T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MULTİBANT SPEKTROSKOPİ UYGULAMALARI İÇİN PLAZMONİK MÜKEMMEL SOĞURUCULAR

Hazırlayan
Aytaç ONUR

Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Yüksek Lisans Tezi

Ağustos 2017
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MULTİBANT SPEKTROSKOPİ UYGULAMALARI İÇİN PLAZMONİK MÜKEMMEL SOĞURUCULAR

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Aytaç ONUR

Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Ağustos 2017
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

Adı-Soyadı : Aytaç ONUR

İmza :



YÖNERGEYE UYGUNLUK

Multibant Spektroskopi Uygulamaları İçin Plazmonik Mükemmel Soğurucular adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Aytaç ÜNÜR
Tezi Hazırlayan

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN
Danışman

Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR
Elektrik – Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında **Aytaç ONUR** tarafından hazırlanan "**Multibant Spektroskopi Uygulamaları İçin Plazmonik Mükemmel Soğurucular**" adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

11/08/2017

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN .....

Üye : Prof. Dr. Celal YILDIZ .....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kutay İÇÖZ .....

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 11/09/2017 tarih ve 2017/38-23 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

11 / 09 / 2017

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Öğrencisi olduğum günden bu yana yaptığım çalışmalarda yol gösteren, engin bilgi ve tecrübesini her daim benimle paylaşan Yüksek Lisans öğrenimim boyunca bana öğrettikleri ile bilim dünyasına ve hayata daha bilgili ve olgun bir mühendis olarak bakabilmemi sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa Türkmen'e teşekkür ederim.

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca hem ders döneminde hem tez dönemimde bana yardımcı olan ve çalışmalarıma katkı sağlayan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Beni yetiştirip bu günlere ulaşmamı sağlayan, hayatımın her anında ve yaptığım her işte olduğu gibi bu çalışmam boyunca da her zaman desteklerini hissettiğim aileme de sonsuz teşekkür ederim.

Aytaç ONUR

Kayseri, Ağustos 2017

MULTİBANT SPEKTROSKOPİ UYGULAMALARI İÇİN PLAZMONİK MÜKEMMEL SOĞURUCULAR

Aytaç ONUR
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2017
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ÖZET

Soğurucular, çalışma frekansında üzerlerine gelen elektromanyetik radyasyonu soğuran sistemlerdir. Soğurucular fonksiyonel olarak rezonant ve geniş bant soğurucular olarak sınıflandırılırlar. Rezonant soğurucular spesifik bir rezonans frekansında soğurma yaparken geniş bant soğurucular geniş bir frekans bandında soğurma yaparlar. Plazmonik tabanlı mükemmel soğurucular ise rezonans frekanslarında gelen elektromanyetik radyasyonun tamamına yakın bir bölümünü soğuran plazmonik tabanlı nanoanten dizileridir. Bu yapılar rezonans frekanslarında oluşan yüksek yakın alan dağılımları yoluyla ışık-madde etkileşimini artırdıkları için spektroskopi, fotovoltaik piller ve biyosensörler gibi farklı uygulamalarda kullanılabilmektedirler. Bu tez çalışmasında literatürde yer alan örneklerinden farklı geometrilere sahip mükemmel soğurucular tasarlanarak nümerik olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışması giriş bölümüyle birlikte toplam beş bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, çalışmaya yönelik temel tanımlamalara yer verilmiştir. Birinci bölümde, açıklık ve parçacık tabanlı plazmonik mükemmel soğurucular tanıtılmıştır. İkinci bölümde, tez çalışmasında mükemmel soğurucuların analizinde kullanılan zaman domeninde sonlu farklar (Finite Difference Time Domain; FDTD) metoduna dayalı simülasyon programı Lumerical FDTD Solutions hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde teze özgü olarak tasarlanan on iki farklı mükemmel soğurucunun çift bant ve çoklu bant rezonans sonuçları nümerik olarak incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise tartışma, sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plazmonik tabanlı mükemmel soğurucular; Spektroskopi; Zaman domeninde sonlu farklar metodu; Biyosensör.

PLASMONIC PERFECT ABSORBERS FOR MULTİBAND SPECTROSCOPY APPLICATIONS

Aytaç ONUR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, August 2017

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Mustafa TÜRKMEN

ABSTRACT

Absorbers are the systems that absorb the electromagnetic radiation coming on the working frequency. The absorbers are functionally classified as resonant and broad band absorbers. While resonant absorbers absorb in a specific resonance frequency, broadband absorbers absorb in a broad frequency band. Plasmonic based perfect absorbers are plasmonic nanoantenna arrays which absorb almost all radiation coming from the resonance frequencies. These structures can be used in different applications such as spectroscopy, photovoltaic batteries and biosensors because they increase light-matter interaction through high near field distributions in resonance frequencies. In this thesis study, perfect absorbers having different geometries than the examples in the literature was designed and numerically examined.

Thesis study consists of total five chapters with the introductory chapter. In the introductory chapter, basic descriptions related to the study have been given. In the first chapter, aperture and particle based plasmonic perfect absorbers have been introduced. In the second chapter, detailed information about Lumerical FDTD Solutions program, based on finite difference time domain (FDTD), used in the analysis of the perfect absorbers have been given. In the third chapter the results of twelve different perfect absorbers structures which are designed as unique for the thesis that have dual-band and multi-band resonance values, have been examined numerically. In the fourth chapter, conclusions and recommendations have been presented.

Keywords: Plasmonic based perfect absorbers; Spectroscopy; Finite difference time domain; Biosensor.

İÇİNDEKİLER

MULTİBANT SPEKTROSKOPİ UYGULAMALARI İÇİN PLAZMONİK MÜKEMMEL SOĞURUCULAR

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK i
YÖNERGEYE UYGUNLUK ii
KABUL VE ONAY SAYFASI iii
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR iv
ÖZET v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
KISALTMALAR VE SİMGELER x
ŞEKİLLER LİSTESİ xii

GİRİŞ

TEMEL TANIMLAMALAR

G.1. Nanoteknoloji 19
G.1.1. Nano Kavramı 19
G.1.2. Nanoteknoloji Kavramı 20
G.2. Elektromanyetik Spektrum 21
G.3. Antenler, Optik antenler ve Nanoantenler 22
G.4. Plazmonikler 24
G.5. Yüzey Plazmon Polaritonları 26
G.5.1. Yüzey Plazmonları 27
G.5.2. Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) 27
G.5.3. Lokalize Yüzey Plazmon Rezonansları (LSPRs) 29
G.6. Spektroskopi Uygulamaları 29
G.7. Yüzey Güçlendirilmiş Kızılötesi Soğurum (SEIRA) 30
G.8. Tezin amacı 30

1. BÖLÜM
PLAZMONİK TABANLI MÜKEMMEL SOĞURUCULAR

1.1. Giriş 32
1.1.1. Parçacık tabanlı plazmonik mükemmel soğurucu dizileri..... 33
1.1.2. Açıklık tabanlı plazmonik mükemmel soğurucu dizileri 34

2. BÖLÜM
NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ

2.1. Giriş 36
2.2. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu 36
2.3. Lumerical FDTD Solutions Programının Özellikleri 40

3. BÖLÜM
PLAZMONİK TABANLI MÜKEMMEL SOĞURUCU TASARIMLARI

3.1. Giriş… 42
3.2. Teze Özgü Tasarlanan Plazmonik Tabanlı Mükemmel Soğurucular……. 43
3.2.1. T#1'e ait sonuçlar..... 43
3.2.2. T#2'e ait sonuçlar..... 48
3.2.3. T#3'e ait sonuçlar..... 57
3.2.4. T#4'e ait sonuçlar..... 59
3.2.5. T#5'e ait sonuçlar..... 64
3.2.6 T#6'e ait sonuçlar..... 71
3.2.7. T#7'e ait sonuçlar..... 76
3.2.8. T#8'e ait sonuçlar..... 83
3.2.9. T#9'a ait sonuçlar..... 88
3.2.10. T#10'a ait sonuçlar..... 96
3.2.11. T#11'e ait sonuçlar..... 102
3.2.12. T#12'e ait sonuçlar..... 108
3.2.13. T#13'e ait sonuçlar..... 115

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler 120

KAYNAKÇA 124

ÖZGEÇMİŞ 135

KISALTMALAR VE SİMGELER

Au	Altın
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
DI-Water	De-ionised Water; De-İyonize Edilmiş Su
EBL	Electron-Beam Lithography; Elektron Demet Litografisi
ERR	Electric Ring Resonator; Elektrik Halka Rezonatör
FDTD	Finite-Difference Time-Domain; Zaman Domeninde Sonlu Farklar
FOM	Figure of Merit; Deneysel Başarı Grafiği
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy; Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
IPA	Isopropil Alcohol; İzopropil Alkol
LSP	Localized Surface Plasmon; Lokalize Yüzey Plazmonu
LSPR	Localized Surface Plasmon Resonance; Lokalize Yüzey Plazmon Rezonansı
MDM	Metal-Dielectric-Metal; Metal-Dielektrik-Metal
MgF_2	Magnezyum Florür
MIR	Mid infrared – Orta Kızılötesi
MPA	Metamaterial Perfect Absorber; Metamalzeme Mükemmel Soğurucu
NIR	Near Infrared - Yakın Kızılötesi
O_2	Oksijen
MS	Mükemmel Soğurucu
PA	Perfect Absorber; Mükemmel Soğurucu
PMMA	Polymethyl Methacrylate; Pleksi
PSPs	Propagating Surface Plasmons; Yayılan Yüzey Plazmonları
RI	Refractive Index - Kırıcılık İndeksi
SEIRA	Surface-Enhanced Infrared Absorption; Yüzey Güçlendirilmiş Kızılötesi Soğurum
SEM	Scanning Electron Microscope; Taramalı Elektron Mikroskobu
SERS	Surface-Enhanced Raman Spectroscopy; Yüzeyde Güçlendirilmiş Raman Spektroskopisi
SiO_2	Silisyumdioksit

SP	Surface Plasmon; Yüzey Plazmonu
SPP	Surface Plasmon Polariton; Yüzey Plazmon Polaritonu
SPR	Surface Plasmon Resonance; Yüzey Plazmon Rezonansı
SRR	Split Ring Resonators; Ayrık Halka Rezonatörler
THz	TeraHertz

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1. Bazı nesne, madde ve canlıların nanometre cinsinden yaklaşık büyüklükleri.. 19
Şekil G.2. Lycurgus Kupası.. 21
Şekil G.3. Elektromanyetik spektrum (Gama ışını, X-ışını, Morötesi, Görünür ışık, Kızılötesi, Mikrodalga, Radyo, Tv ve Uzun-dalga).. 22
Şekil G.4. (a) H şeklindeki optik anten dizisinin birim hücresi (b) birim hücrenin katmanları.. 24
Şekil G.5. Serbest elektron bulutunun yayılma ilişkisi.. 25
Şekil G.6. Dielektrik metal arayüzeyde yüzey plazmon polaritonu ve iki yarım uzayda azalan alanlar. 27
Şekil G.7. Yüzey plazmon rezonansının ölçülmesi için kurulan düzenek.. 28
Şekil G.8. Newton'un prizma deney düzeneği.. 29
Şekil 1.1. (a) Mükemmel soğurucu yapısı. (b) Mükemmel soğurucunun SEM görüntüsü. (c) Çift-bant spektral cevaba sahip mükemmel soğurucunun spektral cevabı.. 34
Şekil 1.2. (a) Tasarlanan açıklık tabanlı nanoanten yapısı. (b) Üretilen nanoanten dizisinin SEM görüntüsü.. 35
Şekil 2.1. Yee hücresi 37
Şekil 2.2. FDTD programı arayüzünde tasarlanan MS yapısı. 41
Şekil 3.1. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi.. 43
Şekil 3.2. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisi spektral cevabı.. 44
Şekil 3.3. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde farklı dielektrik katman kullanılması durumunda elde edilen absorbans spektrumları. 44
Şekil 3.4. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin (a) f_1 rezonansındaki ve (b) f_2 rezonansındaki elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$.. 45
Şekil 3.5. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) g değişimi (b) L değişimi (c) t_1 değişimi (d) s değişimi (e) w değişimi (f) P değişimi 46

Şekil 3.6. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.. 47
Şekil 3.7. H şeklindeki MS dizisinin birim hücresi.. 48
Şekil 3.8. H şeklindeki MS dizisi spektral cevabı. 49
Şekil 3.9. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$ (a) f_1 rezonansı (b) f_2 rezonansı. 49
Şekil 3.10. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) L değişimi (b) H değişimi (c) w değişimi (d) t değişimi. 50
Şekil 3.11. Geometrisi değiştirilen H şeklindeki MS dizisinin birim hücresi.. 51
Şekil 3.12. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde farklı dielektrik katman kullanılması durumunda elde edilen absorbans spektrumları. 52
Şekil 3.13. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.. 53
Şekil 3.14. (a) SiO_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları. 54
Şekil 3.15. (a) Al_2O_3 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.. 55
Şekil 3.16. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) L değişimi (b) H değişimi (c) w değişimi (d) P değişimi. 56
Şekil 3.17. Farklı kırılma indisli malzemeler için mükemmel soğurucu dizisinin absorbans spektrumu.. 56
Şekil 3.18. (a) Mükemmel soğurucu şematik görünümü (b) Mükemmel soğurucu dizisi spektral cevabı (c, d) Elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$ (c) f_1 ve (d) f_2 rezonanslarında oluşan dağılımlar.. 58
Şekil 3.19. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) d değişimi (b) h değişimi (c) L değişimi (d) w değişimi. 59
Şekil 3.20. (a) Çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi. (b) Çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları.. 60

Şekil 3.21. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 61
Şekil 3.22. (a) SiO_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 62
Şekil 3.23. (a) Al_2O_3 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 63
Şekil 3.24. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi..... 64
Şekil 3.25. Demir haç şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi..... 65
Şekil 3.26. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2, (d) f_3 ve (e) f_4 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 66
Şekil 3.27. (a) SiO_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2, (d) f_3 ve (e) f_4 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 67
Şekil 3.28. (a) Al_2O_3 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2, (d) f_3 ve (e) f_4 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 68
Şekil 3.29. Demir Haç şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi (b) w değişimi..... 69
Şekil 3.30. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış mükemmel soğurucu birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi..... 70
Şekil 3.31. (a) Yıldız şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi. (b) Mükemmel soğurucu dizisi..... 71
Şekil 3.32. MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. (b) Farklı dielektrikler için absorbans spektrumları..... 72
Şekil 3.33. (a, b) MgF_2 ve (c, d) SiO_2 dielektrik ara katmanlar için rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 73

Şekil 3.34. Yıldız şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) Altın kalınlığı (t_{Au}) değişimi (b) MgF_2 kalınlığı (t_S) değişimi (c) h değişimi (d) Periyot (P) değişimi. 74
Şekil 3.35. (a) Farklı kırılma indisli malzemeler için mükemmel soğurucu dizisinin absorbans spektrumu. (b) Kırılma indisi-rezonans frekansı arasındaki ilişki. 75
Şekil 3.36. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış mükemmel soğurucu birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.. 75
Şekil 3.37. (a) Dört başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucunun şematik görünümü. (b) Dört başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı ara katmanlar için absorbans spektrumları..... 77
Şekil 3.38. (a) Mükemmel soğurucu dizisinin MgF_2 ara katmanı ile spektral cevabı. (b) f_1 ve (c) f_2 rezonanslarında elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$.. 78
Şekil 3.39. (a) Mükemmel soğurucu dizisinin SiO_2 ara katmanı ile spektral cevabı. (b) f_1 ve (c) f_2 rezonanslarında elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$.. 79
Şekil 3.40. (a) Mükemmel soğurucu dizisinin Al_2O_3 ara katmanı ile spektral cevabı. (b) f_1 ve (c) f_2 rezonanslarında elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$.. 80
Şekil 3.41. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) d değişimi (b) L değişimi (c) h_1 değişimi (d) h_2 değişimi (e) w_1 değişimi (f) w_2 değişimi (g) P değişimi. 81
Şekil 3.42. (a) Kaplama ortamlı mükemmel soğurucu şematik görünümü. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi 82
Şekil 3.43. Dört başlı ok şeklinde nano açıklık tabanlı MS dizisi birim hücresi.. 83
Şekil 3.44. Dört başlı ok şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları..... 84
Şekil 3.45. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 85
Şekil 3.46. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 86

Şekil 3.47. Önerilen MS dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) d değişimi (b) L değişimi (c) h_2 değişimi (d) w_1 değişimi (e) w_2 değişimi (f) P değişimi. 87
Şekil 3.48. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış MS dizisinin birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.. 88
Şekil 3.49. MS dizisi birim hücresi. (a) Şematik görünümü (b) Üstten görünümü..... 89
Şekil 3.50. Demir haç şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları..... 90
Şekil 3.51. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 91
Şekil 3.52. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 92
Şekil 3.53. (a) Al_2O_3 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 93
Şekil 3.54. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi (b) w değişimi (c) L değişimi (d) P değişimi. 94
Şekil 3.55. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış MS dizisinin birim hücresi. (b) Yapının kırılma indisi değişimlerinde spektral cevabı. (c) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.. 95
Şekil 3.56. MS dizisi birim hücresi. (a) Şematik görünümü. (b) Üstten görünümü..... 96
Şekil 3.57. Yıldız şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları..... 97
Şekil 3.58. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 98
Şekil 3.59. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 99

Şekil 3.60. (a) Al_2O_3 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 100
Şekil 3.61. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi, (b) d değişimi. 101
Şekil 3.62. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış MS dizisinin birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi. 101
Şekil 3.63. MS dizisi birim hücresi. (a) Şematik görünümü. (b) Üstten görünümü..... 103
Şekil 3.64. Köşeli H şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları..... 103
Şekil 3.65. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 104
Şekil 3.66. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 105
Şekil 3.67. (a) Al_2O_3 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 106
Şekil 3.68. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) t değişimi (b) w değişimi (c) P değişimi (d) t_{Au} değişimi. 107
Şekil 3.69. MS dizisi birim hücresi. (a) Şematik görünümü. (b) Üstten görünümü..... 108
Şekil 3.70. Dört kollu açıklık şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları..... 109
Şekil 3.71. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2 ve (d) f_3 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 110
Şekil 3.72. (a) SiO_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2 ve (d) f_3 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 111

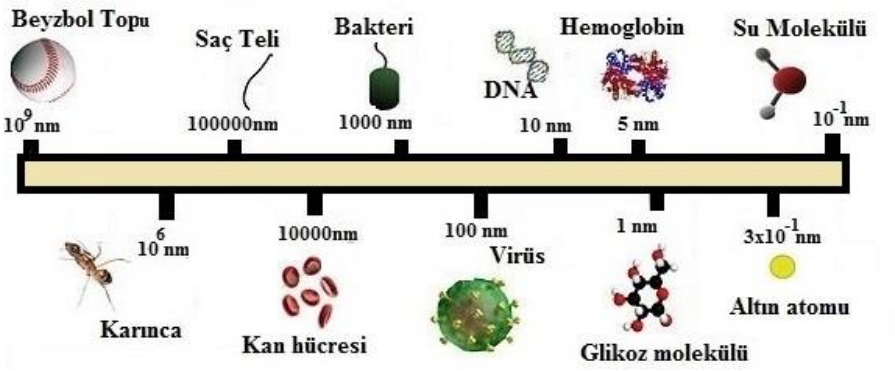
Şekil 3.73. (a) Al_2O_3 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2, ve (d) f_3 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 112
Şekil 3.74. Önerilen MS dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi (b) L değişimi (c) w değişimi (d) P değişimi (e) t_{Au} değişimi. 114
Şekil 3.75. Davut Yıldızı şeklindeki MS dizisinin birim hücresi..... 115
Şekil 3.76. Davut Yıldızı şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları..... 116
Şekil 3.77. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 117
Şekil 3.78. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları..... 118
Şekil 3.79. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi (b) w değişimi (c) P değişimi. 119

GİRİŞ
TEMEL TANIMLAMALAR

G.1. Nanoteknoloji

G.1.1. Nano Kavramı

Nano kelimesi dilimize Yunancadan girmiştir. Yunanca cüce anlamındaki "nanos" sözcüğünden türemiştir. Nano, dilimizde herhangi bir büyüklüğün milyarda biri anlamında bir ön ek olarak kullanılmakta ve 'nm' kısaltması ile gösterilmektedir. Nanometre, büyüklük olarak metrenin milyarda birini (1 / 1.000.000.000 m. = 10^{-9}) ifade eder [1-4]. Bir nanometre yaklaşık olarak altı karbon atomunun genişliği ya da on su molekülü büyüklüğündedir. İnsan saç teli çapı yaklaşık 90 – 100 μm arasındadır. Şekil G.1'de bazı nesnelerin, canlıların ve moleküllerin nanometre cinsinden büyüklükleri görülmektedir. Nano kavramı ve nano ölçek bilim, teknoloji ve mühendisliği birleştiren nanoteknolojinin ve nanomalzemenin tasarlandığı, görüntülendiği, incelendiği ve analiz edildiği bir boyuttur.



Şekil G.1. Bazı nesne, madde ve canlıların nanometre cinsinden yaklaşık büyüklükleri.

Nano kavramı her ne kadar metrik bir boyut ifade etse de malzemenin bu boyutlarda farklı fiziksel özelliklerinin ortaya çıkması nedeniyle yapısal özellikleri hakkında da fikir vermektedir. Fiziksel boyutları nanometre ebatlarına inen malzemelerde geleneksel özelliklerinin dışında daha farklı elektriksel, optik, fiziksel ve kimyasal özellikler ortaya çıkmaktadır [2-4]. Nano boyutlara ulaşan maddelerde yüzey/hacim oranı artmakta ve bu artışta malzeme yüzeyinde yer alan atom sayısını artırmaktadır. Bu değişimler malzemenin yüzey enerjisini artırarak farklı özelliklerinin ortaya çıkmasına olanak sağlamakta ve nano malzemeler elde edilmektedir. Nano kavramı elektronik yapılar ve devreler için de önemli bir ifadedir. Nano boyutlarda imal edilebilen devreler ile yüksek hızlı bilgisayarlar ve daha geniş depolama alanına sahip bellekler geliştirilmektedir. Üzerinde bulunan nano boyutlu transistörlerin sayısının artırılması daha gelişmiş ve daha hızlı elektronik kartların yapımına olanak sağlamıştır. Yine nano boyutta üretilen veya nano malzeme kullanılan sensör vb. algılayıcı elektromekanik yapılar daha hassas ve daha hızlı ölçüm ve algılama yapan elektromekanik sistemler halini almışlardır [2-5].

G.1.2. Nanoteknoloji Kavramı

Nanoteknoloji günümüzde birçok bilim dalında hızla gelişen ve büyüyen bir yere sahiptir. Dünyada her maddenin yapı taşı atomlardır ve maddeler yapısal özelliklerini bu atomların dizilişleriyle elde ederler [4-5]. Maddelerin atomik ve moleküler seviyede kontrolü, nanometre boyutlarında yeni özelliklerinin elde edilmesi ya da ortaya çıkarılması için gerekli malzeme ve sistemlerin üretilmesi nanoteknoloji olarak ifade edilebilir [5-6]. Nanoteknolojik ürünlerde malzemelerin atomik ve moleküler yapıları istenilen şekillerde değiştirilerek hedeflenen yapılar üretilebilmektedir. Bu şekilde üretilen malzemeler çok farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Daha sert ya da daha esnek, daha hafif, daha kararlı, daha iletken özelliklere sahip maddeler ortaya çıkabilmektedir. Örnek olarak 1 nanometre boyutlarına inen altın rengi kırmızı olmakta, sert ve kırılgan bir özelliğe sahip seramik nanometre boyutlarında şekil verilebilen daha esnek bir yapıya dönüşebilmektedir [6-8]. Nanoteknoloji terimi her ne kadar 21. yüzyılda yaygın olarak kullanılsa bile tarihi 14. yüzyıla kadar uzanmaktadır. Antik Roma krallarının kullanması için yapılan ‘Lycurgus Kupası’ nano malzemelerin özelliklerini ortaya çıkaran ilk ürün olma özelliği taşımaktadır. Bu kupalar, üzerlerinde bulunan altın ve gümüş nano parçacıklar sayesinde ışık altında kupanın rengi yeşilden

kırmızıya dönüşür (Şekil G.2). Kupa üzerindeki nano malzemeler yoluyla meydana gelen metal-dielektrik etkileşimi yapıdaki farklı özellikleri ortaya çıkarmaktadır [9]. Eski çağlarda bu şekilde birçok sanatsal çalışmada nano malzeme kullanıldığı görülmüştür. Yakın tarihimizde ise nanoteknolojinin gelişimi 1980'li yıllardan itibaren hızlanmıştır. 1980'li yıllarda farklı amaçlara yönelik birçok cihaz geliştirilmiştir. 1931 yılında ilk elektron mikroskobu (Transmission Electron Microcope-TEM) geliştirilmiştir. 1942 yılında ise taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microcope-SEM) tanıtılmıştır. 21. yüzyıl başlarında ise nano materyal üretimi artmış, nano görüntüleme teknikleri geliştirilmiş ve bilimin her dalına yayılan bir nanoteknoloji kavramı ortaya çıkmıştır. Nanoelektronikte ise gelişim süreci 2005 yılında hızlı bir şekilde artarak nano boyutlu elektronik cihazların tasarımı yaygınlaşmıştır. Günümüzde nanoteknoloji ve bu teknoloji ile üretilen ürünler; uzay ve havacılık alanında, savunma ve silah sanayiinde, tıp teknolojileri ve tanı teşhis uygulamalarında, elektronik materyaller ve bilgisayar donanımlarında ayrıca imalat ve malzeme sektörü gibi neredeyse hayatın her alanında yer almaktadır.

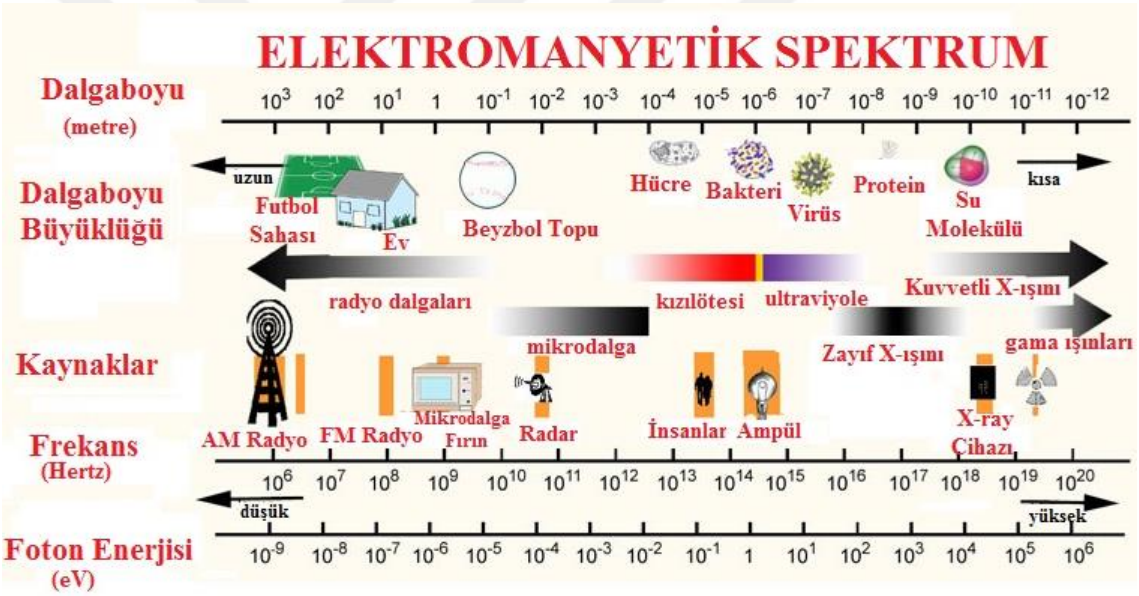


Şekil G.2. Lycurgus Kupası [9].

G.2. Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik dalgalar geniş bir dalga boyunu veya geniş bir frekans aralığını kapsamaktadır. Tüm elektromanyetik radyasyonun frekans değerleri ya da dalga boylarına göre sınıflandırıldığı ve sıralandığı gösterime elektromanyetik spektrum (tayf) denir [10-11]. Şekil G.3'de görüldüğü gibi gama ışınlarından radyo dalgalarına kadar

tüm elektromanyetik dalgalar frekans değerleri ve dalga boylarına göre spektrumda yer alır. Elektromanyetik dalgalar frekansları ya da dalgaboyları değiştikçe farklı etkilere sahip olmakta ve bu etkiler neticesinde Şekil G.3'de görüldüğü gibi hayatın birçok alanında kullanılmaktadırlar. Radyo-TV frekansları, ses dalgaları, medikal ve biyolojik görüntüleme teknikleri, görünür ışık bölgeleri ve benzeri birçok uygulama farklı frekans ve dalgaboyuna sahip elektromanyetik dalgalar kullanılarak elde edilmektedir. Tez çalışmasında tasarlanan yapıların spektral aralığı Kızılötesi frekans (300 GHz – 300 THz) bölgesinde yer almaktadır. Kızılötesi frekans bölgesi uzak, orta ve yakın kızılötesi şeklinde üç bölüme ayrılmaktadır. Tez çalışmasında genellikle orta ve yakın kızılötesi bölgeler tercih edilmiştir [12].



Şekil G.3. Elektromanyetik spektrum (Gama ışını, X-ışını, Morötesi, Görünür ışık, Kızılötesi, Mikrodalga, Radyo, TV ve Uzun-dalga).

G.3. Antenler, Optik antenler ve Nanoantenler

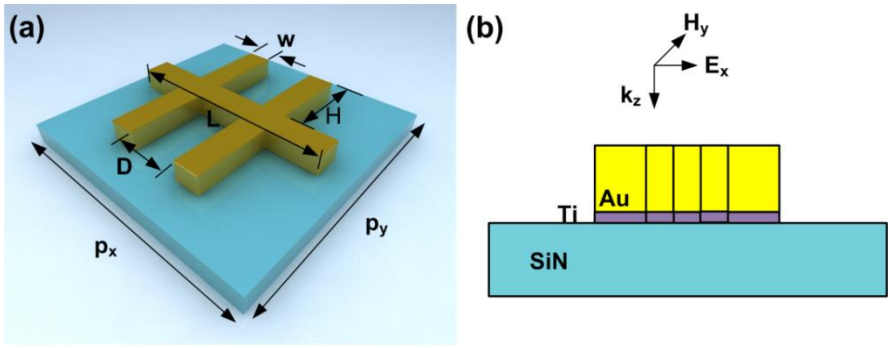
Antenler elektromanyetik dalgaları göndermek veya almak için kullanılan cihazlardır [13-15]. Verici antenler, iyi ayarlanmış ışıma diyagramları ile uzak mesafelere gönderilmek üzere elektromanyetik dalgaların oluşturulmasında verici devrelerde kullanılırlar. Alıcı devrelerde ise antenler uzak mesafedeki bir kaynaktan gönderilen kodlanmış bilgileri elde etmek için elektromanyetik dalgaların alınmasında alıcı anten olarak kullanılırlar. Antenler özellik ve kullanım alanlarına göre farklı şekillerde

sınıflandırılmaktadır [13-16]. Genel olarak ise antenler frekans bantlarına göre, uygulama alanlarına göre, ışıma özelliklerine göre, yapısal özelliklerine ve genel özelliklerine göre beş ana başlıkta sınıflandırılabilirler [14-17]. Uygulama alanlarına göre antenler; radyo TV yayın antenleri, haberleşme antenleri, yön tayini antenleri ve radar antenleri şeklinde sınıflandırılabilirler. Işıma özelliklerine göre ise; izotropik, kalem biçimli, yelpaze biçimli, belirli düzlemlerde eş diyagramlı ve dairesel veya eliptik polarizasyonlu antenler şeklinde sınıflandırılırlar. Antenler yapısal özelliklerine göre ise; dipol, monopol, katlanmış dipol, mikroşerit, yarık, parabolik yansıtıcı, spiral, huni, düzlemsel ve doğrusal antenler olarak sınıflandırılırlar [13-18]. Genel özelliklerine göre antenler; adaptif, geniş bant, açıklık, yansıtıcılı, rezonant, elektriksel boyutu küçük ve yürüyen dalga antenler şeklinde sınıflara ayrılırlar. Son olarak frekans bantlarına göre ise, çok alçak frekans antenleri (3 – 30 KHz), alçak frekans antenleri (30 – 300 KHz), orta frekans antenleri (0.3 – 3 MHz), yüksek frekans antenleri (3 – 30 MHz), çok yüksek frekans antenleri (30 – 300 MHz), çok çok yüksek frekans antenleri (0.3 – 3 GHz), süper yüksek frekans antenleri (3 – 30 GHz) ve milimetrik dalga antenleri (30 – 300 GHz) şeklinde sınıflandırılabilirler [15-19].

Optik antenler ise bulundukları ortamda yayılan optik ışımaları elektriksel işaretlere veya tersi olarak elektriksel işaretleri optik ışımalara verimli bir şekilde dönüştüren aygıtlardır [17-19]. Optik antenler elektromanyetik ışımayı çok küçük boyutlara sıkıştırabilirler ve bu sıkıştırılmış elektromanyetik ışımayı yerel kaynaklardan uzak alanlara çok verimli bir şekilde gönderebilirler. Optik antenlerin çalışma prensibi ışık ile madde arasında etkileşmeye dayanmaktadır. Optik antenler farklı geometrilerde ve farklı boyutlarda tasarlanarak birçok farklı uygulamada kullanılabilmektedirler [19-20]. Optik antenler ışığı yönlendirebilmek ve hapsedebilmek için geliştirilmiş deneysel bir teknolojidir. En temel özellikleri serbestçe yayılan optik bir radyasyonu sınırlandırılmış bir enerjiye dönüştürebilmeleridir. Sahip oldukları bu özellik nedeniyle kuantum ışık kaynakları, optik haberleşme, fotovoltaikler, biyolojik ve kimyasal algılama, güneş pilleri ve mevcut mikroskopların hassasiyetlerinin geliştirilmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar [15-20].

Optik antenlerin nanometre boyutlarında üretilen modelleri ise “nanoantenler” olarak adlandırılırlar [20-21]. Tek bir nanoparçacık veya nanoaçıklık kullanarak nanoantenler

tasarlanabilmektedir. Boyutları çok küçük olduğu için birden fazla parçacık veya açıklık nanoanten kullanılarak da nanoanten dizileri oluşturulabilir. Nanoantenler, tek bir birim hücrenin veya birden fazla nanoparçacık ya da nanoaçıklıktan oluşan bir anten dizisinin bir taban malzemesi üzerinde çeşitli nano-üretim teknikleri kullanılarak elde edilirler. Nanoanten dizilerinin geometrilerinin değiştirilmesi ile istenilen optik özelliklere sahip yapılar gerçekleştirilebilir [21-22]. Bazı dielektrik malzemelerin ve metallerin birleştirilmesi sonucu elde edilen plazmonik metamalzemelerle ışığın bu yapılar içerisinde hapsedilmesi veya ışığın yönlendirilebilmesi mümkündür [18-22]. Optik anten dizilerine örnek olarak literatürde yer alan ve Şekil G.4 (a)'da verilen H şeklindeki nanoanten dizisi gösterilebilir [23]. H şeklindeki nanoanten dizisi birbirine paralel iki eş dikdörtgen altın nanoparçacık ve onları ortalarından dik bir şekilde kesen üçüncü bir dikdörtgen altın nanoparçacıktan oluşmaktadır. Yapının birim hücresinde L yatay olan nanoçubuğun uzunluğunu, w nanoçubukların genişliğini, D paralel iki nanoçubuk arasındaki mesafeyi, H dikey nanoçubukların alt ve üst kollarının uzunluklarını göstermektedir. Şekil G.4 (b)'de yapının birim hücresinde kullanılan metal ve dielektrik katmanlaın kesit görünümü yer almaktadır [23].



Şekil G.4. (a) H şeklindeki optik anten dizisinin birim hücresi. (b) birim hücrenin katmanları [23].

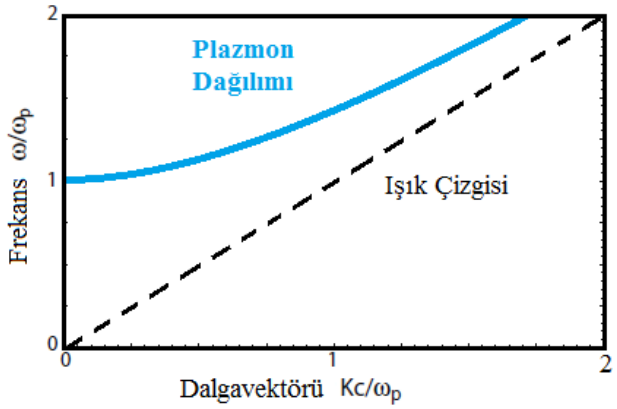
G.4. Plazmonikler

Plazmonikler metallerdeki toplu elektron osilasyonları olan plazmonlar yoluyla ışığı oda sıcaklığında hapsetme imkânı sağlayan nanoanten yapılardır. Plazmon, metallerdeki toplu elektron osilasyonlarıdır [24-26]. Mükemmel soğurucu yapılarında ışık oda

sıcaklığında bu yolla hapsedilebilmektedir. Çalışılan dalgaboyundan daha küçük boyutlardaki metalik nanoyapılar plazmon enerjisini kullanarak ışık madde etkileşimini arttırarak ışığı kırınım limitinin altında sınırlayabildikleri için [24-28] plazmonikler verimli optik algılama araçlarıdır [24, 28-29]. Şekil G.5'de metallerdeki serbest elektron bulutlarının yayılma ilişkisi yer almaktadır ve şekilden görüldüğü üzere, plazma frekansı altında ($\omega < \omega_p$) elektromanyetik yayılım yoktur. $\omega > \omega_p$ durumunda dalgalar

$$v_g = d\omega/dk < c \tag{1}$$

grup hızıyla yayılırlar.



Şekil G.5. Serbest elektron bulutunun yayılma ilişkisi [24, 27-29].

$\omega = \omega_p$ olduğunda düşük sönüm nedeniyle $\epsilon(w_p) = 0$ eşitliği elde edilir. Bu durumda boyuna uyarım modu (k || E), zayıf depolarize edici bir alan olarak;

$$\mathbf{E} = (-1/\epsilon_0)\mathbf{P} \tag{2}$$

şeklinde formülize edilir. Bu formülde ve tez içerisinde yer alan diğer formüllerde terimlerin kalın punto ile verilmesi o terimlerin vektörel bir nicelik olduğunu göstermektedir. Dielektrik uzanım ve dielektrik sabiti aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon_0\epsilon\mathbf{E} = \epsilon_0\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}\right)\mathbf{E} \tag{3}$$

Metallerin optik davranışlarının modellenmesinde Drude ve Lorentz modelleri gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bu modellerle metallerin ϵ' ları;

$$\Rightarrow \epsilon(\omega) = 1 - \frac{\boldsymbol{\omega_P^2}}{\boldsymbol{\omega^2 + i\gamma\omega}} = 1 - \frac{\omega_P^2 \tau^2}{\omega^2\tau^2 + i\omega\tau} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir [24,26].

Burada ω_p plazma frekansı olarak tanımlanır ve;

$$\omega_p^2 = Ne^2/(\epsilon_0 m) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Düşük frekanslarda $\kappa\tau \ll 1$, metaller güçlü soğuruculardır [24, 26, 28-29]. Soğurma sabiti ise;

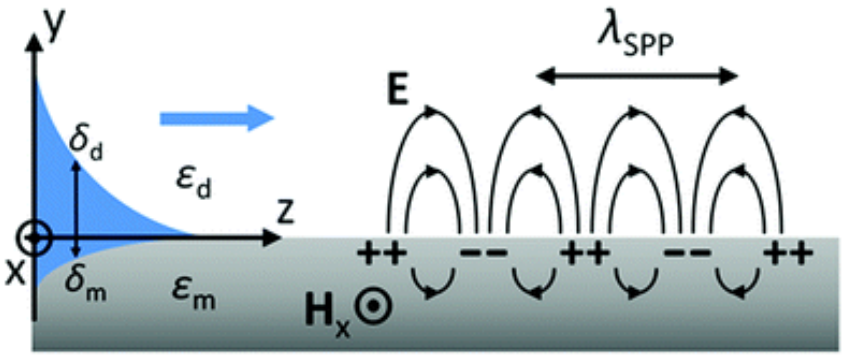
$$\alpha = \sqrt{2\omega_p^2 \omega\tau/c^2} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir [24, 26, 29].

Metal-dielektrik ara yüzeyinde oluşan ve yayılan serbest elektron osilasyonları yüzey plazmonu olarak tanımlanmaktadır ve metalik nanoyapılarda elektromanyetik alanlarla kuple olmuş yayılmayan elektron uyartımları ise lokalize yüzey plazmonu olarak ifade edilmektedir [24, 26, 29].

G.5. Yüzey Plazmon Polaritonları

Yüzey plazmon polaritonları, tek yönde yayılan ve metal/dielektrik ara yüzeyinde ilerleyen elektromanyetik dalgalardır [24, 30-32]. Dalgalar ilerleme yönüne dik yönde hızla sönümlenirler. Dalga metal ve harici dielektrik ortamın sınırları üzerindedir. Bu osilasyonlar sınırdaki herhangi bir değişikliğe karşı son derece hassastır ve Şekil G.6'da görüldüğü gibi yayılırlar [24, 32-33]. Ara yüzeyde sönümlenen dalgalardan δ_m 10 nm ~ 100 nm, δ_d 300 nm ~ 500 nm, δ_x ~ 500 nanometrede hayatta kalabilmektedir.



Şekil G.6. Dielektrik metal ara yüzeyde yüzey plazmon polaritonu ve iki yarım uzayda azalan alanlar [33].

G.5.1. Yüzey Plazmonları

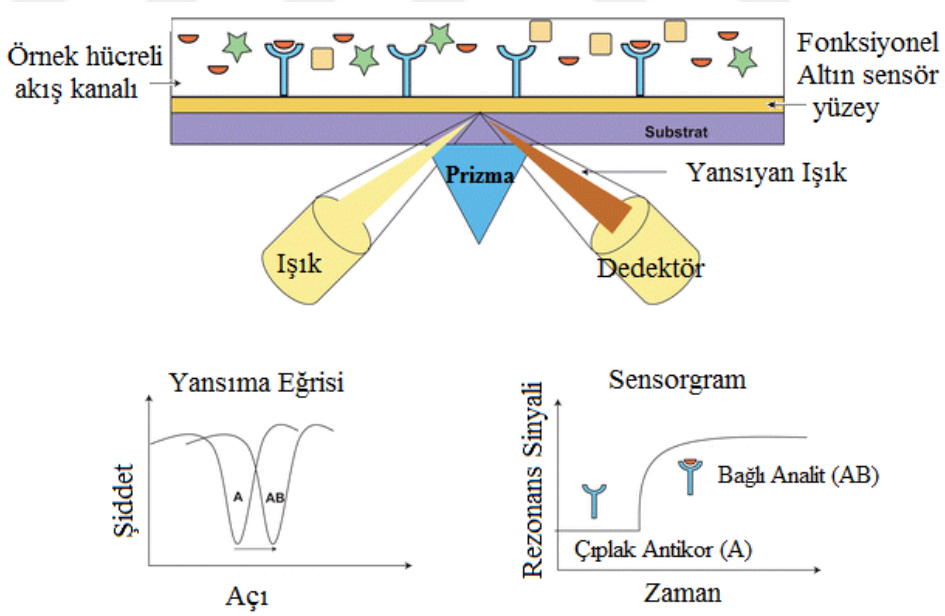
Metal ve dielektrik ara yüzeyi sınırında oluşan serbest elektron osilasyonlarına yüzey plazmonları adı verilir. Yüzey plazmonları, yayılan yüzey plazmonları ve LSP olarak iki sınıfa ayrılırlar [24, 30, 33-34]. Yayılan yüzey plazmonları metal filmlerde uyarılabilir ve bu metal filmler, Kretschmann [35] ve Otto [36] prizma kuplajlayıcı ve optik dalga kılavuzu kuplajlayıcı olarak örneklendirilebilir. Lokalize yüzey plazmonları (LSP) ise metal nanoparçacıklarda uyarılabilir ve bu uyartım sayesinde yakın-alan bölgesinde güçlü bir elektromanyetik alan indükleyebilir. Lokalize yüzey plazmonlarının metal nanoparçacıklarda uyarılması ile yapılan uygulama örnekleri ise, kırıcılık indeksi ölçümü [37-38], yüzey arttırılmış Raman spektroskopisi [39-41] ve biyomoleküler etkileşim tespiti [42] şeklinde sıralanabilir.

G.5.2. Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR)

Metallerin ya da sıvı ve katı haldeki maddelerin bir ışık kaynağı yoluyla uyarılması sonucu sahip oldukları elektronlarda meydana gelen toplu osilasyona yüzey plazmon rezonansı (Surface Plasmon Resonance, SPR) denir [43-46]. Polarize ışık, yüzeyi altın kaplı bir prizmaya gönderildiğinde ışığın bir kısmı yansırken bir kısmı da soğurulur. Işığın geliş açısı değiştirilerek yansıyan ışığın şiddetindeki değişim izlendiğinde yansıyan ışık şiddetinde belirgin bir azalma görülür. Yansıyan ışığın şiddetinde maksimum azalmanın gerçekleştiği açı rezonans açısı ya da SPR açısı şeklinde adlandırılır. Bu geliş açısında ışık, yüzey plazmonlarını olan elektron paketçiklerini uyarır ve yüzey plazmon rezonans olayı meydana gelir. Yüzey plazmon rezonansı iki optik ortamın ara yüzeyine ince iletken bir altın ya da gümüş film yerleştirildiğinde

meydana gelir. Belirli bir geliş açısında metal yüzeyindeki elektron frekanslarının gelen ışığın fotonlarının frekanslarıyla eşleşmeleri nedeniyle rezonans durumuna ortaya çıkar. Bu rezonans durumunda enerji soğurulacağı için yansıyan ışının yoğunluğunda bir azalma meydana gelmektedir. SPR uygulamalarında genellikle düzlemsel metal veya metal nanoparçacık yüzey üzerinde malzemelerin soğurma derecelerini ölçmek için kullanılır [44-47].

Gümüş ve ya altın bir metal yüzeye belirli bir dalgaboyuna sahip ışık (elektromanyetik dalga) çarptığında, yansıma açısı ile yansır. SPR açısında, ışık yansıtılmaz ve maksimum oranda soğurulur. Şekil G.7'de görüldüğü gibi yüzeye eklenen herhangi bir molekül yada örnek hücre metalin dış yüzeyi boyunca ilerleyen plazmon dalganın rezonans açısını değiştirecektir. Böylece rezonans frekansında meydana gelen kayma ya da değişim ölçülerek örnek üzerine eklenen molekülün varlığını tespit edilebilmektedir [48-50]. Bu yöntem biyo-algılamada tercih edilen bir uygulama yöntemidir.



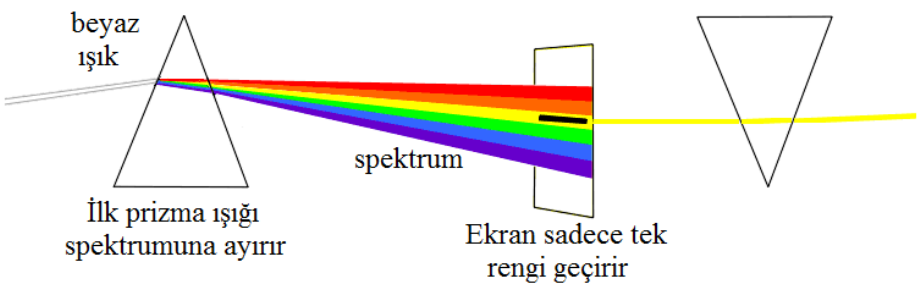
Şekil G.7. Yüzey plazmon rezonansının ölçülmesi için kurulan düzenek [50].

G.5.3. Lokalize Yüzey Plazmon Rezonansları (LSPRs)

Lokalize yüzey plazmon rezonansı (Localized Surface Plasmon Resonance; LSPR) metalik nanoparçacıklarda görülen ve temeli elektromanyetik alan artışına dayanan bir durumdur [51-52]. Bir yüzeyde bulunan metal nanoparçacıklar ultraviyole bandında elektromanyetik dalgalar kullanılarak uyarılır ve bu uyartım sonucunda yüzeyde yer alan tüm elektronlar belirli bir frekans değerinde rezonansa girerek maksimum enerji soğurumuna yol açarlar. Metal nanoparçacıkların rezonansa girdiği frekans kırıcılık indisine bağlıdır. Metal parçacıklara tutunan herhangi bir madde ya da molekül rezonans frekansını etkileyeceğinden aynı frekansta soğurulan elektromanyetik dalga ya da maksimum soğrulmanın gerçekleştiği rezonans frekansı referans alınarak tutunan maddelerin yapısı belirlenebilmektedir [24, 51-53]. Bu çalışma yöntemi biyo-algılama uygulamalarında kullanılan mükemmel soğurucuların temelini teşkil etmektedir.

G.6. Spektroskopi Uygulamaları

Madde ile elektromanyetik radyasyon arasındaki etkileşimi inceleyen bilim dalına spektroskopi denilmektedir [54-56]. Spektroskopi genellikle atom, molekül gibi maddelerin bir enerji düzeyinden diğerine geçişleri sırasında soğurulan ya da saçılan parçacıklar, ışık veya ses aracılığı ile incelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Işığın özelliklerini ölçerek spektroskopik analiz yapmakta kullanılan cihazlara ise spektrometre ya da spektrofotometre denir [57]. Spektroskopi tarihi ve gelişim süreci Newton'un 1666 yılında yaptığı çalışmalar ile başlamıştır [56-58]. Newton yaptığı prizma deneyi ile beyaz ışığı oluşturan renkleri göstermiş ve ilk spektroskopik uygulamayı gerçekleştirmiştir (Şekil G.8).



Şekil G.8. Newton'un prizma deney düzeneği.

G.7. Yüzey Güçlendirilmiş Kızılötesi Soğurum (SEIRA)

Yüzey güçlendirilmiş kızılötesi soğurum (Surface-Enhanced Infrared Absorption; SEIRA) uygulamalarında üzerine düşürülen ışığın dalgaboyundan daha küçük olan ince metal filmler, yüzeyde arttırılmış kızılötesi soğurum sağlamaktadır. SEIRA yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta algılanacak olan hedef analitin moleküler rezonansı ile üretilen yapılardan elde edilen rezonans frekanslarının aynı olacak şekilde ayarlanabilmesidir [59-62]. Bu da tasarlanacak olan çipin geometrik şeklinde ve boyutlarında hatta kullanılacak olan malzemede değişiklikler yapılarak sağlanabilmektedir. Raman spektrometresinin gelişiminin ardından, aynı yüzey yükseltme etkisinin düşük frekanslarda gözlenebilmesi ile SEIRA spektroskopisi gelişim göstermiştir. IR frekanslarda SEIRA yöntemi kullanılarak metal parçacıklar arasında hapsedilebilen elektromanyetik alan miktarı yükseltilebilmektedir. IR ışınları kullanılarak metal yüzeyler üzerinde bulunan moleküllerin doğrudan uyarılmasıyla yoluyla SEIRA elde edilmektedir. Gelen kızılötesi radyasyonun elektrik alanı, yüzeydeki lokalize yüzey plazmonların uyarımıyla artırılarak verimli bir soğurum etkisi sağlanabilmektedir [60-64].

G.8. Tezin Amacı

Tezin amacı, aynı anda birden fazla molekülün ya da bir molekülün birden fazla rezonans modunun algılanmasında kullanılabilecek kızılötesi bölgede çalışan çok bantlı plazmonik tabanlı mükemmel soğurucular tasarlamak ve tasarlanan mükemmel soğurucu dizilerinin analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Literatürde yer alan benzer yapıların ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve çalışma metodunun belirlenmesinin ardından kullanılacak paket program yoluyla teze özgü olarak tasarlanan nanoanten dizilerinin nümerik analizleri yapılacaktır. Tasarlanan nano boyuttaki yapıların spektral cevapları incelenecek, rezonans frekanslarında soğurum yüzdeleri hesaplanarak bu frekans değerlerinde oluşan yakın alan dağılımları elde edilecektir. Yapıların tasarımında kullanılan dielektrik ara katmanlar değiştirilerek spektral cevaplar üzerinde ve yakın alan dağılımları üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Tasarlanan mükemmel soğurucuların geometrik parametreleri değiştirilerek farklı rezonans frekanslarında kullanılabilecek yapılar araştırılacaktır. Böylelikle ilgili mükemmel soğurucu yapılar için rezonans frekanslarının ayarlanmasında kullanılabilecek bir kontrol mekanizması

geliştirilmiş olacaktır. Rezonans frekansları ayarlanarak farklı rezonans değerine sahip moleküller ayarlanabilecektir. Yapıların kırılma indisi hassasiyetleri kontrol edilerek bir sensör olarak kullanılabilme yetenekleri değerlendirilecektir. Tez çalışmasında parçacık tabanlı ve açıklık tabanlı mükemmel soğurucular tasarlanarak soğurum kapasiteleri ve rezonans sayıları yüksek yapılar elde edilmeye çalışılacaktır. Mükemmel soğuruculardа elektromanyetik radyasyonun soğurum değerinin ve yakın alan dağılımı değerlerinin yüksek olması istenilen temel özelliklerdendir. Bu değerlerin yüksek olması nanoanten dizisinin hedef moleküllerle etkileşimini artırmakta böylelikle daha hassas algılama yapılabilmektedir. Özetle bu çalışmada yeni ve literatürdeki örneklerden farklı geometrilere sahip çift ve çok bant rezonans cevabına sahip plazmonik tabanlı mükemmel soğurucular tasarlanarak spektroskopi uygulamalarında ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılma potansiyelleri araştırılacaktır. Günümüzde biyo-algılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekül ya da analitin algılanması arzu edilmekte olup çoklu bant rezonans cevaba sahip sensör yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında en az iki rezonanslı olmak üzere, üç ve dört adet rezonans frekansına sahip yapılar elde edilmeye çalışılacaktır. Birden fazla rezonans frekansına sahip mükemmel soğurucu yapılar çok bantlı spektroskopi uygulamaları ve çoklu biyo-algılama çalışmalarının temelini oluşturmaktadır.

1. BÖLÜM
PLAZMONİK MÜKEMMEL SOĞURUCULAR

1.1. Giriş

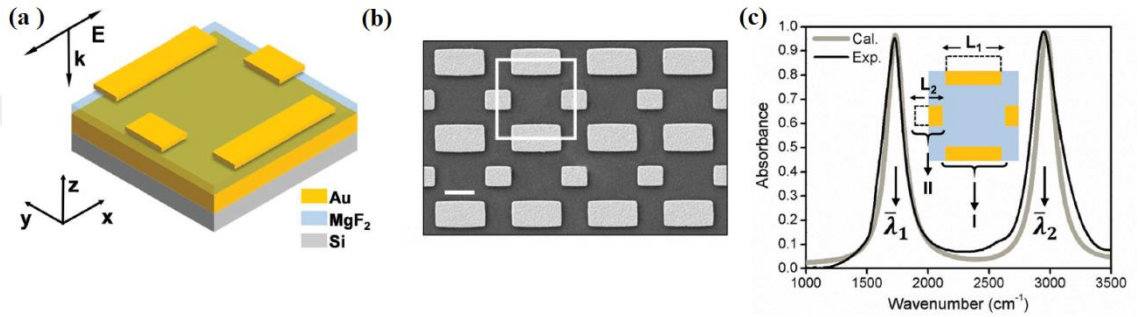
Plazmonik mükemmel soğurucular (MS), rezonans frekanslarında gelen radyasyonun (elektromanyetik dalganın) büyük bir bölümünü soğuran plazmonik tabanlı nano aygıtlardır [61, 65-71]. Mükemmel soğurucular belirli bir geometride yapılandırılmış, kullanılan ışığın dalgaboyundan küçük metal parçacık ya da açıklık dizileri şeklinde tasarlanabilmektedirler. Tasarlanan bu yapılarda düz bir metal film ile yapılandırılmış nano boyutlu parçacıklar ya da açıklıklar arasına yerleştirilen bir dielektrik ara katman yolu ile elektromanyetik enerjinin soğurumu arttırılmaktadır. Plazmon enerjisini kullanan ve dielektrik-metal kompoziti olan bu soğurucular plazmon enerjisi yoluyla ışığı oda sıcaklığında ve çok küçük boyutlarda hapsedebilen ve ışığı istenildiği gibi yönlendirebilen, hapsedilen yakın alan dağılımlarını yükselterek ışık-madde etkileşimini artıran, nano boyutlardaki optik nanoanten dizileridir [24, 61, 68-77]. Plazmonik soğurucuların kırılma indeksi hassasiyeti, polarizasyon hassasiyeti, geometrik veya maddesel parametre değişimleri ile ayarlanabilen spektrumları, rezonans değerlerindeki şiddetli soğurma değerleri gibi optik özellikleri, kimyasal ve biyolojik algılamayı mümkün kılmaktadır [71-79]. Literatürde yer alan ilk örneklerinde tek-bant [80- 82] olarak tasarlanmaya ve üretilmeye başlayan mükemmel soğurucular, nanoteknolojinin gelişimi ve bu alanda yapılan araştırmaların hızlı artışı ile çift-bantlı [61, 83-86] olarak tasarlanmaya ve üretilmeye başlamıştır. Günümüzde ise bir sensör olarak kullanılması durumunda, aynı anda birden fazla molekülün algılanması ya da daha hassas algılama olanağı sağlaması nedenleriyle çoklu bant yapılar üzerindeki çalışmalar artmıştır. Üç-bant [87-89] ve dört-bantlı [90] olarak tasarlanan mükemmel soğurucuların deneysel

çalışmaları ve fabrikasyon işlemleri yaygın bir çalışma alanı haline gelmiştir. Multi-bant plazmonik mükemmel soğurucular [91-92] spektroskopi [93] ve biyo-algılama uygulamalarında [61, 94-95] önemli bir yere sahip nanoanten dizileridir.

1.1.1. Parçacık tabanlı mükemmel soğurucular

Parçacık tabanlı plazmonik mükemmel soğurucular nanoanten dizilerinin en yaygın modelleridir. Günümüz teknolojisinde ilgi çekici bir çalışma alanı olan negatif kırıcılık indeksi [96-97] ve sonrasında gelişen metamalzeme uygulamalarında nanoyapılar ve nanoantenler tercih edilmektedir [98-99]. Mükemmel soğurucu nanoanten çalışmaları hassas sensörlerin [100-101], gelişmiş fotovoltaik pillerin [102-106] ve optik görüntülüme cihazlarının [107-108] tasarlanmasında da önemli bir yer tutmaktadır. Geleneksel parçacık tabanlı nanoanten dizilerinin ardından parçacık tabanlı mükemmel soğurucular yaygın bir şekilde tasarlanmakta ve hızla gelişen bir çalışma alanı olarak popüler bir araştırma sahası halini almaktadır. Soğurum değerleri %100'e yakın olan yani gönderilen ışığın neredeyse tamamını belirli rezonans frekanslarında hapsedebilen parçacık tabanlı mükemmel soğurucular genellikle dört etkin dielektrik tabaka kullanılarak tasarlanır. Metal-dielektrik-metal sentezi şeklinde oluşan yapılarda taban malzemesi olarak silikon tercih edilmektedir. Taban malzemesinin üzeri altın katman ile kaplanmakta ve bu şekilde ışığın alt bölüme geçmesi engellenmektedir. Altın üzerinde ise farklı kırılma indislerine sahip dielektrik katmanlar (MgF_2, SiO_2, Al_2O_3 vb.) kullanılarak yapının soğurum değerleri metal-dielektrik-metal etkileşimi vasıtasıyla artırılmaya çalışılmaktadır. Dielektrik ara katman üzerinde nanoanten şeklin yer aldığı altın parçacık bulunmaktadır. Teze özgü tasarlanan anten modeli altın nanoparçacık halinde birim hücrenin en üst katmanında yer almaktadır. Birim hücre tasarımının ardından gerek teorik çalışmalar gerekse de deneysel çalışma ve fabrikasyon işlemleri nanoanten dizileri şeklinde yapılmaktadır. İlk uygulamalarında tekli bant [80] olarak tasarlanan parçacık tabanlı mükemmel soğurucular günümüzde çift-bant ve çoklu-bant spektral cevaba sahip yapılar şeklinde tasarlanabilmektedir [61, 87, 90]. Soğurma oranları yüksek olan rezonans frekansları, tasarlanan nanoyapıda ne kadar fazla ise bu yapıların günümüzde tercih edilme oranları da bir o kadar fazla olmaktadır. Parçacık tabanlı çift bantlı plazmonik mükemmel soğurucu nanoanten dizilerine Çetin vd. [109] tarafından tasarlanan (Şekil 1.1 (a)) ve nanoüretimi gerçekleştirilen (Şekil 1.1 (b)) yapı

örnek olarak verilebilir. Mükemmel soğurucu birim hücresinin alt yüzeyi Silikon katman üzerine 200 nm kalınlıkta altın film ile kaplanmış ve 100 nm'lik MgF_2 ara katman üzerine yerleştirilen 50 nm kalınlıktaki altın nanoparçacıklar kullanılmıştır. Şekil 1.1 (c)'de yapının y-polarizeli aydınlatma altında elde edilen spektral davranışı yer almaktadır. Çift bant rezonans cevaba sahip olan MS dizisinde ilk rezonansta %95 ve ikinci rezonansta %98'lik soğurma elde edilmiştir. Yapının teorik ve deneysel sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.



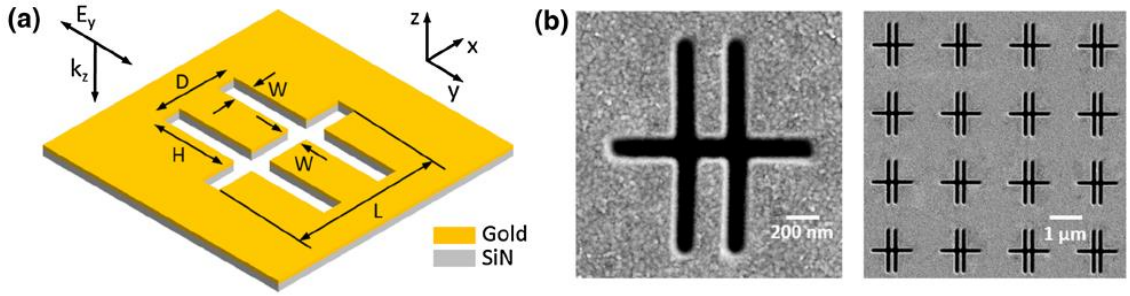
Şekil 1.1. (a) Mükemmel soğurucu yapısı. (b) Mükemmel soğurucunun SEM görüntüsü. (c) Çift-bant spektral cevaba sahip mükemmel soğurucunun spektral cevabı [109].

1.1.2. Açıklık tabanlı mükemmel soğurucular

Plazmonik mükemmel soğurucu tasarımlarında yeni bir çalışma alanı olarak açıklık tabanlı mükemmel soğurucular geliştirilmektedir. Plazmonik nanoanten dizilerinin açıklık modellerinin [110-112] geliştirilip üretilmelerinin ardından benzer yöntemlerle mükemmel soğurucu dizileri de tasarlanmaktadır. Açıklık tabanlı mükemmel soğuruculardaki genellikle dört ana katman bulunmaktadır. Yapıların en alt tabakasında silikon (Si) substrat kullanılmaktadır. Silikon üzerine altın (Au) film kaplanmakta, altın üzerine bir dielektrik ara katman yerleştirilmekte ve en üst bölümde de açıklık nanoanten yapının oyulacağı bir altın katman yer almaktadır. Silikon alt tabaka üzerinde kullanılan altın film gönderilen ışığın alt bölüme geçmesini engelleyerek yukarıda hapsedilen ışık miktarını yani soğurum miktarını artırıcı bir işlev yapmaktadır. İki metal altın tabaka arasında kullanılan dielektrik katmanlar ise meta-dielektrik-metal etkileşimi yoluyla soğurum miktarını artırmaktadır. Bu ara katmanda tasarlanan yapılara göre farklı kırılma indisine sahip dielektrik malzemeler tercih edilebilmektedir. Birim hücrenin en üst bölümde yer alan altın katman ise tasarlanan yapının ya da şeklin

içerisine oyularak açıklık anten modelin meydana getirildiği bölümdür. Açıklık tabanlı mükemmel soğurucular yüksek soğurum oranları, gelişmiş yakın alan dağılımları ve yüksek kırılma indisi hassasiyetleri ile parçacık tabanlı modelleri gibi başarılı sonuçlar vermektedir. Günümüzde yaygın bir şekilde tasarlanan açıklık tabanlı mükemmel soğurucuların deneysel araştırmaları ve nanoüretimleri gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. Bu tez çalışmasında parçacık tabanlı mükemmel soğurucular ile birlikte açıklı tabanlı mükemmel soğurucu tasarımları da gerçekleştirilmiş ve nümerik analizleri yapılmıştır. Spektral cevapları incelenen, yakın alan dağılımları elde edilen açıklık tabanlı yapılar literatüre sunulmuştur.

Şekil 1.2 (a)'da açıklık tabanlı olarak tasarlanmış H şeklinde bir nanoanten birim hücresi görülmektedir [113]. Yapının alt katmanında 80 nm kalınlığında silikon nitrat (SiN), üst katmanında ise 30 nm kalınlığında altın (Au) kullanılmıştır. Altın katman içerisine oyularak oluşturulan H şeklindeki açıklık yapıda geometrik parametreler W = 100 nm, H = 600 nm, L = 1250 nm, D = 200 nm olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 1.2 (b)'de üretilen nanoanten birim hücresi ve dizisi verilmiştir.



Şekil 1.2. (a) Tasarlanan açıklık tabanlı nanoanten yapısı. (b) Üretilen nanoanten dizisinin SEM görüntüsü [113].

2. BÖLÜM
NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ

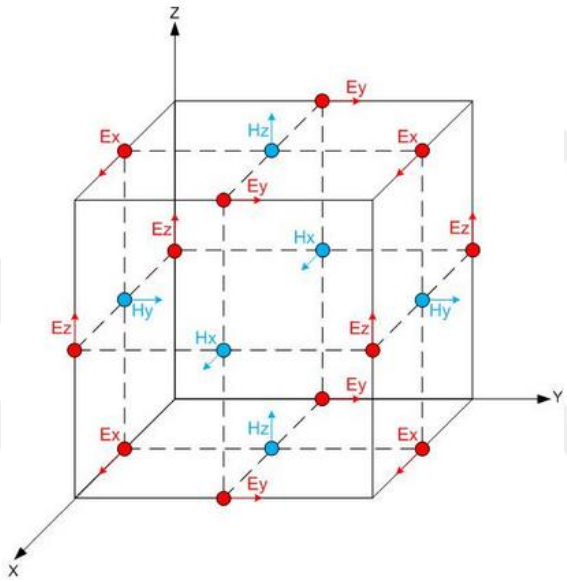
2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında yapılacak olan nümerik analizler, FDTD metodu kullanılarak gerçekleştirilecek ve bu amaçla FDTD tabanlı Lumerical FDTD isimli paket program kullanılacaktır [114]. Zaman domeninde sonlu farklar (Finite Difference Time Domain; FDTD) yöntemini kullanan Lumerical FDTD Solutions simülasyon programı, yapılan üç boyutlu nanoanten tasarımlarının elektromanyetik simülasyonlarını hızlı bir şekilde gerçekleştirmesi ve doğruluk oranının oldukça yüksek olması nedeniyle tercih edilmiştir. Bu yazılım aracılığıyla gerçekleştirilen simülasyonlardan yapıların optik özellikleri analiz edilecek, ardından yapıların geometrilerinin değiştirilmesi durumunda tekrar yapılan simülasyonlardan elde edilen veriler sonucunda geometrinin yapıların optik özellikleri (frekans cevapları) üzerindeki etkisi incelenecektir. Bu şekilde spektroskopi ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılmaya uygun optik özelliklere sahip mükemmel soğurucu yapıları belirlenebilecektir [24, 115].

2.2. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu

Sonlu farklar (FD: Finite Difference) yöntemi uzun süredir bilinmesine ve sıklıkla kullanılmasına rağmen zaman domeninde Maxwell denklemleri için kullanımı ilk olarak 1966 yılında K. Yee tarafından önerilmiştir. Bunun sonucunda elektromanyetik dalga yayılımını modelleyen Maxwell denklemlerinin FD ile yeniden yazılması ve zamana göre türevlerinin de sayısallaştırılarak genelleştirilmesi yöntemi FDTD adıyla yani zaman domeninde sonlu farklar yöntemi (Finite Difference Time Domain) olarak

anılmış ve bu şekilde kullanımı yaygınlaşmıştır [24, 115-117]. FDTD yöntemi Maxwell denklemlerinde bulunan diferansiyel operatörlerin zamanda ve konumda ayrıklaştırılması temeline dayanmaktadır. Yapıların gerçek durumlarının belirlenmesi amacıyla üç boyutlu (3D) yapıların ele alınması gerektiği durumlarda uzaydaki ayrıklaştırma Şekil 2.1'de yer alan Yee [118] tarafından önerilen birim hücre kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.1. Yee hücresi [118].

Gerçek bir problemde yapı, her biri bir ε ve μ değerine sahip olan ve uygun bir şekilde boyutlandırılmış Yee hücrelerine bölünerek kolaylıkla analiz edilebilir. Burada ε malzemenin dielektrik sabitini, μ ise birim hücredeki malzemenin manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir [24, 115-116].

3D-FDTD için Yee birim hücresi kullanıldığında elektrik ve manyetik alanların bileşenleri iteratif denklemlerle ele alınır. Kayıplı bir ortamda;

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{E} \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{H} \tag{2.2}$$

şeklinde verilen ilk iki Maxwell denkleminin çözümü ile bulunur. E değerleri $t = n \cdot \Delta t$'de ve H değerleri $t = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta t$'de belirlenir. Ana döngü zaman döngüsüdür ve seçilen maksimum zaman adımı tamamlanıncaya kadar ana zaman döngüsü çalışmaya devam eder. Eğer zaman Δt uzunluğunda ayrık adımlara ayrılırsa, şimdiki zamanda hesaplanan alan değerleri, önceki değerlere göre artar veya azalır. Hücre yapısı nedeniyle 3D-FDTD için, zamanın tam katlarında elektrik alanlar, kesirli katlarında ise magnetik alanlar hesaplanmaktadır. Burada verilen denklemler (μ = μ0) boşluğun permiabilitesine sahip, kayıplı dielektrik ortamlarda geçerlidir [24, 115-118].

Temel FDTD algoritması, belirli bir zaman döngüsünde Yee hücrelerinden oluşmuş 3D-FDTD uzayında her nokta için altı elektromanyetik alan bileşeninin hesaplanmasını içermektedir. Eşitlik 2.1 ve 2.2'de verilen Maxwell denklemlerindeki **E** ve **H** alanlarına ait kısmi diferansiyel denklemlerdeki gerekli vektörel çarpımlar yapılırsa, elektrik alan;

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \begin{vmatrix} \vec{\imath} & \vec{\jmath} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = \frac{1}{\varepsilon} \begin{pmatrix} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

olur. Burada elektrik alanın 3 bileşeni vardır. Bunlar;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) \tag{2.3a}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right) \tag{2.3b}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) \tag{2.3c}$$

şeklinde yazılabilir.

Manyetik alan ise;

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \begin{vmatrix} \vec{\imath} & \vec{\jmath} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \\ \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

olur. Burada manyetik alanın 3 bileşeni vardır. Bunlar;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y}\right) \tag{2.4a}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z}\right) \tag{2.4b}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\right) \tag{2.4c}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Böylece elektrik ve manyetik alana ait üçer bileşen elde edilmiş olur. Zamanla değişen durumlarda uzayın herhangi bir noktasındaki elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirlerine tamamen bağlıdır [24, 115-118]. Belirtilen bu bağlılık ortamın manyetik geçirgenliği ve dielektrik sabitiyle de ilişkilidir.

Elde edilen bu elektrik alan ve manyetik alana ait 6 adet eşitlik zamana bağlıdır. Bilgisayar ortamında çözülebilmesi için bu 6 eşitliğin ayrıklaştırılması gerekmektedir. FDTD yönteminde üç boyutlu problemlerde uzaydaki ayrıklaştırma, Yee tarafından önerilen ve Şekil 2.1'de yer alan birim hücre kullanılarak gerçekleştirilir.

Bu amaçla Taylor serisi kullanılarak merkezi sonlu farklar açılımı yapılır. Burada $u(i.\Delta x,\ j.\Delta y,\ k.\Delta z) = u^n_{i,j,k}$ anlamına gelir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u^n\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) - u^n\left(i-\frac{1}{2},j,k\right)}{\Delta x} \tag{2.5}$$

konumda ayrıklaştırmayı sağlar.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u^{n+1/2}(i,j,k) - u^{n-1/2}(i,j,k)}{\Delta t} \tag{2.6}$$

ise zamanda ayrıklaştırmayı sağlar.

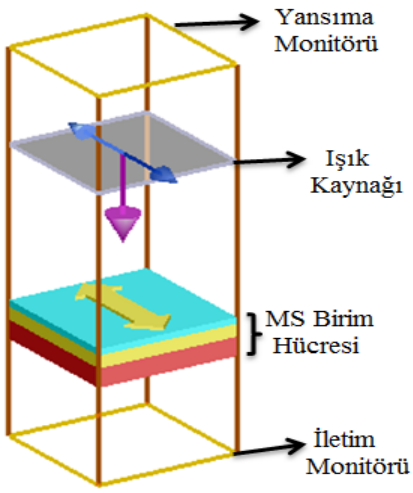
Üçer adet manyetik alan ve elektrik alan denklemleri üzerinde konum ve zamanda ayrıklaştırma yapıldıktan sonra düzenleme yapılırsa manyetik alan ve elektrik alan denklemleri elde edilmiş olur [115].

FDTD yönteminde analiz edilecek olan yapı pratikteki durumu birebir olarak modellemek amacıyla x, y ve z eksenleri boyunca binlerce küçük hücreye bölünmektedir. Gerekli işlem adımlarından sonra, yapı içerisindeki elektromanyetik dalgaların ilerleyişi hakkında bilgiler elde edilir. Köşelerde meydana gelen elektrik ve manyetik alanlar hesaplanır. İncelenecek yapı ne kadar fazla hücreye bölünürse o kadar hassas ve gerçeğe yakın sonuç elde edilebilmektedir. Ancak elektrik ve manyetik alan değerlerinin fazla değişmediği yerlerde, yapının çok fazla hücreye bölünmesi sadece işlem yükünü artırmaktadır. Daha doğru ve verimli sonuçlar elde etmek amacıyla alan değerlerinin hızlı değişim gösterdiği bölgelerde, köşelerde ve uç bölgelerde yapı daha fazla hücreye bölünür yani yerel hücrelendirme (local mesh) metodu uygulanır [116-117]. Kapalı uzayda açık bir bölgenin simülasyonu yapıldığı için sınır koşullarının da mutlaka temel algoritmaya eklenmesi gerekmektedir. Bu tür problemlerin çözümü karmaşık hesaplamalar ve analizler gerektirmektedir. Bu nedenle karmaşık işlemleri çözümleyen ve doğru sonuçlar veren paket programlar kullanılarak gerekli işlem ve hesaplamalar hızlı, hassas ve gerçeğe yakın bir şekilde elde edilir. Sunulan bu tezde tasarlanan mükemmel soğurucu nanoanten dizileri için FDTD çözümleri, Lumerical FDTD isimli paket program kullanılarak gerçekleştirilecektir.

2.3. Lumerical FDTD Solutions Programının Özellikleri

Tez çalışması sırasında açıklık ve parçacık tabanlı nanoanten plazmonik mükemmel soğurucuların tasarımları ve zaman domeninde analizleri bu program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lumerical FDTD Solutions, 3 boyutlu tasarımlar yapmaya olanak sağlayan bir arabirime sahiptir. Bu program ile tez kapsamında tasarlanan nanoboyuttaki mükemmel soğurucuların frekans ve zaman domeninde yansıma ve geçiş

karakteristikleri elde edilerek bu sonuçlara bağlı olarak soğurum karakteristiği belirlenmektedir. Elde edilen rezonans frekanslarında oluşan yakın alan dağılımları yine bu program ile belirlenmekte ve elektrik alan değerleri hesaplanabilmektedir [24, 115, 117]. Yapıların tasarlanması sırasında kullanılan dielektrik katmanların, metallerin ve ortamların kırıcılık indisleri seçilebilmekte ve istenilen özellikte malzemeler tercih edilebilmektedir. İstenilen boyutlarda ve kalınlıklarda birim hücreler tasarlanabilmekte ve nanoanten dizileri şeklinde analizler yapılabilmektedir. Ayarlanan frekans aralığında gönderilecek ışığın polarizasyonu belirlenebilmekte ve bu şekilde mükemmel soğurucu yapısının altına yerleştirilen iletim monitörü ile iletim karakteristikleri ve yapının üstüne yerleştirilen yansıma monitörü ile yansıma karakteristikleri elde edilerek hesaplanabilmektedir. Oluşturulan yapıların belirlenen rezonans frekanslarında elektrik alan ve manyetik alan dağılımları yapının istenilen bölgelerine yerleştirilen alan monitörleri ile elde edilebilmektedir. Kullanılan programın arayüzünde oluşturulan nanoanten birim hücresi ve ışık kaynağı ile monitörlerin yerleşim modeli Şekil 2.2'de verilmiştir. Tez çalışmasında yer alan tüm tasarımlar Lumerical FDTD programı kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen analiz sonuçları Matlab programına aktarılarak istenilen özellikte grafikler çizdirilmiştir.



Şekil 2.2. FDTD programı arayüzünde tasarlanan MS yapısı.

3. BÖLÜM
PLAZMONİK TABANLI MÜKEMMEL SOĞURUCU TASARIMLARI

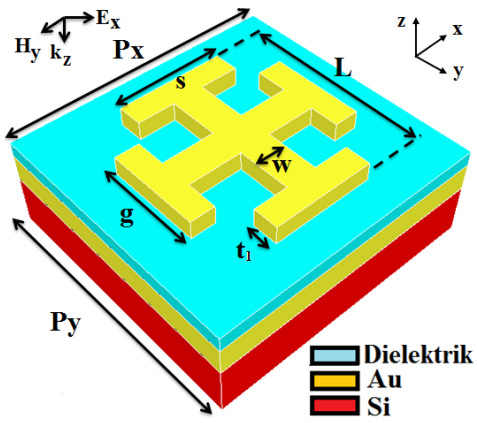
3.1. Giriş

Bu bölümde, ilk olarak literatürde farklı nanoanten çalışmaları için tasarlanmış iki adet yapı mükemmel soğurucu olarak yeniden tasarlanarak yapıların analizleri ve nümerik incelemeleri yapılmıştır. Ardından literatürdekilerden farklı tamamen teze özgü geometrilere sahip on adet plazmonik tabanlı mükemmel soğurucu tasarlanmış ve nümerik sonuçları sunulmuştur. Tasarlanan mükemmel soğurucuların reflektans ve transmitans spektrumları elde edilerek rezonans frekanslarında oluşan absorbans değerleri hesaplanmıştır. Rezonans frekanslarında meydana gelen yakın alan dağılımları elde edilerek yorumlanmıştır. Ayrıca tasarlanan yapıların geometrik parametreleri ve katman kalınlıkları değiştirilerek optik spektrumlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışmada yansıma spektrumu reflektans (R), iletim spektrumu transmitans (T) ve soğurum spektrumu absorbans (A) ile gösterilmiştir. Reflektans ve transmitans değerleri elde edildikten sonra absorbans değeri $A = 1 - R - T$ formülü ile hesaplanmıştır [61]. Teze özgü olarak yapılan on üç adet çalışmadan sekiz tanesi nanoparçacık tabanlı beş tanesi de nanoaçıklık tabanlı mükemmel soğurucu olarak tasarlanmıştır. Parçacık ve açıklık tabanlı yapıların sonuçları arasındaki farklar ve etkiler analiz edilerek yorumlanmıştır. Teze özgü olarak tasarlanan mükemmel soğurucu yapılarının nümerik analizleri FDTD yöntemi kullanılarak yapılmıştır [114]. Mükemmel soğurucu tasarımında kullanılan metallerin ve ara katmanların dielektrik sabitleri Palik [119]'dan alınmıştır.

3.2. Teze Özgü Tasarlanan Plazmonik Tabanlı Mükemmel Soğurucular

3.2.1. T#1

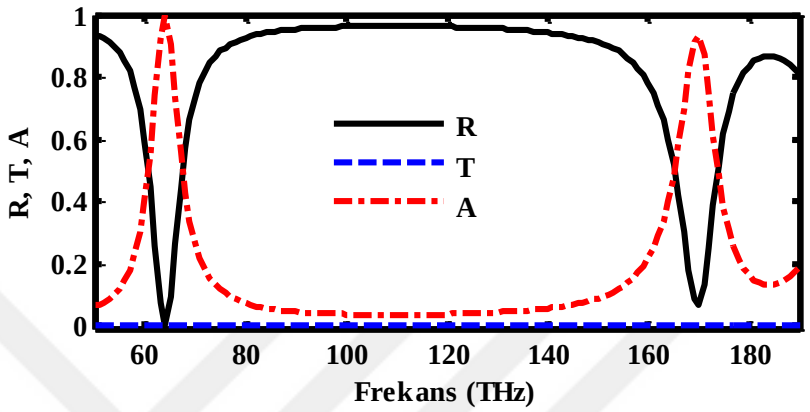
Bu çalışmada, daha önce farklı nanoanten uygulamaları [110-111] için tasarlanmış Kudüs Haçı şeklindeki parçacık tabanlı yapının mükemmel soğurucu dizisi olarak spektral cevapları nümerik olarak incelenmiştir. Yapının literatürde yer alan nanoanten modeline ait geometrik parametreleri korunmuş ve sadece mükemmel soğurucu özelliği kazanabilmesi için gerekli katmanlar değiştirilmiştir. Şekil 3.1'de Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi verilmiştir. Yapı silikon (Si) üzerine kaplanan altın (Au) film ile Kudüs Haçı şeklindeki altın nanoparçacıklar arasında yer alan dielektrik ara katmandan (MgF_2) oluşmaktadır. Silikon katmanı kalınlığı 300 nm, altın film kalınlığı 200 nm, MgF_2 dielektrik ara katman kalınlığı 100 nm ve Au nanoparçacık kalınlığı 50 nm'dir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 1450$ nm'dir. Simülasyonlar boyunca analizler x-polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucunun geometrik parametreleri L = 1100 nm, w = 200 nm, s = 430 nm, t_1 = 160 nm ve g = 450 nm olarak belirlenmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z ekseni boyunca kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi.

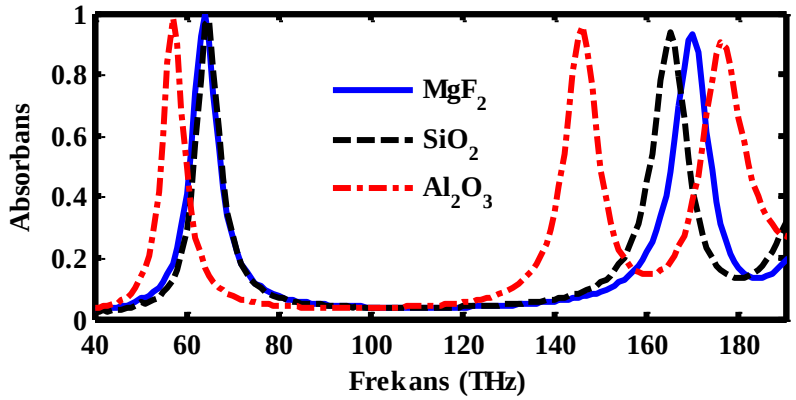
Yapının reflektans (R) ve transmitans (T) spektrumu elde edilerek, absorbans (A) spektrumu A = 1 - R – T formülü ile hesaplanmıştır. Kudüs Haçı şeklindeki parçacık

tabanlı mükemmel soğurucu dizisinden teorik olarak elde edilen sonuçlar Şekil 3.2'de, verilmiştir. Şekil 3.2'den görüldüğü gibi Kudüs Haçı şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu dizisi çift bant rezonans cevabına sahiptir.



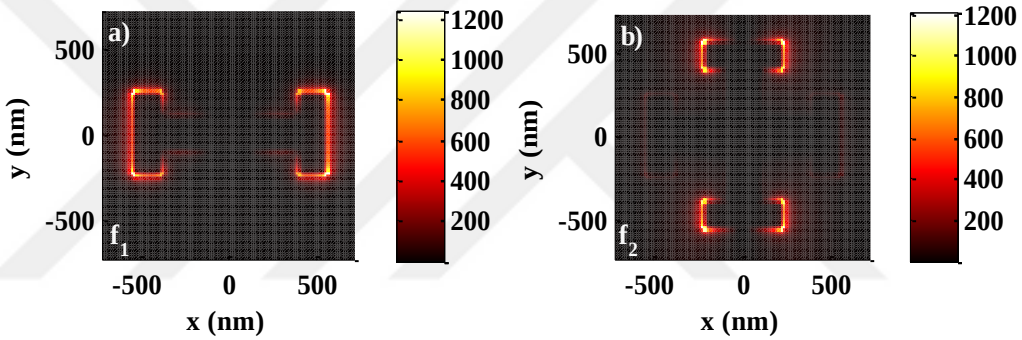
Şekil 3.2. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisi spektral cevabı.

Şekil 3.3'de Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir. Kullanılan tüm dielektrik katmanlar için absorbans değeri bire yakın olmakta yani gönderilen ışığın %100'e yakın soğurumu gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.3. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde farklı dielektrik katman kullanılması durumunda elde edilen absorbans spektrumları.

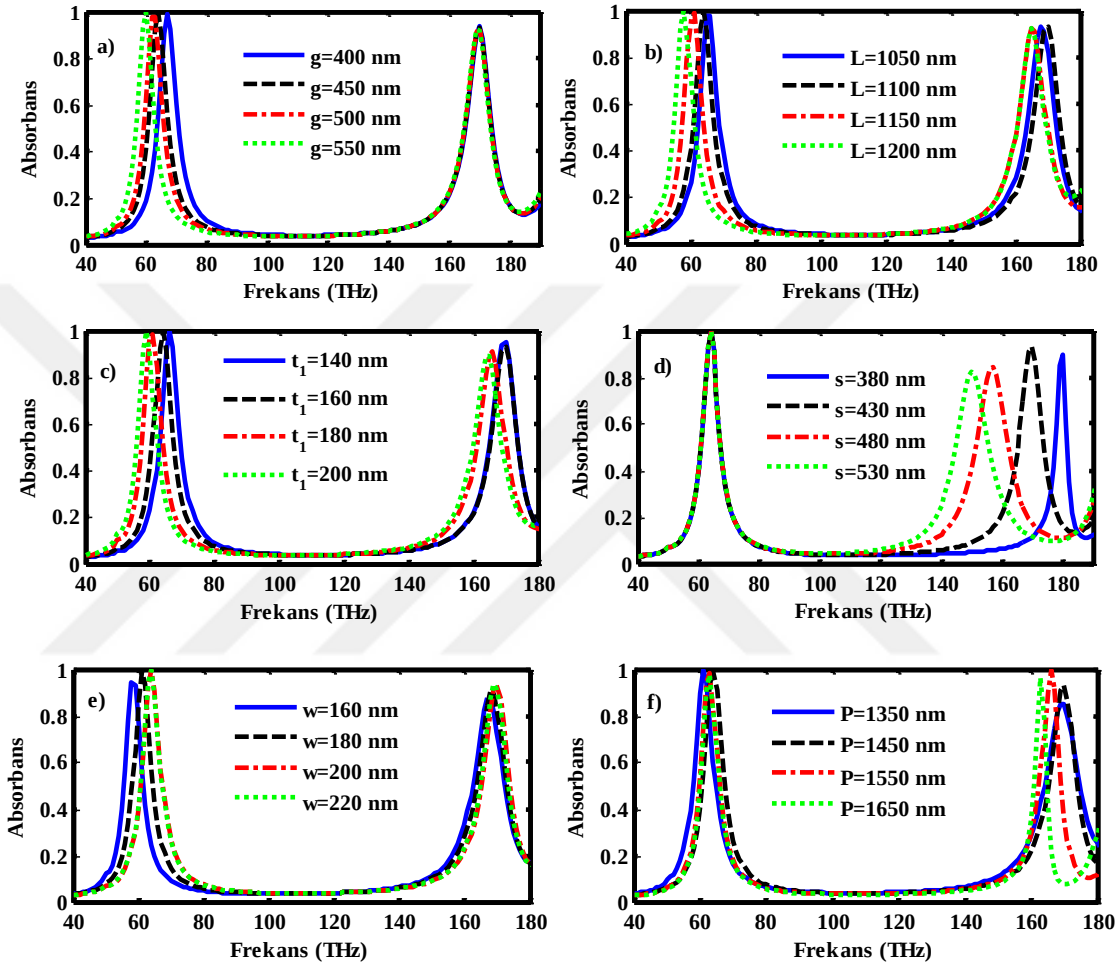
Kudüs Haçı şeklindeki yapıda dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda elde edilen iki rezonans noktalarındaki elektrik alan dağılımları Şekil 3.4'de verilmiştir (L = 1100 nm, w = 200 nm, s = 430 nm, t_1 = 160 nm ve g = 450 nm). f_1 rezonans frekansında elektrik alan dağılımları yapının sol ve sağ kollarında (Şekil 3.4 (a)), f_2 rezonans frekansında elektrik alan dağılımları yapının alt ve üst kollarında yoğunlaşmıştır (Şekil 3.4 (b)). Elektrik alan dağılımları gelen ışığın şiddetine göre 1200 kat daha fazladır. SEIRA uygulamaları için yüksek elektrik alan değerleri istenen bir durumdur. Bu değer klasik nanoanten yapılarında 160 civarında olmaktadır. Biyosensör uygulamalarında bu değerin yüksek olması metal ile hedef analitin etkileşimini artırması nedeniyle tercih edilmektedir.



Şekil 3.4. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin (a) f_1 rezonansındaki ve (b) f_2 rezonansındaki elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$.

SEIRA tekniği kullanılarak yapılan biyo-algılama uygulamalarında, algılanması hedeflenen protein veya virüsün moleküler rezonansı ile aynı rezonans frekansına sahip mükemmel soğurucu dizileri nanoüretim teknikleri kullanılarak üretilmektedir . Üretilen mükemmel soğurucu dizilerinin üzerine içerisinde protein veya virüslerin bulunduğu solüsyonlar konulur ve yapının spektral davranışındaki değişiklikler incelenerek yapının frekans spektrumunda bir bozulma veya kayma olup olmadığı gözlemlenir. Kayma ya da bozulma gerçekleşirse solüsyon içerisinde algılanması istenilen protein veya virüsün bulunduğu tespit edilmiş olur. Elektrik alan değerlerinin yüksek olması ile madde-ışık etkileşimi artacağı için sunulan mükemmel soğurucu dizisi yüksek elektrik alan değerleri ile SEIRA tekniği kullanılarak biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilir.

Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucunun geometrik parametrelerinin değişimine karşılık optik spektrumundaki değişimler Şekil 3.5'de verilmiştir (L = 1100 nm, w = 200 nm, s = 430 nm, t_1 = 160 nm ve g = 450 nm).

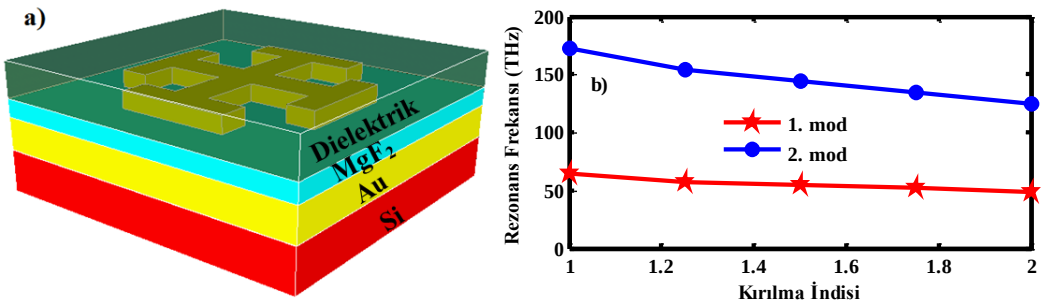


Şekil 3.5. Kudüs Haçı şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) g değişimi, (b) L değişimi (c) t_1 değişimi (d) s değişimi (e) w değişimi (f) P değişimi.

Diğer parametreler sabit kalmak şartı ile sol ve sağ kollardaki dikdörtgen nanoçubukların boyu (g) arttığında sadece birinci rezonans frekansı azalmaktadır, ikinci rezonans frekansı etkilenmemektedir (Şekil 3.5 (a)). Kudüs Haçı şeklindeki altın parçacığın boyu (L) arttığında rezonans frekansları azalmaktadır (Şekil 3.5 (b)). Alt ve üst kollardaki dikdörtgen nanoparçacıkların genişliği (t_1) arttığında, tüm rezonans frekansları azalmaktadır (Şekil 3.5 (c)). Alt ve üst kollardaki dikdörtgen nanoparçacıkların genişliği (s) arttığında, sadece ikinci rezonans frekansı azalmaktadır

(Şekil 3.5 (d)). Yapının ortasında bulunan dik ve yan dikdörtgen nanoparçacıkların genişliği (w) arttığında, sadece birinci rezonans frekansı hafifçe artmaktadır (Şekil 3.5 (e)). Absorbans spektrumunun periyoda (P) bağımlılığı Şekil 3.5 (f)'de görülmektedir. Periyot artırıldığında her iki rezonans frekansı etkilenmekte, birinci rezonans frekansı az miktarda sağa kayarken ikinci rezonans frekansı sola kaymaktadır (Şekil 3.5 (f)). Yapılan analiz sonucunda sunulan mükemmel soğurucu dizisinin optik özelliklerinin yapının geometrik parametrelerine bağlı olduğu görülmüştür (Şekil 3.5). Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları yapının geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir.

Kudüs Haçı şeklindeki çift bantlı rezonansa sahip mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini analiz etmek için, Şekil 3.6 (a)'da görüldüğü gibi mükemmel soğurucu nanoanten yapısının üzeri 100 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanmıştır (L = 1100 nm, w = 200 nm, s = 430 nm, t_1 = 160 nm ve g = 450 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 100 nm). Mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve farklı kırılma indislerine göre yapıya ait iki rezonans frekansının da lineer olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.6 (b)). Böylelikle önerilen yapının spektroskopi ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılabileceği görülmüştür.



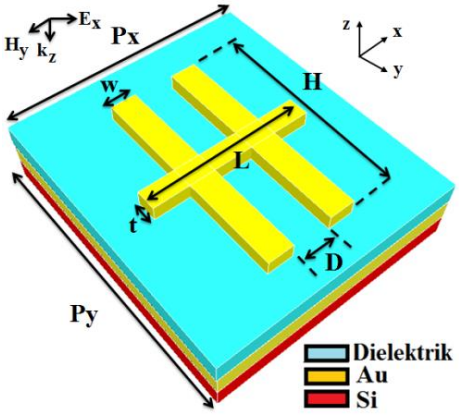
Şekil 3.6. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.

Çift bant rezonans cevabı ve yüksek yakın alan dağılımları, ayarlanabilir spektral cevabı ve kırılma indisi hassasiyeti ile Kudüs Haçı şeklindeki çift bant mükemmel soğurucu

dizisi biyo-algılama uygulamalarında biyosensör olarak aynı anda iki farklı molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

3.2.2. T#2

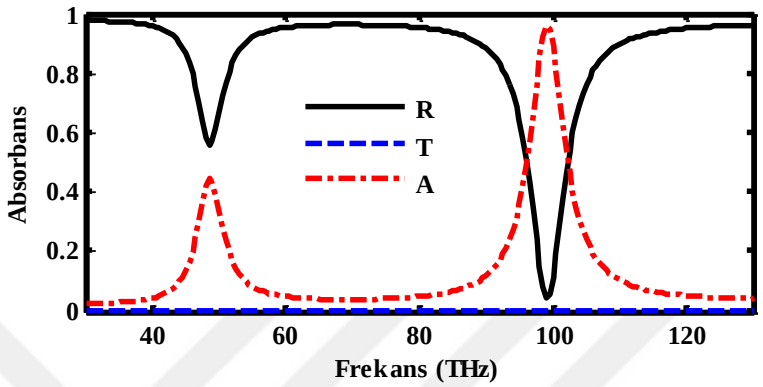
Bu çalışmada, daha önce farklı nanoanten uygulamaları [23] için tasarlanmış H şeklindeki parçacık tabanlı yapı mükemmel soğurucu dizisi olarak incelenmiştir. Şekil 3.7'de H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi verilmiştir. Yapı silikon (Si) üzerindeki altın (Au) film ile H şeklindeki altın nanoparçacıklar arasında yer alan dielektrik ara katmandan (MgF_2) oluşmaktadır. Silikon kalınlığı 300 nm, altın film kalınlığı 200 nm, MgF_2 dielektrik ara katman kalınlığı 100 nm ve Au nanoparçacık kalınlığı 50 nm'dir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 2050$ nm'dir. Simülasyonlar boyunca analizler x-polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisi iki adet dikey ve bir adet yatay altın çubuktan oluşmaktadır. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde geometrik boyutlar; L = 1250 nm (yatay çubuk uzunluğu), t = 200 nm (yatay çubuk genişliği), H = 1425 nm (dikey çubukların uzunluğudur), w = 230 nm (dikey çubuk genişliği), D = 170 nm (dikey çubuklar arasındaki mesafe) olarak belirlenmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve z ekseni boyunca mükemmel uyumlu katmanlar kullanılmıştır.



Şekil 3.7. H şeklindeki MS dizisinin birim hücresi.

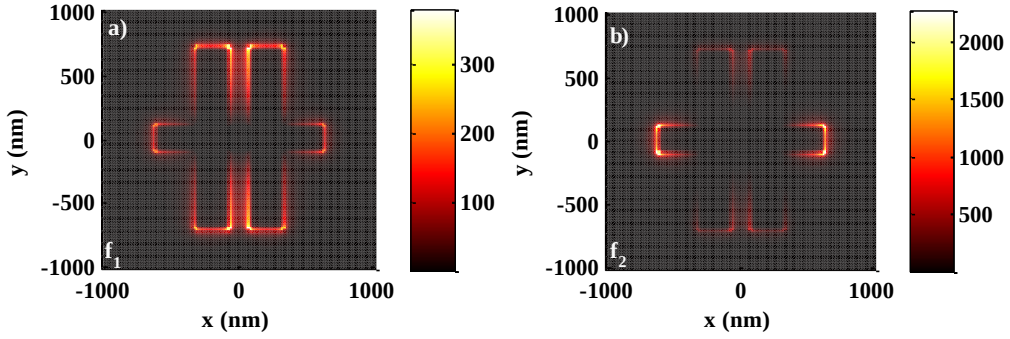
Yapının reflektans (R) ve transmitans (T) spektrumu elde edilerek, absorbans (A) spektrumu hesaplanmıştır. H şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu dizisi için FDTD metodu kullanılarak elde edilen nümerik sonuçlar Şekil 3.8'de verilmiştir. Şekil

3.8'den görüldüğü gibi H şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu dizisi çift bant rezonans cevabına sahiptir. Elde edilen rezonans frekanslarından birinci rezonans %45 civarında olurken ikinci rezonansta %99 soğurum elde edilmiştir.



Şekil 3.8. H şeklindeki MS dizisinin spektral cevabı.

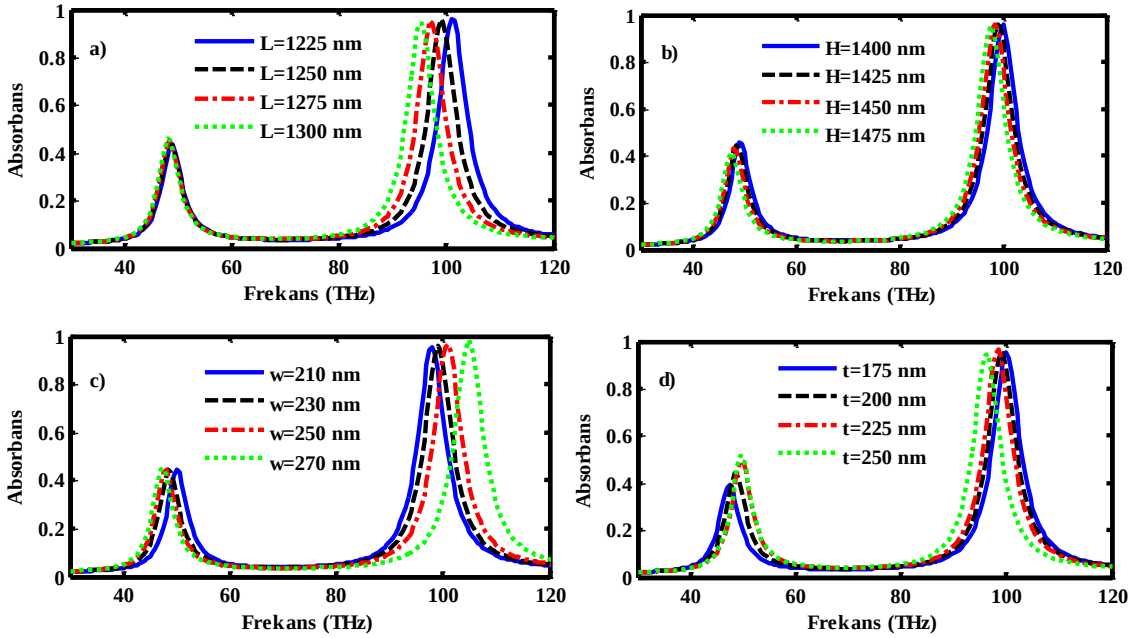
H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisine ait rezonans noktalarındaki elektrik alan dağılımları Şekil 3.9'da verilmiştir (L = 1250 nm, w = 230 nm, t = 200 nm, D = 170 nm ve H= 1425 nm). f_1 rezonans frekansında elektrik alan dağılımları yapının dikey ve yatay çubukların kenar ve köşelerinde (Şekil 3.9 (a)), f_2 rezonans frekansında elektrik alan dağılımları yatay çubuğun köşelerinde yoğunlaşmıştır (Şekil 3.9 (b)). Birinci rezonans noktası için elektrik alan değeri gelen ışığın şiddetine göre 350 kat, ikinci rezonans noktası için 2000 kattan daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 3.9. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$ (a) f_1 rezonansı (b) f_2 rezonansı.

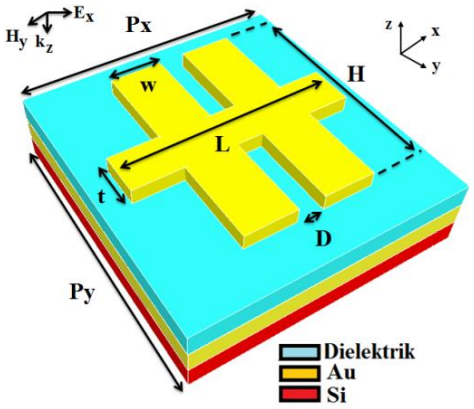
Birinci rezonans frekansında yakın alan dağılımları düşük olsa da özellikle ikinci rezonans frekansında elde edilen yüksek yakın alan değerleri kızılötesi rejimde biyo-algılama ve spektroskopi uygulamaları için önem taşımaktadır.

H şeklindeki mükemmel soğurucunun geometrik parametrelerinin değişimine karşılık optik spektrumunda elde edilen değişimler Şekil 3.10'da verilmiştir (L = 1250 nm, w = 230 nm, t = 200 nm, D = 170 nm ve H= 1425 nm). Diğer parametreler sabit kalmak şartı ile yatay çubuğun boyu (L) arttığında ikinci rezonans frekansı azalmaktadır, birinci rezonans frekansı etkilenmemektedir (Şekil 3.10 (a)). Dikey çubukların boyu (H) arttığında yapının her iki rezonans frekansı hafifçe azalmaktadır (Şekil 3.10 (b)). Dikey çubukların genişliği (w) arttığında, birinci rezonans frekansı hafif azalmakta, ikinci rezonans frekansı ise artmaktadır (Şekil 3.10 (c)). Yatay çubuğun genişliği (t) arttığında, birinci rezonans frekansı sağa kaymakta yani artmakta, ikinci rezonans frekansı ise azalmaktadır (Şekil 3.10 (d)). Tasarlanan MS birim hücresinin geometrik parametreleri yapının optik spektrumu üzerinde etki göstermektedir. Geometrik parametreler değiştirilerek yapının rezonans frekansları ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.10. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) L değişimi (b) H değişimi (c) w değişimi (d) t değişimi.

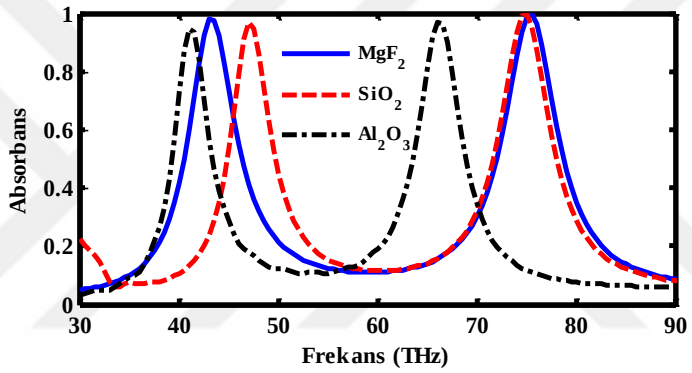
H şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten yapı ile ilgili çalışmanın ikinci bölümünde MS birim hücresi Şekil 3.11'de görüldüğü gibi farklı geometrik parametreler ve farklı katman kalınlıkları kullanılarak yeniden tasarlanmıştır. Daha önce %45 civarında olan birinci rezonanstaki soğurum değeri bu geometrik parametrelerin ve katman kalınlıklarının değiştirilmesi ile artırılmaya çalışılmıştır. Yapıda taban malzemesi olarak kullanılan silikon katmanının kalınlığı 300 nm, altın film kalınlığı 200 nm, MgF_2 dielektrik ara katman kalınlığı 150 nm ve altın (Au) nanoparçacık kalınlığı 50 nm olarak belirlenmiştir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 1900$ nm'dir. Simülasyonlar boyunca analizler x-polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisi iki adet dikey ve bir adet yatay olmak üzere boyutları eşit olan üç adet dikdörtgen altın nanoçubuktan oluşmaktadır. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde geometrik parametreler; L = 1750 nm (yatay dikdörtgen nanoçubuk uzunluğu), t = 400 nm (yatay dikdörtgen nanoçubuk genişliği), H = 1750 nm (dikey dikdörtgen nanoçubukların uzunluğu), w = 400 nm (dikey dikdörtgen nanoçubukların genişliği), D = 100 nm (dikey çubuklar arasındaki mesafe) olarak belirlenmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z ekseni boyunca kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Geometrisi değiştirilen H şeklindeki MS dizisinin birim hücresi.

Şekil 3.12'de H şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir. H şeklindeki altın nanoparçacıklar ve altın film katmanı arasında yer alan katmanda farklı

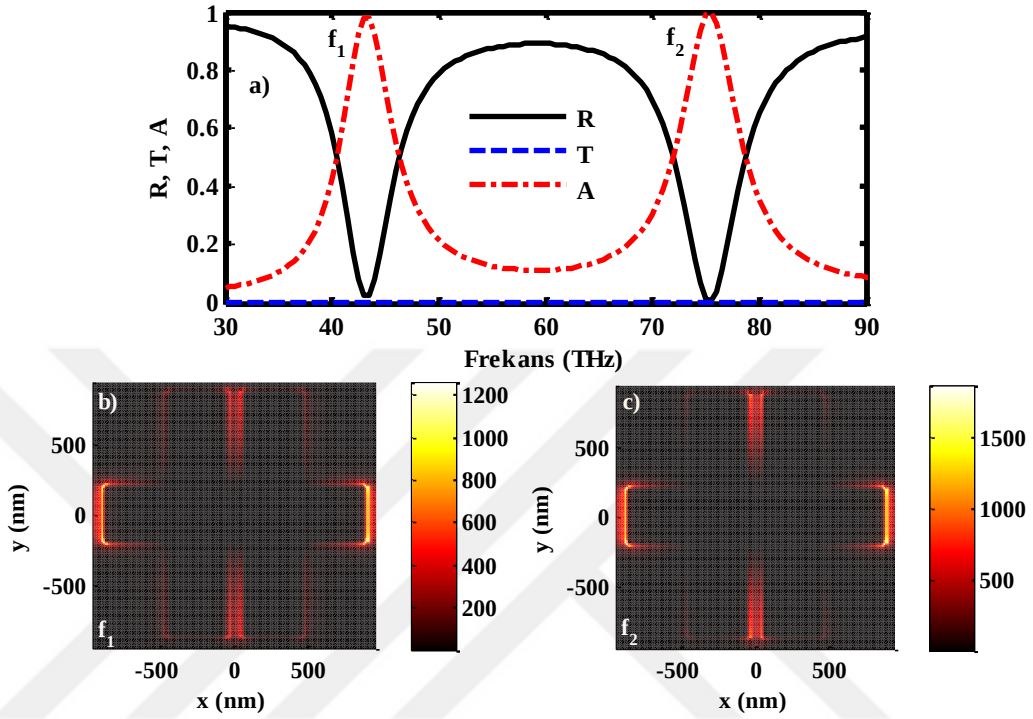
kırıcılık indisine sahip dielektrikler kullanılmıştır. Kullanılan tüm dielektrik katmanlar için absorbans değeri bire yakın olmakta yani gönderilen ışığın neredeyse tamamı soğurulabilmektedir. Bu şekilde yüksek soğurum özelliğine sahip yapıda üç farklı dielektrik katman kullanabilme özelliği elde edilmiştir. MS dizisinde bu şekilde dielektrik ara katmanı değiştirilerek istenilen rezonans frekansına göre spektral cevabı ayarlanabilen bir yapı meydana gelmiştir. H şeklindeki çalışmanın ilk bölümünde incelenen yapıda 100 nm kalınlığında kullanılan dielektrik ara katman ikinci bölümde 150 nm'ye çıkarılmıştır. Dielektrik katmandaki artışın yapının soğurum yeteneğini de artırdığı görülmüştür. Bu artış metal-dielektrik etkileşiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.12. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde farklı dielektrik katman kullanılması durumunda elde edilen absorbans spektrumları.

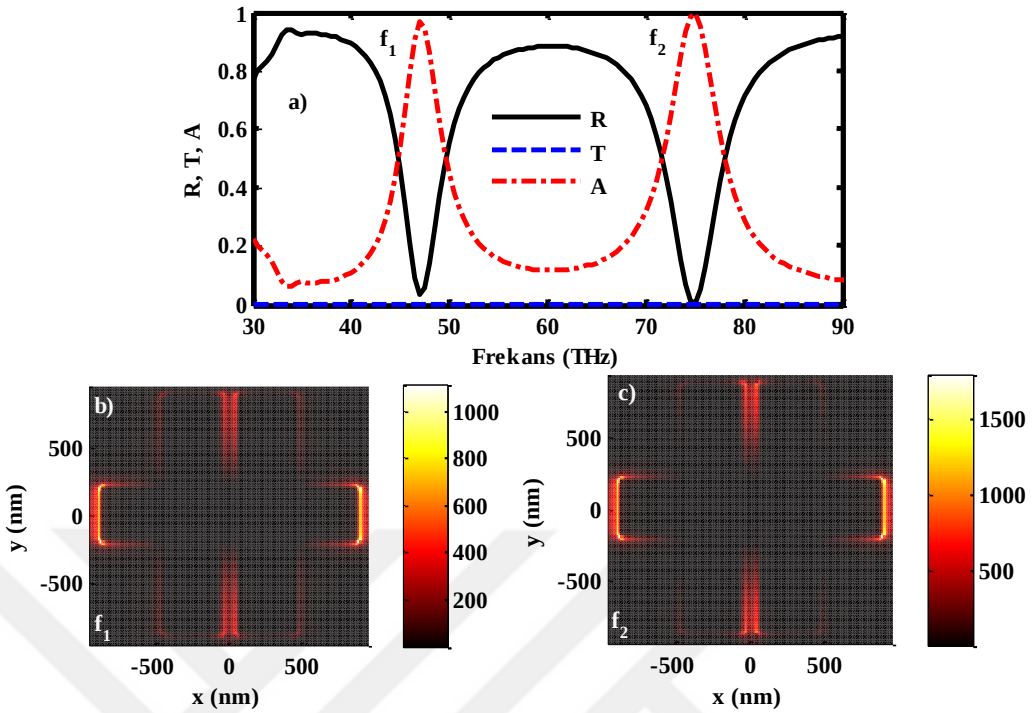
H şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı Şekil 3.13 (a)'da verilmiştir. Şekil 3.13 (a)'da görüldüğü gibi mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 43 THz) absorbans % 98.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 75 THz) absorbans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.13 (a)). Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda f_1 ve f_2 rezonans frekanslarında elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.13 (b) ve 3.13 (c)'de verilmiştir. Birinci rezonans noktası için elektrik alan değeri gelen ışığın şiddetine göre 1200 kat, ikinci rezonans noktası için 1500 kattan daha fazla olduğu görülmüştür. Her

iki rezonans frekansında da soğurum değerleri oldukça yüksek olmakta ve gelişmiş yakın alan dağılımları elde edilmektedir.



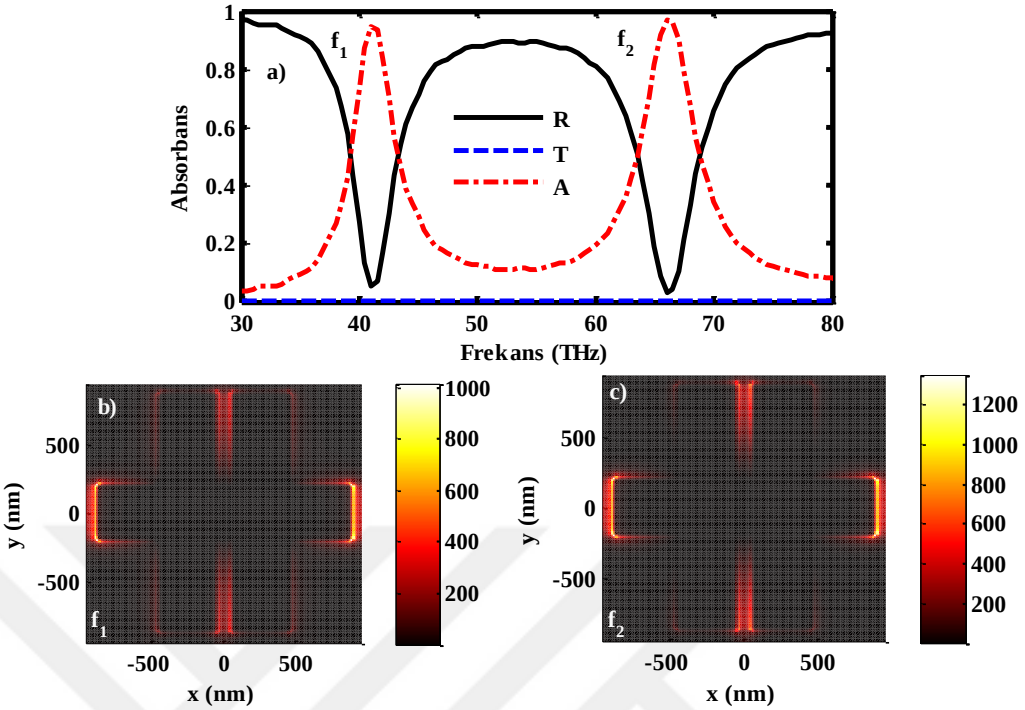
Şekil 3.13. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

H şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.14 (a)'da sunulmuştur. Çift bant rezonans cevaba sahip yapıda elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 47 THz) absorbans % 97.7, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 74.5 THz) absorbans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.14 (b) ve 3.14 (c)'de verilmiştir. Birinci rezonans noktası için elektrik alan değeri gelen ışığın şiddetine göre 1000 kat, ikinci rezonans noktası için 1500 kattan daha fazla olduğu görülmüştür. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman değişiminde yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve yapının keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür. Bu şekilde tasarlanan yapıda farklı bir dielektrik ara katman kullanılabilme avantajı elde edilmiştir.



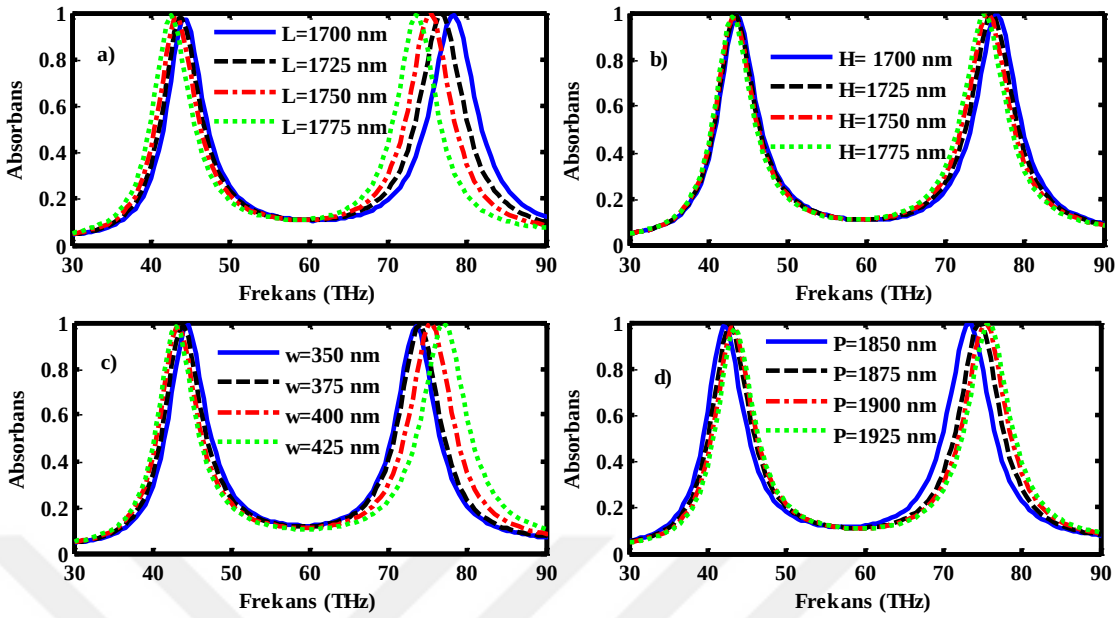
Şekil 3.14. (a) SiO_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Önerilen mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 (n = 1.76) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.15 (a)'da verilmiştir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 41 THz) absorbans % 95 ve ikinci rezonans noktasında (f_2 = 66 THz) absorbans değeri % 99.6 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1, f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.15 (b) ve 3.15 (c)'de verilmiştir. Dielektrik ara katman olarak 150 nm kalınlığında Al_2O_3 kullanıldığında mükemmel soğurucu dizisinin absorbans değerlerinde bir miktar düşüş olsa da elde edilen değerler geleneksel yapılara göre oldukça yüksek olmaktadır. Elektrik alan dağılım değerlerinde ise birinci rezonans noktası için elektrik alan değeri gelen ışığın şiddetine göre 1000 kat, ikinci rezonans noktası için 1200 kattan daha fazla olduğu görülmüştür. Elektrik alan dağılımları dikdörtgen nanoçubukların keskin köşelerinde yoğunlaşmıştır. MS dizisi birim hücresinde dielektrik katman olarak Al_2O_3 kullanıldığında yüksek elektrik alan değerlerini koruyabilmektedir.



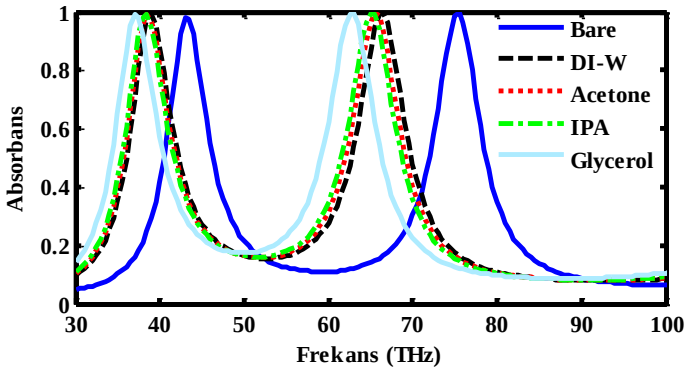
Şekil 3.15. (a) Al_2O_3 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

H şeklindeki mükemmel soğurucunun geometrik parametrelerinin değişimine karşılık optik spektrumundaki değişimler Şekil 3.16'da verilmiştir (L = 1750 nm, H = 1750 nm, t = 400 nm, D = 100 nm, w = 400 nm). Diğer parametreler sabit kalmak şartı ile yatay çubuğun boyu (L) arttığında tüm rezonans frekansları azalmaktadır (Şekil 3.16 (a)). Dikey çubukların boyu (H) arttığında yapının her iki rezonans frekansı hafifçe azalmakta yani rezonans frekansları sola kaymaktadır (Şekil 3.16 (b)). Dikey çubukların genişliği (w) arttığında, birinci rezonans frekansı hafifçe azalmakta, ikinci rezonans frekansı ise artmakta yani sağa kaymaktadır (Şekil 3.16 (c)). Yapının rezonans frekansları periyodu değiştirilerek de ayarlanabilmektedir. Yapının periyodu (P) arttığında, iki rezonans frekansı da artmaktadır (Şekil 3.16 (d)). Önerilen yapının optik spektrumu geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Frekans ayarlama yeteneği tasarlanan MS yapısına bir sensör olarak kullanılması durumunda önemli bir avantaj sağlayabilecektir.



Şekil 3.16. H şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) L değişimi (b) H değişimi (c) w değişimi (d) P değişimi.

Çalışmanın son bölümde mükemmel soğurucu dizilerinin biyosensör uygulamalarında kullanılabilme potansiyelini görmek ve kırılma indisi değişimine hassasiyetini tespit etmek amacıyla mükemmel soğurucu dizileri farklı kırılma indisli yapılar içerisine gömülerek optik spektrumları incelenmiştir (Şekil 3.17).



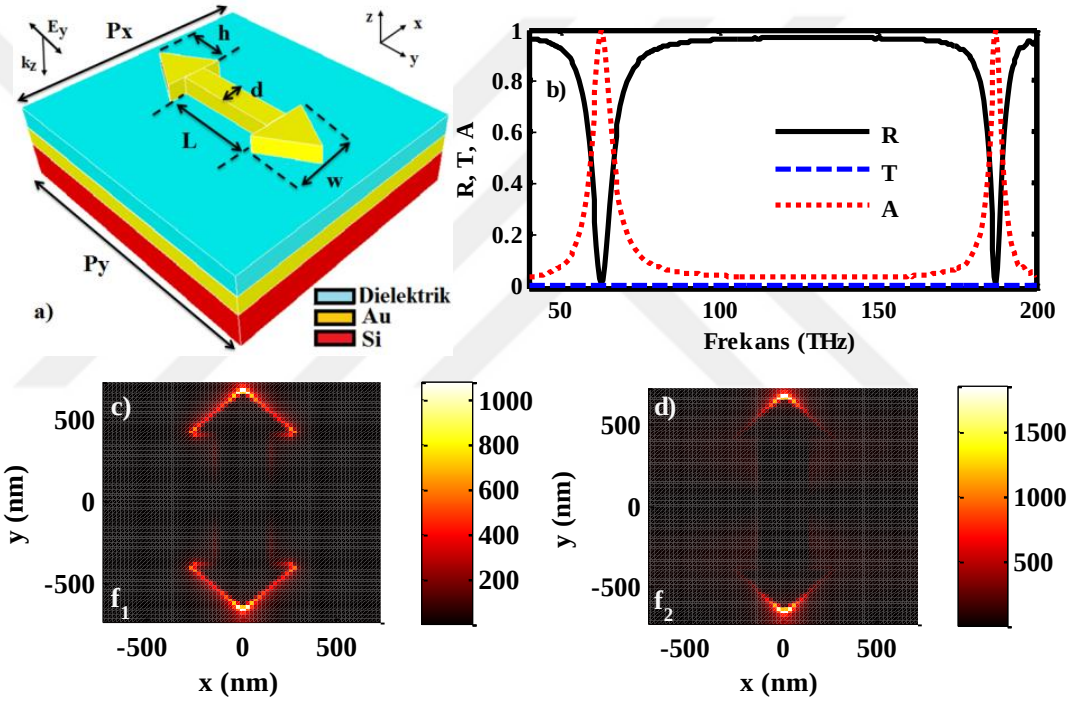
Şekil 3.17. Farklı kırılma indisli malzemeler için mükemmel soğurucu dizisinin absorbans spektrumu.

Solüsyonsuz ortamda (Bare) (n = 1), de-iyonize edilmiş su (DI-Water) (n = 1.3325), aseton (Acetone) (n = 1.3591), izopropil alkol (IPA) (n = 1.3776) ve gliserol (Glycerol) (n = 1.4722) gibi farklı kırılma indisli malzemeler içerisine gömülen mükemmel soğurucu yapılarının absorbans spektrumları incelenmiştir (Şekil 3.17). Önerilen mükemmel soğurucu yapısı bu farklı kırılma indisli malzemeler içerisinde yüksek soğurma yeteneğini koruyabilmektedir. H şeklindeki mükemmel soğurucu yapı orijinal geometrileri ile tasarlandığında iki adet rezonans frekansı olmakta ancak birinci rezonans frekansı %45 civarında kalmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde yer alan farklı geometrilerle yapılan tasarımla iki rezonans frekansıda %99 seviyelerine ulaşmıştır. Yapının farklı dielektrik katmanlar için soğurum değerleri hesaplanmış ve yakın alan dağılımları elde edilmiştir. Yapının optik spektrumu ilk bölümde olduğu gibi ikinci tasarım için de geometrik parametrelerle değiştirilebilmektedir. Bu durum tasarlanan MS dizisinin farklı rezonans frekanslarında da kullanılabilme avantajı sağlamaktadır.

3.2.3. T#3

Bu çalışmada, kızılötesi algılama uygulamaları için çift başlı ok şeklinde altın nanoparçacık tabanlı yeni bir mükemmel soğurucu dizisi sunulmuştur. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevapları FDTD metodu kullanılarak incelenmiştir. Şekil 3.18 (a)'da önerilen mükemmel soğurucunun birim hücresinin şematik görünümü verilmiştir. Yapı silikon (Si) üzerindeki altın (Au) film ile çift başlı ok şeklindeki altın nanoparçacıklar arasında yer alan dielektrik ara katmandan (MgF_2) oluşmaktadır. Silikon kalınlığı 300 nm, altın film kalınlığı 200 nm, MgF_2 dielektrik ara katman kalınlığı 100 nm ve altın (Au) nanoparçacık kalınlığı 50 nm'dir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 1450$ nm'dir. Simülasyonlar boyunca analizler y-polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. Dielektrik ara katman üzerine yerleştirilen üst ve alt ikizkenar üçgenlerin yüksekliği h ve taban genişlikleri w ile gösterilmiştir. İkizkenar üçgenlerin ortasında yer alan dikdörtgen parçacığın genişliği d ve uzunluğu L ile gösterilmiştir. Geometrik boyutlar L = 800 nm, w = 500 nm, h = 250 nm ve d = 250 nm olarak seçilmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z ekseni boyunca kullanılmıştır. Yapının reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) spektrumları Şekil 3.18 (b)'de verilmiştir. Önerilen

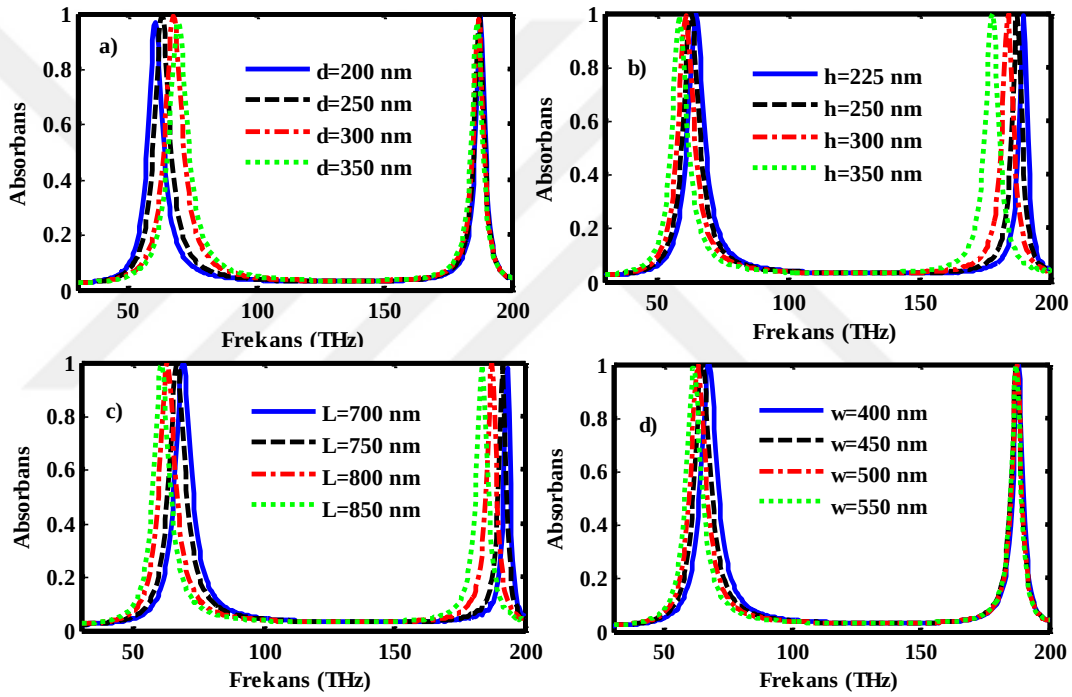
mükemmel soğurucu çift bant rezonansa sahiptir ve bunların oranları ilk rezonansta (f_1 = 63 THz) %99.5 ve ikinci rezonansta (f_2 = 187.5 THz) %99.7 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.18 (c)'de birinci rezonans (f_1) ve Şekil 3.18 (d)'de ikinci rezonans (f_2) frekansındaki elektrik alan dağılımları verilmiştir. Yakın alan dağılımları 1000 kattan yüksek olup yapının keskin köşelerinde yoğunlaşmıştır. Bu durum biyo-algılama uygulamalarında algılanması istenilen analitlerin enerjinin yoğunlaştığı bölgelere temasıyla ışık – madde etkileşiminin artmasına ve ilgili sensör yapısının hassasiyetini yüksek olmasına yol açacak bir durumdur.



Şekil 3.18. (a) Mükemmel soğurucu şematik görünümü (b) Mükemmel soğurucu dizisi spektral cevabı (c, d) Elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$ (c) f_1 ve (d) f_2 rezonanslarında oluşan dağılımlar.

Şekil 3.19 farklı d, h, L ve w parametre değerleri için spektral cevaptaki değişimleri göstermektedir (L = 800 nm, w = 500 nm, h = 250 nm ve d = 250 nm). Diğer parametreler sabit kalmak kaydı ile, çift başlı ok şeklindeki altın nanoparçacığın ortasında yer alan dikdörtgenin eni (d) artırıldığında birinci rezonans frekansı artmakta yani sağa kaymaktadır (Şekil 3.19 (a)). Üçgen parçacıkların yüksekliği (h) arttığında tüm rezonans frekansları sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.19 (b)). L (dikdörtgen nanoparçacığın boyu) arttığında tüm rezonans frekansları sola kaymakta

yani azalmaktadır (Şekil 3.19 (c)). Üçgen parçacıkların taban genişliği (w) arttığında ise ilk rezonans frekansı sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.19 (d)). Sunulan mükemmel soğurucu dizilerinin optik karakteristikleri geometrik parametrelere bağlıdır. Önerilen mükemmel soğurucu dizilerinin rezonans frekansları yapının geometrik boyutları değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Bu parametreler sensör yapısının rezonans frekansını hassas bir şekilde ayarlama imkanı veren kolay ayarlama mekanizmaları olarak kullanılabilir. Bu şekilde tasarımcı algılanması istenilen analitin rezonans frekansına göre bir ayarlama yaparak gerekli yapıyı elde edebilmektedir.



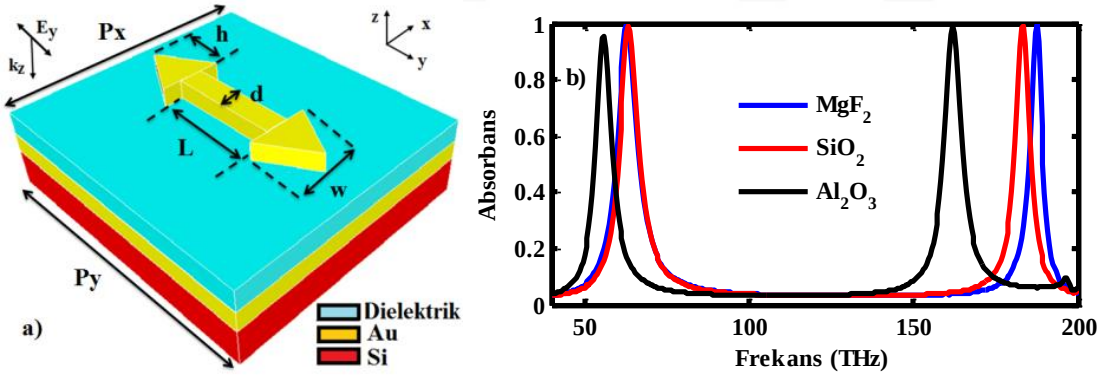
Şekil 3.19. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) d değişimi (b) h değişimi (c) L değişimi (d) w değişimi.

Çift bant rezonans cevabı ve gelişmiş yakın alan dağılımları, ayarlanabilir spektral cevabı ile önerilen çift başlı ok şeklindeki çift bant mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi algılama uygulamalarında kullanılabilir.

3.2.4. T#4

Bu çalışmada, çift başlı ok şeklinde nanoparçacıklara dayalı mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik ara katmanlar (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) için frekansa bağlı

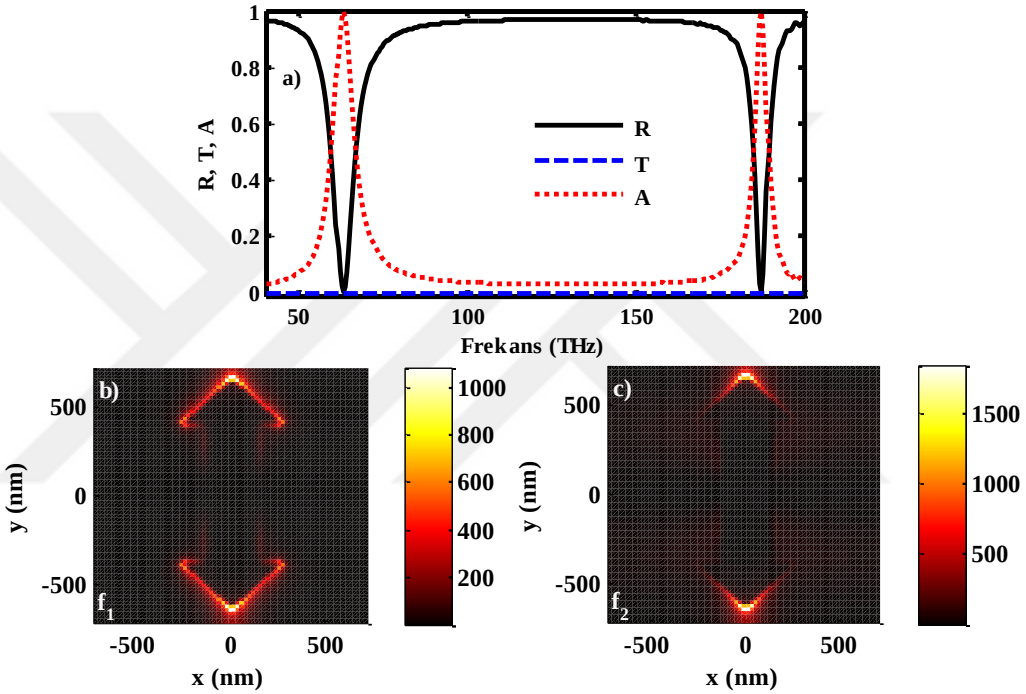
olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı incelenmiştir. Simülasyonlarda y polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır. Şekil 3.20 (a)'da birim hücresi görülen çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında taban malzemesi olarak 300 nm kalınlığında silikon kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 200 nm altın film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_S= 100 nm kalınlığında bir dielektrik ara katman yerleştirilmiştir. Nanoanten yapısının son katmanı olarak t_{Au}= 50 nm kalınlığında altın nanoparçacıklar yerleştirilmiştir. İncelenen mükemmel soğurucu dizisinin periyodu 1450 nm (P_x = P_y = 1450 nm) olarak belirlenmiştir. Dielektrik ara katman üzerine yerleştirilen üst ve alt ikizkenar üçgenlerin yüksekliği h ve taban genişlikleri w'dır. İkizkenar üçgenlerin ortasında yer alan dikdörtgen parçacığın genişliği d ve uzunluğu L'dir. (Şekil 3.20). Şekil 3.20 (b)'de çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir. Kullanılan tüm dielektrik katmanlar için absorbans değeri bire yakın olmakta yani %100'e yakın bir soğurum değeri elde edilmektedir.



Şekil 3.20. (a) Çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi. (b) Çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları.

Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı Şekil 3.21 (a)'da verilmiştir (L = 800 nm, h = 250 nm, w = 500 nm, d = 250 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 100 nm). Şekil 3.21 (a)'da görüldüğü gibi mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 63 THz) absorbans % 99.5, ikinci rezonans

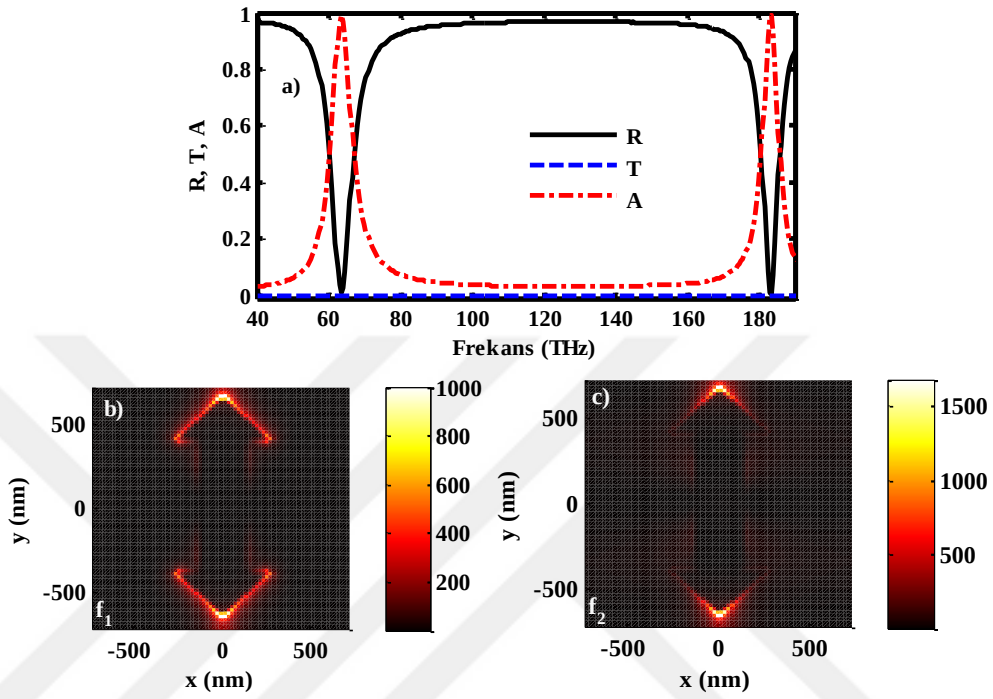
noktasında (f_2 = 187.5 THz) absorbans değeri % 99.7 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.21 (a)). Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda f_1 ve f_2 rezonans frekanslarında dielektrik katman ve altın nanoparçacıkların birleştiği ara yüzeyde elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.21 (b) ve 3.21 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının üçgenlerin keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre 1000 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.21. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

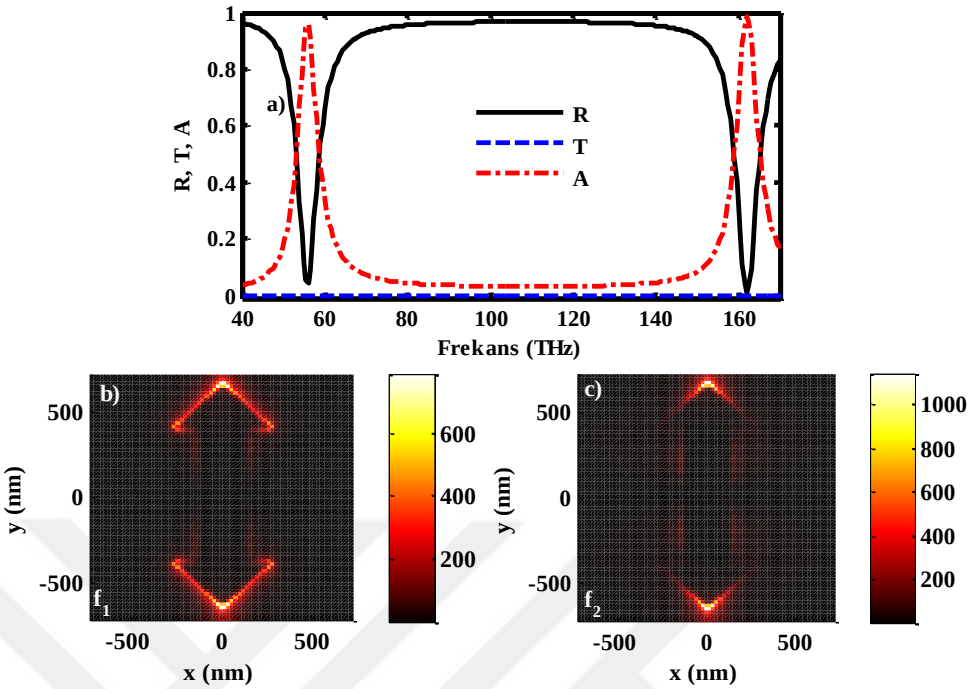
Çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.22 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 63.5 THz) absorbans % 98.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 183 THz) absorbans değeri % 98.7 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.22 (b) ve 3.22 (c)'de verilmiştir. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde

yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve üçgenlerin keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür.



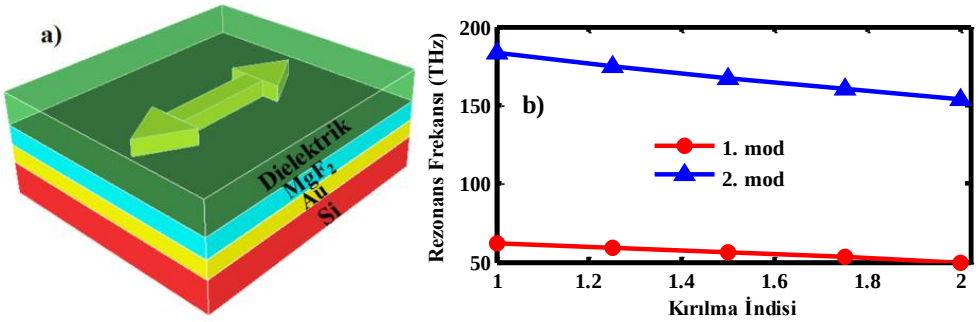
Şekil 3.22. (a) SiO_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 (n = 1.76) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.23 (a)'da verilmiştir (L = 800 nm, h = 250 nm, w = 500 nm, d = 250 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 100 nm). Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 56 THz) absorbans % 95.6 ve ikinci rezonans noktasında (f_2 = 162 THz) absorbans değeri % 98.8 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1, f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.23 (b) ve 3.23 (c)'de verilmiştir. Dielektrik ara katman olarak 100 nm kalınlığında Al_2O_3 kullanıldığında da mükemmel soğurucu dizisinin yüksek absorbans hassasiyetini koruduğu ve yüksek elektrik alan dağılımlarına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 3.23. (a) Al_2O_3 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Çift başlı ok şeklindeki altın nanoparçacık tabanlı çift bantlı rezonansa sahip mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini analiz etmek için, Şekil 3.24 (a)'da görüldüğü gibi mükemmel soğurucu nanoanten yapısının üzeri 100 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanmıştır (L = 800 nm, h = 250 nm, w = 500 nm, d = 250 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 100 nm). Bu çalışmada tasarlanan yapının biyo-algılamada bir sensör olarak kullanılması durumunda hedef analitlerin bir solüsyon yada bir madde içerisinde olabileceği varsayılarak üzerine kaplama ortamlı bir analiz yapılmıştır. Mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve farklı kırılma indislerine göre yapıya ait iki rezonans frekansının da lineer bir şekilde değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.24 (b)). Tasarlanan mükemmel soğurucu yapı, bu şekilde farklı kırılma indisli malzemeler üzerinde olduğu durumlarda da farklı frekans değerlerinde bir spektral cevap vererek biyo-algılamada bir sensör olarak kullanılabilme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.



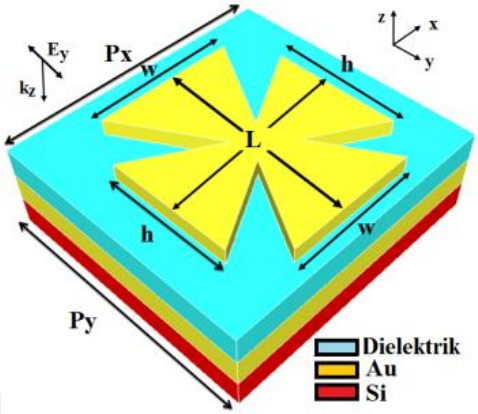
Şekil 3.24. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.

Bu çalışmada, ilgili yapının spektroskopi ve biyosensör uygulamalarında kullanılabilme potansiyelinin belirlenmesi amacıyla kızılötesi frekans bölgesinde kullanılabilecek çift başlı ok şeklinde metal-dielektrik-metal kompoziti altın nanoparçacık tabanlı çift-bant mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik ara katmanlar için spektral cevabı incelenmiştir. Mükemmel soğurucu dizilerinin absorbans yeteneğinin dielektrik ara katmanlara bağımlılığı ve kırılma indisine hassasiyeti incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. En yüksek absorbans değeri ve elektrik alan dağılımı dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılan MS dizisinden elde edilmiştir. Çift-bant rezonans cevabı, yüksek elektrik alan değerleri ve kırılma indisi hassasiyeti ile çift başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilirler.

3.2.5. T#5

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede spektroskopi ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek literatürde demir haç şeklinde adlandırılan nanoparçacıklara sahip yeni bir mükemmel soğurucu nanoanten dizisi sunulmuştur. Şekil 3.25'de birim hücresi görülen demir haç şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında taban malzemesi olarak 300 nm kalınlığında silikon kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 200 nm altın film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_S = 125 nm kalınlığında bir dielektrik ara katman yerleştirilmiştir. Nanoanten yapının son katmanı olarak t_{Au} = 50 nm kalınlığında demir haç şeklinde altın nanoparçacıklar kullanılmıştır. Sunulan mükemmel soğurucu dizisinin periyodu 2000 nm (P_x = P_y = 2000 nm) olarak belirlenmiştir. Dielektrik ara katman üzerine yerleştirilen üst ve alt ikizkenar üçgen kolların yüksekliği 1000 nm ve taban

genişlikleri w'dır. Dielektrik ara katman üzerine yerleştirilen sağ ve sol ikizkenar üçgen yan kolların yüksekliği 1000 nm ve taban genişlikleri h'dir (Şekil 3.25). Mükemmel soğurucu dizisinde altın parçacıkların toplam boyu L'dir.

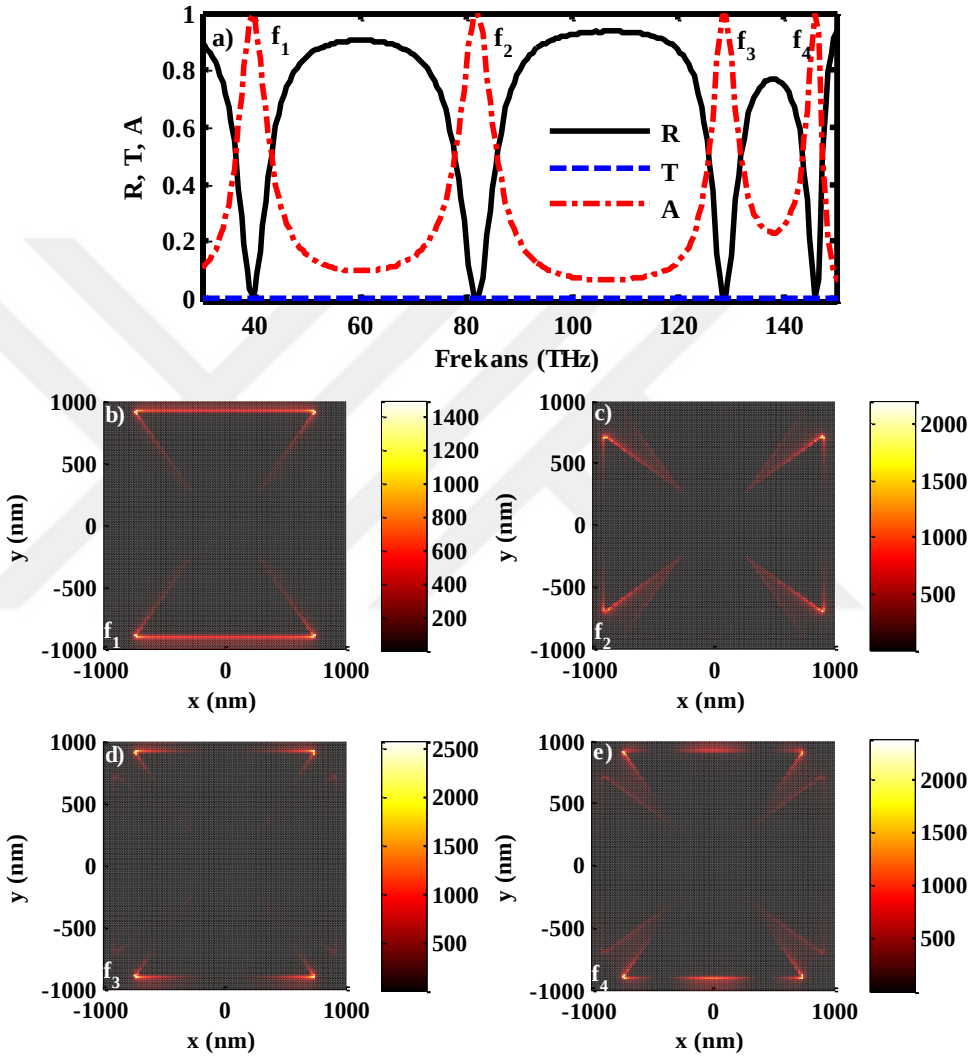


Şekil 3.25. Demir haç şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi.

Simülasyonlar boyunca y polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır. Dielektrik ara katmanın optik özelliklere etkisini görmek amacıyla demir haç şeklindeki altın nanoparçacık tabanlı mükemmel soğurucu dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3 kullanılarak frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı incelenmiştir.

Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.26 (a)'da verilmiştir (L = 1800 nm, h = 1400 nm, w = 1450 nm, P = 2000 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 125 nm). Şekil 3.26 (a)'da görüldüğü gibi mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çoklu-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen dört adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 39.5 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 82 THz) absorbans değeri % 99.9, üçüncü rezonans noktasında (f_3 = 128.5 THz) absorbans değeri %99.8 ve dördüncü rezonans noktasında (f_4 = 146 THz) absorbans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.26 (a)). Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1, f_2, f_3 ve f_4) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.26 (b), 3.26 (c), 3.26 (d) ve 3.26 (e)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının

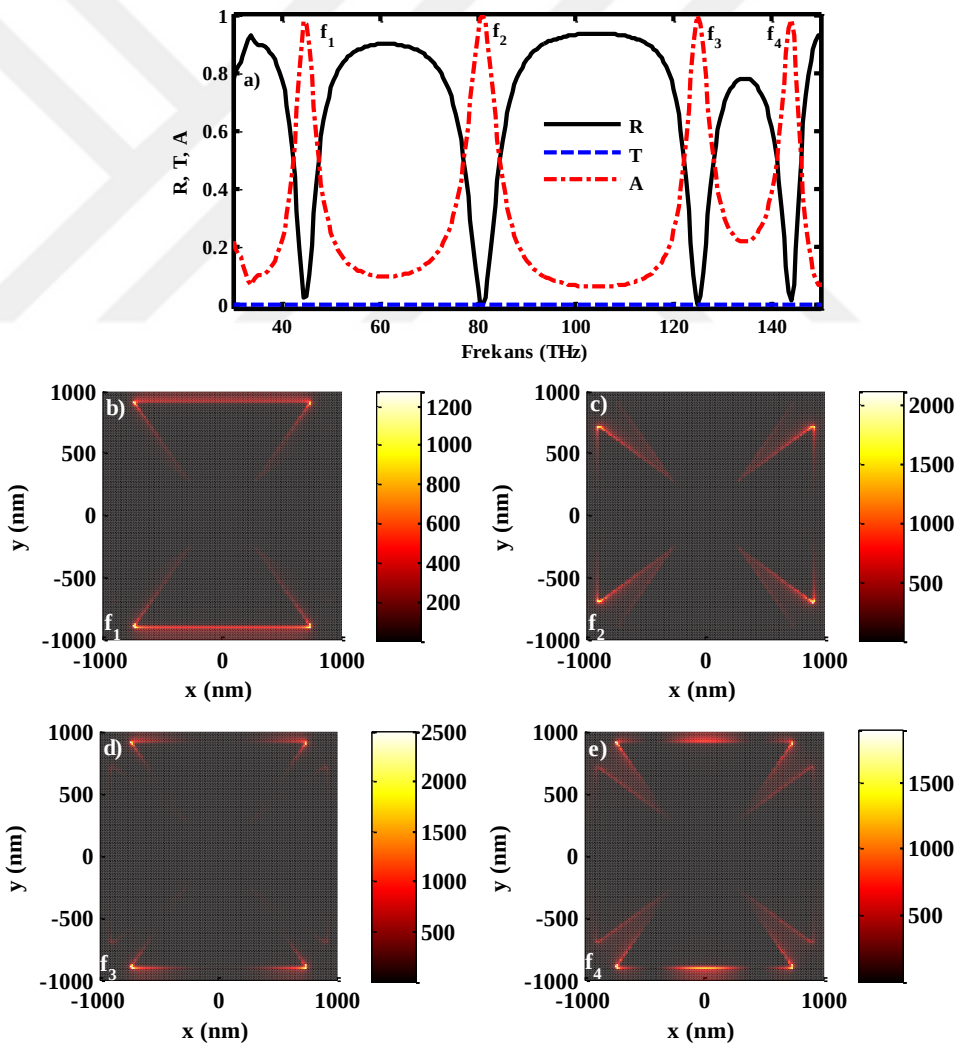
üçgenlerin keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre 1400 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Elde edilen dört adet rezonans frekansında da soğurum değerleri %100'e yakın olmaktadır. Yüksek soğurum değerleri ve yüksek yakın alan dağılımları spektroskopi uygulamaları için tercih edilen bir durumdur.



Şekil 3.26. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2, (d) f_3 ve (e) f_4 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

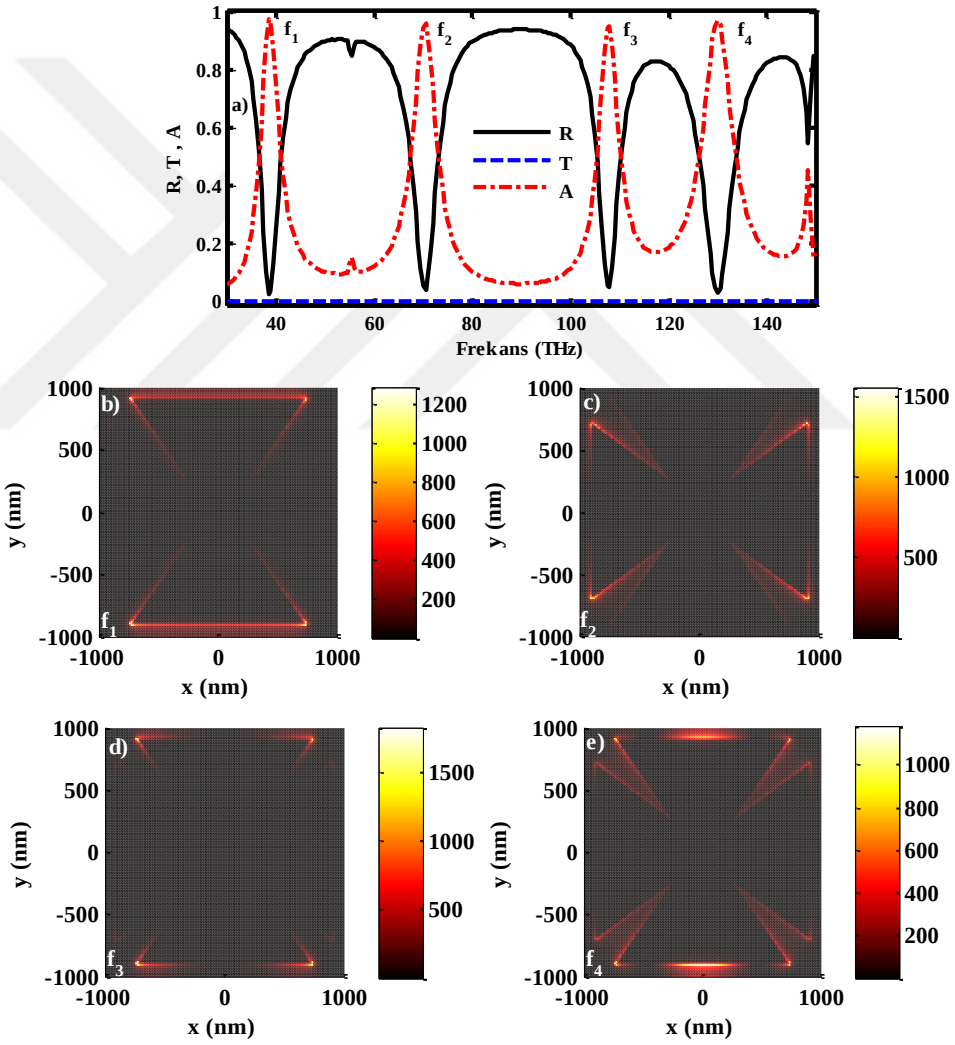
Demir haç şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.27 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen dört adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 44.5 THz) absorbans % 98.4, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 81 THz) absorbans değeri % 99.9,

üçüncü rezonans noktasında (f_3 = 125 THz) absorbans değeri % 99.9 ve dördüncü rezonans noktasında (f_4 = 144 THz) absorbans değeri % 99.8 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1, f_2, f_3 ve f_4) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.27 (b), 3.27 (c), 3.27 (d) ve 3.27 (e)'de verilmiştir. Önerilen mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve üçgenlerin keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür. Elde edilen dört rezonans noktasında da elde edilen soğurum değeri bire yakın olmaktadır. Bu durum soğurma değerinin %100'e yakın olduğunu göstermektedir.



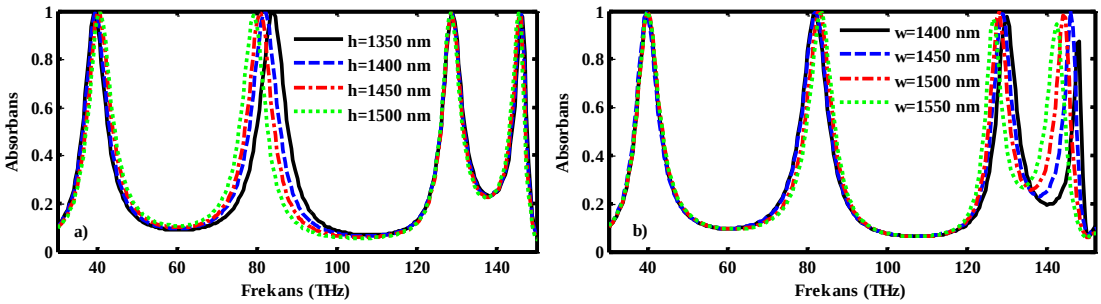
Şekil 3.27. (a) SiO_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2, (d) f_3 ve (e) f_4 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Demir haç şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 (n = 1.76) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.28 (a)'da sunulmuştur (L = 1800 nm, h = 1400 nm, w = 1450 nm, P = 2000 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 125 nm). Elde edilen dört adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 38.5 THz) absorbans % 98.2, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 70.5 THz) absorbans değeri % 97.2, üçüncü rezonans noktasında (f_3 = 108 THz) absorbans değeri % 96.5 ve dördüncü rezonans noktasında (f_4 = 130 THz) absorbans değeri % 97.5 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.28. (a) Al_2O_3 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2, (d) f_3 ve (e) f_4 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

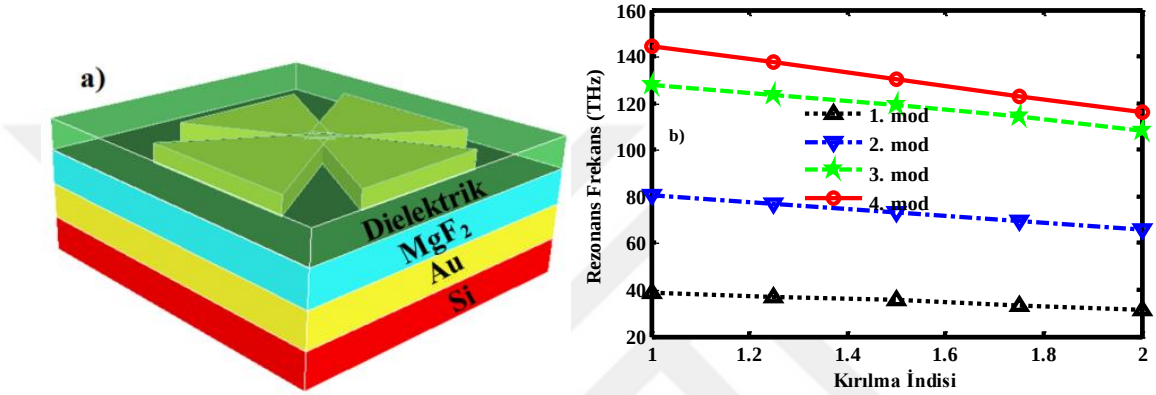
Dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1, f_2, f_3 ve f_4) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.28 (b), 3.28 (c), 3.28 (d) ve 3.28 (e)'de verilmiştir. Birinci rezonans noktasında elektrik alan değeri gönderilen ışıktan 1200 kat, ikinci rezonansta 1500 kat, üçüncü rezonansta 1200 kat ve dördüncü rezonans noktasında ise 1000 kattan fazla olmaktadır. Dielektrik ara katman olarak 125 nm kalınlığında Al_2O_3 kullanıldığında da mükemmel soğurucu dizisinin yüksek absorbans hassasiyetini koruduğu ve yüksek elektrik alan dağılımlarına sahip olduğu görülmüştür. Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin geometrik parametrelerinde yapılan değişikliklere karşı absorbans spektrumundaki değişimler Şekil 3.29'de verilmiştir (L = 1800 nm, h = 1400 nm, w = 1450 nm, P = 2000 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 125 nm). Diğer parametreler sabit kalmak üzere demir haç şeklindeki yapının sağ ve sol kollarında bulunan ikizkenar üçgenlerin taban genişlikleri (h) artırıldığında ilk iki rezonans frekansı değişmektedir (Şekil 3.29 (a)). Birinci rezonans frekansı artarak sağa kayarken ikinci rezonans frekansı ise sola kaymakta yani azalmaktadır. Yapının üst ve alt kollarında bulunan ikizkenar üçgen parçacıkların taban genişlikleri (w) artırıldığında ise üçüncü ve dördüncü rezonans frekansları sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.29 (b)). Sunulan mükemmel soğurucu dizisinin ilk iki rezonans frekansı yan kolların genişliğini değiştirerek, son iki rezonans frekansı ise üst ve alt kolların genişliğini değiştirerek ayarlanabilmektedir.



Şekil. 3.29. Demir Haç şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi (b) w değişimi.

Demir haç şeklindeki çok bantlı rezonansa sahip mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini ve biyo-algılama uygulamalarında bir sensör olarak kullanılabilme potansiyelini analiz etmek için, Şekil 3.30 (a)'da görüldüğü gibi

mükemmel soğurucu yapısının üzeri 100 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanmıştır (L = 1800 nm, h = 1400 nm, w = 1450 nm, P = 2000 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 125 nm). Demir haç şeklindeki çok bantlı rezonansa sahip mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve farklı kırılma indislerine göre yapıya ait dört farklı rezonans frekansının lineer olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.30 (b)).

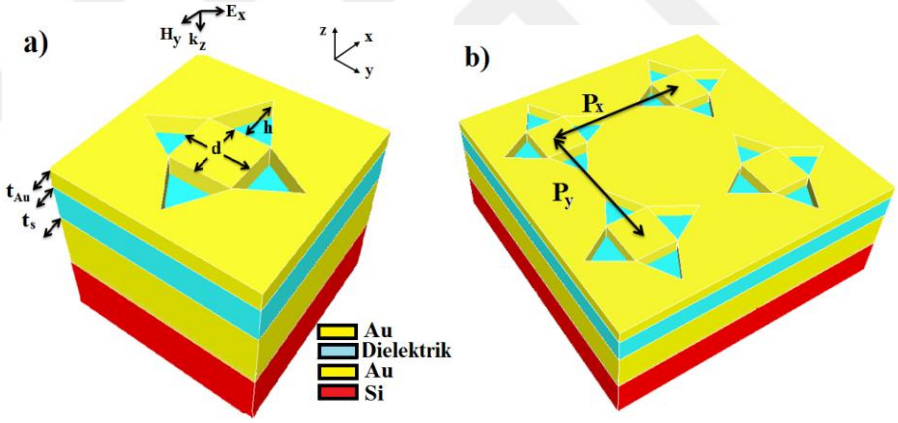


Şekil 3.30. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış mükemmel soğurucu birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.

Bu çalışmada, kızılötesi frekans bölgesinde biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek demir haç şeklinde yeni bir metal-dielektrik-metal kompoziti altın nanoparçacık tabanlı mükemmel soğurucu dizileri sunulmuştur. Mükemmel soğurucu dizisi absorbans değerleri %99'un üzerinde olan dört adet rezonans frekansına sahiptir. Mükemmel soğurucu dizilerinin rezonans cevabının geometrik parametrelere bağımlılığı ve kırılma indisine hassasiyeti incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. Çoklu-bant rezonans cevabı, geometrik parametrelere göre ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ve kırılma indisi hassasiyeti ile sunulan mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Absorbans değerleri yüksek dört adet rezonans frekansına sahip olan bu mükemmel soğurucu yapı aynı anda dört farklı biyolojik numunenin tespiti için kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Soğurum değerleri yüksek dört adet rezonans frekansına sahip böyle bir uygulama literatürde henüz gerçekleştirilmemiştir.

3.2.6. T#6

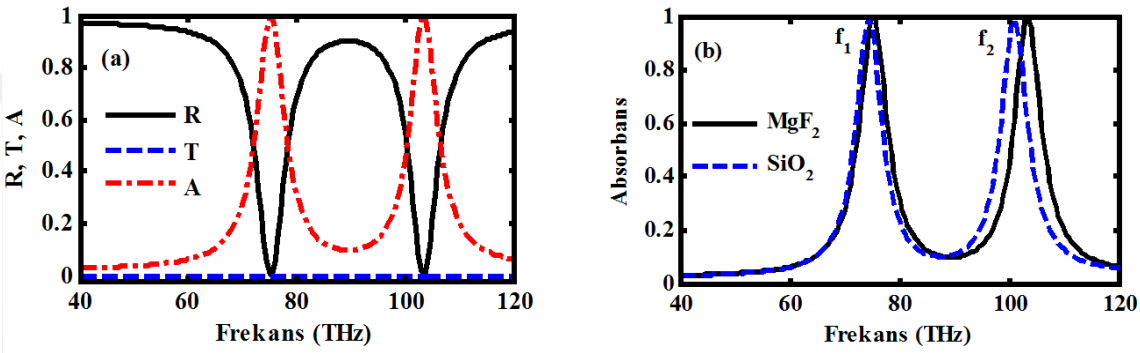
Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek yıldız şeklindeki yeni bir mükemmel soğurucu sunulmuştur. Şekil 3.31 (a)'da görülen yıldız şeklindeki nanoanten yapısında taban malzemesi olarak 500 nm kalınlığında silikon kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 200 nm altın film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_S= 100 nm kalınlığında dielektrik bir ara katman yerleştirilmiştir. Nanoanten yapının son katmanı olarak t_{Au}= 50 nm kalınlığında altın kullanılmıştır. Sunulan mükemmel soğurucu dizisinin periyodu 2000 nm (P_x = P_y = 2000 nm) olarak belirlenmiştir. Altın katman içerisinde yükseklikleri h = 500 nm ve taban genişlikleri d = 700 nm olan 4 adet ikizkenar üçgen açıklıklar Şekil 3.31'deki gibi oluşturulmuştur. Mükemmel soğurucu dizisinin analizi gerçekleştirilirken *x* yönünde polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır. Şekil 3.31 (b)'de mükemmel soğurucu dizisi verilmiştir.



Şekil 3.31. (a) Yıldız şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin birim hücresi. (b) Mükemmel soğurucu dizisi.

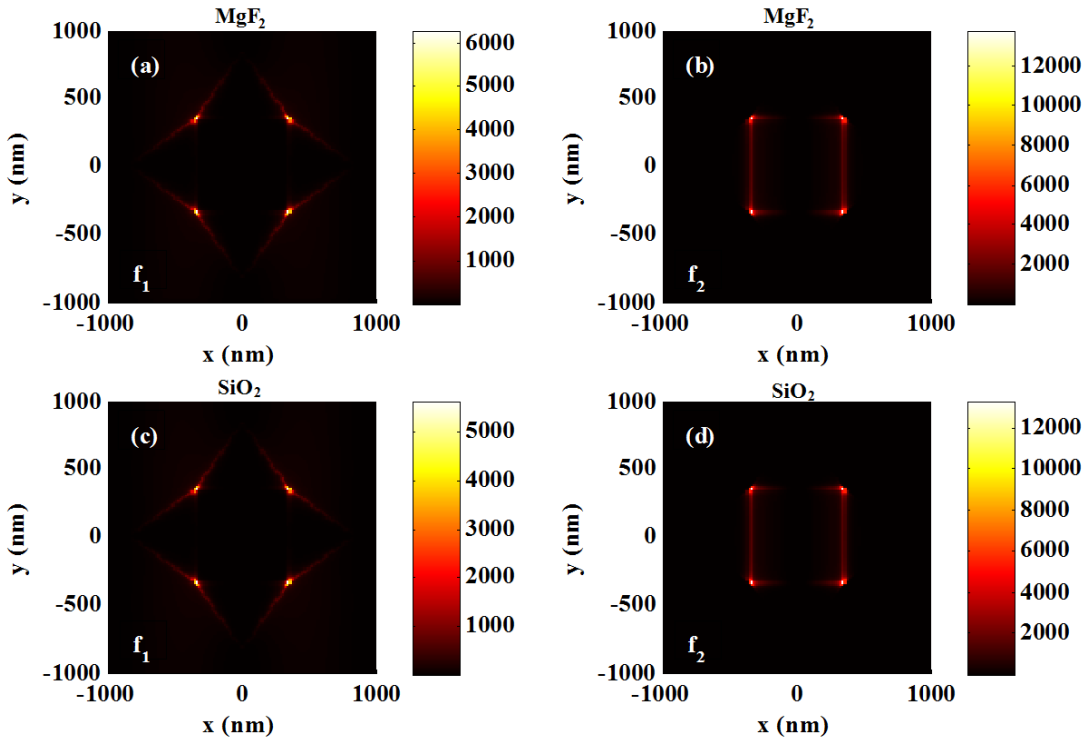
Yıldız şeklindeki nano-açıklık tabanlı mükemmel soğurucu dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı Şekil 3.32 (a)'da görüldüğü gibi olmaktadır. Sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki adet rezonans noktasından ilkinde (f_1 = 75 THz) absorbans % 99.8 ve ikinci rezonans noktasında (f_2 = 103.5 THz), absorbans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir. Dielektrik katmanların önerilen mükemmel soğurucu dizisinin absorbans karakteristiğine etkilerini incelemek için farklı dielektrik katmanlar (MgF_2 ve SiO_2)

kullanılmıştır. Farklı dielektrik katmanlar (MgF_2 ve SiO_2) için yapının absorbans (A) spektrası Şekil 3.32 (b)'de verilmiştir. Dielektrik ara katman olarak kullanılan MgF_2 yerine SiO_2 (n = 1.5) kullanıldığında ise rezonans noktalarının sola kaydığı ve absorbans değerlerinin % 99'un üzerinde olduğu görülmüştür (Şekil 3.32 (b)). Bu şekilde tasarlanacak yapıda farklı bir dielektrik katman kullanabilme özelliği elde edilmiş ve yine farklı rezonans frekanslarında bir mükemmel soğurucu tasarlanabilme avantajı kazanılmıştır.



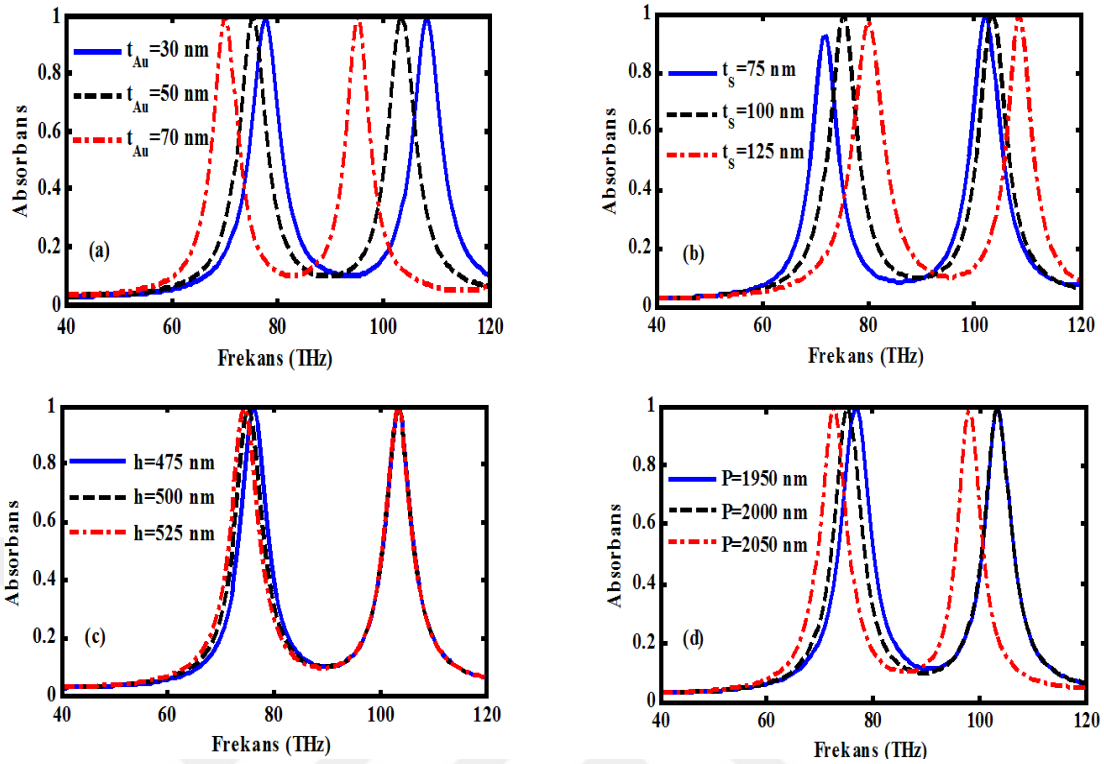
Şekil 3.32. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. (b) Farklı dielektrikler için absorbans spektrumları.

Dielektrik ara katman olarak MgF_2 ve SiO_2 kullanılması durumunda rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları Şekil 3.33'de verilmiştir. Mükemmel soğurucu dizisi yıldız şeklinde oluşturularak üçgenlerin keskin noktalarında elektrik alan değerlerinin yüksek olması sağlanmıştır. Dielektrik ara katman olarak MgF_2 ve SiO_2 kullanılarak mükemmel soğurucu dizisinin soğurma yeteneğinin artırılabildiği gözlemlenmiştir. Elektrik alan dağılımlarının üçgen açıklıkların kesişme noktalarında yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre MgF_2 kullanıldığında birinci rezonans noktasından 6000 kattan, ikinci rezonans noktasında ise 12000 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Dielektrik katman olarak SiO_2 kullanılması durumunda ise elektrik alan değerleri gönderilen ışığa göre, ilk rezonans noktasında 5000 kattan, ikinci rezonans noktasında 12000 kattan daha fazla olmaktadır. Bu yüksek elektrik alan değerleri ışık – madde etkileşiminin artmasına ve ilgili sensör yapısının hassasiyetinin artmasına olanak sağlamaktadır.



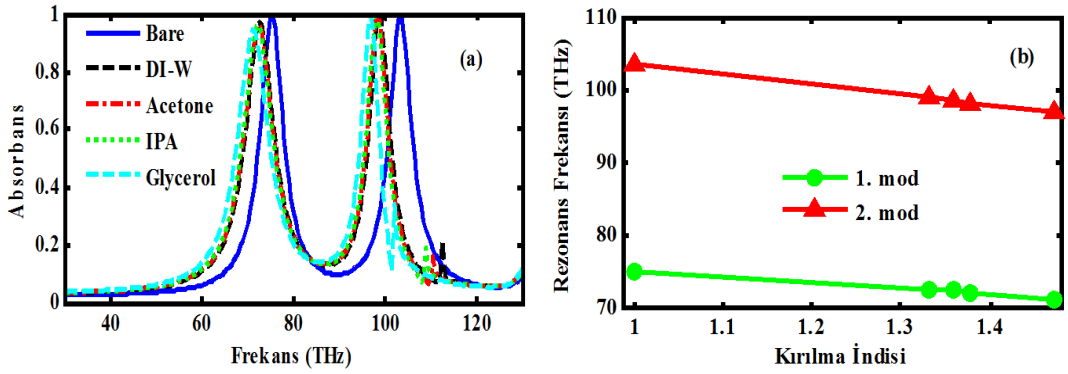
Şekil 3.33. (a, b) MgF_2 ve (c, d) SiO_2 dielektrik ara katmanlar için rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Şekil 3.34'de mükemmel soğurucu dizisinin farklı geometrik parametrelerinde yapılan değişikliklere karşı absorbans spektrumundaki değişimler verilmiştir (h = 500 nm, d = 700 nm, P = 2000 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 100 nm). Diğer parametreler sabit kalmak koşulu ile altın katmanı t_{Au} artırıldığında rezonans noktaları sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.34 (a)). Dielektrik ara katman MgF_2'nin kalınlığı (t_s) artırıldığında ise rezonans frekansları artmaktadır (Şekil 3.34 (b)). Üçgen açıklıkların yüksekliği (h) artırıldığında ilk rezonans frekansı azalırken ikinci rezonans frekansı değişmemektedir (Şekil 3.34 (c)). Yapının periyodu artırıldığında ise rezonans frekansları sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.34 (d)). Sunulan mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları geometrik parametrelerin değiştirilmesiyle ve katman kalınlıklarının artırılması yada azaltılması yoluyla kolaylıkla ayarlanabilmektedir (Şekil 3.34). Bu şekilde geometrik parametre değişimleri ve katman kalınlığı değişimleri yapılarak farklı rezonans frekanslarına sahip yapılar tasarlanabilecektir.



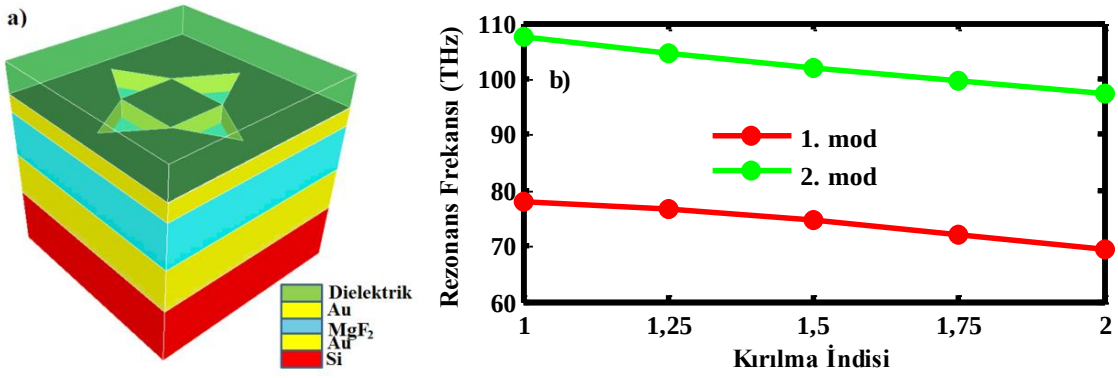
Şekil 3.34. Yıldız şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) Altın kalınlığı (t_{Au}) değişimi (b) MgF_2 kalınlığı (t_S) değişimi (c) h değişimi (d) Periyot (P) değişimi.

Bu çalışmada, mükemmel soğurucu dizilerinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini tespit etmek ve bir sensör olarak kullanılabilme yeteneğini analiz etmek amacıyla mükemmel soğurucu dizileri, de-iyonize edilmiş su (DI-Water) (n=1.3325), aseton (Acetone) (n=1.3591), izopropil alkol (IPA) (n=1.3776) ve gliserol (Glycerol) (n=1.4722) gibi farklı kırılma indisli malzemeler içerisine gömülerek absorbans spektrumları incelenmiştir (Şekil 3.35 (a)). Önerilen mükemmel soğurucu yapısı bu farklı kırılma indisli malzemeler içerinde yüksek soğurma yeteneğini koruyabilmektedir. Ortamın kırılma indisi ve rezonans frekansları arasındaki ilişki Şekil 3.35 (b)'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Ortamın kırılma indisi artarken, her iki mod için rezonans frekansları azalmaktadır. Nanoaçıklık tabanlı mükemmel soğurucu yapısı bir sensör olarak kullanılması durumunda farklı çözeltiler içerisinde bağların yada moleküllerin algılanmasında yüksek absorbans yeteneği sayesinde kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Kırılma indisi hassasiyeti biyo-algılama uygulamalarında kullanılacak sensörler için büyük önem taşıyan bir kriterdir.



Şekil 3.35. (a) Farklı kırılma indisli malzemeler için mükemmel soğurucu dizisinin absorbans spektrumu. (b) Kırılma indisi-rezonans frekansı arasındaki ilişki.

Yıldız açıklık şeklindeki çift bantlı rezonansa sahip mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini analiz etmek için, Şekil 3.36 (a)'da görüldüğü gibi mükemmel soğurucu yapısının üzeri 100 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanmıştır (h = 500 nm, d = 700 nm, P = 2000 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 100 nm). Yıldız açıklık şeklindeki çift bantlı rezonansa sahip mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve farklı kırılma indislerine göre yapıya ait iki rezonans frekansının azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.36 (b)).



Şekil 3.36. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış mükemmel soğurucu birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.

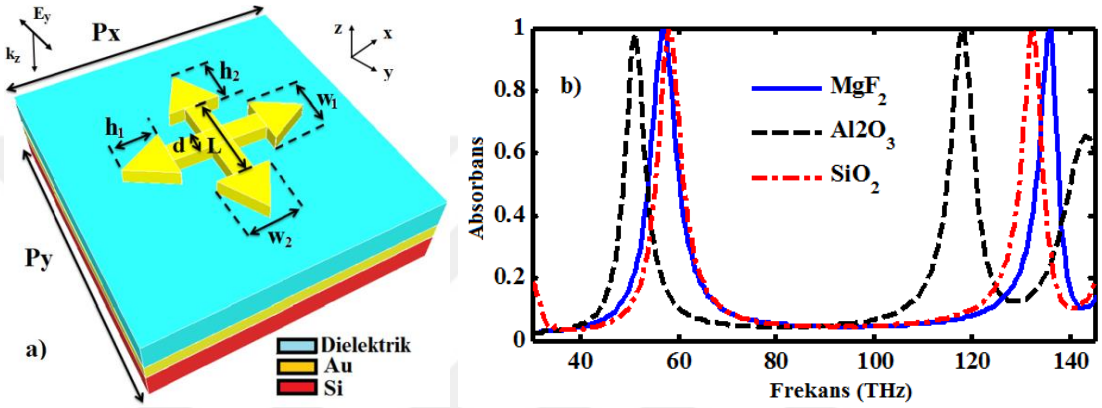
Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek yeni bir metal-dielektrik-metal kompoziti nano-açıklık tabanlı mükemmel soğurucu dizileri sunulmuştur. mükemmel soğurucu dizilerinin rezonans cevabının geometrik parametrelere bağımlılığı ve kırılma indisine hassasiyeti incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. Çift-bant rezonans cevabı, ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ve kırılma indisi hassasiyeti ile sunulan mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

3.2.7. T#7

Bu çalışmada, orta-kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek dört başlı ok şeklinde altın nanoparçacık tabanlı yeni bir mükemmel soğurucu dizisi sunulmuştur. Rezonans davranışlarının fiziksel temelini anlamak için ve nanoyapının alan dağılımlarını belirlemek için rezonans frekanslarında yakın alan dağılımları elde edilmiştir.

Şekil 3.37 (a)'da önerilen mükemmel soğurucunun şematik görünümü yer almaktadır. Yapı dielektrik yüzey (Si) üzerinde altın (Au) film ile nanoparçacık tabanlı üst yüzey arasında yer alan ara katmandan (MgF_2) oluşmaktadır. Dielektrik yüzey kalınlığı 500 nm, altın film kalınlığı 200 nm, dielektrik katmanı kalınlığı 125 nm ve dört başlı ok şeklindeki altın nanoparçacık kalınlığı 50 nanometredir. Şekil 3.37 (a)'da, L ve d sırasıyla dikdörtgen nanoçubukların boyunu ve enini belirtmektedir. h_1 sağ ve sol üçgen nanoparçacıkların yüksekliğini ve h_2 alt ve üst üçgen nanoparçacıkların yüksekliğini belirtmektedir. w_1 sağ ve sol üçgen nanoparçacıkların taban genişliklerini göstermekte ve w_2 alt ve üst üçgen nanoparçacıkların taban genişliklerini göstermektedir. Mükemmel soğurucu dizisinin periyotları, $P_x = P_y = 2000$ nm olarak belirlenmiştir. Simülasyonlar boyunca analizler y-polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir ve geometrik boyutlar L = 1000 nm, w_1 = 750 nm, w_2 = 700 nm, h_1 = 400 nm, h_2 = 350 nm ve d = 350 nm olarak seçilmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve z ekseni boyunca mükemmel uyumlu katmanlar kullanılmıştır.

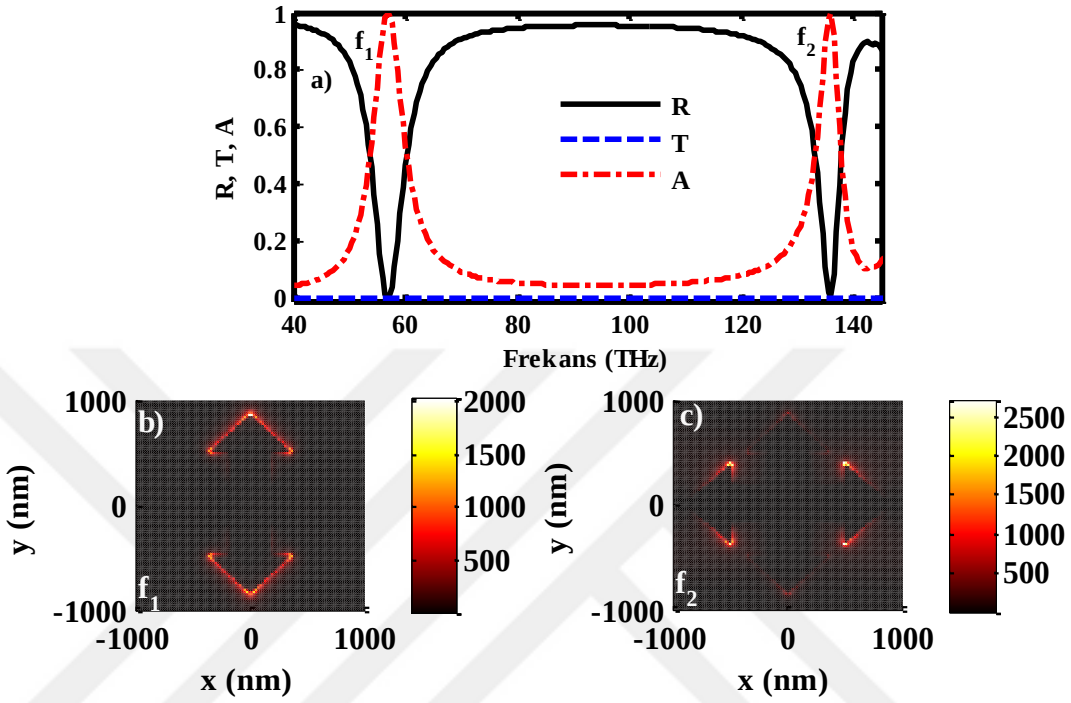
Dielektrik katmanların önerilen mükemmel soğurucu dizisinin absorbans karakteristiğine etkilerini incelemek için farklı dielektrik katmanlar (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) kullanılmıştır. Farklı dielektrik katmanlar (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) için yapının absorbans (A) spektrası Şekil 3.37 (b)'de verilmiştir. Tüm yapılar orta-kızılötesi bölgede çift bant davranışı sergilemektedir. Ayrıca tüm dielektrik katmanlar için absorbans değeri bire yakın olup %100' e yakın soğurum elde edilmiştir.



Şekil 3.37. (a) Dört başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucunun şematik görünümü. (b) Dört başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı ara katmanlar için absorbans spektrumları.

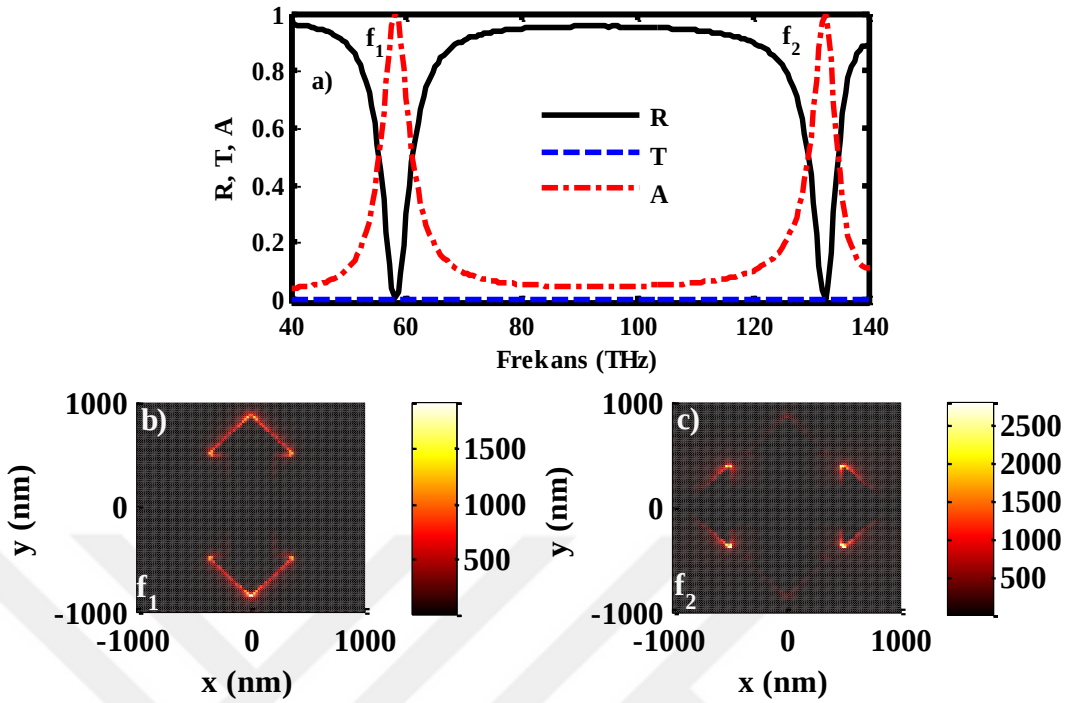
Şekil 3.38 (a)'da mükemmel soğurucu dizisinde MgF_2 dielektrik katmanı kullanıldığında elde edilen absorbans (A), reflektans (R) ve transmitans (T) spektrası yer almaktadır. Önerilen mükemmel soğurucu çift bant rezonansa sahiptir ve bu rezonanslardan ilkinde (f_1 = 57 THz) ve ikincisinde (f_2 = 136 THz) absorbans değerleri %99.9 olarak elde edilmiştir. Yapının her iki rezonans frekansında da soğurum değerleri oldukça yüksek bir şekilde gerçekleşmiştir. Birinci (f_1) ve ikinci (f_2) rezonanslarda elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.38 (b) ve 3.38 (c)'de verilmiştir. Yakın alan dağılımları yapının keskin köşelerinde yoğunlaşmakta ve birinci rezonans noktasında 2000 kattan, ikinci rezonans noktasında ise 2500 kattan yüksek olmaktadır. Bu köşelerdeki moleküller metalik parçacıklardan uzakta duranlara göre elektromanyetik alan ile çok daha güçlü bir etkileşime girebilirler. Bu durum önerilen mükemmel soğurucu diziliminin yüzeye yakın bölgedeki dielektrik ortamının rezonans frekanslarını güçlü olarak etkileyebileceği anlamına gelir. Bu olgu, önerilen mükemmel soğurucu

diziliminin kızılötesi algılama yeteneklerinin temelidir ve ilgili yapının bir sensör olarak kullanılabileceğini gösteren en temel unsurdur.



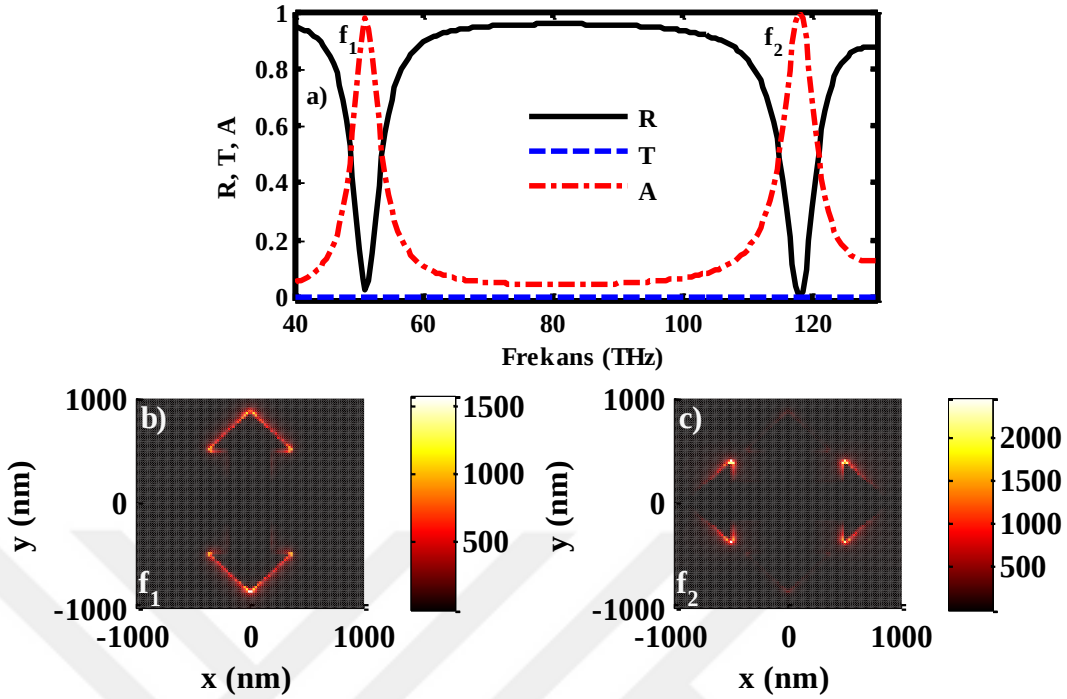
Şekil 3.38. (a) Mükemmel soğurucu dizisinin MgF_2 ara katmanı ile spektral cevabı. (b) f_1 ve (c) f_2 rezonanslarında elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$.

Şekil 3.39 (a) yapının SiO_2 ara katmanı ile elde edilen A, R ve T spektrasını göstermektedir. Önerilen mükemmel soğurucu çift bant rezonansa sahiptir ve bu rezonanslardan ilkinde (f_1 = 58 THz) absorbans değeri %99.8 ikincisinde ise (f_2 = 132.5 THz) %99.9 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman değiştiğinde de yapı yüksek soğurum kapasitesini korumuştur. Birinci (f_1) ve ikinci (f_2) rezonanslarında elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.39 (b) ve 3.39 (c)'de verilmiştir. Yakın alan dağılımları yapının keskin köşelerinde ilk rezonans noktasında 1500 kattan ve ikinci rezonans noktasında 2500 kattan yüksek olmaktadır. Birinci rezonans frekansı absorbans değerinde gerçekleşen az miktardaki azalma nedeniyle ilk rezonans noktasındaki elektrik alan değerleri de MgF_2'de elde edilen değerlerden daha düşük olmuştur. Ancak ikinci rezonansta hem absorbans değerinde hem elektrik alan değerlerinde bir değişim olmamıştır. Tasarlanan dört başlı ok şeklindeki altın nanoparçacık tabanlı mükemmel soğurucuda farklı bir dielektrik katman kullanılabilme avantajı olduğu görülmüştür.



Şekil 3.39. (a) Mükemmel soğurucu dizisinin SiO_2 ara katmanı ile spektral cevabı. (b) f_1 ve (c) f_2 rezonanslarında elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$.

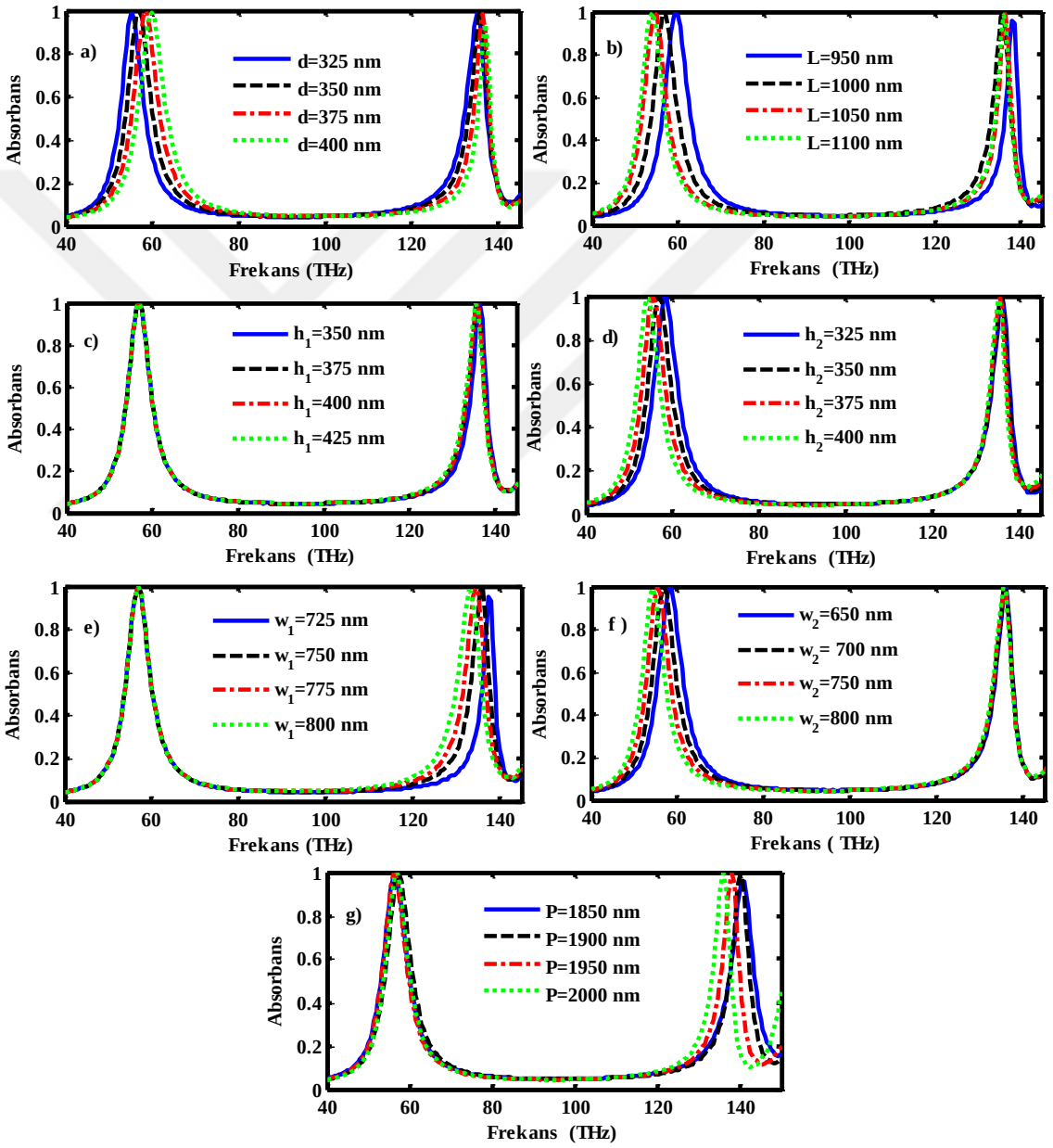
Çalışmanın bu bölümünde yapının dielektrik katmanında Al_2O_3 kullanılarak optik spektrumunda meydana gelen değişimler incelenmiştir. Şekil 3.40 (a) yapının Al_2O_3 ara katmanı ile elde edilen absorbans (A), reflektans (R) ve transmitans (T) spektrasını göstermektedir (L = 1000 nm, w_1 = 750 nm, w_2 = 700 nm, h_1 = 400 nm, h_2 = 350 nm ve d = 350 nm). Önerilen mükemmel soğurucu çift bant rezonansa sahiptir ve bu rezonanslardan ilkinde (f_1 = 51 THz) absorbans değeri %98.4 ikincisinde ise (f_2 = 118 THz) %99.8 olarak elde edilmiştir. Birinci (f_1) ve ikinci (f_2) rezonanslarda elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.40 (b) ve 3.40 (c)'de verilmiştir. Yakın alan dağılımları gönderilen ışıktan üçgenlerin keskin köşelerinde yoğun olmak üzere birinci rezonans noktasında 1500 kattan, ikinci rezonans noktasında ise 2000 kattan yüksek olmaktadır. Birinci rezonans frekansı olan 51 THz'de elektrik alan dağılımları alt ve üst kollarda yer alan altın üçgen nanoparçacıkların keskin köşelerinde, ikinci rezonans frekansı olan 116 THz'de ise sağ ve sol kollarda yer alan altın üçgen nanoparçacıkların keskin köşelerinde yoğunlaşmıştır. Yapıda dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 kullanıldığında da yüksek elektrik alan değerlerini ve yüksek absorbans yeteneğini korumaktadır. Dört başlı ok şeklindeki MS dizisinde farklı dielektrik katmanlar kullanabilme avantajı elde edilmiştir.



Şekil 3.40. (a) Mükemmel soğurucu dizisinin Al_2O_3 ara katmanı ile spektral cevabı. (b) f_1 ve (c) f_2 rezonanslarında elektrik alan dağılımları $|E|^2/|E_{int}|^2$.

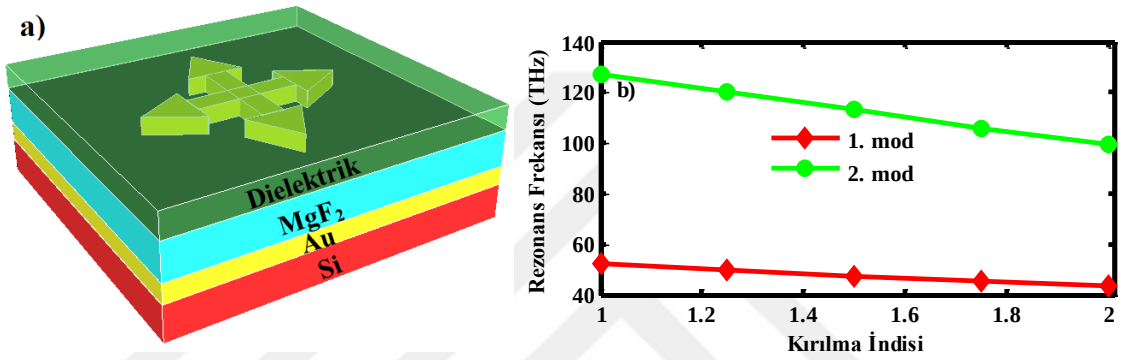
Şekil 3.41 farklı d, L, h_1, h_2, w_1, w_2 ve P parametre değerleri için spektral değişimleri göstermektedir (L = 1000 nm, w_1 = 750 nm, w_2 = 700 nm, h_1 = 400 nm, h_2 = 350 nm, ve d = 350 nm). Diğer parametreler sabit kalmak koşulu ile, d (dikdörtgen nanoçubukların eni) artığında tüm rezonans frekansları azalmaktadır (Şekil 3.41 (a)). Şekil 3.41 (b)'de L (dikdörtgen nanoçubukların boyu) değişimi için absorbans spektrası verilmiştir, dikdörtgen nanoçubukların uzunluğu arttığında yapının tüm rezonans frekansları azalmaktadır. h_1 (sağ ve sol üçgen nanoparçacıkların yüksekliği) arttığında, sadece ikinci rezonans frekansı hafifçe azalmakta yani sola kaymaktadır (Şekil 3.41 (c)). h_2 (alt ve üst üçgen nanoparçacıkların yüksekliği) artırıldığında, sadece ilk rezonans frekansı azalmaktadır (Şekil 3.41 (d)). w_1 (sağ ve sol üçgen nanoparçacıkların taban genişliği) arttığında, sadece ikinci rezonans frekansı azalmaktadır (Şekil 3.41 (e)) ancak w_2 (alt ve üst üçgen nanoparçacıkların taban genişliği) arttığında sadece ilk rezonans frekansı azalmaktadır (Şekil 3.41 (f)). Absorbans spektrasının periyoda (P) bağımlılığı Şekil 3.41 (g)'de görülmektedir, periyot değişiminden sadece ikinci rezonans frekansı etkilenmekte ve periyot artırıldığında ikinci rezonans noktası sağa kaymaktadır. Mükemmel soğurucu dizisinin optik özellikleri yapının geometrik parametrelerine

bağımlıdır (Şekil 3.41). Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları yapının geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Bu parametreler yapının bir sensör olarak kullanılması durumunda tasarlanacak sensör yapısının rezonans frekansını hassas bir şekilde ayarlama imkanı veren kolay ayarlama mekanizmaları olarak kullanılabilir.



Şekil 3.41. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) d değişimi (b) L değişimi (c) h_1 değişimi (d) h_2 değişimi (e) w_1 değişimi (f) w_2 değişimi (g) P değişimi.

Önerilen dört başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinin kırılma indisine hassasiyetini kontrol etmek ve bir sensör olarak kullanılabilme potansiyelini analiz etmek için, yapının üst bölümü farklı kırılma indislerine sahip (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75 ve n = 2) kaplama katmanları ile kaplanmıştır (Şekil 3.42 (a)). Kaplama katmanı kalınlığı 100 nm'dir. Rezonans frekansları ile kaplama ortamlarının kırılma indisleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Kaplama ortamların kırılma indisleri arttığında tüm rezonans frekansları azalmaktadır (Şekil 3.42 (b)).



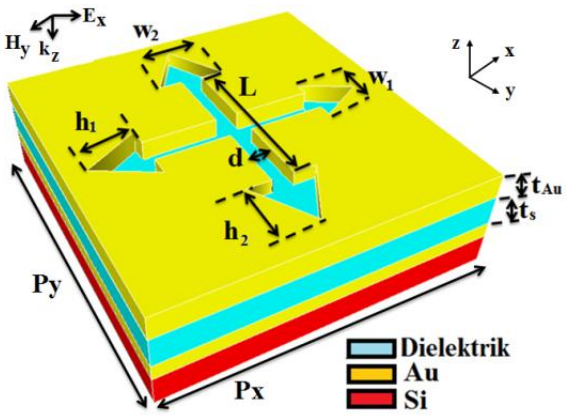
Şekil 3.42. (a) Kaplama ortamlı mükemmel soğurucu şematik görünümü. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.

Sonuç olarak, orta-kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamaları için dört başlı ok şeklinde nanoparçacıklar tabanlı yeni bir plazmonik mükemmel soğurucu dizisi sunulmuştur. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı ve yakın alan dağılımları elde edilmiştir. Yapı soğurum değerleri oldukça yüksek olan iki rezonans frekansına sahiptir ve bu rezonans frekanslarında geleneksel yapılara nazaran oldukça yüksek yakın alan dağılımları elde edilmiştir. Yüksek elektrik alan değerleri spektroskopi ve SEIRA uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. Dielektrik katmanların önerilen mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Mükemmel soğurucu dizisinde MgF_2 dielektrik katmanı kullanıldığında en yüksek absorbans değerleri ve yakın alan dağılımları elde edilmiştir. Çift bant spektral cevabı ve yüksek yakın alan dağılımları, geometrik parametrelerin değiştirilmesiyle ayarlanabilen spektral cevabı ile önerilen dört başlı ok şeklindeki çift bant mükemmel soğurucu dizisi orta-kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında ve spektroskopi uygulamalarında kullanışlı olabilir.

3.2.8. T#8

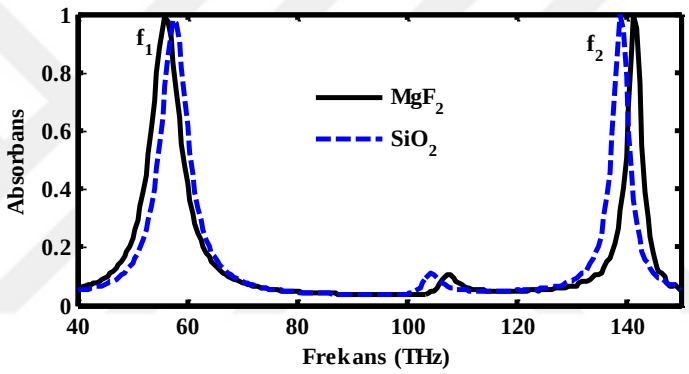
Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek dört başlı ok şeklinde nanoaçıklık tabanlı yeni bir mükemmel soğurucu dizisi sunulmuştur. Rezonans davranışlarının fiziksel temelini anlamak için ve nanoyapının alan dağılımlarını belirlemek için rezonans frekanslarında yakın alan dağılımları elde edilmiştir.

Şekil 3.43'de görülen dört başlı ok şeklindeki açıklık nanoanten yapısında taban malzemesi olarak 500 nm kalınlığında silikon kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 200 nm altın film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_s = 130 nm kalınlığında dielektrik bir ara katman yerleştirilmiştir. Nanoanten yapının son katmanı olarak t_{Au} = 50 nm kalınlığında altın kullanılmıştır. Sunulan MS dizisinin periyodu P_x = P_y = 2000 nm olarak belirlenmiştir. Altın katman içerisinde; enleri d = 250 nm ve boyları L = 1000 nm olan iki adet dikdörtgen açıklık asimetrik olarak oluşturulmuştur. Dikdörtgen açıklıkların uçlarına yükseklikleri h_1 = 475 nm ve taban genişlikleri w_1 = 780 nm olan iki adet ikizkenar üçgen açıklık sol ve sağ kollara, yükseklikleri h_2 = 475 nm ve taban genişlikleri w_2 = 810 nm olan iki adet ikizkenar üçgen açıklık üst ve alt kollarda yer alacak şekilde yapı meydana getirilmiştir. MS dizisinin analizi gerçekleştirilirken x yönünde polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır.



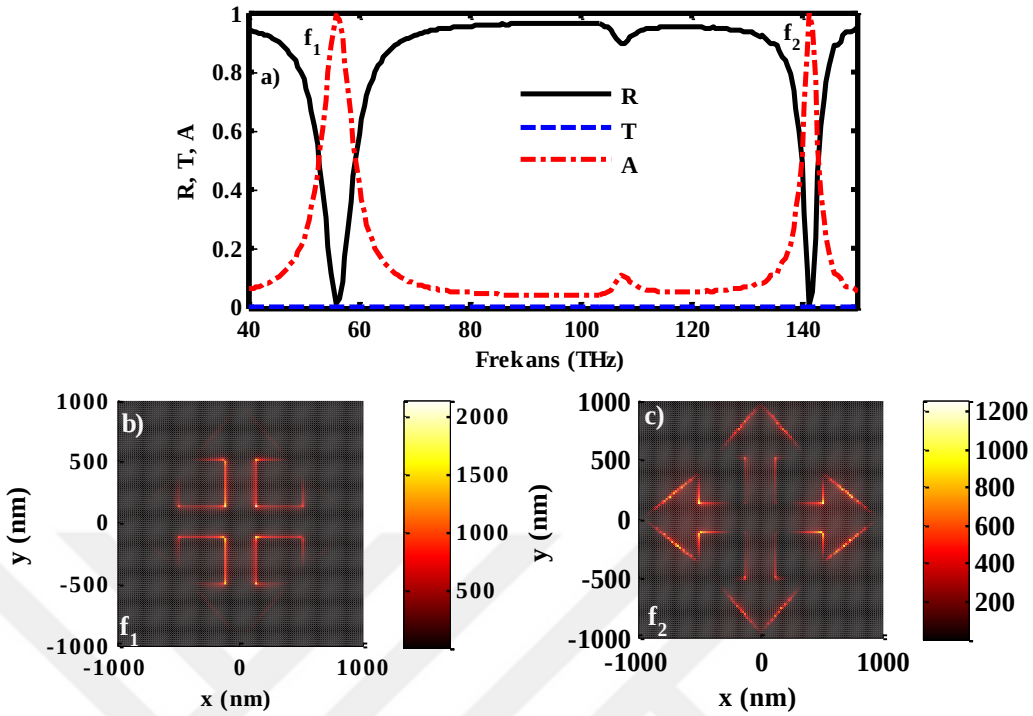
Şekil 3.43. Dört başlı ok şeklinde nano açıklık tabanlı MS dizisi birim hücresi.

Dört başlı ok şeklinde nanoaçıklıklara dayalı mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik ara katmanlar (MgF_2 ve SiO_2) için frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı incelenmiştir. Şekil 3.44.de dört başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2 ve SiO_2) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir. Kullanılan iki dielektrik katman için de absorbans değeri bire yakın olmakta yani %100'e yakın bir soğurum elde edilmektedir. Bu şekilde MS birim hücresi tasarlanırken iki farklı dielektrik katman kullanabilme ve farklı rezonans frekanslarına sahip yapılar elde edebilme avantajı olduğu görülmüştür.



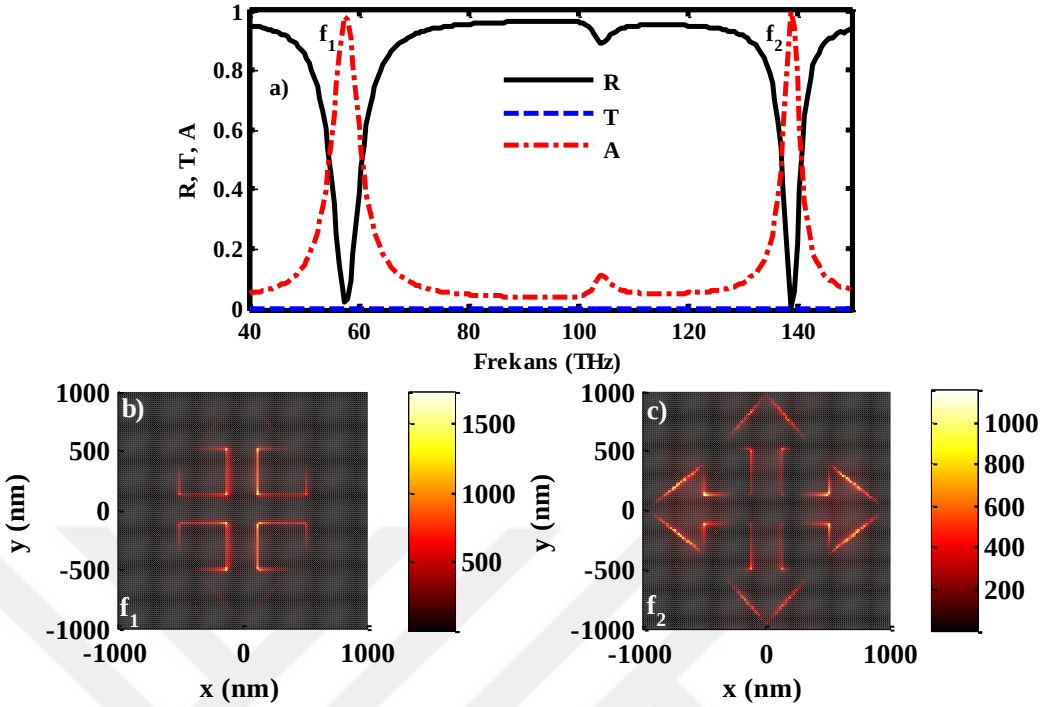
Şekil 3.44. Dört başlı ok şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları.

MS nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı Şekil 3.45 (a)'da verilmiştir. Şekil 3.45 (a)'da görüldüğü gibi MS dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 56 THz) absorbans % 99.5, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 141.5 THz) absorbans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.34.a). Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda f_1 ve f_2 rezonans frekanslarında elde edilen elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.45 (b) ve 3.45 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının yapıdaki açıklıkların keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre birinci rezonans frekansında 2000 kattan, ikinci rezonans frekansında ise 1200 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.45. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

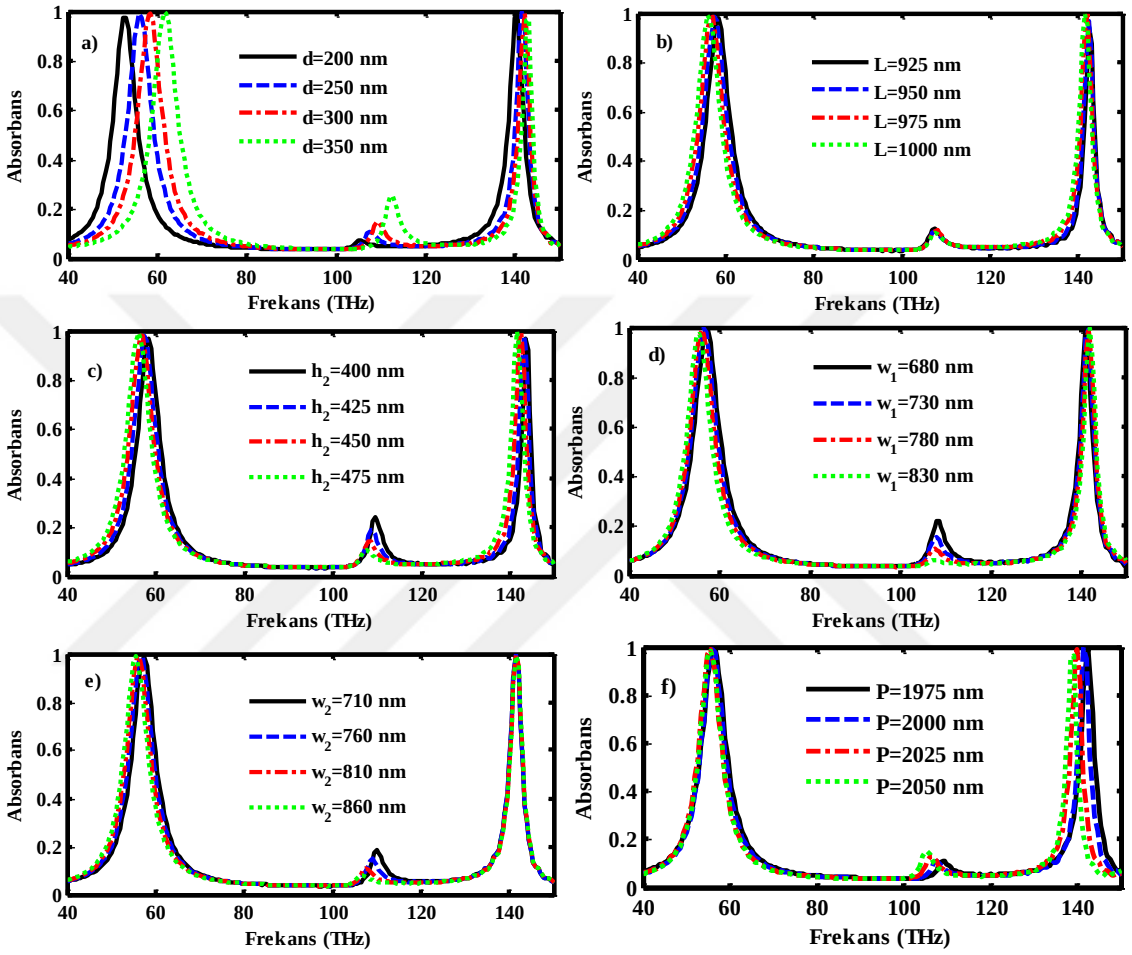
Nanoaçıklık tabanlı dört başlı ok şeklindeki plazmonik mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.46 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 57.5 THz) absorbans % 98.2, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 139 THz) absorbans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir. Birinci rezonansta absorbans değeri MgF_2 kullanılan yapıdan biraz daha düşük oranda gerçekleşmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.46 (b) ve 3.46 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımları gönderilen ışığa göre birinci rezonans noktasında 1500 kattan, ikinci rezonans noktasında ise 1000 kattan fazla değerde olmaktadır. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve üçgen nanoaçıklıkların keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 3.46. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Şekil 3.47 farklı d, L, h_2, w_1, w_2 ve P parametre değerleri için spektral değişimleri göstermektedir (L = 1000 nm, d = 250 nm, h_1 = 475 nm, w_1 = 780 nm, h_2 = 475 nm, w_2 = 810 nm, P = 2000 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_s = 130 nm). Diğer parametreler sabit kalmak koşulu ile, d (dikdörtgen nanoaçıklıkların eni) artığında tüm rezonans frekansları sağa kaymakta yani artmaktadır (Şekil 3.47 (a)). Şekil 3.47 (b)'de L (dikdörtgen nanoaçıklıkların boyu) değişimi için absorbans spektrası verilmiştir, dikdörtgen nanoaçıklıkların uzunluğu arttığında yapının tüm rezonans frekansları azalmaktadır. h_2 (alt ve üst üçgen nanoaçıklıkların yüksekliği) artırıldığında, iki rezonans frekansıda sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.47 (c)). w_1 (sağ ve sol üçgen nanoaçıklıkların taban genişliği) arttığında, birinci rezonans frekansı hafifçe azalmakta ikinci rezonans frekansı ise hafifçe artmaktadır (Şekil 3.47 (d)) ancak w_2 (alt ve üst üçgen nanoaçıklıkların taban genişliği) arttığında sadece ilk rezonans frekansı hafifçe sola kaymakta azalmaktadır (Şekil 3.47 (e)). Absorbans spektrasının periyoda (P) bağımlılığı Şekil 3.47 (f)'de görülmektedir, periyot değişiminden ikinci rezonans frekansı etkilenmekte ve periyot artırıldığında ikinci rezonans noktası sola kaymaktadır.

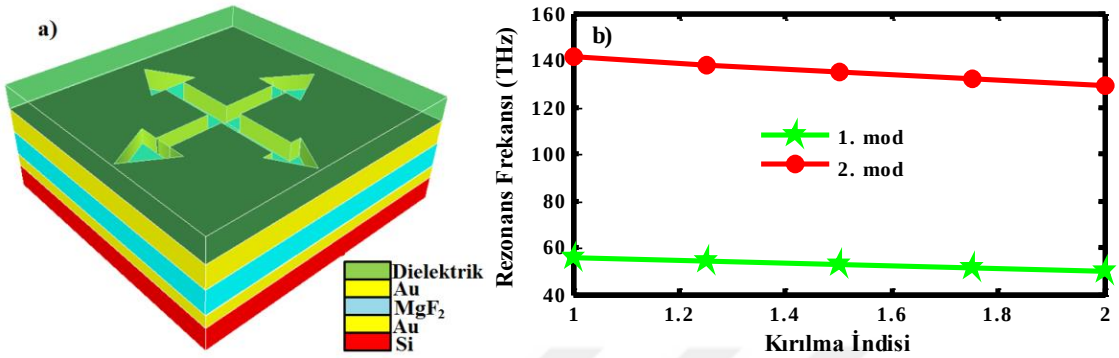
Mükemmel soğurucu dizisinin optik özellikleri yapının geometrik parametrelerine bağımlıdır (Şekil 3.47). Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları yapının geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.47. Önerilen MS dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) d değişimi (b) L değişimi (c) h_2 değişimi (d) w_1 değişimi (e) w_2 değişimi (f) P değişimi.

Sunulan dört başlı ok şeklindeki çift bant rezonansa sahip MS dizisinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini analiz etmek için, Şekil 3.48 (a)'da görüldüğü gibi MS nanoanten yapısının üzeri 100 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanmıştır (L = 1000 nm, d = 250 nm, h_1 = 475 nm, w_1 = 780 nm, h_2 = 475 nm, w_2 = 810 nm, P = 2000 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_s = 130 nm). MS dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas

olduğu ve farklı kırılma indislerine göre yapıya ait iki rezonans frekansının da lineer olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.48 (b)).



Şekil 3.48. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış MS dizisinin birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.

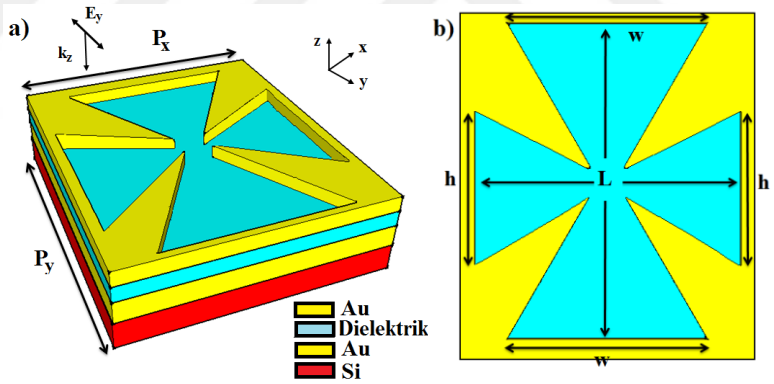
Sonuç olarak bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek dört başlı ok şeklinde yeni bir metal-dielektrik-metal kompoziti nano-açıklık tabanlı MS dizisi sunulmuştur. MS dizilerinin rezonans cevabının geometrik parametrelere bağımlılığı ve kırılma indisine hassasiyeti FDTD yöntemi ile incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. Çift-bant rezonans cevabı, ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ve kırılma indisi hassasiyeti ile sunulan MS dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

3.2.9. T#9

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek demir haç şeklinde nanoaçıklık tabanlı yeni bir mükemmel soğurucu dizisi sunulmuştur. Rezonans davranışlarının fiziksel temelini anlamak için ve nanoyapının alan dağılımlarını belirlemek için rezonans frekanslarında yakın alan dağılımları elde edilmiştir.

Şekil 3.49 (a)'da görülen demir haç şeklindeki açıklık nanoanten yapısında taban malzemesi olarak 300 nm kalınlığında silikon (Si) kullanılmıştır. Taban malzemesinin

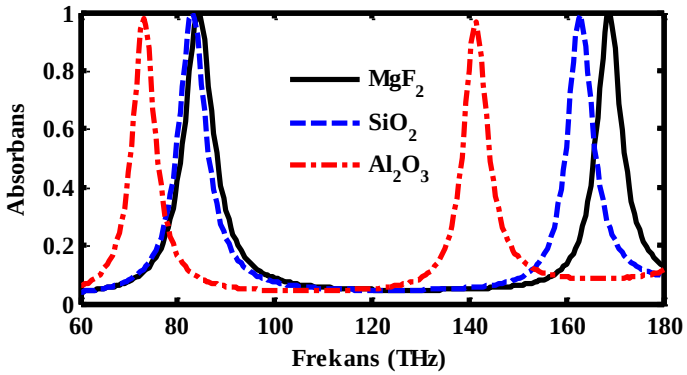
üzeri 200 nm altın (Au) film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_s = 150 nm kalınlığında dielektrik bir ara katman yerleştirilmiştir. Taban malzemesi üzerine kaplanan altın katman gönderilen ışığın alt katmana geçmesini önleyerek üst bölgede hapsedilmesini sağlamaktadır. Açıklık tabanlı nanoanten yapısının son katmanı olarak t_{Au} = 50 nm kalınlığında altın kullanılmıştır. Sunulan mükemmel soğurucu dizisinin periyodu 1450 nm (P_x = P_y = 1450 nm) olarak belirlenmiştir. Altın katman içerisinde; yükseklikleri 1000 nm olan ve taban genişlikleri w = 1000 nm olan iki adet ikizkenar üçgen açıklık alt ve üst kollara yerleştirilmiştir. Yükseklikleri 1000 nm ve taban genişlikleri h = 700 nm olan iki adet ikizkenar üçgen açıklık ise sağ ve sol kollarda yer alacak şekilde yerleştirilerek yapı tasarlanmıştır (Şekil.3.49 (b)). Altın parçacık içerisinde oluşturulan açıklık nanoanten yapının toplam boyu L = 1300 nm olarak belirlenmiştir. MS dizisinin analizi gerçekleştirilirken y yönünde polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 3.49. MS dizisi birim hücresi. (a) Şematik görünümü (b) Üstten görünümü.

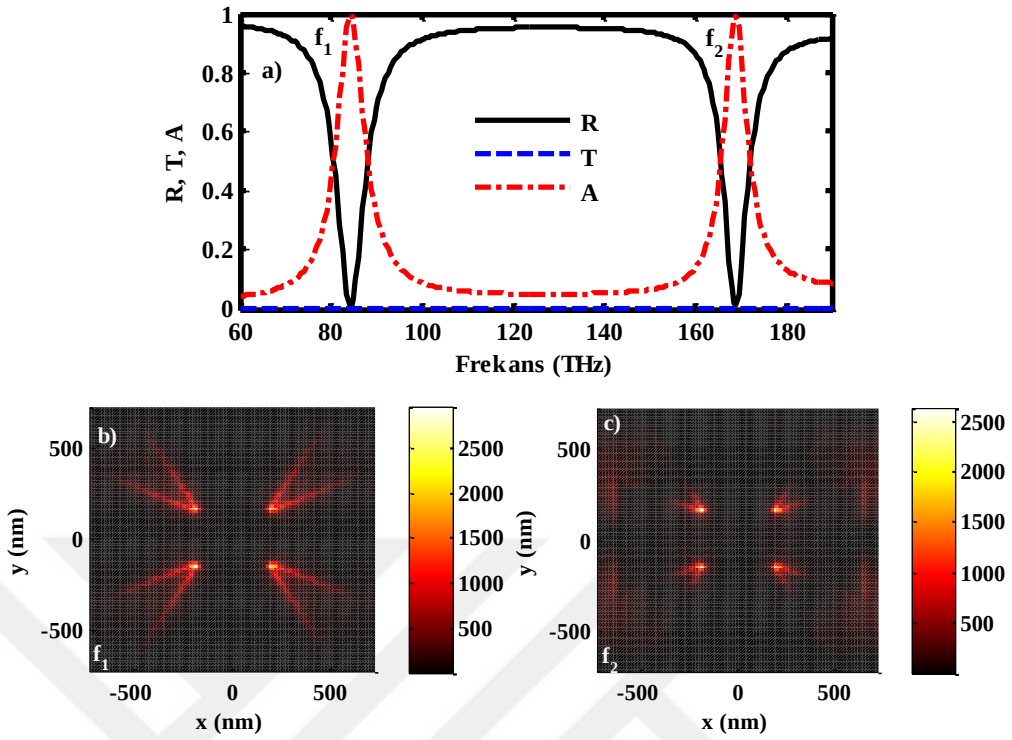
Demir haç şeklinde nano-açıklıklara dayalı mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik ara katmanlar (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) için frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı incelenmiştir. Şekil 3.50'de demir haç şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir. Kullanılan tüm dielektrik katman için de absorbans değeri bire yakın olmakta yani gönderilen elektromanyetik dalganın tamamı soğurulabilmektedir. Bu durum tasarlanan yapıda

birbirinden farklı rezonans frekanslarına sahip üç adet dielektrik ara katman kullanabilme avantajı sağlamıştır.



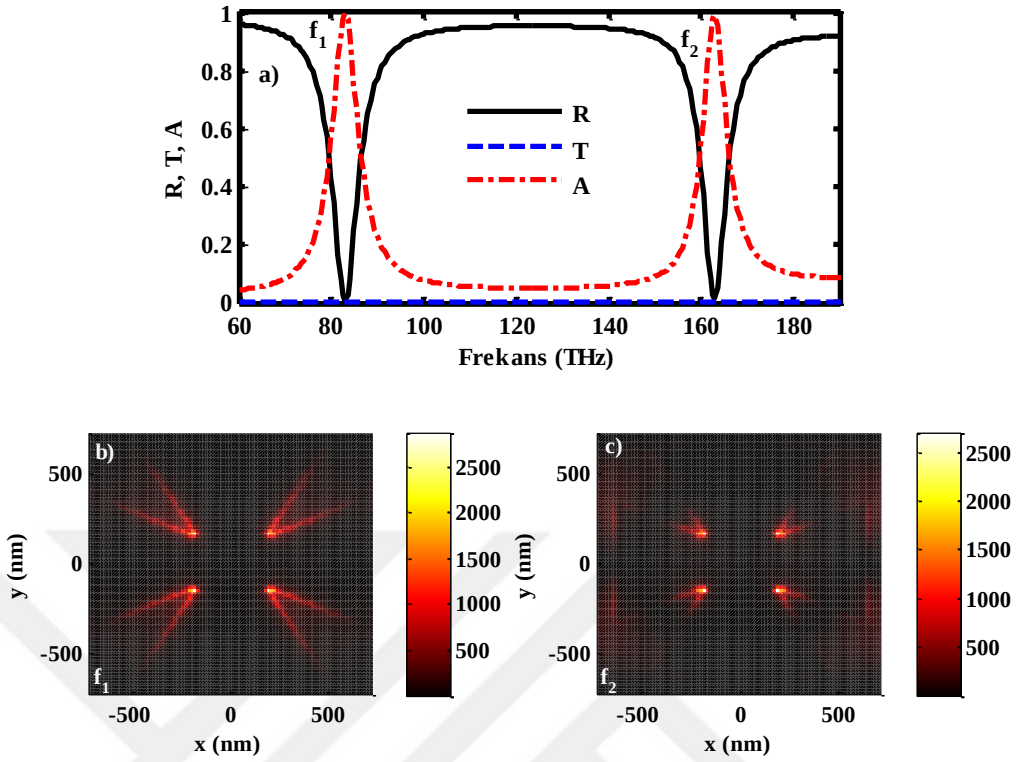
Şekil 3.50. Demir haç şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları.

Demir haç şeklindeki nanoaçıklık tabanlı plazmonik MS nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) spektrumu Şekil 3.51 (a)'da verilmiştir. Şekil 3.51 (a)'da görüldüğü gibi MS dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 84.5 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 169 THz) absorbans değeri % 99.6 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.51 (a)). Her İki rezonans frekansında elde edilen bire yakın soğurum oranı mükemmel soğurucular için hedeflenen temel parametrelerden birisidir. Bu yapılar için bir diğer temel unsurda yakın alan dağılımlarının yüksek olmasıdır. Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda f_1 ve f_2 rezonans frekanslarında elde edilen elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.51 (b) ve 3.51 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının yapıdaki açıklıkların keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre tüm rezonans frekanslarında 2500 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Geleneksel yapılarda 160 civarında olan bu değerin yüksek olması tasarlanan yapının bir sensör olarak kullanılması halinde etkinliğini ve hassasiyetini artıran bir unsur olarak dikkat çekmektedir. Yakın alan dağılımlarının yüksek olması spektroskopi ve SEIRA uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. Işık-madde etkileşiminin arttığı bu noktalarda daha hassas ve daha güçlü algılama yapılabilmektedir.



Şekil 3.51. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

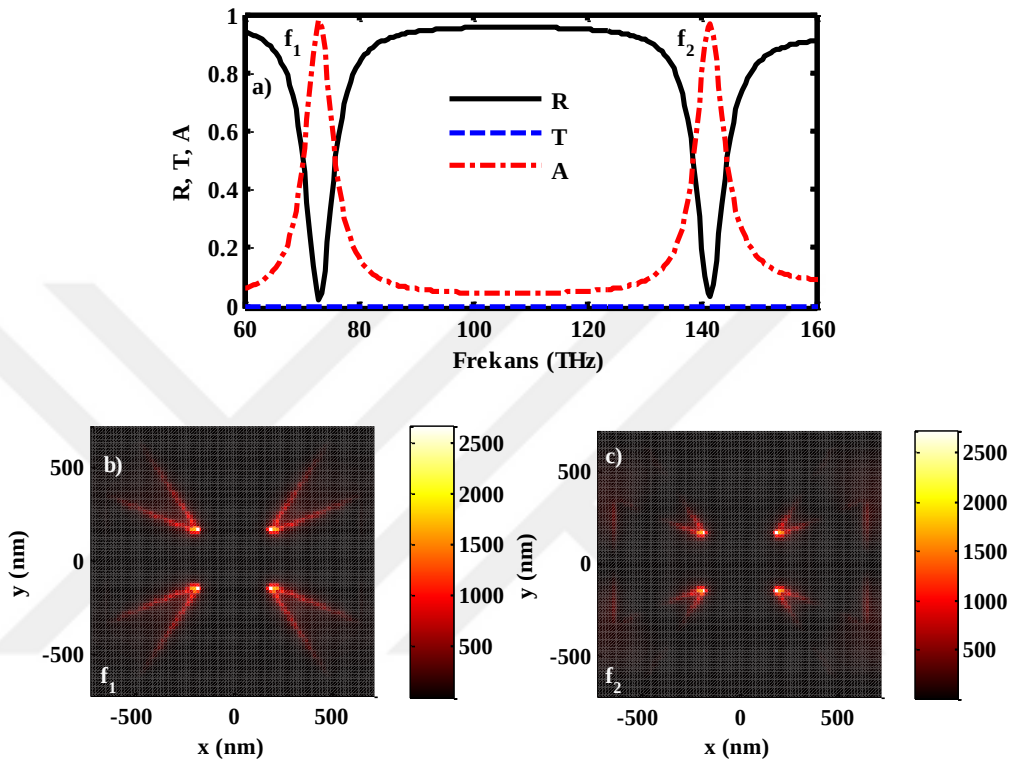
Önerilen demir haç şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.52 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 83 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 163 THz) absorbans değeri % 99.4 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.52 (b) ve 3.52 (c)'de verilmiştir. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve açıklıkların keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür. Elektrik alan dağılımlarının yapıdaki açıklıkların keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre tüm rezonans frekanslarında 2500 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması durumunda MgF_2 kullanılan yapıdan elde edilen sonuçlara yakın değerler ortaya çıkmıştır. Rezonans frekanslarında meydana gelen absorbans değerleri ve yakın alan dağılımları birbirine yakın oranlarda gerçekleşmiştir.



Şekil 3.52. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Nano-açıklık tabanlı demir haç şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 (n = 1.76) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.53 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 73 THz) absorbans % 98.1, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 141.5 THz) absorbans değeri % 97 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.53 (b) ve 3.53 (c)'de verilmiştir. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve açıklıkların keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür. Elektrik alan dağılımlarının yapıdaki açıklıkların keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre tüm rezonans frekanslarında 2500 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 tercih edilmesi durumunda daha önce incelenen MgF_2 ve SiO_2'ye nazaran absorbans değerlerinde bir miktar azalmalar meydana gelmiştir. Ancak rezonans noktalarında oluşan yakın alan dağılımlarının çok fazla

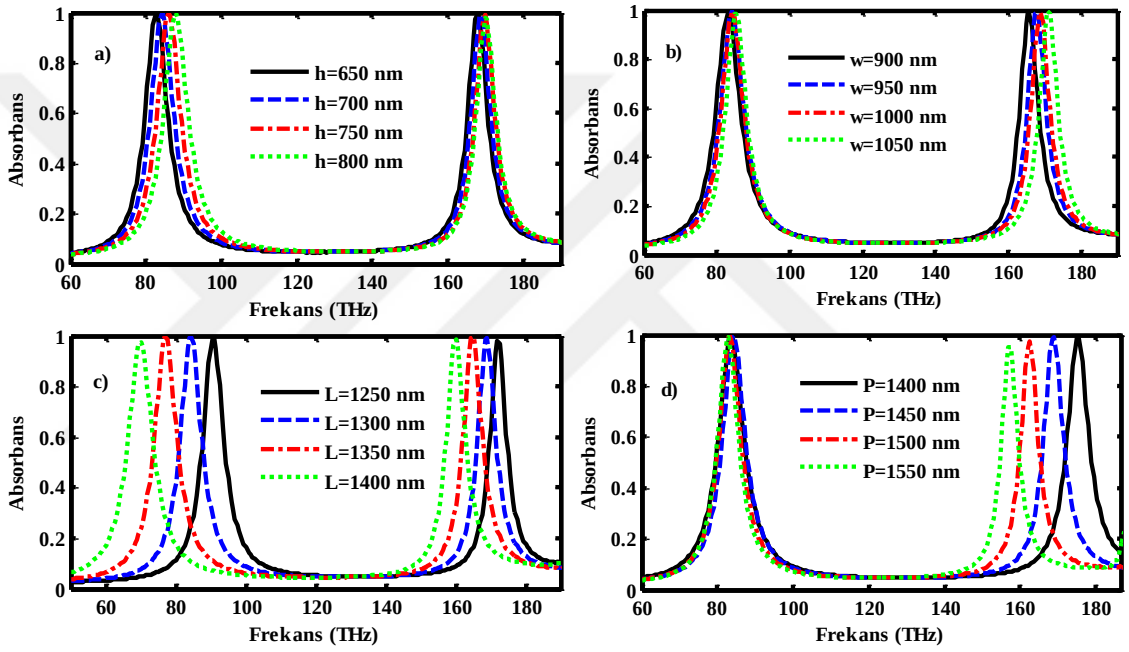
etkilenmediği ve birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durum tasarlanan MS dizisinde farklı rezonans frekanslarına sahip üç farklı dielektrik kullanabilme avantajı olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.53. (a) Al_2O_3 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Şekil 3.54 farklı h, w, L ve P parametre değerleri için spektral değişimleri göstermektedir(L = 1300 nm, h = 700 nm, w = 1000 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_s = 150 nm). h (sol ve sağ kollarda bulunan üçgen açıklıkların taban genişliği) artığında birinci rezonans frekansı sağa kaymakta yani artmaktadır (Şekil 3.54 (a)). Şekil 3.54 (b)'de w (alt ve üst kollarda bulunan üçgen açıklıkların taban genişliği) değişimi için absorbans spektrası verilmiştir, alt ve üst kollarda bulunan üçgen açıklıkların taban genişliği arttığında yapının tüm rezonans frekansları artmaktadır. Bu artış birinci rezonans frekansında hafifçe gerçekleşirken ikinci rezonans frekansında belirgin bir şekilde olmaktadır. L (demir haç şeklindeki açıklığın eni ve boyu) artırıldığında, tüm rezonans frekansları sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.54 (c)). Absorbans

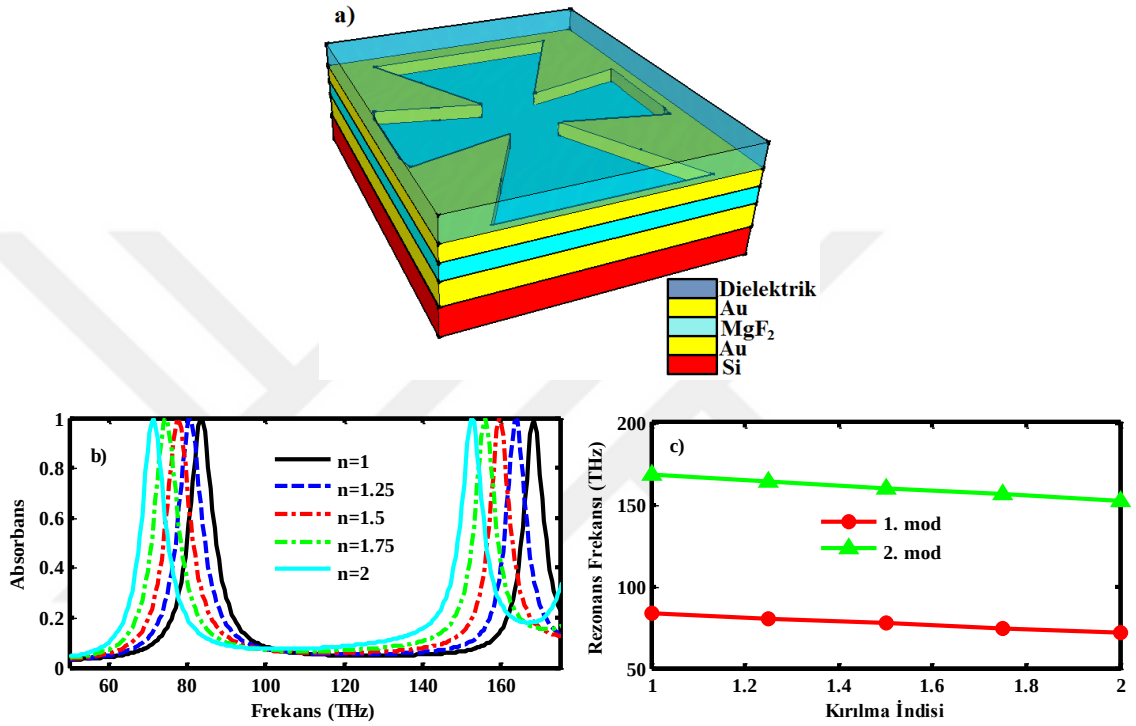
spektrasının periyoda (P) bağımlılığı Şekil 3.54 (d)'de görülmektedir, periyot değişiminden ikinci rezonans frekansı etkilenmekte ve periyot artırıldığında ikinci rezonans noktası sola kaymaktadır. Mükemmel soğurucu dizisinin optik özellikleri yapının geometrik parametrelerine bağımlıdır (Şekil 3.54). Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları yapının geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Bu durum tasarlanan yapının algılanmak istenilen analitin rezonans frekansına göre ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.54. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi (b) w değişimi (c) L değişimi (d) P değişimi.

Sunulan demir haç şeklindeki çift bant rezonansa sahip MS dizisinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini analiz etmek için, Şekil 3.55 (a)'da görüldüğü gibi MS nanoanten yapısının üzeri 100 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanmıştır (L = 1300 nm, h = 700 nm, w = 1000 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_s = 150 nm). MS dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve farklı kırılma indislerine göre yapıya ait iki rezonans frekansında da yüksek absorbans değerini koruyarak kırılma indisi arttıkça rezonans frekanslarının sola doğru kaydığı görülmüştür (Şekil 3.55 (b)).

Yapıya ait rezonans frekanslarının 1. mod ve 2. modda lineer olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.55 (c)). Kırılma indisi hassasiyeti önerilen yapının biyo-algılamada bir sensör olarak kullanılması durumunda önemli bir etken olmakta ve yapının algılama kapasitesi ve hassasiyetini ön plana çıkarmaktadır.



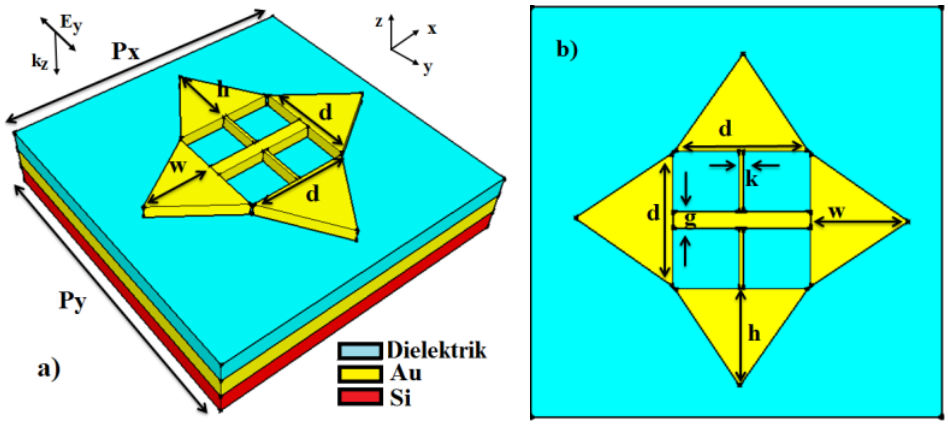
Şekil 3.55. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış MS dizisinin birim hücresi. (b) Yapının kırılma indisi değişimlerinde spektral cevabı. (c) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek demir haç şeklinde yeni bir metal-dielektrik-metal kompoziti nano-açıklık tabanlı MS dizisi sunulmuştur. MS dizilerinin rezonans cevabının geometrik parametrelere bağımlılığı ve kırılma indisine hassasiyeti incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. Çift-bant rezonans cevabı, ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ve kırılma indisi hassasiyeti ile sunulan MS dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

3.2.10. T#10

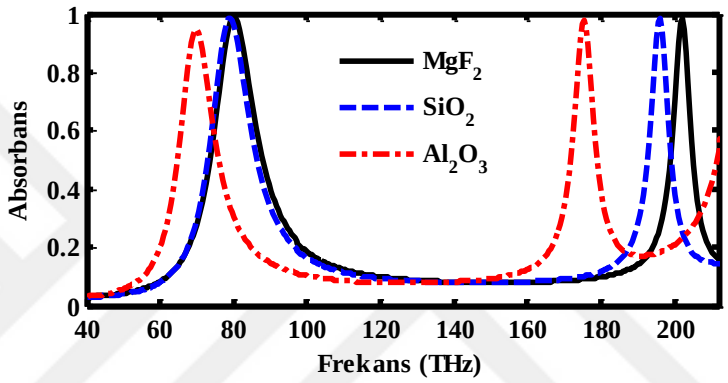
Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında ve spektroskopi uygulamalarında kullanılabilecek yıldız şeklinde altın nanoparçacık tabanlı yeni bir mükemmel soğurucu dizisi sunulmuştur. Yapının üç farklı dielektrik ara katman için spektral cevapları analiz edilmiştir. Rezonans davranışlarının fiziksel temelini anlamak için ve nanoyapının alan dağılımlarını belirlemek için rezonans frekanslarında yakın alan dağılımları elde edilmiştir.

Şekil 3.56 (a)'da görülen yıldız şeklindeki nanoanten yapısında taban malzemesi olarak 300 nm kalınlığında silikon kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 200 nm altın film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_s = 100 nm kalınlığında dielektrik bir ara katman yerleştirilmiştir. Nanoanten yapının son katmanı olarak t_{Au} = 50 nm kalınlığında altın kullanılmıştır. Sunulan MS dizisinin periyodu 1250 nm (P_x = P_y = 1250 nm) olarak belirlenmiştir. Yapının birim hücresi oluşturulurken, yükseklikleri h = 375 nm olan iki adet ikizkenar üçgen altın nanoparçacık alt ve üst kollara, yükseklikleri w = 350 nm olan iki adet ikizkenar üçgen altın nanoparçacık ise sağ ve sol kollara yerleştirilmiştir. Bu dört üçgen parçacığın taban genişlikleri d = 400 nm'dir. Birim hücrenin ortasında asimetrik olarak yer alan iki adet dikdörtgen altın nanoparçacıktan yatay parçacığın eni g = 90 nm, dikey olan parçacığın eni ise k = 10 nm'dir (Şekil 3.56 (b)). MS dizisinin analizi gerçekleştirilirken y yönünde polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır.



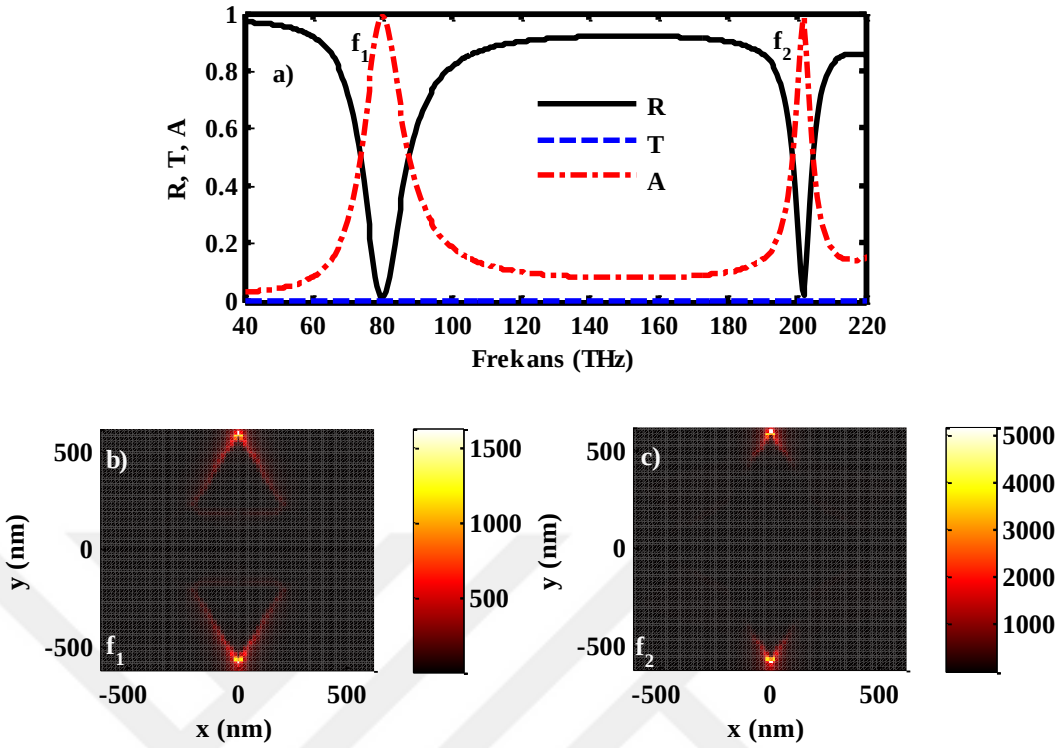
Şekil 3.56. MS dizisi birim hücresi. (a) Şematik görünümü. (b) Üstten görünümü.

Yıldız şeklinde nanoparçacıklara dayalı mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik ara katmanlar (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) için frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı incelenmiştir. Şekil 3.57'de yıldız şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir. Kullanılan üç dielektrik katman için de absorbans değeri bire yakın olmakta yani %100'e yakın bir soğurum elde edilebilmektedir.



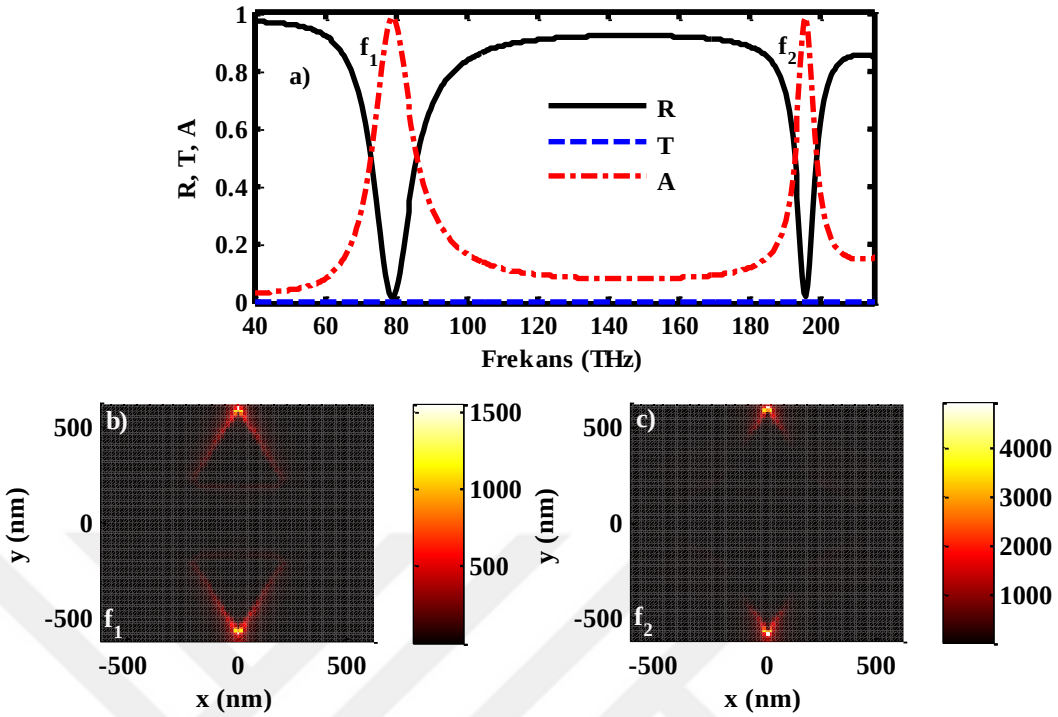
Şekil 3.57. Yıldız şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları.

MS nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı Şekil 3.58 (a)'da verilmiştir. Şekil 3.64 (a)'da görüldüğü gibi MS dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 80 THz) absorbans % 99.8, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 202 THz) absorbans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.64 (a)). Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda f_1 ve f_2 rezonans frekanslarında elde edilen elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.58 (b) ve 3.58 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının yapıdaki üçgenlerin keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre birinci rezonans frekansında 1500 kattan, ikinci rezonans frekansında ise 5000 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Özellikle ikinci rezonans noktasında elde edilen yüksek değer SEIRA uygulamaları için büyük önem taşımaktadır.



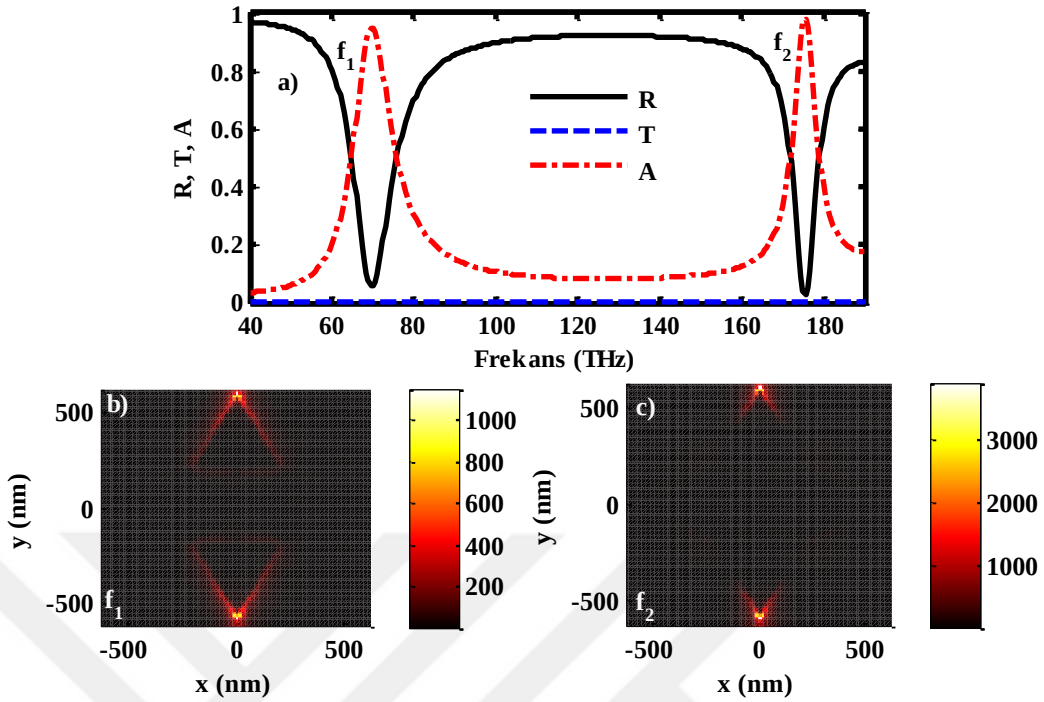
Şekil 3.58. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Yıldız şeklindeki altın nanoparçacık tabanlı mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.59 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 79 THz) absorbans % 99.8, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 196 THz) absorbans değeri % 99.9 olarak gerçekleşmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.59 (b) ve 3.59 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının yapıdaki üçgenlerin keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre birinci rezonans frekansında 1500 kattan, ikinci rezonans frekansında ise 4000 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde küçük değişimler olmasına rağmen yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve alt ve üst kollarda yer alan üçgen parçacıkların keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür.



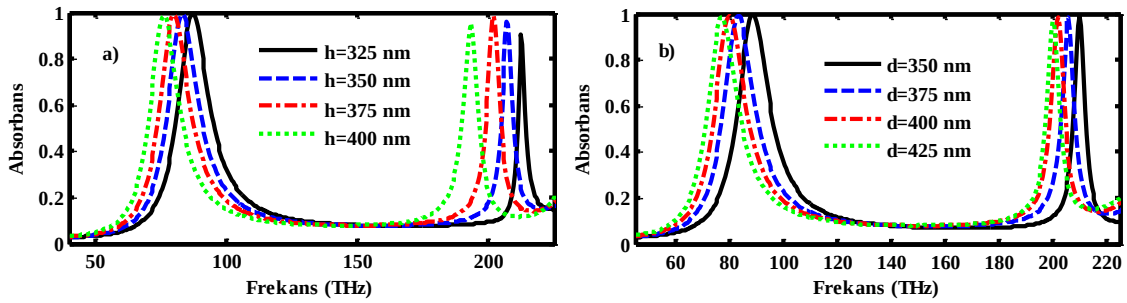
Şekil 3.59. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Yıldız şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 (n = 1.76) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.60 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 69.5 THz) absorbans % 98.1, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 175.5 THz) absorbans değeri % 99.1 olarak elde edilmiştir. Rezonans frekanslarında gerçekleşen absorbans değerleri MgF_2 ve SiO_2 kullanımında elde edilen değerlerden biraz daha düşük miktarlarda gerçekleşmiştir. Dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.60 (b) ve 3.60 (c)'de verilmiştir. Birinci rezonans noktasında yakın alan dağılımları gönderilen ışıktan 1000 kat, ikinci rezonans noktasında ise 3000 kattan yüksek olmaktadır. Dielektrik ara katman olarak 100 nm kalınlığında Al_2O_3 kullanıldığında da MS dizisinin yüksek absorbans hassasiyetini koruduğu ve yüksek elektrik alan dağılımlarına sahip olduğu görülmüştür. Önerilen MS dizisinde dielektrik katman olarak Al_2O_3'de farklı bir seçenek olarak kullanılabilecektir.



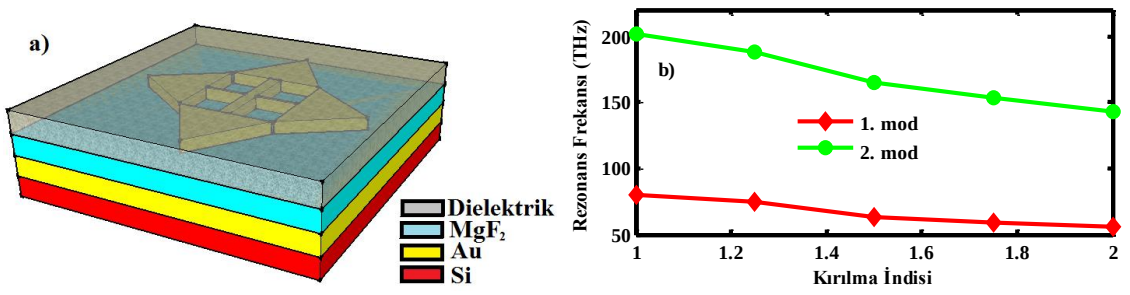
Şekil 3.60. (a) Al_2O_3 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Şekil 3.61 tasarlanan MS dizisinin farklı h ve d parametre değerleri için spektral değişimleri göstermektedir (h = 375 nm, w = 350 nm, d = 400 nm, g = 90 nm, k = 10 nm, P = 1250 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 100 nm). Diğer parametreler sabit kalmak koşulu ile, h (alt ve üst üçgen nanoparçacıkların yüksekliği) artığında tüm rezonans frekansları belirgin bir şekilde sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.61 (a)). Şekil 3.61 (b)'de d (üçgen nanoparçacıkların taban genişlikleri) değişimi için absorbans spektrası verilmiştir, d artırıldığında yapının tüm rezonans frekansları azalmaktadır. Mükemmel soğurucu dizisinin optik özellikleri yapının geometrik parametrelerine bağımlıdır. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları yapının geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Bu özellik yapıya farklı rezonans frekanslarında tasarlanabilme imkanı vermektedir. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin biyo-algılamada kullanılması durumunda altın üçgen nanoparçacıkların yüksekliği ve taban genişlikleri grafiklerde belirtilen değerlerde değiştirilerek ihtiyaç duyulan frekans değerlerinde farklı sensör yapıları tasarlama olanağı ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.61. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi, (b) d değişimi.

Sunulan yıldız şeklindeki altın nanoparçacık tabanlı çift bant rezonansa sahip MS dizisinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini analiz etmek ve bir sensör olarak kullanılabilme potansiyelini değerlendirmek için, Şekil 3.62 (a)'da görüldüğü gibi MS nanoanten yapısının üzeri 100 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanmıştır (h = 375 nm, w = 350 nm, d = 400 nm, g = 90 nm, k = 10 nm, P = 1250 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 100 nm). MS dizisinin kırılma indisi değişimine karşı hassas olduğu ve farklı kırılma indislerine göre yapıya ait iki rezonans frekansının da lineer olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.62 (b)).



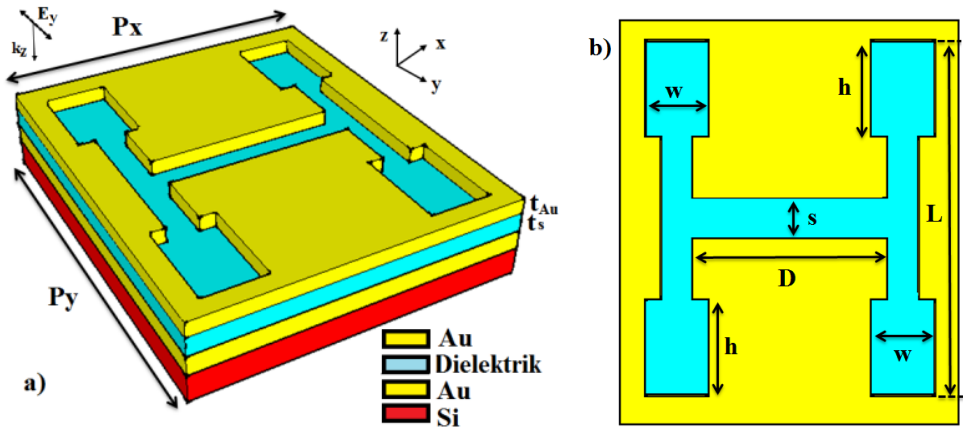
Şekil 3.62. (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış MS dizisinin birim hücresi. (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi.

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek yıldız şeklinde yeni bir metal-dielektrik-metal kompoziti nano-parçacık tabanlı MS dizisi sunulmuştur. MS dizilerinin rezonans cevabının geometrik parametrelere bağımlılığı ve kırılma indisine hassasiyeti incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. Çift-bant rezonans cevabı, ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ve kırılma indisi hassasiyeti ile sunulan MS dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

3.2.11. T#11

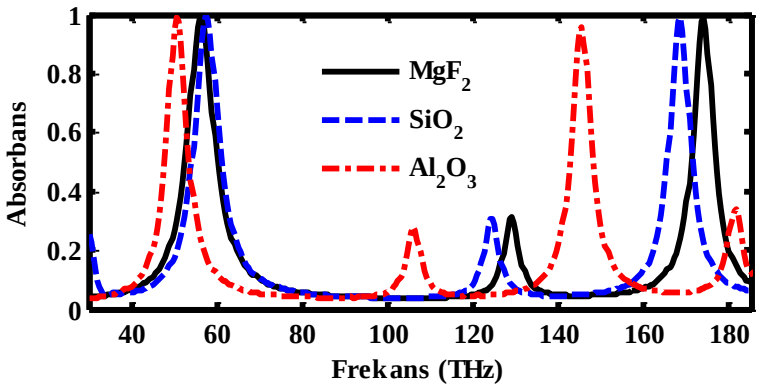
Bu çalışmada, kızılötesi bölgede spektroskopi ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek Köşeli H şeklinde nanoaçıklık tabanlı yeni bir mükemmel soğurucu dizisi sunulmuştur. Yapının üç farklı dielektrik ara katman (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) için spektral cevabı analiz edilmiştir. Rezonans frekanslarında elde edilen reflektans (R) ve transmitans (T) değerleri kullanılarak absorbans (A) değerleri hesaplanmıştır. Rezonans davranışlarının fiziksel temelini anlamak için ve nanoyapının alan dağılımlarını belirlemek için rezonans frekanslarında yakın alan dağılımları elde edilmiştir. Nanoaçıklık tabanlı yapının geometrik parametreleri ve katman kalınlıkları değiştirilerek optik spektrumunda meydana gelen değişimler analiz edilmiştir.

Şekil 3.63 (a)'da görülen köşeli H şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten yapısında taban malzemesi olarak 300 nm kalınlığında silikon (Si) kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 200 nm altın (Au) film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_s = 100 nm kalınlığında dielektrik bir ara katman yerleştirilmiştir. Nanoanten yapının son katmanı olarak t_{Au} = 50 nm kalınlığında altın (Au) kullanılmıştır. Sunulan MS dizisinin periyodu 1450 nm (P_x = P_y = 1450 nm) olarak belirlenmiştir. Yapının köşelerinde yükseklikleri h = 350 nm ve enleri w = 300 nm olan 4 adet eş dikdörtgen açıklık yer almaktadır. Yapının ortasında yer alan yatay dikdörtgen açıklığın boyu D = 750 nm ve açıklığın eni s = 150 nm olarak belirlenmiştir. Dikey dikdörtgen açıklıkların enleri de 150 nm olarak alınmıştır. Yapının toplam yüksekliği L = 1350 nm'dir. (Şekil 3.63 (b)). MS dizisinin analizi gerçekleştirilirken y yönünde polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 3.63. MS dizisi birim hücresi. (a) Şematik görünümü. (b) Üstten görünümü.

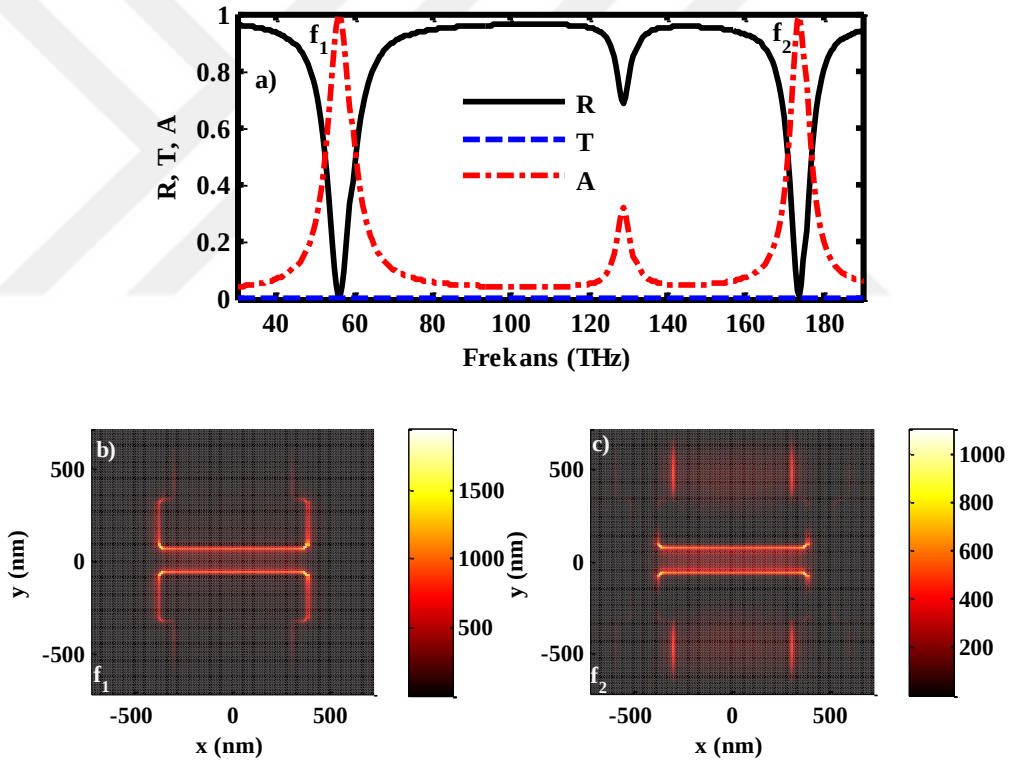
Köşeli H şeklinde nanoaçıklık tabanlı mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik ara katmanlar (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) için frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı incelenmiştir. Şekil 3.64'de tasarlanan mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir. Kullanılan üç dielektrik katman için de absorbans değeri bire yakın olmakta yani %100'e yakın bir soğurum oranı elde edilmektedir.



Şekil 3.64. Köşeli H şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları.

MS nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı Şekil

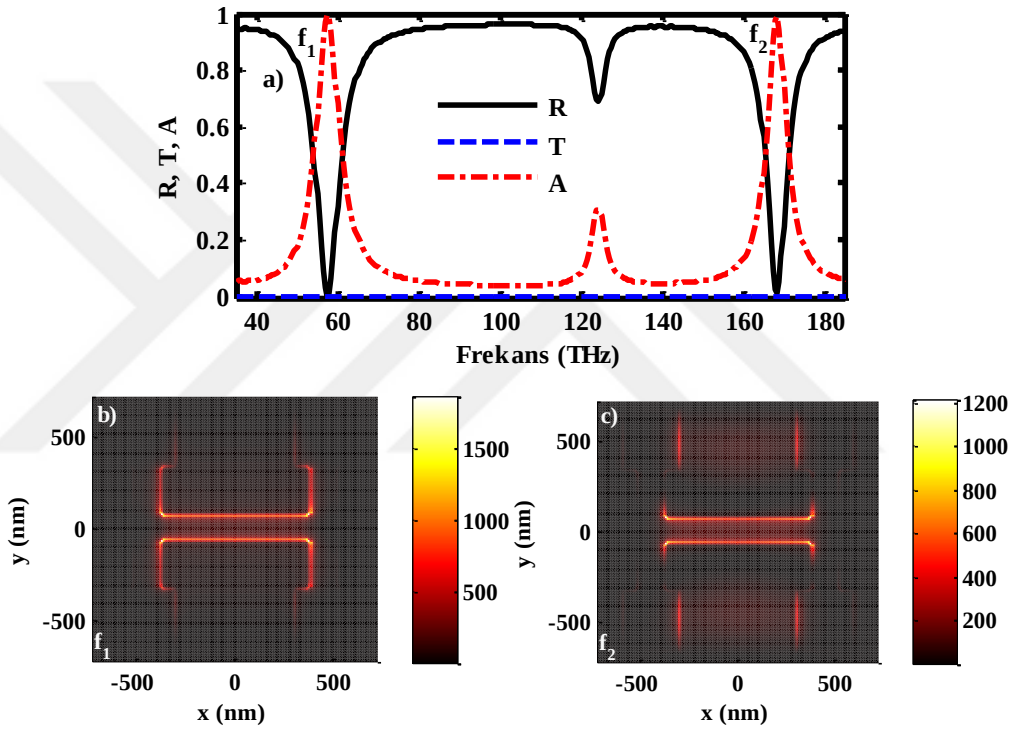
3.65 (a)'da verilmiştir. Şekil 3.65 (a)'da görüldüğü gibi MS dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 56.5 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 174 THz) absorbans değeri % 99.7 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.65 (a)). Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda f_1 ve f_2 rezonans frekanslarında elde edilen elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.65 (b) ve 3.65 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının yapının keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre birinci rezonans frekansında 1500 kattan, ikinci rezonans frekansında ise 1000 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.65. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Köşeli H şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.66 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 57.5 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 168.5 THz) absorbans değeri % 98.9

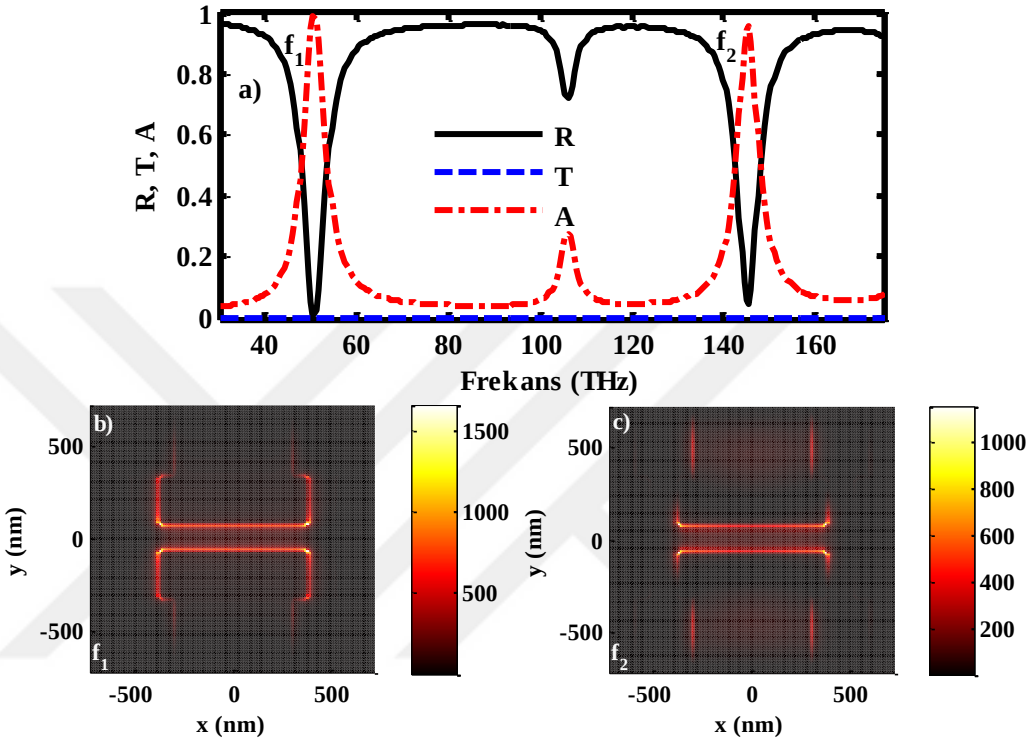
olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.66 (b) ve 3.66 (c)'de verilmiştir. Birinci rezonans noktasında yakın alan dağılımları gönderilen ışıktan 1500 kat, ikinci rezonansta ise 1200 kattan yüksek olmaktadır. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve yapının keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 3.66. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Köşeli H şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 (n = 1.76) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.67 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 50.5 THz) absorbans % 99.8, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 145.5 THz) absorbans değeri % 95.5 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.67 (b) ve 3.67 (c)'de verilmiştir. Dielektrik ara katman olarak 100 nm kalınlığında Al_2O_3

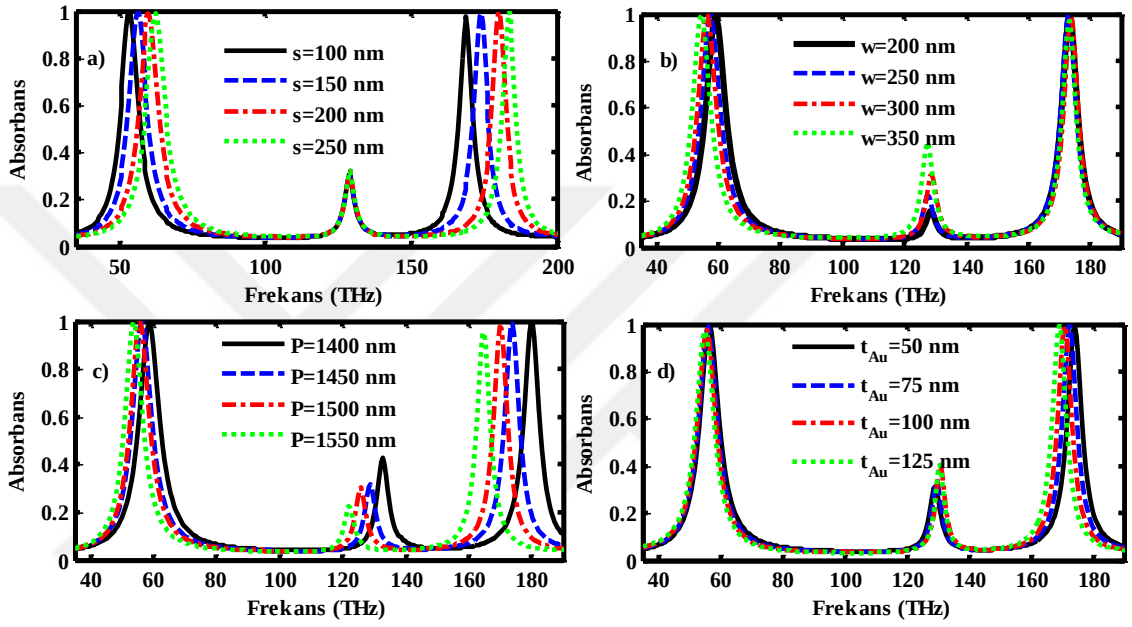
kullanıldığında da MS dizisinin yüksek absorbans hassasiyetini koruduğu ve yüksek elektrik alan dağılımlarına sahip olduğu görülmüştür. MS dizisinde Al_2O_3 tercih edilebilecek yeterlilikte bir dielektrik olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.67. (a) Al_2O_3 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Şekil 3.68 farklı s, w, P ve t_{Au} parametre değerleri için spektral değişimleri göstermektedir (D = 750 nm, h = 350 nm, w = 300 nm, s = 150 nm, L = 1350 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm, t_s = 100 nm). Diğer parametreler sabit kalmak koşulu ile, s (yatay dikdörtgen nanoaçıklığın eni) artığında tüm rezonans frekansları sağa kaymakta yani artmaktadır (Şekil 3.68 (a)). Şekil 3.68 (b)'de w (köşelerde yer alan dikdörtgen nanoaçıklıkların eni) değişimi için absorbans spektrası verilmiştir, w arttığında yapının birinci rezonans frekansı azalmaktadır. Yapının periyodu (P) artırıldığında optik özellikleri değişmekte ve rezonans frekansları azalmaktadır (Şekil 3.68 (c)). Yapının katman kalınlığı değişimi de rezonans frekanslarını etkilemektedir. En üst katmanda yer alan ve nanoaçıklık yapının içerisinde oyularak oluşturulduğu altın katmanı (t_{Au})

kalınlığı artırıldığında ikinci rezonans frekansı sola kaymakta yani azalmaktadır (3.68 (d)). Mükemmel soğurucu dizisinin optik özellikleri yapının geometrik parametrelerine ve katman kalınlıklarına bağımlıdır. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları yapının geometrik parametreleri ve katman kalınlıkları değiştirilerek ayarlanabilmektedir.

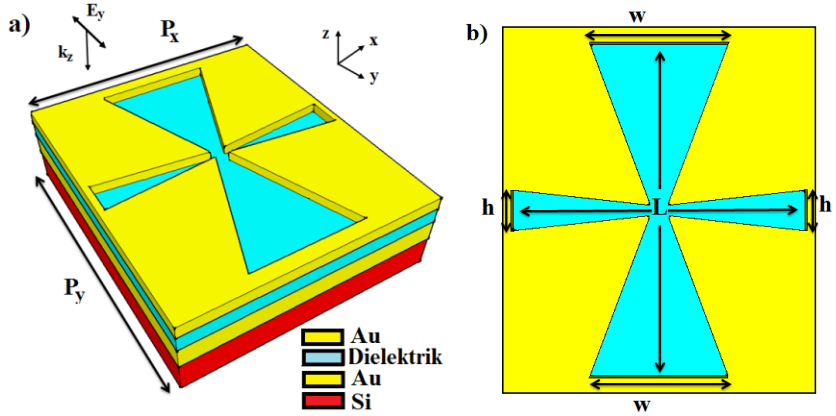


Şekil 3.68. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) s değişimi (b) w değişimi (c) P değişimi (d) t_{Au} değişimi.

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında ve spektroskopi uygulamalarında kullanılabilecek köşeli H şeklinde yeni bir metal-dielektrik-metal kompoziti nano-açıklık tabanlı MS dizisi sunulmuştur. Üç farklı dielektrik katman için yapının spektral cevapları ve absorbans değerleri incelenmiştir. MS dizilerinin rezonans cevabının geometrik parametrelere ve katman kalınlıklarına bağımlılığı incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. Çift-bant rezonans cevabı, ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ile sunulan MS dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında aynı anda iki farklı molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

3.2.12. T#12

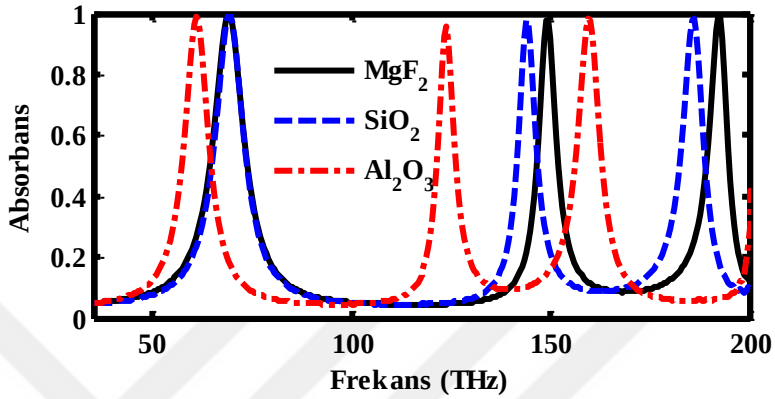
Bu çalışmada, kızılötesi bölgede spektroskopi ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek dört kollu açıklık şeklinde yeni bir mükemmel soğurucu nanoanten dizisi sunulmuştur. Şekil 3.69 (a)'da birim hücresi görülen nanoaçıklıklar ile oluşturulan yapıda taban malzemesi olarak 300 nm kalınlığında silikon kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 200 nm altın film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_S= 150 nm kalınlığında bir dielektrik ara katman yerleştirilmiştir. Nanoanten yapının son katmanı olarak t_{Au}= 50 nm kalınlığında altın kullanılarak içerisinde dört taraflı açıklıklar meydana getirilerek birim hücre elde edilmiştir. Sunulan mükemmel soğurucu dizisinin periyodu 1450 nm (P_x = P_y = 1450 nm) olarak belirlenmiştir. Şekil 3.69 (b)'de geometrik parametreleri verilen yapıda alt ve üst açıklıkların taban genişlikleri w ile sağ ve sol kollardaki açıklıkların taban genişlikleri h ile gösterilmiştir. Yükseklikleri 800 nm olan dört üçgen açıklık yapının merkezinde iç içe geçmekte ve oluşan açıklık şeklin eni ve boyu L ile gösterilmektedir. MS dizisinin birim hücresinde L = 1350 nm, w = 650 nm ve h = 250 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.69. MS dizisi birim hücresi. (a) Şematik görünümü. (b) Üstten görünümü.

Simülasyonlar boyunca y polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır. Dielektrik ara katmanın optik özelliklere etkisini görmek amacıyla dört kollu açıklık şeklindeki mükemmel soğurucu dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3 kullanılarak frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı incelenmiştir. Şekil 3.70'de tasarlanan mükemmel soğurucunun farklı dielektrik

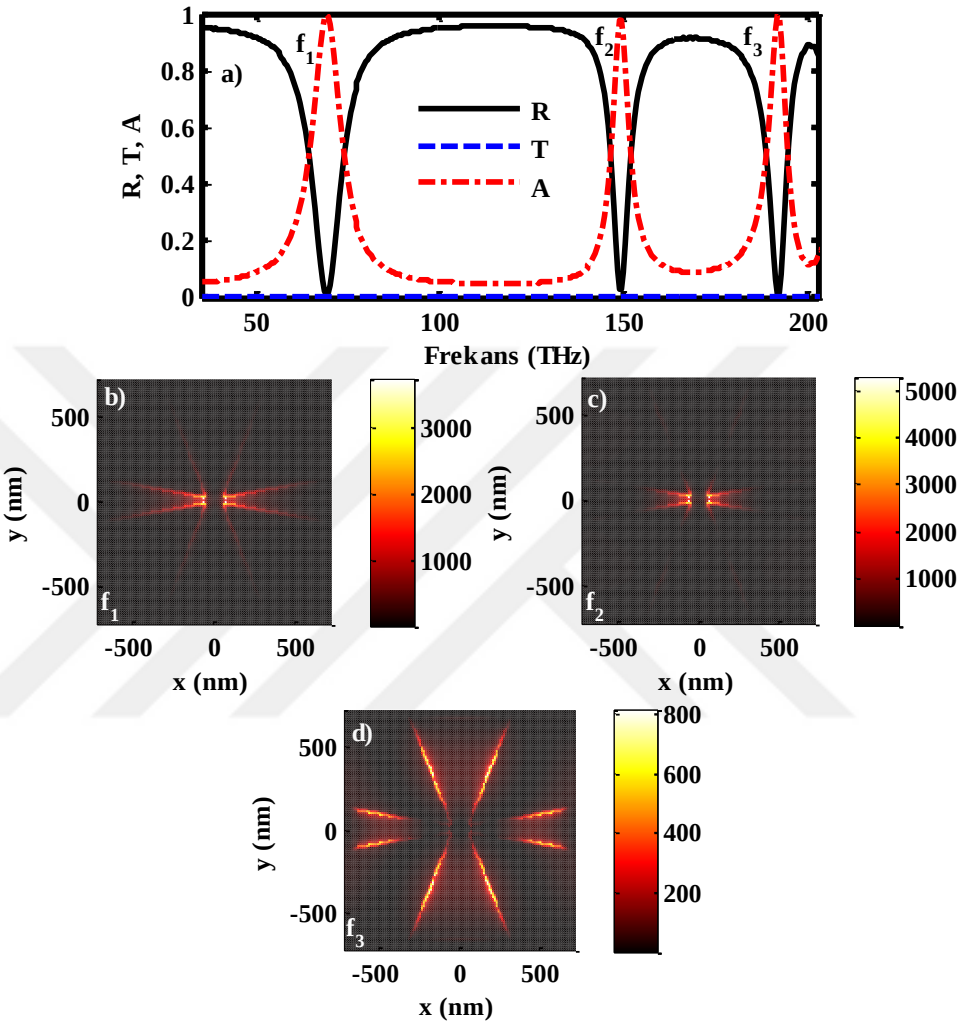
katmanlar için (MgF_2, SiO_2 ve Al_2O_3) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir Kullanılan üç dielektrik katman için de absorbans değeri bire yakın olmakta yani %100'e yakın bir soğurum oranı elde edilmektedir.



Şekil 3.70. Dört kollu açıklık şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları.

Nanoaçıklık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.71 (a)'da verilmiştir (L = 1350 nm, h = 250 nm, w = 650 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 150 nm). Şekil 3.71 (a)'da görüldüğü gibi mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çoklu-bant rezonans cevaba sahiptir. Elde edilen üç rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 69.5 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 149.5 THz) absorbans değeri % 97.7 ve üçüncü rezonans noktasında (f_3 = 128.5 THz) absorbans değeri %99.9 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.71 (a)). Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1, f_2 ve f_3) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.71 (b), 3.71 (c) ve 3.71 (d)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının nanoaçıklık üçgenlerin keskin köşelerinde dielektrik ara katman ile üst altın katmanın birleştiği noktalarda yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre birinci rezonans frekansında 3000 kattan, ikinci rezonans frekansında 5000 kattan ve üçüncü rezonans frekansında 800 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Elde edilen üç adet rezonans frekansında da soğurum değerleri %100'e yakın

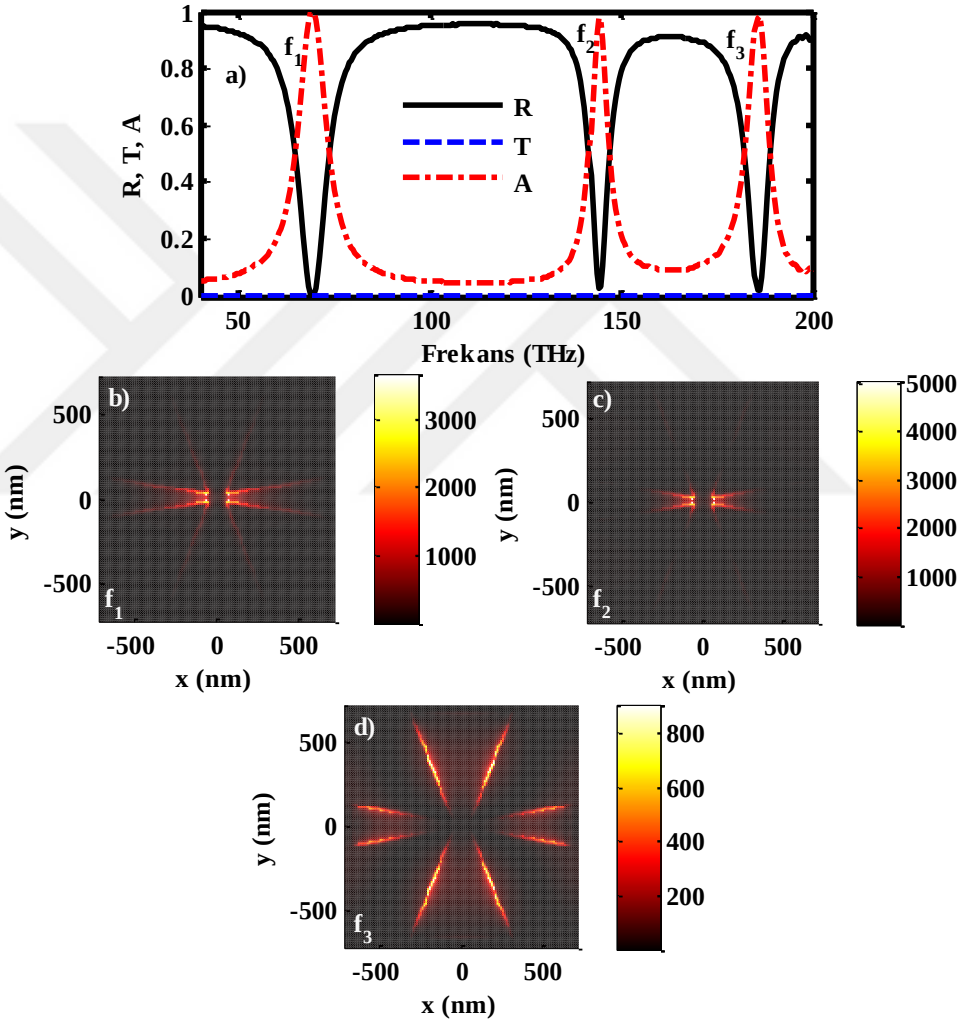
olmaktadır. Yüksek soğurum değerleri ve yüksek yakın alan dağılımları spektroskopi ve SEIRA uygulamaları için tercih edilen bir durumdur.



Şekil 3.71. (a) MgF_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2 ve (d) f_3 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Tasarlanan nanoaçıklık tabanlı mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.72 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen üç rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 69.5 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 144 THz) absorbans değeri % 98 ve üçüncü rezonans noktasında (f_3 = 186 THz) absorbans değeri % 99 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında

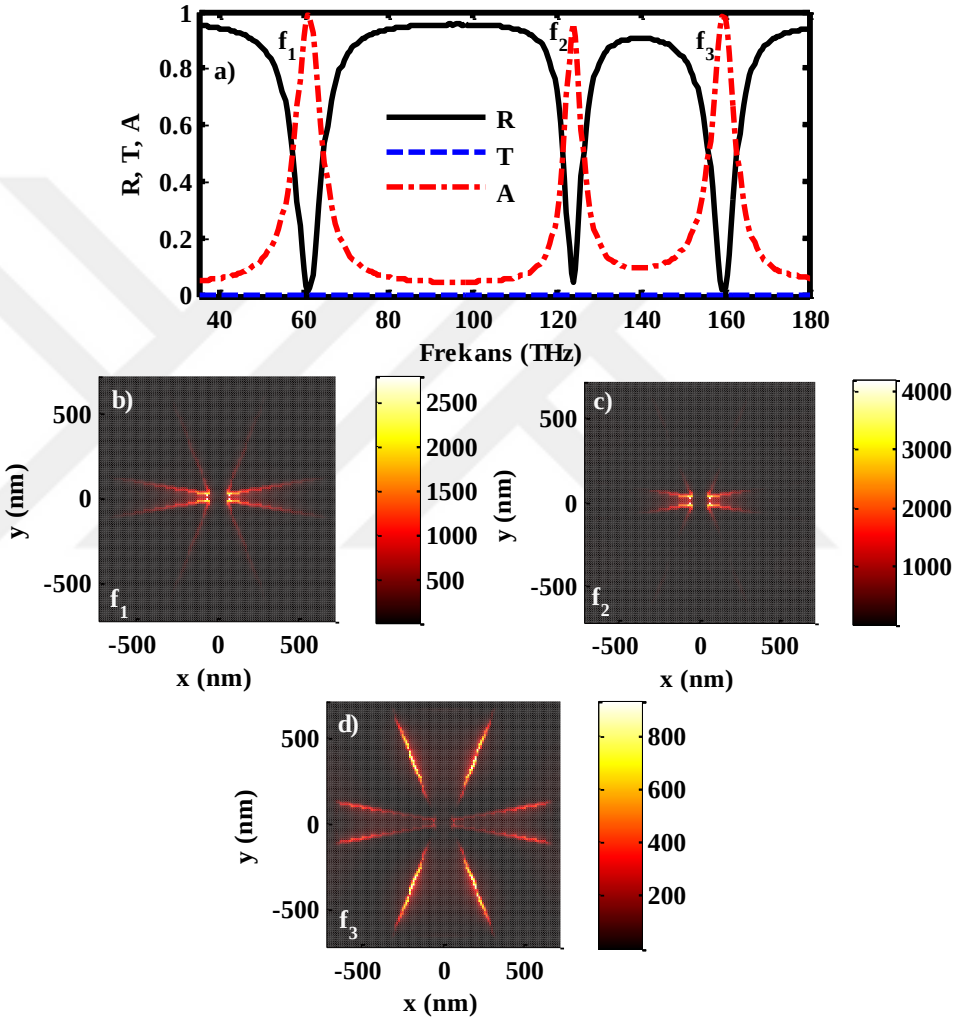
(f_1, f_2 ve f_3) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.72 (b), 3.72 (c) ve 3.72 (d)'de verilmiştir. Önerilen mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve üçgen açıklıkların keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür. Elde edilen üç rezonans noktasında da soğurum değeri bire yakın olmakta yani %100'e yakın bir soğurma meydana gelmektedir.



Şekil 3.72. (a) SiO_2 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2 ve (d) f_3 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Önerilen mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 (n = 1.76) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.73 (a)'da sunulmuştur. Elde

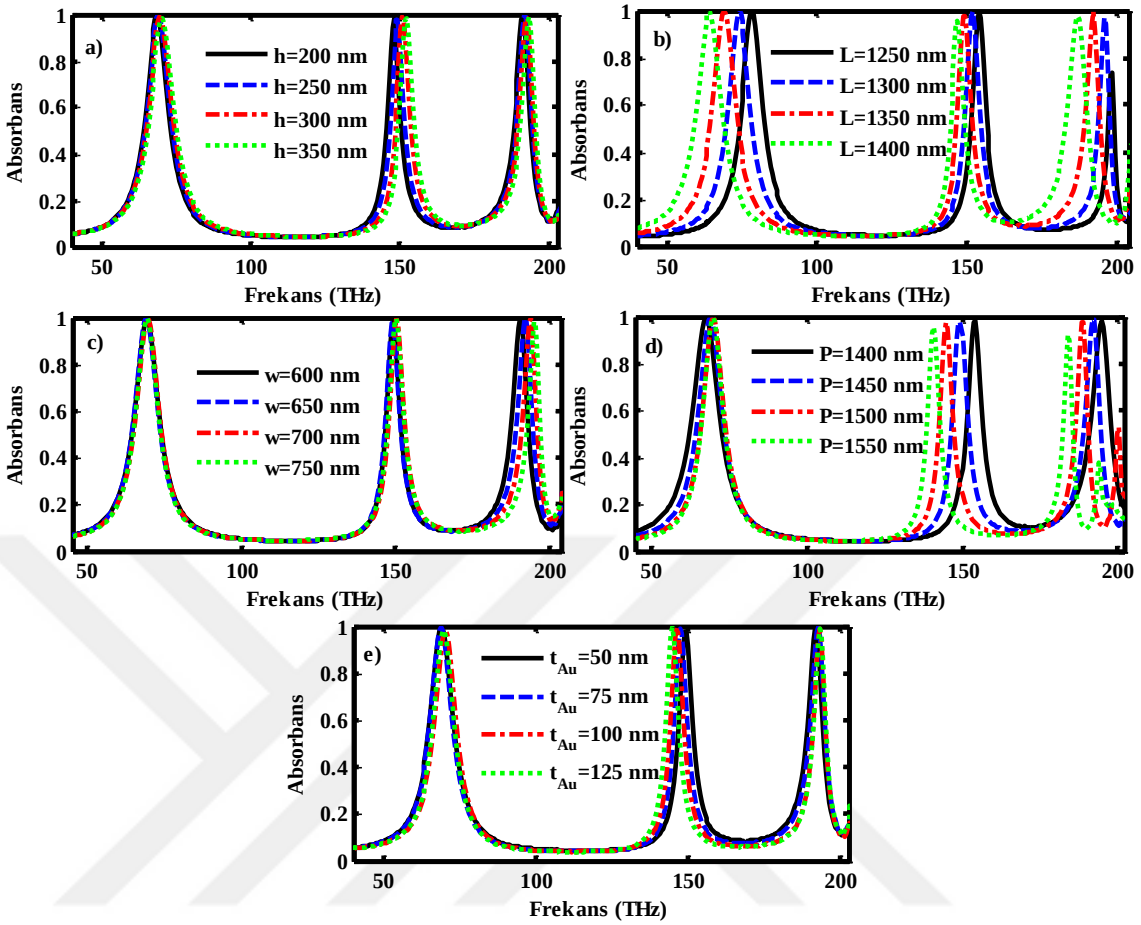
edilen üç rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 61.5 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 124.5 THz) absorbans değeri % 95.6 ve üçüncü rezonans noktasında (f_3 = 160 THz) absorbans değeri % 98.6 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak Al_2O_3 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1, f_2 ve f_3) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.73 (b), 3.73 (c) ve 3.73 (d)'de verilmiştir.



Şekil 3.73. (a) Al_2O_3 kullanılan mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı. Al_2O_3 dielektrik ara katman için (b) f_1, (c) f_2, ve (d) f_3 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Dielektrik ara katman olarak 150 nm kalınlığında Al_2O_3 kullanıldığında da mükemmel soğurucu dizisinin yüksek absorbans hassasiyetini koruduğu ve yüksek elektrik alan dağılımlarına sahip olduğu görülmüştür.

Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılan nanoaçıklık tabanlı plazmonik mükemmel soğurucu dizisinin geometrik parametrelerinde yapılan değişikliklere karşı absorbans spektrumundaki değişimler Şekil 3.74'de verilmiştir (L = 1350 nm, h = 250 nm, w = 650 nm, P = 1450 nm, t_{Au} = 50 nm ve t_S = 150 nm). Diğer parametreler sabit kalmak üzere yapının sağ ve sol kollarında bulunan ikizkenar üçgen açıklıkların taban genişlikleri (h) artırıldığında ilk rezonans frekansı hafifçe, ikinci ve üçüncü rezonans frekansları ise belirgin şekilde sağa kaymakta yani artmaktadır (Şekil 3.74 (a)). Yapının toplam eni ve boyunu temsil eden L parametresi arttığında üç rezonans frekansı da azalmakta yani sola kaymaktadır (Şekil 3.74 (b)). Yapının üst ve alt kollarında bulunan ikizkenar üçgen açıklıkların taban genişlikleri (w) artırıldığında ise üçüncü rezonans frekansı sağa kaymakta yani artmaktadır (Şekil 3.74 (c)). MS dizisinin periyodu da yapının optik spektrumu üzerinde etkilidir. Yapının periyot (P) değişiminden üç rezonans frekansı da etkilenmektedir. Periyot artırıldığında ilk rezonans frekansı hafifçe artmakta ikinci ve üçüncü rezonans frekansları ise azalmaktadır (Şekil 3.74 (d)). Mükemmel soğurucu birim hücresinin katman kalınlıkları değişimi de optik spektrumu etkilemektedir. Yapının en üst katmanında yer alan ve nanoaçıklıkların içerisine oyulduğu altın katman (t_{Au}) artırıldığında ikinci rezonans frekansı azalmakta yani sola kaymakta, üçüncü rezonans frekansı ise hafifçe sağa kaymakta yani artmaktadır (Şekil 3.74 (e)). Nanoaçıklık tabanlı çoklu bant mükemmel soğurucu yapısında geometrik parametreler ve katman kalınlıkları değiştirilerek optik spektrum ayarlanabilmektedir. Belirtilen parametrelerin ayarlanabilme özelliği tasarlanan mükemmel soğurucunun biyo-algılamada bir sensör olarak kullanılması durumunda büyük avantaj sağlamaktadır. Bu parametreler sensör yapısının rezonans frekansını hassas bir şekilde ayarlama imkanı sağlayan kolay ayarlama mekanizmaları olarak kullanılabilecektir. Araştırmacılar algılanması hedeflenen analitin, molekül yada biyolojik bağ yapısının rezonans frekansına göre mükemmel soğurucu yapının rezonans frekansını geometrisini değiştirerek ayarlama imkanına sahip olacaktır. Tek bant ve çift bant spektral cevaba sahip mükemmel soğurucu nanoanten yapılarının ardından günümüzde çoklu rezonans bantlarına sahip yapılar daha da önem kazanmıştır. Üç rezonansa sahip bu yapının rezonans frekanslarının Şekil 3.74'de verilen grafiklerde yer alan değerlerle ayarlanabilir olması yapının önemini ve avantajlarını bir kat daha artırmaktadır.



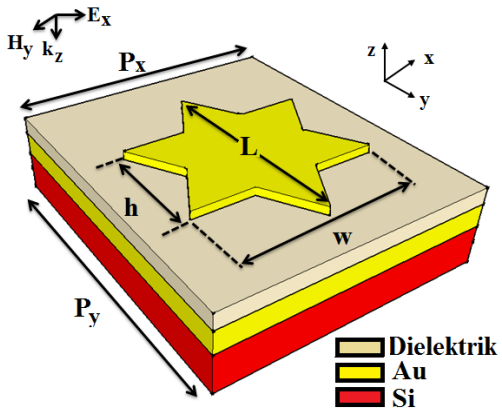
Şekil. 3.74. Önerilen MS dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi (b) L değişimi (c) w değişimi (d) P değişimi (e) t_{Au} değişimi.

Bu çalışmada, kızılötesi frekans bölgesinde spektroskopi ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek dört kollu açıklık şeklinde yeni bir metal-dielektrik-metal kompoziti nanoaçıklık tabanlı mükemmel soğurucu dizileri sunulmuştur. Mükemmel soğurucu dizisi absorbans değerleri bire yakın olan üç adet rezonans frekansına sahiptir. Mükemmel soğurucu dizilerinin rezonans cevabının geometrik parametrelere ve katman kalınlıklarına bağımlılığı incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. Çoklu-bant rezonans cevabı, geometrik parametrelere göre ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ile sunulan mükemmel soğurucu dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Bu yapı aynı anda üç farklı biyolojik numunenin tespiti için kullanılabilecektir.

3.2.13. T#13

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede spektroskopi ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek ve literatürde Davut Yıldızı olarak isimlendirilen şekilde nanoparçacık tabanlı yeni bir mükemmel soğurucu dizisi sunulmuştur. Yapının iki farklı dielektrik ara katman için spektral cevapları incelenmiş ve rezonans frekanslarında elde edilen absorbans değerleri hesaplanmıştır. Rezonans davranışlarının fiziksel temelini anlamak ve nano yapının alan dağılımlarını belirlemek için rezonans frekanslarında yakın alan dağılımları elde edilmiştir.

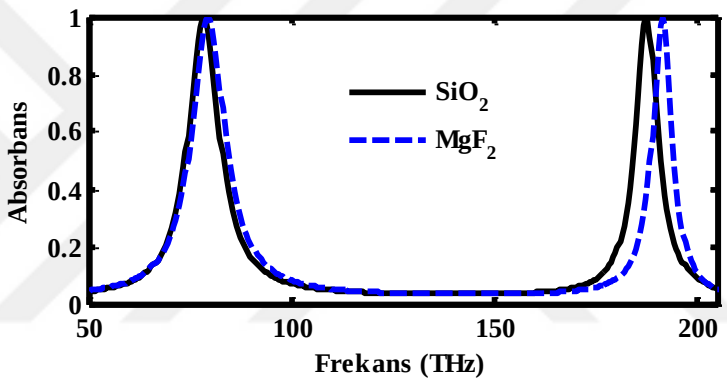
Şekil 3.75'de görülen Davut Yıldızı şeklindeki altın parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten yapısında taban malzemesi olarak 300 nm kalınlığında silikon (Si) kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 250 nm altın (Au) film ile kaplanmış, altın film üzerine ise t_s = 50 nm kalınlığında dielektrik bir ara katman (SiO_2) yerleştirilmiştir. Nanoanten yapının son katmanı olarak t_{Au} = 75 nm kalınlığında altın (Au) nanoparçacıklar kullanılmıştır. Sunulan MS dizisinin periyodu 1450 nm ($P_x = P_y$ = 1450 nm) olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.75. Davut Yıldızı şeklindeki MS dizisinin birim hücresi.

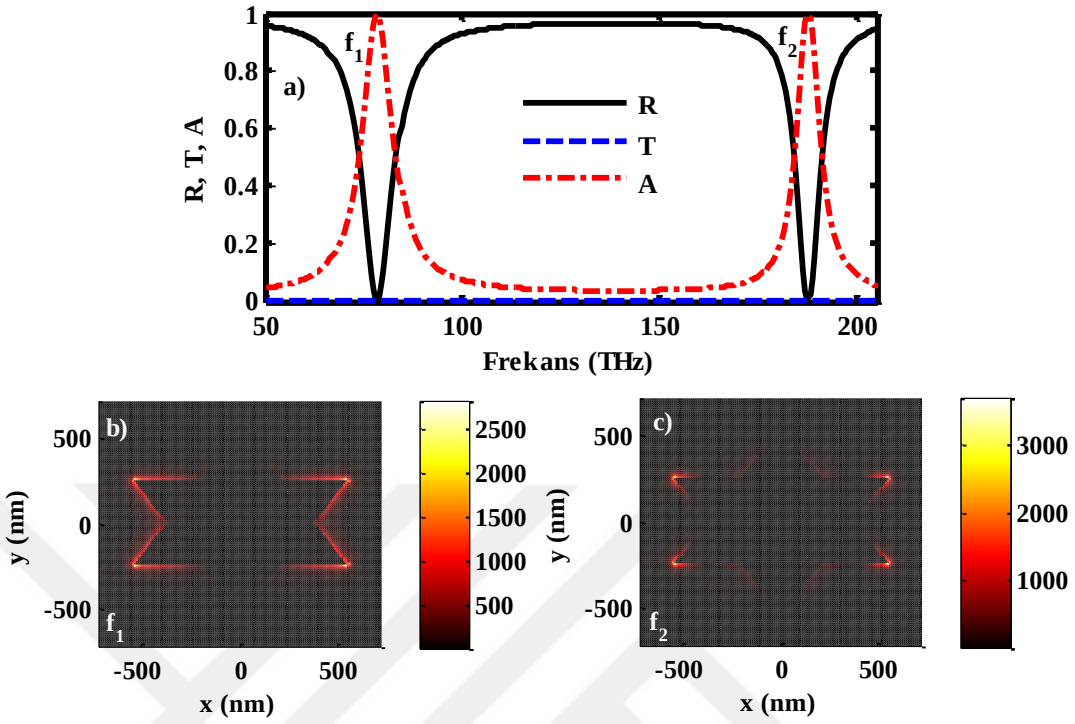
Mükemmel soğurucu yapının birim hücresi oluşturulurken, taban genişlikleri w = 1100 nm ve yükseklikleri 800 nm olan iki adet ikizkenar üçgen parçacık asimetrik olarak yerleştirilmiştir. İç içe geçen üçgenlerin taban noktaları arasındaki mesafe h = 500 nm olarak belirlenmiştir. Davut Yıldızı şeklindeki altın nanoparçacığın toplam

boyu L = 1100 nm olarak belirlenmiştir. MS dizisinin analizi gerçekleştirilirken x yönünde polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır. Davut Yıldızı şeklinde nanoparçacıklara dayalı mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik ara katmanlar (MgF_2 ve SiO_2) için frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı incelenmiştir. Şekil 3.76'da mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2 ve SiO_2) frekansa bağlı olarak elde edilen absorbans cevabı verilmiştir. Kullanılan iki dielektrik katman için de absorbans değeri bire yakın olmakta yani %100'e yakın bir soğurum elde edilebilmektedir. Yapı iki farklı dielektrik katman ile tasarlanabilme avantajına sahiptir.



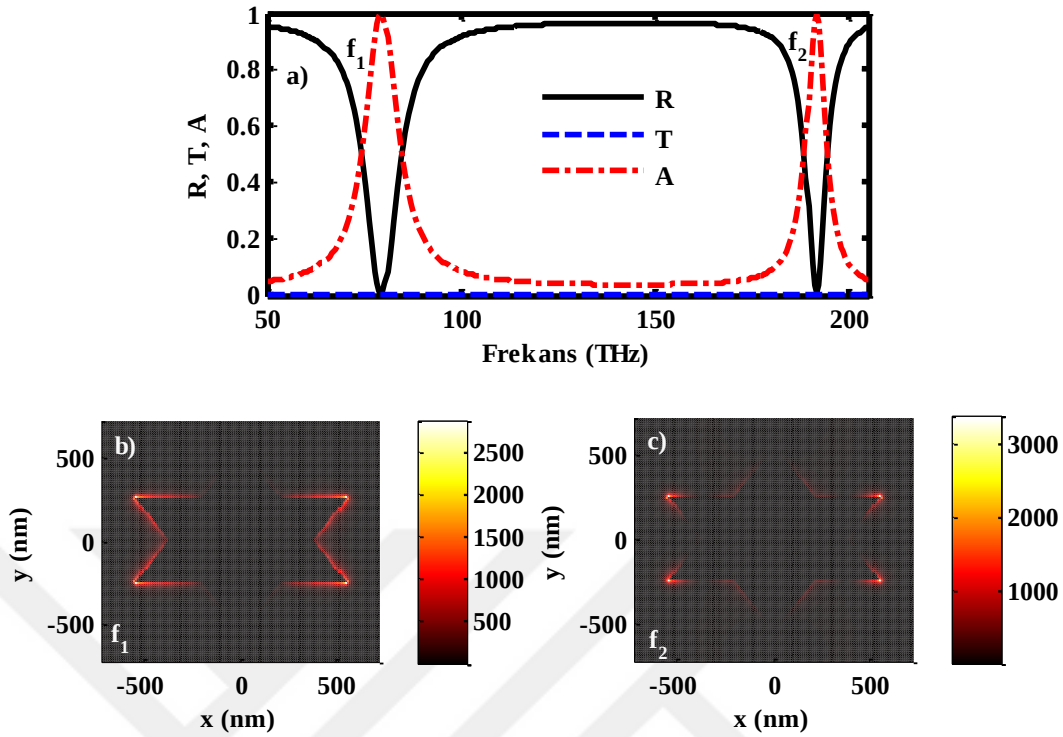
Şekil 3.76. Davut Yıldızı şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorbans spektrumları.

Davut Yıldızı şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 (n = 1.5) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 3.77 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 78.5 THz) absorbans % 99.9, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 187.5 THz) absorbans değeri % 99.8 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.77 (b) ve 3.77 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının dielektrik ara katman ile altın parçacığın birleştiği noktalarda üçgenlerin keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre birinci rezonans frekansında 2500 kattan, ikinci rezonans frekansında ise 3000 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir.



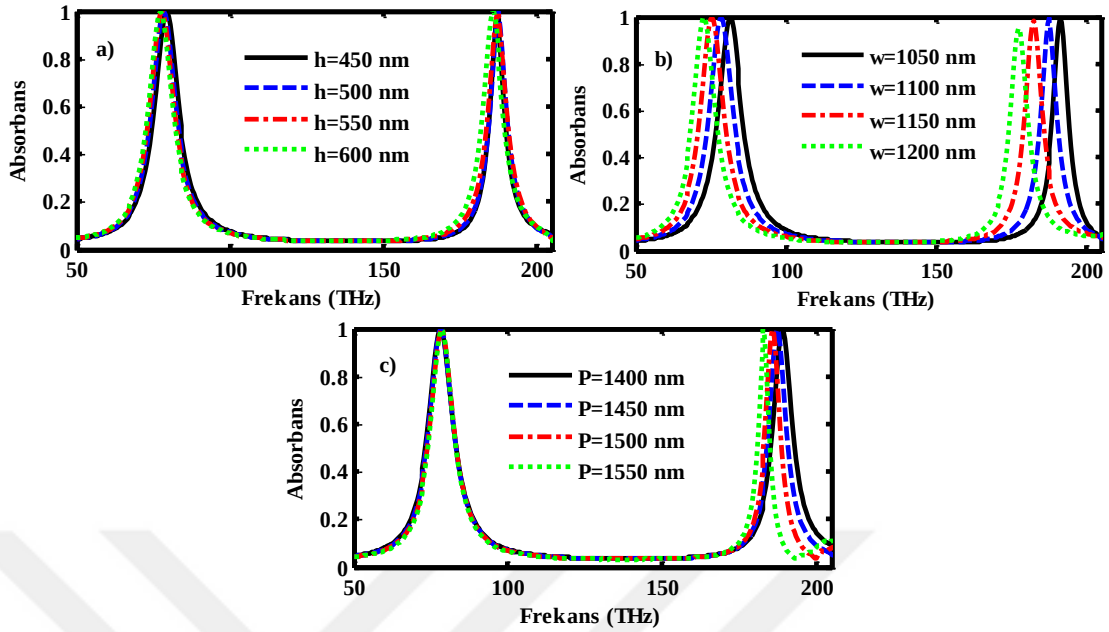
Şekil 3.77. (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

MS nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 (n = 1.37) kullanılması durumunda elde edilen reflektans (R), transmitans (T) ve absorbans (A) cevabı Şekil 3.78 (a)'da verilmiştir. Şekil 3.64 (a)'da görüldüğü gibi MS dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde (f_1 = 79.5 THz) absorbans % 99.8, ikinci rezonans noktasında (f_2 = 191.5 THz) absorbans değeri % 99.8 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.78 (a)). Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda f_1 ve f_2 rezonans frekanslarında elde edilen elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3.78 (b) ve 3.78 (c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının dielektrik ara katman ile altın parçacığın birleştiği noktalarda üçgenlerin keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre birinci rezonans frekansında 2500 kattan, ikinci rezonans frekansında ise 3000 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde yüksek absorbans yeteneğini koruduğu ve yapının keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 3.78. (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{int}|^2$ dağılımları.

Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılan yapıda farklı h, d ve P parametre değerleri için optik spektrumdaki değişimler Şekil 3.79'da yer almaktadır (L = 1100 nm, h = 500 nm, w = 1100 nm, P = 1450 nm). Diğer parametreler sabit kalmak koşulu ile, h (üçgenlerin taban noktaları arasındaki uzaklık) artığında birinci rezonans frekansı sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.79 (a)). Şekil 3.79 (b)'de w (üçgen nanoparçacıkların taban genişlikleri) değişimi için absorbans spektrası verilmiştir, w arttığında yapının tüm rezonans frekansları azalmaktadır. Yapının periyodu da optik spektrumu üzerinde etki göstermektedir. Yapının periyodu (P) artırıldığında ikinci rezonans frekansı sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 3.79 (c)). Mükemmel soğurucu dizisinin optik özellikleri yapının geometrik parametrelerine bağımlıdır. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları yapının geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.79. Önerilen mükemmel soğurucu dizisinde absorbans rezonanslarının değişimi (a) h değişimi (b) w değişimi (c) P değişimi.

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede spektroskopi ve biyo-algılama uygulamalarında kullanılabilecek Davut Yıldızı şeklinde yeni bir metal-dielektrik-metal kompoziti nano-parçacık tabanlı MS dizisi sunulmuştur. MS dizilerinin rezonans cevabının geometrik parametrelere bağımlılığı incelenmiş ve elektrik alan dağılımları hesaplanmıştır. Çift-bant rezonans cevabı, ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ile sunulan MS dizisi kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde yapılabilecek olan algılama uygulamalarında kullanılmak üzere çift bant ve çoklu bant frekans cevabına sahip nanoparçacık ve nanoaçıklık tabanlı plazmonik mükemmel soğurucular tasarlanmıştır. Tez çalışmasında ilk olarak literatürde farklı nanoanten çalışmaları için tasarlanmış alan T#1 ve T#2 çalışmaları mükemmel soğurucu olarak modellenmiş ve detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapıların teze özgü olarak plazmonik mükemmel soğurucu şeklinde birim hücreleri ve katmanları oluşturulmuş ancak modellerin geometrik parametreleri korunmuştur. Bu yapıların nümerik analizleri yapılarak absorbans spektrumları ve yakın alan dağılımları incelenmiştir. Rezonans frekanslarında oluşan yakın alan dağılımları mükemmel soğurucu dizilerinin algılanacak hedef moleküller ile etkileşimini artırdığı için çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Model ve birim hücreleri teze özgü olarak tasarlanan, T#3, T#4, T#5, T#6, T#7, T#8, T#9, T#10, T#11, T#12 ve T#13 çalışmalarına ait nümerik analizler yapılmıştır. Tez kapsamında tasarlanan mükemmel soğurucuların geometrisi belirlendikten sonra yapıların, rezonans frekansı, yansıma ve iletim özellikleri incelenmiş ve soğurum değerleri hesaplanmıştır. Sunulan mükemmel soğurucuların rezonans frekanslarında oluşan yakın alan dağılımları elde edilmiştir. Daha sonra yapılarda kullanılan dielektrik katmanlar değiştirilerek yüksek soğurum kapasitelerini koruyup koruyamadıkları incelenmiştir. Benzer şekilde bu dielektrik katmanlar için soğurum değerleri ve yakın alan dağılımları elde edilmiştir. Önerilen mükemmel soğurucuların farklı rezonans frekanslarında da kullanılabileceklerini göstermek için yapıların geometrik parametreleri değiştirilerek yapıların optik spektrumlarındaki değişimler incelenmiştir.

Tasarlanan nanoanten mükemmel soğurucuların bulunacağı ortamın kırıcılık indisi yada yapının üzerine yapılacak bir kaplama ortamının kırıcılık indisinin optik spektruma etkisi incelenmiştir. T#1 çalışmasında daha önce farklı nanoanten analizlerinde kullanılan "Kudüs Haçı" şeklindeki yapı mükemmel soğurucu olarak tasarlanmış ve incelenmiştir. Yapıdan çift bant spektral cevap elde edilmiş ve rezonans frekanslarında yüksek elektrik alan dağılımları elde edilmiştir. Yapıda farklı dielektrik ara katman kullanabilme ve geometrik parametrelerini değiştirerek spektral cevap değiştirebilme avantajları görülmüştür. T#2 çalışmasının ilk bölümünde yine daha önce nanoanten olarak tasarlanmış "H" şeklindeki yapı mükemmel soğurucu olarak analiz edilmiştir. Yapının spektral cevabında iki adet rezonans frekansı elde edilmiş ve geometrik parametreleri değiştirilerek bu rezonans frekansları ayarlanabilmiştir. Ancak ilk rezonansta elde edilen soğurum değerinin düşük olması nedeniyle çalışmanın ikinci aşamasında aynı yapı farklı geometrilerle yeniden tasarlanmıştır. İkinci bölümde yine çift bant spektral cevap elde edilmiş ve iki rezonans frekansında da oldukça yüksek değerlerde soğurum gerçekleşmiştir. Geometrik parametrelerinin değişimiyle yapının spektral cevabı ayarlanabilmiştir. T#3 çalışmasında "Çift Başlı Ok" şeklindeki parçacık tabanlı yapı ile çift bant spektral cevap ve yüksek elektrik alan dağılımları elde edilmiş ve yapının geometrileri değiştirilerek spektral cevabı değiştirilebilmiştir. T#4 çalışması ile "Çift Başlı Ok" şeklindeki yapıda dielektrik ara katman değişimlerinin etkileri ve kırılma indisi hassasiyeti analiz edilmiştir. Üç farklı dielektrik ara katman ile yapının soğurum değerleri bire yakın olarak elde edilmiş ve yapı çift bant spektral cevap özelliğini korumuştur. T#5 çalışmasında "Demir Haç" şeklinde parçacık tabanlı bir yapı tasarlanmıştır. Yapıdan dört adet rezonans frekansı elde edilmiş ve bu rezonans frekanslarında soğurum değeri bire oldukça yakın olmuştur. Çoklu bant spektral cevabın incelenmesinin ardından yapıda farklı dielektrik ara katmanlar kullanılmıştır. Tüm dielektrik ara katmanlar için yapı yüksek soğurum değerlerini korumuş ve yüksek elektrik alan dağılımları görülmüştür. Yüksek soğurum değerine sahip dört farklı rezonans frekansı ile tasarlanan yapı aynı anda dört farklı molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir. T#6 çalışmasında "Yıldız" şeklinde açıklık tabanlı bir yapı tasarlanmıştır. Yapı iki farklı dielektrik ara katman için çift bant spektral cevaba sahip olup rezonans frekanslarında oldukça yüksek elektrik alan dağılımlarına sahiptir. Nanoaçıklık tabanlı bu çalışmada elde edilen elektrik alan dağılımları tez içerisinde yer alan diğer tüm çalışmalardan yüksek olmuştur. T#7 çalışmasında "Dört Başlı Ok"

şeklinde parçacık tabanlı yapı analiz edilmiştir. Yapıdan yüksek soğurum değerlerinde iki adet rezonans frekansı elde edilmiştir. Üç farklı dielektrik ara katman içinde yüksek soğurum kapasitesini koruyan yapının elektrik alan dağılımları oldukça yüksek gerçekleşmiştir. Yapının rezonans frekansları geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmiştir. T#8 çalışmasında "Dört Başlı Ok" şeklindeki yapı bu kez açıklık olarak farklı geometrik değerler ile yeniden tasarlanmıştır. Açıklık tabanlı yapı benzer şekilde soğurum değeri yüksek iki rezonans frekansına sahiptir ancak parçacık modelinden farklı olarak yapıda iki adet dielektrik ara katman kullanılabilmiştir. İki dielektrik ara katman için yüksek soğurum değerleri ve yüksek yakın alan dağılımları elde edilmiştir. Yapının geometrileri değiştirilerek spektral cevabı ayarlanabilmiştir. T#9 çalışmasında, T#5 çalışmasında tasarlanan "Demir Haç" şeklindeki yapının açıklık modeli çalışılmıştır. Parçacık modelinde dört adet rezonans frekansına sahip yapının açıklık modelinden iki adet rezonans frekansı elde edilmiştir. Farklı dielektrik ara katmanlar için yapı yüksek soğurum ve yüksek yakın alan dağılımı özellikleri göstermiştir. T#10 çalışmasında, T#6'da yapılan "Yıldız" şeklindeki açıklık yapının benzer bir parçacık modeli tasarlanmıştır. Yapıda üç farklı dielektrik ara katman kullanılabilmiş ve hepsi içinde yüksek soğurum değerlerine sahip çift bant spektral cevapları elde edilmiştir. Yakın alan dağılımları açıklık modelindeki kadar olmasa da yine çok yüksek gerçekleşmiştir. T#11 çalışmasında "Köşeli H" şeklinde açıklık tabanlı bir yapı tasarlanmıştır. Yapı farklı dielektrik ara katmanlar için çift bant spektral cevapta yüksek soğurum değerleri ve yüksek elektrik alan dağılımı sonuçları vermiştir. Yapının geometrik parametreleri ve katman kalınlıkları değişimi ile spektral cevabı değiştirilebilmiştir. T#12 çalışmasında "Dört Kollu Açıklık" şeklinde oluşturulan yapı çoklu bant rezonans cevabı vermiştir. Soğurum değerleri yüksek üç rezonans frekansına sahip yapıda farklı dielektrik katman kullanımında yine yüksek soğurum değerlerini korunmuştur. Rezonans frekanslarında yüksek elektrik alan dağılımları meydana gelmiştir. Yapının geometrik parametreleri ve katman kalınlıkları değiştirilerek optik spektrumu ayarlanabilmiştir. Yüksek soğurum değerlerine sahip üç farklı rezonans frekansı ile yapı aynı anda üç farklı molekülün algılanmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir. T#13 çalışmasında ise "Davut Yıldızı" şeklinde altın nanoparçacık tabanlı bir mükemmel soğurucu yapısı tasarlanmıştır. Yapıda iki farklı dielektrik ara katman kullanılmış ve her ikisi içinde yüksek soğurum değerleri ve

yüksek elektrik alan dağılımları elde edilmiştir. Yapının optik spektrumu geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir.

Sonuç olarak sunulan mükemmel soğurucu yapıları, yüksek soğurum değerleri ve yüksek yakın alan dağılımları sayesinde kızılötesi bölgede spektroskopi uygulamalarında ve biyolojik algılama uygulamalarında kullanılabilecek çift - bant ve çoklu - bant özellik gösteren karakteristiğe sahiptirler. Bu özellik önerilen yapıların aynı anda birden fazla molekülün ya da hedef analitin biyo-algılanmasına ya da daha hassas algılama yapabilmesine olanak sağlayacak bir avantajdır. Ayarlanabilir spektral cevapları ile yapılar farklı rezonans frekanslarında da kullanılabilme avantajına sahiptirler.

Tez sonunda elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslararası literatüre sunulmuştur. Teze özgü olarak tasarlanan mükemmel soğuruculardan dokuz adet sözlü bildiri yayını ve bir adet dergi yayını yapılmıştır. T#3 "12. Nanoscience and Nanotechnology (NanoTr-12)" konferansında, T#4 "2016 Tıp Teknolojileri Kongresinde (TıpTekno16)", T#5 "20. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısında (Biyomut2016)", T#6 "8. Ursi Türkiye 2016 Bilimsel Kongresi ve Ulusal Genel Kurul Toplantısında", T#7 "3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT)" konferansında ve "International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers (IJAMEC)" dergisinde, T#8 "Elektrik – Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı ELECO 2016"da, T#10 "5th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT)" konferansında sunulmuştur. T#11, "The Tenth Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'10)" konferansında sunulmuştur. T#13, T#9 ve T#12 çalışmaları ise ulusal ya da uluslararası bilimsel dergilerde yayınlanmak üzere hazırlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda bu tez kapsamında tasarlanan ve nümerik analizleri gerçekleştirilen mükemmel soğurucu yapıların deneysel çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve nanoanten dizilerinin üretilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

1. Tepe, A., 2007. Nanoteknolojide Nano Ölçekteki Yapıların Yerel Olmayan Elastisite Çerçevesinde İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 100 s.
2. Hierold, C., Jungen, C. Helbling. T., 2007. Nanoelectromechanical sensors based on carbonnanotubes. **Sensors and Actuators A: Physical, 136** (1): 51-61.
3. Yılmaz, S., 2014. Nanomalzemelerin Mimaride Kullanım Olanakları. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 162 s.
4. Buzea, C., Pacheco, I. I., Robbie. K., 2007. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. **A Journal Biomaterials and Biological Interfaces, 2** (4): 18-65.
5. Çıracı, S., 2005, Metrenin Bir Milyarda Birinde Bilim ve Teknoloji, **Bilim ve Teknik Dergisi, 453**: 6-10.
6. Kayır, Y. Z., Baççıl, E. G., 2010. Nanoteknoloji Nedir. 15. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi. İstanbul.
7. Erkoç, S., 2007. Nanobilim ve Nanoteknoloji. 2. Baskı. ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
8. Baykara, T., Günay, V., Musluoğlu, E., 2010. Nanoteknoloji ve Nano-malzeme Süreçleri. Alp yayıncılık.
9. Freestone, I., Meeks, N., Sax, M., Higgitt, C., 2007. The Lycurgus cup – A roman nanotechnology. **Gold Bulletin, 40** (4): 270-277.
10. Genç, B., 2006. Elektromanyetik Spektrumun X-Işını ve Görünür Bölgesinde Ortamlardan Yayılan Fotonları Kaydetmek için Spektrometre ve Görüntüleme Sistemlerinin Tasarımı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 94 s.
11. Sengupta, D. L., Sarka, T. K., 2003. Maxwell, hertz, the maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. **IEEE Antennas and Propagation Magazine, 45** (2): 13-19.
12. Stedwell, C. N., Polfer, N. C., 2013. Laser Photodissociation and Spectroscopy of Mass-separated Biomolecular Ions. Springer Science & Business Media, 119 pp.

13. Stutzman, L. W., Thiele, G. A., 2012. Antenna Theory and Design. John Wiley & Sons, New Jersey, 857 pp.
14. Volakis, J. L., 2007. Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition. Mc Graw Hill Professional, New York, 1800 pp.
15. Johnson, R. C., 1993. Antenna Engineering Handbook, Third Edition. Mc Graw Hill Professional, New York, 1512 pp.
16. Bharadwaj, P., Deutsch, B., Novotny, L., 2009. Optical antennas. **Advances in Optics and Photonics, 1** (3): 438-483.
17. Agio, M., Alu, A., 2013. Optical Antennas. Cambridge University Press, New York, 455 pp.
18. Kern, J., Kullock, R., Prangsma, J., Emmerling, M., Kamp, M., Hecht, B., 2015. Electrically driven optical antennas. **Nature Photonics, 9**: 582-586.
19. Brongersma, M. L., 2008. Plasmonics: Engineering optical nanoantennas. **Nature Photonics**, **2** (5): 270-272.
20. Krasnok, A. E., Maksymov, I. S., Denisyuk, A. I., Belov, P. A., Miroshnichenko, A. E., Simovski, C. R., Kivshar, Y. S., 2013. Optical nanoantennas. **Physics-Uspekhi, 56** (6): 539.
21. Krasnok, A. E., Miroshnichenko, A. E., Belov, P. A., Kivshar, Y. S., 2012. All-dielectric optical nanoantennas. **Optics Express, 20** (18): 20599-20604.
22. Alu, A., Engheta, N., 2013. Theory, modeling and features of optical nanoantennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 61** (4):1508-1517.
23. Aslan, E., Turkmen, M., 2013. Novel dual-band resonator nanoantenna array for infrared detection applications. **Sensors and Materials**, **25** (9): 689-696.
24. Korkmaz, S., 2015. Biyosensör Uygulamalarında Kullanılabilecek Plazmonik Tabanlı Mükemmel Soğurucuların Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 92 s.
25. Maier, S. A., Brongersma, M. L., Kik, P. G., Meltzer. S., Requicha, A. A. G., Atwater, H. A., 2001. Plasmonics-A route to nanoscale optical devices. Advanced Materials, 13 (19): 1501-1505.
26. Maier, S. A., 2007. Plasmonics: Fundamentals and Applications. Springer Science & Business Media, New York, 230 pp.

27. Cetin A. E., Artar, A., Turkmen, M., Yanik, A. A., Altug H., 2011. Plasmon induced transparency in cascaded π – shaped materials. **Optics Express, 19 (23)**: 22607-22618.

28. Stockman, M. I., 2011. Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future. **Optics Express**, **19** (22): 22029-22106.

29. Schuller, J. A., Barnard, E. S., Cai, W., Jun, Y. C., White, J. S., Brongersma, M. L., 2010. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation. **Nature materials**, **9** (3): 193-204.

30. Kawata, S., 2001. Near-field Optics and Surface Plasmon Polaritons. Springer Science & Business Media, New York, 207 pp.

31. Homola, J., 2008. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. **Chemical Reviews**, **108** (2): 462-493.

32. Kik, P. G., Brongersma, M. L., 2007. Surface plasmon nanophotonics. **Springer Series in Optical Sciences, 131**: 1-9.

33. Smith, C. L. C., Stenger, N., Kristensen, A., Mortensen, N. A., Bozhevolnyi, S. I., 2015. Gap and channeled plasmons in tapered grooves: a review. **Royal Society of Chemistry, 7**: 9355-9386.

34. Camacho, A. S., 2015. Plasmon nanolasers and plasmon optical tweezers. **Nano Science and Technology, 3**: 10-17.

35. Matsubara, K., Kawata, S., Minami, S., 1988. Optical chemical sensor based on surface plasmon measurement. **Applied Optics**, **27** (6): 1160-1163.

36. Otto, A., 1968. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. **Zeitschrift für Physik**, **216** (4): 398-410.

37. Zeng, J., Liang, D., Cao, Z., 2005. Applications of optical fiber SPR sensor for measuring of temperature and concentration of liquids. pp. 667-670. 17. International Conference on Optical Fibre Sensors, May 23, 2005, Bruges.

38. Gündoğdu, G., 2012. Görünür Bölge ve Yakın Kırmızı Altı Bölgesi için Dielekrik Ayna Tasarımı Hazırlanması ve Karakterizasyonu. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 89 s.

39. Chen, C. Y., Burstein, E., 1980. Giant Raman scattering by molecules at metal-island films. **Physical Review Letters**, **45** (15): 1287-1291.

40. Şöföroğlu, M., 2013. Yüzeyde Güçlendirilmiş Raman Spektroskopisi Tekniği Kullanılarak Hedef DNA Dizi Tayini. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 82 s.

41. Yangan, N. N., 2011. Yüzeyde Güçlendirilmiş Raman Spektroskopisi (YGRS) Tekniği ile Proteaz Aktivitesi Tayini. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 99 s.

42. Karlsson, R., Fält, A., 1997. Experimental design for kinetic analysis of protein-protein interactions with surface plasmon resonance biosensors. **Journal of Immunological Methods**, **200** (1–2): 121-133.

43. Sadrolhosseini, A. R., Naseri, M., Kamari, H. M., 2016. Surface plasmon resonance sensor for detecting of arsenic in aqueous solution using polypyrrole-chitosan-cobalt ferrite nonaparticles composite layer. **Optics Communications, 383**: 132-137.

44. Liedberg, B., Nylander, C., Lunström, I., 1983. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing. **Sensors and Actuators**, **4**: 299-304.

45. Homola, J., 2003. Present and future of surface plasmon resonance biosensors. **Anal Bionanl Chemical, 377**: 528-539.

46. Homola, J., Yee, S. S., Gauglitz, G., 1999. Surface plasmon resonance sensors: review. **Sensors and ActuatorsB: Chemical, 54** (1-2): 3-15.

47. Jorgenson, R., Yee, S., 1993. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance. **Sensors and Actuators B: Chemical**, **12** (3): 213-220.

48. Shankaran, D. R., Gobi, K. V., Miura, N., 2007. Recent advancements in surface plasmon resonance immunosensors for detection of small molecules of biomedical, food and environmental interest. **Sensors and Actuators B: Chemical**, **121** (1): 158-177.

49. Weiss, M. N., Srivastava, R., Groger, H., Lo, P., Luo, S.-F., 1995. A theoretical investigation of environmental monitoring using surface plasmon resonance waveguide sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, **51** (2–3): 211-217.

50. Linman, M. J., Abbas, A., Cheng, Q., 2010. Interface design and multiplexed analysis with surface plasmon resonance (SPR) spectroscopy and SPR imaging. **Royal Society of Chemistry, 135** (11): 2759-2767.

51. Du, G. X., Mori, T., Suzuki, M., Saito, S., Fukuda, H., Takahashi, M., 2010. Evidence of localized surface plasmon enhanced magneto-optical effect in nanodisk array. **Applied Physics Letters**, **96** (8): 081915.
52. Willets, K. A., Duyne, R. P. V., 2007. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing. **Annual Review Physics Chemical, 58** (0): 267-297.
53. Sepulveda, B., Angelome, P. C., Lechuga, L. M., Marzan, L. M., 2009. LSPR-based nanobiosensors. **Nanotoday, 4** (3): 244-251.
54. Doğruyol, M., 2014. Meyve Dokusunun Spektroskopik İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 99 s.
55. Westfall, R. S., 2011. The development of Newton's theory of color. **The History of Science Society, 53** (3): 339-358.
56. Taşkın, Y., 2012. Hava Perspektifinin İşık ve Renk Açısından İncelenmesi ve Empresyonizm'de Uygulama Biçimleri. Cumhuriyet Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sivas, 180 s.
57. Biyomedikal Cihaz Teknolojileri, 2011. Spektrofotometre Cihazları. TC Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 104 pp.
58. Tosh, R., Hudson, L., 2015. International year of light 2015. **Newsletter of the International Radiation Physics Society, 29** (1): 1-25.
59. Jensen, T. R., Van Duyne, R. P., Johnson, S. A., Maroni, V. A., 2000. Surface-enhanced infrared spectroscopy: A comparison of metal island films with discrete and nondiscrete surface plasmons. **Applied Spectroscopy, 54** (3): 371-377.
60. Kundu, J., Le, F., Nordlander, P., Halas, N. J., 2008. Surface enhanced infrared absorption (SEIRA) spectroscopy on nanoshell aggregate substrates. **Chemical Physics Letters**, **452** (1–3): 115-119.
61. Chen, K., Adato, R., Altug, H., 2012. Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy. **ACS Nano**, **6** (9): 7998-8006.
62. Ataka, K., Stripp, S. T., Heberle, J., 2013. Surface enhanced infrared absorption spectroscopy (SEIRAS) to probe monolayers of membrane proteins. **Biochimica et Biophysica Acta,** 1828: 2283-2293.
63. Ataka, K., Heberle, J., 2007. Biochemical applications of surface-enhanced infrared absorption spectroscopy. **Anal Bioanal Chemical,** 388: 47-54.

64. Verfer, F., Pain, T., Nazabal, V., Boussard-Pledel, C., Bureau, B., Colas, F., Rinnert, E., Boukerma, K., Compere, C., Guilloux-Viry, M., Deputier, S., Perrin, A., Guin, J. P., 2012. Surface enhanced infrared absorption (SEIRA) spectroscopy using gold nanoparticles on As_2S_3 glass. **Sensors and Actuators B: Chemical, 175**: 142-148.

65. Tittl, A., Mai, P., Taubert, R., Dregely, D., Liu, N., Giessen, H., 2011. Palladium-based plasmonic perfect absorber in the visible wavelength range and its application to hydrogen sensing. **Nano Letters, 11**: 4366-4369.

66. Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M., Giessen, H., 2010. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor. **Nano Letters**, **10** (7): 2342-2348.

67. Bossard, J. A., Lin, L., Yun, S., Liu, L., Werner, D. H., Mayer, T. S, 2014. Near-ideal optical metamaterial absorbers with super-octave bandwith. **ACS Nano, 8** (2): 1517-1524.

68. Zhao, Y., Hao, Q., Ma, Y., Lu, M., Zhang, B., 2012. Light-driven tunable dual-band plasmonic absorber using liquid-crystal-coated asymmetric nanodisk array. **Applied Physics Letters, 100** (0531): 19/1-19/4.

69. Zhang, B., Zhao, Y., Hao, Q., Kiraly, B., Khoo, I.-C., Chen, S., Huang, T. J., 2011. Polarization-independent dual-band infrared perfect absorber based on a metal-dielectric-metal elliptical nanodisk array. **Optics Express**, **19** (16): 15221-15228.

70. Cheng, Y., Gong, R., Zhao, J., 2016. A photoexcited switchable perfect metamaterial absorber/reflector with polarization-independent and wide-angle for terahertz waves. **Optical Materials**, **62**: 28-33.

71. Rhee, J. Y., Yoo, Y. J., Kim, K. W., Kim, Y. J., Lee, P. Y., 2014. Metamaterial-based perfect absorbers. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, **28 (13)**: 1541-1580.

72. Liu, Y., Zhang, Y. Q., Jin, R. X., Zhang, S., Lee, P. Y., 2016. Dual-band infrared perfect absorber for plasmonic sensor based on the electromagnetically induced reflection-like effect. **Optics Communications**, **371**: 173-177.

73. Sabah, C., Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., Demirel, E., 2014. Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle

independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding an a sensor application. **Optics Communications**, **322**: 137-142.

74. Feng, R., Ding, W., Liu, L., Chen, L., Qiu, J., Chen, G., 2014. Dual-band infrared perfect absorber based on asymmetric T-shaped plasmonic array. **Optics Express, 22** (52): 335-343.
75. Hao, J., Wang, J., Liu, X., Padilla, W. J., Zhou, L., Qiu, M., 2010. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial. **Applied Physics Letters**, **96** (25): 251104.
76. Li, G., Chen, X., Li, O., Shao, C., Jiang, Y., Huang, L., Ni, B., Hu, W., Lu, W., 2012. A novel plasmonic resonance sensor based on an infrared perfect absorber. **Journal of Physics D: Applied Physics**, **45** (20): 205102.
77. Lian, Y., Ren, G., Liu, H., Gao, Y., Zhu, B., Wu, B., Jian, S., 2016. Dual-band near infrared plsmonic perfect absorber assisted by strong coupling between bright-dark nanoresonators. **Optics Communications, 380**: 267-272.
78. Huang, W. X., Zhao, G. R., Guo, J. J., Wang, M. S., Shi, J. P., 2016. Nearly perfect absorbers operating associated with fano resonance in the infrared range. **Chinese Physical Society, 33** (8): 088103/1 – 088103/4.
79. Wang, B. X., 2017. Quad-band terahertz metamaterial absorber based on the combining of the dipole and quadrupole resonances of two srrs. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 23**: (4).
80. Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., Padilla, W. J., 2008. Perfect metamaterial absorber. **Physical Review Letters**, **100** (20): 207402.
81. Cheng, Y., Yang, H., Cheng, Z., Wu, N., 2010. Perfect metamaterial absorber based on a split-ring-cross resonator. **Applied Physiscs A: Materials Science & Processing, 102**: 99-103.
82. Bağcı, F., Akoğlu, B., 2016. Consequences of unit cell design in metamaterial perfect absorbers. **Acta Physica Polonica A, 129** (4): 792-796.
83. Tao, H., Bingham, C. M., Pilon, D., Fan, K., Strikwerda, A. C., Shrekenhamer, D., Padilla, W. J., Zhang, X., Averitt, R. D., 2010. A dual band terahertz metamaterial absorber. **Journal of Physics D: Applied Physics, 43**: 225102.
84. Zhang, B., Zhao, Y., Hao, Q., Kiraly, B., Khoo, I.-C., Chen, S., Huang, T. J., 2011. Polarization-independent dual-band infrared perfect absorber based on a

metal-dielectric-metal elliptical nanodisk array. **Optics Express**, **19** (16): 15221-15228.

85. Li, M. H., Yang, H. L., Hou, X. W., Perfect metamaterial absorber with dual bands. **Progress In Electromagnetics Research, 108**: 37-49.
86. Liu, X., Lan, C., Li, B., Zhao, Q., Zhou, J., 2016. Dual band metamaterial perfect absorber based on artificial dielectric "molecules". **Scientific Reports, 6**: 28906.
87. Wang, B. X., Wang, G. Z., Sang, T., 2016. Simple design of novel triple-band terahertz metamaterial absorber for sensing application. **Journal of Physics D: Applied Physics,49:** 165307.
88. Shen, X., Cui, T. J., Zhao, J., Ma, H. F., Jiang, W. X., Li, H., 2011. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber. **Optics Express**, **19** (10): 9401-9407.
89. Dayal, G., Ramakrishna, S. A., 2013. Design of multi-band metamaterial perfect absorbers with stacked metal-dielectric disks. **Journal of Optics, 15 (5)**: 055106.
90. Hu, D., Wang, H., Tang, Z., Zhang, X., Zhu, Q., 2016. Design of four-band terahertz perfect absorber based on a simple #- shaped metamaterial resonator. **Applied Physiscs A: Materials Science & Processing, 122**: 826.
91. Seren, H. R., Keiser, G. R., Cao, L., Zhang, J., Strikwerda, A. C., Fan, K., Metcalfe, G. D., Wraback, M., Zhang, X., Averitt, R. D., 2014. Optically modulated multiband terahertz perfect absorber. **Advanced Optical Materials, 2** (12): 1221-1226.
92. Cui, Y., Fung, K.H., Xu, J., He, S., Fang, N. X., 2012. Multiband plasmonic absorber based on transverse phase resonances. **Optics Express, 20** (16): 17552.
93. D'Andrea, C., Bochterle, J., Toma, A., Huck, C., Neubrech, F., Messina, E., Fazio, B., Marago, O. M., Fabrizio, E. D., Chapella, M. L., Gucciardi, P. G., Pucci, A., 2013. Optical nanoantennas for multiband surface-enhanced infrared and raman spectroscopy. **ACS Nano, 4** (7): 3522- 3531.
94. Jamali, A. A., Witzigman, B., 2014. Plasmonic perfect absorbers for biosensing applications. **Plasmonics, 9**: 1265-1270.

95. Jamali, A. A., 2015. Optical Antennas for Biosensing Applications. Dissertation For The Acquisition of The academic Degree, University of Kassel, Germany,123 pp.

96. Xu, J., Zhao, Z., Yu, H., Yang, L., Gou, P., Cao, J., Zou, Y., Qian, J., Shi, T., Ren, Q., An, Z., 2016. Design of triple-band metamaterial absorbers with refractive index sensitivity at infrared frequencies. **Optics Express, 24** (22): 25742-25751.

97. Smith, D. R., Pendry, J. B., Wiltshire, M. C. K., 2004. Metamaterials and negative refractive index. **Science**, **305** (5685): 788-792.

98. He, S., Cui, Y., Ye, Y., Zhang, P., Jin, Y., 2009. Optical nano-antennas and metamaterials. **Materialstoday, 12** (12): 16-24.

99. Monticone, F., Alu, A., Metamaterials and plasmonics: From nanoparticles to nanoantenna arrays, metasurfaces, and metamaterials. Chinese Physics B, 23 (4): 047809/1-047809/12.

100. Bagheri, S., Strohfeldt, N., Sterl, F., Berrier, A., Tittl, A., Giessen, H., 2016. Large-area low-cost plasmonic perfect absorber chemical sensor fabricated by laser interference lithography. **ACS Sensors, 1**: 1148-1154.

101. Zhu, S., Li, F., Du, C., Fu, Y., 2008. A localized surface plasmon resonance nanosensor based on rhombic Ag nanoparticle array. **Sensors and Actuators B: Chemical**, **134** (1): 193-198.

102. Vora, A., Gwamuri, J., Pala, N., Kulkarni, A., Pearce, J. M., Güney, D. Ö., 2014. Exchanging ohmic losses in metamaterial absorbers with useful optical absorption for photovoltaics. **Scientific Reports, 4**: 4901, 1-13.

103. Rufangura, P., Sabah, C., 2016. Wide-band polarization independent perfect metamaterial absorber based on concentric rings topology for solar cells application. **Journal of Alloys and Compounds, 680**: 473-479.

104. Munday, J. N., Atwater, H. A., 2010. Large integrated absorption enhancement in plasmonic solar cells by combining metallic gratings and antireflection coatings. **Nano Letters**, **11** (6): 2195-2201.

105. Rufangura, P., Sabah, C., 2016. Design and characterization of a dual-band perfect metamaterial absorber for solar cells applications. **Journal of Alloys and Compounds, 671**: 43-50.

106. Mulla, B., Sabah, C., 2015. Perfect metamaterial absorber design for solar cell applications. **Waves in Random and Complex Media**, **25(3)**: 382-392.

107. Huang, Y., Kim, D. H., 2011. Dark-field microscopy studies of polarization-dependent plasmonic resonance of single gold nanorods: rainbow nanoparticles. **Nanoscale, 3**: 3228-3232.

108. Hu, H., Ma, C., Liu, Z., 2010. Plasmonic dark field microscopy. **Applied Physics Letters**, **96** (11): 113107.

109. Cetin A. E., Korkmaz S., Durmaz H., Aslan E., Kaya S., Paiella R., Turkmen M., 2016. Quantification of multiple molecular fingerprints by dual-resonant perfect absorber, **Advanced Optical Materials**, **4:** 1274-1280.

110. Cetin, A. E., Kaya, S., Mertiri, A., Aslan, E., Erramilli, S., Altug, H., Turkmen, M., 2015. Dual-band plasmonic resonator based on Jerusalem cross-shaped nanoapertures. **Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications**, **15**: 73-78.

111. Aslan, E., Kaya, S., Turkmen, M., 2014. Enhanced transmission through periodic arrays of Jerusalem cross-shaped nanoapertures for sensing applications. **Advanced Photonics,** SeM2C.3.

112. Aslan, E., Turkmen, M., 2017. Square fractal-like nanoapertures for SEIRA spectroscopy: An analytical, numerical and experimental study. **Sensors and Actuators A: Physical, 259**: 127-136

113. Cetin A. E., Turkmen, M., Aksu, S., Etezadi, D., Altug, H., 2015. Multi-resonant compact nanoaperture with accessible large nearfields. **Applied Physics B, 118 (1)**: 29-38.

114. The numerical simulations are carried out using a finite-difference-time-domain package, Lumerical FDTD^{TM}, (**www.lumerical.com**), (Erişim tarihi: Mayıs 2017).

115. Eryılmaz, G. S., 2013. Kablosuz Haberleşme Uygulamaları İçin Mikroşerit Beslemeli Yarık Anten Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 60 s.

116. Sevgi, L., 1999. Elektromagnetik Problemler ve Sayısal Yöntemler. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 214 pp.

117. Inan, U. S., Marshall, R. A., 2011. Numerical Electromagnetics: The FDTD Method. Cambridge University Press, Cambridge, 404 pp.

118. Yee, K. S., 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **14** (3): 302-307.

119. Palik, E., 1985. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, London, 535 pp.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Aytaç ONUR
Uyruğu: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri: 12 Aralık 1983, Ürgüp
Medeni Durumu: Bekâr
Tel: +90 542 801 66 26
Email: aytac.onur@saglik.gov.tr
Yazışma Adresi: Kavaklıönü Mah. 613. Sk. No.15/3, 50400, Ürgüp/NEVŞEHİR

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	ERÜ, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Böl.	2017
Lisans	OMÜ, Mühendislik Fak. Elektrik-Elektronik Müh. Böl.	2009
Lise	Nevşehir Anadolu Lisesi	2001

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2015- Halen	Nevşehir Devlet Hastanesi	Mühendis
2012–2015	Konya Kamu Hastaneler Birliği Genel Sekreterliği	Mühendis
2011-2012	Medaş Aksaray İşletme Mühendisliği	İşletme Sorumlusu
2010-2011	Körfezim Elektrik Nevşehir	Mühendis

YABANCI DİL

İngilizce