chemically Assisted Ion Beam Etching, **J. Vac. Sci. Technol. B**, **21**, 900.
26. Zhang, W. Y., 2000. Robust Photonic Band Gap From Tunable Scatterers, **Phys. Rev. Lett.**, **84**, 2853.
27. Miller, S. E. 1969. Integrated Optics: An Introduction. **Bell Syst. Tech. J.**, 48, 2059.

28. Fan, Shanhui, P. R. Villeneuve, and J.D. (1995). Joannopoulos, “Theoretical investigation of fabrication-related disorder on the properties of photonic crystals.” **J. Appl. Phys.**, **78**:1415-1418.
29. Rodriguez. Alejandro, M. Ibanescu, J.D. (2005). Joannopoulos, and Steven G. Johnson. “Disorder immune confinement of light in photonic crystal cavities.” **Opt. Lett.** **30**; 3192-3194.
30. Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Meade, R. D. and Winn, J. N. 2008. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press, 283 p., Princeton.
31. Johnson, S. and Joannopoulos, J. (2001). Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis. **Opt. Express**, **8**(3), 173-190.
32. Üstün, K. 2011. Fotonik kristallerde ışığın yavaşlatılması. Yüksek Lisans Tezi. TOBB Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 61 s., Ankara.
33. Barkou, S. E., Broeng, J., Bjarklev, A., 1998. Dispersion properties of photonic bandgap guiding fibers, pp. 117-119. OFC’98: Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, February 22-27, 1998, San Jose Convention Center, California.
34. Guo, S., Ablin, S., 2003. Simple plane wave implementation for photonic crystal calculations. **Optics Express**, **11**: 167-175.
35. BandSolve (RSoft Design Group) prog.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Pelin ALTINKAYA

Uyruđu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 1 Nisan 1988, Kayseri

Medeni Durumu: Bekâr

Tel: +90 538 430 64 32

email: pelin.altinkaya@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	E.Ü. Fen Fak. Fizik	2011
Lise	Kocasinan Lisesi, Kayseri	2005

YABANCI DİL

İngilizce