ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRÜNÜR BÖLGEDE GEÇİRGEN, RF KALKANLAMA YAPABİLEN ÇOK KATMANLI İNCE FİLM KAPLAMALARININ TASARLANMASI VE SAYISAL HESAPLAMALI ÇÖZÜMLENMESİ

Onur ALPAY

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2019

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Onur ALPAY tarafından hazırlanan "**Görünür Bölgede Geçirgen, RF Kalkanlama Yapabilen Çok Katmanlı İnce Film Kaplamalarının Tasarlanması ve Sayısal Hesaplamalı Çözümlenmesi**" adlı tez çalışması 03/10/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

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

Jüri Üyeleri:

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

Üye : Prof Dr. Asım Egemen YILMAZ,
Ankara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdürü

ETİK

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

03.10.2019



Onur ALPAY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÖRÜNÜR BÖLGEDE GEÇİRGEN, RF KALKANLAMA YAPABİLEN ÇOK KATMANLI İNCE FİLM KAPLAMALARININ TASARLANMASI VE SAYISAL HESAPLAMALI ÇÖZÜMLENMESİ

Onur ALPAY

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Bu tez çalışmasında Gümüş (Ag) ve İterbiyum Florür (YbF_3) kullanılarak oluşturulan metal-dielektrik çok katmanlı PBG yapılarda görünür bölgede geçirgenlik ve radyo frekans (RF) aralığında kalkanlama etkinliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasında ilk olarak farklı kalınlıklardaki Ag filmlerin geçirgenlik ve kalkanlama hesaplamaları üzerinde durulmuştur. İkinci olarak sızma derinliği hesaplamalarıyla yapılacak tasarımlardaki kriterler belirlenmiştir. Son olarak belirlenen kriterler doğrultusunda Essential Macleod optik ince film tasarım programı kullanılarak farklı periyotlarda modeller tasarlanmıştır. Tasarlanan modellerin detaylı karşılaştırmaları yapılarak YbF_3 katmanlar arasına yerleştirilen ince Ag filmlerle oluşturulan periyodik yapılarda periyot sayısının, katman kalınlıklarının, ve malzeme sıralamasının geçirgenlik, yansıma, soğurma ve kalkanlama etkinliği üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Modeller arasında istenilen kalkanlama etkinliğini (43 db) sağlayabilen yapının en yüksek %63,75 geçirgenliğe sahip olduğu görülmüştür.

Haziran 2018, 108 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristaller, metal-dielektrik yapılar, çok katmanlı ince filmler, optik geçirgenlik, RF kalkanlama etkinliği

ABSTRACT

Master Thesis

DESIGN AND NUMERICAL COMPUTING ANALYSIS OF MULTILAYER THIN FILM COATINGS WITH HIGH TRANSPARENT IN VISIBLE SPECTRUM AND RF SHIELDING ABILITY

Onur ALPAY

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

Supervisor: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

In this thesis study, it is aimed to investigate the optical transparency and shielding efficiency of radio-frequency (RF) range in metal-dielectric multi-layer PBG structures formed by using Silver (Ag) and Ytterbium Fluoride (YbF_3). In the thesis, firstly, the transparency and shielding efficiency calculations of Ag films of different thicknesses are emphasized. Secondly, the criteria for the designs to be made with the skin depth calculations were determined. Finally, in accordance with the determined criteria, models were designed in different periods using Essential Macleod optical thin film design program. By making detailed comparisons of the designed models, the effects of period number, layer thicknesses and material order on optical transparency, reflection, absorption and shielding efficiency were observed in periodic structures formed with thin Ag films placed between YbF3 layers. Among the models, the structure which can provide the desired shielding efficiency (43 dB) has the highest transparency of 63.75%.

June 2019, 108 pages

Key Words: Photonic crystals, metal-dielectric structures, multi-layer thin films, optical transparency, RF shielding efficiency

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince her türlü bilgi birikimini benimle paylaşan, akademik olarak gelişmeme yardımcı olan ve çalışmalarımla ilgili beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Barış AKAOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı)

Bu süreçte göstermiş oldukları destek ve anlayış için başta şefim, Kıdemli Lider Mühendis Erkin Utku TURGUT olmak üzere, Optik Üretim bölümüne ve ASELSAN Elektro-Optik Üretim Müdürlüğü'ne

Güzel eşim Mervem'e ve beni yetiştiren aileme teşekkür ederim.

Onur ALPAY
Ankara , Ekim 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
TEŞEKKÜR ..... **iv**
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. KURAMSAL TEMELLER **8**
2.1 Optik Sabitler **8**
2.2 Komplex Kırılma İndisi ve Dielektrik Sabiti **9**
2.3 Optik Sabitlerin Frekansa Bağlılığı **12**
2.3.1 Harmonik osilatör modeli **15**
2.3.2 Drude modeli ve Lorentz nodeli **18**
2.3.3 Drude-Lorentz modeli **22**
2.3.4 Faz hızı ve grup hızı **26**
2.4 Optik İnce Film Teorisi **28**
2.4.1 Transfer matris yöntemi **32**
2.5 Geçirgenlik ve Yansıma **38**
2.6 Fotonik Kristaller **40**
2.7 Fotonik Bant Aralığı Yapısı **42**
2.8 Işığın Metal ve Dielektrik Ortamlarla Etkileşimi **45**
2.9 Sızma Derinliği **47**
2.10 Kalkanlama Teorisi ve RF Kalkanlama Etkinliği (SE) **49**
2.11 İnsan Gözü Hassasiyeti **54**
3. MATERYAL VE YÖNTEM **56**
3.1 Essential Macleod **56**
3.2 Kullanılan Malzemeler **56**
3.3 Metal-Dielektrik Fotonik Kristal Yapı Tasarımı **65**

3.3.1 Tasarım kriterleri 65
3.3.2 Model 1 (4 periyot) 66
3.3.3 Model 2 (5 periyot) 72
3.3.4 Model 3 (6 periyot) 76
3.3.5 Model 4 (7 periyot) 82
4. SONUÇ 84
4.1 Oluşturulan Son Modelin Farklı Programlarda Karşılaştırılması 95
KAYNAKLAR 99
EKLER 102
EK 1 Kullanılan Malzemelere Ait, Macleod ve Optilayer Programlarından Alınan Kırılma İndisleri 103
EK 2 İterbiyum Florür (YbF3) için Macleod ve Optilayer programlarından alınan kırılma indislerinin referans değerlerler karşılaştırılması 106
ÖZGEÇMİŞ 108

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR DİZİNİ

In	İndiyum
Sn	Kalay
Zn	Çinko
Cd	Kadmiyum
Al	Alüminyum
Ag	Gümüş
Au	Altın
Cu	Bakır
YbF_3	İterbiyum Florür
MgF_2	Magnezyum Florür
ZnO	Çinko Oksit
SiO_2	Silisyum Dioksit
TiO_2	Titanyum Dioksit
ZrO_2	Zirkonyum Dioksit
CeF_3	Seryum Florür
m	Metre
cm	Santimetre
nm	Nanometre
µm	Mikrometre
n_e	Taşıyıcı Elektron Sayısı
Ω	Ohm
S	Siemens
dB	Desibel
ε	Dielektrik sabiti
°	Derece
λ_0	Işığın Boşluktaki Dalga Boyu
λ_m	Işığın Ortamdaki Dalga Boyu
ν	Frekans
c	Işık Hızı
V_m	Işığın Ortamdaki Hızı

δ	Sızma Derinliği
n	Kırılma İndisi
$\tilde{n}$	Komplex Kırılma İndisi
n_i	Yoketme Katsayısı
n_o	Işığın Geldiği Ortamın Kırılma İndisi
n_f	İnce Filmin Kırılma İndisi
n_s	Alttaşın Kırılma İndisi
$\emptyset$	Faz Farkı
d	İnce Filmin Fiziksel Kalınlığı
Δ	Optik Yol Farkı
1D	1 Boyut
2D	2 Boyut
3D	3 Boyut
θ	Açı
θ_i	Gelen Işının Yüzeyin Normaliyle Yaptığı Açı
θ_t	Film Ortamında İlerleyen Işının Yüzeyin Normaliyle Yaptığı Açı
$\vec{E}$	Elektrik Alan Vektörü
E_0	Elektrik Alan Büyüklüğü
$\vec{B}$	Manyetik Alan Vektörü
E_0	Manyetik Alan Büyüklüğü
$\vec{J}$	Akım Yoğunluğu
ρ	Serbest Yük Yoğunluğu
ε_0	Boş Uzayın Dielektrik Sabiti
μ_0	Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği
η_0	Boş Uzayın Empedansı
π	Pi Sayısı
M	Transfer Matris
t	Geçirgenlik Katsayısı
r	Yansıtma Katsayısı
T	Geçirgenlik
R	Yansıtıcılık
A	Soğurma

Kısaltmalar

RKA	Radar Kesit Alanı
EM	Elektromanyetik
TCO	Saydam İletken Oksit
ITO	İndiyum Kalay Oksit
SE	Kalkanlama Etkinliği
RF	Radyo Frekansı
MD	Metal-Dielektrik
MS	Metal-Yarı İletken
PBG	Fotonik Bant Aralığı
MD-PBG	Metal-Dielektrik Fotonik Bant Aralığı
SD	Sızma Derinliği
IR	Kızılötesi
FC	Fotonik Kristaller
EM	Essential Macleod

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Soğurma mekanizması 9
Şekil 2.2 Bağlı elektronların bantlar arası geçişinin şematik gösterimi 13
Şekil 2.3 Yalıtkan, yarıiletken ve metaller için bant yapıları 14
Şekil 2.4 Dış elektrik alan etkisi altında elektronun harmonik osilasyonu 15
Şekil 2.5 Altın için Drude modelinde elde edilen sonuç (kesikli çizgi) ve ölçülen sonuç (düz çizgi) (Palik, E. D. 1985). 19
Şekil 2.6 Altındaki bağlı elektronların elektrik geçirgenliğe katkısı. Kullanılan parametreler; $\omega_1 = 4.55\text{x}10^{15}\ \text{s}^{-1}$, $\gamma = 9.10x10^{16}\ \text{s}^{-1}$, $\omega_0 = 4.19\text{x}10^{17}\ \text{s}^{-1}$ (450nm) 20
Şekil 2.7 Komplex dielektrik fonksiyonun bileşenleri a) Metaller Drude modeliyle, b) Dielektrikler Lorentz modeliyle açıklanmıştır 22
Şekil 2.8 Altının hem serbest elektrondan hem de tek bir bantlar arası geçişten gelen katkı göz önüne alındığında, Drude-Lorentz modeli (kesikli çizgi) tarafından hesaplanan ve ölçülen elektrik geçirgenliği değerleri (düz çizgi) karşılaştırılmıştır 24
Şekil 2.9 Alüminyum için 200nm ve 1200nm arasındaki dalga boylarına karşılık gelen gerçek (a) ve sanal(b) kısımlar. Bantlar arası geçişlerin birinci, ikinci ve üçüncü etkisi 25
Şekil 2.10 Gümüşün elektrik geçirgenlik değerleri ve ona karşı gelen kırılma indisleri 26
Şekil 2.11 Faz Hızı ve Grup Hızının Gösterimi 27
Şekil 2.12 Kırılma indisinin dağınım bağıntısı ile gösterilmesi 27
Şekil 2.13 Ortamdaki birincil ve ikincil dalgaların etkileşiminin frekansa göre değişimi 28
Şekil 2.14 İnce film yüzeyinde oluşan yansıma ve geçirgenlik (Pedrotti vd. 1993) 29
Şekil 2.15 İnce film yüzeyinde oluşan yansıma ve geometrik optik yol farkı (Pedrotti vd. 1993) 31
Şekil 2.16 Tek katmanlı ince filmde ışının yansıması ve kırınımı (Pedrotti vd. 1993) .. 34
Şekil 2.17 Çok katmanlı (N) ince film yapısının şematik gösterimi (Sarto vd. 2003) 38
Şekil 2.18 1 Doğada bulunan fotonik kristal örnekleri 41
Şekil 2.19 Bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristal örnekleri 42
Şekil 2.20 1 boyutlu fotonik kristal bant yapısı. (Joannopoulos vd. 2008) 43
Şekil 2.21 Her biri 0.5a genişliğinde katmanlara sahip üç farklı çok katmanlı film için gösterilen fotonik bant yapıları 44
Şekil 2.22 PBG yapısının frekansa karşı iletim grafiği (Scalora vd. 1997). 45

Şekil 2.23 Dielektrik ortamda ilerleyen dalga 46
Şekil 2.24 İletken ortamda ilerleyen dalga..... 47
Şekil 2.25 İletken ortamda ilerleyen dalga..... 47
Şekil 2.26 Metal içinde ilerleyen ışığın sızma derinliği..... 48
Şekil 2.27 Elektromanyetik alanın kalkanlama yapılarak azaltılması 50
Şekil 2.28 ASTM D4935-10 standardına göre sonlu, düzlem yüzeylerin elektrik ve manyetik alan için kalkanlama yapılabildiği frekans aralıkları..... 51
Şekil 2.29 Radarlarda kullanılan frekans ve dalga boyu bantları..... 53
Şekil 2.30 İnsan gözünün hassasiyeti..... 55
Şekil 3.1 Gümüş için kırma indislerinin karşılaştırılması a) Literatür bilgisi, b) Essential Macleod programı kütüphanesi 57
Şekil 3.2 İterbiyum Florür için kırma indislerinin karşılaştırılması a) Literatür bilgisi, b) Essential Macleod programı kütüphanesi 57
Şekil 3.3 Tek katman 80,78 nm YbF_3 geçirgenlik grafiği..... 59
Şekil 3.4 Ag kalınlığına göre iletkenlik değişimi 60
Şekil 3.5 Ag kalınlığına göre kalkanlama etkinliği değişimi..... 61
Şekil 3.6 10 nm Ag görünür dalgaboyu aralığında geçirgenlik ve yansıtma grafiği 61
Şekil 3.7 17 nm Ag görünür dalgaboyu aralığında geçirgenlik ve yansıtma grafiği 62
Şekil 3.8 63 nm Gümüş'ün görünür dalgaboyu aralığında geçirgenlik ve yansıtma grafiği 62
Şekil 3.9 400 nm Gümüş'ün görünür dalgaboyu aralığında geçirgenlik ve yansıtma grafiği 63
Şekil 3.10 Son katmanı değiştirilen, 4 periyotlu MD-PBG yığının geçirgenlik grafiği 64
Şekil 3.11 4 periyot ilk adım katman kalınlıkları..... 67
Şekil 3.12 4 periyot ilk adım geçirgenlik grafiği 67
Şekil 3.13 4 periyot ikinci adım geçirgenlik grafiği 68
Şekil 3.14 4 periyot üçüncü adım geçirgenlik grafiği 69
Şekil 3.15 4 periyot 4 periyot dördüncü adım katman kalınlıkları (Yüksek Geçirgenlik)..... 69
Şekil 3.16 4 periyot dördüncü adım geçirgenlik grafiği (Yüksek Geçirgenlik)..... 70
Şekil 3.17 4 periyot birinci adım (Standart Başlangıç) ve dördüncü adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği 70
Şekil 3.18 4 periyot altınca adım katman kalınlıkları (~43 dB kalkanlama etkinliği) 71
Şekil 3.19 4 periyot dördüncü (Yüksek Geçirgenlik) ve beşinci (~43 dB kalkanlama etkinliği) adımların karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği 72

Şekil 3.20 5 periyot birinci adım katman kalınlıkları 73
Şekil 3.21 5 periyot birinci adım geçirgenlik grafiği 73
Şekil 3.22 5 periyot ikinci adım katman kalınlıkları (Yüksek Geçirgenlik) 74
Şekil 3.23 5 periyot ikinci adım geçirgenlik grafiği (Yüksek Geçirgenlik) 74
Şekil 3.24 5 periyot standart başlangıç ve ikinci adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği 75
Şekil 3.25 5 periyot üçüncü adım katman kalınlıkları (~43 dB Kalkanlama Etkinliği) . 76
Şekil 3.26 5 periyot ikinci adım (Yüksek Geçirgenlik) ve üçüncü adım (~43 dB kalkanlama etkinliği) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği 76
Şekil 3.27 6 periyot birinci adım katman kalınlıkları 77
Şekil 3.28 6 periyot birinci adım geçirgenlik grafiği 77
Şekil 3.29 6 periyot ikinci adım katman kalınlıkları (Yüksek Geçirgenlik) 78
Şekil 3.30 6 periyot ikinci adım geçirgenlik grafiği (Yüksek Geçirgenlik) 78
Şekil 3.31 6 periyot standart başlangıç ve ikinci adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği 79
Şekil 3.32 6 periyot standart başlangıç ve ikinci adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği 80
Şekil 3.33 6 periyot üçüncü adım katman kalınlıkları (~43 dB Kalkanlama Etkinliği) 81
Şekil 3.34 6 periyot birinci (Yüksek Geçirgenlik) ve üçüncü (~43 dB Kalkanlama Etkinliği) adımların karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği 81
Şekil 3.35 7 periyot katman kalınlıkları (Yüksek Geçirgenlik, >43 dB Kalkanlama Etkinliği) 82
Şekil 3.36 7 periyot birinci adım geçirgenlik grafiği 83
Şekil 3.37 7 periyot standart başlangıç ve birinci adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği 83
Şekil 4.1 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması 86
Şekil 4.2 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait yansıma grafiklerinin karşılaştırılması 87
Şekil 4.3 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait soğurma grafiklerinin karşılaştırılması 87
Şekil 4.4 Modellerin 43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliği sağladığı durumuna ait geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması 90
Şekil 4.5 43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliği sağladığı durumuna ait yansıma grafiklerinin karşılaştırılması 90
Şekil 4.6 43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliği sağladığı durumuna ait soğurma grafiklerinin karşılaştırılması 91

Şekil 4.7 43 dB kalkanlama etkinliği sağlayan model 3'ün düşük yansıma sağlayan katman kalınlıkları 92
Şekil 4.8 Model 3 düşük ve yüksek yansıtıcı durumların geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması 93
Şekil 4.9 Model 3 düşük ve yüksek yansıtıcı durumların yansıma grafiklerinin karşılaştırılması 94
Şekil 4.10 Model 3 düşük ve yüksek yansıtıcı durumların soğurma grafiklerinin karşılaştırılması 94
Şekil 4.11 Gümüş için n ve k değerlerinin Macleod ve OptiLayer programlarından alınan değerlerin referans değerlerle karşılaştırılması 96
Şekil 4.12 İterbiyum Florür için n ve k değerlerinin Macleod ve OptiLayer programlarından alınan değerlerin referans değerlerle karşılaştırılması 97
Şekil 4.13 Macleod programında geliştirilen nihai tasarımın OptiLayer programıyla karşılaştırılması 98

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Soy metallerin elektrik özellikleri ve plazma frekansları 21
Çizelge 2.2 Soy metallerin elektrik özellikleri ve plazma frekansları 23
Çizelge 3.1 Bazı metallerin iletkenliklerinin karşılaştırılması 58
Çizelge 3.2 Farklı kalınlıklardaki metal filmlerin iletkenlik ve kalkanlama etkinliği değerleri 59
Çizelge 3.3 400-700 nm aralığındaki ışığın Ag katman içindeki sızma derinlikleri 65
Çizelge 4.1 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait geçirgenlik, yansıma ve soğurma yüzdeleri 84
Çizelge 4.2 Modellerin 43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliği sağladığı durumuna ait geçirgenlik, yansıma ve soğurma değerleri 88
Çizelge 4.3 Modellerin 43 dB kalkanlama etkinliği sağlayan model 3'ün yüksek ve düşük yansıma değerleri 92

1. GİRİŞ

İkinci Dünya Savaşının son yıllarına doğru tepkili motorların icadı ile başlayan teknoloji devrimi, 20. yüzyılın ikinci yarısına damgasını vurmuş ve 21. yüzyılı adeta havacılık asrına çevirmiştir. Nükleer teknolojiler, bilgisayar teknolojileri, akıllı füze sistemlerinin aerodinamik teknolojisi ile birlikte dördüncü nesil savaş uçakları yerini beşinci nesil uçaklara bırakmıştır. Savaş uçaklarının hiç radar izi bırakmadan ilerlemesi arzu edilir. Radara yakalanmamak için alçak uçuş yapmak veya düşman radarlarının elektronik karıştırıcılarla bastırılması çözüm değildir ve düşmana bir saldırıya uğrayacağı haberini sızdırmaktadır. Beşinci nesil uçakların kuyruk, kanat, hava girişi gibi gövde ek yerlerinde ve özellikle kanopilerinde radar izinin azaltılması için çok yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Singh ve Jha 2015).

Kokpit uçağın radar tarafından görünürlüğünü en fazla arttıran kaynaklardan biridir. Kokpit içerisinde birçok gösterge/ekran radyo frekans (RF) sinyallerini yansıtmaktadır ve uçağın radar kesit alanını arttırmaktadır. Standart kanopi radar sinyallerinin geçmesine izin vermektedir. Radar kesit alanını azaltmak için uygulanan en etkin yöntemlerden biri radar dalgasının kokpite girmesini engellemektir. Kanopinin metal ile kaplanması radar dalglarının kokpite girmesini engellemede kullanılan yöntemlerden birisidir. Kokpit içi yansımaları en aza indirmek için kanopi, uçağın tasarımı ile hassas bir şekilde bütünleştirilmelidir (Uçar 2013).

Sözü edilen bu kaplamalar için transparan iletken ince filmler (TCO) tercih edilmektedir. TCO'lar sahip oldukları yüksek elektrik iletkenliğinin yanında görünür dalgaboyu aralığında da (400-700 nm) yüksek geçirgenlik gösterirler. Bu özelliklerinden dolayı birçok elektronik ve optik uygulamada kullanılmaktadırlar. En çok üzerinde çalışılan TCO'lar İndium (In), Kalay (Sn), Çinko (Zn) ve Kadmiyum (Cd) üzerine temellenmektedir (Granqvist ve Hultaker 2002, Ohta vd. 2003, Medvede 2007, Zhou ve Exarhos 2007, Granqvist 2007, Ginley vd. 2011).

İndiyum kalay oksit (ITO) 50 yılı aşkın bir süredir araştırılmaktadır. ITO optik ve elektriksel performansı nedeniyle gösterge teknolojilerinden dokunmatik ekranlara

kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak ITO'nun pahalı bir malzeme olmasının yanında elektriksel ve optik özelliklerinin taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olması ve yapı kusurları gibi durumlar nedeniyle belirgin bir kaplama prosesine sahip değildir. Bunun yanında, birlikte kaplandığı metal tabakalarda zamanla oksitlenmeye neden olarak yapının, elektriksel ve optik özelliklerin bozulmasına neden olabilmektedir (Scott vd. 1996).

Granqvist ve Hultaker (2002), farklı taşıyıcı yoğunluğuna ($10^{20} < n_e < 3^{*}10^{21}$ cm^{-3}) sahip olacak şekilde 5 farklı ITO örnek üretmiş ve eşit kalınlıkta (0.2 μm), cam alttaşlar üzerine büyütmüş. Taşıyıcı yoğunluğunun optik performansı etkilediğini görmüşler. Örneklerin, spektrumun 175 nm-50 μm (UV-FIR) aralığında alınan ölçümleri sonucunda taşıyıcı yoğunluğundaki artışın iletim bandının genişliğini azalttığını ve yansımayı arttırdığını gözlemlemiştir.

Klöppel vd. (1999), DC-magnetron sputter yöntemiyle, sputter ortamındaki oksijen miktarını değiştirerek (%0, %3.75 ve %7.5) 50 nm kalınlığında tek katman ITO örnekler üreterek oksijen miktarındaki artışının ITO'nun geçirgenliğini 400 nm-2.5 μm dalgaboyu aralığında %20 arttırdığı gözlemlemiştir.

Izumi vd. (2002) plastik alttaş üzerine, 0.5 μm kalınlıkta ITO üretmiş ve plastik alttaş üzerinde elde edilen en düşük direnç değerini ölçmüştür ($1.3 * 10^{-4}$ Ω.cm).

Sarto vd. (2003), Izumi vd. (2002) yaptığı çalışmanın kalkanlama etkinliğini (SE) radyo frekans (RF) aralığında 33 dB olarak ölçmüştür.

Bir yapının kalkanlama etkinliği o yapının iletkenliğiyle sınırlanır. Bu nedenle kalkanlama etkinliğini arttırmanın en etkin yolu kalın metal filmler kullanmaktır. Metaller birçok dalgaboyunu oldukça iyi bir şekilde yansıtırlar ve yansıtamadıklarını soğurma eğilimi gösterirler. Bu yüzden metaller elektromanyetik dalgalar için kalkanlama ve korunma amacıyla kullanılırlar.

Scalora vd. (1997), cam alttaşlar üzerine kaplanmış, tek katman ve kalınlıkları farklı (40 nm, 90 nm ve 200 nm) Gümüş (Ag) filmlerin görünür bölgedeki geçirgenliklerini karşılaştırmıştır. 550 nm dalgaboyunda 40 nm kalınlıktaki örneğin geçirgenliği %7, 90 nm'de %0,003 ve 200 nm'de %0 ölçmüştür. Artan metal kalınlığına bağlı olarak, görünür dalgaboyu aralığında daha az ışığın metal katmanı geçebildiğini gözlemlemiştir.

Bloemer ve Scalora (1998), cam alttaşlar üzerine kaplanmış, tek katman ve kalınlıkları farklı (40 nm, 78 nm, 92 nm ve 114 nm) Gümüş (Ag) filmlerin görünür bölgedeki geçirgenliklerini karşılaştırmıştır. 550 nm dalgaboyunda, 40 nm kalınlıktaki örneğin geçirgenliği %7 civarındayken, kalınlığın giderek artmasıyla geçirgenliğin %1'in altına indiğini gözlemlemiştir.

Sarto ve Voti (2005), 68 nm kalınlığında tek katman Gümüş'ün (Ag) kalkanlama etkinliğini 43 dB üzerinde ölçmüştür.

Işık, kalın bir metal film tabakasından tamamen yansıtılmadan önce metal içinde çok az bir mesafe kat etmektedir. Bu mesafeye sızma derinliği (δ) denir. Sızma derinliği, gelen ışığın dalga boyuna (λ_0) ve metalin kırılma indisinin sanal kısmına (n_i) bağlıdır.

Scalora vd. (1997), elektromanyetik dalgaların kuantum tünelleme etkisi düşünülerek 1D fotonik kristallerde, daha kalın olan dielektrik katmanlar arasına tek parça, kalın metal filmi ince filmler şeklinde yerleştirerek, yüksek ve düşük kırılma indisine sahip metal ve dielektrik malzemelerin bir biri ardına sıralandığı periyodik, fotonik bant aralığı (MD-PBG) yapıları oluşturmuştur. Sızma derinliğinden daha düşük kalınlıktaki ince metal filmlerle oluşturulan bu yapılar sayesinde ışığın çok katmanlı yapılar içerisinde ilerlemesi sağlanmıştır.

Yapıdaki toplam metal kalınlığı, ışığı geçirmeyen ve kalkanlama etkinliği yüksek, tek katman bir metalle eşit miktardadır. Buna rağmen yüzeye gelen ışığın büyük bir miktarı yapı için ilerleyebilmektedir.

Eklenen metal katmanlar yapıdaki dielektrik ya da yarı iletken katmanları kısa devre ederek metal-dieletrik (MD) veya metal-yarı iletken (MS) PBG yapının iletkenliğini arttıracaktır. Bu yapıda en umut vadeden durum ITO'nun yerini alabilecek olmasıdır. Metal katmanlar üzerinden iletilen akım sayesinde *aktif kalkanlama* yapılarak, RF kalkanlama etkinliği elde edilebilmektedir.

Scalora vd. (1997), Gümüş (Ag) ve Magnezyum Florür'den (MgF_2) oluşan, farklı kalınlık ve periyotlarda, bir boyutlu fotonik kristal yapılı örnekler üretmiş ve örneklerin görünür bölgede geçirgenlik özelliklerini incelemiştir. Birinci örnek 4 periyotlu, Ag (10 nm)/MgF_2 (110 nm) kaplanmış (toplam Ag kalınlığı 40 nm) ve iletim bandı 300 nm–700 nm aralığında gözlemlenmiş, maksimum %70 geçirgenlik elde edilmiş. İkinci örnek, 20 periyotlu Ag (10 nm)/MgF_2 (140 nm) kaplanmış (toplam Ag kalınlığı 200 nm) ve iletim bandı 400 nm–750 nm aralığında gözlemlenmiş, maksimum %35 geçirgenlik elde edilmiştir. Üçüncü örnek, 3 periyotlu Ag (30 nm)/MgF_2 (140nm) kaplanmış (toplam Ag kalınlığı 92 nm) ve iletim bandı 500 nm–650 nm aralığında gözlemlenerek maksimum %50 geçirgenlik elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda toplam metal film kalınlığının geçirgenliği etkilediği ve dielektrik film kalınlıklarının geçirgenlik bandının konumunu değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Bloemer ve Scalora (1998), Gümüş (Ag) ve Magnezyum Florür'den (MgF_2) oluşan, farklı kalınlık ve periyotlarda, bir boyutlu fotonik kristal yapılı örnekler üretmişler ve örneklerin görünür bölgede geçirgenlik özelliklerini incelemiştir. Her örneğin en üst katmanı olarak, içerdiği MgF_2 katman kalınlıklarının yarısı kadar MgF_2 eklenmiştir. Bu durumun geçirgenliği %15 civarında arttırdığı belirtilmiştir. Birinci örnek, 3 periyotlu Ag (38 nm)/MgF_2 (233nm) kaplanmış (toplam Ag kalınlığı 114 nm) ve iletim bandı 725–850 nm aralığında gözlemlenerek mak. %23 geçirgenlik elde edilmiştir. İkinci örnek, 3 periyotlu Ag (26 nm)/MgF_2 (140 nm) kaplanmış (toplam Ag kalınlığı 78 nm) ve iletim bandı 500–700 nm aralığında kaydırılmış, maksimum %55 geçirgenlik elde etmişlerdir. Üçüncü örnekte 4 periyotlu Ag (23 nm)/MgF_2 (140 nm) kaplanmış (toplam Ag kalınlığı 92 nm) ve iletim bandı 450–650 nm aralığında gözlemlenerek mak. %55 geçirgenlik elde edilmiş. Çalışmanın sonucunda toplam metal film kalınlığının

geçirgenliği etkilediği ve dielektrik film kalınlıklarının geçirgenlik bandının konumunu ayarladığı gözlemlenmiştir.

Sarto vd. (2003), Gümüş (Ag) ve Çinko Oksit'ten (ZnO) oluşan farklı kalınlık ve periyotlarda, bir boyutlu fotonik kristal yapılı örnekler üretmişler ve örneklerin görünür bölgede geçirgenlik ve RF kalkanlama özelliklerini incelemiştir. Örneklerdeki Ag ve ZnO kalınlıklarını ve yerleşimlerini değiştirerek 30 MHz-1 GHz frekansları arasında 35-42 dB kalkanlama etkinliği ve görünür bölgede maksimum %60 geçirgenlik elde edilmiş. Son katmanda bulunan ZnO kalınlığının yarıya indirilmesinin salınımı azaltıp geçirgenliği arttırdığı, toplam ZnO kalınlığının iletim bandının konumunu ayarladığı ve toplam Ag kalınlığındaki azalmanın geçirgenliği arttırırken kalkanlama etkinliğini azalttığı anlaşılmış.

Sarto ve Voti (2005), Gümüş (Ag) ve Titanyum Dioksit'ten (TiO_2) oluşan, farklı kalınlık ve eş periyotta, bir boyutlu fotonik kristal yapılı örnekler üretmişler ve örneklerin görünür bölgede geçirgenlik ve RF kalkanlama özelliklerini incelemiştir. Her örneğin toplam Ag kalınlığı 68 nm'dir. İlk iki örnekte Ag katman kalınlıkları eşit tutularak, TiO_2 katman kalınlıkları arttırılmıştır. Dielektrik malzeme kalınlığındaki artışın iletim bandını yüksek dalga boylarına doğru kaydırdığı gözlemlenmiştir. Üçüncü örnekte, birinci örneğe göre, en dış katmanda bulunan Ag kalınlığı 5 nm arttırılıp, alttaşa yakın olanlar 5 nm azaltılmıştır. Ayrıca TiO_2 katman kalınlıkları 3'de 1 oranında azaltılmıştır. Beklendiği gibi dış katmandaki Ag kalınlığının artışı geçirgenliği %10 oranında düşürdüğü, TiO_2 katman kalınlıklarının azaltılmasının iletim bandını düşük dalga boylarına kaydırdığı gözlemlenmiştir. İkinci örneğin kalkanlama etkinliği (SE) 30 MHz-6 GHz frekans aralığında 40 dB olarak ölçülmüştür.

Sangram vd. (2014), Gümüş (Ag) ve Silisyum Dioksit (SiO_2) malzemelerinden oluşan, farklı kalınlık ve periyodlarda, bir boyutlu fotonik kristal yapılı örnekler üretmişler ve örneklerin görünür bölgede soğurma, geçirgenlik ve açı bağımlı yansıtıcılık özelliklerini incelemişlerdir. Örneklerin, kendi periyodik düzeni içinde metal ve dielektrik kalınlıkları sabit tutulmuştur. Metal kalınlığının sızma derinliğinden daha kalın olduğunda ya da metal kalınlığı sabit tutulup periyod sayısı arttırıldığında, ışığın

geçirgenliğinin görünür bölgede oldukça düştüğü gözlemlenmiştir. Toplam metal kalınlığındaki az miktarda değişimin soğurma üzerinde büyük bir değişikliğe neden olmadığı tespit edilmiştir. Artan dielektrik malzeme kalınlığının iletim bandını yüksek dalga boylarına doğru kaydırdı gözlemlenmiştir. İnce film yüzeyine gelen ışığın yüzeyin normaliyle yaptığı açının 15°'nin üzerine çıktığında görünür bölgede yansıtıcılığın %80'in üzerine çıktığı belirlenmiştir.

Yu vd. (2004), Gümüş (Ag) ve Magnezyum Florür (MgF_2) malzemelerinden oluşan, periyodlarda, bir boyutlu fotonik kristal yapılı örnekler üretmişler ve örneklerin görünür ve kızılötesi (IR) gölgede bölgede soğurma özelliklerini incelemişlerdir. 80 nm kalınlığın tek parça Ag kalın filmin görünür bölgede %4 soğurma yaptığı ölçülmüştür. Malzeme kalınlıkları sabit tutularak (12 nm Ag ve 120 nm MgF_2) oluşturulan 1D MD-PGB 4 ve 8 periyotlu örneklerin %20-%30 ve %40-%50 soğurma yaptığı ölçülmüştür. Periyod sayısındaki artışın 1D MD-PBG yapıda soğurmayı arttırdığı gözlemlenmiştir.

Zhang vd. (2011), Gümüş (Ag) ve Magnezyum Florür (MgF_2) malzemelerinden oluşan, periyodik ve bir boyutlu fotonik kristal yapılı örnekler üretmişler ve örneklerin görünür bölgede soğurma özelliklerini incelemişlerdir. A örneği periyodik düzende oluşturulmuştur (minimum soğurma %15 ve maksimum soğurma %58). En üst katmanda bulunan MgF_2 kalınlığı yarıya indirilerek örnek B ve en alt katmanda bulunan Ag kalınlığı 5 katına çıkarılarak örnek C oluşturuluyor. Sonuçlar B örneğine yansıma önleyici özellik eklendiğini ve soğurmanın A örneğine göre min. %12,1 ve maksimum %33,3 oranında arttığını, C örneğine ise yansıtıcı özellik eklendiğini ve soğurmanın A örneğine göre min. %50,0 ve maksimum %50,7 oranında arttığını göstermektedir. Çalışmada A örneği (100 periyot) ve C örneği (50 periyot) karşılaştırılmıştır. Periyodik yapıda toplam metal kalınlığı artışının görünür bölgede soğurmayı %80 üzerine, ilk Ag katmanının kalınlığı artışının soğurmayı görünür bölgede soğurmayı %90 üzerine, periyot sayısı daha düşük olsa bile, çıkardığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı hem görünür bölgede yüksek geçirgen hem de RF kalkanlama yapabilen çok katmanlı ince film kaplamaların geliştirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda metal ve dielektrik malzemeler kullanılarak istenilen şartları sağlayan

çok katmanlı ince film yapıların tasarlanması planlanmıştır. Bu plan doğrultusunda, Gümüş (Ag) ve İterbiyum Florür (YbF_3) kullanılarak 1 boyutlu Metal-Dielektrik fotonik kristal yapılar tasarlanmıştır. Tasarımlar için "Essential Macleod" optik ince film yazılımı kullanılmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda sistemin periyod sayısı ve katman kalınlıkları optimize edilerek en uygun tasarım belirlenmiştir. Çalışmanın bu alandaki bilginin zenginleştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Optik Sabitler

Boşlukta ilerleyen ışının her hangi bir ortamla etkileşimi basitçe yansıma, iletim ve soğurma olarak verilebilir. Yansıma (R) yüzeyden yansıyan ışın miktarının gelen ışın miktarına oranı olarak tanımlanır. İletim (T) ise iletilen ışın miktarının gelen ışın miktarına oranı olarak tanımlanır. Eğer ortamda saçılma yoksa enerjinin korunumu ilkesi gereği

$$R + T + A = 1 \tag{2.1}$$

olmalıdır. Işının ortamda ilerleyişi ortamın kırılma indisiyle (n) tanımlanır. Kırılma indisi, ışığın boş uzaydaki hızının c ortamdaki hızına v_m oranıdır.

$$n = \frac{c}{v_m} \tag{2.2}$$

Soğrulma, ortamda birim uzunlukta soğrulan ışık miktarının bir kesri olarak tanımlanır. Eğer ışık z doğrultusunda ilerliyorsa, herhangi bir z pozisyonundaki şiddeti $I(z)$ ile tanımlanır. Işık şiddetinin z doğrultusunda dz kadar küçük mesafelerde azalması

$$-\frac{dI(z)}{dz} = \alpha I(z) \tag{2.3}$$

olarak verilir. Eşitlik 2.3'ün integrali alınırsa Beer Yasası elde edilir.

$$I_t = I_0 e^{-\alpha l} \tag{2.4}$$

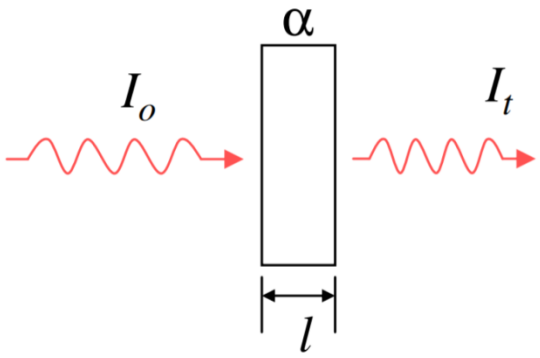
I_0 gelen ışığın şiddeti, I_t malzemeden çıkan ışığı şiddeti, l malzeme kalınlığı ve α soğurma katsayısıdır. Bu durumda ışığın ortamda soğurulması soğurma katsayısına ve

malzemenin kalınlığına bağlıdır (Şekil 2.1). Bir ortamın soğurması optik yoğunlukla da (O.D.) verilebilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$O.D. = -\log_{10}\left(\frac{I(l)}{I_0}\right) \tag{2.5}$$

l, ortamda oluşan soğurma uzunluğudur. Eşitlik 2.4'ten de görüldüğü üzere optik yoğunluk soğurma katsayısına bağlıdır (Fox, 2001).

$$O.D. = \frac{\alpha l}{\log_e(10)} = 0{,}434\alpha l \tag{2.6}$$



Şekil 2.1 Soğurma mekanizması

2.2 Komplex Kırılma İndisi ve Dielektrik Sabiti

Ortam yüzeyindeki yansıma ve ortamdaki soğrulma komplex kırılma indisi adı verilen bir büyüklüğü bağlıdır. ($\tilde{n}$) sembolü ile gösterilir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\tilde{n} = n + in_i \tag{2.7}$$

Eşitliğin gerçek kısmı, n, eşitlik 2.2'de verilen kırılma indisidir. Sanal kısmı olan n_i ise yok etme katsayısı olarak bilinir ve doğrudan soğurma katsayısıyla ilişkilidir. Bu ilişki komplex kırılma indisine sahip bir ortamda ilerleyen dalga düzlem elektromanyetik

dalga kullanılarak türetilebilir. z doğrultusunda ilerleyen, konum ve zaman bağımlı elektromanyetik dalga

$$\vec{\mathrm{E}}(z,t) = \vec{\mathrm{E}}_0 e^{i(\vec{k}\vec{z}-\omega t)} \tag{2.8}$$

eşitliği ile ifade edilir. $\vec{k}$, dalga vektörü ve ω ise açısal frekanstır. Soğurma yapmayan bir ortamda ilerleyen ışığın dalga boyu (λ_m), boş uzayın dalga boyunun ve ortamın kırılma indisine oranına ($\lambda_m = \lambda_0/n$) eşittir. Bu sayede ortama ait dalga vektörü

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0/n} = n\frac{\omega}{c} \tag{2.9}$$

eşitliği şeklinde yazılabilir. Bu durum komplex kırılma inişi için yazılırsa dalga vektörü için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$k = \tilde{n}\frac{\omega}{c} = (n + in_i)\frac{\omega}{c} \tag{2.10}$$

Elde edilen dalga vektörü eşitlik 2.8'de verilen düzlem elektromanyetik dalga denkleminde yerine yazılırsa

$$\vec{\mathrm{E}}(z,t) = \vec{\mathrm{E}}_0 e^{i(\omega\tilde{n}z/c-\omega t)} = \vec{\mathrm{E}}_0 e^{-n_i\omega z/c} e^{i(\omega nz/c-\omega t)} \tag{2.11}$$

Eşitliği elde edilir. Eşitliğin $e^{-n_i\omega z/c}$ kısmı dalganın ortam içinde exponansiyel bir azalmayla ilerleyeceğini belirtir. Ortamda ilerleyen ışığın yoğunluğu I, EE^* ile orantılıdır. Bu durumdan anlaşılacağı üzere ışık yoğunluğunun ortamdaki exponansiyel düşüşü $2x$ $(n_i\omega/c)$ eşittir. Bu aynı zamanda soğurma katsayısıdır.

$$\alpha = \frac{2n_i\omega}{c} = \frac{4\pi n_i}{\lambda_0} \tag{2.12}$$

Bu eşitlik soğurma katsayısının ortamın kırılma indisine ait yok etme katsayısıyla ilişkili olduğunu göstermektedir.

Elektromanyetik dalgaya ait faz hızı aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\frac{1}{v} = \sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r} \tag{2.13}$$

μ_0 boş uzayın manyetik geçirgenliği, ε_0 boş uzayın dielektrik sabiti, μ_r bağıl manyetik geçirgenlik ve ε_r bağıl dielektrik sabiti. Boş uzayda $\mu_r = \varepsilon_r = 1$'dir. Bu durumda eşitlik 2.13 ışık hızına eşit olur.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} = 2{,}998x10^8\ m\ s^{-1} \tag{2.14}$$

Ancak herhangi bir ortama giren ışık için hız (v_m),

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} c \tag{2.15}$$

eşitliğiyle verilir. Optik frekanslarda $\mu_r = 1$ kabul edilir ve eşitlik 2.2'de kırılma indisini c ve v_m'e bağlı olduğu eşitlikte yerine yazılırsa

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \tag{2.16}$$

elde edilir. Bu durum elektromanyetik dalganın ortamda ilerlemesinin dielektrik sabitlere bağlı olduğunu gösterir. Eğer kırılma indisi komplex bir sayı olursa bu durumda bağıl dielektrik sabiti de komplex sayı olmak zorundadır. Bu durumda komplex bağıl dielektrik sabiti $\tilde{\varepsilon_r}$ aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\tilde{\varepsilon_r} = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \tag{2.17}$$

Eşitlik 2.16'dan da anlaşılacağı üzere komplex bağıl dielektrik sabiti, komplex kırılma indisinin karesine eşittir. Eşitlik üzerinden her iki büyüklüğün gerçek ve sanal kısımları eşitlenirse kırılma indisi ve yok etme sabitinin dielektrik katsayılarla ilişkisi elde edilmiş olur.

$$\varepsilon_1 = n^2 - {n_i}^2 \quad ve \quad \varepsilon_2 = 2nn_i \tag{2.18}$$

ya da

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\varepsilon_1 + ({\varepsilon_1}^2 + {\varepsilon_2}^2)^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad ve \quad n_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(-\varepsilon_1 + ({\varepsilon_1}^2 + {\varepsilon_2}^2)^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.19}$$

Eğer ortam soğurması oldukça zayıfsa, n_i oldukça küçük olacaktır. Eşitlik 2.18 tekrar düzenlenerek aşağıdaki eşitlikler elde edilir (Fox, 2001).

$$n = \sqrt{\varepsilon_1} \quad ve \quad n_i = \frac{\varepsilon_2}{2n} \tag{2.20}$$

2.3 Optik Sabitlerin Frekansa Bağlılığı

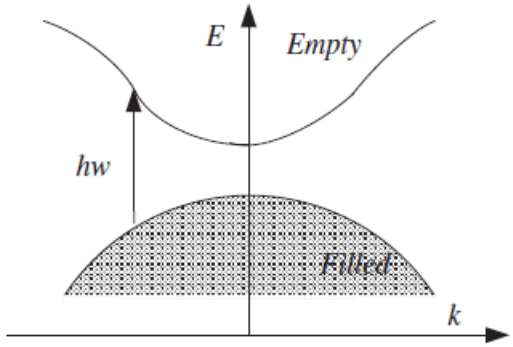
Metallerin ve dielektriklerin optik tepkileri arasındaki fark plazmonik cihazların tasarımı için temel unsurlar olmalarını sağlarlar. Metaller, ışık madde etkileşimiyle ortaya çıkan özellikleri nedeniyle nano yapılara dahil edilirler. Serbest elektronlar ve bağlı elektronlar için teori modelini izleyen metallerin optik performansı, nano boyutta plazmonik malzemelerin gerçekleştirilmesi yaklaşımını izler

Katı malzemelerin optik özelliklerini araştırmak için metaller ve yarı iletkenler içindeki iletken elektronlardan başlanır. Ortam içerisinde iletkenlik elektronları ve bantlar arası geçiş elektronları vardır. İletim elektronları, metaller içerisinde serbestçe hareket ederler, oysa bantlar arası geçiş elektronları, yalnızca bant aralığı enerjisinden daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar tarafından uyarılabilir. Her ikisi de metallerin optik özelliklerini tanımlayan elektrik ve manyetik geçirgenlik gibi karmaşık dielektrik fonksiyonları belirler.

İletim elektronları temel olarak metal ortam içindeki serbest taşıyıcılarla ilişkilendirilir. Bu bant içi elektronik iletimin mekanizması Drude teorisi ile açıklanmaktadır. İşgal edilmiş durumlara bağlı elektronlar için, elektronlar, Fermi seviyesinin altındaki enerji

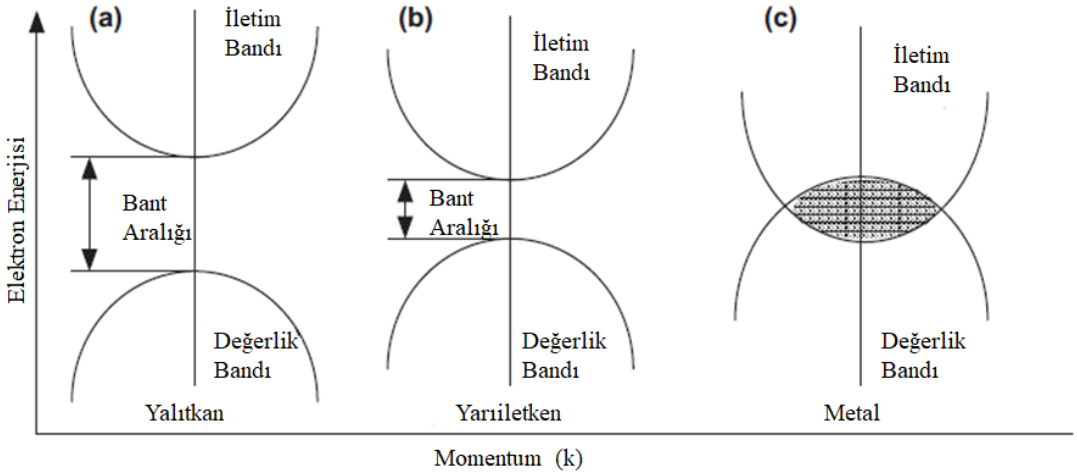
bandından iletken bantlara, ancak yeterli enerjiye sahip fotonlar tarafından uyarıldığında atlayabilir.

Bu elektron geçiş sürecine, değerlik bandı ile boş bir iletim bandı arasında enerji durumuna izin verilmediği, ara bant geçişi adı verilir (Şekil 2.2). Daha yüksek enerjili fotonlar, bağlı elektronları daha düşük enerji seviyelerinden boş iletim bandına yükseltir. Bu tür bantlar arası geçişler genellikle görünür veya kızıl ötesi dalga boyunda ışık-madde etkileşimlerinde meydana gelir. Bantlar arası geçiş işlemi, bir elektron ve bir deşik (hole) taşıyan bir çift üretir. Uygulamada, bantlar arası geçişlerin sadece bir kısmı, birkaç özel enerji bandına karşılık gelen iletim mekanizmasına katkıda bulunur.



Şekil 2.2 Bağlı elektronların bantlar arası geçişinin şematik gösterimi

Katı malzemeler, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi kendi enerji bandı yapılarına sahiptir. Enerji bandı yapılarının çeşitli özellikleri, katı malzemelerin çok yönlü elektriksel özelliklerini belirler. Örneğin, katkılanmamış silikonun bant aralığı ~1.1 eV iken, elmasın 5 eV bant aralığı vardır.



Şekil 2.3 Yalıtkan, yarıiletken ve metaller için bant yapıları

Enerji seviyeleri arasındaki elektron geçişleri ortamın dielektrik fonksiyonunu ve ardından optik özelliklerini belirler. Bir yalıtkan için, Şekil 2.3 (a)'da gösterildiği gibi, değerlik ve iletim bandı arasında büyük bir boşluk bulunmaktadır. Hiçbir elektron, iletim bandına yeterli enerji olmadan atlamaz. Şekil 2.3 (b)'de gösterildiği gibi, yarı iletken malzemeler temelde yalıtkanların sahip olduğu benzer bant yapısına sahiptir; ancak, yarı iletkenlerin bant aralığı (Eg), yalıtkanlarınkinden çok daha küçüktür. Yarı iletkenler içindeki elektronların sayısı, fotonlar elektron iletimi elde etmek için uyarıldıktan sonra büyük ölçüde artacaktır. Derin bir katkılama yarı iletken bant boşluklarını büyük ölçüde azaltacaktır, bu da daha fazla mevcut elektronun bantlar arası geçişe katkıda bulunmasını sağlar.

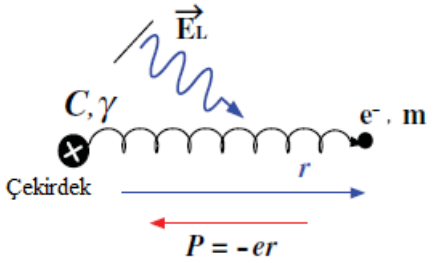
Bununla birlikte, metal malzemeler söz konusu olduğunda, enerji bantları birbiriyle örtüşür veya bazı durumlarda, Şekil 2.3 (c)'de gösterildiği gibi kısmen doldurulur. Değerlik bantlarının ve serbest iletim bantlarının üst üste binmesi, elektronların bantlar arasında serbestçe hareket etmesini sağlar. Metaller arasındaki bantlar arası geçişler, düşük frekanslı fotonlar tarafından uyarma altında kolayca oluşabilir. Serbest taşıyıcılar büyük ölçüde iletime katkıda bulunur. Serbest taşıyıcıların yoğunlukları düşük olmasına rağmen, serbest taşıyıcıların yüksek mobilitesi metallerin iletkenliğine katkıda bulunur.

2.3.1 Harmonik osilatör modeli

Drude ve Lorentz modelleri, malzemelerin optik özelliklerini açıklamak için elektronik kinetik teorisinde geliştirilmiştir. İlerleyen zamanlarda modeller, katı malzemelerin dielektrik özelliklerini tanımlayan Drude-Lorentz modeline genişletilmiştir.

Ortam içindeki bir yük, çekirdeğe bağlı olan bir harmonik osilatör olarak işlem görür (Şekil 2.4). Olası bir elektromany etik dalganın uyarılması altında, osilatör elektriksel alana göre karşılıklı fazda salınır. Burada, elektron çekirdeği sisteminde dipol momentinin olmadığı kutupsal olmayan bir molekülün koşulları tartışılmaktadır. Alanın yön değiştirmesiyle birlikte alandan dolayı oluşan dipol momentlerinin yönü de değişir. Dış alanın frekansı düşükse dipol momentleri bu değişime ayak uydurarak alanla salınır. Ancak çok yüksek frekanslarda alana ayak uyduramayarak alanın değişimimi geriden takip edecektir.

Dinamik bakış açısıyla, elektronun salınımı yük dağılımına neden olacak ve ek bir indüklenmiş elektrik alanı yaratacaktır. İndüklenen alan yükü denge konumuna geri getirecektir.



Şekil 2.4 Dış elektrik alan etkisi altında elektronun harmonik osilasyonu

Newton'un ikinci yasasına göre sistemin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$m_e \frac{\partial^2 \mathbf{r}(t)}{\partial t^2} = \sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{F}_E(t) + \mathbf{F}_D(t) + \mathbf{F}_S(t) \tag{2.21}$$

m_e, yükün etkin kütlesi ve $\mathbf{r}(t)$ yükün denge noktasına olan mesafesidir. $\mathbf{F}_E(t) = q_e\mathbf{E}_0 e^{-j\omega t}$, dış elektrik alanın yük üzerine uyguladığı kuvvet, q_e yük miktarı ve $\mathbf{E}_0$ elektrik alan büyüklüğüdür. $\mathbf{F}_s(t) = -q \text{ x } \mathbf{r}(t)$, denge noktasından olan uzaklıkla orantılı geri çağırma kuvvetidir. $q = m_e{\omega_0}^2$, ω_0 salınımın doğal frekansıdır. İletken malzemeler içindeki serbest elektronlar herhangi belirli bir çekirdeğe bağlı olmadıkları için üzerlerine uygulanan geri çağırma kuvveti sıfırdır. $\mathbf{F}_D = -\gamma[\partial\mathbf{r}(t)/\partial\, t]$, çarpışma enerjisi kaybından kaynaklanan sönümleme kuvveti anlamına gelir, burada γ sönümleme katsayısıdır. Geri çağırma ve sönümleme kuvvetleri negatiftir çünkü hareket yönünün tersidir. Böylece, eşitlik 2.21 aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$m_e\frac{\partial^2\mathbf{r}}{\partial t^2} + m_e\gamma\frac{\partial\mathbf{r}}{\partial t} + m_e{\omega_0}^2\mathbf{r} = q_e\mathbf{E}_0 e^{-j\omega t} \tag{2.22}$$

Denklem $\mathbf{r}(\boldsymbol{\omega})$ için çözüldüğünde;

$$\mathbf{r}(\boldsymbol{\omega}) = \frac{q_e}{m_e({\omega_0}^2 - \omega^2 - j\gamma\omega)}\mathbf{E}(\boldsymbol{\omega}) \tag{2.23}$$

Yükün zamanla dengeli konumundan sapması bir dipol moment oluşumuna neden olur. Birim hacimdeki toplam dipol momenti kutuplanma vektörü (**P**) ile verilir,

$$\mathbf{P} = N_e q_e\mathbf{r}(\boldsymbol{\omega}) = \frac{N_e{q_e}^2}{m_e({\omega_0}^2 - \omega^2 - j\gamma\omega)}\mathbf{E}(\boldsymbol{\omega}) \tag{2.24}$$

N_e, birim hacimdeki elektron sayısıdır. Kutuplanma vektörü aynı zamanda indüklenen elektrik alanla ve elektrik duygunluk $(\chi = \varepsilon_r - 1)$ ile de orantılıdır.

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0\chi_e\mathbf{E}(\boldsymbol{\omega}) = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\mathbf{E}(\boldsymbol{\omega}) \tag{2.25}$$

Eşitlik 2.24 ve 2.25 birbirine eşitlenerek elektrik duygunluk elde edilebilir.

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}(\boldsymbol{\omega}) = \left(\frac{N_e {q_e}^2}{m_e}\right) \frac{1}{({\omega_0}^2 - \omega^2 - j\gamma\omega)} \mathbf{E}(\boldsymbol{\omega}) \tag{2.26}$$

$$\chi_e(\omega) = \left(\frac{N_e {q_e}^2}{\varepsilon_0 m_e}\right) \frac{1}{({\omega_0}^2 - \omega^2 - j\gamma\omega)} \tag{2.27}$$

ω_p, metalin plazma frekansıdır ve aşağıdaki eşitlikle verilir.

$${\omega_p}^2 = \frac{N_e {q_e}^2}{\varepsilon_0 m_e} \tag{2.28}$$

Plazma frekansı eşitlik 2.27'de yerine yazılırsa frekansa bağlı elektrik duygunluk ifadesi elde edilir.

$$\chi_e(\omega) = \frac{{\omega_p}^2}{({\omega_0}^2 - \omega^2 - j\gamma\omega)} \tag{2.29}$$

Elektrik duygunluk ifadesi kullanılarak, maddenin elektrik geçirgenliğinin $\left(\varepsilon = \varepsilon_0\left[1 + \chi_e(\omega)\right]\right)$ frekansa bağlılığı bulunabilir.

$$\hat{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_0 {\omega_p}^2}{({\omega_0}^2 - \omega^2 - j\gamma\omega)} \tag{2.30}$$

Eşitlik 2.30 reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa;

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_0 {\omega_p}^2 ({\omega_0}^2 - \omega^2)}{({\omega_0}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \tag{2.31}$$

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{\varepsilon_0 \gamma {\omega_p}^2 \omega}{({\omega_0}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \tag{2.32}$$

$$\hat{n}^2(\omega) = \hat{\varepsilon}/\varepsilon_0 = \left[1 + \frac{{\omega_p}^2({\omega_0}^2 - \omega^2)}{({\omega_0}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2}\right] - j\left[\frac{\gamma {\omega_p}^2 \omega}{({\omega_0}^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2}\right] \tag{2.33}$$

2.3.2 Drude modeli ve Lorentz modeli

Metaller ve elektromanyetik dalgalar arasındaki etkileşimler ilk önce serbest elektronların kolektif hareketi ile belirlenir. Elektronlar herhangi bir çekirdeğe bağlı olmadığından geri çağırma kuvveti etkisinde değildir. Serbest bir elektronun değişken elektrik alan altındaki hareketi Newton'un ikinci yasasına göre aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$m_e \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2} + m_e \gamma \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} = -q_e \mathbf{E}_0 e^{-j\omega t} \tag{2.34}$$

Denklem $\mathbf{r}(t)$ için çözüldüğünde;

$$\mathbf{r}(\boldsymbol{\omega}) = \frac{q_e}{m_e(\omega^2 + j\gamma\omega)} \mathbf{E}(\boldsymbol{\omega}) \tag{2.35}$$

Birim hacimdeki toplam dipol moment dikkate alındığında ise metaller için elektrik geçirgenlik ifadesi frekansa bağlı şekilde elde edilir.

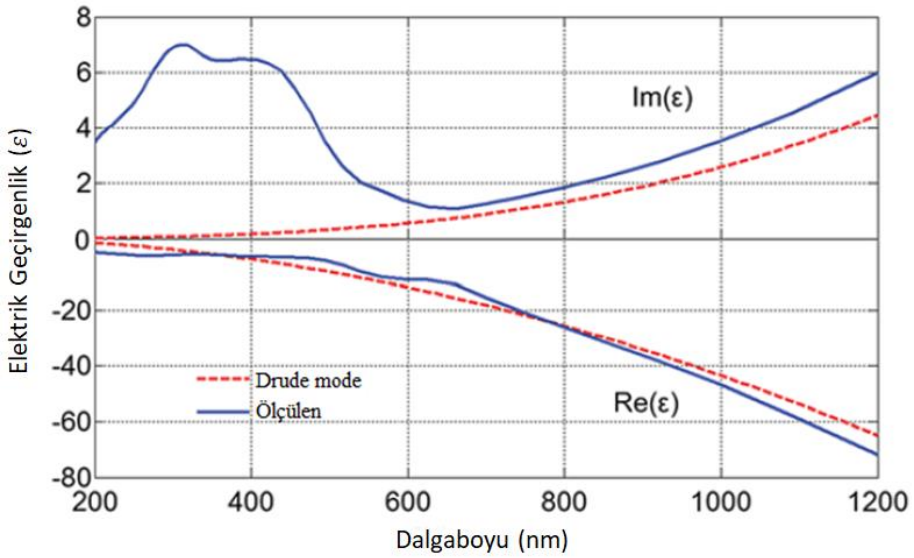
$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{{\omega_p}^2}{\omega^2 + j\gamma\omega} \tag{2.36}$$

ω_p, metalin plazma frekansıdır. Plazma frekansında malzemenin elektromanyetik tepkisi metalik davranıştan dielektrik davranışa doğru değişir. Plazma frekansının altındaki frekanslarda optik ortam metal benzeri davranış sergiler. Eşitlik 2.356gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + j\varepsilon_2 = \left(1 - \frac{{\omega_p}^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right) + j\frac{\gamma {\omega_p}^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \tag{2.37}$$

Eşitlik 2.36 kullanılarak altının elektrik geçirgenliği görünür dalgaboyu ve kızıl ötesi dalgaboyu aralığında hesaplanmıştır (**Şekil 2.5**). Şekilden anlaşılacağı üzere plazma frekansından düşük frekanslarda (plazma dalgaboyuna karşılık gelen dalgaboyundan

yüksek dalgaboylarında) elektrik geçirgenliğin reel kısmı tüm spektrum boyunca negatif değer alıyor. 650nm ve üzerindeki dalgabolarında Drude modeli deneysel sonuçlarla örtüşmektedir. Ancak 650nm'den düşük dalgaboylarında elektrik geçirgenliğin sanal kısmında sonuçlar arasında belirgin bir sapma görülmektedir. Ölçülen sonuçlar, Drude modelinden elden edilen sonuçlara göre daha hızlı artış göstermektedir. Bu fark, yüksek enerjili fotonlar tarafından uyarılan bağlı elektronların bantlar arası geçişlerinin, Drude modelinde dikkate alınmamasından kaynaklanmaktadır, ancak bantlar arası geçişlerin önemli hale geldiği gerçeğine bağlanmaktadır.



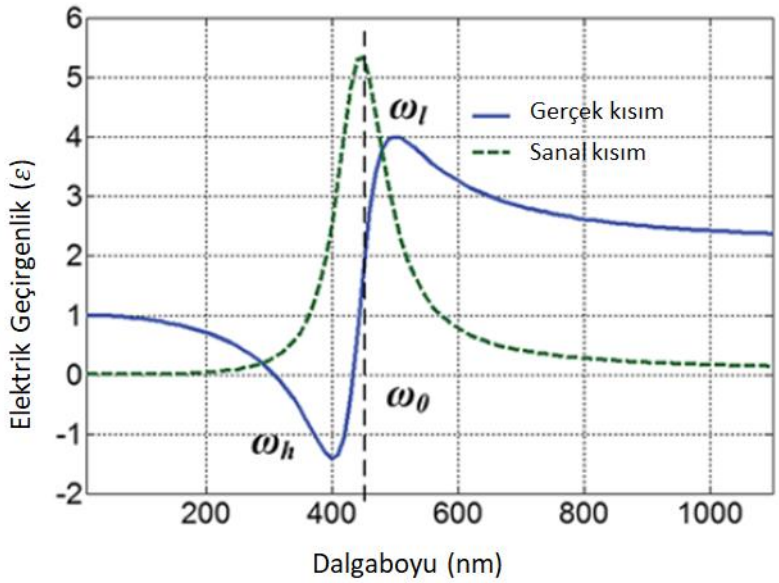
Şekil 2.5 Altın için Drude modelinde elde edilen sonuç (kesikli çizgi) ve ölçülen sonuç (düz çizgi) (Palik, E. D. 1985).

Bağlı elektronların bantlar arası geçişlerinin elektrik geçirgenliğine olan katkısı, dielektrik ortama karşılık gelen rezonansa benzer. Bu geçişler, serbest elektronlar dikkate alınmadan, Aşağıdaki denklemle verilir.

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{{\omega_1}^2}{{\omega_0}^2 - \omega^2 - j\gamma\omega} \tag{2.38}$$

ω_0, elektrik alan altındaki bağlı elektronun salının frekansıdır. ω_1 ve γ ise bağlı elektrona karşılık gelen frekans ve sönüm katsayısıdır.

Şekil 2.6, yalnızca bağlı elektronların bantlar arası katkısını göz önüne alarak altının dielektrik geçirgenliğini göstermektedir. Gerçek kısım bir dağılım davranışı gösterirken, sanal kısım net bir rezonans davranışı sergiler. Dikey noktalı çizgi, rezonans frekansını (ω_0) temsil eder. Rezonans frekansı ayrıca sanal kısmın en yüksek değerine karşılık gelmektedir, bu yüzden soğurma frekansı olarak da adlandırılır. Gerçek kısım için, düşük frekanslarda ($\omega < \omega_p$) bir tepe değeri ve yüksek frekanslarda ($\omega > \omega_p$) bir vadi değeri vardır. Bu tepe ve vadi arasındaki frekans bölgesine, elektrik geçirgenlik değerinin frekansla azaldığı, anormal dağılım bölgesi denir.



Şekil 2.6 Altındaki bağlı elektronların elektrik geçirgenliğe katkısı. Kullanılan parametreler; $\omega_1 = 4.55\text{x}10^{15}\ \text{s}^{-1}$, $\gamma = 9.10x10^{16}\ \text{s}^{-1}$. $\omega_0 = 4.19\text{x}10^{17}\ \text{s}^{-1}$ (450nm)

Bir Lorentz osilatörü için, geçirgenliğin gerçek kısmı rezonans frekansından daha düşük aralıkta pozitif bir değer iken, rezonans frekansından biraz daha yüksek frekansta negatif bir vadi vardır. Şekil 2.6'daki bir başka özellik, dalga boyu rezonans dalga boyundan çok daha büyük olduğunda, geçirgenlik değeri sıfır olmayan bir asimptotik değere sahip olur. Bu durum ortam içindeki bantlar arası elektron geçişlerinin bir sonucudur.

Bantlar arası elektronların daha yüksek dereceli geçişi dikkate alındığında geçirgenlik, Lorentz modelinin üst üste bindirilmesiyle ifade edilir.

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \sum_{i}^{K} \frac{f_i {\omega_i}^2}{{\omega_i}^2 - \omega^2 - j\gamma_i \omega} \tag{2.39}$$

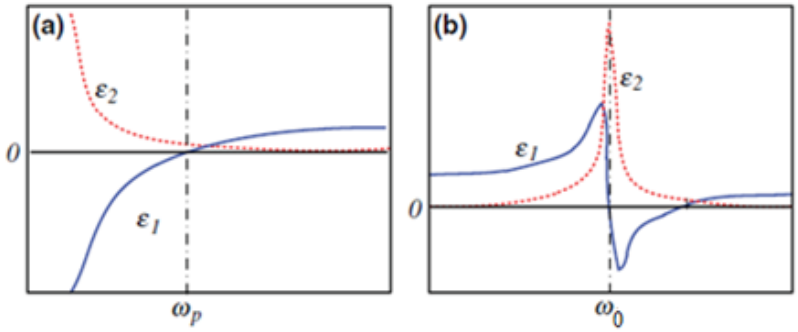
i, resonans modlarını, ω_i, rezonant frekanslarını ve f_i, ağırlık katsayılarını ifade eder.

Her elektronun dipol polarizasyonuna katkıda bulunduğu varsayılmaktadır. Atom çekirdeği aynı zamanda hafif bir katkı yapar, çünkü çekirdeğin kütlesi elektrondan çok daha büyüktür. Yukarıda belirtilen Drude teorisindeki dielektrik geçirgenlik formülleri, sonsuz çekirdek kütlesinin yaklaşımı altında türetilmiştir. Diğer bir varsayım, yalnızca bir elektronun bir elektronik-dinamik sistemde çalıştığıdır. Bu gibi durumlarda, yaygın olarak kullanılan soy metallerin elektriksel özellikleri ve bunlara karşılık gelen plazma frekansları ve ayrıca sönümleme sabiti Çizelge 2.1'de listelenmiştir.

Çizelge 2.1 Soy metallerin elektrik özellikleri ve plazma frekansları

Metal	Plazma Frekansı (eV)	Plazma Frekansı (10^{15} s^{-1})	Plazma Frekansı (10^{15} s^{-1})
Au	9.1	13.8	0.011
Al	9.2	14.0	0.032
Ag	15.1	22.9	0.92
Cu	8.8	13.4	0.14

Drude modelini ve Lorentz modelini kullanarak metallerin özellikleri Şekil 2.7'de karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.7(a), drude modelindeki plazma frekansında sıfırdan geçen dielektrik fonksiyonu metal içindeki toplu elektronik salınıma karşılık gelir. Lorentz denklemleri tarafından açıklanan Şekil 2.7(b), soğurma pikiyle tutarlı olan bağlı elektronlara karşılık gelen bir rezonans frekansını göstermektedir.



Şekil 2.7 Komplex dielektrik fonksiyonun bileşenleri

a) Metaller Drude modeliyle, b) Dielektrikler Lorentz modeliyle açıklanmıştır

2.3.3 Drude-Lorentz modeli

Hem bağlı elektronlar hem de serbest olanlar, metalik bir ortamın optik özelliklerine katkıda bulunur. Bu nedenle, birleştirilmiş elektrik geçirgenlik, Drude–Lorentz modelinde, hem bant içi etki için Drude bileşenini hem de bantlar arası geçiş için Lorentz terimini içerir.

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{{\omega_p}^2}{\omega^2 + j\omega\gamma_d} + \sum_{i=1}^{K} \frac{f_i {\omega_i}^2}{{\omega_i}^2 - \omega^2 - j\omega\gamma_i} \qquad (2.40)$$

K, ω_i rezonans frekansına karşılık gelen yüksek enerjili salınımların toplam sayısıdır.

Şekil 2.6 - 2.7'de gösterildiği gibi, bantlar arası geçiş, rezonans dalga boyundan çok daha uzakta bir dalga boyunda elektrik geçirgenliğin sıfır olmayan bir asimptotik değerine sahiptir. Soy metaller içerisinde, bağlı elektronların çeşitli bant yapıları nedeniyle genellikle çoklu bantlar arası geçişlerin olması dikkat çekicidir. Bu nedenle, tüm ilgili geçişleri hesaba kattıktan sonra, rezonans dalga boyundan çok daha uzun dalga boylarında çalışırken sabit bir değeri (ε_∞) gösterir. Bu nedenle, temel salınımı dikkate alan modifiye Drude-Lorentz modeli aşağıdaki gibi verilir. Örneğin, altın için $\omega \to 0$ durumunda $\varepsilon_\infty = 1.2$'dir.

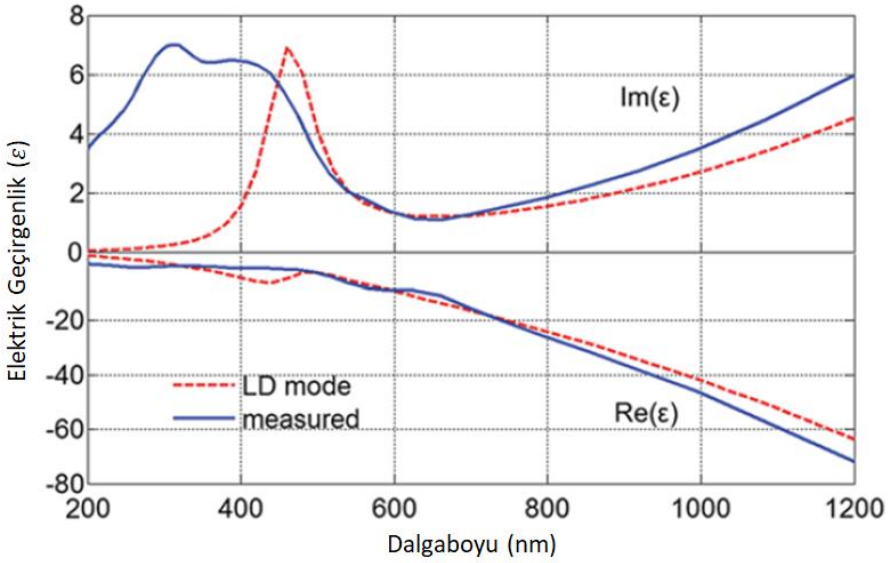
$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{{\omega_p}^2}{\omega^2 + \gamma^2} + j\frac{{\omega_p}^2\gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \tag{2.40}$$

Drude-Lorentz modeli için soy metallerin optimal değerleri Çizelge 2.2'de listelenmiştir. Bunlar arasında soy metal malzemeler (Au, Ag ve Cu), alüminyum ve geçiş metalleri (Cr, Ni, Pd, Pt ve Ti) bulunur. Bu metaller optoelektronik cihazlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu optik verilerin ölçümleri, deneysel koşullara (geometri morfolojisi ve üretim süreci açısından) büyük ölçüde bağlıdır, bu nedenle ilgili optik veriler dikkatli bir şekilde seçilmelidir.

Çizelge 2.2 Drude-Lorentz modelinde kullanılan parametre değerleri

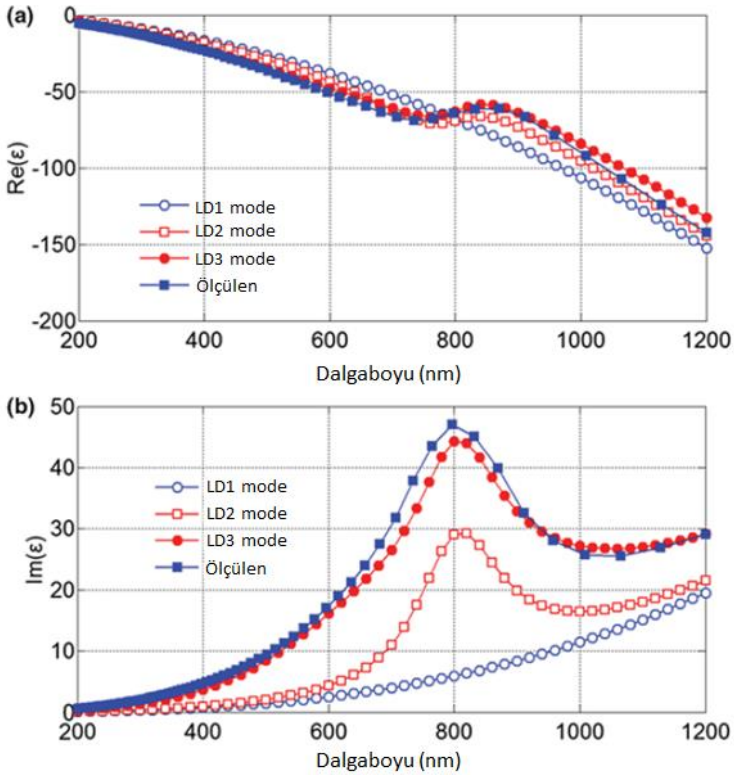
Parametreler	**Ag**	**Au**	**Cu**	**Al**
f_0	0.845	0.760	0.575	0.523
γ_d	0.048	0.053	0.030	0.047
f_1	0.065	0.024	0.061	0.227
$\gamma_1(\mathrm{eV})$	3.886	0.241	0.378	0.333
$\omega_1(\mathrm{eV})$	0.816	0.415	0.291	0.162
f_2	0.124	0.010	0.104	0.050
γ_2	0.452	0.345	1.056	0.312
ω_2	4.481	0.830	2.957	1.544
f_3	0.011	0.071	0.723	0.166
γ_3	0.065	0.870	3.213	1.351
ω_3	8.185	2.969	5.300	1.808
f_4	0.840	0.601	0.638	0.030
γ_4	0.916	2.494	4.305	3.382
ω_4	9.083	4.304	11.18	3.473
f_5	5.646	4.384	-	-
ω_5	20.29	13.32	-	-

Hem serbest elektronların hem de tek bir bantlar arası geçişin katkısı dikkate alındığında, altının dielektrik fonksiyonu deneysel sonuçlara yaklaşır. Şekil 2.8'de sadece bir bantlar arası geçiş gösterilmiştir. Bu nedenle mod eğrileri 500 nm'nin altındaki dalga boylarında deneysel sonuçlarla örtüşmemektedir. Bir metal için, düşük dalgaboylarında genellikle çoklu, bantlar arası geçişler vardır. Bunun nedeni daha yüksek enerjili fotonlar, bağlı elektronların bantlar arası geçişlerini teşvik eder.



Şekil 2.8 Altının hem serbest elektrondan hem de tek bir bantlar arası geçişten gelen katkı göz önüne alındığında, Drude-Lorentz modeli (kesikli çizgi) tarafından hesaplanan ve ölçülen elektrik geçirgenliği değerleri (düz çizgi) karşılaştırılmıştır.

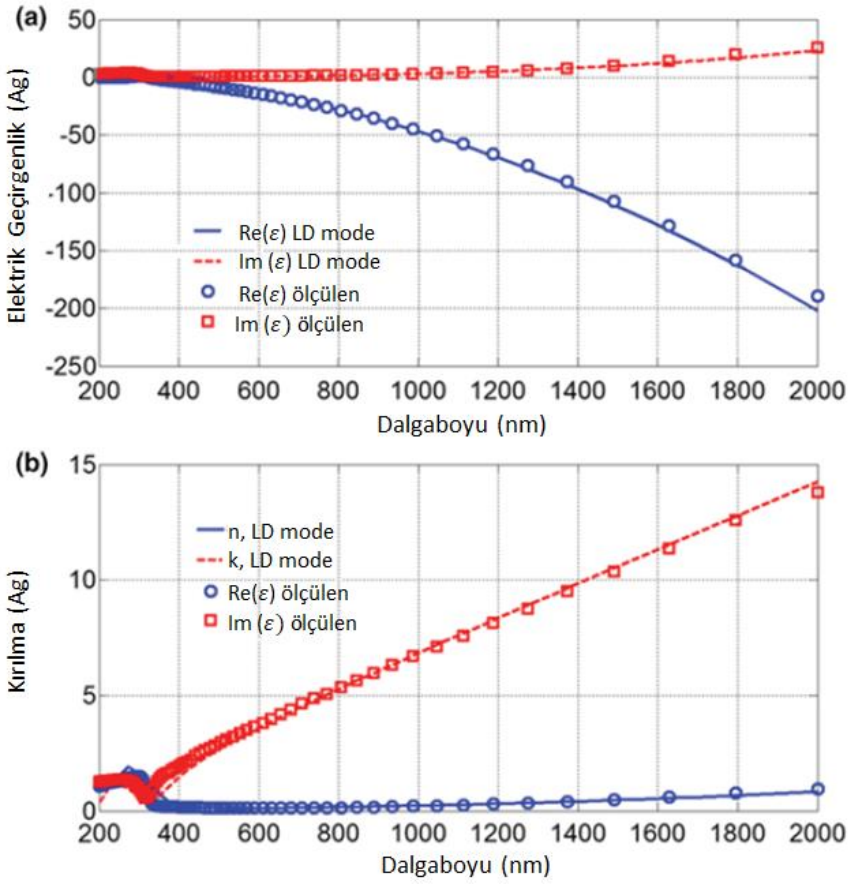
Birden fazla bantlar arası geçiş eşitlik 2.40'a dahil edilirse, hesaplanan sonuçlar deneysel sonuçlara yakın bir şekilde ilerleyecektir. Örneğin, alüminyumun dielektrik fonksiyonları, Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Dielektrik fonksiyonun hem gerçek kısmı hem de hayali kısmı, yüksek enerjili bantlar arası geçişler dikkate alındığında deneysel sonuçlara yaklaşır. Bazı hızlı değişimler, en dış bağlı elektronların en altta kalan bant arası geçişine karşılık gelen 800 nm civarında meydana gelir.



Şekil 2.9 Alüminyum için 200nm ve 1200nm arasındaki dalga boylarına karşılık gelen gerçek (a) ve sanal (b) kısımlar. Bantlar arası geçişlerin birinci, ikinci ve üçüncü etkisi.

Metal gümüşün dielektrik geçirgenliği ve karmaşık kırılma indisi, Şekil 2.10'de gösterilmektedir. Hem serbest hem de bağlı elektronların katkısı göz önünde bulundurulur. Deneysel sonuçlar, Drude-Lorentz modelinde hesaplanan sonuçlarla tutarlıdır. Optik frekanslarda, dielektrik geçirgenliğin hayali kısmı pozitiftir, oysa gerçek kısım rezonant dalga boyundan daha uzun dalga boylarında negatif değerlere sahiptir. $\mathrm{Im}(\varepsilon) << \mathrm{Re}(|\varepsilon|)$ 'in dielektrik işlevi geçerlidir. Bununla birlikte, kırılma indisinin sanal kısmı, sıfırdan biraz daha büyük olan gelen gerçek kısımdan çok daha büyüktür.

Optik özellikler, Drude ya da Lorentz modelleriyle tamınlanan elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleriyle elde edilmektedir (Li, 2017)

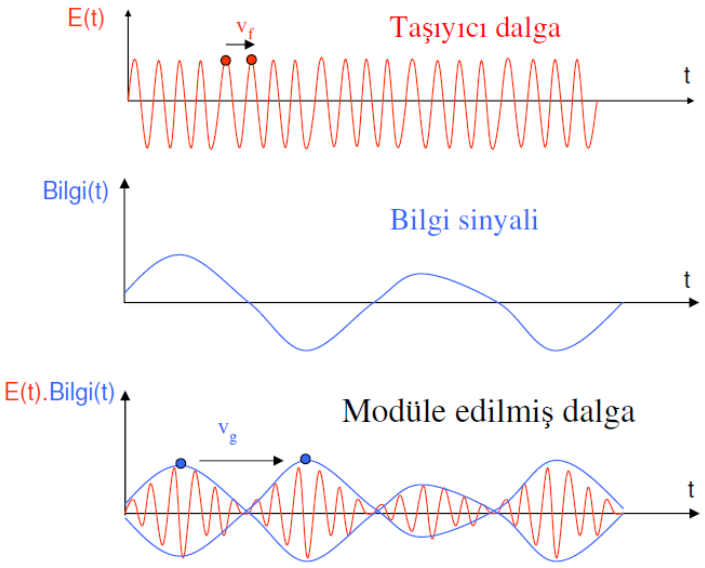


Şekil 2.10 Gümüşün elektrik geçirgenlik değerleri ve ona karşı gelen kırılma indisleri

Fresnel denklemlerinde yansıma katsayısı $(n_1-n_2)/(n_1+n_2)$ ile gösterilmiştir. Burada n_1 kırılma indisinin gerçek kısmı ve n_2 sanal kısmıdır. Bantlar arası geçişe karşılık gelen plazma frekansından daha uzun dalga boylarındaki $n_2>>n_1$ koşullarında, yansıma katsayısı, 1 değerine yaklaşır. Bu durum, ışık parçalarının çoğunun, dielektrik ve metal ara yüzeyinden yansıdığını gösterir.

2.3.4 Faz hızı ve grup hızı

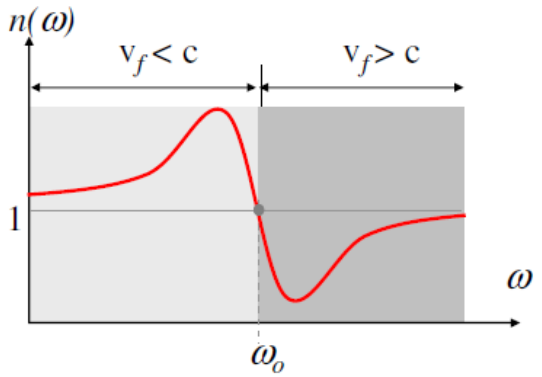
Dalgalar söz konusu olunca iki farklı hızdan bahsedilir. Bunlardan biri Faz Hızı, diğeri Grup Hızıdır. Faz hızı, tek frekanslı bir dalganın hızını, grup hızı ise dalga paketinin hızını ifade eder (Şekil 2.11). Bilgi iletimi, tek frekanslı taşıyıcı bir dalganın modüle edilmesi ile gönderildiğinden bilgi, faz hızında değil grup hızında iletilir ve genellikle ışık hızına eşit veya küçüktür.



Şekil 2.11 Faz Hızı ve Grup Hızının Gösterimi

Dalga hızı (faz hızı), yani taşıyıcı dalga ($V_f = \omega/k$) modüle edilmediği için bilgi iletmez. Bilgi iletim hızı ise modüle edilmiş olan grup hızıdır ($V_g = \partial\omega/\partial\, k$).

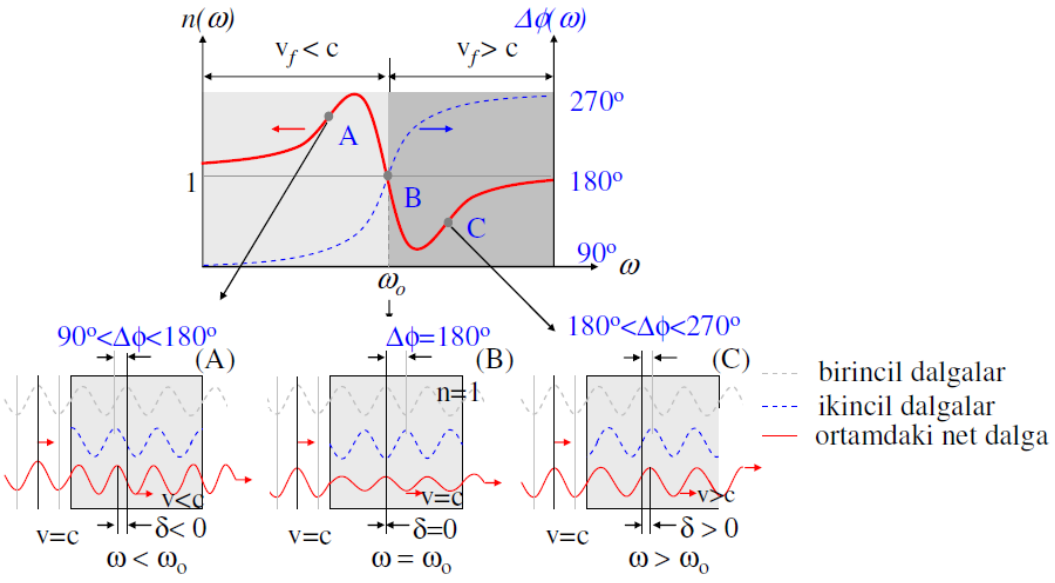
Dağınım bağıntısı n(ω) yakından incelendiğinde ilginç özellikler sergilediği görülür. Örneğin ışığın frekansı ortamın rezonans frekansına eşit ($\omega = \omega_0$) olduğunda kırılma indisi boşluktaki değerini (n=1) alır, üstünde ise birden küçük (n<1) bir değer alır (**Şekil 2.12**). Bu durum, kırılma indisinin tanımı hatırlandığında, ışığın ortamdaki hızının boşluktaki hızından daha büyük olacağı anlamına gelmektedir ki bu da, ışık hızının bilgi iletiminde üst sınır olduğunu öngören genel göreliliğin sonuçları ile çelişmektedir.



Şekil 2.12 Kırılma indisinin dağınım bağıntısı ile gösterilmesi

n<1 durumuna karsı gelen hız aslında bilgi iletim hızı değil modüle edilmemiş tek frekanslı bir dalganın faz hızıdır; bu durum ikincil dalgalarla açıklanabilir. Kırılma indisi, madde ortamında ilerleyen dalganın (birincil dalgalar), alan tarafından uyarılan ortamdaki dipollerin yayınladığı aynı frekanslı dalgaların (ikincil dalgalar) girişimi sonucunda oluşan yeni dalganın eş faz yüzeylerinin hızını, yani faz hızını göstermektedir.

Rezonans frekansının altında (A) dipollerin yayınladıkları ikincil dalgalar ışığın ortamda oluşturduğu birincil dalgaların gerisinde (δ<0), rezonans frekansının üstünde (C) ise birincil dalgaların ilerisindedir (δ>0) (Şekil 2.13). Faz hızı, birincil ve ikincil dalgaların girişimi sonucu oluşan eş faz yüzeylerinin hızı olduğundan rezonans frekansının üstünde faz hızı ışık hızından büyük olabilmektedir.

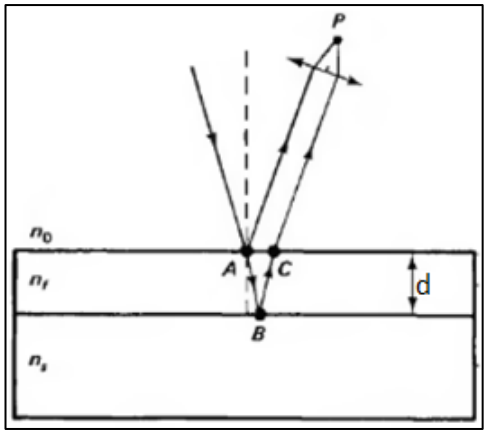


Şekil 2.13 Ortamdaki birincil ve ikincil dalgaların etkileşiminin frekansa göre değişimi

2.4 Optik İnce Film Teorisi

Bu bölümde optik uygulamalarda kullanılan ince filmler için temel tanımlar, fiziksel kavramlar ve bu kavramların matematiksel ifadelerine yer verilecektir.

Girişim, ince filmlerin temel prensibidir. İnce film üzerine gelen ışınların bir kısmını geçirirken bir kısmını da yansıtır (Şekil 2.14). Hava-film ara yüzeyinde filmle buluşan ışın demeti yansıma yaparak ve filmde ilerleyerek ikiye ayrılır. A noktasından kırılarak film içerisine giren ışın demeti film alttaş ara yüzeyinde (B noktasından) ikinci bir yansımaya uğrar. Daha sonra filmi C noktasından terk eder. Her iki yüzeyden yansıyan ışınlar birbirlerine paralel doğrultuda ilerler. Işın demetinin belirli bir kısmı film içerisinde şiddetini ve yoğunluğunu kaybedinceye kadar yüzeyler arasında iç yansımalara devam eder. Sonuçta A ve C noktasından paralel olarak ilerleyen ışınlar "süperpozisyon" ilkesi gereği girişim oluştururlar. P noktasında oluştuğunu varsaydığımız girişim için ışın demetlerinin aldığı yol uzunlukları farklı olmaktadır. B noktasından yansıyan ışınların fazladan aldığı ABC optik yol farkı (Δ) ışın demetleri arasında göreli faz farkına sebep olmaktadır. Oluşan bu faz farkı, ışın demetleri arasında yapıcı veya yıkıcı girişim oluşturmaktadır. Yapıcı girişimde yansıma artarken, yıkıcı girişim yansımanın azalmasına neden olur. Ulaşılmak istenilen yansıma ve geçirme oranları, oluşan faz farkına yani kırılma indisine ve film kalınlığına bağlıdır (Pedrotti vd. 1993).



Şekil 2.14 İnce film yüzeyinde oluşan yansıma ve geçirgenlik (Pedrotti vd. 1993)

Film yüzeyine θ_i açısıyla gelen ışın demetinin kırılma ve yansıma olayları şekil 2.15'de görülmektedir. C ve D noktalarına erişen ışın demetleri için oluşan faz farkı AD ve ABC yolları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Işınlar C ve D noktalarına ulaştıktan sonra paralel olarak ilerlerler. Paralel ışınlar aynı ortamda ilerledikleri için aralarında faz farkı oluşmaz. Optik yol farkını hesaplayabilmek için üçgen geometrisi

kullanılabilir. ABC üçgeninden film yüzeyine bir dikme indirilerek G noktası, E ve F noktaları ise G noktasından AB ve BC optik yollarına indirilen dikmelerdir. Sonuç olarak optik yol farkı:

$$\Delta = n_f(AB + BC) - n_0(AD) \tag{2.41}$$

Ortamın (n_0) ve filmin (n_f) kırıcılık indisleri cinsinden tanımlanır. Daha basitleştirmek için AB ve BC uzunluklarını E ve F noktaları yardımıyla parçalayarak gösterilebilir ve

$$\Delta = \left[n_f(AE + FC) - n_0(AD)\right] + n_f(EB + BF) \tag{2.42}$$

elde edilir. Snell kanunu, üçgen geometrisi ve trigonometrik eşitlikler kullanılarak

$$n_0 \sin\theta_i = n_f \sin\theta_t \tag{2.43}$$

$$AE = AG \sin\theta_i = \left(\frac{AC}{2}\right) \sin\theta_t \tag{2.44}$$

$$AC = AD \sin\theta_i \tag{2.45}$$

$$n_0 AD = 2n_f AE = n_f(AE + FC) \tag{2.46}$$

eşitliği elde edilir. Optik yol farkı (Δ)

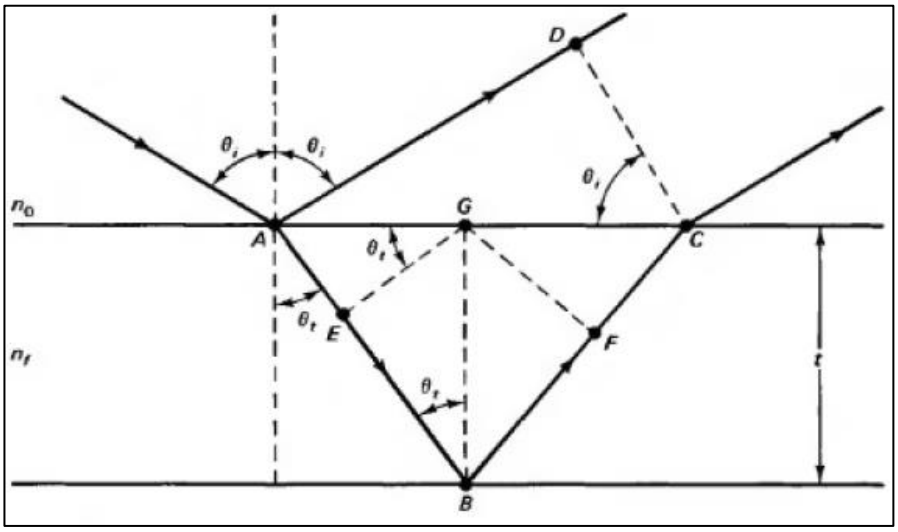
$$\Delta = n_f(EB + BF) = 2n_f EB \tag{2.47}$$

olarak tanımlanabilir. EB ve film kalınlığı olan d arasındaki bağıntıyı kullanılarak

$$EB = d \cos\theta_t \tag{2.48}$$

$$\Delta = 2n_f d \cos\theta_t \tag{2.49}$$

optik yol farkı elde edilir.



Şekil 2.15 İnce film yüzeyinde oluşan yansıma ve geometrik optik yol farkı (Pedrotti vd. 1993)

Boşlukta Maxwell denklemleri aşağıdaki şekildedir.

Genel	Boşlukta	
$\vec{\nabla}.\vec{\mathbf{E}} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$	$\vec{\nabla}.\vec{\mathbf{E}} = 0$	(2.50)
$\vec{\nabla}.\vec{\mathbf{B}} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$	$\vec{\nabla}.\vec{\mathbf{B}} = 0$	(2.51)
$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{E}} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{E}} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$	(2.52)
$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{E}} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} + \vec{\mathbf{J}}$	$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{E}} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$	(2.53)

2.50 ve 2.51 eşitlikleri birlikte çözülüp, bulunan elektrik alan 2.50 eşitliğinde kullanıldığında manyetik alan bulunmuş olur.

$$\vec{\mathbf{B}} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}\mathrm{E}_0 e^{i(\vec{\mathbf{k}}\vec{\mathbf{z}} - \omega t)} \qquad (2.54)$$

Elektrik ve manyetik alan vektörleri incelendiğinde, manyetik alan şiddetinin elektrik alan şiddeti cinsinden yazılabileceği görülmektedir.

$$B_0 = \sqrt{\varepsilon_0}\sqrt{\mu_0}E_0 \tag{2.55}$$

Eşitlik 2.14'de verilen ışık hızı kullanılarak, boşlukta elektrik ve manyetik alan büyüklükleri arasında

$$B_0 = \frac{1}{c}E_0 \tag{2.35}$$

eşitliği yazılabilir. Manyetik alan ve elektrik alan arasındaki bağlantı herhangi bir ortam için

$$B_0 = \frac{1}{v_m}E_0 \tag{2.57}$$

şeklinde yazılabilir. Kırılma indisi ve ışık hızı arasındaki bağıntı ($n = c/v$) yukarıdaki denklemle birleştirilse;

$$B_0 = \frac{n}{c}E_0 \tag{2.58}$$

$$B_0 = n\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}E_0 \tag{2.59}$$

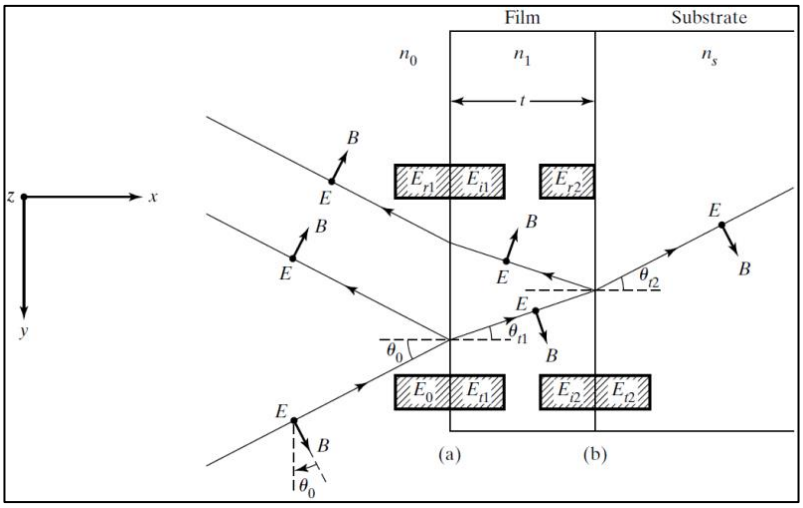
eşitliği bulunur.

2.4.1 Transfer matris yöntemi

İnce film yüzeylerindeki geçiş ve yansımaların hesaplanabilmesi için optik yol farkıyla faz farkı arasındaki ilişki ve ince filmler için Maxwell denklemlerinin uygulanması

incelenir. Bu inceleme Maxwell'in kuramının bir uygulaması olan transfer matrisi hesaplama yöntemi ile ayrıntılı şekilde yapılabilir. Bu yöntem ilk olarak 1950 yılında F. Abelés tarafından önerilmiş ve o tarihten bu yana geliştirilerek kullanılmaya devam edilmiştir (Furman ve Tikhonravov, 1992).

Transfer matrisi elde edilirken şekil 2.16'de verilen gösterimler kullanılacaktır. Şekilde gösterilen ışın demetinin elektrik alan bileşeni (E) gelen ışın, yansıyan ışın ve normalin bulunduğu düzleme dik olacak şekilde seçilmiştir. Işın demetinin bir kısmı film-hava ara yüzeyinden (a) dış yansımaya uğrar. Işın demetinin film içerisine geçiş yapan kısmı n_1 kırılma indisine sahip, manyetik özelliği olmayan ($\mu = \mu_0$) film ortamında ilerleyerek film-alttaş ara yüzeyinde (b) ikinci bir iç yansımaya uğrar ve alttaşa geçiş yapar. Hava ortamındaki, film içerisindeki ve alttaş ortamındaki ışın demetlerinin elektrik alan bileşenlerinin yönleri sayfadan dışarıya doğru z yönündedir. Işın demetlerinin manyetik alan bileşenlerinin (B) yönü ise şekilde gösterildiği gibidir. Yansıma esnasında manyetik alanın (B) y bileşeni ters yöne dönmektedir. (a) ve (b) ara yüzeyleri ile karşılaşan düzlemsel dalgalardan oluşan elektrik ve manyetik alanlar için sınır koşulları yazılmalıdır. Elektromanyetik teoriye göre elektrik ve manyetik alanların yüzeylere paralel bileşenlerinin sürekli olması gerekmektedir. Bunun anlamı yüzeylerin her iki tarafında da bileşen şiddetleri birbirine eşit olmalıdır. Şekil 2.16'deki gösterimlere göre elektrik alan (a) ve (b) yüzeylerinin her noktasında yüzeye paraleldir ancak manyetik alan hem yüzeye paralel (y yönünde) hem de yüzeye dik (x yönünde) iki bileşenden meydana gelmektedir.



Şekil 2.16 Tek katmanlı ince filmde ışının yansıması ve kırınımı (Pedrotti vd. 1993)

Hava, ince film ve alttaş ara yüzeylerinde elektromanyetik teorinin sınır koşullarına göre elektrik alan ve manyetik alan;

$$\mathrm{E}_a = \mathrm{E}_0 + \mathrm{E}_{r1} = \mathrm{E}_{t1} + \mathrm{E}_{i1} \tag{2.60}$$

$$\mathrm{E}_b = \mathrm{E}_{i2} + \mathrm{E}_{r2} = \mathrm{E}_{t2} \tag{2.61}$$

$$\mathrm{B}_a = \mathrm{B}_0 \cos\theta_0 - \mathrm{B}_{r1} \cos\theta_0 = \mathrm{B}_{t1} \cos\theta_{t1} - \mathrm{B}_{i1} \cos\theta_{t1} \tag{2.62}$$

$$\mathrm{B}_b = \mathrm{B}_{i2} \cos\theta_{t1} - \mathrm{B}_{r2} \cos\theta_{t1} = \mathrm{B}_{t2} \cos\theta_{t2} \tag{2.63}$$

Manyetik ve elektrik alan büyüklükleri arasındaki eşitlik 2.59 kullanılarak 2.62 ve 2.63 eşitlikleri tekrar yazılırsa,

$$\mathrm{B}_a = n_0\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cos\theta_0(\mathrm{E}_0 - \mathrm{E}_{r1}) = n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cos\theta_{t1}(\mathrm{E}_{t1} - \mathrm{E}_{i1}) \tag{2.64}$$

$$\mathrm{B}_b = n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cos\theta_{t1}(\mathrm{E}_{i2} - \mathrm{E}_{r2}) = n_s\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cos\theta_{t2}\mathrm{E}_{t2} \tag{2.65}$$

elde edilir. Eşitlikler, γ_0, γ_1 ve γ_s kullanılarak tekrar yazılırsa

$$B_a = \gamma_0(E_0 - E_{r1}) = \gamma_1(E_{t1} - E_{i1}) \quad (2.66)$$

$$B_b = \gamma_1(E_{i2} - E_{r2}) = \gamma_s E_{t2} \quad (2.67)$$

Eşitliklerde kullanılan γ_0, γ_1 ve γ_s

$$\gamma_0 = n_0\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cos\theta_0 \quad (2.68)$$

$$\gamma_1 = n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cos\theta_{t1} \quad (2.69)$$

$$\gamma_s = n_s\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cos\theta_{t2} \quad (2.70)$$

şeklindedir. Bu sınır koşullarında E_{i2}'yi E_{tl} ve E_{r2}'yi E_{i1} cinsinden yazılırsa faz farkı nedeniyle;

$$E_{i1} = E_{r2}e^{-i\emptyset} \quad (2.71)$$

$$E_{i2} = E_{r1}e^{-i\emptyset} \quad (2.72)$$

eşitlikleri oluşur. Bu eşitlikte $\emptyset$'yı faz farkı olarak tanımlanır ve optik yol farkını kullanılırsa, faz farkı

$$\emptyset = k_0\Delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right) n_1 d\cos\theta_{t1} \quad (2.73)$$

olarak yazılabilir. 2.71 ve 2.72 eşitlikleri (b) sınır koşullarından elde edilen 2.61 ve 2.63 eşitlikleri ile birlikte çözülürse;

$$E_b = E_{t1}e^{-i\emptyset} + E_{i1}e^{i\emptyset} = E_{t2} \quad (2.74)$$

$$B_b = \gamma_1\left(E_{t1}e^{-i\emptyset} - E_{i1}e^{-i\emptyset}\right) = \gamma_s E_{t2} \quad (2.75)$$

olarak bulunur. 2.74 eşitliği γ_1 ile çarpılarak 2.74 ve 2.75 eşitlikleri toplanırsa, 2.74 eşitliği $-\gamma_1$ ile çarpılarak 2.74 ve 2.75 eşitlikleri taraf tarafa toplanırsa E_{tl} ve E_{i1} , E_b ve B_b cinsinden elde edilmiş olur.

$$\mathrm{E}_{t1} = \left(\frac{\gamma_1 \mathrm{E}_b + \mathrm{B}_b}{2_{\gamma 1}}\right) e^{i\emptyset} \tag{2.76}$$

$$\mathrm{E}_{t1} = \left(\frac{\gamma_1 \mathrm{E}_b - \mathrm{B}_b}{2_{\gamma 1}}\right) e^{-i\emptyset} \tag{2.77}$$

E_{t1} ve E_{i1} sınır koşullarını sağlayan 2.76 ve 2.77 eşitlikleri 2.61 ve 2.63 eşitliklerinde yerlerine yazılıp çözülürse,

$$\mathrm{B}_a = \left(\frac{\gamma_1 \mathrm{E}_b + \mathrm{B}_b}{2}\right) e^{i\emptyset} - \left(\frac{\gamma_1 \mathrm{E}_b - \mathrm{B}_b}{2}\right) e^{-i\emptyset} \tag{2.78}$$

$$\mathrm{B}_a = \frac{\gamma_1 \mathrm{E}_b}{2} e^{i\emptyset} + \frac{\mathrm{B}_b}{2} e^{i\emptyset} - \frac{\gamma_1 \mathrm{E}_b}{2} e^{-i\emptyset} + \frac{\mathrm{B}_b}{2} e^{-i\emptyset} \tag{2.79}$$

$$\mathrm{B}_a = i\gamma_1 \mathrm{E}_b \left(\frac{e^{i\emptyset} - e^{-i\emptyset}}{2i}\right) + \mathrm{B}_b \left(\frac{e^{i\emptyset} + e^{-i\emptyset}}{2}\right) \tag{2.80}$$

elde edilir.

$2\cos\emptyset = e^{i\emptyset} + e^{-i\emptyset}$ ve $2i\sin\emptyset = e^{i\emptyset} - e^{-i\emptyset}$

Euler eşitliklerinden yararlanılarak B_a tekrar yazılırsa,

$$\mathrm{B}_a = \mathrm{E}_b(i\gamma_1 \sin\emptyset) + \mathrm{B}_b \cos\emptyset \tag{2.81}$$

olarak bulunur. Benzer şekilde yukarıdaki işlem adımları elektrik alan için uygulanırsa,

$$\mathrm{E}_a = \left(\frac{\gamma_1 \mathrm{E}_b + \mathrm{B}_b}{2\gamma_1}\right) e^{i\emptyset} - \left(\frac{\gamma_1 \mathrm{E}_b - \mathrm{B}_b}{2\gamma_1}\right) e^{-i\emptyset} \tag{2.82}$$

$$\mathrm{E}_a = \mathrm{E}_b \cos\delta + \mathrm{B}_b \left(\frac{i \sin\emptyset}{\gamma_1}\right) \tag{2.83}$$

olarak bulunur.

Sonuç olarak (a) yüzeyindeki elektrik alan ve manyetik alan değerlerinin, (b) yüzeyindeki elektrik ve manyetik alan değerleri cinsinden yazılabildiği görülmektedir. Eşitlik 2.81 ve 2.83 matris formunda yazıldığında;

$$\begin{bmatrix} \mathrm{E}_a \\ \mathrm{B}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\emptyset & \left(\frac{i \sin\emptyset}{\gamma_1}\right) \\ (i\gamma_1 \sin\emptyset) & \cos\emptyset \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{E}_b \\ \mathrm{B}_b \end{bmatrix} \tag{2.84}$$

ifadesi elde edilir. 2.84 eşitliğinde verilen 2×2 matris genelleştirilerek,

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \tag{2.85}$$

ince bir film tabakası için karakteristik transfer matrisi olarak tanımlanır. Çok katmanlı sistemler için her tabakanın karakteristik matrisi yazılarak çarpılır ve sisteme ait bir transfer matrisi elde edilir (M_T). N katmanlı bir sistem için geçiş matrisi aşağıdaki gibi hesaplanır (Şekil 2.17).

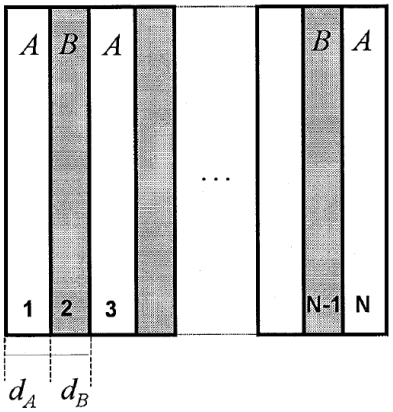
$$\begin{bmatrix} \mathrm{E}_a \\ \mathrm{B}_a \end{bmatrix} = M_1 M_2 \ldots\ldots M_N \begin{bmatrix} \mathrm{E}_N \\ \mathrm{B}_N \end{bmatrix} \tag{2.86}$$

$$M_T = M_1 M_2 \ldots\ldots M_N \tag{2.87}$$

İnce film tabakasına yüzeyin normali doğrultusunda gelen ($\theta_0 = 0$) ışın için transfer matrisinde verilen γ değerlerinde bulunan cos terimleri 1'e eşit olur ve transfer matrisi

$$M = \begin{bmatrix} \cos\emptyset & \dfrac{i\sin\emptyset}{n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \\ in_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sin\emptyset & \cos\emptyset \end{bmatrix} \tag{2.88}$$

şeklinde elde edilir.



Şekil 2.17 Çok katmanlı (N) ince film yapısının şematik gösterimi (Sarto vd. 2003)

2.5 Geçirgenlik ve Yansıma

Sırasıyla elektrik alan için 2.60 ve 2.61, manyetik alan için 2.66 ve 2.67 eşitlikleri transfer matrisinde yerlerine yazılırsa

$$\begin{bmatrix} \mathrm{E}_0 + \mathrm{E}_{r1} \\ \gamma_0(\mathrm{E}_0 - \mathrm{E}_{r1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\emptyset & \dfrac{i\sin\emptyset}{\gamma_1} \\ i\gamma_1\sin\emptyset & \cos\emptyset \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{E}_{t2} \\ \gamma_s\mathrm{E}_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{E}_{t2} \\ \gamma_s\mathrm{E}_{t2} \end{bmatrix} \tag{2.89}$$

elde edilir. Matris formu, transfer matris elemanları kullanılarak tekrar yazılırsa

$$\mathrm{E}_0 + \mathrm{E}_{r1} = m_{11}\mathrm{E}_{t2} + m_{12}\gamma_s\mathrm{E}_{t2} \tag{2.90}$$

$$\gamma_0(\mathrm{E}_0 - \mathrm{E}_{r1}) = m_{21}\mathrm{E}_{t2} + m_{22}\gamma_s\mathrm{E}_{t2} \tag{2.91}$$

eşitlikleri elde edilir. Her iki eşitlik E_0'a bölünürse geçirgenlik katsayısı ($t = \mathrm{E}_{t2}/\mathrm{E}_0$) ve yansıtma katsayısı ($r = \mathrm{E}_{r1}/\mathrm{E}_0$) elde edilir.

$$t = \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0\gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \tag{2.92}$$

$$r = \frac{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0\gamma_s m_{12} - m_{21} + \gamma_s m_{22}}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0\gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \tag{2.93}$$

Tek ya da çok katmanlı ince filmlerin geçirgenlik katsayısını (t) veya yansıtma katsayısını (r) bulmak için, her tabakanın karakteristik matrisini hesaplayıp, onların çarpımıyla bulunan matrisin elemanlarını, yukarıdaki bağıntılarda yerine koymak yeterlidir. r^* ve t^* yansıma ve kırma katsayılarının sanal kısımları olmak üzere yansıtıcılık ve geçirgenlik $R = rr^* = |r|^2$ ve $T = \gamma_s\gamma_0 tt^* = 1 - R$ şeklinde bulunur (Pedrotti vd. vd. 1993).

İnce film tabakasına yüzeyin normali doğrultusunda gelen ($\theta_0 = 0$) ışın için transfer matris aşağıdaki gibi yazılır.

$$M = \begin{bmatrix} \cos\emptyset & \dfrac{i\sin\emptyset}{n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \\ in_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sin\delta & \cos\emptyset \end{bmatrix} \tag{2.94}$$

Transfer matris elemanları 2.93 eşitliğinde yerlerine yazılırsa

$$r = \frac{\gamma_0\cos\emptyset + \gamma_0\gamma_s\dfrac{i\sin\emptyset}{n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} - n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sin\emptyset + \gamma_s\cos\emptyset}{\gamma_0\cos\emptyset + \gamma_0\gamma_s\dfrac{i\sin\emptyset}{n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} + n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sin\emptyset + \gamma_s\cos\emptyset} \tag{2.95}$$

eşitliği elde edilir. Daha önce tanımlanan γ_0, γ_1 ve γ_s terimlerinin açılımları eşitlikte yerine yazılarak ve gerekli sadeleştirmeler yapılarak yansıma katsayısı;

$$r = \frac{n_1(n_0 - n_s)\cos\emptyset + i(n_0 n_s - n_1^2)\sin\emptyset}{n_1(n_0 + n_s)\cos\emptyset + i(n_0 n_s + n_1^2)\sin\emptyset} \tag{2.96}$$

elde edilir. Eşitlikten de anlaşılacağı üzere yansıma katsayısı komplex bir sayıdır ve eşleniği ile çarpılarak yansıtıcılık elde edilir.

$$R = rr^* = |r|^2 \tag{2.97}$$

$$R = \frac{n_1^2(n_0 - n_s)^2 \cos^2 \emptyset + (n_0 n_s - n_1^2)^2 \sin^2 \emptyset}{n_1^2(n_0 + n_s)^2 \cos^2 \emptyset + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2 \emptyset} \tag{2.98}$$

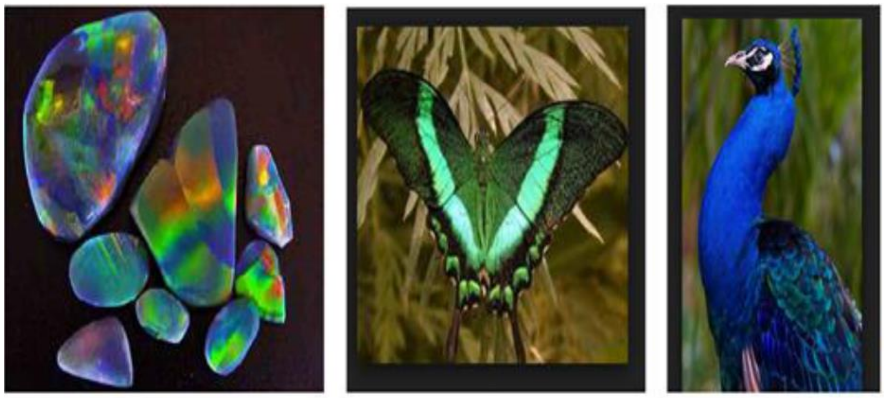
$T = \gamma_s \gamma_0 t t^* = 1 - R$ işlemi yapılarak

$$T = \frac{4 n_0 n_s}{n_1^2(n_0 + n_s)^2 \cos^2 \emptyset + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2 \emptyset} \tag{2.99}$$

elde edilir.

2.6 Fotonik Kristaller

Fotonik kristal (FC) yapılar doğada bulunmasına rağmen, bilim adamları tarafından ancak 20. yüzyılda yapay olarak üretilmeye başlamış ve çeşitli alanlarda günümüzde kullanılmaya devam etmiştir. Opaller, doğal fotonik kristallerin en çok bilinen örneklerindendir. Şekil 2.18'de gösterildiği gibi bazı kelebeklerin kanatlarının ve tavus kuşu tüylerinin renk pigmentleri içermediği halde fotonik kristal yapıları sayesinde güzel renklere sahip olduğu gözlemlenmiştir (Vukusic 2003, Tayeb vd. 2003, Thylen vd. 2004, Ghiradella 1991).



a) b) c)

Şekil 2.18 Doğada bulunan fotonik kristal örnekleri

a. Opaller, b. kelebek kanatları, c. kuş tüyleri

Periyodik bir ortamda EM dalgaların yayılımı ilk defa 1888'de Lord Rayleigh tarafından çalışılmıştır (Rayleigh 1888). Yapılan çalışmada periyodik olarak arka arkaya birleştirilmiş materyaller kullanılmıştır. Bu materyaller bir boyutta fotonik kristallere benzemektedir. Rayleigh bu materyallerin düzlemler boyunca ışığın geçişini yasaklayan dar bir bant aralığına sahip olduğunu göstermiştir. Periyodik yapılarla ilgili çalışmalar devam etse de, ancak 1987 iki ve üç boyutlarda fotonik bant aralıklı yapılar üretilmiştir (Yablonovitch vd. 1987). Fotonik kristallerin kullanım alanı oldukça fazladır. Bunlar lazer teknolojileri, fiber optik yapılar, yüksek hızlı optik bilgisayarlar, optik ara bellekler, ışığı bükebilen meta malzemeler, ışık yayan diyotlar, güneş pilleri vb.dir.

Fotonik kristaller üç parametre ile tanımlanır: örgü yapısı, periyot ve yapıyı oluşturan malzemelerin dielektrik sabitleri. Bu parametrelerin uygun seçimiyle, elektromanyetik dalgaların doğrusal yayılmasının yasak olduğu bir boşluk oluşturulabilir. Bu yasaklanmış frekans aralığı *fotonik bant aralığı* olarak adlandırılır.

Fotonik kristaller, sahip oldukları periyot sayısına göre ayırt etmek yaygındır. Bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristallerin örnekleri şekil 2.19'da gösterilmiştir. Tam bir fotonik bant aralığı elde etmek için gerekli ancak yeterli koşullar, periyodiklik ve yapının farklı dielektrik sabitine sahip malzemelerle oluşturulmasıdır (Joannopoulos vd. 2008).

E. Yablonovitch (1987), lokalize kusur modlarını kullanarak kendiliğinden emisyonu arttırmak için fotonik kristal adını verdiği üç boyutlu bir periyodik ortam kullanmayı önermiştir.

S. John (1987), elektromanyetik dalgaları sınırlandırmak için düzensiz üç boyutlu periyodik bir ortamın kullanılmasını önermiştir.

Zaman içinde fotonların sınır durumu ve kendiliğinden emisyonun üssel olmayan bozulması gibi birçok ilginç kuantum optik fikir öngörülmüştür. Bu fikirler, hem ışık-madde etkileşiminin temelinin anlaşılmasında hem de çeşitli yeni optoelektronik ve fotonik uygulamalarında beklenmeyen sonuçlara yol açan araştırma alanlarını teşvik etmiştir (Joannopoulos vd. 2008, Bjarklev vd. 2003, Sakoda 2004, Busch vd. 2004, Lourtioz vd. 2005).

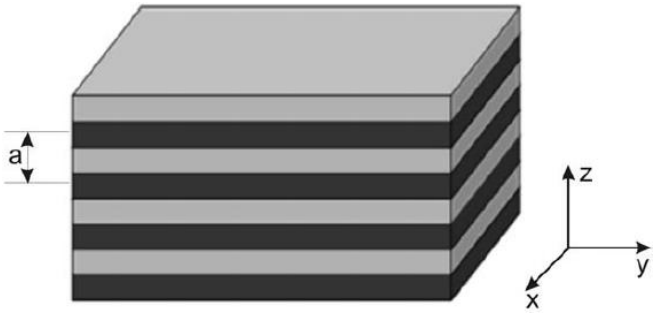


Şekil 2.19 Bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristal örnekleri

a) 1D fotonik kristal kesitinin SEM görüntüsü (Xifre vd. 2003) b) 2D fotonik kristal kesitinin SEM görüntüsü (Trifonov vd. 2005) c) 3D fotonik kristal kesitinin SEM görüntüsü (Cheylan vd. 2006)

2.7 Fotonik Bant Aralığı Yapısı

Fotonik kristaller şekil 2.20'de gösterildiği gibi genellikle birbiri ardına sıralanmış yüksek ve düşük kırılma indisine sahip dielektrik katmanlarından oluşur (Joannopoulos vd. 2008). Sistem z-doğrultusunda a periyoduyla kendini tekrar eder. z-doğrultusunda ilerleyen düzlem bir dalga iki ortam ara yüzeyinde yansıyacaktır. Bu durum, yapı içinde ileri ve geri hareket eden dalgalar oluşturur. Sonuçta yapı içinde duran dalgalar oluşur.



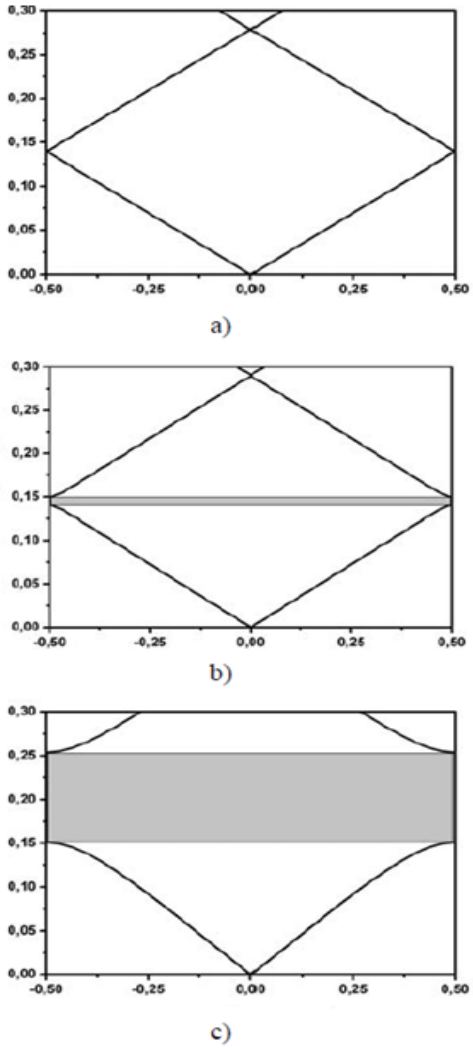
Şekil 2.20 1 boyutlu fotonik kristal bant yapısı. (Joannopoulos vd. 2008)

İzotropik bir dielektrik madde içinde ışığın dağılımı aşağıdaki denklemde verilmektedir:

$$\omega(k) = \frac{ck}{\sqrt{\varepsilon}} \tag{2.100}$$

c ışık hızı, k dalga vektörü ve ε dielektrik sabitidir. Bu denklem ışığın enerjisinin momentumla lineer olarak değiştiğini göstermektedir.

Çok katmanlı dielektrik yapıların dağınım ilişkisi şekil 2.21'de verilmiştir. a örneğinde, her iki dielektrik katman aynı dielektrik sabitine sahiptir ve tek bir malzeme levhasını oluşturur. (b) ve (c) örneklerinde farklı dielektrik sabitine sahip malzemelerden oluşan dielektrik yığın boyunca yayılan ışığın dağılımını göstermektedir.



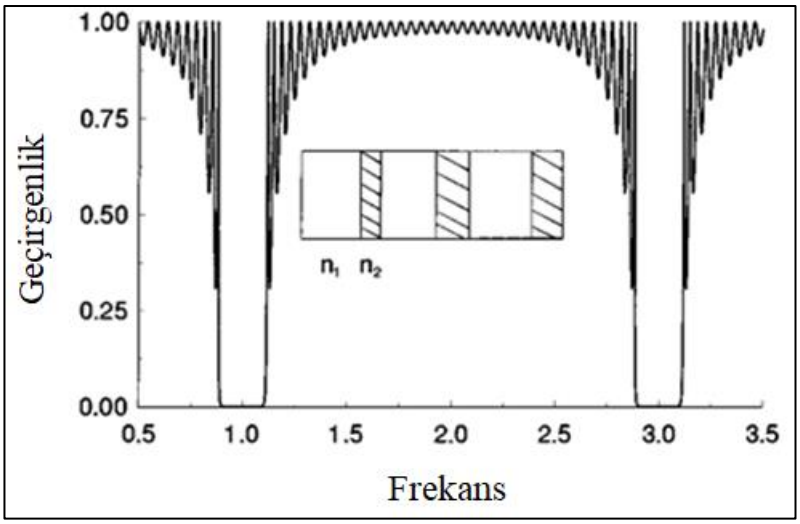
Şekil 2.21 Her biri 0.5a genişliğinde katmanlara sahip üç farklı çok katmanlı film için gösterilen fotonik bant yapıları

a) her katman aynı dielektrik sabitine ε = 13 sahiptir b) katmanlar ε = 13 ve ε = 12 arasında değişmektedir c) Katmanlar ε = 13 ve ε = 1 arasında değişmektedir. Fotonik bant aralıkları gölgeli alanlarla gösterilmiştir (Joannopoulos vd. 2008).

Bir boyutlu fotonik bant aralığı oluşturacak şekilde bir araya gelen farklı dielektrik sabitine sahip malzemelerin kalınlıkları referans dalga boyunun büyüklüğünün bir kesri, genellikle dörtte biri olacak şekilde seçilebilir. Bu durum çeyrek-dalga yığınını olarak adlandırılır. Dielektrik katmanların bu şekilde dizilmesinin bir sonucu olarak, girişim etkisi bazı dalga boylarının iletilmesine, "bant-aralığı" dalga boyu olarak adlandırılan referans dalga boyu merkezli dalga boyu aralığının tamamen yansıtılmasına neden olur.

Şekil 2.22'de, 20 periyottan, yani 40'ar adet yüksek ve düşük kırılma indisine sahip katmandan oluşan bir çeyrek dalga yığınında frekansa karşı ışığın iletiminin grafiği gösterilmektedir. Grafikte 1.00 değeri, iletilen sinyalin %100'üne karşılık gelmektedir. Örnek için iki dielektrik malzeme seçilmiştir. n_2= 1.41 kırılma indisine sahip bir cam ve n_1 = 1 kırılma indisine sahip olan hava (Scalora vd. 1998).

İletimin neredeyse bir olduğu bir dizi iletim rezonansı ve iletimin neredeyse sıfır olduğu iki bant aralığı gösterilmiştir. Bu rezonanslar ve boşluklar daha yüksek frekanslarda ve sonsuzda tekrar eder. Pratik açıdan sadece ilk birkaç rezonans ve boşluk önemlidir.



Şekil 2.22 PBG yapısının frekansa karşı iletim grafiği (Scalora vd. 1997)

Şekil 2.22'den de anlaşılacağı üzere referans dalga boyu ve çevresindeki dalga boylarında gelen ışık yapı içinde ilerleyemeyecektir. Diğer bir değişle çok katmanlı yapı, aralığın üstündeki ve altındaki dalga boylarına geçirgen olacaktır. Spektrumda sıfır olarak verilen bu kısımlar bant aralıklarına neden olurlar (Scalora vd. 1998).

2.8 Işığın Metal ve Dielektrik Ortamlarla Etkileşimi

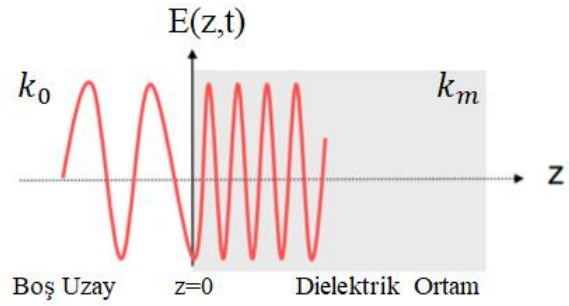
Optik kaplamada malzemeler genellikle iki ayrı sınıfa ayrılırlar, metaller ve dielektrikler. Dielektrik malzemelerin yok etme katsayıları (n_i) ihmal edilebilecek kadar

küçüktür ve tüm optik özelliklerini kırılma indisi ($n = c/v_m = \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_0}$) belirler. Bu yüzden ışık dielektrik malzemelerin içinden kayıpsız ilerler. Metallerde ise optik özellikler komplex bir kırılma indisi ($\tilde{n} = n - in_i$) ile belirlenir.

Maxvell denklemleri dielektrik ortam için çözüldüğünde (+z yönünde ilerleyen dalga için)

$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0}\sin(k_m.z - \omega t + \emptyset) \tag{2.101}$$

eşitliği elde edilir. Eşitlikten de anlaşılacağı gibi dalga, genliği değişmeden dielektrik ortam içinde ilerler (Şekil 2.23).



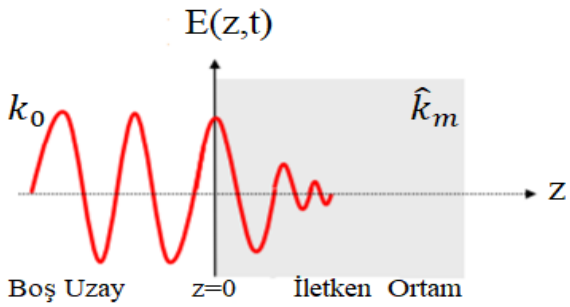
Şekil 2.23 Dielektrik ortamda ilerleyen dalga

Maxvell denklemleri iletken (metal) ortam için çözüldüğünde (+z yönünde ilerleyen dalga için)

$$\vec{E}(z,t) = \overrightarrow{E_0}e^{-\frac{\omega}{c}n_i z}e^{i\left[\frac{\omega}{c}nz-\omega t+\emptyset\right]} \tag{2.102}$$

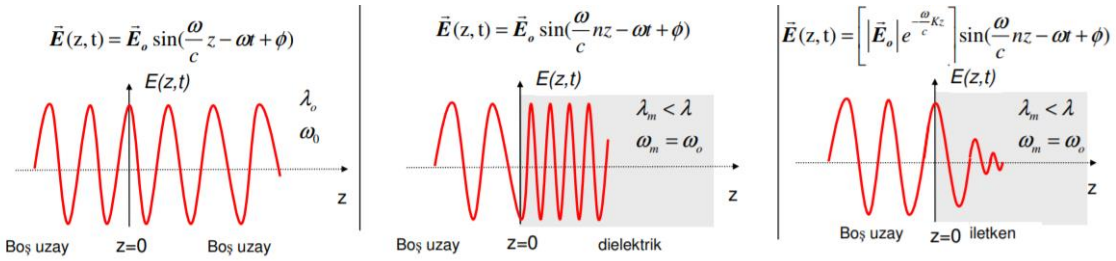
$$\vec{E}(z,t) = E(z)e^{i\left[\frac{\omega}{c}nz-\omega t+\emptyset\right]} \tag{2.103}$$

eşitliği elde edilir. Eşitlikten de anlaşılacağı gibi dalga, genliği azalarak iletken ortam içinde ilerler (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 İletken ortamda ilerleyen dalga

Karşılaştırma amacıyla ışığın boşlukta, dielektrik ortamda ve iletken ortamda hareketi şekil 2.25'de verilmiştir.

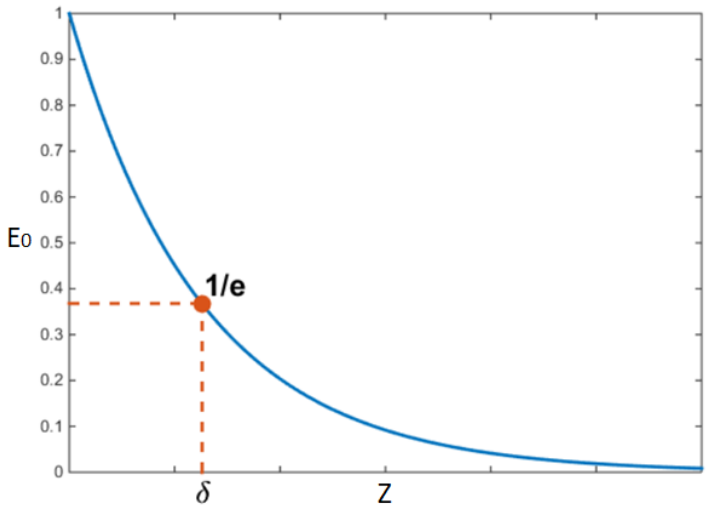


Şekil 2.25 İletken ortamda ilerleyen dalga

2.9 Sızma Derinliği

Işık, neredeyse tamamı geri yansıtılmadan önce metal içerisinde kısa bir mesafe de olsa ilerler. Bu kısa mesafede gelen ışığın %1'lik bir kısmı soğurulur ve ısı olarak ortaya çıkar. Bu mesafeye sızma derinliği (δ) adı verilir. Sızma derinliği, metal yüzeyine gelen ışığın dalga boyuna bağlıdır.

Sızma derinliği, yüzeye gelen elektrik alan yoğunluğunun (genliğin) metal içinde $1/e$'sine düştüğü mesafe olarak da tanımlanır (Şekli 2.26).



Şekil 2.26 Metal içinde ilerleyen ışığın sızma derinliği

Sızma derinliği (δ), kırılma indisinin sanal kısmıyla ve gelen ışığın dalga boyuyla ifade edilir.

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi n_i} \tag{2.104}$$

Gümüş (Ag) film ($n_i = 3$) yüzeyine $\lambda = 500$ nm dalgaboylu ışık düşürüldüğünde sızma derinliği yaklaşık 13 nm'dir. Öte yandan dalgaboyu mikro dalga mertebesinde olan dalgalar için $n_i = 10^4$ civarındadır ve sızma derinliği mikron mertebesindedir. Bu durum metal yüzeyine gelen farklı dalga boylarındaki ışıkların metal içinde belirtilen mesafeleri kat ettikten sonra yansıması gerektiğini söyler.

20 nm kalınlığındaki bir metal film görünür dalgaboyundaki ışık için kalın, radyo dalgaları ya da mikro dalgalar için oldukça ince bir filmdir. İyi iletken bir metalin mikro dalga mertebesi için kırılma indisinin hem gerçek (n) hem de sanal kısmı (n_i) 10^4 mertebesindedir (Palik, 1998).

Mikro dalga mertebesinde bir dalganın metal içinde ki dalgaboyu, $\lambda = \lambda_0/n \approx 10^{-6}$ m'dir. Fiziksel kalınlığı (d) 10 nm olan bir metal filmin optik kalınlığı (OT) 10^{-4} m olduğuna göre bu kalınlık mikro dalgalar için 100 λ optik kalınlığa eşdeğerdir. Bunun

anlamı 10 nm kalınlığındaki ince metal film mikro dalga mertebesindeki dalgalar için aşılamaz bir potansiyel engel oluşturacaktır. Bu yüzden metaller mikro dalgalar için tamamen opaktır. Sızma derinliği olgusu periyodik yapının bozulduğu ve kırılma indisleri arasındaki farkın azaldığı durumlarda etkisini yitirecektir.

2.10 Kalkanlama Teorisi ve RF Kalkanlama Etkinliği (SE)

Kalkanlama; iki ortamı birbirinden elektromanyetik alanda izole etmek olarak tanımlanabilir (Sevgi, 2000). İstenmeyen elektromanyetik dalgaların olumsuz etkilerinin azaltılması amacı ile yapılan elektromanyetik kalkanlama işlemleri elektronik cihazların uygun ortam şartlarında çalışabilmeleri için son derece önemlidir. Kalkanlama bir cihazdan içeri (veya dışarı) doğru giren (çıkan) kaçak alanların azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. SE (shielding efficiency) kalkanlamanın ne derece etkili olduğunu gösteren bir parametre olup, desibel (dB) olarak ifade edilmektedir.

Şekil 2.27'de d kalınlığındaki bir duvarda kalkanlama etkisini oluşturan bileşenler görülmektedir. Kalınlığı d olan malzeme içinde elektromanyetik dalgalar üç şekilde zayıflatılmaktadır. Birincisi duvardan yansımalar, ikincisi duvar içindeki soğurulması nedeniyle zayıflamalar ve üçüncüsü ise duvar içerisindeki çoklu yansıma kayıplarıdır. Kalkanlama performansı, kullanılan malzemelerin özelliklerine, çalışma frekansına ve gücü yayan kaynaklara bağlıdır. Pratikte, kalkanlama için aşağıdaki noktalar önemlidir:

a. Kalkanlama, elektrik alanın düşük frekanslarda yansıtılması ve yüksek frekanslarda soğurulması ile gerçekleşir.

b. Kalkanlama, manyetik alanın düşük frekanslarda soğurulması ile gerçekleşir.

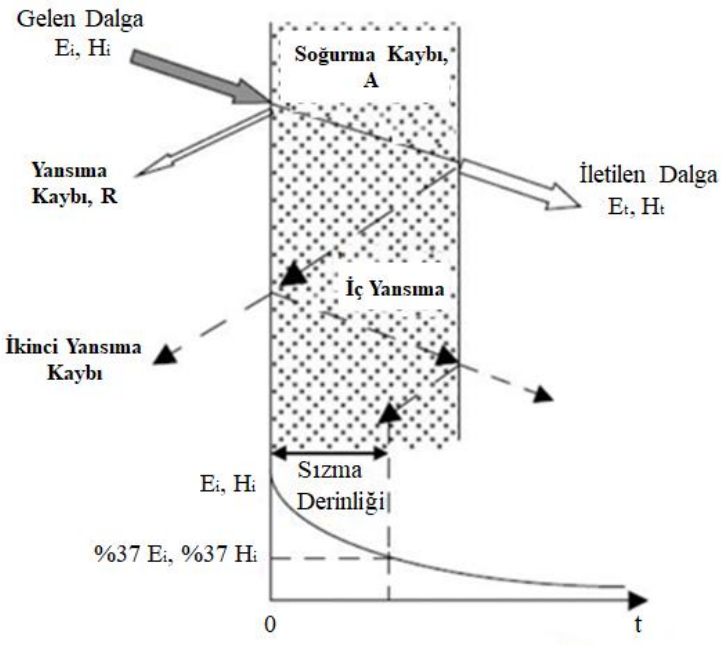
c. Yüksek iletkenlik, yansıma ve soğurmayı pozitif yönde etkiler.

d. Yüksek manyetik geçirgenlik yüksek soğurulmaya neden olurken, düşük yansıma oluşturur.

e. Kalkan (metal) kalınlığı arttıkça soğurulma artar.

f. Manyetik alan için kalın yapılara ihtiyaç duyulurken elektrik alan için ince yapılar kullanılabilir.

g. Kaynak ile yapı arasındaki uzaklık yansıma özelliklerini değiştirir.

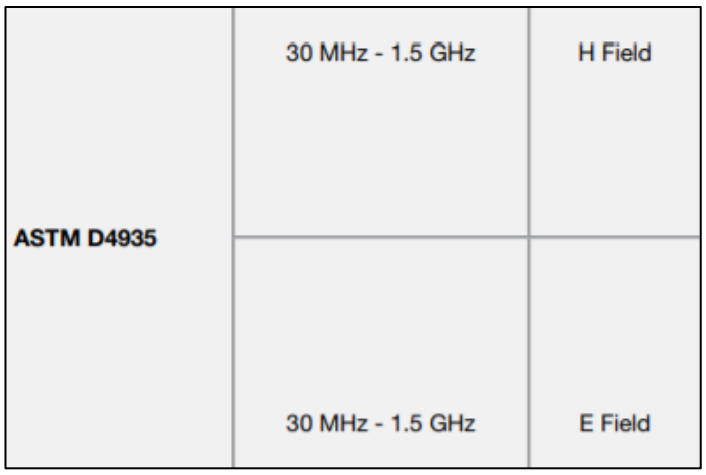


Şekil 2.27 Elektromanyetik alanın kalkanlama yapılarak azaltılması

ASTM D4935-10 (Düz Yüzeylerin Kalkanlama Etkinliğini Ölçmek için Standart Test Yöntemi) standardına göre kalkanlama etkinliğinin (SE) genel tanımı genellikle bir korumanın verimliliğini belirlemek için kullanılır. Bu standarda göre sonlu, düzlem yüzeylerin elektrik ve manyetik alan için kalkanlama yapılabildiği frekans aralıkları şekil 2.28'de verilmiştir. İnce film yüzeyine, yüzeyin normali doğrultusunda gelen dalga için SE,

$$SE = 20\log_{10}\frac{|E_i|}{|E_t|} \tag{2.105}$$

eşitliği ile hesaplanabilir. E_i ve E_t, film yüzeyine gelen ve iletilen elektrik alan büyüklükleridir (Ohring, 1992).



Şekil 2.28 ASTM D4935-10 standardına göre sonlu, düzlem yüzeylerin elektrik ve manyetik alan için kalkanlama yapılabildiği frekans aralıkları

Bir boyutlu, N katmanlı metal-dielektrik fotonik bant aralığı (MD-PBG) yapısı şekil 2.20'de gösterilmiştir. Yapının sahip olduğu periyot sayısı p ile tanımlanmıştır. d_A, σ_A ve ε_{rA}, A ortamının fiziksel kalınlığı, iletkenliği ve bağıl dielektrik sabiti, d_B, σ_B ve ε_{rB}, B ortamının fiziksel kalınlığı, iletkenliği ve bağıl dielektrik sabitidir.

Çok katmanlı, metal ve dielektrik ince filmlerle oluşturulan yapılarda, SE toplam transfer matrisinin (M_T) elemanları kullanılarak ifade edilebilir (Sarto vd. 2002).

$$SE = 20\log\{0.5[M_T(1,1) + M_T(2,2) + \eta_0 M_T(2,1) + \eta_0{}^{-1} M_T(1,2)]\} \quad (2.106)$$

η_0 ($\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \cong 120\pi \cong 377\ \Omega$) boş uzayın empedansı ve $M_T(i,j)$ N katmanlı ve p periyotlu optik bir film için hesaplanan 2x2 toplam transfer matrisinin ($M_T = (M_A M_B)^p M_A$) elemanlarıdır.

$$M_T = M_A M_B = \left(\begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{\gamma_A} \\ i\gamma_A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{\gamma_B} \\ i\gamma_B & 0 \end{bmatrix} \right)^p \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{\gamma_A} \\ i\gamma_A & 0 \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

Şekil 2.20'de verildiği gibi A katmanı iletkenliği yüksek olan metal ve B katmanı iletkenliği düşük dielektrik malzeme olsun. Metal filmin kalınlığı sızma derinliği civarındaysa, kalkanlama etkisi metal-dielektrik ara yüzeyinde oluşan yansıma ve metal içindeki soğurma mekanizmasıyla elde edilir. Bu yüzden 30 MHz'den 1,5 GHz'e kadar olan frekans aralığında, dielektrik malzemelerin transfer matrisi birim matrisine (I) eş değerdir (Sarto vd. 2003). Bu durumda toplam transfer matrisi,

$$M_T = M_A M_B = \left(\begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{\gamma_A} \\ i\gamma_A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^p \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{\gamma_A} \\ i\gamma_A & 0 \end{bmatrix} \tag{2.108}$$

$$M_T = {M_A}^p M_A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{\gamma_A} \\ i\gamma_A & 0 \end{bmatrix}^{p+1} \tag{2.109}$$

elde edilir. Bu sonuç toplam kalınlığı $d_{A,tot}$ olan, tek katman kalın metal filmin transfer matrisidir. Toplam metal kalınlığı aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi ifade edilir.

$$d_{A,tot} = \sum_{i}^{N} d_{Ag,i} \tag{2.110}$$

Hesaplamaların sonucu metal ve dielektrikten oluşan çok katmanlı yapının tek katman kalın metal film gibi davranacağını gösterir. Metal, iyi iletken ($\sigma \gg \omega\varepsilon$) ve buna izin verecek kalınlıkta ($d > 10\,nm$) olduğu zaman SE aşağıdaki şekilde verilebilir ve SE toplam metal kalınlığına ($d_{A,tot}$) ve metal malzemenin iletkenliğe (σ_A) bağlıdır (Tamburrano ve Sarto, 2004).

$$SE = 20\log_{10}\left(\frac{\eta_0 d_{A,tot}\sigma}{2}\right) = 45{,}51 + 20\log_{10} d_{A,tot}\sigma_{A,tot} \tag{2.111}$$

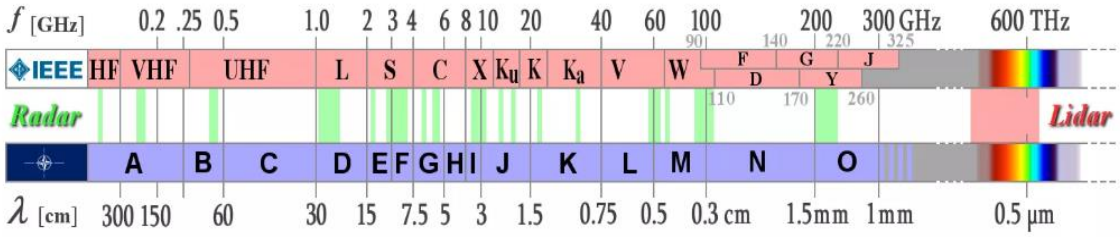
Frekans küçüldükçe ($f \to MHz$), tek katman metal film için kalkanlama etkinliği (SE_0), aşağıdaki eşitlikle verilebilir.

$$SE_0 = \lim_{f \to MHz}(SE) = 20\log_{10}\left(1 + \frac{\eta_0 d\sigma}{2}\right) \quad (2.112)$$

Basit bir hesap yapılarak $SE_0 \cong SE_0$ olduğu görülecektir.

Film kalınlığı $d > 2\delta$ olduğunda kalkanlama etkinliği artan film kalınlığıyla beraber artacaktır (Amore vd. 2009).

Bugüne kadar frekans bantlarını tanımlamakta kullanılan geçerli iki sistem şekil 2.29'da yan yana gösterilmektedir. IEEE tarihsel kökenleri olan ve kısmen 2. Dünya Savaşından gelen seçimi benimsemiştir. NATO'da bant sınırları için farklı bant bölgelerinde teknolojileri ve ölçüm imkânlarına uyumlu yeni bir frekans bant çizelgesi kullanılmaktadır. Bant sınırları yaklaşık logaritmik bölünmüştür ve sistem yukarı doğru açık olduğundan daha alt frekans bantlarının kolayca tanımlanmasına imkân vermektedir. Bu tanımlama sistemi de yine askeri kökenlidir ve radarların çok önemli bir rol oynadığı elektronik savaşa dönük bir bant dağılımıdır.



Şekil 2.29 Radarlarda kullanılan frekans ve dalga boyu bantları

Yapılması planlanan tasarımla 1,5 GHz'e kadarlık bir bölgede kalkanlama amaçlanmıştır. Eski askeri standartlara göre L bandına karşılık gelen bu aralık yeni sistemde D bandına karşılık gelmektedir. Bu frekans bandı 400 km gibi çok uzun menzilli radarlar için çok uygundur. Bu bantta sivil iletişim servislerinden kaynaklanan parazitlerin çok az oluşu radarın çok yüksek güçle geniş bantlı sinyallerin gönderebilmesine imkân sağlar. Uçuş güvenlikte bu frekans bandını seyir trafik radarları ve hava rotası gözetim radarları kullanırlar.

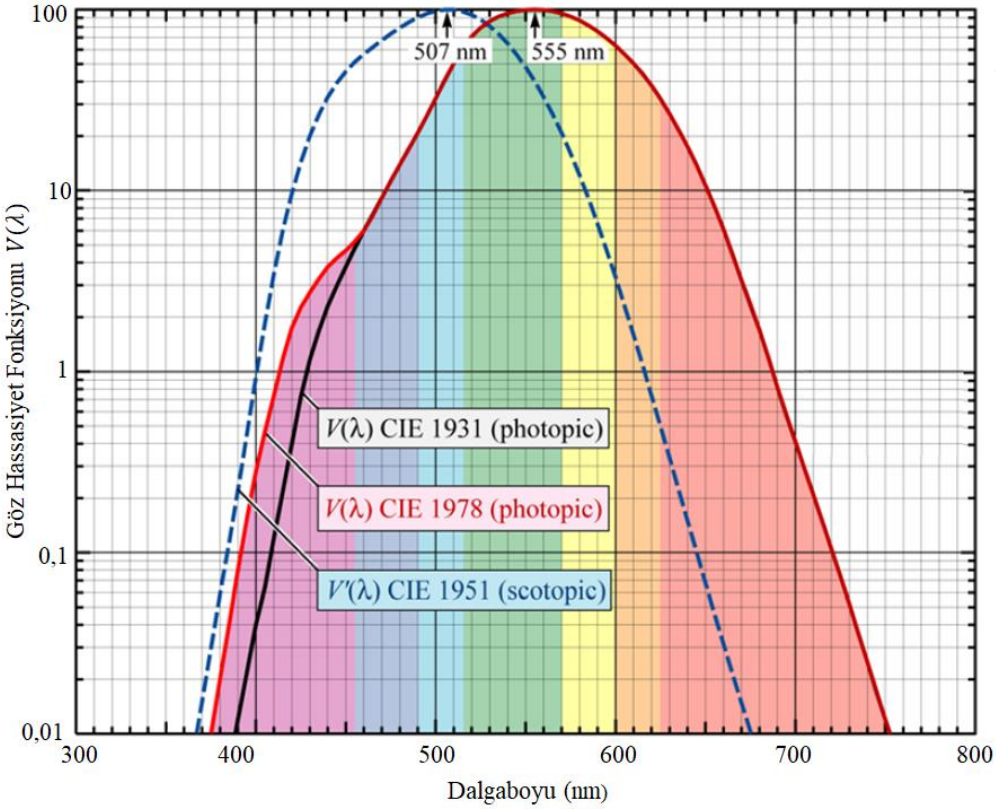
2.11 İnsan Gözü Hassasiyeti

İnsan gözü, 1 W gücünde yeşil ışık yayan ışık kaynağını, aynı güçte kırmızı ışık yayan başka bir kaynaktan daha parlak görecektir, çünkü göz yeşil bölgede daha hassastır. İnsan gözü, dalgaboyu 400 nm (menekşe) ve 700 nm (kırmızı) arasında olan ışık dalgasına duyarlıdır. 400 nm'den (ultraviyole, UV) kısa veya 700 nm'den uzun (kızılötesi, IR) dalga boyları görünür değildir.

Göz, yüksek veya düşük ışık koşullarında farklı şekilde tepki verir: gün ışığında, 3 cd/m2 üzerindeki parlaklık seviyeleri için görme esas olarak retinanın merkezi tarafından yapılır ve maksimum hassasiyet 555 nm'dedir (yeşil bölge). Bu görüşe *fotopik görüş* denir.

Düşük ışık koşullarında, 30 μcd/m2'nin altındaki parlaklık seviyeleri için, görme esas olarak retinanın çevresel bölgesi tarafından yapılırken, merkez bölge herhangi bir rengi görecek kadar hassas değildir. Bu görüşe *scotopik görüş* denir. Maksimum hassasiyet 507 nm'dedir (mavi-yeşil bölgede) ve kırmızı ışık neredeyse görünmez.

Göz hassasiyeti fonksiyonu $V\ (\lambda)$ aynı zamanda standart parlaklık fonksiyonu olarak da adlandırılır ve fotopik görü için, yayılan enerji (Watt) ve ışık akısı (Lümen) arasında bir dönüşüm tanımlamak için kullanılır. Göz hassasiyeti ya da standart parlaklık fonksiyonu $V(\lambda)$ şekil 2.30'de verilmiştir.



Şekil 2.30 İnsan gözünün hassasiyeti

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Essential Macleod

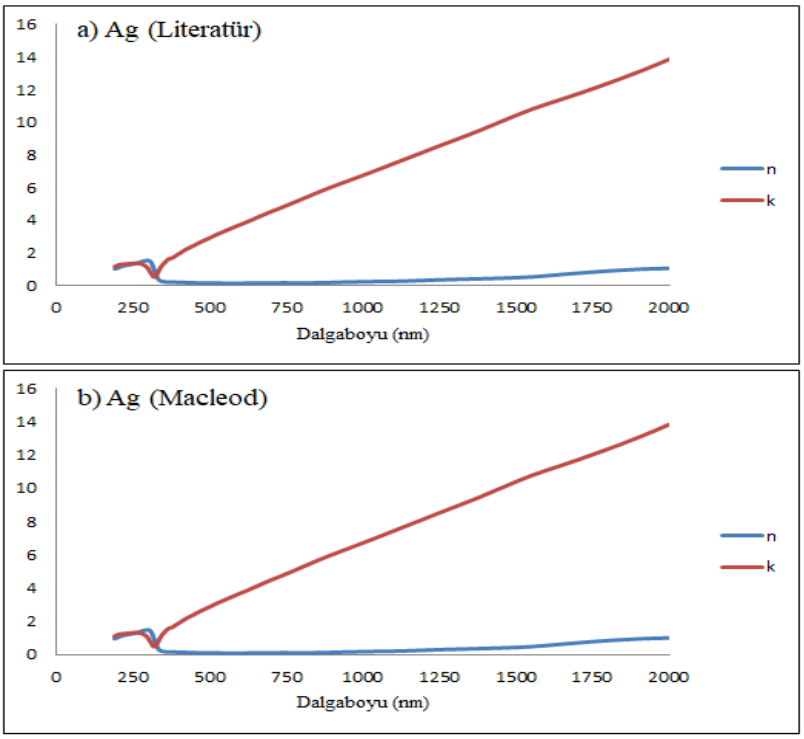
Essential Macleod, kuramsal temellerde anlatılan ince film teorisini temel alarak oluşturulmuştur. Çok katmanlı ince film optik kaplamaların tasarım ve analizinden, üretilmiş ürünlerin tersine mühendisliğine kadar geniş bir yelpazedeki işlemleri yerine getirebilen kapsamlı bir yazılımdır. Angus Macleod tarafından geliştirilmiştir.

3.2 Kullanılan Malzemeler

Metal-Dielektrik çok katmanlı ince film yığınlar görünür dalgaboyu aralığında yüksek geçirgenlik sağlayan ve diğer dalgaboylarında yansıma yapabilen yapılardır. Kullanılan metal ince filmler sayesinde RF kalkanlama özelliği gösterirler.

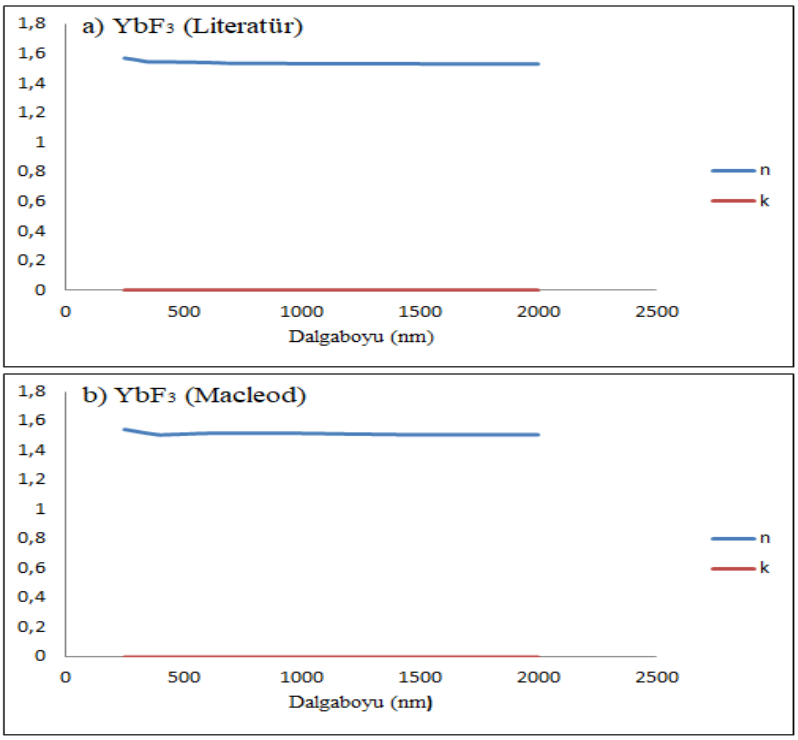
Bu çalışmada 400-700 nm arasında yüksek geçirgenlik sağlayan ve 1,5 GHZ'e kadar frekanslarda 43 dB ve üzeri kalkanlama yapabilen çok katmanlı, periyodik ve asimetrik metal-dielektrik ince film kaplamaların tasarımı yapılmıştır.

Tasarımda metal olarak Gümüş (Ag), dielektrik olarak İterbiyum Florür (YbF_3) kullanılmıştır. Her iki malzemeye ait kırılma indisleri Essential Macleod programının kütüphanesinden alınmıştır ve literatürde verilen kırılma indisleriyle eşleştiği görülmüştür (Şekil 3.1-3.2). Alttaş olarak ise kırılma indisi 1,518 olan cam kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Gümüş için kırma indislerinin karşılaştırılması

a) Literatür bilgisi, b) Essential Macleod programı kütüphanesi



Şekil 3.2 İterbiyum Florür için kırma indislerinin karşılaştırılması

a) Literatür bilgisi, b) Essential Macleod programı kütüphanesi

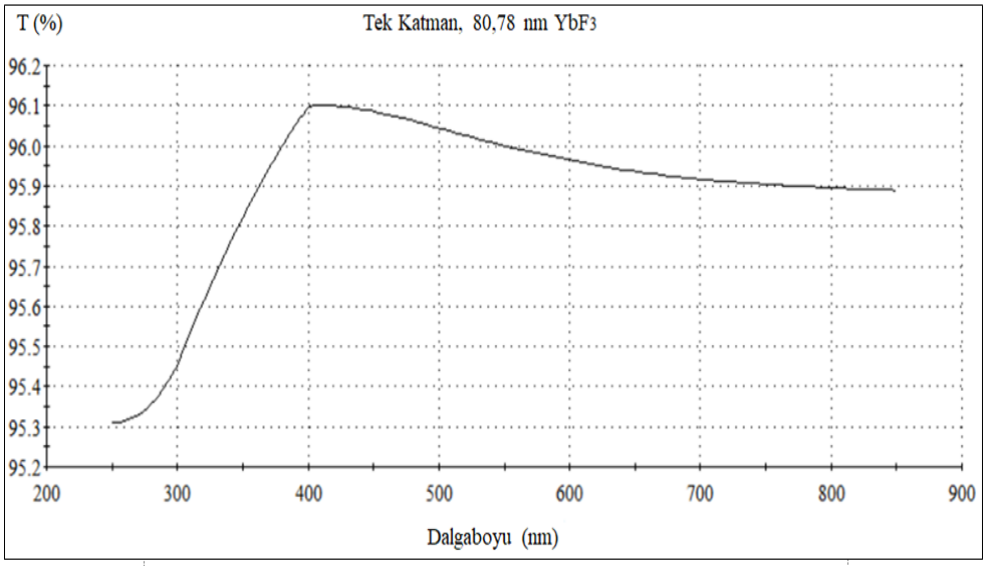
Ag, yaklaşık 320 nm'de ki plazma rezonansı, kırılma indisinin gerçek kısmının görünür dalgaboyu aralığında oldukça düşük olması ve iletkenliğinin fazla olması nedeniyle (Çizelge 3.1) Alüminyum (Al), Altın (Au) ve Bakır (Cu) gibi diğer metallere göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle optik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Palik, 1998).

Çizelge 3.1 Bazı metallerin iletkenliklerinin karşılaştırılması

Metaller	**Elektrik İletkenliği (S/m)**
Gümüş	6,67E+07
Bakır	6,40E+07
Alüminyum	4,00E+07
Pirinç	1,70E+07
Nikel	9,70E+06
Çelik	6,30E+06
Paslanmaz Çelik	1,80E+06
Grafit	5,00E+04

YbF_3 ara katman malzemesi olarak seçilmiştir. ITO gibi diğer yarı iletken malzemelere kıyasla, nispeten düşük bir yok etme katsayısına sahiptir. Ayrıca 175 nm-25 μm (UV-FIR) aralığında oldukça yüksek geçirgenlik sergilemektedir (%96). Aralayıcı olarak diğer dielektrik malzemelere göre düşük kırma indisine sahip olması düşük geçirgenlik veriyor olsa da, basit üretim yöntemleri ve uzun dönem kullanılabilir olması en büyük avantajıdır (Zhang vd. 2013).

Görünür dalgaboyu aralığında maksimum geçirgenliği sağlayabilen tek katman YbF_3 kalınlığı, programla yapılan denemeler sonucunda 80,78 nm olarak belirlenmiştir (**Şekil 3.3**). Ancak MD-PBG yapıda geçirgenliğin arttırılması için dielektrik katman kalınlıkları farklılıklar gösterebilmektedir.



Şekil 3.3 Tek katman 80,78 nm YbF_3 geçirgenlik grafiği

MD-PBG çok katmanlı ince film yığınlarda ışığın geçirgenliği ve kalkanlama etkisi arasındaki dengeyi katmanların ayrı ayrı kalınlıkları ve toplam metal kalınlığı belirler. Bu nedenle görünür dalgaboyu aralığında yüksek geçirgenlik ve yüksek RF kalkanlama etkinliği bir arada elde edilemez. Birinde kazanç sağlamak diğerinde kayba neden olacaktır. Bu yüzden kullanılacak film kalınlıklarının isterler doğrultusunda optimize edilmesi gerekmektedir.

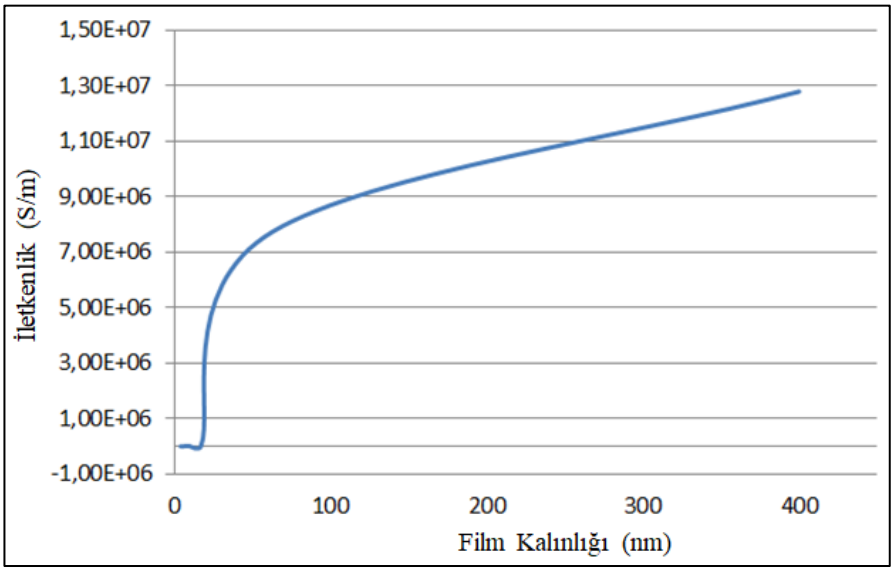
Kalkanlama etkinliğinden metal sorumludur. Toplam metal kalınlığının artması iletkenliği yani kalkanlamayı arttırır. İletkenliğin ve kalkanlama etkinliğinin metal kalınlığıyla olan değişimi çizelge 3.2'de verilmiştir. Kalın Ag filmin iletkenlik değeri karşılaştırma için verilmiştir.

Çizelge 3.2 Farklı kalınlıklardaki metal filmlerin iletkenlik ve kalkanlama etkinliği değerleri

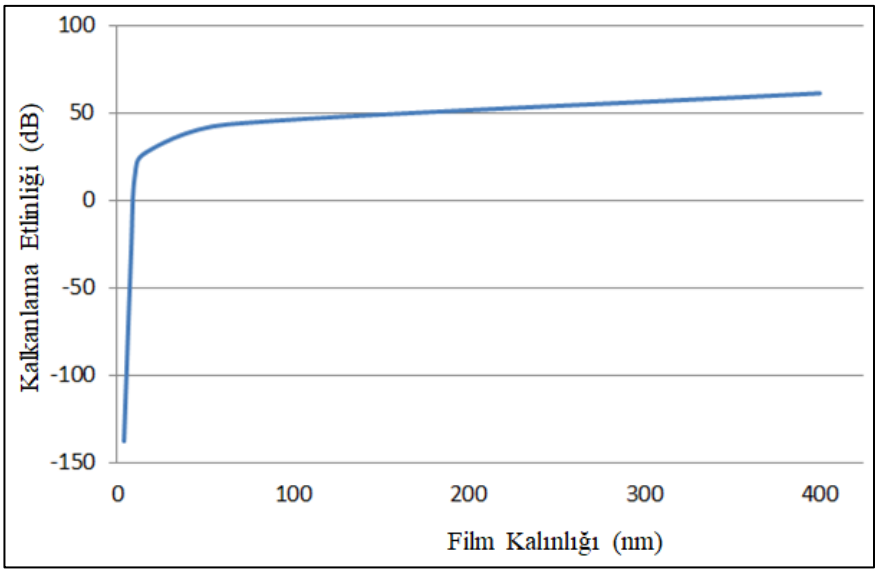
Kalınlık (nm)	4	8	10	17	63	400	Kalın Ag Film
Kalınlık (m)	4,00E-08	8,00E-08	1,00E-08	1,70E-08	6,30E-08	4,00E-07	Kalın Ag Film
Elektrik İletkenliği (S/m)	1,73E-02	2,09E+03	2,39E+06	7,75E+06	1,28E+07	1,56E+07	6,67E+07
SE (dB)	-137,68	-30,03	13,08	27,91	43,64	61,41	-

4 nm'den 400 nm'ye kadar değişen kalınlıklarda SE değerleri, literatürden elde edilen iletkenlik değerleri yardımıyla eşitlik 2.91 kullanılarak hesaplanmıştır. Ag filmin kalınlığına göre iletkenliğinin değişimi şekil 3.4'de, kalkanlama etkinliğinin değişimi şekil 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.2'de de görüldüğü üzere 10 nm altında olan Ag filmin iletkenliğinin hızlı bir şekilde düştüğü belirlenmiştir (Bender vd. 1998). Bu düşüşe bağlı olarak kalkanlama etkinliği de keskin bir düşüş yaşamış ve negatif değerler elde edilmiştir.

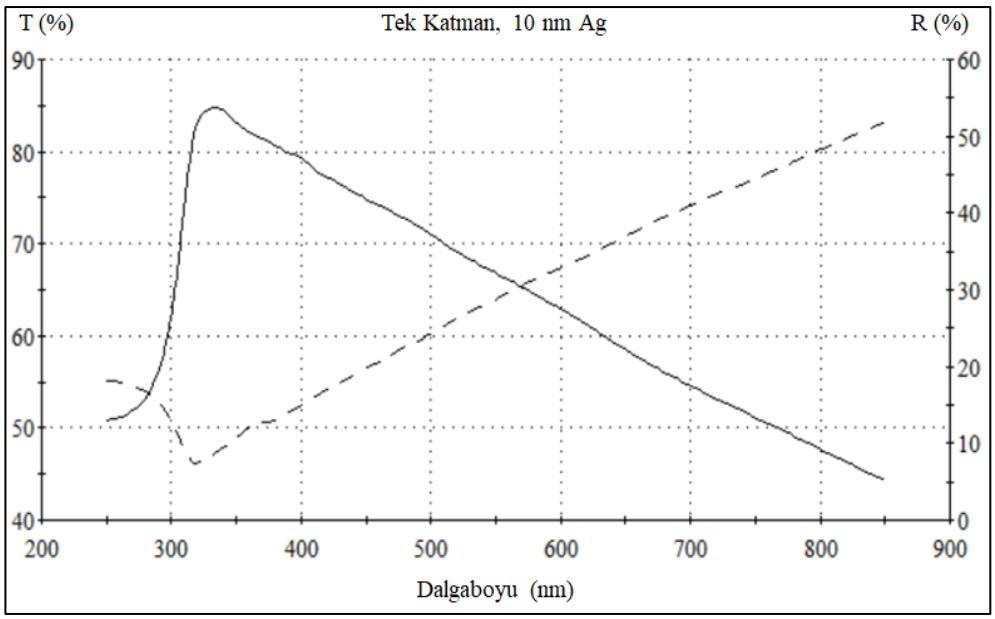


Şekil 3.4 Ag kalınlığına göre iletkenlik değişimi

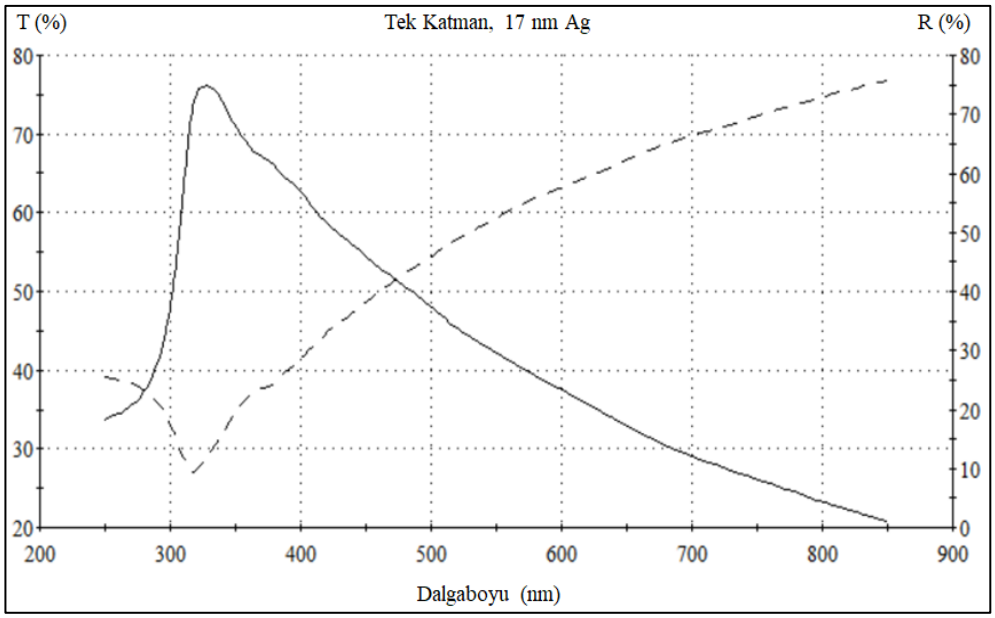


Şekil 3.5 Ag kalınlığına göre kalkanlama etkinliği değişimi

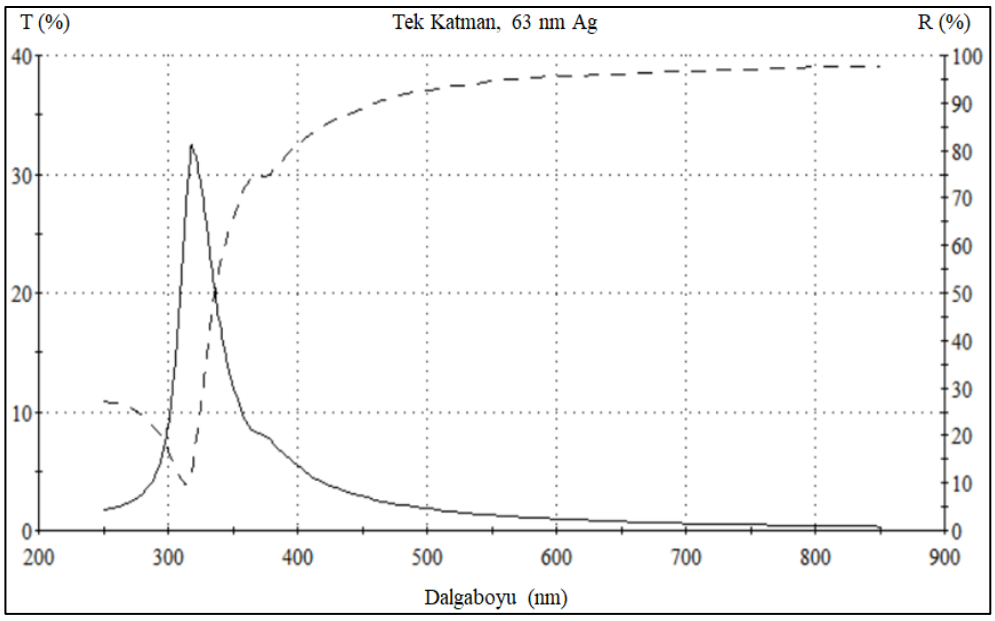
Çizelge 3.2'de verilen tek katman metal filmlerin görünür dalgaboyu aralığındaki geçirgenlik grafikleri program kullanılarak elde edilmiştir. Artan metal kalınlığının geçirgenliği oldukça hızlı bir şekilde düşürdüğü, aynı şekilde yansıtıcılığı arttırdığı görülmektedir (Şekil 3.6-3.9).



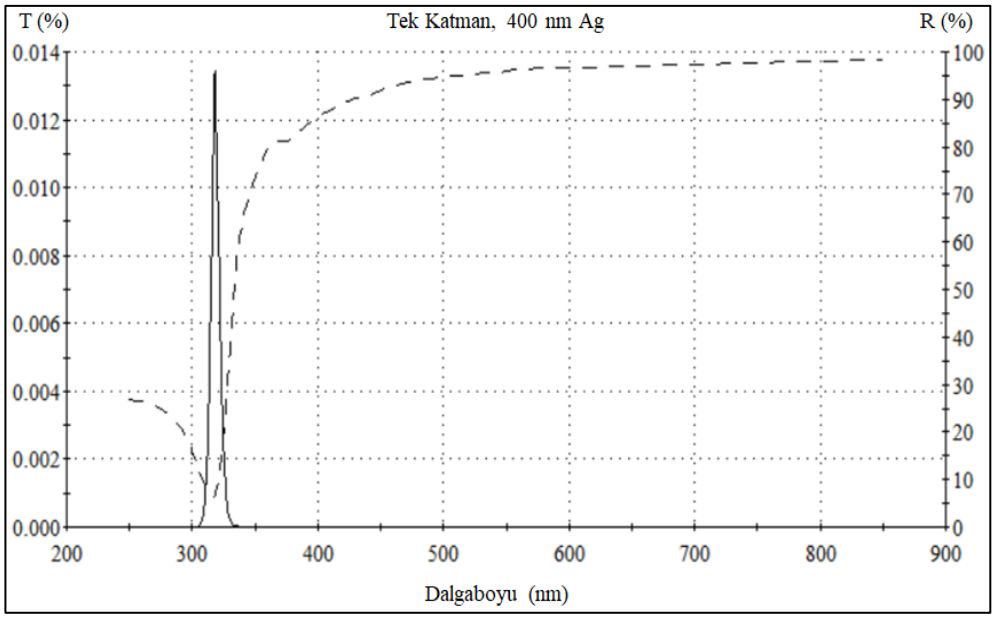
Şekil 3.6 10 nm Ag görünür dalgaboyu aralığında geçirgenlik ve yansıtma grafiği



Şekil 3.7 17 nm Ag görünür dalgaboyu aralığında geçirgenlik ve yansıtma grafiği



Şekil 3.8 63 nm Gümüş'ün görünür dalgaboyu aralığında geçirgenlik ve yansıtma grafiği



Şekil 3.9 400 nm Gümüş'ün görünür dalgaboyu aralığında geçirgenlik ve yansıtma grafiği

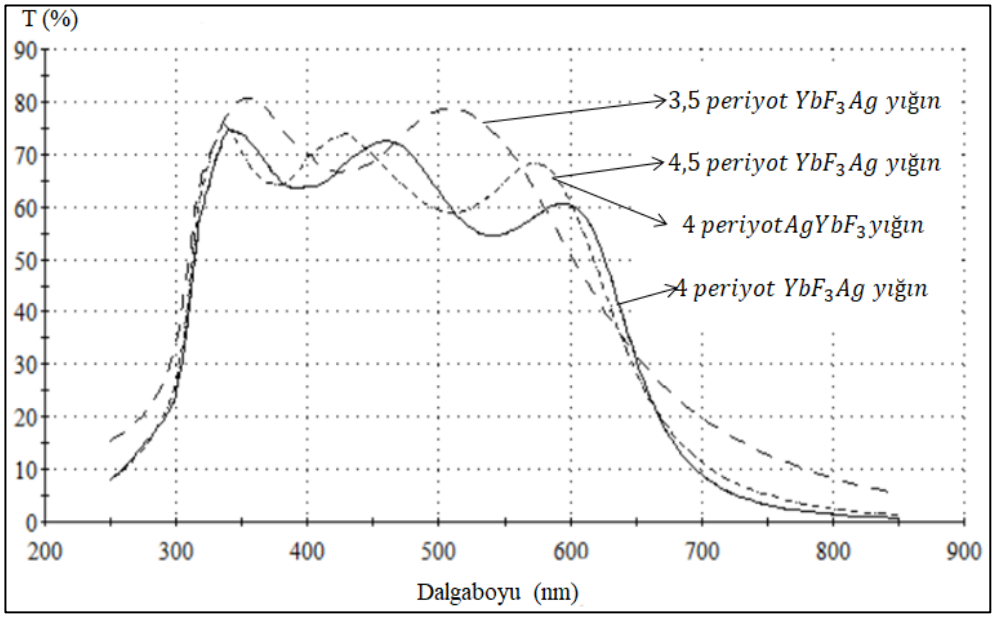
17 nm kalınlığında Ag'nin bile yansıtmanın oldukça yüksek olması göz önüne alınırsa ince film yığınına gelen ışığın karşılaşacağı ilk katmanın Ag olmaması gerekmektedir. Bu durum üç şekilde düzenlenebilir.

1- Alttaş üzerine sırasıyla Ag (10 nm) ve YbF_3 (80,78 nm) yerleştirilerek son katmanın YbF_3 olması sağlanır.
2- Alttaş üzerine sırasıyla YbF_3 (80,78 nm) ve Ag (10 nm) yerleştirilir. Son katmandaki Ag üzerine YbF_3 katman eklenerek, son katmanın YbF_3 olması sağlanır. Yığının periyot sayısı 0,5 arttırılır.

3- Alttaş üzerine sırasıyla YbF_3 (80,78 nm) ve Ag (10 nm) yerleştirilir. Son katmandaki Ag çıkarılarak, son katmanın YbF_3 olması sağlanır. Yığının periyot sayısı 0,5 azaltılır.

Her duruma ait geçirgenlik grafiği, 4 periyotlu yığın için Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Son katmanı Ag olan örnek karşılaştırma için verilmiştir. Yığının periyot sayısı artsa da azalsa da son katmanı Ag olan yığına göre daha yüksek geçirgenlik göstermiştir.

Özelikle son katmandaki Ag'nin çıkartılarak toplam metal kalınlığının azaltılması geçirgenliğe pozitif etki yapmıştır. Ancak azalan metal kalınlığı nedeniyle kalkanlama etkinliği olumsuz etkilenecektir. Ayrıca yapılan denemede görülmüştür ki birinci ve ikinci durumlarda Ag ve YbF_3 yerleşimi birbirinin tersi olsa da aynı geçirgenlik grafiğini çizmişlerdir. Her iki durumda da aynı olan toplam metal kalınlığı nedeniyle benzer geçirgenlikler elde edilmiştir. Bu durum göz önüne alınarak hem toplam malzeme kalınlığının daha az olması hem de alttaş üzerine yapılacak bir bağlantıyla elektrik iletkenliğinin daha kolay sağlanabilmesi nedeniyle tasarıma alttaş üzerine metal malzeme yerleştirilerek başlanacaktır.



Şekil 3.10 Son katmanı değiştirilen, 4 periyotlu MD-PBG yığının geçirgenlik grafiği

Işığın metal katmandan geçebilmesi için, sızma derinliği ön plana çıkmaktadır. Görünür dalgaboyu aralığındaki ışık için maksimum sızma derinliği yaklaşık 16,2 nm ($\lambda =$ 400 nm), minimum sızma derinliği yaklaşık 12,3 nm'dir ($\lambda = 700$ nm) (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3 400-700 nm aralığındaki ışığın Ag katman içindeki sızma derinlikleri

Dalgaboyu (nm)	n	n_i	Sızma Derinliği (nm)
399,95	0,173	1,950	16,32
406,51	0,173	2,029	15,94
413,28	0,173	2,110	15,59
420,29	0,167	2,186	15,30
427,54	0,160	2,260	15,05
435,04	0,159	2,329	14,86
442,8	0,157	2,400	14,68
450,86	0,151	2,479	14,47
459,21	0,144	2,560	14,27
467,87	0,137	2,640	14,10
476,87	0,132	2,720	13,95
486,22	0,130	2,798	13,83
495,94	0,130	2,880	13,70
506,06	0,130	2,974	13,54
516,61	0,130	3,070	13,39
527,6	0,130	3,159	13,29
539,07	0,129	3,250	13,20
551,05	0,124	3,348	13,10
563,57	0,120	3,450	13,00
576,68	0,119	3,554	12,91
590,41	0,121	3,660	12,84
604,81	0,126	3,766	12,78
619,93	0,131	3,880	12,71
635,82	0,136	4,011	12,62
652,55	0,140	4,150	12,51
670,19	0,140	4,293	12,42
688,81	0,140	4,440	12,35
708,49	0,144	4,586	12,29

3.3 Metal-Dielektrik Fotonik Kristal Yapı Tasarımı

3.3.1 Tasarım kriterleri

1- 400 nm Ag'nin kalkanlama etkinliği 61,41 dB hesaplanmıştır. Ancak görünür bölgede geçirgen değildir. 63 nm Ag kalkanlama etkinliği 43 dB'i bulmuş olsa

da tek katman olarak geçirgenlik için yeterli sonuç vermemektedir. 17 nm ve 10 nm Ag katmanların geçirgenlik performansları diğerlerine göre daha yüksek olsa da tek başlarına sağladıkları kalkanlama etkinlikleri yeterli değildir. Bu nedenle 43 dB ve üzerinde kalkanlama sağlayabilmek için toplam Ag kalınlığı en az 63 nm alınacaktır.

2- 10 nm'nin altında Ag filmin iletkenliğinin oldukça düşük olmasının kalkanlama etkinliğini azaltacağı gerekçesiyle kullanılacak Ag katman kalınlıkları en az 10 nm alınacaktır.

3- Işığın metal katman içinde ilerleyebileceği sızma derinlikleri düşünüldüğünde kullanılacak Ag katmanlarının kalınlıkları en fazla 16,32 nm alınacaktır.

4- Tasarlanacak periyodik yapılarda en dış katmanın metal olması geçirgenliği ortalama %10 civarında azaltmaktadır. Bu nedenle yapılacak tasarımlarda en dış katmanda Ag kullanılmayacaktır.

5- Periyodik yapının artması sonucunda artan metal katman adedi geçirgenliği düşürücü etki yapacaktır. Bu yüzden 7 periyodun üzerinde yapı oluşturulmamalıdır.

Belirlenen kriterler kullanılarak, görünür dalgaboyu aralığında yüksek geçirgenlik ve 40 dB üzeri kalkanlama etkinliği elde edebilmek için 4 farklı model tasarlanmıştır. Her model referans çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda geliştirilerek, Essential Macleod programı kullanılarak nihai durumuna getirilmiştir.

3.3.2 Model 1 (4 periyot)

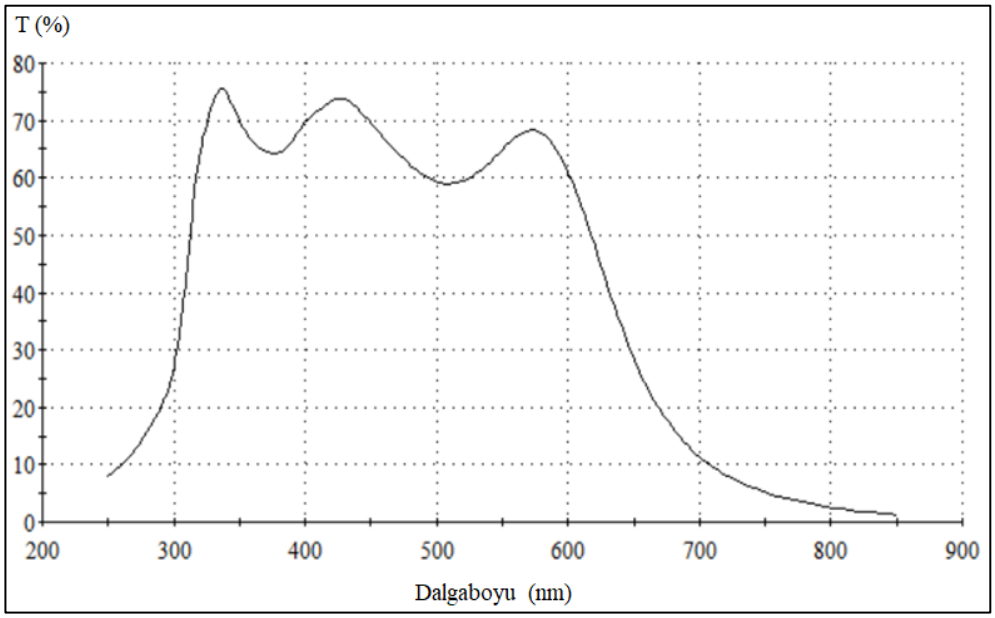
1. Adım: 4 periyot (8 katman) olarak belirlenmiştir. Her bir Ag katmanının kalınlığı 10 nm ve YbF_3 katmanının kalınlığı 80,78 nm olarak alınmıştır (Standart Tasarım

Başlangıcı). Cam alttaş üzerine son katman YbF_3 olacak şekilde sırasıyla YbF_3 ve Ag yerleştirilmiştir (**Şekil 3.11**). Yığın içinde, iç yansımalar nedeniyle bir bant aralığından diğerine, ileri ve geri hareket eden dalgalar girişim etkisi oluştururlar. Oluşan girişim etkisi sonucunda spektrumda salınımlar gözlemlenmiştir (**Şekil 3.12**).

Incident Angle (deg)	0,00
Reference Wavelength (nm)	550,00

	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,22162139	80,78
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,22162139	80,78
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,22162139	80,78
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,22162139	80,78
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
▶	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					0,89556038	363,12

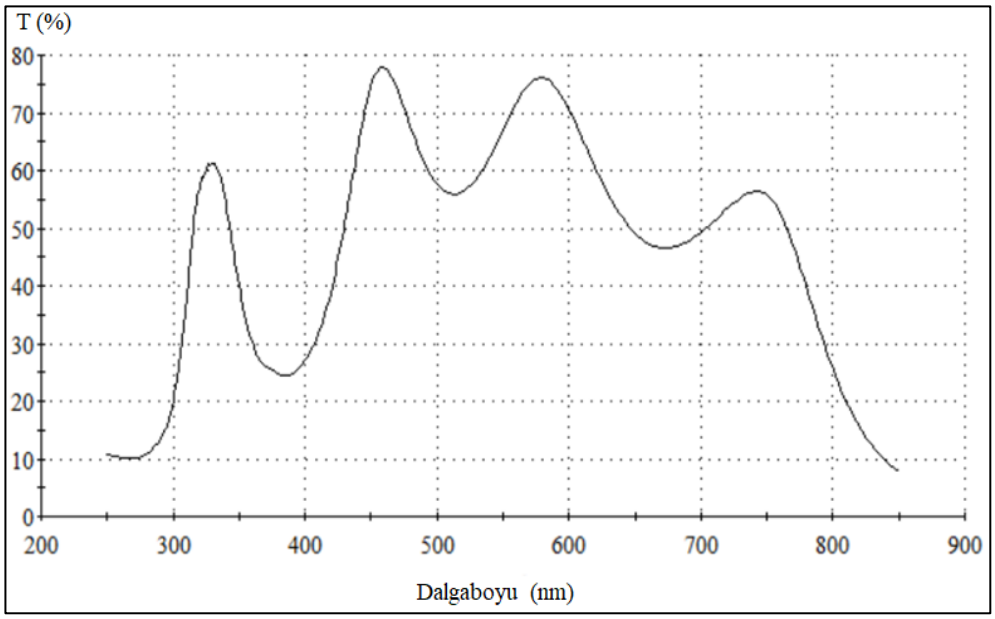
Şekil 3.11 4 periyot ilk adım katman kalınlıkları



Şekil 3.12 4 periyot ilk adım geçirgenlik grafiği

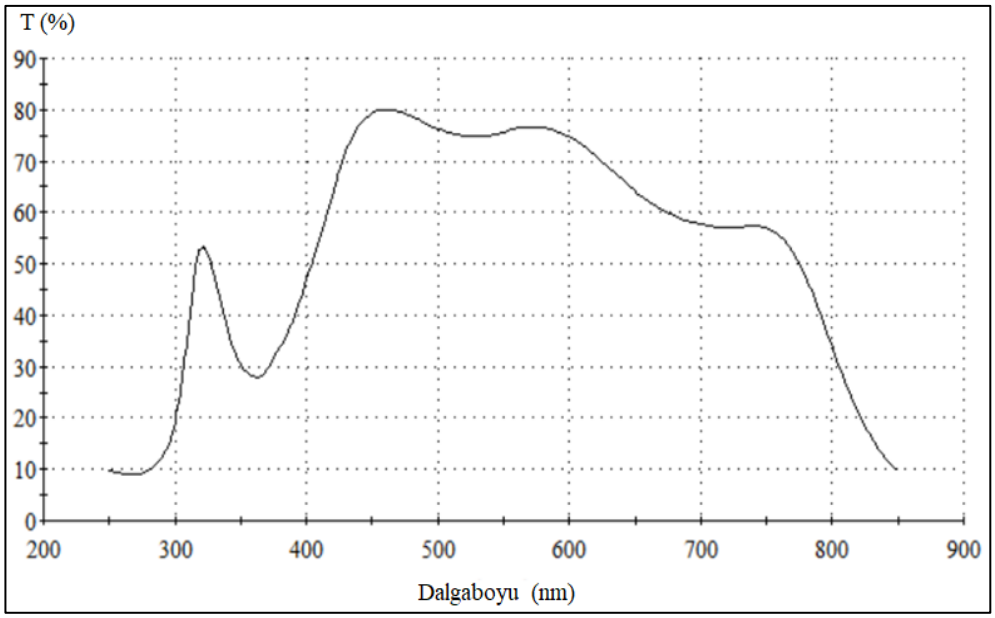
2. Adım: 400-700 nm dalgaboyu aralığında yüksek geçirgenlik elde edebilmek için iletim bandının sağa (büyük dalgaboylarına doğru) kaydırılması gerekmektedir. Bu

durum toplam dielektrik malzeme kalınlığını arttırılarak sağlanabilmektedir. Bu nedenle her bir YbF_3 katman kalınlığı yaklaşık %50 oranında arttırılarak, 121 nm'ye çıkarılmıştır. Artan YbF_3 kalınlığının iletim bandını 350-850 nm aralığına kaydırdığı ancak salınımları derinleştirdiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 4 periyot ikinci adım geçirgenlik grafiği

3. Adım: Yığın içindeki girişim etkisi nedeniyle oluşan salınımlar ortalama geçirgenlik değerini düşürmektedir. Bu durum en üst katmanda bulunan YbF_3 kalınlığı yarıya indirilerek (60,5 nm) azaltılabilmiştir ancak metallerin neden olduğu iç yansımalar azda olsa salınım oluşturmaya devam etmiştir. Bu durumun maksimum ve minimum noktaların yukarı çektiği, ortalama geçirgenlik değerini arttırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.14).

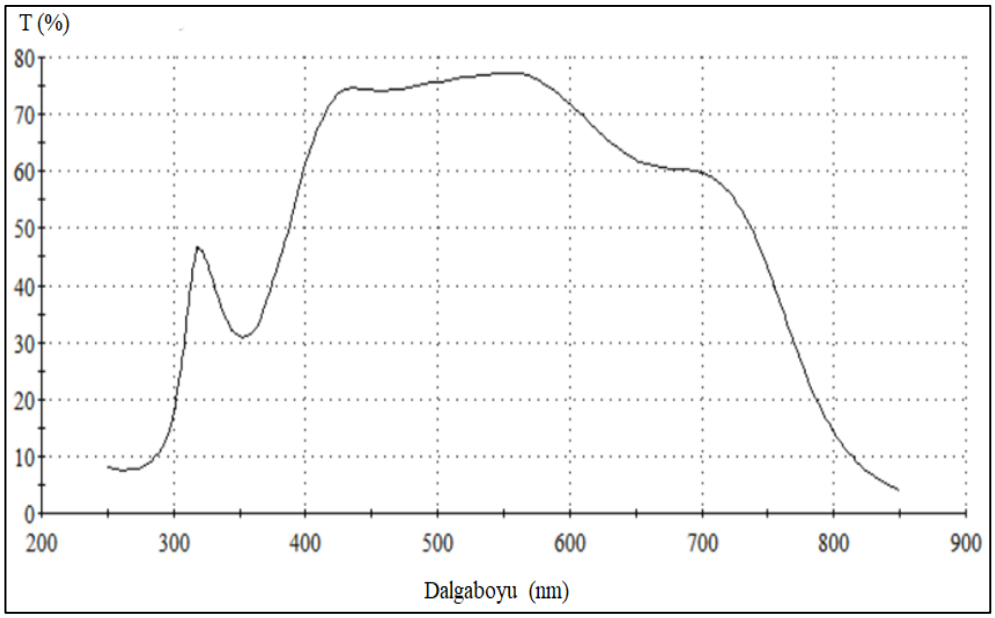


Şekil 3.14 4 periyot üçüncü adım geçirgenlik grafiği

4. Adım: 400-700 nm dalgaboyu aralığında yüksek geçirgenlik elde edebilmek için son durumdaki katman kalınlıkları yapılan düzenlemeler sonucunda optimize edilmiştir. Tasarımın son durumunda MD-PBG yığının kalınlığı 446,75 nm, toplam YbF_3 kalınlığı 405,17 nm ve toplam Ag kalınlığı 41,58 nm'dir (Şekil 3.15). Değişen katman kalınlıklarına göre oluşan geçirgenlik grafiği şekil 3.16'da verilmiştir.

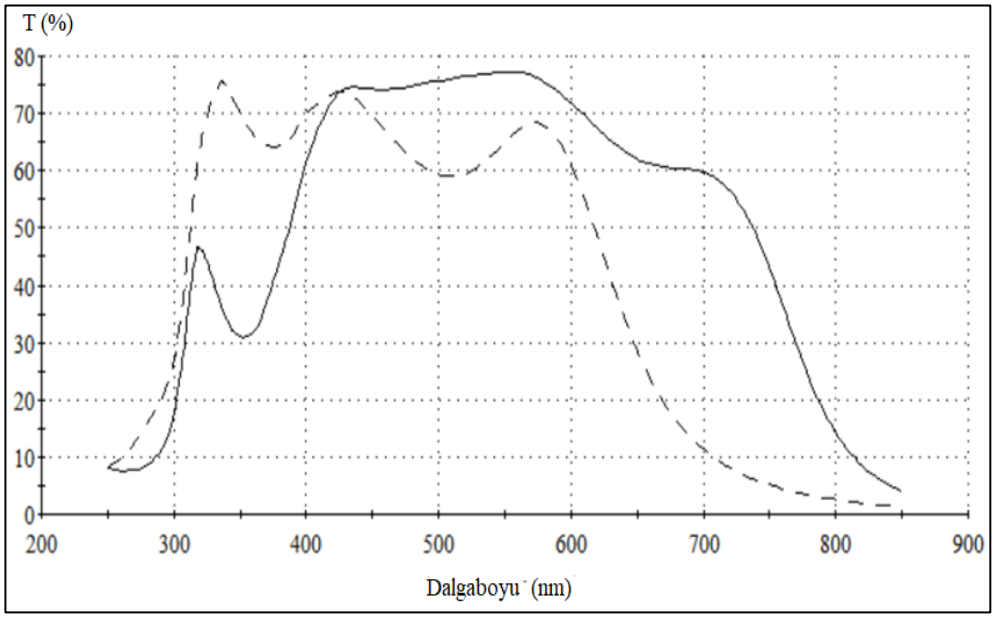
Incident Angle (deg)	0,00				
Reference Wavelength (nm)	550,00				
	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,16301984	59,42
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,30524382	111,26
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00233450	10,29
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,31794631	115,89
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00256137	11,29
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,32538124	118,60
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
▶	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					1,12102450	446,75

Şekil 3.15 4 periyot 4 periyot dördüncü adım katman kalınlıkları (Yüksek Geçirgenlik)



Şekil 3.16 4 periyot dördüncü adım geçirgenlik grafiği (Yüksek Geçirgenlik)

Tasarımın başlangıç ve son aşaması karşılaştırılmalı olarak şekil 3.17'de verilmiştir. Ortalama geçirgenliğin 400-700 nm dalgaboyu aralığında %70'in üzerinde olduğu ve 555 nm ve çevresinde %77'in üzerine çıktığı görülmüştür.



Şekil 3.17 4 periyot birinci adım (Standart Başlangıç) ve dördüncü adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği

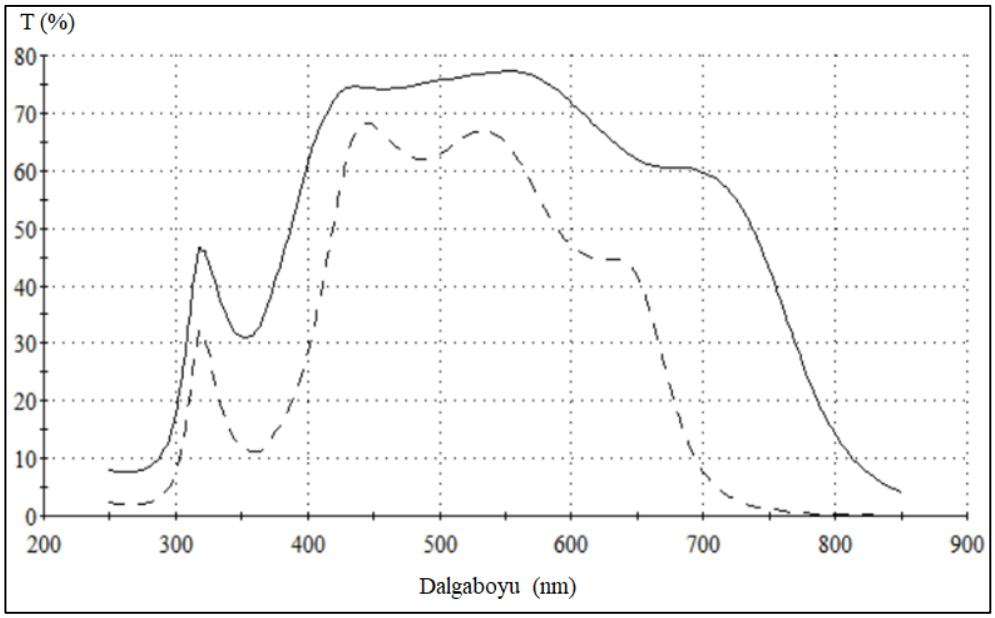
5. Adım: Yüksek geçirgenliğin elde edildiği durumda toplam Ag kalınlığı 41,58 nm'dir. 63 nm altında kalan toplam Ag kalınlığı nedeniyle oluşturulan yığının kalkanlama etkinliğinin 40 dB'in altında kalacağı hesaplanmıştır. Ag katman kalınlıkları arttırılarak kalkanlama etkinliği 40 dB üzerine çıkarılabilir. Bu durumda, yığının kalınlığı 468,11 nm toplam YbF3 kalınlığı 405,17 nm ve toplam Ag kalınlığı 62,94 nm'dir (Şekil 3.18). Yüksek geçirgenlik (düşük kalkanlama etkinliği) ve düşük geçirgenlik (yüksek kalkanlama etkinliği) elde edilen iki durumun karşılaştırması Şekil 3.19'da verilmiştir.

Ortalama geçirgenliğin 400-700 nm dalgaboyu aralığında %51'in üzerinde olduğu ve 555 nm ve çevresinde %63'in üzerine çıktığı görülmüştür.

Incident Angle (deg)	0,00
Reference Wavelength (nm)	550,00

	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,16301984	59,42
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00360724	15,90
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,30524382	111,26
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00420165	18,52
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,31794631	115,89
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00420165	18,52
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,32538124	118,60
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
▶	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					1,12587046	468,11

Şekil 3.18 4 periyot altınca adım katman kalınlıkları (~43 dB kalkanlama etkinliği)



Şekil 3.19 4 periyot dördüncü (Yüksek Geçirgenlik) ve beşinci (~43 dB kalkanlama etkinliği) adımların karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği

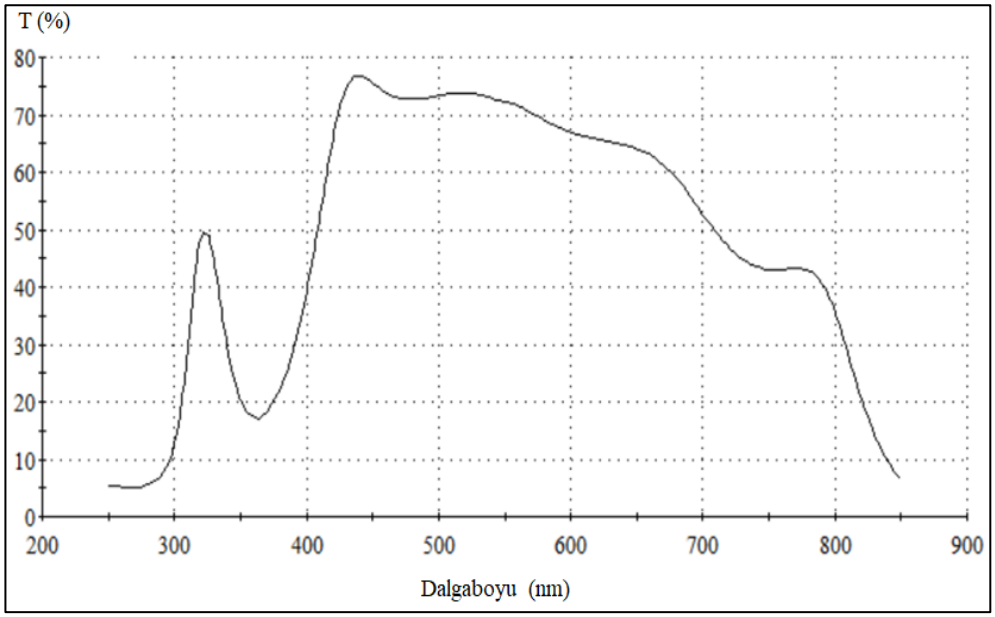
3.3.3 Model 2 (5 periyot)

1. Adım: 5 periyot (10 katman) olarak belirlenmiştir. Model 1 geliştirilirken yapılan değişiklikler bu modelde de aynı etkileri yapacağı için tasarıma model 1 3. adıma benzer şekilde başlanmıştır. Her bir Ag katman kalınlığı 10 nm, iç katmanlardaki YbF_3 kalınlıkları 121 nm ve dış katman YbF_3 kalınlığı 60,5 nm alınmıştır (Şekil 3.20). Elde edilen geçirgenlik grafiği şekil 3.21'de verilmiştir.

Incident Angle (deg)	0,00
Reference Wavelength (nm)	550,00

	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,16598284	60,50
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	9	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	10	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
▶	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					1,50518912	594,50

Şekil 3.20 5 periyot birinci adım katman kalınlıkları



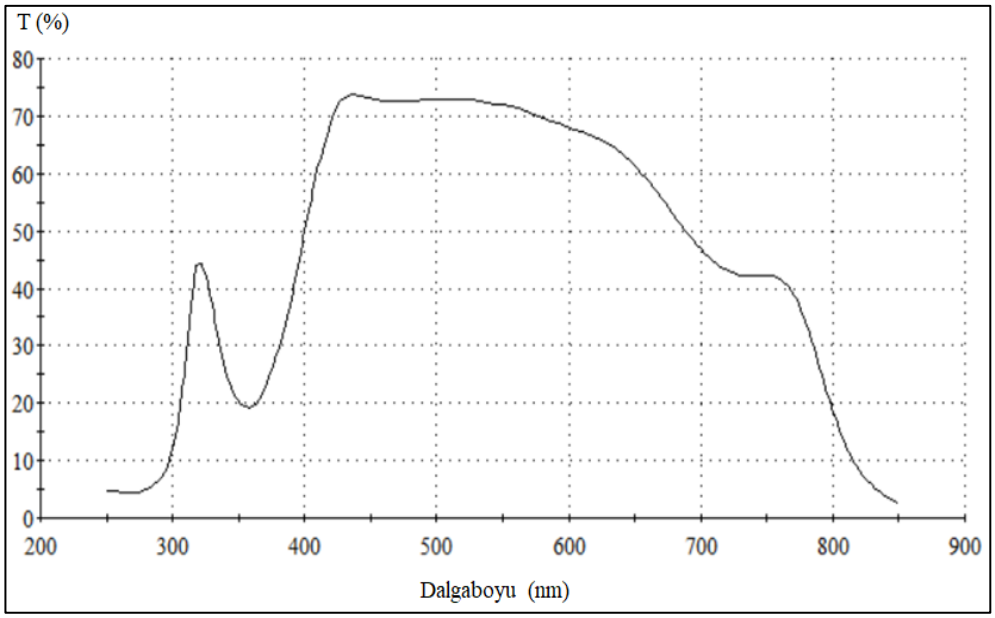
Şekil 3.21 5 periyot birinci adım geçirgenlik grafiği

2. Adım: 400-700 nm dalgaboyu aralığında yüksek geçirgenlik elde edebilmek için son durumdaki katman kalınlıkları yapılan düzenlemeler sonucunda optimize edilmiştir. Tasarımın son durumunda MD-PBG yığının kalınlığı 577,63 nm, toplam YbF_3 kalınlığı 526,03 nm ve toplam Ag kalınlığı 51,60 nm'dir (Şekil 3.22). Değişen katman kalınlıklarına göre oluşan geçirgenlik grafiği şekil 3.23'de verilmiştir.

Incident Angle (deg)	0,00
Reference Wavelength (nm)	550,00

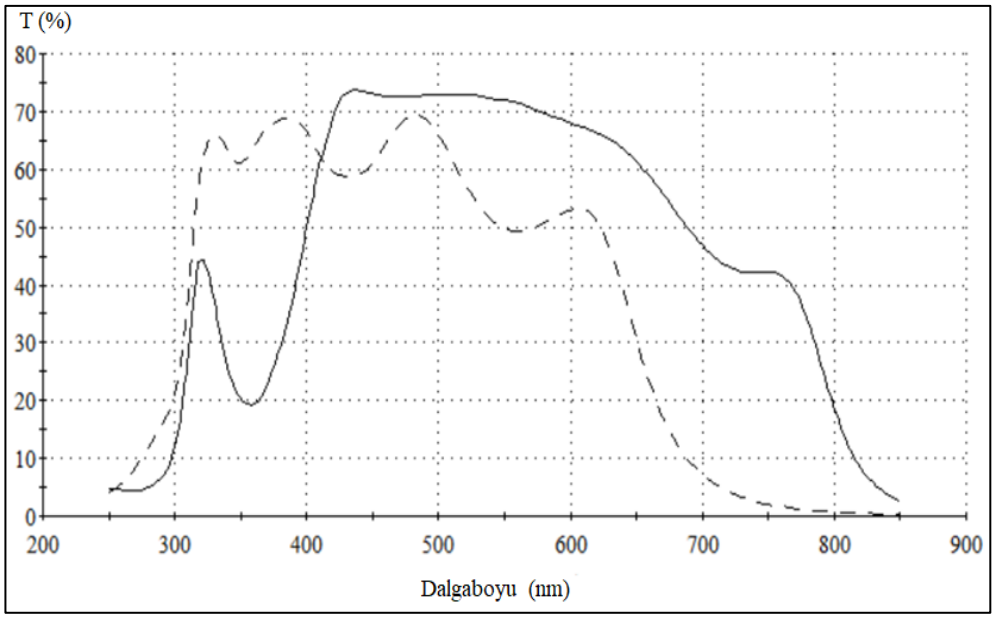
	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,15141476	55,19
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,31742504	115,70
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00238214	10,50
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,32148545	117,18
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00232089	10,23
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,32691761	119,16
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00246608	10,87
	9	YbF3	1,50893	0,00000	0,32592995	118,80
	10	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
▶	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					1,45487933	577,63

Şekil 3.22 5 periyot ikinci adım katman kalınlıkları (Yüksek Geçirgenlik)



Şekil 3.23 5 periyot ikinci adım geçirgenlik grafiği (Yüksek Geçirgenlik)

Standart başlangıç aşaması ve en yüksek geçirgenliğin elde edildiği geçirgenlik grafiği karşılaştırılmalı olarak şekil 3.24'de verilmiştir. Geçirgenliğin görünür dalgaboyu aralığında %67'nin üzerinde olduğu ve 555 nm ve çevresinde %71'in üzerine çıktığı görülmüştür.



Şekil 3.24 5 periyot standart başlangıç ve ikinci adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği

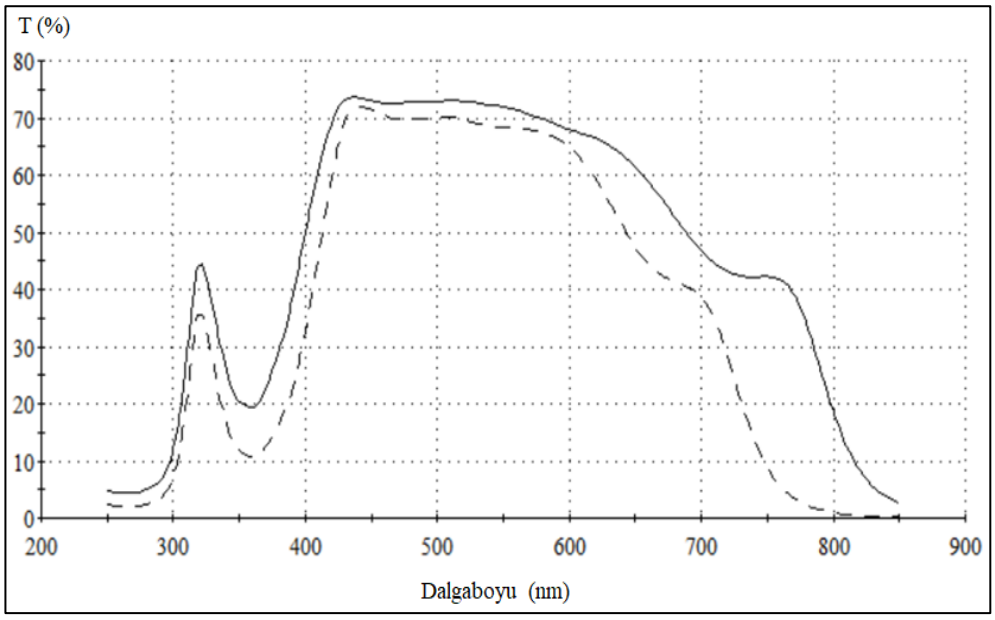
3. Adım: Yüksek geçirgenliğin elde edildiği durumda toplam Ag kalınlığı 51,60 nm'dir. 63 nm altında kalan toplam Ag kalınlığı nedeniyle oluşturulan yığının kalkanlama etkinliğinin 40 dB'in altında kalacağı hesaplanmıştır. Ag katman kalınlıkları arttırılarak kalkanlama etkinliği 40 dB üzerine çıkarılabilir. Bu durumda, yığının kalınlığı 588,90 nm, toplam YbF_3 kalınlığı 525,69 nm ve toplam Ag kalınlığı 63,21 nm'dir (Şekil 3.25). Yüksek geçirgenlik (düşük kalkanlama etkinliği) ve düşük geçirgenlik (yüksek kalkanlama etkinliği) elde edilen iki durumun karşılaştırması Şekil 3.26'da verilmiştir.

Ortalama geçirgenliğin 400-700 nm dalgaboyu aralığında %61'in üzerinde olduğu ve 555 nm ve çevresinde %68'in üzerine çıktığı görülmüştür.

Incident Angle (deg)	0,00				
Reference Wavelength (nm)	550,00				

	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,15665488	57,10
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00272245	12,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,31330976	114,20
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00323291	14,25
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,32269259	117,62
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00298562	13,16
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,32507945	118,49
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00313082	13,80
▶	9	YbF3	1,50893	0,00000	0,32450332	118,28
	10	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					1,45658051	588,90

Şekil 3.25 5 periyot üçüncü adım katman kalınlıkları (~43 dB Kalkanlama Etkinliği)



Şekil 3.26 5 periyot ikinci adım (Yüksek Geçirgenlik) ve üçüncü adım (~43 dB kalkanlama etkinliği) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği

3.3.4 Model 3 (6 periyot)

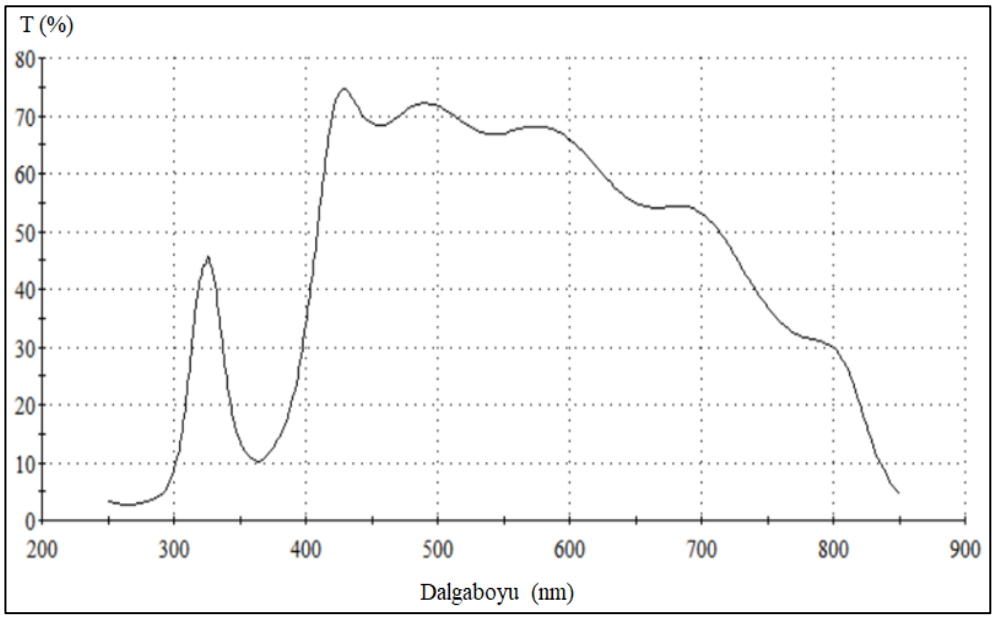
1. Adım: 6 periyot (12 katman) olarak belirlenmiştir. Model 1 geliştirilirken yapılan değişiklikler bu modelde de aynı etkileri yapacağı için tasarıma model 1 3. adıma benzer şekilde başlanmıştır. Her bir Ag katman kalınlığı 10 nm, iç katman YbF_3

kalınlıkları 121 nm ve dış katman YbF_3 kalınlığı 60,5 nm alınmıştır (Şekil 3.27). Elde edilen geçirgenlik grafiği şekil 3.28'de verilmiştir.

Incident Angle (deg)	0,00
Reference Wavelength (nm)	550,00

	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
▶	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,16598284	60,50
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	9	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	10	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	11	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	12	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					1,83942351	725,50

Şekil 3.27 6 periyot birinci adım katman kalınlıkları

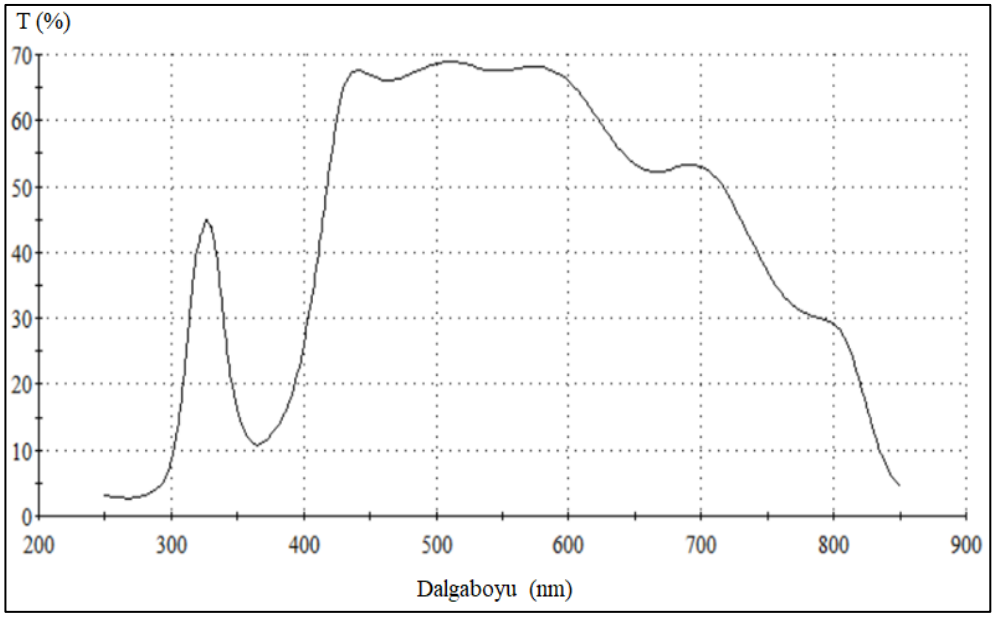


Şekil 3.28 6 periyot birinci adım geçirgenlik grafiği

2. Adım: 400-700 nm dalgaboyu aralığında yüksek geçirgenlik elde edebilmek için son durumdaki katman kalınlıkları yapılan düzenlemeler sonucunda optimize edilmiştir. Tasarımın son durumunda MD-PBG yığının kalınlığı 730,96 nm, toplam YbF_3 kalınlığı 669,75 nm ve toplam Ag kalınlığı 61,21 nm'dir (Şekil 3.29). Değişen katman kalınlıklarına göre oluşan geçirgenlik grafiği şekil 3.30'da verilmiştir.

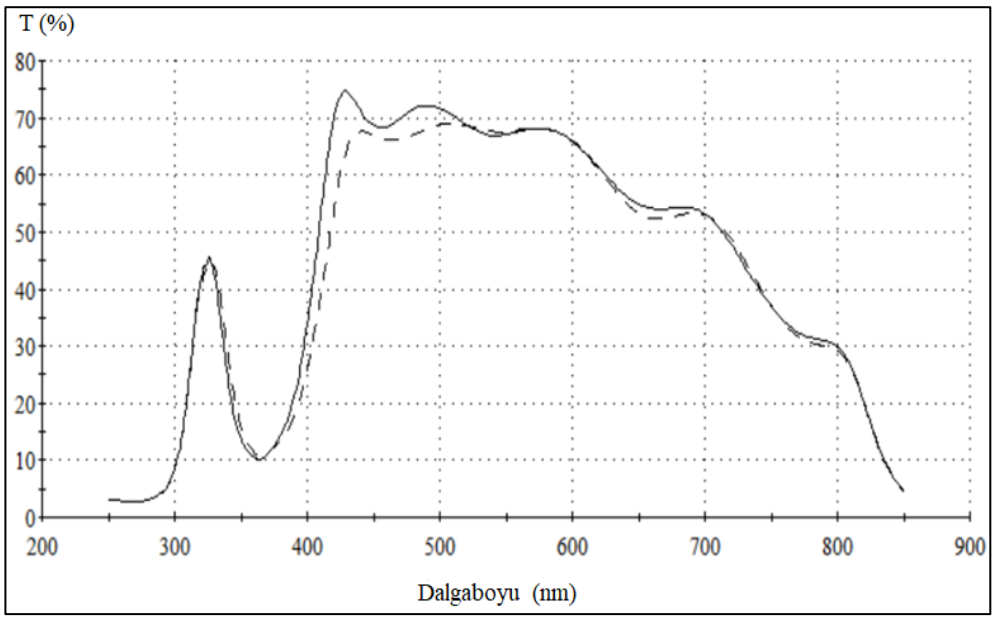
Incident Angle (deg)	0,00				
Reference Wavelength (nm)	550,00				
Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
Medium	Air	1,00000	0,00000		
1	YbF3	1,50893	0,00000	0,15391136	56,10
2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00230728	10,17
3	YbF3	1,50893	0,00000	0,32183948	117,31
4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00238214	10,50
5	YbF3	1,50893	0,00000	0,33498356	122,10
6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00232769	10,26
7	YbF3	1,50893	0,00000	0,33099822	120,65
8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00230501	10,16
9	YbF3	1,50893	0,00000	0,34462145	125,61
10	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00229593	10,12
11	YbF3	1,50893	0,00000	0,35112088	127,98
12	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
				1,85136170	730,96

Şekil 3.29 6 periyot ikinci adım katman kalınlıkları (Yüksek Geçirgenlik)



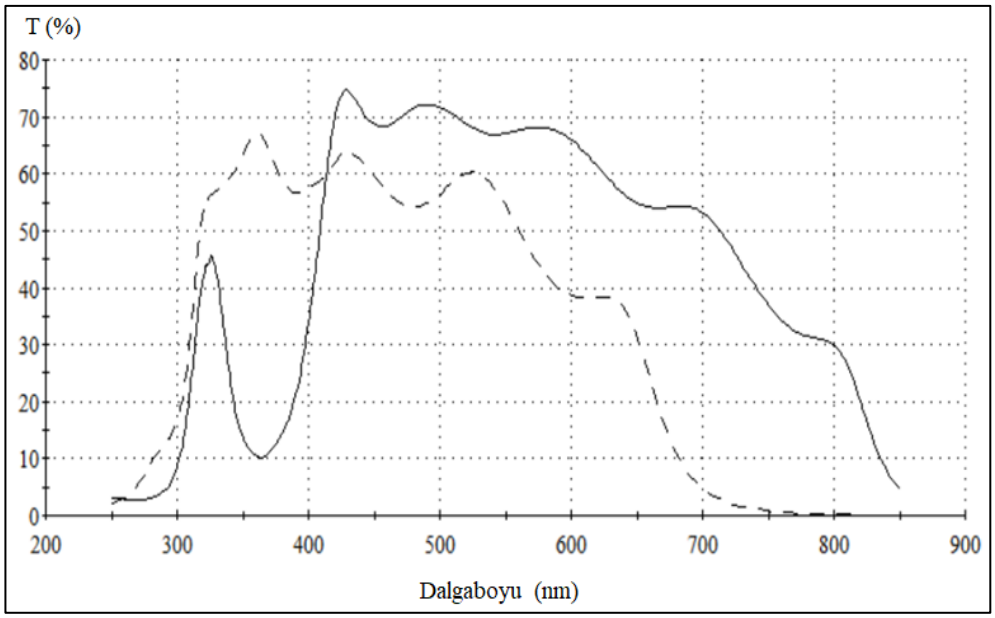
Şekil 3.30 6 periyot ikinci adım geçirgenlik grafiği (Yüksek Geçirgenlik)

1. ve 2. adımlarda elde edilen geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması şekil 3.31'da verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi kalınlıkların optimize edilmesinin 555 nm ve çevresinde geçirgenliği neredeyse hiç değiştirmediği ve 400-700 nm aralığında ortalama geçirgenliği %1-2 civarında düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle görünür bölgede yüksek geçirgenlik için 1. adımda verilen yığının kullanılması uygundur.



Şekil 3.31 6 periyot standart başlangıç ve ikinci adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği

Standart başlangıç aşaması ve en yüksek geçirgenliğin elde edildiği geçirgenlik grafiği karşılaştırılmalı olarak şekil 3.32'de verilmiştir. Ortalama geçirgenliğin görünür dalgaboyu aralığında %62'nin üzerinde olduğu ve 555 nm ve çevresinde %66'nın üzerine çıktığı görülmüştür.



Şekil 3.32 6 periyot standart başlangıç ve ikinci adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği

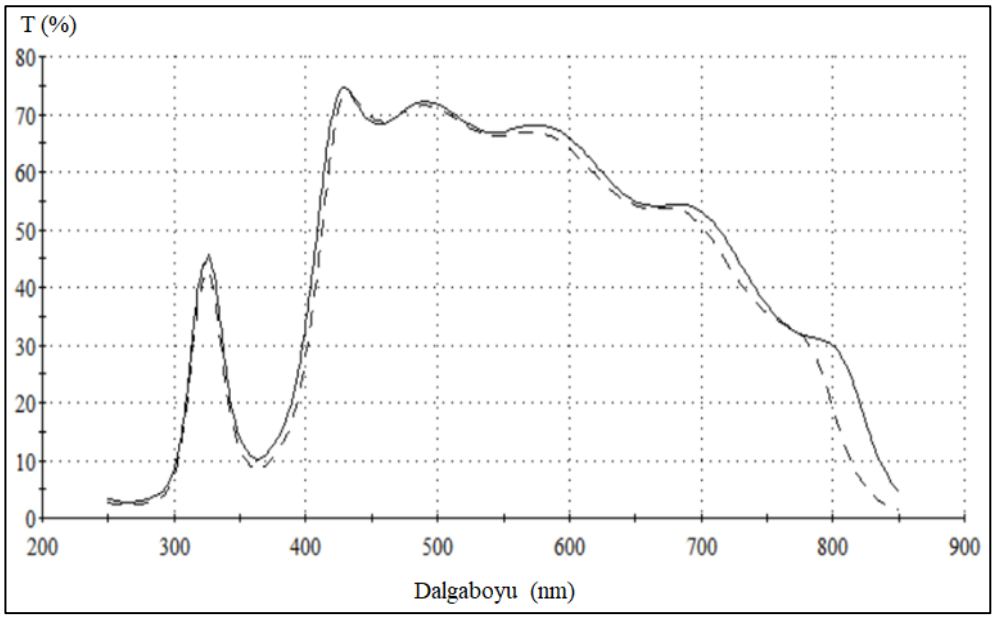
3. Adım: Yüksek geçirgenliğin elde edildiği durumda toplam Ag kalınlığı 60 nm'dir. Oluşturulan yığının kalkanlama etkinliği 40-43 dB arasındadır. Ag katman kalınlıkları arttırılarak kalkanlama etkinliği 43 dB üzerine çıkarılabilir. Bu durumda, yığının kalınlığı 728,89 nm, toplam YbF_3 kalınlığı 665,29 nm ve toplam Ag kalınlığı 63,39 nm, Şekil 3.33'de verilmiştir. Yüksek geçirgenlik (düşük kalkanlama etkinliği) ve düşük geçirgenlik (yüksek kalkanlama etkinliği) elde edilen iki durumun karşılaştırması Şekil 3.34'da verilmiştir.

Ortalama geçirgenliğin 400-700 nm dalgaboyu aralığında %61'in üzerinde olduğu ve 555 nm ve çevresinde %67'in üzerine çıktığı görülmüştür. Artan toplam Ag kalınlığı (3,44 nm) nedeniyle geçirgenliğin tüm bant üzerinde bir miktar azaldığı görülmüştür.

Incident Angle (deg)	0,00
Reference Wavelength (nm)	550,00

	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,16598284	60,50
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00243205	10,72
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00248423	10,95
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00253188	11,16
	9	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	10	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00239575	10,56
	11	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	12	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
▶	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					1,84019260	728,89

Şekil 3.33 6 periyot üçüncü adım katman kalınlıkları (~43 dB Kalkanlama Etkinliği)



Şekil 3.34 6 periyot birinci (Yüksek Geçirgenlik) ve üçüncü (~43 dB Kalkanlama Etkinliği) adımların karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği

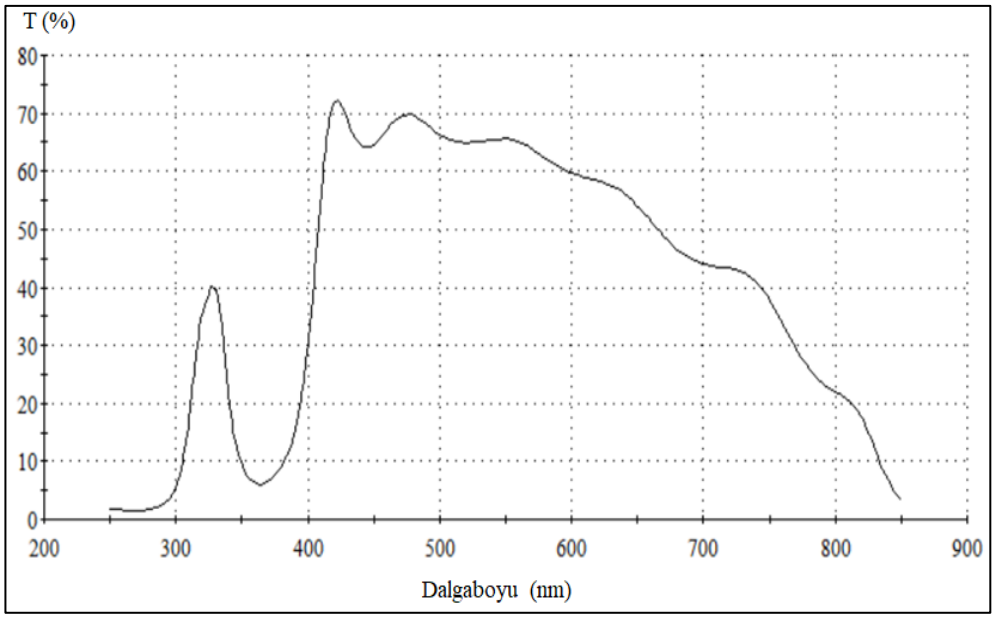
3.3.5 Model 4 (7 periyot)

Diğer modellerle karşılaştırma yapılabilmesi için oluşturulmuştur. 7 periyot (14 katman) olarak belirlenmiştir. Model 1 geliştirilirken yapılan değişiklikler bu modelde de benzer etkiler yapacağı için tasarıma model 1 3. adıma benzer şekilde başlanmıştır. Ag katman kalınlıkları 10 nm, iç katman YbF_3 kalınlıkları 121 nm ve dış katman YbF_3 kalınlığı 60,5 nm alınmıştır (Şekil 3.35). MD-PBG yığının kalınlığı 856,50 nm ve toplam Ag kalınlığı 70 nm'dir Bu şekilde 7 periyot için en yüksek geçirgenlik elde edilmiştir (Şekil 3.36). Standart başlangıç aşaması ve yüksek geçirgenliğin elde edildiği geçirgenlik grafiği karşılaştırılmalı olarak şekil 3.37'de verilmiştir. Ortalama geçirgenliğin görünür dalgaboyu aralığında %60'ın üzerinde olduğu ve 555 nm ve çevresinde %65'in üzerine çıktığı görülmüştür. Toplam Ag kalınlığı 70 nm olduğu için kalkanlama etkinliği 43 dB üzerindedir.

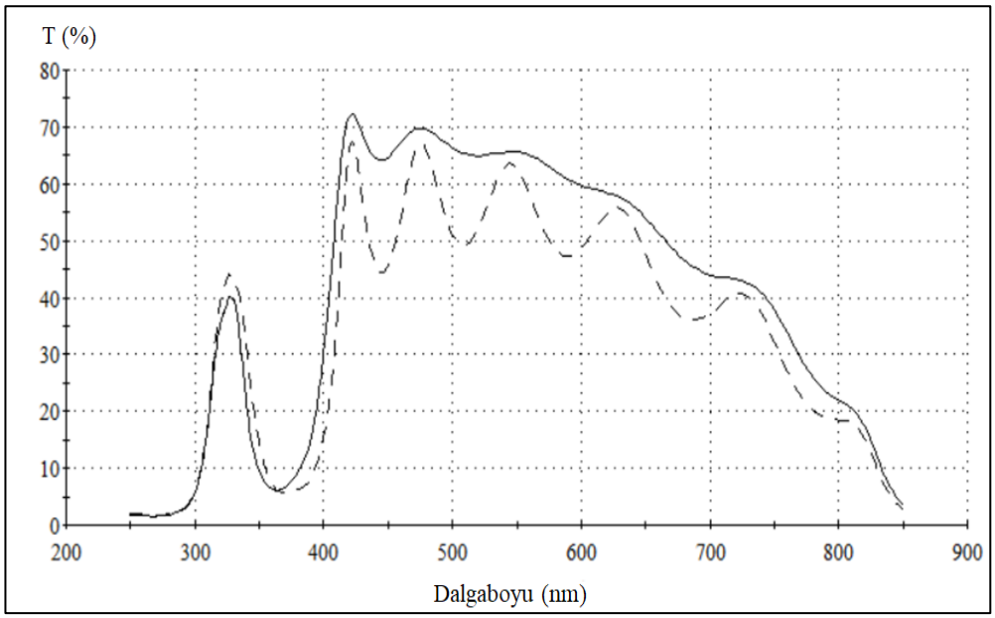
Incident Angle (deg)	0,00
Reference Wavelength (nm)	550,00

	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,16598284	60,50
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	9	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	10	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	11	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	12	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	13	YbF3	1,50893	0,00000	0,33196569	121,00
	14	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
▶	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					2,17365791	856,50

Şekil 3.35 7 periyot katman kalınlıkları (Yüksek Geçirgenlik, >43 dB Kalkanlama Etkinliği)



Şekil 3.36 7 periyot birinci adım geçirgenlik grafiği



Şekil 3.37 7 periyot standart başlangıç ve birinci adım (Yüksek Geçirgenlik) karşılaştırmalı geçirgenlik grafiği

4. SONUÇ

Bu çalışmada metal ve dielektrik malzemeler bir araya getirilerek 400-700 nm dalgaboyu aralığında geçirgen ve radyo frekans aralığında kalkanlama yapabilen çok katmanlı ince film yapıların tasarımı yapılmıştır. Tasarımda metal olarak Gümüş (Ag) ve dielektrik olarak İterbiyum Florür (YbF_3) kullanılmıştır. Bu malzemelerle oluşturulan fotonik bant aralık (PBG) yapısı sayesinde ışığı geçirmeyen tek katman kalın Ag film, YbF_3 filmler arasına ışığın görünür bölgedeki sızma derinlikleri göz önüne alınarak 10-16,32 nm aralığında yerleştirilmiştir. Ag'nin bu şekilde kullanılması hem görünür bölgede geçiren hem de radyo frekans (30 MHz-1,5 GHz) aralığında kalkanlama yapabilen yapılar elde edilmesini sağlamıştır.

Bu amaçla, sırasıyla 4 periyottan 7 periyota kadar 4 farklı model oluşturulmuştur. 4. Model (7 periyot) dışında her model ikiye ayrılmıştır. Birincisi maksimum geçirgenliğin elde edilmeye çalışıldığı, ikincisi ise 40 dB üzeri kalkanlama etkinliğinin elde edilmeye çalışıldığı durumdur.

Her modelin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait geçirgenlik, yansıma ve soğurma değerleri çizelge 4.1'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Yüksek geçirgenlik elde edilebilmesi için Ag katman kalınlıkları minimumda tutulmaya çalışılmıştır.

Çizelge 4.1 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait geçirgenlik, yansıma ve soğurma yüzdeleri

Model No	**Periyot Sayısı**	**Katman Sayısı**	**Yığın Kalınlığı (nm)**	**Toplam Ag Kalınlığı (nm)**	**Tmin (%)**	**Tmax (%)**	**Tav (%)**	**555 nm %T**
1	4	8	446,75	41,58	59,71 (700 nm)	77,29 (556 nm)	70,91	77,29
2	5	10	577,63	51,60	46,81 (700 nm)	73,70 (436 nm)	67,16	71,70
3	6	12	725,50	60,00	28,13 (400 nm)	73,81 (432 nm)	62,93	66,56
4	7	14	856,50	70	30,48 (400 nm)	72,89 (423 nm)	60,33	65,9

Çizelge 4.1 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait geçirgenlik, yansıma ve soğurma yüzdeleri (devam)

Rmin (%)	**Rmax (%)**	**Rav (%)**	**555 nm %R**	**Amin (%)**	**Amax (%)**	**Aav (%)**	**555 nm %A**	**SE (dB)**
1,11 (568 nm)	25,38 (400 nm)	6,19	1,27	13,26 (400 nm)	36,11 (700 nm)	22,89	21,44	< 40 dB
0,82 (646 nm)	37,24 (400 nm)	5,60	2,03	12,77 (400 nm)	39,2 (670 nm)	27,29	26,27	< 40 dB
0,18 (700 nm)	60,42 (400 nm)	6,33	4,67	11,4 (400 nm)	49,2 (700 nm)	30,73	28,77	~ 40 dB
0,29 (424 nm)	58,46 (400 nm)	5,75	0,88	11,06 (400 nm)	48,21 (700 nm)	33,92	32,22	> 43 dB

Çizelgeden de anlaşılabileceği gibi periyot sayısına bağlı olarak artan toplam Ag kalınlığının beklendiği gibi ortalama geçirgenlik değerlerini azalttığı görülmüştür. Dikkat çekici nokta ise ortalama yansıma değerlerinin büyük bir değişiklik göstermemiş olmasıdır. Bu nedenle geçirgenlik değerlerinde oluşan farkın asıl sebebinin ortalama soğurma değerlerindeki kademeli artış olduğu görülmüştür.

Genel olarak, Ag katman kalınlıkları minimumda (10 nm) tutulacak şekilde yığının periyot sayısı arttırıldığında; geçirgenliğin azaldığı, yansımanın hemen hemen aynı olduğu ve soğurmanın arttığı görülmüştür.

Yüksek geçirgenliğin gözlemlendiği durumda elde edilen geçirgenlik, yansıma ve soğurma grafiklerinin karşılaştırılması şekil 4.1-4.3'te verilmiştir.

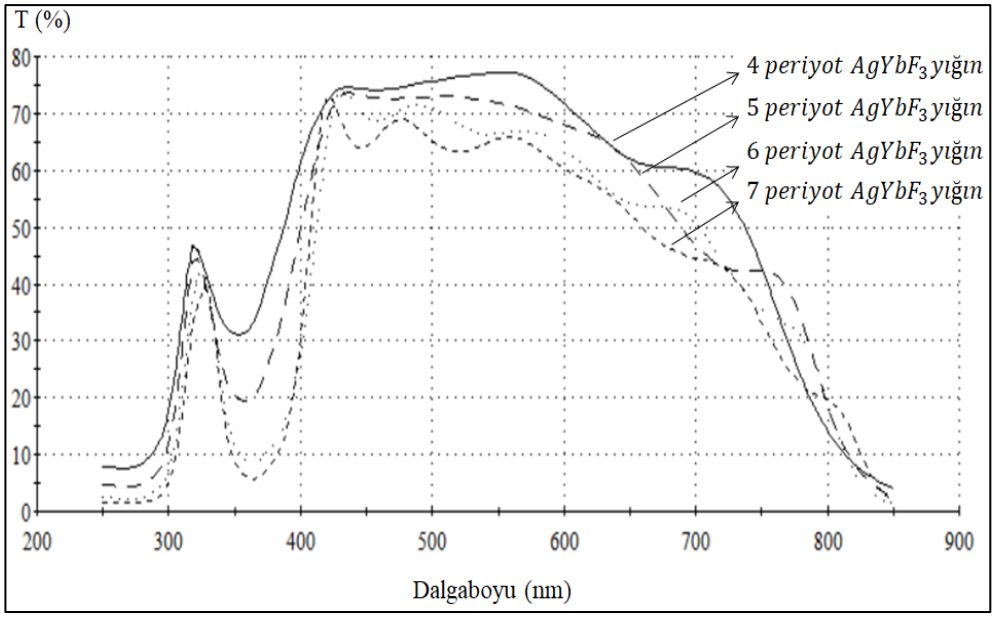
Her modelin geçirgenlik grafiğinde 400 nm'den 700 nm'ye doğru bir düşüş eğilimi görülmektedir. Değişiklik göstermeyen yansıma değerleri nedeniyle soğurma grafiğinin yüksek dalgaboylarına doğru artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu eğilimin nedeni yüksek dalgaboylarına karşılık gelen düşük sızma derinlikleridir.

Toplam YbF_3 kalınlığının artması nedeniyle geçirgenlik bandının düşük dalgaboylarında (350-400 nm), yansıma ve soğurma bandının yüksek dalgaboylarında (> 700 nm) sağa doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle grafiklerde elde edilen maksimum,

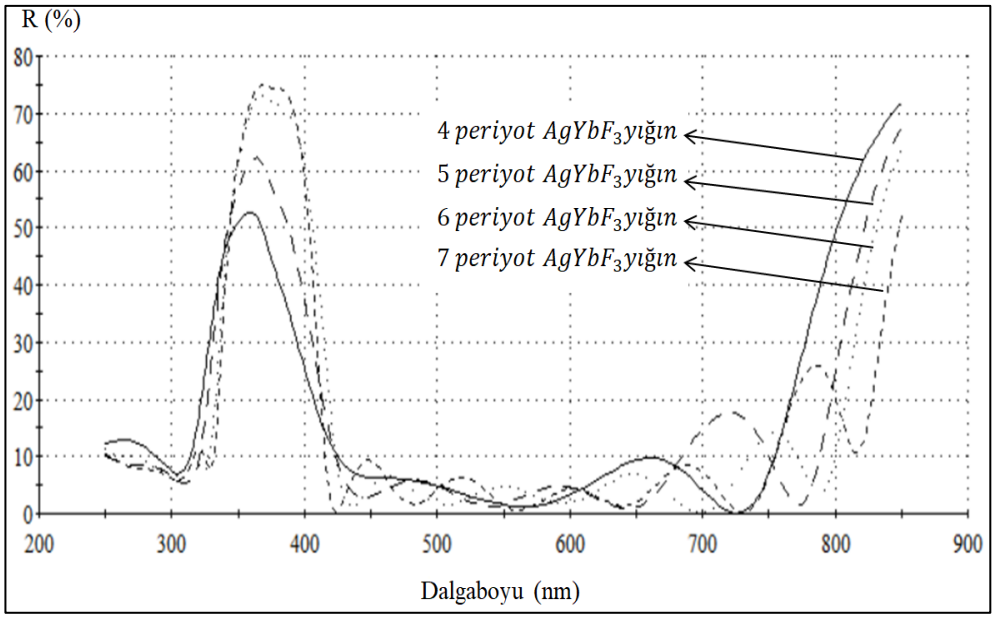
minimum ve ortalama değerleri ve bu değerlere karşılık gelen dalgaboyları değişiklik göstermiştir.

Artan Ag katman adedine bağlı olarak iletim bandında görülen bant kenarlarının dikleştiği, salınımların derinleştiği ve salınım sayısının arttığı gözlemlenmiş, bu durum yansıma ve soğurma grafiklerine de yansımıştır.

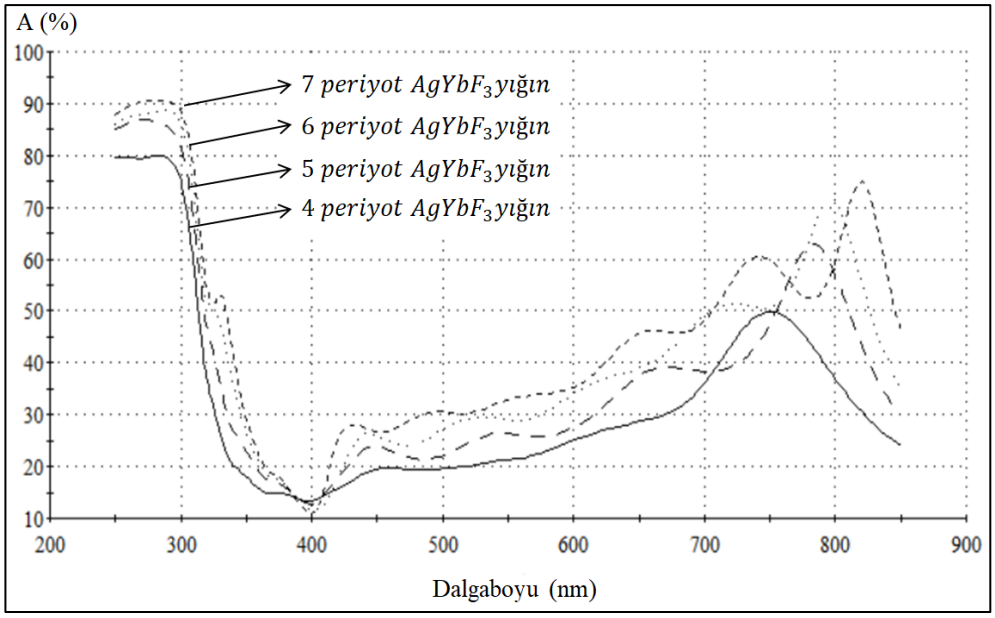
Ag'nin plazma rezonansına karşılık gelen 320 nm'de, artan toplam Ag kalınlığının geçirgenliği ve yansıtmayı azalttığı, soğurmayı arttırdığı gözlemlenmiştir. 320-400 nm arasında ise geçirgenlik çok düşerken, soğurma ve özellikle yansıma artış göstermektedir. 400 nm' ye kadar olan bölümde geçirgenlik üzerindeki engel yansıma iken 400-700 nm arasındaki bölümde bu engelin soğurma olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.2 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait yansıma grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.3 Modellerin yüksek geçirgenlik elde edilen durumuna ait soğurma grafiklerinin karşılaştırılması

Toplam Ag kalınlıkları incelendiğinde model 1 ve model 2'nin kalkanlama etkinliklerinin 40 dB altında, model 3'ün 43 dB civarında ve model 4'ün ise 43 dB üzerinde olduğu hesaplanmıştı (Çizelge 3.2). Bu nedenle düşük olan modeller 43 dB kalkanlama isteri sağlayacak şekilde güncellenmiştir.

Modellerin kalkanlama etkinliğini sağladığı duruma ait geçirgenlik, yansıma ve soğurma değerleri çizelge 4.2'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Model 4 haricinde (70 nm) Ag kalınlıkları toplamı neredeyse birbirine eşittir (~63 nm).

Çizelge 4.2 Modellerin 43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliği sağladığı durumuna ait geçirgenlik, yansıma ve soğurma değerleri

Model No	**Periyot Sayısı**	**Katman Sayısı**	**Yığın Kalınlığı (nm)**	**Toplam Ag Kalınlığı (nm)**	**Tmin (%)**	**Tmax (%)**	**Tav (%)**	**555 nm %T**
1	4	8	468,11	62,94	7,67 (700 nm)	68,13 (448 nm)	51,13	63,47
2	5	10	588,90	63,21	32,7 (400 nm)	72,03 (442)	61,01	68,34
3	6	12	728,89	63,39	26,10 (400 nm)	68,96 (508 nm)	61,60	67,72
4	7	14	856,5	70	30,48 (400 nm)	72,89 (423 nm)	60,33	65,90

Rmin (%)	**Rmax (%)**	**Rav (%)**	**555 nm %R**	**Amin (%)**	**Amax (%)**	**Aav (%)**	**555 nm %A**	**SE (dB)**
0,20 (544 nm)	58,67 (400 nm)	15,86	2,18	12,72 (400 nm)	56,13 (664 nm)	33,00	34,33	~ 43 dB
0,00 (604 nm)	55,00 (400 nm)	7,420	1,59	12,30 (400 nm)	52,20 (700 nm)	31,56	30,17	~ 43 dB
1,20 (598 nm)	61,20 (400 nm)	8,94	4,32	12,50 (406 nm)	45,11 (700 nm)	29,45	27,96	~ 43 dB
0,29 (424 nm)	58,46 (400 nm)	5,75	0,88	11,06 (400 nm)	48,21 (700 nm)	33,92	32,22	> 43 dB

Çizelgeden de anlaşılabileceği gibi artan periyot sayısına bağlı olarak, toplam 63 nm metal kalınlığına sahip olacak şekilde azalan Ag katman kalınlıklarının ortalama geçirgenlik değerlerini arttırdığı görülmüştür. Ancak model bir ve model iki arasındaki artışın, model iki ve model üç arasındaki artışa göre çok daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu durumun nedeninin birinci modelde kullanılan Ag katman kalınlıklarının görünür dalgaboyu aralığındaki ışık için hesaplanan maksimum sızma derinliği değerinin (16,32 nm) de üzerinde olmasıdır. Beklendiği gibi diğer modellerde kullanılan Ag katman

kalınlıkları sızma derinliği limitleri içinde olduğu için ortalama geçirgenlik değerlerinin birbirine yakın çıktığı görülmüştür.

Dikkat çekici nokta ise modellere göre kademeli olarak azalan Ag katman kalınlıklarının, ortalama soğurma değerlerini küçük aralıklarla indirdiği ve yansıma değerlerinde geçirgenlik değerlerinin tersi niteliğinde olduğu görülmüştür.

Genel olarak, Ag katman kalınlıkları toplamı 63 nm civarında olacak şekilde azaltıldığında; geçirgenliğin arttığı, yansımanın dalgalandığı ve soğurmanın azaldığı görülmüştür.

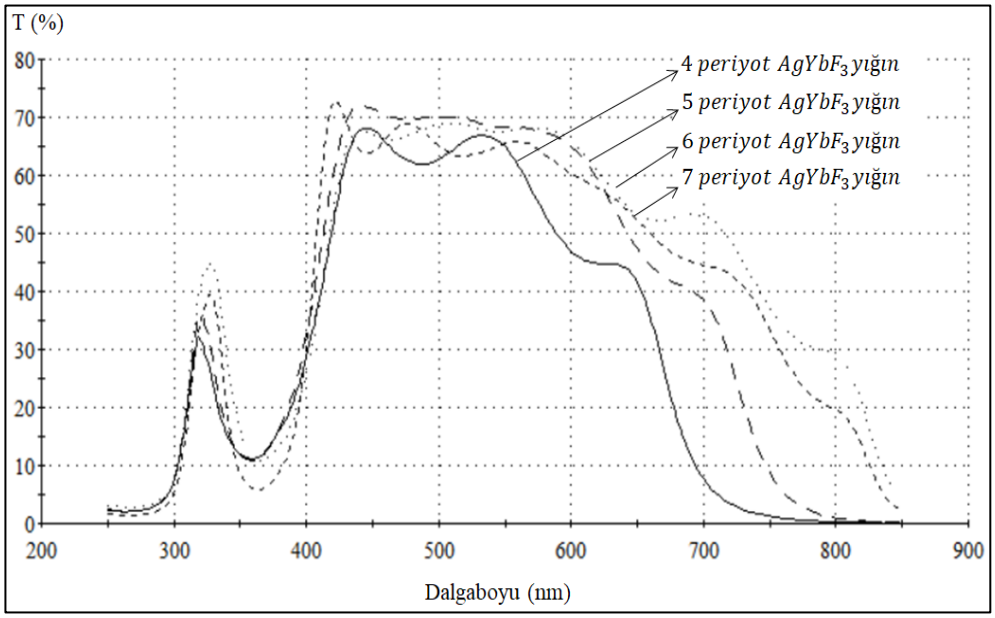
43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliğinin sağlandığı durumda elde edilen geçirgenlik, yansıma ve soğurma grafiklerinin karşılaştırılması şekil 4.4-4.6'te verilmiştir.

Grafikler incelendiğinde artan periyot sayısına (azalan Ag katman kalınlığına) bağlı olarak geçirgenlik, yansıma ve soğurma bantlarının 400 nm civarında bir miktar sola ve 700 nm üzerinde sağa doğru genişlediği görülmektedir. Bunun yanında grafiklerde oluşan salınım derinliklerinin azaldığı ve salınım sayılarının arttığı görülmüştür. Bantlardaki genişlemenin sebebi, artan toplam YbF_3 kalınlıklarının bandı sağa kaydırmasının yanında yığın içindeki Ag katman kalınlıklarının azalarak en dışta kalan Ag kalınlıklarına yaklaşmasıdır. Salınımlar üzerindeki asıl etkinin de bu durum olduğu düşünülmektedir.

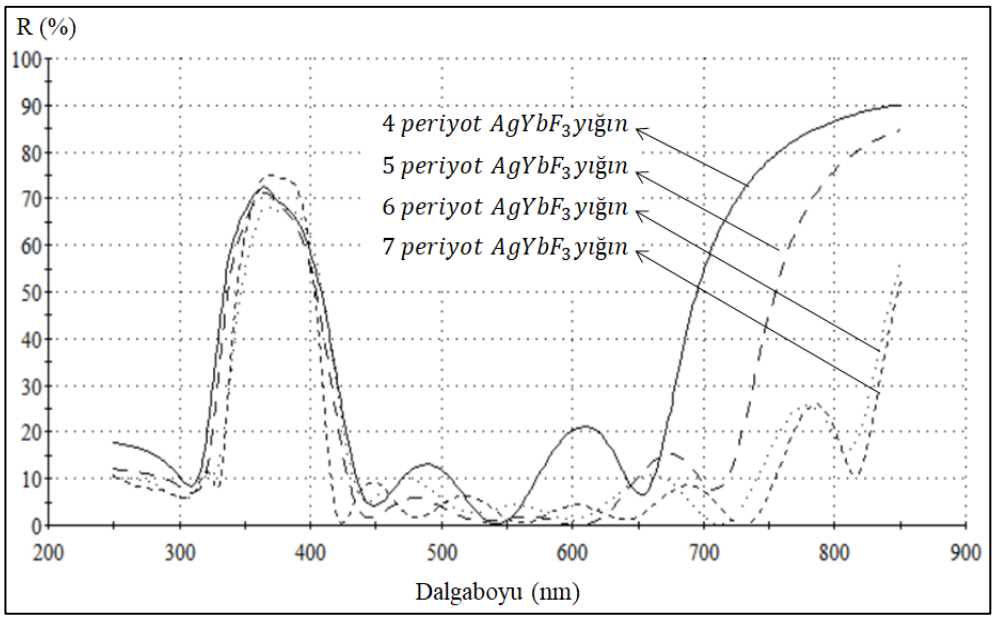
Bantlardaki genişleme ve salınımlar nedeniyle grafiklerde elde edilen maksimum, minimum ve ortalama değerleri ve bu değerlere karşılık gelen dalgaboyları değişiklik göstermiştir.

Ag'nin plazma rezonansına karşılık gelen 320 nm'de, artan toplam Ag kalınlığının geçirgenliği ve yansıtmayı azalttığı, soğurmayı ise arttırdığı gözlemlenmiştir. 320-400 nm arasında ise durum geçirgenlik ve yansıma için tam tersine dönmüştür. 400 nm' ye

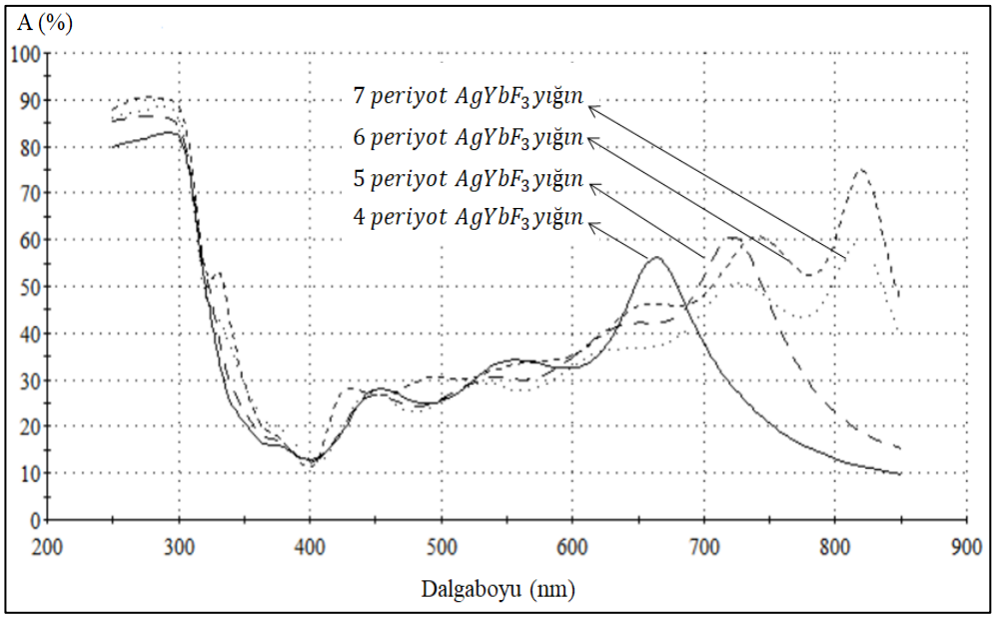
kadar olan bölümde geçirgenlik üzerindeki engel yansıma iken 400-700 nm arasındaki bölümde bu engelin soğurma olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 Modellerin 43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliği sağladığı durumuna ait geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.5 43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliği sağladığı durumuna ait yansıma grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.6 43 dB ve üzeri kalkanlama etkinliği sağladığı durumuna ait soğurma grafiklerinin karşılaştırılması

Tüm modeller incelendiğinde 43 dB kalkanlama etkinliği sağlayan ve en yüksek geçirgenlik, en düşük soğurma gösteren 3. model uygun bulunmuştur. Bu tasarımda ortalama yansıma değeri %8,94 olarak elde edilmiştir. Kalkanlama etkinliğini bozmayacak şekilde, Ag kalınlıkları değiştirilmeden, YbF_3 kalınlıkları şekil 4.7'de verildiği gibi değiştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak çizelge 4.5'de detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Azalan toplam YbF_3 kalınlığının iletim bandının düşük dalga boylarına doğru kaymasını sağladığı ve salınımları azaltarak ortalama yansıma değeri %3,21'e indirdiği görülmüştür. Enerjinin korunumu ilkesine göre değişen yansıma miktarının geçirgenlik ve/veya soğurma değerlerinde de değişiklik yapması beklenmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde ortalama iletkenlik değerinin 2,15 ve ortalama soğurma değerinin 3,59 arttığı gözlemlenmiştir.

Geçirgenlik ve yansımadaki değişimin nedeni, azalan birim YbF_3 kalınlığının (azalan toplam YbF_3 kalınlığının) bantları sola kaydırması sonucu değişen maksimum ve minimum noktalarındaki değişimdir. Fakat aynı etki soğurmada artış olarak

görülmüştür. Sabit periyotlu bir yığında YbF_3 kalınlıklarının soğurma üzerinde belirgin etkisi olduğu anlaşılmıştır.

Incident Angle (deg)	0,00
Reference Wavelength (nm)	550,00

	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
	1	YbF3	1,50893	0,00000	0,16082503	58,62
	2	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
	3	YbF3	1,50893	0,00000	0,31361155	114,31
	4	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00243205	10,72
	5	YbF3	1,50893	0,00000	0,31133443	113,48
	6	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00248423	10,95
	7	YbF3	1,50893	0,00000	0,32014112	116,69
	8	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00253188	11,16
	9	YbF3	1,50893	0,00000	0,30834399	112,39
	10	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00239575	10,56
	11	YbF3	1,50893	0,00000	0,30414641	110,86
	12	Ag(2)	0,12478	3,33956	0,00226871	10,00
▶	Substrate	Glass	1,51854	0,00000		
					1,73278387	689,74

Şekil 4.7 43 dB kalkanlama etkinliği sağlayan model 3'ün düşük yansıma sağlayan katman kalınlıkları

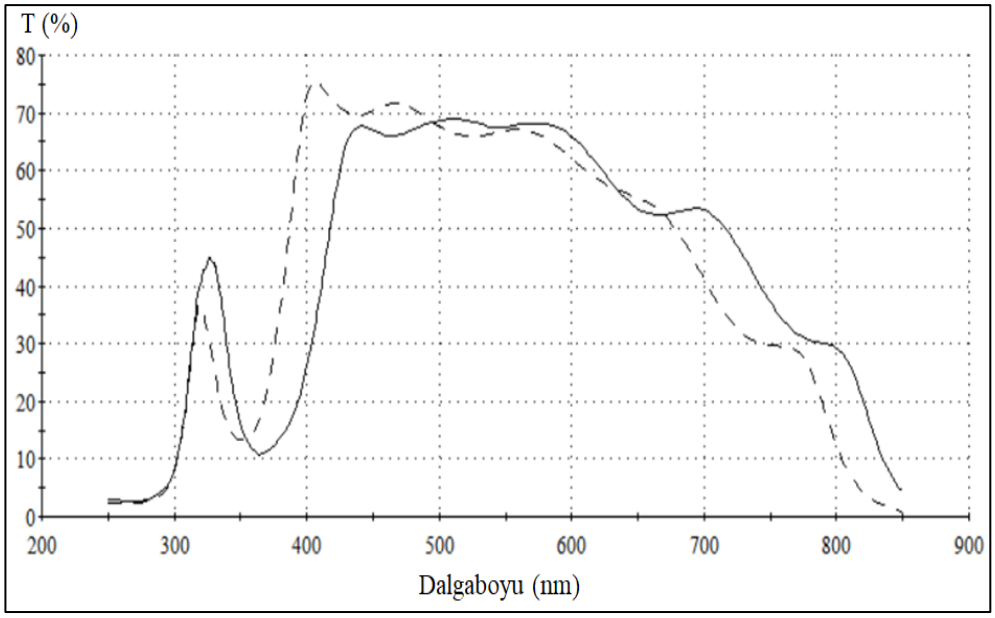
Çizelge 4.3 Modellerin 43 dB kalkanlama etkinliği sağlayan model 3'ün yüksek ve düşük yansıma değerleri

Model No	**Periyot Sayısı**	**Katman Sayısı**	**Yığın Kalınlığı (nm)**	**Toplam YbF_3 Kalınlığı (nm)**	**Toplam Ag Kalınlığı (nm)**	**Tmin (%)**	**Tmax (%)**	**Tav (%)**	**555 nm %T**
3	6	12	728,89	663,29	63,39	26,10 (400 nm)	68,96 (508 nm)	61,6	67,72
3-AR	6	12	689,74	626,35	63,39	41,25 (700 nm)	75,50 (406 nm)	63,75	67,17

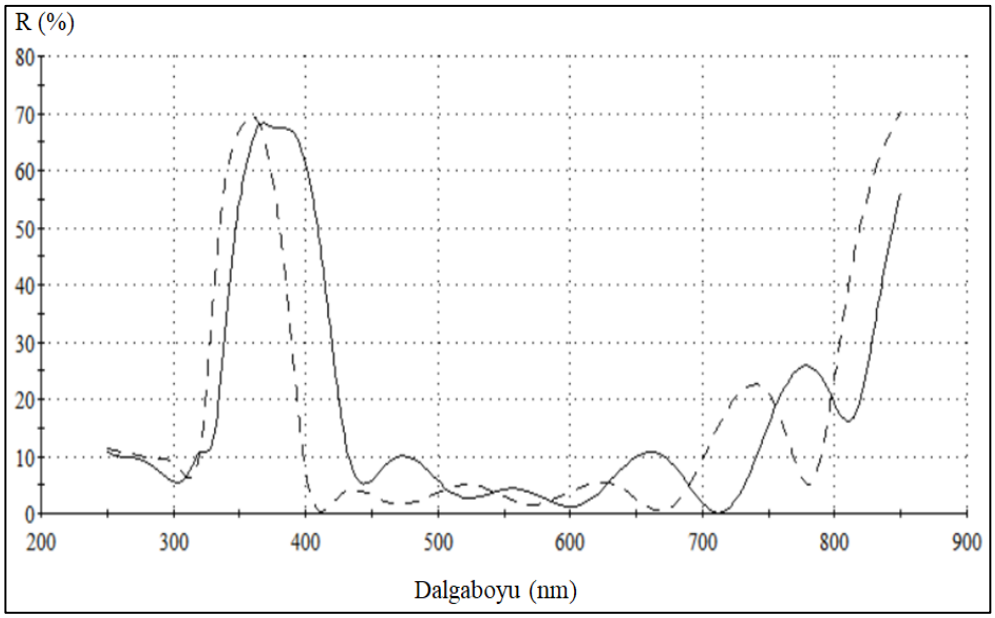
Çizelge 4.3 Modellerin 43 dB kalkanlama etkinliği sağlayan model 3'ün yüksek ve düşük yansıma değerleri (devam)

Rmin (%)	**Rmax (%)**	**Rav (%)**	**555 nm %R**	**Amin (%)**	**Amax (%)**	**Aav (%)**	**555 nm %A**	**SE (dB)**
1,20 (598 nm)	61,20 (400 nm)	8,94	4,32	12,50 (406 nm)	45,11 (700 nm)	29,45	27,96	~ 43 dB
0,32 (412 nm)	9,44 (700 nm)	3,21	2,46	19,47 (400 nm)	49,50 (694 nm)	33,04	30,36	~ 43 dB

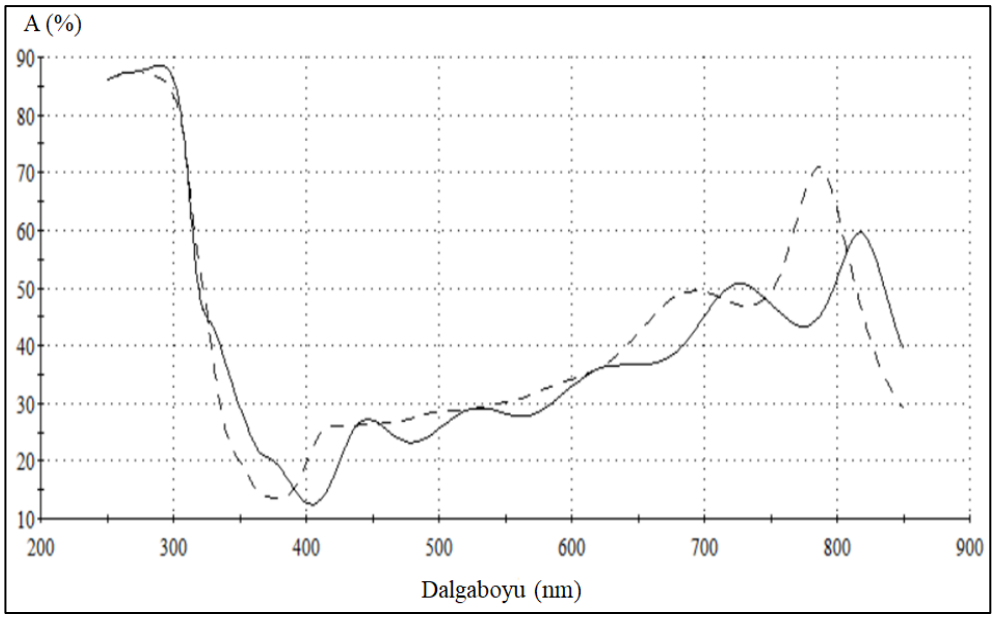
Son durumda elde edilen geçirgenlik, yansıma ve soğurma grafiklerinin karşılaştırılması şekil 4.8-4.10'da verilmiştir**.**



Şekil 4.8 Model 3 düşük ve yüksek yansıtıcı durumların geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.9 Model 3 düşük ve yüksek yansıtıcı durumların yansıtma grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.10 Model 3 düşük ve yüksek yansıtıcı durumların soğurma grafiklerinin karşılaştırılması

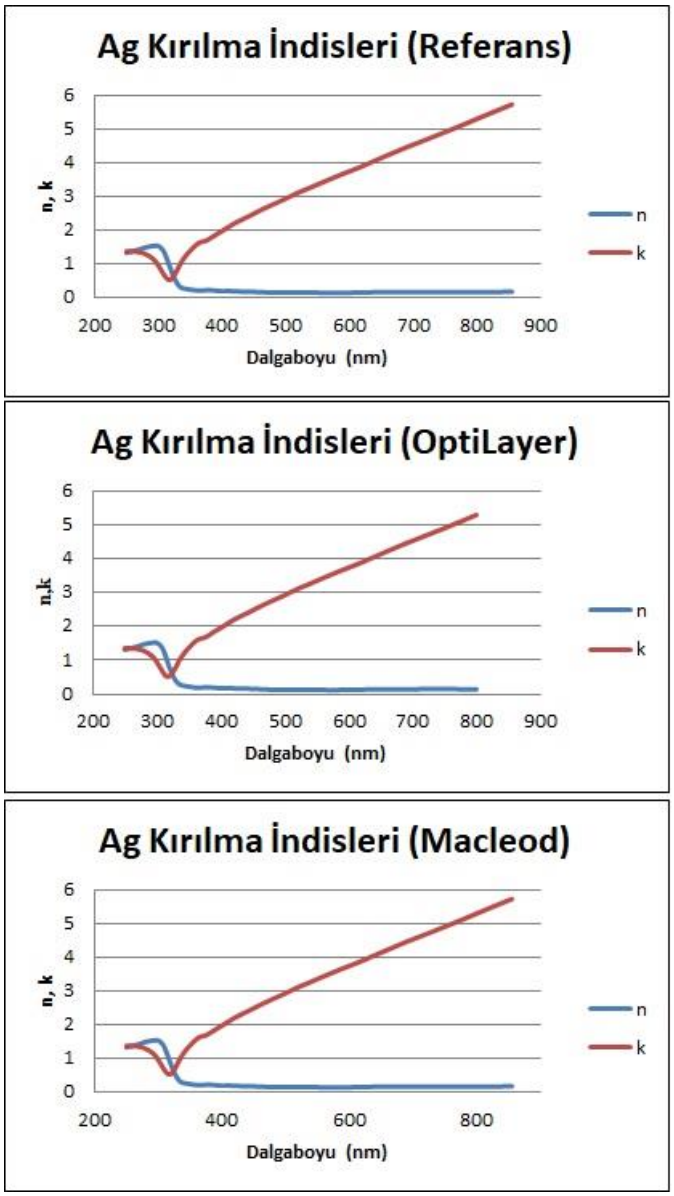
Farklı modellerde, sızma derinliği ve iletkenliğe bağlı kalkanlama hesaplamaları yapılarak tasarlanan çok katmanlı metal-dielektrik yığınlarda ışığın geçirgenliği ve kalkanlama etkinliği incelenmiştir. Kullanılan düşük kırılma indisli dielektrik malzeme

ile 43 dB kalkanlama etkinliği sağlanan ve %63 geçirgenlik elde edilen yığın tasarlanabilmiştir.

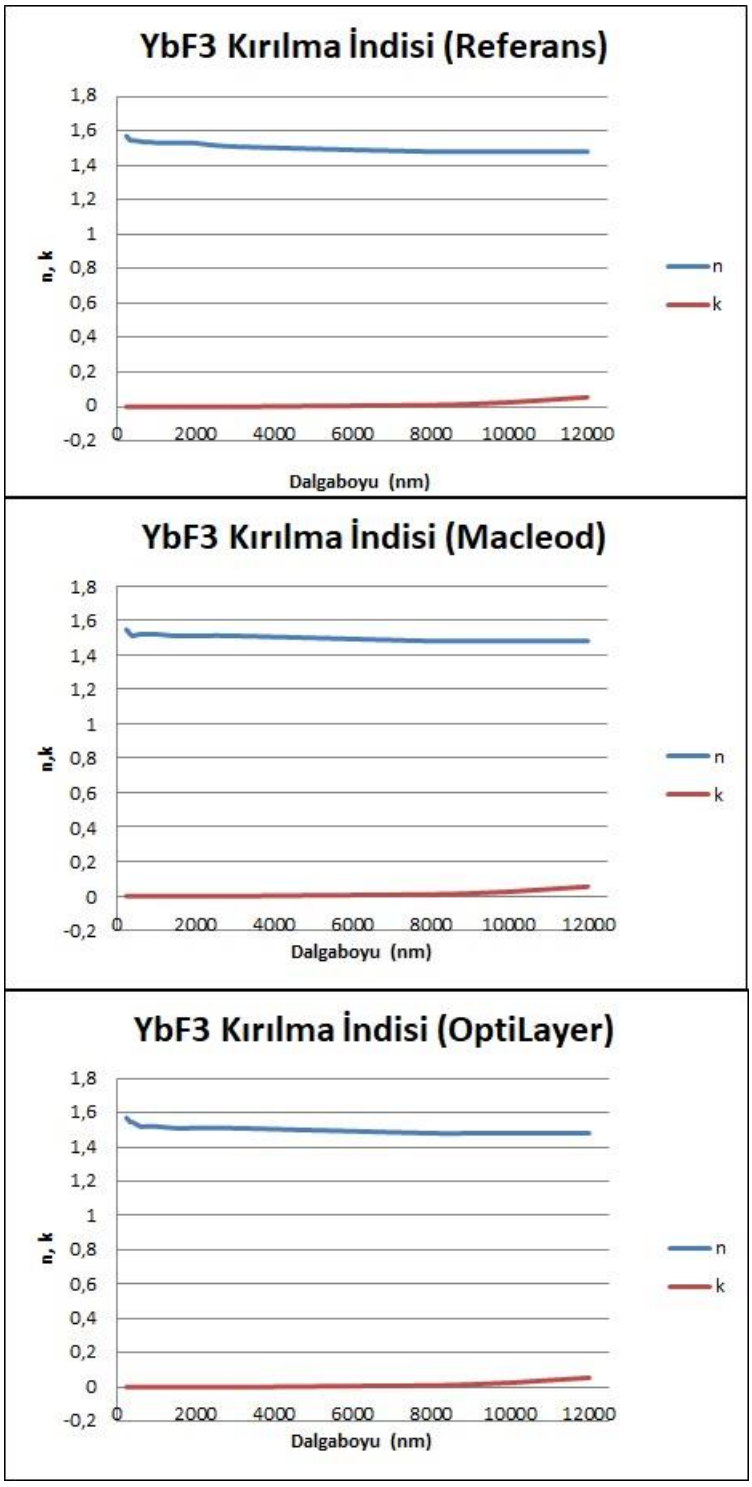
4.1 Oluşturulan Son Modelin Farklı Programlarda Karşılaştırılması

Macleod optik ince film tasarımı programıyla oluşturulan, beklenen kalkanlama etkinliğini ve optik geçirgenliği sağlayan, tasarım OptiLayer isimli benzer bir ticari optik ince film kaplama programıyla yinelenmiştir.

Kullanılan malzemelere ait kırılma indislerinin, benzer altyapıları kullanan programlardan alınan değerlerle referans değerlerin, karşılaştırılması şekil 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.



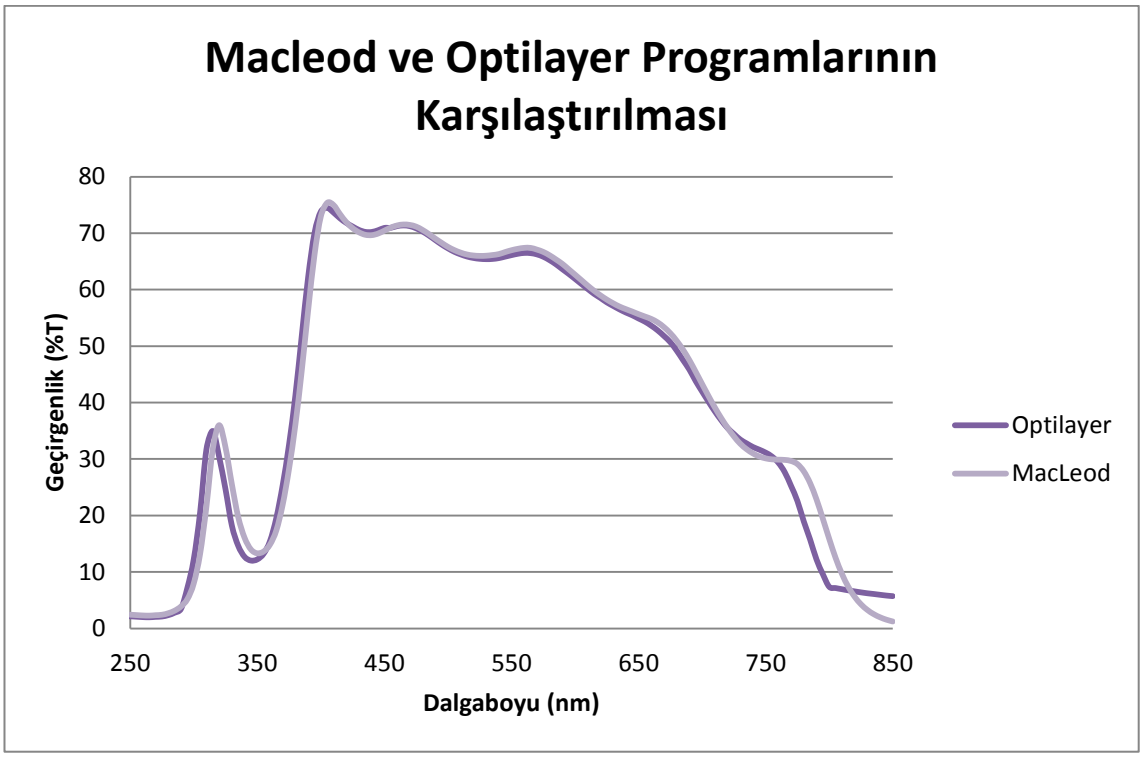
Şekil 4.11 Gümüş için n ve k değerlerinin Macleod ve OptiLayer programlarından alınan değerlerin referans değerlerle karşılaştırılması



Şekil 4.12 İterbiyum Florür için n ve k değerlerinin Macleod ve OptiLayer programlarından alınan değerlerin referans değerlerle karşılaştırılması

Şekil 4.11- 4.12'de de gösterildiği gibi programların kullandıkları kırılma indisi verileri referans kırılma indisiyle uyuşmaktadır. Kırılma indislerinde noktadan sonra ikinci

basamaktan sonra olan rakamsal değişiklikler sonuçlar üzerinde küçük farklılıklar oluşturmuştur. Her iki kaplama programında oluşturulan nihai tasarımların karşılaştırılması şekil 4.13'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi her iki programda elde edilen geçirgenlik grafikleri görünür dalga boyu aralığında örtüşmektedir. Spektrumun bazı bölgelerinde program farklılıklarından (hesaplama yöntemi, kırılma indisi vb.) kaynaklanan ayrılıklar görülebilmektedir



Şekil 4.13 Macleod programında geliştirilen nihai tasarımın OptiLayer programıyla karşılaştırılması

KAYNAKLAR

Anonymous. 2010. Web Sitesi: https://www.kriegerproducts.com/downloads/pdf/RFI-Shielding-Principles.pdf. Erişim Tarihi: 09.06.2018

Anonymous. 2013. Web Sitesi: ttps://www.filmetrics.com/refractive-index-database/Ag/Silver. Erişim Tarihi: 18.05.2019

Anonymous. 2014. Web Sitesi: https://materion.com/resource-center/product-data-and-related-literature/inorganic-chemicals/fluorides/ytterbium-fluoride-ybf3. Erişim Tarihi: 18.05.2019

Anonymous. 2015. Web Sitesi: http://www.giangrandi.ch/optics/eye/eye.shtml. Erişim Tarihi: 25.05.2019

Anonymous. 2010. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. D4935–10. ASTM International, USA.

Bjarklev, A., Broeng J. and Bjarklev, A. S. 2003. Photonic Crystal Fibers. Springer US, Boston, MA.

Busch, K., Lolkes, S., Wehrspohn, R.B. and Foll, H. 2004. Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication and Characterization. Wiley-VCH, 378, Weinheim.

Furman, S. A., Tikhonravov, A. V. 1992. Basics of Optics of Multilayer Systems. Frontiéres, 1992, Paris.

Fox, M. 2001. Optical Properties of Solids. Oxford, 2-8, New York.

Ginley, D., Hosono, H., Paine, D.C. 2011. Handbook of Transparent Conductors. Springer, 534, USA.

Granqvist, C .G. and Hultaker, A. 2002. Transparent and conducting ITO films: New developments and applications, Thin Solid Films, 411(1), 1-5.

Granqvist, C .G. 2007. Transparent Conductors as Solar Energy Materials: A Panoramic Review. Solar Energy Materials and Solar Cells, 91(4), 1529-1598.

Hecht, E. 1998. Optics. Addison Wesley Longman, 418-423, New York.

Izumi, H., Ishihara, T., Yoshioka, H. and Motoyama, M. 2002. Electrical properties of crystalline ITO films prepared at room temperature by pulsed laser deposition on plastic substrates. Thin Solid Films, 411(1), 32–35.

John, S. 1987. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. Phys. Rev. Lett. 58, 2486.

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, Princeton.

Kloppel, A., Kriegseis, W., Meyer, B. K., Scharmann, A., Daube, C., Stollenwerk, J. and Trube, J. 2000. Dependence of the electrical and optical behavior of ITO-silver-ITO multilayers on the silver properties. Thin Solid Films, 365, 139–146.

Li, Y., Optical Properties of Plasmonic Materials, 2017, SPIE Digital Materials, Chapter 1, New York

Lourtioz, J. M., Benisty, H., Berger, V. and Gerard, J.M. 2005. Photonic Cystals: Towards nanoscale photonic devices. Springer, 426, Berlin.

Medvede, J. E. 2007. Unconventional approaches to combine optical transparency with electrical conductivity. Appl. Phys. A, 89, 43-47.

Ohta, H., Nomura, K., Hiramatsu, H., Ueda, K., Kamiya, T., Hirano, M. and Hosono, H. 2003. Frontier of transparent oxide semiconductors. Solid –State Electronics, 47, 2261-2267.

Ohring, M. 1992. The Material Science of Thin Films. Academic Press, 794, Boston.

Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. S., Pedrotti L. M. 2007. Introduction to Optics. Pearson Education, Inc., 476-783, USA.

Palik, E. D. 1985. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, 978, New York.

Palik, E. D. 1991. Silver in Handbook of Optical Constants of Solids II. Academic Press, 350–357, New York.

Sakoda, K. 2004. Optical properties of photonic crystals. Springer Verlag, 265, Berlin.

Sarto, M.S., Sarto F., Larciprete, M.C., Scalora, M., D'Amore, M., Sibilia, C. and Bertolotti, M. 2003. Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band_gap structures. Journal of Applied Physics, 83(5), 2377-2383.

Sarto, M.S., Di Michele, S. and Leerkamp, P. 2002. Electromagnetic performances of innovative lightweight shields to reduce radiated emissions from PCB's. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 44(2), 353-363.

Sarto, M., Sarto, F., Larciprete, M., Scalora, M., D'Amore, M., Sibilia, C. and Bertolotti, M. 2003. Nanotechnology of transparent metals for radio frequency electromagnetic shielding, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 45(4), 586–594.

Scott, J. C., Kaufman, J. H., Brock, P. J., Di Pietro, R., Salem, J. and Goitia, J. 1996. Degradation and failure of MEH-PPV light-emitting diodes. Journel of Applied Phyics, 79, 2745-2751.

Seelig, M. W., Daube, C., Frankeberger, H., Ocker, B. and Stollenwerk, J. 1998. Dependence of film composition and thickness on optical and electrical properties of ITO-metal-ITO multilayers. Thin Solid Films, 326(1-2), 67–71.

Sevgi L. 2000. Elektromanyetik uyumluluk elektromanyetik kirlilik. Teknolojik işbirliği dergisi, 318, İstanbul

Singh, H. and Jha, R. M. 2015. Introductin to Radar Cross Section Reduction. Cambridge University Press, 325, Cambridge.

Tambunano, A., Sarto, M.S. and Sarto, F. 2004. Electromagnetic characterization of innovative shielding materials in the frequency range up to 8 GHz. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 551-556, USA.

Tilley, R. 2000. Colour and The Optical Properties of Materials. John Wiley & Sons, 78-96, USA.

Trifonov, T., Marsal, L. F., Rodríguez, A., Pallarès, J. and Alcubilla, R. 2005. Fabrication of two- and three-dimensional photonic crystals by electrochemical etching of silicon. Physica Status Solidi, 2, 3104-3107.

Uçar, H. 2013. Radar Cross Section Reduction. Journal of Naval Science and Engineering. 9(2), 72-87.

Xifré-Pérez, E., Pallarès, J., Ferré-Borrull, J., Trifonov, T. and Marsal, L. F. . Low refractive index porous silicon multilayer with a high reflection band. Physica Status Solidi, 4(6), 2034-2038.

Yablonovich , E. 1987. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. Physical Review Letters. 58(20), 2059-2062.

Zhang, M. C., Allen, T. W., Drobot, B., McFarlane, S., Meldrum, A. and DeCorby R. G. 2013. Transparency and stability of Ag-based metal–dielectric multilayers. The Optical Society, 52(31), 7479-7485.

EKLER

EK 1 Gümüş (Ag) için Macleod ve Optilayer programlarından alınan kırılma indislerinin referans değerlerler karşılaştırılması

EK 2 İterbiyum Florür (YbF_3) için Macleod ve Optilayer programlarından alınan kırılma indislerinin referans değerlerler karşılaştırılması

EK 1 Gümüş (Ag) için Macleod ve Optilayer programlarından alınan kırılma indislerinin referans değerlerler karşılaştırılması

Ag (Referans)			Ag (Macleod)			Ag (Optilayer)		
Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k
250,51	1,309	1,35	201,6	1,08481	1,25125	250	1,3067	1,3507
253,06	1,320	1,35	203,25	1,098	1,26	255	1,3285	1,3495
255,67	1,331	1,35	204,93	1,11162	1,26563	260	1,3515	1,3511
258,33	1,343	1,35	206,64	1,125	1,27	265	1,3786	1,3470
261,05	1,357	1,35	208,38	1,13719	1,275	270	1,4070	1,3284
263,83	1,372	1,35	210,14	1,149	1,28	275	1,4379	1,3124
266,67	1,388	1,34	211,94	1,16144	1,28531	280	1,4668	1,2769
269,57	1,404	1,33	213,77	1,173	1,29	285	1,4903	1,2277
272,53	1,422	1,32	215,63	1,18188	1,29281	290	1,5069	1,1680
275,56	1,441	1,31	217,52	1,19	1,295	295	1,5186	1,0842
278,65	1,459	1,29	219,44	1,19912	1,2975	300	1,5177	0,9572
281,82	1,476	1,26	221,4	1,208	1,3	305	1,4526	0,7985
285,06	1,490	1,23	223,4	1,21569	1,3025	310	1,3230	0,6470
288,37	1,502	1,19	225,43	1,223	1,305	315	1,0757	0,5217
291,76	1,514	1,14	227,5	1,23069	1,30719	320	0,7873	0,5330
295,24	1,519	1,08	229,6	1,238	1,31	325	0,5650	0,6368
298,80	1,519	0,99	231,75	1,244	1,31469	330	0,3920	0,7848
302,44	1,496	0,88	233,93	1,25	1,32	335	0,2946	0,9833
306,17	1,433	0,76	236,16	1,25719	1,325	340	0,2570	1,1285
310,00	1,323	0,65	238,43	1,265	1,33	345	0,2361	1,2537
313,92	1,142	0,55	240,75	1,27344	1,335	350	0,2212	1,3586
317,95	0,932	0,50	243,11	1,282	1,34	355	0,2066	1,4554
322,08	0,719	0,55	245,52	1,28969	1,34563	360	0,1925	1,5467
326,32	0,526	0,66	247,97	1,298	1,35	365	0,1860	1,6128
330,67	0,388	0,82	250,48	1,30856	1,35063	370	0,1910	1,6426
335,14	0,294	0,99	253,03	1,32	1,35	375	0,1992	1,6653
339,73	0,253	1,12	255,64	1,33106	1,35	380	0,2010	1,7121
344,44	0,238	1,24	258,3	1,343	1,35	385	0,1960	1,7771
349,30	0,221	1,35	261,02	1,35694	1,35125	390	0,1875	1,8404
354,29	0,209	1,44	263,8	1,372	1,35	395	0,1788	1,8957
359,42	0,195	1,53	266,64	1,3875	1,34125	400	0,1730	1,9500
364,71	0,186	1,61	269,53	1,404	1,33	405	0,1721	2,0090
370,15	0,192	1,64	272,5	1,42231	1,32187	410	0,1732	2,0703
375,76	0,200	1,67	275,52	1,441	1,31	415	0,1722	2,1297
381,54	0,198	1,74	278,62	1,45919	1,28813	420	0,1676	2,1848

Ag (Referans)			Ag (Macleod)			Ag (Optilayer)		
Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k
387,50	0,192	1,81	281,78	1,476	1,26	425	0,1621	2,2358
393,65	0,182	1,88	285,02	1,49013	1,22875	430	0,1587	2,2834
400,00	0,173	1,95	288,34	1,502	1,19	435	0,1578	2,3289
406,56	0,173	2,03	291,73	1,51356	1,143	440	0,1576	2,3741
413,33	0,173	2,11	295,2	1,519	1,08	445	0,1561	2,4209
420,34	0,167	2,19	298,76	1,51938	0,98881	450	0,1526	2,4696
427,59	0,160	2,26	302,4	1,496	0,882	455	0,1480	2,5190
435,09	0,159	2,33	306,14	1,4325	0,76106	460	0,1433	2,5677
442,86	0,157	2,40	309,96	1,323	0,647	465	0,1390	2,6147
450,91	0,151	2,48	313,89	1,14206	0,55088	470	0,1354	2,6601
459,26	0,144	2,56	317,91	0,932	0,504	475	0,1328	2,7038
467,92	0,137	2,64	322,04	0,71906	0,55438	480	0,1311	2,7460
476,92	0,132	2,72	326,28	0,526	0,663	485	0,1302	2,7874
486,27	0,130	2,80	330,63	0,38813	0,81856	490	0,1300	2,8291
496,00	0,130	2,88	335,1	0,294	0,986	495	0,1300	2,8720
506,12	0,130	2,97	339,69	0,25331	1,12069	500	0,1300	2,9171
516,67	0,130	3,07	344,4	0,238	1,24	505	0,1300	2,9637
527,66	0,130	3,16	349,25	0,22144	1,34525	510	0,1299	3,0104
539,13	0,129	3,25	354,24	0,209	1,44	515	0,1300	3,0559
551,11	0,124	3,35	359,38	0,19481	1,53375	520	0,1301	3,0990
563,64	0,120	3,45	364,66	0,186	1,61	525	0,1302	3,1398
576,74	0,119	3,55	370,11	0,19206	1,64188	530	0,1302	3,1791
590,48	0,121	3,66	375,71	0,2	1,67	535	0,1298	3,2179
604,88	0,126	3,77	381,49	0,19806	1,735	540	0,1288	3,2571
620,00	0,131	3,88	387,45	0,192	1,81	545	0,1271	3,2972
635,90	0,136	4,01	393,6	0,182	1,87875	550	0,1251	3,3381
652,63	0,140	4,15	399,95	0,173	1,95	555	0,1230	3,3793
670,27	0,140	4,29	406,51	0,17262	2,02938	560	0,1211	3,4205
688,89	0,140	4,44	413,28	0,173	2,11	565	0,1197	3,4614
708,57	0,144	4,59	420,29	0,16669	2,18625	570	0,1189	3,5018
729,41	0,148	4,74	427,54	0,16	2,26	575	0,1187	3,5415
751,52	0,146	4,91	435,04	0,1585	2,32938	580	0,1191	3,5807
775,00	0,143	5,09	442,8	0,157	2,4	585	0,1198	3,6192
800,00	0,143	5,29	450,86	0,15106	2,47875	590	0,1209	3,6570
826,67	0,145	5,50	459,21	0,144	2,56	595	0,1222	3,6942
855,17	0,152	5,72	467,87	0,13731	2,64	600	0,1238	3,7310
			476,87	0,132	2,72	605	0,1255	3,7677
			486,22	0,13025	2,79812	610	0,1273	3,8047
			495,94	0,13	2,88	615	0,1292	3,8423
			506,06	0,12994	2,97375	620	0,1310	3,8808
			516,61	0,13	3,07	625	0,1329	3,9204
			527,6	0,13006	3,15938	630	0,1346	3,9610
			539,07	0,129	3,25	635	0,1363	4,0024

Ag (Referans)			Ag (Macleod)			Ag (Optilayer)		
Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k
			551,05	0,12437	3,34813	640	0,1377	4,0442
			563,57	0,12	3,45	645	0,1388	4,0862
			576,68	0,11931	3,55375	650	0,1397	4,1282
			590,41	0,121	3,66	655	0,1402	4,1700
			604,81	0,1255	3,76625	660	0,1403	4,2113
			619,93	0,131	3,88	665	0,1403	4,2522
			635,82	0,13613	4,01063	670	0,1400	4,2926
			652,55	0,14	4,15	675	0,1398	4,3325
			670,19	0,14006	4,29313	680	0,1397	4,3720
			688,81	0,14	4,44	685	0,1397	4,4108
			708,49	0,14431	4,58625	690	0,1401	4,4491
			729,33	0,148	4,74	695	0,1409	4,4869
			751,43	0,14588	4,90813	700	0,1419	4,5242
			774,91	0,143	5,09	705	0,1430	4,5612
			799,91	0,14256	5,28875	710	0,1443	4,5980
			826,57	0,145	5,5	715	0,1455	4,6347
			855,07	0,15194	5,72062	720	0,1466	4,6714
						725	0,1475	4,7082
						730	0,1481	4,7452
						735	0,1482	4,7826
						740	0,1481	4,8202
						745	0,1476	4,8582
						750	0,1470	4,8964
						755	0,1462	4,9348
						760	0,1454	4,9735
						765	0,1445	5,0124
						770	0,1437	5,0515
						775	0,1430	5,0908
						780	0,1424	5,1302
						785	0,1421	5,1697
						790	0,1419	5,2094
						795	0,1418	5,2491
						800	0,1420	5,2888

EK 2 İterbiyum Florür (YbF_3) için Macleod ve Optilayer programlarından alınan kırılma indislerinin referans değerlerler karşılaştırılması

YbF3 (Referans)			YbF3 (Macleod)			YbF3 (Optilayer)		
Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k
250	1,5699	0,000	250	1,54599	0	250	1,5699	0
255	1,5687	0	255	1,54487	0	255	1,5687	0
260	1,5675	0	260	1,54365	0	260	1,5675	0
265	1,5663	0	265	1,54237	0	265	1,5663	0
270	1,5651	0	270	1,54103	0	270	1,5651	0
275	1,5639	0	275	1,53966	0	275	1,5639	0
280	1,5627	0	280	1,53826	0	280	1,5627	0
285	1,5615	0	285	1,53685	0	285	1,5615	0
290	1,5603	0	290	1,53543	0	290	1,5603	0
295	1,5591	0	295	1,53401	0	295	1,5591	0
300	1,558	0	300	1,53259	0	300	1,558	0
350	1,545	0	305	1,53119	0	350	1,545	0
400	1,545	0	310	1,5298	0	400	1,545	0
600	1,540	0	315	1,52843	0	600	1,520	0
700	1,535	0	320	1,52708	0	700	1,520	0
800	1,535	0	325	1,52575	0	800	1,520	0
900	1,535	0	330	1,52444	0	900	1,520	0
1000	1,532	0	335	1,52316	0	1000	1,520	0
1500	1,531	0	340	1,52191	0	1500	1,510	0
2000	1,530	0	345	1,52068	0	2000	1,510	0
2940	1,510	0	350	1,51948	0	2940	1,510	0
8000	1,480	0,01	355	1,5183	0	8000	1,480	0
9000	1,48	0,015	360	1,51716	0	9000	1,480	0
10000	1,48	0,025	365	1,51604	0	10000	1,480	0
11000	1,48	0,04	370	1,51494	0	11000	1,480	0
12000	1,48	0,055	375	1,51388	0	12000	1,480	0
			380	1,51284	0			
			385	1,51182	0			
			390	1,51084	0			
			395	1,50987	0			
			400	1,50893	0			
			600	1,52000	0			
			700	1,52000	0			
			800	1,52000	0			
			900	1,52000	0			
			1000	1,52000	0			
			1500	1,51000	0			
			2000	1,51000	0			

YbF3 (Referans)			YbF3 (Macleod)			YbF3 (Optilayer)		
Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k	Dalgaboyu	n	k
			2940	1,51000	0			
			8000	1,48000	0,01			
			9000	1,48000	0,015			
			10000	1,48000	0,025			
			11000	1,48000	0,04			
			12000	1,48000	0,055			

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Onur ALPAY

Doğum Yeri : Kırıkkale

Doğum Tarihi : 24 Nisan 1988

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Çorum Atatürk Anadolu Lisesi (2006)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü (2013)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Ekim 2019

Çalıştığı Kurum ve Yıl

TOBB ETÜ - Araştırma Görevlisi (2014-2015)

ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş - Optik Üretim, Test ve Analiz Mühendisi (Mühendis I) (2015-2018)

ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş - Optik Üretim, Test ve Analiz Mühendisi (Mühendis II) (2018-)