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

ÇİFT BANTTA MÜKEMMEL SOĞURUM ÖZELLİĞİ GÖSTEREN PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ TASARIMI

Hazırlayan Mustafa KIRLAR

Danışman Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Yüksek Lisans Tezi

Haziran 2019 KAYSERİ



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

ÇİFT BANTTA MÜKEMMEL SOĞURUM ÖZELLİĞİ GÖSTEREN PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ TASARIMI (Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan Mustafa KIRLAR

Danışman Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

> Haziran 2019 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 : Mustafa KIRLAR İmza : **Çift Bantta Mükemmel Soğurum Özelliği Gösteren Plazmonik Nanoanten Dizileri Tasarımı** adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan Mustafa KIRLAR

INAM

Danışman Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Elektrik – Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Veen Gur

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında Mustafa KIRLAR tarafından hazırlanan "Çift Bantta Mükemmel Soğurum Özelliği Gösteren Plazmonik Nanoanten Dizileri Tasarımı" adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

28. 19 2019

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

: Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

Üye

Üye

: Doç. Dr. Kutay İÇÖZ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun <u>?1/07/10/9</u>tarih ve <u>26/9/37-2.2</u> sayılı kararı ile onaylanmıştır.

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 akademisyen olarak bakabilmemi sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa Türkmen'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca bilgilerini benden esirgemeyen ve bu uzun yolculuğun henüz başında iken kendisiyle tanışma fırsatı bulduğum Sayın Dr. Öğretim Üyesi Erdem Aslan'a teşekkürü borç bilirim.

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.

Mustafa KIRLAR Kayseri, Haziran 2019

ÇİFT BANTTA MÜKEMMEL SOĞURUM ÖZELLİĞİ GÖSTEREN PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ TASARIMI

Mustafa KIRLAR Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2019 Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ÖZET

Mükemmel soğurucular, çalışma frekansında üzerlerine gelen elektromanyetik radyasyonu soğuran sistemlerdir. Çeşitli elektromanyetik dalga dedektörleri, ışınım ölçerler, güneş enerjisi emilimi vb. gibi birçok alanda mükemmel soğuruculara ihtiyaç duyulmaktadır. Plazmonik tabanlı mükemmel soğurucular ise rezonans frekanslarında gelen elektromanyetik radyasyonun tamamına yakın bir bölümünü soğuran plazmonik 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 tasarımlardan farklı geometrilere sahip mükemmel soğurucu nanoanten dizileri tasarlanarak nümerik olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışması giriş bölümüyle birlikte toplam beş bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, tezle ilgili temel tanımlamalara yer verilirken birinci bölümde, parçacık tabanlı plazmonik mükemmel soğurucular tanıtılmıştır. İkinci bölümde, tez çalışmasında mükemmel soğurucu nanoanten dizilerinin analizinde kullanılan zaman domeninde sonlu farklar (Finite Difference Time Domain; FDTD) metoduna dayalı paket program Lumerical FDTD Solutions hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde teze özgü olarak tasarlanan dört farklı mükemmel soğurucu nanoanten dizisi nümerik olarak incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise tartışma, sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mükemmel soğurucu nanoanten dizileri; Spektroskopi; Plazmonik; Zaman domeninde sonlu farklar metodu.

DESIGN OF PLASMONIC NANOANTENNA ARRAYS INDICATING PERFECT ABSORPTION IN DUAL BAND

Mustafa KIRLAR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences M. Sc. Thesis, June 2019 Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Mustafa TÜRKMEN

ABSTRACT

Perfect absorbers are the systems that absorb the electromagnetic radiation coming on the working frequency. They are needed in many fields of technology, such as various electromagnetic wave detectors, bolometers, solar-energy harvesting, and so on. 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, perfect absorber nanoantenna arrays having different geometries than the examples in the literature was designed and numerically examined.

The thesis 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, 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 absorber nanoantenna arrays have been given. In the third chapter the results of four different perfect absorber nanoantenna arrays which are designed as unique for the thesis that have dual-band values, have been examined numerically. In the fourth chapter, conclusions and recommendations have been presented.

Keywords: Perfect absorber nanoantenna arrays; Spectroscopy; Plasmonic; Finite difference time domain.

İÇİNDEKİLER

ÇİFT BANTTA MÜKEMMEL SOĞURUM ÖZELLİĞİ GÖSTEREN PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ TASARIMI

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

GİRİŞ

TEMEL TANIMLAMALAR

G.1 .	Nanoantenler	
G.2.	Optik Antenler	16
G	G.2.1. Optik Antenlerin Fiziksel Özellikleri	17
G.3.	Plazmonikler	17
G	G.3.1. Plazmoniğin Gelişimi	
G.4 .	Yüzey Plazmon Polaritonları (SPPs)	20
G	G.4.1. Lokalize Yüzey Plazmon Rezonansı (LSPR)	21
G.5.	Yüzey Güçlendirilmiş Raman Spektroskopisi (SERS)	23
G.6.	Yüzey Güçlendirilmiş Kızılötesi Soğurum (SEIRA)	24
G.7.	Tezin amacı	25

1. BÖLÜM

PLAZMONİK TABANLI MÜKEMMEL SOĞURUCULAR

1.1.	Giriş	•••••	••••••	••••••		••••••	27
	1.1.1.	Parçacık tabanlı	plazmonik	mükemmel soğ	<u>ğ</u> urucu di	zileri	28

2. BÖLÜM

NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ

2.1.	Giriş	30
2.2.	Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu	30
2.3.	Lumerical FDTD Solutions Programının Özellikleri	34

3. BÖLÜM

PLAZMONİK TABANLI MÜKEMMEL SOĞURUCU NANOANTEN DİZİ TASARIMLARI

3.1.	Giriş.						
3.2.	Teze	Özgü	Tasarlanan	Plazmonik	Tabanlı	Mükemmel	Soğurucu
Nano	anten D	izileri					
	3.2.1.	T#1'e	ait sonuçlar			•••••	
	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				66

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

11	Tantiama Sanua	va Onavilan 74
4.1.	i arusma-sonuc y	/ 4
		• • • •- • • • • • • • • • • • •

KAYNAKÇA	77
ÖZGEÇMİŞ	
YAYINLAR	

KISALTMALAR VE SİMGELER

Au	Altın
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
FDTD	Finite-Difference Time-Domain; Zaman Domeninde Sonlu Farklar
FOM	Figure of Merit; Yararlılık Katsayısı
FWHM	Full Width Half Maximum; Yarı Doruk Genişliği
GaN	Gallium Nitride; Galyum Nitrit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers ; Elektrik Elektronik
	Mühendisleri Enstitüsü
LED	Light Emitting Diode; Işık Yayan Diyot
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
PMMA	Polymethyl Methacrylate; Polimetal metakrilat
PSPs	Propagating Surface Plasmons; Yayılan Yüzey Plazmonları
RIS	Refractive Index Sensitivity – Kırılma İndisi Hassasiyeti
RIU	Refractive Index Unit – Kırılma İndisi Birimi
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
SPP	Surface Plasmon Polariton; Yüzey Plazmon Polaritonu
THz	TeraHertz
TM	Tranverse Magnetic; Enine Manyetik

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1.	Lycurgus Kadehi
Şekil G.2.	Yüzey plazmon polariton salınımlarının şematik gösterimi ve iki yarım
	uzayda azalan alanlar
Şekil G.3.	Lokalize yüzey plazmon rezonansını gösteren, alt dalga boyu metalik
	kürelerin düzlem dalga uyarılması
Şekil G.4.	(a) Stokes saçılması (b) Anti-Stokes saçılması için enerji seviyesi
	diyagramı
Şekil 1.1.	(a) Mükemmel soğurucu yapısı. (b) Mükemmel soğurucunun SEM
	görüntüsü. (c) Çift-bant spektral cevaba sahip mükemmel soğurucunun
	spektral cevabı
Şekil 2.1.	Yee hücresi
Şekil 3.1.	(a) Asimetrik π şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu
	nanoanten dizisinin birim hücresi, yukarıdan aşağıya doğru katmanlar,
	Au nanoanten dizileri, Ti yapıştırma katmanı, SiO2 dielektrik katman, Au
	film katmanı ve Si substrat. (b) Soğurum spektrum cevabı
Şekil 3.2.	(a) Asimetrik π şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu
	nanoanten dizisinin enine kesit şematik gösterimi. (t_s , SiO ₂ kalınlığını,
	t_{Au} , altın nanoparçacık kalınlığını temsil etmektedir.)
	(b) $t_S = 60$ nm ve $t_{Au} = 110$ nm için soğurum spektrumu,
	(c) $f_1 = 123.73$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine
	etkisi, (d) $f_2 = 189.27$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum
	genliğine etkisi
Şekil 3.3.	Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi,
	(a, b) W değişimi, $D = 500$ nm ve $L = 600$ nm, (c, d) L değişimi,
	W = 100 nm ve $D = 500$ nm, (e, f) D değişimi, $L = 600$ nm ve
	$W = 100$ nm. ($t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 60$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm.)40
Şekil 3.4.	Altın nanoparçacıklar alt ara yüzeyinde f_{I} = 123.73 THz için (a) yük
	yoğunluğu dağılımı, (b) elektrik alan dağılımı (E / E_i) .
	f_{2} = 189.27 THz için (c) yük yoğunluğu dağılımı, (d) elektrik alan dağılımı
	$(\mathbf{E} / \mathbf{E}_i)$. $(L = 600 \text{ nm}, W = 100 \text{ nm}, D = 500 \text{ nm},$
	$P_x = P_y = 2200 \text{ nm}, t_{Au} = 110 \text{ nm ve } t_S = 60 \text{ nm.})42$

- Şekil 3.10. (a) Rüzgar gülü şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin enine kesit şematik gösterimi. (t_s, Al₂O₃ kalınlığını, t_{Au}, altın nanoparçacık kalınlığını temsil etmektedir.)
 (b) t_s = 90 nm ve t_{Au} = 110 nm için soğurum spektrumu,
 (c) f₁ = 75.54 THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi, (d) f₂ = 105.42 THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine

GİRİŞ TEMEL TANIMLAMALAR

G.1. Nanoantenler

Optik bilimi ve mühendisliğinde ışık, genellikle, yayılan radyasyonun dalga cephelerini mercekler, aynalar ve kırınımlayıcı elemanlar vasıtasıyla yönlendirerek kontrol edilir [1]. Bu uygulama, elektromanyetik alanların dalga yapısına dayanır ve bu nedenle, alt dalga boyu ölçeğindeki alanları kontrol etmeye uygun değildir [1]. Buna karşılık, radyo dalgası ve mikrodalga teknolojisi, ağırlıklı olarak elektromanyetik alanları yönlendirmek, dalga boyu ölçeğinde kontrol etmek ve yayılan radyasyon ile lokalize alanlar arasında verimli bir şekilde bağlanmak için antenleri kullanır.

Antenler, radyo dalgası veya mikrodalga rejiminde elektromanyetik radyasyon kullanan cep telefonları ve televizyonlar gibi cihazlar için önemli bir teknoloji olmasına rağmen, optik benzerleri günümüz teknolojisinde yoktur [1]. Bununla birlikte, nanooptik ve plazmonik konusundaki son araştırmalar, optik anten kavramına yoğunlaşmıştır ve son zamanlarda bazı çalışmalarda radyo dalgaları ve mikrodalga anten teorilerinin optik frekans rejimine nasıl dönüştürüleceği üzerinde çalışılmaktadır.

Teknolojik uygulamalarda optik antenlerin bulunmaması, öncelikle küçük ölçekleriyle ilişkilidir. Nanobilimin ve nanoteknolojinin ilerlemesi, yukarıdan aşağıya nanoüretim araçları ve aşağıdan yukarıya kendi kendine montaj teknikleri kullanılarak bu uzunluk ölçeğine erişim sağlar. Optik anten yapılarının üretimi, yeni optoelektronik cihazlar için ortaya çıkan bir firsattır.

Nanoteknoloji, nanometre ölçeğinde (yaklaşık 1-100 nm) maddeyi kontrol etmek ve kullanmak için bilimsel bilginin uygulanması olarak tanımlanmaktadır. Kırınım kabaca yayılan radyasyonun dalga boyunu yaklaşık yarısına kadar sınırladığından, optik alanların geleneksel olarak kontrol edilebileceği uzunluk ölçekleri nanoteknolojiye ilgi boyutunun dışında kalmaktadır. Nano ölçekli yapı taşlarını uzaysal olarak ayırmak ve standart spektroskopik teknikleri kullanarak fiziksel ve kimyasal özelliklerini incelemek çoğu zaman mümkündür. Bununla birlikte, nano ölçekli yapıların özellikleri yapı taşları ile çevre arasındaki etkileşimler nedeniyle makroskopik bir yapıya gömüldükten sonra değişebilir. Aslında, nano ölçekli sistemlerin en ilginç yönlerinden biri, bazı durumlarda küçük uyaranlara büyük bir tepki verebilecek olan toplu olguların egemen olduğu özellikleri içermeleridir. Bu tür karmaşık nano ölçekli yapılarda optik alanları anlamak için algılama ve kontroldeki zorlu engellerin üstesinden gelinmelidir. Optik antenler kırınım sınırını aşmaya yardımcı olarak nanometre ölçeğinde optik alanların kullanılmasını, kontrol edilmesini ve görselleştirilmesini sağlar.

G.2. Optik Antenler

Radyo antenleri bir iletişim sorununa çözüm olarak geliştirilirken, optik antenlerin bulunması mikroskopi ile başladı. Radyo dalgası ve mikrodalga emsallerine benzer şekilde, optik anten serbest yayılan optik radyasyonu etkili bir şekilde lokalize enerjiye verimli bir şekilde dönüştürmek için tasarlanmış bir cihaz olarak tanımlanır. Mikroskopi bağlamında, optik bir anten, harici lazer radyasyonunun kırınım sınırından daha küçük boyutlara yoğunlaşarak etkili bir şekilde geleneksel odaklama merceğinin veya nesnesinin yerini alır. 22 Nisan 1928 tarihli bir mektupta, Edward Hutchinson Synge, Albert Einstein'a, küçük bir parçacıktan saçılan alanın ışık kaynağı olarak kullanılabileceği mikroskobik bir yöntem olduğunu açıkladı [2]. Parçacık, serbest yayılan optik radyasyonu, bir numune yüzeyi ile etkileşime girecek lokalize bir alana dönüştürecekti [1]. Yüzey bir alıcı olarak, parçacık optik bir anten olarak görülebilir. Synge teorisinde, yirminci yüzyılın başında Avusturyalı kimyager Richard Adolf Zsigmondy tarafından icat edilen bir teknik olan karanlık alan mikroskopisinin geliştirilmesinden esinlenmiştir. John Wessel 1985 yılında "Parçacık, gelen bir elektromanyetik alanı alan bir anten görevi görüyor [3]," yazdığında Synge'nin çalışmasından habersizdi ve bu onu yerel mikroskobik ışık kaynaklarının klasik antenler

ile olan benzerliğinden açıkça söz eden ilk kişi yaptı [4,5]. Tarayıcı tünel mikroskopisi [6] ve yüzey güçlendirilmiş Raman saçılmasının (Surface Enhanced Raman Scattering; SERS) [7-9] keşfedilmesi, büyük olasılıkla Wessel'in fikrinden ilham almıştır. SERS anlayışı arayışı, lazerle ışınlanmış metal parçacıkların ve kümelerin yakınında elektromanyetik alan gelişimini öngörmeyi amaçlayan birçok teorik çalışmaya yol açtı [10-14]. Bu dönem, nanoplazmoniğin ilk aşaması olarak kabul edilebilir.

G.2.1. Optik Antenlerin Fiziksel Özellikleri

Optik antenler RF ve mikrodalga emsallerine oldukça benzerdir, ancak fiziksel özelliklerinde ve ölçeklendirme davranışlarında çok önemli farklılıklar vardır. Bu farklılıkların çoğu, metallerin optik frekanslarda mükemmel iletken olmadıklarından, bu frekanslarda serbest elektron gazı olarak tanımlanan güçlü şekilde ilişkili plazmalar oldukları için ortaya çıkar [1]. Optik antenler ayrıca tipik olarak galvanik iletim hatları ile sürülmez - yerel osilatörler bunun yerine antenlerin besleme noktasına yaklaştırılır ve elektronik salınımlar kapasitif olarak sürülür [15]. Ayrıca, optik antenler çeşitli alışılmadık formlar alabilir ve özellikleri, yüzey plazmon rezonansları nedeniyle güçlü bir şekilde şekil ve malzemeye bağlı olabilir.

G.3. Plazmonikler

Nano üretim yöntemlerindeki son gelişmeler, optoelektronik cihazların boyutlarını en aza indirgemek için nano ölçekte daha önce önerilen kuantum mekaniksel olayların tasarımına, üretimine ve testine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda nanofotonik, nano ölçekte tasarlanan nesnelerdeki ışık ve malzeme etkileşimini araştıran alanlardan biridir. Fotonik bant aralığı yapıları, kuantum optik sistemler [16], ultra yüksek Q fotonik boşluklar [17], ultra hızlı lazerler [18], kimyasal [19] ve biyolojik sensörler [20], dielektrik bazlı nanoyapılı fotonik yüzeyler kullanılarak başarıyla ve kapsamlı bir şekilde literatüre sunulmuştur. Dielektrik bazlı optik nanoyapılarda, cihaz boyutları kırınım sınırından dolayı ışığın dalga boyu ile sınırlıdır (Rayleigh kriteri, d $\sim \lambda/2$). Bununla birlikte, son zamanlarda metalik yapıların bu kırınım sınırının üstesinden gelebileceği ve yüzey plazmon polaritonlarının (Surface Plasmon Polaritons; SPPs) uyarılması ile alt dalga boyunda yönlendirmeye izin verdiği gösterilmiştir [21, 22]. Her ne kadar yüzey plazmon polaritonları 50 yılı aşkın süredir bilinse de [23], bu alan özellikle son yıllarda daha fazla dikkat çekmeye başlamıştır. Bu dikkat çekici ilginin ardındaki temel neden, SPP'lerin kırınım sınırının altındaki ışığı yönlendirmede potansiyel olarak kullanılmasıdır [21]. Elektronik ile birlikte plazmonik kelimesi 2000'li [24] yılların başında H. A. Atwater tarafından yüzey plazmon polaritonlarının bilim ve teknolojisini ve genişleyen uygulamalarını kapsayacak şekilde literatüre kazandırılmıştır. Plazmonikler, ışıkmetal etkileşimleriyle en geniş anlamda, oldukça aktif bir araştırma alanıdır.

Spesifik olarak, nano ölçekte ışık-metal etkileşimlerinin geçmişi, özellikle tek boyutlu metal ızgaralarda periyodik metalik yapılardan yayılan ışığın yansıma spektrumlarında optik farklılıkların gözlendiği bu yüzyılın başına kadar uzanır. Daha sonraki çalışmalar, bu olayda SPP'nin önemli bir rol oynadığını kanıtlamıştır. İlerleyen yıllarda plazmonlar bilim ve teknolojinin birçok alanında kapsamlı uygulamalar bulmuşlardır. Kimya, biyoloji ve fizik alanındaki bilim adamlarının katkıları plazmonikleri çok disiplinli bir araştırma alanı haline getirmiştir.

G.3.1. Plazmoniğin Gelişimi

Nanometrik boyutlardaki ışık ve metalik parçacıklar arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak ortaya çıkan plazmonların ilk gözlemi, dördüncü yüzyılda ünlü Lycurgus kadehinde [25] gerçekleşti. Bu Roma kadehi, dikkat çekici renk süslemeleri sergileyen, cam içine gömülü altın ve gümüş nanoparçacıklara sahiptir. Bu kadeh ışığı yansıtma durumunda yeşil, ışığı iletme durumunda ise kırmızı görünmektedir. Cam malzemenin içindeki metalik nanoparçacıklar gelen beyaz ışığın yeşil kısmını soğurur ve yeşil yansımaya neden olacak şekilde dağıtır. Bu olgunun fiziksel kökeni, küresel olarak şekillendirilmiş parçacıklardan saçılan ışığın Mie teorisine dayanmaktadır [24, 26]. Mühendislik tasarımıyla şekil, boyut ve birleşim özellikleri değiştirilerek bu nanoparçacıkların optik özellikleri büyük ölçüde ayarlanabilir. Nanoparçacıkları elde etmek için sayısız yöntem vardır. Bu yöntemlerden biri olan, e-ışın litografisi ile nano ölçekli parçacıkların benzer metalik dizilerinin üretimi yapılabilir [27]. Parçacıkların şekli, saçılma spektrumunu önemli ölçüde değiştirir ve görülebilir spektrumun tüm aralığına yayılabilir.



Şekil G.1. Lycurgus Kadehi [25].

1974'lerde, moleküller sert metalik yüzeylere yerleştirildiğinde Raman sinyalinde çarpıcı bir artış gözlendi [28]. Takip eden yıllarda bu olay plazmonik uyarmaların varlığı ile ilişkilendirildi [29]. İlerleyen yıllardaki çalışmalar, metalik nanoparçacıkların genis bir spektral aralıkta belirli dalga boylarında plazmonik bir rezonansı destekleyebileceğini ve Raman sinyalini artırabileceğini göstermiştir [30]. Bu gelişme, daha önce imkansız olan, uygun şekilde tasarlanmış nanoparçacıklar kullanarak tek moleküllerin spektroskopisine yol açar. Nanoteknolojik ilerlemenin ardından, özellikle nanoyapıların kendiliğinden montajındaki gelişmeler; pek çok nanopartikül türü, algılama ve tibbi tanı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [31]. Birkaç örnek vermek gerekirse, Halas vd. [32] kanserli dokuya enjekte edilmiş plazmonik parçacıklar ve metalik nanoparçacıkların soğurma rezonansında dokuyu ışıkla aydınlatarak kanserli dokunun öldürülmesinde başarılı olmuştur. Tamamen farklı bir alanda metalik nanoparçacıklar aydınlatma teknolojilerinde de kullanıldı. 2004 yılında Scherer ve arkadaşları [33], GaN (Gallium Nitride; galyum nitrit) tabanlı LED'lerden yayılan ışık yoğunluğunu, bu cihazları yoğun altın ve gümüş parçacık dizileri ile kaplayarak, 14 kat artırdılar. Özet olarak, metalik nanoparçacıklar, lokalize plazmonlar nedeniyle dikkat çekici optik özellikler sergiler ve günlük yaşamın pek çok kesiminde çok sayıda uygulamada yer bulabilir. Plazmonik araştırmanın önemli bir kısmı, yayılan

yüzey plazmonlarının özellikleri ile ilgilidir. Bu alanda en önemli keşif 1998 yılında Thomas Ebbesen vd. [34] tarafından nano deliklerle dokulu metalik yüzeylerin olağanüstü optik iletimleri gözlemlenerek yapılmıştır. İletilen ışığın gelen ışığa yoğunluk oranının, nano deliklerin yüzde alanı tarafından izin verilenden çok daha büyük olduğu ölçüldü.

Genel olarak, deliğin boyutu aydınlatılan ışığın dalga boyundan küçükse, iletilen alanlar yakın alanda olmaya başlar. Bununla birlikte, metalik yüzeylerde, ışık bu nano deliklerden gecebilir. Bu gözlemi açıklamak için ilk yaklasımlar, plazmonik uyarmaların varlığına dayanıyordu. Daha ileri araştırmalar bu noktaya açıklık getirdi ve sadece plazmonların değil, aynı zamanda kırılıp genliği azalan dalgaların da bu olağan dışı iletime katkıda bulunduğu sonucuna varıldı [35]. Bu bilgi, yeni nesil bir fotonik cihaz yaratma olasılığı sebebiyle, plazmonik araştırmalara katkıda bulundu. 2000'li yıllarda, California Teknoloji Enstitüsü'ndeki araştırmacılar ışığın doğrusal bir altın nokta zinciri kullanarak alt dalga boyu ölçeğinde yönlendirilebileceğini gösterdi [36]. Ayrıca, Miyazaki vd. [37] 600 nm dalga boyuna sahip bir fotonu 55 nm genişlikteki bir geometriye sıkıştırabildi. Bu sistemlerin hepsinin metalin soğurma kayıplarından muzdarip olduğu belirtilmelidir. Metal-dielektrik-metal sandviç konfigürasyonları ve uzun menzilli plazmonik dalga kılavuzları gibi yeni yaklaşımlar kaybı azaltmış ve yayılan plazmonların yayılma uzunluğunu mm mertebesine kadar artırmıştır [38]. Plazmonik kristaller, metalik yüzeylerde plazmonların yayılması için benzer söndürme davranışı gösterir. Optik alana yayılan plazmonların bir başka önemli katkısı, altkırınımlı görüntüleme için plazmonik yapıların kullanılmasıdır [22]. Genel olarak, bu deneyler plazmonik araştırmalarının ana çerçevesini çizmiş ve alt dalga boyu optikler için yeni yaklaşımların yolunu açmıştır. Böylece ışığı çok ince metalik katmanlarda (10-50 nm kalınlığında) ve çok küçük etkili dalga boylarında kırınım sınırının altına yönlendirmek mümkün olmustur.

G.4. Yüzey Plazmon Polaritonları (SPPs)

Yüzey plazmon polaritonları (Surface Plasmon Polaritons; SPPs), metal-dielektrik ara yüzeyinde ilerleyen elektromanyetik dalgalardır ve dalgalar ilerleme yönüne dik yönde hızla sönümlenirler [39].

SPP'ler ışığın metallerde iletken elektronlarla etkileşmesiyle ortaya çıkar ve modların açısal frekansı (ω) ve düzlemsel dalga değiştiricisi (k) arasındaki dağılım ilişkisi incelenerek daha iyi anlaşılabilir. SPP'ler, reel ve pozitif dielektrik sabiti $\varepsilon_2 > 0$ olan bir dielektrik ile negatif reel kısmı $Re[\varepsilon_1] < 0$ olan bir dielektrik sabiti ile tarif edilen bir metal arasında düz bir arayüzde bulunur. Maxwell denklemlerinin bu tür bir arayüz çözümü için, her iki yarı boşluğun süreklilik ilişkileri ile birlikte, enine manyetik (TM; Tranverse Magnetic) modu için denklem (G.1) 'de verilen dağılım ilişkisiyle ifade edilir [39, 40].

$$k_{\chi} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(G.1)

Normal olarak, dağılım ilişkisi ışık çizgisinin sağında olduğu için ($k_x > \omega/c$), düz bir metal yüzeydeki SPP'ler, gelen bir düzlem dalgayla doğrudan uyarılamaz. SPP'leri uyarmak için momentum eşleştirmesi gereklidir.



Şekil G.2. Yüzey plazmon polariton salınımlarının şematik gösterimi ve iki yarım uzayda azalan alanlar

G.4.1 Lokalize Yüzey Plazmon Rezonansı

Metal yüzeylerin nano boyutta yapılanması, yüzey plazmon polaritonlarının davranışını kontrol etmek için kullanılabilir. Işık, yayılmayan metalik dalga boylu nanoparçacıklarla etkileşime girdiğinde, lokalize yüzey plazmonları (Localized Surface Plasmons; LSP'ler) olarak adlandırılan metalik nanoparçacıklarla sınırlı lokal plazmon salınımları oluşur. Yayılan yüzey plazmonlarının (Propagating Surface Plasmons; PSP'ler) aksine, LSP'leri uyarmak için faz eşleştirmeye gerek yoktur.

LSP'lerin kökeni hakkında fiziksel bir yaklaşım, yarı-dalga boylu küresel nanoparçacık bir elektromanyetik alandaki yarı statik bir yaklaşımın altındaki davranışının analiz edilmesi ve potansiyel için Laplace denkleminin çözülmesiyle elde edilebilir. Hesaplanan potansiyelin, denklem (G.2) 'de tanımlanan polarizasyon kabiliyetine sahip, uygulamalı alanın bir süperpozisyonu ve parçacık merkezinde bir dipol olduğu ortaya çıkmıştır.

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon + 2\varepsilon_m} \tag{G.2}$$

Burada " α " kutupsallaştırılabilirlik, "a" nano kürenin yarıçapı, " ε_m " ve " ε " sırasıyla izotropik ve emici olmayan ortamın ve metalin dielektrik sabitleridir. Bu denklemin en önemli sonucu, metallerin dielektrik fonksiyonunun imajiner kısmının ihmal edilebilir olması koşuluyla denklem (G.3) 'te verilen Fröhlich koşulunda bir rezonansın var olduğu anlamına gelmesidir.

$$Re[\varepsilon(\omega_{sp})] = -2\varepsilon_m \tag{G.3}$$

Yarı-statik yaklaşım, parçacık büyüklüğü, plazmon rezonansının spektral pozisyonu ve genişliği üzerindeki etkisi hakkında bir fikir vermez. Işığın dalga boyu ile karşılaştırılabilir daha büyük parçacıklar için, elektromanyetik radyasyonun bir küre tarafından saçılması ve emilmesi için Maxwell denklemlerine analitik bir çözüm olan Mie teorisine [41] atıfta bulunulabilir.



Şekil G.3. Lokalize yüzey plazmon rezonansını gösteren, alt dalga boyu metalik kürelerin düzlem dalga uyarılması.

Rezonansın boyut bağımlılığına dair daha nitelikli bir açıklama, bir alt dalga boyu metalik kürenin düzlem dalga uyarımından, bağlanmayan iletken elektronların ve pozitif ızgara vektörlerinin yüzeyin karşı taraflarındaki dağılımına yol açan izini takip eder. Bu dağılım, lokalize yüzey plazmon salınımlarından sorumlu mekanik bir osilatör olarak modellenebilecek bir geri yükleme kuvveti oluşturur. Nanoparçacık büyüklüğü arttıkça, polarizasyon yükleri arasındaki ayrım artar. Sonuç olarak, geri yükleme kuvveti, daha küçük rezonans frekansına düşer ve dolayısıyla rezonansta da analitik çözümden gelen kırmızı bir kaymaya sebep olur [42].

Yukarıda belirtilen yöntemler, plazmon rezonansının nanoparçacıkların ve çevresindeki ortamın boyutuna bağımlılığı hakkında bir fikir verir. Farklı geometriler için Maxwell denklemlerine kesin çözümler elde etmek adına, zaman domeninde sonlu farklar gibi sayısal yöntemler (Finite Difference Time Domain; FDTD) [43] kullanılmalıdır.

G.5. Yüzey Güçlendirilmiş Raman Spektroskopisi (SERS)

C. V. Raman tarafından Raman saçılmasının keşfedilmesi, 1930'da kendisine Nobel Fizik Ödülü'nü kazandırdı. Raman, ışığın ne zaman dağıldığını, çok güçlü bir aydınlatmanın mevcut olması koşuluyla, bozulmuş frekansa sahip bir saçılma ile sıradan bir dağınık radyasyonun eşlik ettiğini gözlemledi [44]. Bununla birlikte, Raman saçılımına özgü küçük sinyal yoğunluğundan dolayı bu olaya ilgi kısa sürede azaldı. 40 yıldan uzun bir süre sonra araştırma, Fleischmann vd. tarafından [7], pürüzlü bir gümüş elektrot üzerine adsorbe edilmiş bir tekli piridin katmanından yoğun Raman sinyalleri elde edilerek yeniden gün yüzüne çıkarılmıştır. Etki, artan sayıda molekülü barındıracak olan elektrotların artan yüzey alanına atfedilmiştir. Bu bulgudan sonra, farklı iki araştırma grubu bağımsız olarak ilişkili Raman sinyallerinin 10⁵-10⁶ mertebesinde bir geliştirme faktörü olduğunu göstermiştir. Van Duyne vd. [8] güçlendirmeyi pürüzlü yüzeyde artan bir elektromanyetik alana bağlarken, Albrecht ve Creighton [9] bir rezonans raman saçılmasına neden olan yük transfer mekanizmasına bağlamıştır. Bu çalışmalar, Yüzeyde Güçlendirilmiş Raman Spektroskopisinin (Surface-Enhanced Raman Spectroscopy; SERS) kökeni hakkında devam eden tartışmayı başlattı ve ilk kez 10⁵-10⁶ mertebelerinde Raman yoğunluğundaki artışlarla yeni bir fiziksel olgu olarak

kabul edildi [8,9]. Günümüzde genel olarak elektromanyetik mekanizmanın 10⁴ mertebesinde güçlendirmeden sorumlu olduğuna inanılırken, kimyasal faktörlerin etkisinin ise 10 ile 100 mertebelerinde olduğuna inanılır.

SERS geliştirmesinin kökeni, bir fotonun bir molekülden elastik olmayan saçılması olan normal Raman saçılması incelenerek daha iyi anlaşılabilir. Elastik olmayan saçılmanın bir sonucu olarak, gelen foton enerjisi " hv_L ", foton ve molekülün titreşimsel enerji seviyeleri arasındaki etkileşimler nedeniyle " hv_m " titreşimsel enerjisi tarafından kaydırılır. Dağılmış ışımanın enerjisi gelen ışımadan daha az ise, bu durum Stokes saçılması olarak adlandırılır ($hv_s = hv_L - hv_m$), aksi takdirde anti-Stokes saçılması ($hv_{as} = hv_L + hv_m$) olarak adlandırılır. Şekil G.4'te görüldüğü gibi Anti-Stokes hattı, Stokes hattından çok daha az yoğundur çünkü sadece ışınlamadan önce titreşimli olarak uyarılan moleküller, anti-Stokes hattına neden olabilir. Saçılan ışığın enerjisindeki değişim (dalga boyu) moleküle özgüdür ve kimyasal ve yapısal bilgisini sağlar.



Şekil G.4. (a) Stokes saçılması (b) Anti-Stokes saçılması için enerji seviyesi diyagramı.

Raman çok zayıf bir süreçtir çünkü gelen fotonların yalnızca küçük bir kısmı katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, onu geliştirmek için kullanılabilecek birkaç mekanizma vardır. Raman saçılma şiddeti, elektrik alan kaynaklı dipol momentin, " \vec{P} ", karesiyle orantılıdır.

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}$$
 (G.4)

burada, " α " moleküler polarizasyon kabiliyeti ve " \vec{E} " moleküle gelen elektrik alandır. Denklem (G.4), Raman yoğunluğunun, moleküler polarizasyon kabiliyetini veya molekülün elektrik alanını değiştirerek arttırılabileceği anlamına gelir. Pürüzlü metal yüzeylerde lokalize plazmonların oluşmasıyla lokal elektromanyetik alanın genliğinin artırılması, elektromanyetik geliştirme mekanizmasına katkıda bulunur [45].

G.6. 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 [46-49]. Bu da tasarlanacak olan çipin geometrik şeklinde ve boyutlarında kullanılacak olan malzemede değişiklikler hatta 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 [47-51].

G.7. 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 soğurucu nanoanten dizileri tasarlamak ve tasarlanan mükemmel soğurucu nanoanten 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. Tasarlanan mükemmel soğurucuların geometrik parametreleri değiştirilerek farklı rezonans frekanslarında kullanılabilecek yapılar araştırılacaktır. Böylelikle ilgili mükemmel soğurucu vapılar icin rezonans frekanslarının avarlanmasında kullanılabilecek bir kontrol mekanizması geliştirilmiş olacaktır. Rezonans frekansları ayarlanarak farklı rezonans değerine sahip moleküller ayarlanabilecektir. Ayrıca teze özgü tasarlanan yapıların kutuplanmaya duyarsız olması beklenecektir. Yapıların kırılma indisi hassasiyetleri kontrol edilerek bir sensör olarak kullanılabilme yetenekleri değerlendirilecektir. Tez çalışmasında parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizileri tasarlanarak soğurum kapasiteleri ve rezonans sayıları yüksek yapılar elde edilmeye calışılacaktır. Mükemmel soğurucularda 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 çoklu bant rezonans cevabına sahip plazmonik tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizileri tasarlanarak spektroskopi ve biyoalgılama uygulamalarında kullanılma potansiyelleri araştırılacaktır. Günümüzde biyoalgılama uygulamalarında aynı anda birden fazla molekül ya da analitin algılanması arzu edilmekte olup çok bant rezonans cevaba sahip sensör yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında birden fazla rezonansa sahip yapılar elde edilmeye çalışılacaktır. Bu tip mükemmel soğurucu nanoanten dizileri çok bantlı spektroskopi uygulamaları ve çoklu biyoalgılama çalışmalarının temelini oluşturmaktadır.

1. BÖLÜM MÜKEMMEL SOĞURUCULAR

1.1. Giriş

İdeal olarak mükemmel bir soğurucu yapı, yansıma, aktarım ve saçılma durumlarını devre dışı bırakarak tüm ışınımı çalışma frekansında ideal olarak soğurur. Gelen ışığı bütün frekanslarda tamamen absorbe etmek genellikle mümkün değildir. Bununla birlikte, belirli amaçlar için ya da belirli frekanslar için mümkün olabilir. Örneğin, birçok cihaz, günümüzde araştırma ve endüstride pratik amaçlar için kızılötesi bölgedeki ışığı soğuracak şekilde tasarlanmıştır. Mükemmel soğurucular üzerine özellikle son on yılda dikkat çekici çalışmalar yapılmıştır. Bu alanda birçok tasarım dedektör, algılama cihazı, metamalzeme, modülatör, mikrobolometre, sensör ve anten olarak önerilmiştir. Mükemmel soğurucular genellikle akım olan elektriksel sinyale optik sinyalin dönüstürücüsü olarak calışır. Bircok tasarım bu amaçla bir dönüstürücü olarak çalışır, ancak mükemmel soğurucular kadar verimli değildir. Bu nedenle, mükemmel soğurucuların tasarımı, araştırma ve endüstride önemlidir. Mükemmel soğurucu tasarımları zaman içinde önemli ölçüde iyileşmiştir. Çeşitli tasarımlar metaller kullanılarak gösterilmiş ve daha karmaşık ve zorlu tasarımlar üretmek için çeşitli nanofabrikasyon teknolojileri kullanılmıştır [52]. Her ne kadar tasarımların ve cihaz türlerinin sayısı artmış olsa da, daha verimli mükemmel soğruculara halen ihtiyaç duyulmaktadır [53-55].

Mükemmel soğurucuların kırılma indisi 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 [56-64]. Literatürde yer alan ilk örneklerinde tek-bant [65-67] olarak tasarlanmaya ve üretilmeye başlayan mükemmel soğurucular,

nanoteknolojinin gelişimi ve bu alanda yapılan araştırmaların hızlı artışı ile çift-bantlı [48, 68-71] 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. Multi-bant plazmonik mükemmel soğurucular [72,73] spektroskopi [74] ve biyo-algılama uygulamalarında [48,75,76] 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 [77,78] ve sonrasında gelisen metamalzeme uygulamalarında nanoyapılar ve nanoantenler tercih edilmektedir [79,80]. Mükemmel soğurucu nanoanten çalışmaları hassas sensörlerin [81,82], gelişmiş fotovoltaik pillerin [83-87] ve optik görüntülüme cihazlarının [88,89] 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 tabaka ile kaplanmakta ve bu sekilde ısığın alt tarafa geçmesi engellenmektedir. Altın üzerinde ise farklı kırılma indislerine sahip dielektrik katmanlar (MgF₂, SiO₂, Al₂O₃ vb.) kullanılarak yapının soğurum değerleri metal-dielektrik-metal etkilesimi 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 [65] olarak tasarlanan parçacık tabanlı mükemmel soğurucular günümüzde çift-bant ve çoklu-bant spektral cevaba sahip yapılar şeklinde tasarlanabilmektedir [48, 90, 91]. 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 Aslan vd. [92] 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 100 nm kalınlıkta altın film ile kaplanmış ve 40 nm'lik MgF₂ ara katman üzerine yerleştirilen 110 kalınlıktaki altın nm nanoparçacıklar kullanılmıştır. Şekil 1.1.c 'de yapının x polarizeli aydınlatma altında elde edilen spektral davranışı yer almaktadır. 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 [92].

2. BÖLÜM NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ

2.1. Giriş

Sunulan bu tezde tasarlanan mükemmel soğurucu nanoanten dizileri için zaman domeninde sonlu farklar (Finite Difference Time Domain; FDTD) çözümleri, Lumerical FDTD isimli paket program kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bu yöntemle simülasyon programı, tasarlanan üç boyutlu nanoanten dizilerinin elektromanyetik analizlerini hızlı ve doğru bir şekilde gerçekleştirmesi sebebiyle tercih edilmiştir. Bu paket program aracılığıyla simüle edilen nanoanten dizilerinin optik özellikleri analiz edilerek, daha sonra anten dizilerinin geometrileri değiştirilerek yeniden elde edilen simülasyonlardan alınan veriler sonucunda yapının geometrisinin optik özellikleri üzerindeki etkisi incelenecektir.

2.2. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu

FDTD yöntemi, Maxwell'in kıvrılma denklemlerini zaman alanında çözen temel hesaplamalı elektrodinamik yaklaşımlardan biridir. Bir zaman alanı yöntemi olduğu için FDTD çözümleri, tek bir simülasyonda çok çeşitli frekansları kapsayabilir ve genel olarak FDTD simülatörleri, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak elektromanyetik alanlar için kullanıldığından, simülasyon sırasında Fourier dönüşümünü alması gerekir. FDTD yöntemi, kıvrılma denklemlerini ayrıklaştırır ve ızgara tabanlı modelleme yöntemlerini kullanır.

Bu algoritmanın temeli ilk olarak 1961'de anten ve yayılım ile ilgili IEEE işlemlerinde Kane Yee tarafından yapılmıştır [93]. Zaman domeninde sonlu farklar ve kısaltması "FDTD" terimleri, 1980'de IEEE elektromanyetik uyumluluk işlemlerinde Allen Taflove tarafından literatüre kazandırılmıştır [94]. Halen, FDTD modellemesi fotonik kristaller, nanofotonikler, biyosensörler, mikrodalgalar ve benzeri pek çok uygulamada kullanılmaktadır [95].

Lumerical yazılımı, yapıların oluşturulabildiği ve sıklıklarına göre karmaşık kırılma göstergeleri kullanılarak malzeme türlerinin üretilebileceği bir CAD (Bilgisayar destekli tasarım; Computer aided design) aracıdır. Bu özellikler, deneysel olarak ölçülen, karmaşık malzemelerin dielektrik sabiti ile çalışmayı sağlar. Simülasyonun ilk adımı yapılar oluşturmak ve malzeme türleri atamaktır. Daha sonra ise, simülasyon bölgesini oluşturulur, kaynak türü seçilir ve veri monitörleri bu bölgelere yerleştirilir.



Şekil 2.1. Yee hücresi [100].

Gerçek bir problemde tasarlanan anten dizisi, her biri bir μ ve ε değerine sahip ve uygun bir biçimde yapılandırılmış Yee hücrelerine bölünerek kolaylıkla simüle edilebilir. Burada μ birim hücredeki malzemenin manyetik geçirgenliğini ve ε ise malzemenin dielektrik sabitini ifade etmektedir [96-98].

Üç boyutlu FDTD için Yee birim hücresi kullanıldığında manyetik ve elektrik alan ifadeleri iteratif yaklaşımlarla ele alınır. İzole edilmiş akım ve yüklerin olmadığı bir uzay bölgesi dikkate alındığında Maxwell denklemleri şu şekilde yazılabilir :

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

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

H değerleri $t = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta t$ 'de ve E değerleri $t = n \cdot \Delta t$ 'de ve belirlenir. Burada temelde dikkate alınan döngü zaman döngüsüdür ve seçilen en büyük zaman adımı tamamlanıncaya kadar ana zaman döngüsü çalıştırılır. Zaman ifadesi Δt uzunluğunda adımlara ayrılırsa, şimdiki zamanda hesaplanan alan değerleri, önceki değerlere göre değişiklik gösterir. Hücre yapısı sebebiyle üç boyutlu FDTD için, zamanın kesirli katlarında manyetik alanlar, tam katlarında ise elektrik alanlar, hesaplanmaktadır. Burada ifade edilen denklemler ($\mu = \mu_0$) boşluğun manyetik geçirgenliğine sahip, kayıplı dielektrik ortamlar için geçerlidir [96-100].

FDTD algoritması, belirli bir zaman döngüsünde Yee hücrelerinden oluşan üç boyutlu FDTD uzayında her bir nokta için altı elektromanyetik alan ifadesinin hesaplanmasını içermektedir. Eşitlik 2.1 ve 2.2'de ifade edilen Maxwell denklemlerindeki elektrik ve manyetik alanlara ait kısmi diferansiyel denklemlerdeki gerekli vektörel çarpımlar yapıldığı takdirde, elektrik alan;

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_{\chi} & H_{y} & H_{z} \end{vmatrix} = \frac{1}{\varepsilon} \begin{pmatrix} \frac{\partial H_{z}}{\partial y} - \frac{\partial H_{y}}{\partial z} \\ \frac{\partial H_{x}}{\partial z} - \frac{\partial H_{z}}{\partial x} \\ \frac{\partial H_{y}}{\partial x} - \frac{\partial H_{x}}{\partial y} \end{pmatrix}$$
(2.3)

olur. Burada E'nin 3 bileşeni vardır. Bunlar;

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

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

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

şeklinde ifade edilir.

Manyetik alan ise;

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

olur. Burada H'ın 3 bileşeni vardır. Bunlar;

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

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

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

şeklinde verilir.

Böylelikle elektromanyetik alanlara ait altı adet bileşen elde edilmiş olur. Zamana göre değişen durumlarda uzayın herhangi bir noktasındaki manyetik ve elektrik alan bileşenleri birbirlerine tamamen bağlıdır [96-100]. Bahse konu bu bağlılık ortamın dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliğiyle de ilişkilidir.

Yukarda elde edilen bu manyetik ve elektrik alana ait 6 adet eşitlik zamanın birer fonksiyonudur. Bu ifadelerin bilgisayar ortamında çözümlenebilmesi için bu 6 eşitliğin ayrıklaştırılması gerekir. FDTD metodunda bu ayrıklaştırma, Yee tarafından önerilen ve Şekil 2.1'de gösterilen birim hücre kullanılarak gerçekleştirilir.

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

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

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

ifadesi ise zamanda ayrıklaştırmayı sağlar.

Altı adet elektromanyetik alan denklemleri üzerinde zaman ve konumda ayrıklaştırma gerçekleştirildikten sonra gerekli düzenleme yapılırsa elektrik ve manyetik alan denklemleri elde edilmiş olur [97].

FDTD metodunda simüle edilecek olan nanoanten dizisi pratikteki durumuyla birebir uyum sağlamak amacıyla x, y ve z eksenleri boyunca binlerce küçük birim hücreye ayrılmaktadır. Yukarıda bahsedilen durumlar gerçekleştirildikten sonra, nanoanten dizisi içerisindeki elektromanyetik dalgaların ilerleyişi hakkında bilgiler elde edilir. Yapının uç noktalarında meydana gelen manyetik ve elektrik alanlar hesaplanır. Analizi gerçekleştirilen yapı ne kadar çok birim hücreye ayrılırsa o kadar doğru ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilir. Fakat manyetik ve elektrik alan değerlerinin fazla değişmediği yerlerde, yapının daha çok hücreye bölünmesi sadece işlem hacmini artırmakta ve gerçekleştirilen simülasyonun daha uzun sürmesine sebebiyet vermektedir. Daha hassas ve gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek maksadıyla alan değer değişiminin hızlı olduğu bölgelerde, özellikle keskin köşe ve uç noktalarda, yapı daha çok hücreye bölünerek lokalize hücrelendirme metodu uygulanır [98,99]. Bu işlemler yapılırken kapalı ortamda açık bir bölgenin simülasyonu yapıldığından ilgili sınır koşullarının mutlaka dikkate alınarak temel algoritmaya eklenmesi gerekmektedir. Böyle problemlerin çözümü karmaşık analiz ve hesaplamalar gerektirmektedir. Bu sebeple karmaşık işlemleri analiz edip çözümlemesini yapabilen, hassas ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesini sağlayan paket programlar kullanılarak gerekli hesaplamalar hızlı, doğru ve gerçeğe yakın bir şekilde elde edilebilir.

2.3. Lumerical FDTD Solutions Programinin Özellikleri

Lumerical FDTD Solutions, 3 boyutlu tasarımlar yapmaya olanak sağlayan bir arabirime sahiptir. Bu program ile tez kapsamında tasarlanan nanoboyuttaki mükemmel soğurucu nanoanten dizilerinin frekans ve zaman domeninde yansıma ve geçiş karakteristikleri elde edilerek bu sonuçlara bağlı olarak soğurum karakteristiği belirlenmektedir. Elde edilen rezonans modlarında oluşan yakın alan dağılımları yine bu program ile belirlenmekte ve manyetik ve elektrik alan haritaları çıkarılabilmektedir [96, 97, 99]. Yapıların tasarlanması sırasında kullanılan dielektrik katmanların, metallerin ve ortamların kırıcılık indisleri seçilebilmekte ve istenilen özellikte malzemeler atanabilmektedir. Program, tasarımcının istenilen boyut ve kalınlıklarda birim hücreler tasarlayabilmesine ve nanoanten dizileri şeklinde analizler yapabilmesine imkan sağlamaktadır. Belirlenen frekans değerlerinde gönderilen ışığın polarizasyonu ayarlanabilmekte ve bu şekilde mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin 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.

3. BÖLÜM PLAZMONİK TABANLI MÜKEMMEL SOĞURUCU NANOANTEN DİZİ TASARIMLARI

3.1. Giriş

Bu bölümde, literatürdekilerden farklı tamamen teze özgü geometrilere sahip dört adet plazmonik tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisi tasarlanmış ve nümerik sonuçları sunulmuştur. Tasarlanan mükemmel soğurucu nanoanten dizilerinin soğurum spektrumları elde edilerek rezonans frekanslarında oluşan soğurum değerleri hesaplanmıştır. Rezonans frekanslarında meydana gelen yakın alan dağılımları, elektrik ve manyetik alan olarak elde edilip yorumlanmıştır. Ayrıca tasarlanan nanoanten dizilerinin geometrik parametreleri ve tabaka kalınlıkları değiştirilerek optik spektrumlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Teze özgü olarak tasarlanan mükemmel soğurucu yapılarının nümerik analizleri FDTD yöntemi kullanılarak yapılmıştır [43]. Mükemmel soğurucu nanoanten dizileri tasarımında kullanılan metallerin ve ara katmanların dielektrik sabitleri Palik [101]'ten alınmıştır.

3.2. Teze Özgü Tasarlanan Plazmonik Mükemmel Soğurucu Nanoanten Dizileri3.2.1. T#1

Bu çalışmada, orta kızılötesi bölgede çalışan parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin karakterizasyonu ve tasarımı simüle edilmiştir. Yapıyı oluşturan tabaka kalınlıkları ve geometrik parametre değişiminin simülasyonları ile rezonans modların spektral tepkisi ve ayarlanabilirliği nanoanten dizisi için analiz edilmiştir. Akım ve yük yoğunluğu dağılımlarının yanı sıra rezonans modları için manyetik ve elektrik alan dağılımlarının soğurum spektrumları incelenmiştir. Parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının yatay ve dikey altın parçacıklar arasındaki yakın alan kuplajından ve parçacıkların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, tasarlanan nanoanten dizisi farklı kırılma indisine sahip ortamlara yerleştirilerek bu ortamlarda geometrik parametre değişimlerinin her iki rezonans üzerindeki etkisi ve yararlılık katsayısı (figure-of-merit; FOM) ile kırılma indisi hassasiyetinin (refractive index sensitivity; RIS) algılama performansı incelenmiştir. Bunlara ek olarak SEIRA uygulamalarındaki potansiyel kullanımını göstermek adına, konformal bir poli (metil metakrilat) tabakasının karbonil v(C=O) germe modunun algılanması da analiz edilmiştir.



Şekil 3.1. (a) Asimetrik π şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi, yukarıdan aşağıya doğru katmanlar, Au nanoanten dizileri, Ti yapıştırma katmanı, SiO₂ dielektrik katman, Au film katmanı ve Si substrat. (b) Soğurum spektrum cevabı.

Şekil 3.1.a'da parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi gösterilmektedir. Burada L = 600 nm, altın nanoparçacıkların uzunluğunu, W = 100 nm genişliğini, D = 500 nm altın nanoparçacıklar arasındaki mesafeyi göstermektedir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 2200$ nm'dir. Nanoanten dizisi, silikon (Si) üzerinde kaplı altın (Au) tabaka üzerine dielektrik ara katman silisyum dioksit (SiO₂) ve asimetrik olarak yerleştirilmiş π -şeklindeki altın nanoparçacıkların altına yerleştirilen titanyum (Ti) yapıştırıcıdan oluşmaktadır. Yapıyı oluşturan blokların kalınlığı aşağıdan yukarıya, Si = 500 nm, Au = 100 nm, SiO₂ = 60 nm, Ti = 5 nm, asimetrik olarak konumlandırılmış altın nanoparçacıkların kalınlığı ise 110 nm'dir. Simülasyonlar x polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z ekseni boyunca kullanılmıştır. Ayrıca simülasyonlar yapılırken kullanılan geniş bant düzlem dalga kaynağının nanoanten dizisi üzerine dik konumlanmış k vektörü şekil 3.1.a'da gösterilmektedir.

Asimetrik π şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin soğurum spektral cevabı şekil 3.1.b'de gösterilmektedir. Nanoanten dizisinin, soğurum (absorbance; A) spektrumu A = 1 - R - T formülü ile hesaplanmıştır [102]. Bu formülde R parametresi ile yansıma (reflectance) ve T parametresi ile iletim (transmittance) değerleri ifade edilmektedir. Formülden anlaşılacağı üzere mükemmel soğurum elde edebilmek için yansıma ve iletim olmamalıdır. Şekil 3.1.b'de görüldüğü gibi asimetrik π şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çift bant rezonans cevabına sahiptir.

Tasarlanan nanoanten dizisi için elde edilen spektral cevap, dizinin periyodu, altın nanoparçacıkların kalınlığı, dielektrik ara katman kalınlığı gibi parametrelere bağlı olduğu kadar rezonatör görevi gören anten dizilerinin L, W, D gibi boyut parametrelerine de bağımlıdır.



Şekil 3.2. (a) Asimetrik π şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin enine kesit şematik gösterimi. (t_S , SiO₂ kalınlığını, t_{Au} , altın nanoparçacık kalınlığını temsil etmektedir.) (b) $t_S = 60$ nm ve $t_{Au} = 110$ nm için soğurum spektrumu, (c) $f_1 = 123.73$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi, (d) $f_2 = 189.27$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi.

Tabaka kalınlığının soğurum genliğine etkisini inceleyebilmek için dielektrik ara katman (SiO₂) kalınlığı (t_S) ve altın nanoparçacık kalınlığı (t_{Au}) 10 nm'den başlanarak 150 nm'ye kadar 10'ar nm aralıklarla değiştirilmiştir. Şekil 3.2.a'da tasarlanan parçacık tabanlı nanoanten dizisinin kesit görünüşü ve kalınlık ifadelerinin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 3.2.c ve d'de ise sırasıyla düşük frekans modunda ($f_1 = 123.73$ THz, $\lambda_1 = 2441$ nm) ve yüksek frekans modunda ($f_2 = 189.27$ THz, $\lambda_2 = 1583$ nm) tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi görülmektedir. t_S ve t_{Au} parametrelerinin yüksek ve düşük değerlerinde soğurum genliğinin düştüğü şekil 3.2.c ve d'de görülmektedir. t_S ve t_{Au} parametreleri birbirine göre ters orantılı seçildiğinde mükemmel bir soğurum elde edebilmektedir. Bu çalışmada yapılacak simülasyonlarda mükemmel bir soğurum elde edebilmek için t_S ve t_{Au} parametreleri sırasıyla 60 nm ve 110 nm olarak seçilecektir. Şekil 3.2.b'de t_S ve t_{Au} parametrelerinin sırasıyla 60 nm ve



D = 500 nm, ve $P_x = P_y = 2200$ nm olarak sabit tutulduğu ve mükemmel bir soğurum elde edildiği grafik gösterilmektedir.

Şekil 3.3. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi, (a, b) W değişimi, D = 500 nm ve L = 600 nm, (c, d) L değişimi, W = 100 nm ve D = 500 nm, (e, f) D değişimi, L = 600 nm ve W = 100 nm. ($t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 60$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm.)

Biyoalgılama uygulamarı için, özellikle SEIRA uygulamalarında, parçacık boyutlarının değiştirilerek plazmonik rezonans frekanslarının ayarlanabilmesi arzu edilen bir durumdur. Bu amaçla; yapıyı oluşturan blokların kalınlık değişimlerinin yanı sıra, rezonatör görevi gören altın nanoparçacıkların geometrik parametre değişimleri de incelenmiştir. Şekil 3.3.a ve b'de altın nanoparçacıkların genişliğini temsil eden *W* parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans

frekansına etkisi gösterilmiştir. İncelenen değerlerde düşük frekans modunda, W parametresinin artan değerleri için 90 nm den büyük olduğu yerlerde rezonans frekansının düştüğü gözlenirken 90 nm'ye kadar olan değerlerde rezonans frekansının değişmediği gözlenmiştir. Yüksek frekans modunda ise W değişiminin rezonans frekansını etkilemediği görülmüştür. Şekil 3.3.c ve d'de ise altın nanoparçacıkların uzunluğunu temsil eden L parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. L uzunluğu arttıkça düşük frekans modu için rezonans frekansı değerinin azaldığı, yüksek frekans modu için ise incelenen değerlerde 500nm ile 650nm uzunlukları arasında değişim gözlenmezken diğer değerler için L arttıkça rezonans frekans değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.3.e ve f'de vatay olarak konumlanmış altın nanoparçacıklar arasındaki mesafeyi temsil eden D parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. Düşük frekans modu için yatay altın nanoparçacıklar arasındaki mesafe arttıkça rezonans frekansının da arttığı görülmektedir. Yüksek frekans modu için incelen değerlerde rezonans frekansında hemen hemen değişiklik olmadığı sadece 800nm değeri için rezonans frekansının azaldığı görülmektedir. Altın nanoparçacıkların parametre değişimleri incelenirken tabaka kalınlıkları ve dizinin periyodu sırasıyla $t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 60$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm olarak alınmıştır.



Şekil 3.4. Altın nanoparçacıklar alt ara yüzeyinde $f_{1} = 123.73$ THz için (a) yük yoğunluğu dağılımı, (b) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). $f_2 = 189.27$ THz için (c) yük yoğunluğu dağılımı, (d) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). (L = 600 nm, W = 100 nm, D = 500 nm, $P_x = P_y = 2200$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_S = 60$ nm.)

Tasarlanan nanoanten dizisinin rezonans modlarındaki yük yoğunluğu ile elektrik alan dağılımları bize soğurum rezonanslarının kökeni hakkında fikir verir. Şekil 3.4.a'da düşük frekans modu için altın nanoparçacıkların alt ara yüzeyindede yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. X eksenine paralel yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıklar etrafında yüklerin dipolar bir salınımı görülmektedir. Şekil 3.4.b'de ise düşük frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$) görülmektedir. Elektrik alan, şekil 3.4.a'da görüldüğü üzere yatay yönlendirilmiş nanoparçacıkların dipolar karakteristiği sebebiyle uç kısımlarda oldukça fazladır. Yüksek frekans modu için şekil 3.4.c'de altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Bu modda yüklerin yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay dilendirilmiş ikili görülmektedir. Yüksek frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı görülmektedir. Bu modda yüklerin yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların uç kısımları ile yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$) şekil 3.4.d'de verilmiştir. Elektrik alan

dağılımının yatay ikili nanoparçacıkların uç kısımlarında ve bu parçacıklarla dikey tekli nanoparçacık arasındaki bölgede gelen ışığın şiddetine oranla 100 kattan fazla güçlendirildiği görülmektedir. Tasarlanan nanoanten dizisinin elektrik alan değerlerinin yüksek olması ile madde-ışık etkileşimi artacağı için sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi yüksek elektrik alan değerleri ile SEIRA tekniği kullanılarak biyosensör uygulamalarında kullanılabilir.



Şekil 3.5. y = 0 düzleminde altın nanoparçacıklar ile altın tabaka düzlemi arasındaki bölgede akım yoğunluğu ve manyetik alan dağılımı $f_{1} = 123.73$ THz için (a) akım yoğunluğu dağılımı, (b) manyetik alan dağılımı (|H|/|H_i|). $f_{2} = 189.27$ THz için (c) akım yoğunluğu dağılımı, (d) manyetik alan dağılımı (|H|/|H_i|). (L = 600 nm, W = 100 nm, D = 500 nm, $P_{x} = P_{y} = 2200$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_{S} = 60$ nm.)

Soğurum rezonanslarının fiziksel kökenini daha iyi anlayabilmek adına altın nanoparçacıklar ve altın tabaka düzlemi arasındaki bölgede akım dağılımı incelenmiştir. Altın nanoparçacıkların yüzey plazmon rezonansı ile bu parçacıkların altın tabaka düzlemi arasındaki yakın alan kuplajı anti-paralel akımlara neden olmaktadır. Şekil 3.5.a ve c'de sırasıyla düşük ve yüksek rezonans modları için akım yoğunluğu haritasının enine kesitsel görünümü verilmiştir. Altın nanoparçacık ve altın tabaka

düzlemi arasında anti-paralel yönleri olan akım yoğunlukları kırmızı ve mavi oklarla gösterilmiştir. Haritada kırmızı alanlar, mavi alanlara göre akım yoğunluğunun daha fazla olduğu bölgelerdir. Bu anti-paralel akımlar dielektrik tabakada daha yüksek manyetik alan dağılımına sebep olmaktadır. Şekil 3.5.b'de düşük frekans modu için dielektrik tabaka içinde manyetik alan genliğinin gelen ışığın manyetik alan genliğine oranla 6 kattan fazla artırıldığı görülmektedir. Şekil 3.5.d'de ise yüksek frekans modunda aynı durumun 20 kattan fazla olduğu gözlenmiştir. Şekil 3.4 ve 3.5'teki sonuçlar soğurum rezonanslarının fiziksel kökeni hakkında bilgi vermektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere soğurumun sebebi yatay nanoparçacıklar yüzeyindeki yük salınımlarıdır, bu altın parçacıklar gelen ışık enerjisini yakın alan kuplajıyla yakalar ve bu enerjiyi altın tabaka düzlemiyle altın nanoparçacıkların sebep olduğu anti-paralel akımların omik kayıplarıyla dağıtır.



Şekil 3.6. (a) Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kaplama ortamı ile şematik görünümü. (b) Soğurum spektrumlarının kaplama ortamının kırılma indisine bağımlılığı. (c) Her spektrumun rezonans dalga boyunun, kaplama ortamının kırılma indisine bağımlılığı. (W = 100 nm, L = 600 nm, D = 500 nm, $t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 60$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm.)

Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kırılma indisi hassasiyetini elde edebilmek için yapının üzeri şekil 3.6.a'da gösterildiği gibi 250 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanarak simüle edilmiştir. Yapının yüksek yakın alan güçlendirmesi sayesinde, kaplama ortamı, altın nanoparçacıkların yakın alanlarıyla etkileşime girerek mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin rezonant özelliklerini kuvvetli bir şekilde etkiler. Böylelikle kaplama ortamının artan kırılma indisi şekil 3.6.b'de gösterildiği gibi soğurum spektrumunda kaymaya sebep olur. Ayrıca n = 1.75 ve n = 2 kırıcılık indisine sahip ortamlar için çalısılan frekans aralığında farklı rezonans noktaları da gözlenmeye başlanmıştır. Yapının algılama analizi iki parametre yardımıyla yapılabilir. İlk parametre toplu kırılma indisi hassasiyeti (η) olarak ifade edilen ve rezonans dalga boyundaki değişimin ($\Delta\lambda$), kaplama ortamının kırılma indisindeki değişimine (Δn) oranı olarak tanımlanan ifadedir: $\eta = \Delta \lambda / \Delta n$ (nm RIU⁻¹). Ayrıca şekil 3.6.c'den, rezonans dalga boyundaki değişimin, kaplama ortamının kırılma indisindeki değişime oranı ifadesi elde edilebilir. Algılama uygulamaları için diğer önemli parametre yararlılık katsayısı (Figure of Merit; FOM) olarak ifade edilen ve toplu kırılma indisi hassasiyetinin (n), yarı doruk genişliğine Γ (Full Width Half Maximum; FWHM) oranı olarak ifade edilen parametredir : $FOM = \eta / \Gamma$ [103]. Düşük ve yüksek frekans modları için hesaplanan toplu kırılma indisi hassasiyetleri sırasıyla 947 nm RIU⁻¹ ve 571 nm RIU⁻¹'dır. Ayrıca düşük ve yüksek frekans modları için yararlılık katsayıları sırasıyla 3.15 ve 48.40 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara bakarak, yüksek frekans modunun algılama karakteristiğinin düşük frekans modundan çok daha yüksek olduğu ve bunun iki rezonans modunun kökenlerinin farklılığı ile ilişkili olduğunu söylemek mümkündür. Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve böylelikle önerilen yapının kırılma indisi algılama uygulamalarında kullanılabileceği görülmüştür.



Şekil 3.7. Düşük ve yüksek frekans modu için kırılma indisi hassasiyetinin (Refractive Index Sensitivity; RIS) geometrik parametre bağımlılığı (a) W değişimi, (b) L değişimi, (c) D değişimi. Düşük ve yüksek frekans modu için yararlılık katsayısının (Figure of Merit; FOM) geometrik parametre bağımlılığı (a) W değişimi, (b) L değişimi, (c) D değişimi. (W = 100 nm, L = 600 nm, D = 500 nm, $t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 60$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm.)

Yapının performans analizini gerçekleştirebilmek için kırılma indisi hassasiyeti ile yararlılık katsayısının geometrik parametre değişimleri analiz edilmiştir. Şekil 3.7.a.b.c'de düşük ve yüksek frekans modları için *W*, *L*, *D* değişimlerinin kırılma indisi hassasiyetine (Refractive Index Sensitivity; RIS) bağımlılığı görülmektedir. Düşük frekans modu için *W* parametresini artırmak kırılma indisi hassasiyetini düşürürken, *L* ve *D* parametrelerini artırmak tam tersi etki yapmaktadır. Geometrik parametre değişimlerinin yüksek frekans modunda kırılma indisi hassasiyetini çok fazla etkilemediği görülmektedir. Bu durum alan güçlendirme değeri ve geometrik parametrelere oldukça bağlı olan lokalize yüzey plazmon rezonanslarının dalga boyuyla ilgilidir. Şekil 3.7.d.e.f'de düşük ve yüksek frekans modları için *W*, *L*, *D* değişimlerinin yararlılık katsayısına (Figure of Merit; FOM) bağımlılığı görülmektedir. Yararlılık katsayısı kırılma indisi hassasiyetine ve yarık doruk genişliğine bağlıdır. Yüksek frekans modu için *W* parametresini artırmak yararlılık katsayısı değerini düşürürken, *L* ve *D* parametrelerini artırmak tam tersi etki yapmaktadır. Geometrik parametrektir.

değişimlerinin düşük frekans modunda yararlılık katsayısını çok fazla etkilemediği görülmektedir.



Şekil 3.8. (a) Simüle edilen yapının konformal PMMA (Polymethyl Methacrylate; Polimetal metakrilat) film tabakası ile kaplı perspektif görünümü. Yapının yalın hali (kırmızı kesikli çizgiler) ve üstünde 20 nm kalınlığında PMMA film tabakası (mavi düz çizgiler) varken soğurum spektrumu (b) L = 1200 nm, (c) L = 1300 nm, (d) L = 1400 nm (W = 150 nm, D = 750 nm, $P_x = P_y = 3500$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_S = 60$ nm). (e) Yapının üzerinde 10, 20, 30 ve 40 nm bir PMMA film bulunması durumunda, soğurum genliğinin yapının yalın halindeki genliğine göre soğurum genliği farkı.

Yapının SEIRA uygulamalarında kullanılabilirliğini gösterebilmek için üst kısmı PMMA (Polymethyl Methacrylate; Polimetal metakrilat) film tabakası ile kaplanmıştır. Şekil 3.8.a'da üzeri ince film PMMA tabakasıyla kaplanmış yapının perspektif görünümü verilmiştir. PMMA, kızılötesi bölgede iyi karakterize edilmiş güçlü soğurma bantları nedeniyle bir analit olarak tercih edilir. İnce PMMA film tabakasının dağılma

davranışı, karmaşık dielektrik fonksiyonun, bir frekansa bağlı kompleks nispi geçirgenlik değeri olan sabit bir arka plan nispi geçirgenliğinin toplamı olarak tarif edildiği bir Lorentz osilatörü olarak modellenmiştir [104]. Şekil 3.8.b.c.d'de yapının üzerinin 20nm kalınlığında ince PMMA film şeridiyle kaplı (mavi düz çizgiler) ve PMMA film yokken (kırmızı kesikli çizgiler) sırasıyla L = 1200 nm, L = 1300 nm ve L = 1400 nm değerleri için diğer parametreler W = 150 nm, D = 750 nm, $P_x = P_y = 3500$ nm, $t_{Au} = 110$ nm, ve $t_s = 60$ nm olarak sabit tutulurken soğurum spektrumu verilmiştir. PMMA film tabakası varken rezonans frekansının azaldığı görülmektedir. Düşük frekans modu f_1 i PMMA'nın v(C = O) soğurma bandına ayarlamak için, L parametresinin farklı değerleri için birkaç simülasyon gerçekleştirilir. Şekil 3.8.b,c ve d'ye bakılarak en iyi eşleşmenin yaklaşık olarak L = 1300 nm için olarak seçilen değerde olduğunu söylemek mümkündür. Film tabaka kalınlığının etkisini görebilmek için, yapının üzerinde PMMA film tabakası varken soğurum genliğinin, PMMA film tabakası olmadığı durumda soğurum genliğinden çıkarıldığı ΔA soğurum spektrumu grafiği Şekil 3.8.e'de verilmiştir. Bu grafikte PMMA'nın varlığını algılayabilmek için, soğurum-fark grafiğinin genliği incelenmiştir. Sonuç olarak, PMMA film tabakasının ve sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin arttırılmış yakın alanı arasındaki etkileşimin azalması nedeniyle, PMMA film tabaka kalınlığının artırılması daha yüksek soğurum-fark grafiği elde edilmesini sağlayacaktır.

3.2.2. T#2

Bu çalışmada, rüzgar gülü şekilli parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin karakterizasyonu ve tasarımı simüle edilmiştir. Yapıyı oluşturan tabaka kalınlıkları ve geometrik parametre değişiminin simülasyonları ile rezonans modların spektral tepkisi ve ayarlanabilirliği nanoanten dizisi için analiz edilmiştir. Biyoalgılama uygulamaları için kritik bir çalışma olan polarizasyon duyarsızlığı farklı kutuplanma açıları için incelenmiştir. Yük yoğunluğu dağılımları ile rezonans modları için elektrik alan dağılımlarının soğurum spektrumları incelenmiştir. Rüzgar gülü şekilli mükemmel soğurucu nanoanten dizisi farklı kırılma indisine sahip ortamlara yerleştirilerek bu ortamlarda geometrik parametre değişimlerinin her iki rezonans üzerindeki etkisi ve

yararlılık katsayısı (figure-of-merit; FOM) ile kırılma indisi hassasiyetinin (refractive index sensitivity; RIS) algılama performansı incelenmiştir.



Şekil 3.9. (a) Rüzgar gülü şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi, yukarıdan aşağıya doğru katmanlar: Au nanoanten dizileri, Ti yapıştırma katmanı, Al₂O₃ dielektrik katman, Au film katmanı ve Si substrat. (b) Soğurum spektrum cevabı.

Şekil 3.9.a'da rüzgar gülü şekilli mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi gösterilmektedir. Rüzgar gülü yapısı, 4 adet ikizkenar üçgen ve bu üçgenlerin ortasında bir kenar uzunluğu k = 200 nm olan kareden oluşmaktadır. İkizkenar üçgenlerin dik kenar uzunlukları L1 = L2 = 800 nm olarak belirlenmiştir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 2200$ nm'dir. Nanoanten dizisi, silikon (Si) üzerinde kaplı altın (Au) tabaka üzerine dielektrik ara katman alüminyum oksit (Al₂O₃) ve yapıştırma katmanı titanyum (Ti) üzerinde rüzgar gülü şeklindeki altın nanoparçacıklardan oluşmaktadır. Yapıyı oluşturan blokların kalınlığı aşağıdan yukarıya, Si = 500 nm, Au = 100 nm, Al₂O₃ = 90 nm, Ti = 5 nm, üçgensel ve kare olan altın nanoparçacıkların kalınlığı ise 110 nm'dir. Simülasyonlar x polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z ekseni boyunca kullanılmıştır. Ayrıca simülasyonlar yapılırken kullanılan geniş bant düzlem dalga kaynağının nanoanten dizisi üzerine dik konumlanmış *k* vektörü şekil 3.9.a'da gösterilmektedir.

Rüzgar gülü şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin soğurum spektral cevabı şekil 3.9.b'de gösterilmektedir. Nanoanten dizisinin, soğurum (absorbance; A) spektrumu A = 1 - R - T formülü ile hesaplanmıştır [102]. Bu formülde R parametresi

ile yansıma (reflectance) ve T parametresi ile iletim (transmittance) değerleri ifade edilmektedir. Formülden anlaşılacağı üzere mükemmel soğurum elde edebilmek için yansıma ve iletim olmamalıdır. Şekil 3.9.b'de görüldüğü gibi rüzgar gülü şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çift bant rezonans cevabına sahiptir.

Tasarlanan nanoanten dizisi için elde edilen spektral cevap, dizinin periyodu, altın nanoparçacıkların kalınlığı, dielektrik ara katman kalınlığı gibi parametrelere bağlı olduğu kadar rezonatör görevi gören anten dizilerinin L1, L2, k gibi boyut parametrelerine de bağımlıdır.



Şekil 3.10. (a) Rüzgar gülü şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin enine kesit şematik gösterimi. (t_S , Al₂O₃ kalınlığını, t_{Au} , altın nanoparçacık kalınlığını temsil etmektedir.) (b) $t_S = 90$ nm ve $t_{Au} = 110$ nm için soğurum spektrumu, (c) $f_1 = 75.54$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi, (d) $f_2 = 105.42$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi.

Tabaka kalınlığının soğurum genliğine etkisini inceleyebilmek için dielektrik ara katman (Al₂O₃) kalınlığı (t_s) ve altın nanoparçacık kalınlığı (t_{Au}) 10 nm'den başlanarak

160 nm'ye kadar 30'ar nm aralıklarla değiştirilmiştir. Şekil 3.10.a'da tasarlanan parçacık tabanlı nanoanten dizisinin kesit görünüşü ve kalınlık ifadelerinin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 3.10.c ve d 'de ise sırasıyla düşük frekans modunda $(f_1 = 75.54 \text{ THz}, \lambda_1 = 3968 \text{ nm})$ ve yüksek frekans modunda $(f_2 = 105.42 \text{ THz}, \lambda_2 = 2843 \text{ nm})$ tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi görülmektedir. t_S ve t_{Au} parametrelerinin yüksek ve düşük değerlerinde soğurum genliğinin azaldığı şekil 3.10.c ve d'de görülmektedir. Bu çalışmada yapılacak simülasyonlarda mükemmel bir soğurum elde edebilmek için t_S ve t_{Au} parametreleri sırasıyla 90 nm ve 110 nm olarak seçilecektir. Şekil 3.10.b'de t_S ve t_{Au} parametrelerinin sırasıyla 90 nm ve 110 nm olarak alınıp diğer geometrik parametrelerin ise L1 = 800 nm, L2 = 800 nm, $k = 200 \text{ nm}, \text{ ve } P_x = P_y = 2200 \text{ nm}$ olarak sabit tutulduğu ve mükemmel bir soğurum elde edildiği grafik gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi, (a, b) *L1* değişimi, *L2* = 800 nm ve k = 200 nm (c, d) *L2* değişimi, *L1* = 800 nm ve k = 200 nm (e, f) k değişimi, *L1* = 800 nm ve *L2* = 800 nm. (t_{Au} = 110 nm, t_S = 90 nm ve $P_x = P_y$ = 2200 nm.)

Biyoalgılama uygulamarı için, özellikle SEIRA uygulamalarında, parçacık boyutlarının değiştirilerek plazmonik rezonans frekanslarının ayarlanabilmesi arzu edilen bir durumdur. Bu amaçla; rüzgar gülü şekilli yapıyı oluşturan blokların kalınlık değişimlerinin yanı sıra, rezonatör görevi gören altın naoparçacıkların geometrik parametre değişimleri de incelenmiştir. Şekil 3.11.a ve b'de altın nanoparçacıkların boyut parametrelerinden *L1* parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. İncelenen değerlerde düşük ve yüksek frekans modları için, *L1* arttıkça rezonans frekansının daha düşük değerler aldığı gözlenmektedir. Şekil 3.11.c ve d'de ise ikizkenar üçgenin diğer dik kenar uzunluğunu temsil eden *L2* parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. *L2* uzunluğu arttıkça her iki mod için de

rezonans frekansı değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.11.e ve f'de ikizkenar dik üçgenlerin arasındaki karesel bölgenin bir kenar uzunluğunu temsil eden *k* parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. Her iki mod için de rezonans frekansı, *k* parametresinin 200 nm'den 250 nm'ye değişminde hızlı bir artış gösterirken k'nın artan değerlerinde değişimin nispeten daha yavaş olduğu ve bazı yerlerde değişimin olmadığı görülmektedir. Altın nanoparçacıkların parametre değişimleri incelenirken tabaka kalınlıkları ve dizinin periyodu sırasıyla $t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 90$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm olarak alınmıştır.



Şekil 3.12. Soğurum spektrumuna kutuplanma açısının etkisi ve "*k*" vektörünün birim hücreye göre yönelimi. (Eğriler çakışmayı önlemek için 1'er kaydırılarak çizdirilmiştir.)

Genel olarak, mükemmel soğurucuların spektral tepkisi, geometrilerine bağlı olarak kutuplanmaya duyarlıdır, ancak bu durum, bu aygıtların biyoalgılama sistemlerinde kullanımı için bir kısıtlamadır, çünkü birçok biyomolekülün geçiş dipol momentleri tam olarak hizalanmamıştır. Bu nedenle polarizasyon duyarsızlığına sahip plazmonik algılama cihazlarına ihtiyaç vardır. Bu bağlamda sunulan rüzgar gülü şekilli mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çalışılan frekans aralığında kutuplanma bağımlılığı sorununu çözmekte ve ayarlanabilir çift bantlı rezonanslar sağlamaktadır. Şekil 3.12'de Φ kutuplanma açısının 0°, 45° ve 90° değerleri için soğurum spektrumunun neredeyse aynı kaldığı görülmektedir. Soğurum spektrumu grafiğinde kutuplanma açısının farklı değerlerinde çakışmayı önlemek için eğriler 1'er kaydırılarak çizdirilmiştir.



Şekil 3.13. Altın nanoparçacıklar alt ara yüzeyinde $f_{1} = 75.54$ THz için (a) yük yoğunluğu dağılımı, (b) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). $f_2 = 105.42$ THz için (c) Yük yoğunluğu dağılımı, (d) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). (L1 = 800 nm, L2 = 800 nm, k = 200 nm, $P_x = P_y = 2200$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_S = 90$ nm.)

Tasarlanan rüzgar gülü şekilli nanoanten dizisinin rezonans modlarındaki yük yoğunluğu ile elektrik alan dağılımları bize soğurum rezonanslarının kökeni hakkında fikir verir. Şekil 3.13.a'da düşük frekans modu için altın nanoparçacıkların alt ara yüzeyinde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Şekil 3.13.b'de ise düşük frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı $(|E|/|E_i|)$ görülmektedir. Elektrik alan, şekil 3.13.a'da görüldüğü üzere nanoparçacıkların dipolar karakteristiği sebebiyle uç kısımlarda oldukça fazladır. Yüksek frekans modu için şekil 3.13.c'de altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Bu modda yine yüklerin nanoparçacıkların uç kısımlarında dağıldığı görülmektedir. Yüksek frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Yüksek frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Bu modda yine yüklerin nanoparçacıkların uç kısımlarında dağıldığı görülmektedir. Yüksek frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$) şekil 3.13.d'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımının düşük ve yüksek frekans modunda rüzgar gülü şekilli nanoanten dizisinin uç kısımlarında oldukça fazla olduğu ve bu modlar için sırasıyla gelen ışığın şiddetine oranla 80 ve 50 kattan daha fazla güçlendirildiği görülmektedir.

Tasarlanan nanoanten dizisinin elektrik alan değerlerinin yüksek olması ile madde-ışık etkileşimi artacağı için sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi yüksek elektrik alan değerleri ile SEIRA tekniği kullanılarak biyosensör uygulamalarında kullanılabilir.



Şekil 3.14. y = 0 düzleminde altın nanoparçacıklar ile altın tabaka düzlemi arasında manyetik alan dağılımı (a) $f_{I} = 75.54$ THz için (|H|/|H_i|), (b) $f_{2} = 105.42$ THz için (|H|/|H_i|). (*L1* = 800 nm, *L2* = 800 nm, k = 200 nm, $P_{x} = P_{y} = 2200$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_{S} = 90$ nm.)

Soğurum rezonanslarının fiziksel kökenini daha iyi anlayabilmek için altın nanoparçacıklar ve altın tabaka düzlemi arasındaki bölgede manyetik alan dağılımı incelenmiştir. Altın nanoparçacıkların yüzey plazmon rezonansı ile bu parçacıkların altın tabaka düzlemi arasındaki yakın alan kuplajı anti-paralel akımlara neden olmaktadır. Bu anti-paralel akımlar dielektrik tabakada daha yüksek manyetik alan dağılımına sebep olmaktadır. Şekil 3.14.a'da düşük frekans modu için y = 0 düzleminde dielektrik tabaka içinde manyetik alan genliğinin gelen ışığın manyetik alan genliğine oranla 10 kattan fazla artırıldığı görülmektedir. Şekil 3.14.b'de ise yüksek frekans modunda aynı durumun 15 kattan fazla olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.15. (a) Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kaplama ortamı ile şematik görünümü. (b) Soğurum spektrumlarının kaplama ortamının kırılma indisine bağımlılığı. (c) Her spektrumun rezonans dalga boyunun, kaplama ortamının kırılma indisine bağımlılığı. (L1 = 800 nm, L2 = 800 nm, k = 200 nm, $t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 90$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm.)

Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kırılma indisi hassasiyetini elde edebilmek için yapının üzeri şekil 3.15.a'da gösterildiği gibi 250 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanarak simüle edilmiştir. Yapının yüksek yakın alan güçlendirmesi sayesinde, kaplama ortamının, altın nanoparçacıkların yakın alanlarıyla etkileşime girerek mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin rezonant özelliklerini kuvvetli bir şekilde etkilediği görülmüştür. Böylelikle kaplama ortamının artan kırılma indisi şekil 3.15.b'de gösterildiği gibi soğurum spektrumunda kaymaya sebep olur. Ayrıca çalışılan frekans aralığında n = 1'den büyük kırılma indislerinde 3. ve / veya 4. rezonans noktalarının da oluştuğu görülmektedir. Yapının algılama analizi için toplu kırılma indisi hassasiyeti (η), rezonans dalga boyundaki değişimin ($\Delta\lambda$), kaplama ortamının kırılma indisindeki değişimine (Δ n) oranı: $\eta = \Delta\lambda / \Delta n$ (nm RIU⁻¹) ifadesinden ya da şekil 3.15.c'de gösterilen eğim ifadesi kullanılarak da elde edilebilir. Yararlılık katsayısı ise (Figure of Merit; FOM), toplu kırılma indisi hassasiyetinin (η), yarı doruk genişliğine Γ (Full Width Half Maximum; FWHM) oranı ifadesinden : FOM = η / Γ [103] elde edilmiştir. Düşük ve yüksek frekans modları için hesaplanan toplu kırılma indisi hassasiyetleri sırasıyla 1296 nm RIU⁻¹ ve 835 nm RIU⁻¹'dır. Ayrıca düşük ve yüksek frekans modları için yararlılık katsayıları sırasıyla 2.88 ve 3.22 olarak hesaplanmıştır. Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve böylelikle önerilen yapının kırılma indisi algılama uygulamalarında kullanılabileceği görülmüştür.

3.2.3. T#3

Bu çalışmada, dört adet ikizkenar üçgenden oluşan uçurtma şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin karakterizasyonu ve tasarımı simüle edilmiştir. Yapıyı oluşturan tabaka kalınlıkları ve geometrik parametre değişiminin simülasyonları ile rezonans modların spektral tepkisi ve ayarlanabilirliği nanoanten dizisi için analiz edilmiştir. Biyoalgılama uygulamaları için kritik bir çalışma olan polarizasyon duyarsızlığı farklı kutuplanma açıları için incelenmiştir. Yük yoğunluğu dağılımları ile rezonans modları için elektrik ve manyetik alan dağılımlarının soğurum spektrumları incelenmiştir. Uçurtma şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının fiziksel kökeni araştırılmıştır. Ayrıca, tasarlanan nanoanten dizisi farklı kırılma indisine sahip ortamlara yerleştirilerek bu ortamlarda geometrik parametre değişimlerinin her iki rezonans üzerindeki etkisi ve yararlılık katsayısı (figure-of-merit; FOM) ile kırılma indisi hassasiyetinin (refractive index sensitivity; RIS) algılama performansı incelenmiştir.



Şekil 3.16. (a) Uçurtma şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi, yukarıdan aşağıya doğru katmanlar, Au nanoanten dizileri, Ti yapıştırma katmanı, SiO₂ dielektrik katman, Au film katmanı ve Si substrat. (b) Soğurum spektrum cevabı.

Şekil 3.16.a'da uçurtma şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi gösterilmektedir. Uçurtma şekli 4 adet ikizkenar üçgen ve bu üçgenlerin ortasında bir kenar uzunluğu s = 200 nm olan karesel boşluklu bölgeden oluşmaktadır. İkizkenar üçgenlerin dik kenar uzunlukları L1 = L2 = 800 nm olarak belirlenmiştir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 2200$ nm'dir. Nanoanten dizisi, silikon (Si) üzerinde kaplı altın (Au) tabaka üzerine dielektrik ara katman silisyum dioksit (SiO₂) ve yapıştırma katmanı titanyum (Ti) üzerinde uçurtma şeklindeki yapıdan oluşmaktadır. Yapıyı oluşturan blokların kalınlığı aşağıdan yukarıya, Si = 500 nm, Au = 100 nm, SiO₂ = 90 nm, Ti = 5 nm, üçgen altın nanoparçacıkların kalınlığı ise 110 nm'dir. Simülasyonlar x polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z ekseni boyunca kullanılmıştır. Ayrıca simülasyonlar yapılırken kullanılan geniş bant düzlem dalga kaynağının nanoanten dizisi üzerine dik konumlanmış k vektörü şekil 3.16.a'da gösterilmektedir.

Uçurtma şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin soğurum spektral cevabı şekil 3.16.b'de gösterilmektedir. Nanoanten dizisinin, soğurum (absorbance; A) spektrumu A = 1 - R - T formülü ile hesaplanmıştır [102]. Bu formülde R parametresi ile yansıma (reflectance) ve T parametresi ile iletim (transmittance) değerleri ifade edilmektedir. Formülden anlaşılacağı üzere mükemmel soğurum elde edebilmek için yansıma ve iletim olmamalıdır. Şekil 3.16.b'de görüldüğü gibi uçurtma şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çift bant rezonans cevabına sahiptir.

Tasarlanan nanoanten dizisi için elde edilen spektral cevap, dizinin periyodu, altın nanoparçacıkların kalınlığı, dielektrik ara katman kalınlığı gibi parametrelere bağlı olduğu kadar rezonatör görevi gören anten dizilerinin L1, L2, s gibi boyut parametrelerine de bağımlıdır.



Şekil 3.17. (a) Uçurtma şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin enine kesit şematik gösterimi. (t_S , SiO₂ kalınlığını, t_{Au} , altın nanoparçacık kalınlığını temsil etmektedir.) (b) $t_S = 90$ nm ve $t_{Au} = 110$ nm için soğurum spektrumu, (c) $f_1 = 88.07$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi, (d) $f_2 = 125.66$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi.

Tabaka kalınlığının soğurum genliğine etkisini inceleyebilmek için dielektrik ara katman (SiO₂) kalınlığı (t_S) ve altın nanoparçacık kalınlığı (t_{Au}) 10 nm'den başlanarak 160 nm'ye kadar 30'ar nm aralıklarla değiştirilmiştir. Şekil 3.17.a'da tasarlanan parçacık tabanlı nanoanten dizisinin kesit görünüşü ve kalınlık ifadelerinin şematik

gösterimi verilmiştir. Şekil 3.17.c ve d'de ise sırasıyla düşük frekans modunda ($f_1 = 88.07$ THz, $\lambda_1 = 3403$ nm) ve yüksek frekans modunda ($f_2 = 125.66$ THz, $\lambda_2 = 2385$ nm) tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi görülmektedir. t_S ve t_{Au} parametrelerinin düşük frekans modu için ara değerlerinde mükemmele yakın soğurum elde edilirken yüksek frekans modunda bu parametrelerin artan değerlerinde mükemmele yakın soğurum elde edilebildiği şekil 3.17.c ve d'de görülmektedir. Bu çalışmada yapılacak simülasyonlarda mükemmel bir soğurum elde edebilmek için t_S ve t_{Au} parametreleri sırasıyla 90 nm ve 110 nm olarak seçilecektir. Şekil 3.17.b'de t_S ve t_{Au} parametrelerinin sırasıyla 90 nm ve 110 nm olarak alınıp diğer geometrik parametrelerin ise L1 = 800 nm, L2 = 800 nm, s = 200 nm, ve $P_x = P_y = 2200$ nm olarak sabit tutulduğu ve mükemmel bir soğurum elde edildiği grafik gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi, (a, b) *L1* değişimi, *L2* = 800 nm ve *s* = 200 nm (c, d) *L2* değişimi, *L1* = 800 nm ve *s* = 200 nm (e, f) *s* değişimi, *L1* = 800 nm ve *L2* = 800 nm. (t_{Au} = 110 nm, t_s = 90 nm ve $P_x = P_y$ = 2200 nm.)

Biyoalgılama uygulamarı için, özellikle SEIRA uygulamalarında, parçacık boyutlarının değiştirilerek plazmonik rezonans frekanslarının ayarlanabilmesi arzu edilen bir durumdur. Bu amaçla; uçurtma şeklindeki yapıyı oluşturan blokların kalınlık değişimlerinin yanı sıra, rezonatör görevi gören altın naoparçacıkların geometrik parametre değişimleri de incelenmiştir. Şekil 3.18.a ve b'de altın nanoparçacıkların boyut parametrelerinden *L1* parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. İncelenen değerlerde düşük ve yüksek frekans modları için, *L1* arttıkça rezonans frekansının daha düşük değerler aldığı gözlenmektedir. Şekil 3.18.c ve d'de ise ikizkenar üçgenin diğer dik kenar uzunluğunu temsil eden *L2* parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için

rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. *L2* uzunluğu arttıkça her iki mod için de rezonans frekansı değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.11.e ve f'de ikizkenar dik üçgenlerin arasındaki karesel boşluklu bölgenin bir kenar uzunluğunu temsil eden *s* parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. Düşük frekans modu için *s* değeri arttıkça rezonans frekans değeri daha yüksek rezonans frekans noktalarına kayarken, yüksek frekans modunda ise daha düşük frekans noktalarına kayma göstermektedir. Altın nanoparçacıkların parametre değişimleri incelenirken tabaka kalınlıkları ve dizinin periyodu sırasıyla $t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 90$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm olarak alınmıştır.



Şekil 3.19. Soğurum spektrumuna kutuplanma açısının etkisi ve "*k*" vektörünün birim hücreye göre yönelimi. (Eğriler çakışmayı önlemek için 1'er kaydırılarak çizdirilmiştir.)

Mükemmel soğurucuların spektral tepkilerinin geometrilerine bağlı olarak kutuplanmaya duyarlı olması, bu aygıtların biyoalgılama sistemlerinde kullanımı için bir kısıtlamadır. Bu nedenle polarizasyon duyarsızlığına sahip plazmonik algılama cihazlarına ihtiyaç vardır. Bu bağlamda sunulan uçurtma şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çalışılan frekans aralığında kutuplanma bağımlılığı sorununu çözmekte ve ayarlanabilir çift bantlı rezonanslar sağlamaktadır. Şekil 3.19'da Φ kutuplanma açısının 0°, 45° ve 90° değerleri için soğurum spektrumunun neredeyse aynı kaldığı görülmektedir. Soğurum spektrumu grafiğinde kutuplanma açısının farklı değerlerinde çakışmayı önlemek için eğriler 1'er kaydırılarak çizdirilmiştir.



Şekil 3.20. Altın nanoparçacıklar alt ara yüzeyinde $f_1 = 88.07$ THz için (a) yük yoğunluğu dağılımı, (b) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). $f_2 = 125.66$ THz için (c) Yük yoğunluğu dağılımı, (d) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). (L1 = 800 nm, L2 = 800 nm, s = 200 nm, $P_x = P_y = 2200$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_S = 90$ nm.)

Sunulan uçurtma şeklindeki nanoanten dizisinin rezonans modlarındaki yük yoğunluğu ile elektrik alan dağılımları bize soğurum rezonanslarının fiziksel kökeni hakkında fikir verir. Şekil 3.20.a'da düşük frekans modu için altın nanoparçacıkların alt ara yüzeyinde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Şekil 3.20.b'de ise düşük frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$) görülmektedir. Elektrik alan, şekil 3.20.a'da görüldüğü üzere nanoparçacıkların dipolar karakteristiği sebebiyle uç kısımlarda oldukça fazladır. Yüksek frekans modu için şekil 3.20.c'de altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Bu rezonans modunda yine yüklerin nanoparçacıkların uç kısımlarında dağıldığı görülmektedir. Yüksek frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$) şekil 3.20.d'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımının düşük ve yüksek frekans modunda uçurtma şeklindeki nanoanten dizisinin uç kısımlarında oldukça fazla olduğu ve bu modlar için sırasıyla gelen ışığın şiddetine oranla 60 ve 50 kattan daha fazla güçlendirildiği görülmektedir. Sunulan nanoanten dizisinin elektrik alan değerlerinin yüksek olması ile madde-ışık etkileşimi artacağı için tasarlanan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi yüksek elektrik alan değerleri ile SEIRA tekniği kullanılarak biyosensör uygulamalarında kullanılabilir.



Şekil 3.21. y = 0 düzleminde altın nanoparçacıklar ile altın tabaka düzlemi arasında manyetik alan dağılımı (a) $f_1 = 88.07$ THz için ($|H|/|H_i|$), (b) $f_2 = 125.66$ THz için ($|H|/|H_i|$). (L1 = 800 nm, L2 = 800 nm, s = 200 nm, $P_x = P_y = 2200$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_s = 90$ nm.)

Soğurum rezonans modlarının fiziksel kökenini daha iyi anlayabilmek için altın nanoparçacıklar ve altın tabaka düzlemi arasındaki bölgede manyetik alan dağılımı incelenmiştir. Altın nanoparçacıkların yüzey plazmon rezonansı ile bu parçacıkların altın tabaka düzlemi arasındaki yakın alan kuplajı anti-paralel akımlara neden olmaktadır. Bu anti-paralel akımlar dielektrik tabakada daha yüksek manyetik alan dağılımına sebep olmaktadır. Şekil 3.21.a'da düşük frekans modu için dielektrik tabaka içinde manyetik alan genliğinin y = 0 düzleminde gelen ışığın manyetik alan genliğine oranla 8 kattan fazla artırıldığı görülmektedir. Şekil 3.21.b'de ise yüksek frekans modunda aynı durumun 10 kata yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 3.22. (a) Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kaplama ortamı ile şematik görünümü. (b) Soğurum spektrumlarının kaplama ortamının kırılma indisine bağımlılığı. (c) Her spektrumun rezonans dalga boyunun, kaplama ortamının kırılma indisine bağımlılığı. (L1 = 800 nm, L2 = 800 nm, s = 200 nm, $t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 90$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm.)

Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kırılma indisi hassasiyetini elde edebilmek için yapının üzeri şekil 3.22.a'da gösterildiği gibi 250 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik (n = 1, n = 1.25, n = 1.5, n = 1.75, n = 2) malzemeler ile kaplanarak simüle edilmiştir. Yapının yüksek yakın alan güçlendirmesi sayesinde, kaplama ortamının, altın nanoparçacıkların yakın alanlarıyla etkileşime girerek mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin rezonant özelliklerini kuvvetli bir şekilde etkilediği görülmüştür. Böylelikle kaplama ortamının artan kırılma indisi şekil 3.22.b'de gösterildiği gibi soğurum spektrumunda kaymaya sebep olur. Yapının algılama analizi için toplu kırılma indisi hassasiyeti (η), rezonans dalga boyundaki değişimin ($\Delta\lambda$), kaplama ortamının kırılma indisindeki değişimine (Δn) oranı: $\eta = \Delta \lambda / \Delta n$ (nm RIU⁻¹) ifadesinden va da şekil 3.22.c'de gösterilen eğim ifadesi kullanılarak da elde edilebilir. Yararlılık katsayısı ise (Figure of Merit; FOM), toplu kırılma indisi hassasiyetinin (η) , genişliğine Γ (Full Width Half Maximum; FWHM) yarı doruk oranı ifadesinden : FOM = η / Γ [103] elde edilmiştir. Düşük ve yüksek frekans modları için hesaplanan toplu kırılma indisi hassasiyetleri sırasıyla 1231 nm RIU⁻¹ ve 916 nm RIU⁻¹'dır. Ayrıca düşük ve yüksek frekans modları için yararlılık katsayıları sırasıyla 2.49 ve 4.74 olarak hesaplanmıştır. Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve böylelikle önerilen yapının kırılma indisi algılama uygulamalarında kullanılabileceği görülmüştür.

3.2.4. T#4

Bu çalışmada, orta kızılötesi bölgede çalışan parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin karakterizasyonu ve tasarımı simüle edilmiştir. Yapıyı oluşturan tabaka kalınlıkları ve geometrik parametre değişiminin simülasyonları ile rezonans modların spektral tepkisi ve ayarlanabilirliği nanoanten dizisi için analiz edilmiştir. Biyoalgılama uygulamaları için kritik bir çalışma olan polarizasyon duyarsızlığı farklı kutuplanma açıları için incelenmiştir. Yük yoğunluğu dağılımları ile rezonans modları için manyetik ve elektrik alan dağılımlarının soğurum spektrumları incelenmiştir. Parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının yatay ve dikey altın parçacıklar arasındaki yakın alan kuplajından ve parçacıkların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.23. (a) Birbirlerine göre dik konumlu yatay ve dikey ikili nanoparçacıklardan oluşan mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi, yukarıdan aşağıya doğru katmanlar, Au nanoanten dizileri, Ti yapıştırma katmanı, Al₂O₃ dielektrik katman, Au film katmanı ve Si substrat. (b) Soğurum spektrum cevabı.

Şekil 3.23.a'da parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi gösterilmektedir. Burada L = 600 nm, altın nanoparçacıkların uzunluğunu, W = 100 nm

genişliğini, D = 400 nm altın nanoparçacıklar arasındaki mesafeyi göstermektedir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 2200$ nm'dir. Nanoanten dizisi, silikon (Si) üzerinde kaplı altın (Au) tabaka üzerine dielektrik ara katman alüminyum oksit (Al₂O₃) ve yatay ve dikey olarak yerleştirilmiş ikili altın nanoparçacıkların altına yerleştirilen titanyum (Ti) yapıştırıcıdan oluşmaktadır. Yapıyı oluşturan blokların kalınlığı aşağıdan yukarıya, Si = 500 nm, Au = 100 nm, Al₂O₃ = 90 nm, Ti = 5 nm, birbirlerine dik olarak konumlandırılmış altın nanoparçacıkların kalınlığı ise 110 nm'dir. Simülasyonlar x polarizasyonlu ışık kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z ekseni boyunca kullanılmıştır. Ayrıca simülasyonlar yapılırken kullanılan geniş bant düzlem dalga kaynağının nanoanten dizisi üzerine dik konumlanmış *k* vektörü şekil 3.23.a'da gösterilmektedir.

Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin soğurum spektral cevabı şekil 3.23.b'de gösterilmektedir. Nanoanten dizisinin, soğurum (absorbance; A) spektrumu A = 1 - R - T formülü ile hesaplanmıştır [102]. Bu formülde R parametresi ile yansıma (reflectance) ve T parametresi ile iletim (transmittance) değerleri ifade edilmektedir. Formülden anlaşılacağı üzere mükemmel soğurum elde edebilmek için yansıma ve iletim olmamalıdır. Şekil 3.23.b'de görüldüğü gibi parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çift bant rezonans cevabına sahiptir.



Şekil 3.24. (a) Birbirlerine göre dik konumlu yatay ve dikey ikili nanoparçacıklardan oluşan mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin enine kesit şematik gösterimi. (t_S , Al₂O₃ kalınlığını, t_{Au} , nanoparçacık kalınlığını temsil altın etmektedir.) (b) $t_S = 90$ nm ve $t_{Au} = 110$ nm için soğurum spektrumu, (c) $f_1 = 111.21$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi, (d) $f_2 = 176.74$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi.

Tasarlanan nanoanten dizisi için elde edilen spektral cevap, dizinin periyodu, altın nanoparçacıkların kalınlığı, dielektrik ara katman kalınlığı gibi parametrelere bağlı olduğu kadar rezonatör görevi gören anten dizilerinin L, W, D gibi boyut parametrelerine de bağımlıdır.

Tabaka kalınlığının soğurum genliğine etkisini inceleyebilmek için dielektrik ara katman (Al₂O₃) kalınlığı (t_S) ve altın nanoparçacık kalınlığı (t_{Au}) 10 nm'den başlanarak 160 nm'ye kadar 30'ar nm aralıklarla değiştirilmiştir. Şekil 3.24.a'da tasarlanan parçacık tabanlı nanoanten dizisinin kesit görünüşü ve kalınlık ifadelerinin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 3.24.c ve d 'de ise sırasıyla düşük frekans modunda ($f_1 = 111.21$ THz, $\lambda_1 = 2695$ nm) ve yüksek frekans modunda ($f_2 = 176.74$ THz, $\lambda_2 = 1696$ nm) tabaka kalınlığı değişiminin soğurum genliğine etkisi görülmektedir. t_S ve t_{Au} parametrelerinin yüksek ve düşük değerlerinde soğurum genliğinin düştüğü şekil 3.24.c ve d'de görülmektedir. Bu çalışmada yapılacak simülasyonlarda mükemmel bir soğurum elde edebilmek için t_S ve t_{Au} parametreleri sırasıyla 90 nm ve 110 nm olarak seçilecektir. Şekil 3.24.b'de t_S ve t_{Au} parametrelerinin sırasıyla 90 nm ve 110 nm olarak alınıp diğer geometrik parametrelerin ise L = 600 nm, W = 100 nm, D = 400 nm, ve $P_x = P_y = 2200$ nm olarak sabit tutulduğu ve mükemmel bir soğurum elde edildiği grafik gösterilmektedir.



Şekil 3.25. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi, (a, b) W değişimi, D = 400 nm ve L = 600 nm, (c, d) L değişimi, W = 100 nm ve D = 400 nm, (e, f) D değişimi, L = 600 nm ve W = 100 nm. ($t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 90$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm.)

Biyoalgılama uygulamarı için, özellikle SEIRA uygulamalarında, parçacık boyutlarının değiştirilerek plazmonik rezonans frekanslarının ayarlanabilmesi arzu edilen bir
durumdur. Bu amaçla; yapıyı oluşturan blokların kalınlık değişimlerinin yanı sıra, rezonatör görevi gören altın nanoparçacıkların geometrik parametre değişimleri de incelenmiştir. Şekil 3.25.a ve b'de altın nanoparçacıkların genişliğini temsil eden W parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. İncelenen değerlerde düşük ve yüksek frekans modunda, W parametresinin artan değerleri için rezonans frekansının düştüğü gözlenmektedir. Şekil 3.25.c ve d'de ise altın nanoparçacıkların uzunluğunu temsil eden L parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmistir. L uzunluğu arttıkça düsük ve yüksek frekans modu için rezonans frekansı değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.25.e ve f'de altın nanoparçacıklar arasındaki mesafeyi temsil eden D parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. Düşük frekans modu için altın nanoparçacıklar arasındaki mesafe arttıkça rezonans frekansının da arttığı görülürken yüksek frekans modu için bu durumun tam tersi olduğu görülmektedir. Altın nanoparçacıkların parametre değişimleri incelenirken tabaka kalınlıkları ve dizinin periyodu sırasıyla $t_{Au} = 110$ nm, $t_S = 90$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm olarak alınmıştır.



Şekil 3.26. Soğurum spektrumuna kutuplanma açısının etkisi ve "*k*" vektörünün birim hücreye göre yönelimi. (Eğriler çakışmayı önlemek için 1'er kaydırılarak çizdirilmiştir.)

Mükemmel soğurucuların spektral tepkilerinin geometrilerine bağlı olarak kutuplanmaya duyarlı olması, bu aygıtların biyoalgılama sistemlerinde kullanımı için bir kısıtlamadır. Bu nedenle polarizasyon duyarsızlığına sahip plazmonik algılama cihazlarına ihtiyaç vardır. Bu bağlamda sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çalışılan frekans aralığında kutuplanma bağımlılığı sorununu çözmekte ve ayarlanabilir

çift bantlı rezonanslar sağlamaktadır. Şekil 3.26'da Φ kutuplanma açısının 0°, 45° ve 90° değerleri için soğurum spektrumunun neredeyse aynı kaldığı görülmektedir. Soğurum spektrumu grafiğinde kutuplanma açısının farklı değerlerinde çakışmayı önlemek için eğriler 1'er kaydırılarak çizdirilmiştir.



Şekil 3.27. Altın nanoparçacıklar alt ara yüzeyinde $f_{1} = 111.21$ THz için (a) yük yoğunluğu dağılımı, (b) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). $f_{2} = 176.75$ THz için (c) yük yoğunluğu dağılımı, (d) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). (L = 600 nm, W = 100 nm, D = 400 nm, $P_x = P_y = 2200$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_S = 90$ nm.)

Tasarlanan mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin rezonans modlarındaki yük yoğunluğu ile elektrik alan dağılımları bize soğurum rezonanslarının kökeni hakkında fikir verir. Şekil 3.27.a'da düşük frekans modu için altın nanoparçacıkların alt ara yüzeyindede yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. X eksenine paralel yatay yönlendirilmiş ikili nanoparçacıklar etrafında yüklerin dipolar bir salınımı görülmektedir. Şekil 3.27.b'de ise düşük frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$) görülmektedir. Elektrik alan, şekil 3.27.a'da görüldüğü üzere yatay yönlendirilmiş nanoparçacıkların dipolar karakteristiği sebebiyle uç kısımlarda oldukça fazladır. Yüksek frekans modu için şekil

3.27.c'de altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Bu modda yüklerin dikey yönlendirilmiş ikili nanoparçacıklar üzerinde dağıldığı görülmektedir. Yüksek frekans modu için altın nanoparçacıkların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$) şekil 3.27.d'de verilmiştir. Şekil 3.27.b ve d'de sırasıyla elektrik alan dağılımının yatay ve dikey ikili nanoparçacıkların uç kısımlarında gelen ışığın şiddetine oranla 100 kattan ve 40 kattan fazla güçlendirildiği görülmektedir. Tasarlanan nanoanten dizisinin elektrik alan değerlerinin yüksek olması ile madde-ışık etkileşimi artacağı için sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi yüksek elektrik alan değerleri ile SEIRA tekniği kullanılarak biyosensör uygulamalarında kullanılabilir.



Şekil 3.28. y = 0 düzleminde altın nanoparçacıklar ile altın tabaka düzlemi arasında manyetik alan dağılımı (a) $f_{I} = 111.21$ THz için (|H|/|H_i|), (b) $f_{2} = 176.75$ THz için (|H|/|H_i|). (L = 600 nm, W = 100 nm, D = 400 nm, $P_{x} = P_{y} = 2200$ nm, $t_{Au} = 110$ nm ve $t_{S} = 90$ nm.)

Soğurum rezonans modlarının fiziksel kökenini daha iyi anlayabilmek için altın nanoparçacıklar ve altın tabaka düzlemi arasındaki bölgede manyetik alan dağılımı incelenmiştir. Altın nanoparçacıkların yüzey plazmon rezonansı ile bu parçacıkların altın tabaka düzlemi arasındaki yakın alan kuplajı anti-paralel akımlara neden olmaktadır. Bu anti-paralel akımlar dielektrik tabakada daha yüksek manyetik alan dağılımına sebep olmaktadır. Şekil 3.28.a'da düşük frekans modu için dielektrik tabaka içinde manyetik alan genliğinin y = 0 düzleminde gelen ışığın manyetik alan genliğine oranla 10 kattan fazla artırıldığı görülmektedir. Şekil 3.28.b'de ise yüksek frekans modunda aynı durumun 15 kata yaklaştığı görülmektedir. Şekil 3.27 ve 3.28'deki sonuçlar soğurum rezonanslarının fiziksel kökeni hakkında bilgi vermektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere soğurumun sebebi yatay ve dikey nanoparçacıklar yüzeyindeki yük salınımlarıdır,

bu altın parçacıklar gelen ışık enerjisini yakın alan kuplajıyla yakalar ve bu enerjiyi altın tabaka düzlemiyle altın nanoparçacıkların sebep olduğu anti-paralel akımların omik kayıplarıyla dağıtır.



4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, spektroskopi uygulamalarında kullanılmak üzere çift bant frekans cevabına sahip parçacık tabanlı plazmonik mükemmel soğurucu nanoanten dizileri literatüre sunulmuştur. Kızılötesi bölgede çalışan parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizilerinin karakterizasyonu ve tasarımı simüle edilmiştir. Yapıları oluşturan tabaka kalınlıkları ve geometrik parametre değişiminin simülasyonları ile rezonans modların spektral tepkisi ve ayarlanabilirliği nanoanten dizisi için analiz edilmiştir. T#1 calısmasında; akım ve yük voğunluğu dağılımlarının yanı sıra rezonans modları icin manyetik ve elektrik alan dağılımlarının soğurum spektrumları incelenmiştir. Asimetrik π şeklindeki parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının yatay ve dikey altın parçacıklar arasındaki yakın alan kuplajından ve parçacıkların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, tasarlanan nanoanten dizisi farklı kırılma indisine sahip ortamlara yerleştirilerek bu ortamlarda geometrik parametre değişimlerinin her iki rezonans üzerindeki etkisi ve yararlılık katsayısı (figure-of-merit; FOM) ile kırılma indisi hassasiyetinin (refractive index sensitivity; RIS) algılama performansı incelenmiştir. Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve böylelikle önerilen yapının kırılma indisi algılama uygulamalarında kullanılabileceği görülmüştür. Bunlara ek olarak SEIRA uygulamalarındaki potansiyel kullanımını göstermek adına, konformal bir poli (metil metakrilat) tabakasının karbonil v(C=O) germe modunun algılanması da analiz edilmiştir. T#2 çalışmaşında; biyoalgılama uygulamaları için kritik bir çalışma olan polarizasyon duyarsızlığı farklı kutuplanma açıları için incelenmiştir. Yük

voğunluğu dağılımları ile rezonans modları icin elektrik alan dağılımlarının soğurum spektrumları incelenmiştir. Rüzgar gülü şekilli mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının fiziksel kökeni araştırılmıştır. Ayrıca, tasarlanan nanoanten dizisi farklı kırılma indisine sahip ortamlara yerleştirilerek bu ortamlarda geometrik parametre değisimlerinin her iki rezonans üzerindeki etkisi ve yararlılık katsayısı (figure-of-merit; FOM) ile kırılma indisi hassasiyetinin (refractive index sensitivity; RIS) algılama performansı incelenmiştir. T#3 çalışmasında; biyoalgılama uygulamaları için kritik bir çalışma olan polarizasyon duyarsızlığı farklı kutuplanma açıları için incelenmiştir. Yük voğunluğu dağılımları ile rezonans modları icin elektrik ve manyetik alan dağılımlarının soğurum spektrumları incelenmiştir. Uçurtma şeklindeki mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının fiziksel kökeni araştırılmıştır. Ayrıca, tasarlanan nanoanten dizisi farklı kırılma indisine sahip ortamlara yerleştirilerek bu ortamlarda geometrik parametre değişimlerinin her iki rezonans üzerindeki etkisi ve yararlılık katsayısı (figure-of-merit; FOM) ile kırılma indisi hassasiyetinin (refractive index sensitivity; RIS) algılama performansı incelenmiştir. T#4 çalışmasında; yük yoğunluğu dağılımları ile rezonans modları için manyetik ve elektrik alan dağılımlarının soğurum spektrumları incelenmiştir. Parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının yatay ve dikey altın parçacıklar arasındaki yakın alan kuplajından ve parçacıkların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

Tasarlanan nanoanten dizisinin elektrik alan değerlerinin yüksek olması ile madde-ışık etkileşimi artacağı için sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi yüksek elektrik alan değerleri ile SEIRA tekniği kullanılarak biyosensör uygulamalarında kullanılabilir. Sonuç olarak literatüre sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizileri, yüksek soğurum değerleri ve yüksek yakın alan dağılımları sayesinde elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde biyoalgılama ve spektroskopi uygulamalarında kullanılabilecek çift bant özellik gösteren karakteristiğe sahiptirler. Bu sayede sunulan 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 nanoanten dizileri farklı rezonans frekanslarında da kullanılabilme avantajına sahiptirler.

Tez çalışmasında sunulan yapılardan T#1 ve T#4 çalışmaları Science Citation Index (SCI)'da taranan dergilerde sunulmak üzere hazırlanmaktadır. Gelecekte ise bu tez kapsamında tasarlanan ve nümerik analizleri gerçekleştirilen mükemmel soğurucu nanoanten dizilerinin deneysel çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve nanoanten dizilerinin üretilmesi hedeflenmektedir.



KAYNAKÇA

- Bharadwaj, P., Deutsch, B., Novotny, L., 2009. Optical antennas. Advances in Optics and Photonics, 1 (3): 438-483.
- Novotny, L., 2007. The history of near-field optics. Progress in Optics, 50: 137–184.
- Wessel, J., 1985. Surface-enhanced optical microscopy. Journal of the Optical Society of America B, 2 (9): 1538–1540.
- Anger, P., Bharadwaj, P., Novotny, L., 2006. Enhancement and quenching of single molecule fluorescence. Physical Review Letters, 96 (11): 113002.
- Kühn, S., Hakanson, U., Rogobete, L., Sandoghdar, V., 2006. Enhancement of single-molecule fluorescence using a gold nanoparticle as an optical nanoantenna. Physical Review Letters, 97 (1): 017402.
- Binnig, G., Rohrer, H., 1982. Scanning tunneling microscopy. Helvetica Physica Acta, 55 (6): 726–735.
- Fleischmann, M., Hendra, P. J., McQuillian, A. J., 1974. Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode. Chemical Physics. Letters, 26 (2): 163–166.
- Jeanmaire, D. L., Duyne, R. P. V., 1977. Surface Raman spectroelectrochemistry: part I. Heterocyclic, aromatic, and aliphatic amines adsorbed on the anodized silver electrode. Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, 84 (1): 1–20.
- Albrecht, M. G., Creighton, J. A., 1977. Anomalously intense Raman spectra of pyridine at a silver electrode. Journal of the American Chemical Society, 99 (15): 5215–5217.
- 10. Gersten, J., Nitzan, A., 1980. Electromagnetic theory of enhanced Raman scattering of molecules adsorbed on rough surfaces. The Journal of Chemical Physics 73 (7): 3023–3037.
- Wokaun, A., Gordon, J., Liao, P., 1982. Radiation damping in surfaceenhanced Raman scattering. Physical Review Letters 48 (22): 957–960.
- 12. Boardman, A. D., 1982. Electromagnetic Surface Modes. Wiley, 776 pp.
- Metiu, H., 1984. Surface enhanced spectroscopy. Progress in Surface Science, 17 (3-4): 153–320.

- Meier, M., Wokaun, A., Liao, P. F., 1985. Enhanced fields on rough surfaces: dipolar interactions among particles of sizes exceeding the Raleigh limit. Journal of the Optical Society of America B, 2 (6): 931–949.
- 15. Pohl, D. W., 2000. Near-field optics seen as an antenna problem. World Scientific, 9–21.
- Englund, D., Faraon, A., Fushman, I., Stoltz, N., Petroff, P., Vuckovic, J., 2007. Controlling cavity reflectivity with a single quantum dot. Nature, 450 (7171): 857-861.
- 17. Akahane, Y., Asano, T., Song, B. S., Noda, S., 2003. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal. **Nature**, **425** (6961): 944-947.
- Altug, H., Englund, D., Vuckovic, J., 2006. Ultrafast photonic crystal nanocavity laser. Nature Physics, 2 (7): 484-488.
- Lee, K., Asher, S. A., 2000. Photonic crystal chemical sensors: pH and ionic strength. Journal of American Chemical Society, 122 (39): 9534-9537.
- 20. Chow, E., Grot, A., Mirkarimi, L. W., Sigalas, M., Girolami, G., 2004. Ultracompact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity. **Optics Letters 29**, (10): 1093-1095.
- Barnes, W. L., Dereux, A., Ebbesen, T. W., 2003. Surface plasmon subwavelength optics. Nature, 424 (6950): 824-830.
- Melville, D. O. S., Blaikie, R. J., 2005. Super-resolution imaging through a planar silver layer. Optics Express, 13 (6): 2127-2134.
- 23. Ritchie, R. H., 1957. Plasma losses by fast electrons in thin films. Physical Review, 106 (5): 874.
- 24. Atwater, H. A., 2007. The promise of plasmonics. Scientific American, 296 (4): 56-63.
- Freestone, I., Meeks, N., Sax, M., Higgitt, C., 2007. The Lycurgus cup A roman nanotechnology. Gold Bulletin, 40 (4): 270-277.
- Stewart, M. E., Anderton, C. R., Thompson, L. B., Maria, J., Gray, S. K., Rogers, J. A., Nuzzo, R. G., 2008. Nanostructured plasmonic sensors. Chemical Reviews, 108 (2): 494-521.
- 27. Murray, W. A., Barnes, W. L., 2007. Plasmonic materials. Advanced Materials, 19 (22): 3771- 3782.

- Holland, W. R., Hall, D. G., 1984. Frequency-shifts of an electric-dipole resonance near a conducting surface. Physical Review Letters, 52 (12): 1041-1044.
- 29. Moskovits, M., 1978. Journal of Chemical Physics, 69 (9): 4159.
- Hutter, E., Fendler, J. H., 2004. Exploitation of localized surface plasmon resonance. Advanced Materials, 16 (19): 1685-1706.
- McFarland, A. D., Young, M. A., Dieringer, J. A., Van Duyne, R. P., 2005. Wavelength-scanned surface-enhanced Raman excitation spectroscopy. Journal of Physical Chemistry B, 109 (22): 11279-11285.
- 32. Loo, C., Lin, A., Hirsch, L., Lee, M. H., Barton, J., Halas, N., West, J., Drezek, R., 2004. Nanoshell-enabled photonics-based imaging and therapy of cancer. Technology in Cancer Research & Treatment, 3 (1): 33-40.
- 33. Vuckovic, J., Loncar, M., Scherer, A., 2000. Surface plasmon enhanced lightemitting diode. **IEEE Journal of Quantum Electronics, 36** (10): 1131.
- Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Ghaemi, H. F., Thio, T., Wolff, P. A., 1998. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. Nature, 391 (6668): 667-669.
- 35. Gay, G., Alloschery, O., De Lesegno, B. V., O'Dwyer, C., Weiner, J., Lezec, H. J. 2006. The optical response of nanostructured surfaces and the composite diffracted evanescent wave model. Nature Physics, 2 (4): 262-267.
- 36. Brongersma, M. L., Hartman, J. W., Atwater, H. A., 2000. Electromagnetic energy transfer and switching in nanoparticle chain arrays below the diffraction limit. Physical Review B, 62 (24): 16356-16359.
- Miyazaki, H. T., Kurokawa, Y., 2006. Squeezing visible light waves into a 3-nmthick and 55-nm-long plasmon cavity. Physical Review Letters, 96 (9): 097401.
- Boltasseva, A., Nikolajsen, T., Leosson, K., Kjaer, K., Larsen, M. S., Bozhevolnyi, S. I., 2005. Integrated optical components utilizing long-range surface plasmon polaritons. Journal of Lightwave Technology, 23, (1): 413-422.
- Maier, S. A., 2006. Plasmonics : fundamentals and applications. Springer US, New York, 224 pp.
- Raether, H., 1988. Surface plasmons: on smooth and rough surfaces and on gratings. Springer-Verlag, Berlin, 117 pp.
- 41. Mie, G., 1908. Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen.Annalen der Physik, 330 (3): 377-445.

- 42. Maier, S. A., Atwater, H. A., 2005. Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures. Journal of Applied Physics, 98 (1): 011101-011101-10.
- 43. The numerical simulations are carried out using a finite-difference-time-domain package, Lumerical FDTD[™], (<u>www.lumerical.com</u>), (Erişim tarihi: Mayıs 2019).
- 44. Raman, C. V., Krishnan, K., 1928. A new type of secondary radiation. Nature, 121 (3048): 501-502.
- 45. Garrell, R. L., 1989. Surface-enhanced Raman spectroscopy. Analytical Chemistry, 61 (6): 401A-411A.
- 46. Jensen, T. R., Van Duyne, R. P., Johnson, S. A., Maroni, V. A., 2000. Surfaceenhanced infrared spectroscopy: A comparison of metal island films with discrete and nondiscrete surface plasmons. Applied Spectroscopy, 54 (3): 371-377.
- 47. 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.
- Chen, K., Adato, R., Altug, H., 2012. Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy. ACS Nano, 6 (9): 7998-8006.
- 49. 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.
- Ataka, K., Heberle, J., 2007. Biochemical applications of surface-enhanced infrared absorption spectroscopy. Anal Bioanal Chemical, 388: 47-54.
- 51. 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 As₂S₃ glass. Sensors and Actuators B: Chemical, 175: 142-148
- Sergeant, N. P., Pincon, O., Agrawal, M., Peumans, P., 2009. Design of wideangle solar-selective absorbers using aperiodic metal-dielectric stacks. Optics express, 17 (25): 22800-22812.

- 53. Landy, N., Sajuyigbe, S., Mock, J., Smith, D., Padilla, W., 2008. Perfect metamaterial absorber. **Physical review letters**, **100** (20): 207402.
- 54. Brouard, S., Macias, D., Muga, J., 1994. Perfect absorbers for stationary and wavepacket scattering. Journal of Physics A: Mathematical and General 27 (12): L439.
- 55. Hedayati, M. K., Javaherirahim, M., Mozooni, B., Abdelaziz, R., Tavassolizadeh, A., Chakravadhanula, V. S. K., Zaporojtchenko, V., Strunkus, T., Faupel, F., Elbahri, M., 2011. Design of a perfect black absorber at visible frequencies using plasmonic metamaterials. Advanced Materials, 23 (45): 5410-5414.
- 56. Rhee, J. Y., Yoo, Y. J., Kim, K. W., Kim, Y. J., Lee, P. Y., 2014. Metamaterialbased perfect absorbers. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 28 (13): 1541-1580.
- 57. 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.
- 58. 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.
- 59. 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.
- 60. 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.
- 61. 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.
- 62. 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 brightdark nanoresonators. **Optics Communications**, 380: 267-272.

- 63. 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.
- 64. 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).
- 65. Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., Padilla, W. J., 2008. Perfect metamaterial absorber. **Physical Review Letters**, **100** (20): 207402.
- 66. 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.
- 67. Bağcı, F., Akoğlu, B., 2016. Consequences of unit cell design in metamaterial perfect absorbers. Acta Physica Polonica A, 129 (4): 792-796
- 68. 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.
- 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 metaldielectric-metal elliptical nanodisk array. Optics Express, 19 (16): 15221-15228.
- 70. Li, M. H., Yang, H. L., Hou, X. W., Perfect metamaterial absorber with dual bands. Progress In Electromagnetics Research, 108: 37-49.
- 71. 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.
- 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.
- 73. 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.
- 74. 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.

- 75. Jamali, A. A., Witzigman, B., 2014. Plasmonic perfect absorbers for biosensing applications. **Plasmonics**, **9**: 1265-1270.
- 76. Jamali, A. A., 2015. Optical Antennas for Biosensing Applications. Dissertation For The Acquisition of The academic Degree, University of Kassel, Germany,123 pp.
- 77. 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.
- 78. Smith, D. R., Pendry, J. B., Wiltshire, M. C. K., 2004. Metamaterials and negative refractive index. Science, 305 (5685): 788-792.
- 79. He, S., Cui, Y., Ye, Y., Zhang, P., Jin, Y., 2009. Optical nano-antennas and metamaterials. Materialstoday, 12 (12): 16-24.
- Monticone, F., Alu, A., Metamaterials and plasmonics: From nanoparticles to nanoantenna arrays, metasurfaces, and metamaterials. Chinese Physics B, 23 (4): 047809/1-047809/12.
- 81. Bagheri, S., Strohfeldt, N., Sterl, F., Berrier, A., Tittl, A., Giessen, H., 2016. Largearea low-cost plasmonic perfect absorber chemical sensor fabricated by laser interference lithography. ACS Sensors, 1: 1148-1154.
- 82. 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.
- 83. 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.
- 84. 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.
- 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.

- 86. 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.
- Mulla, B., Sabah, C., 2015. Perfect metamaterial absorber design for solar cell applications. Waves in Random and Complex Media, 25 (3): 382-392.
- Huang, Y., Kim, D. H., 2011. Dark-field microscopy studies of polarizationdependent plasmonic resonance of single gold nanorods: rainbow nanoparticles. Nanoscale, 3: 3228-3232.
- Hu, H., Ma, C., Liu, Z., 2010. Plasmonic dark field microscopy. Applied Physics Letters, 96 (11): 113107.
- 90. 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.
- 91. 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.
- 92. Aslan E., Kaya S., Aslan E., Korkmaz S., Saracoglu O. G., Turkmen M., 2017. Polarization insensitive plasmonic perfect absorber with coupled antisymmetric nanorod array. Sensors and Actuators B: Chemical, 243: 617-625.
- 93. Yee K., 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.
- 94. Taflove A., 1980. Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady state electromagnetic penetration problems. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 22 (3): 191–202.
- 95. Taflove A., Hagness S. C., 2005. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, 978.
- 96. Korkmaz, S., 2015. Biyosensör Uygulamalarında Kullanılabilecek Plazmonik Tabanlı Mükemmel Soğurucuların Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 92 s.
- 97. Eryılmaz, G. S., 2013. Kablosuz Haberleşme Uygulamaları İçin Mikroşerit Beslemeli Yarık Anten Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 60 s.

- 98. Sevgi, L., 1999. Elektromagnetik Problemler ve Sayısal Yöntemler. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 214 pp.
- Inan, U. S., Marshall, R. A., 2011. Numerical Electromagnetics: The FDTD Method. Cambridge University Press, Cambridge, 404 pp.
- 100. 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.
- 101. Palik, E., 1985. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, London, 535 pp.
- 102. Aytaç, O., 2017. Multibant Spektroskopi Uygulamaları İçin Plazmonik Mükemmel Soğurucular. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 137 s.
- 103. Estevez, M.C., Otte, M.A., Sepulveda, B., Lechuga, L.M., 2014. Trends and challenges of refractometric nanoplasmonic biosensors: a review. Analytica Chimica Acta, 806: 55–73.
- 104. Lahiri, B., McMeekin, S.G., La Rue, R.M.D., Johnson, N.P., 2013. Enhanced Fanoresonance of organic material films deposited on arrays of asymmetricsplitring resonators (A-SRRs). Optics Express 21: (9343–9352).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı:	Mustafa KIRLAR						
Uyruğu:	Türkiye (T.C)						
Doğum Tarihi ve Yeri:	14.04.1988 - Kayseri						
Medeni Durum:	Bekar						
e-mail:	mustafakirlar@erciyes.edu.tr						
Yazışma Adresi:	Kocatepe	Mah.	3027.	Sok.	Hilal	Apt.	No:10/34
	Melikgazi/KAYSERİ						

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	ERÜ, Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2019
	Bölümü	
Lisans	ERÜ, Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2012
	Bölümü	
Lise	Kayseri Lisesi (YDA)	2007

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2018-Halen	ERÜ MÜH. FAK.	Araştırma Gör.
2017-2018	KİOSB	Mühendis
2016-2017	HASÇELİK KABLO SAN. ve TİC A.Ş.	Mühendis
2014-2016	ASPİLSAN ENERJİ SAN. ve TİC. A.Ş.	Mühendis
2012-2013	ÇALIK YEDAŞ	Mühendis

YABANCI DİL

İngilizce: 86.25 (YDS – Nisan 2017)

YAYINLAR

- Kirlar, M., Turkmen M., Kaya S., (2016). Optical Characteristics of UT-Shaped Multi-Resonant Metamaterials. NANOTR-12, 3 Haziran, KOCAELİ.
- Kırlar, M., Onur A., Türkmen M., Kaya S., (2016). Spektroskopi Uygulamalarında Kullanılabilecek Parçacık Tabanlı Plazmonik Nanoanten Dizilerinin Tasarımı. VIII. URSI-TÜRKİYE'2016 BİLİMSEL KONGRESİ, 3 Eylül, ANKARA.
- 3. Turkmen M., Kirlar, M., Aslan E., (2018). Fractal plasmonic metamaterials for biosensing applications. 8th NRW Nano-Conference, 21-22 Kasım, Dortmund.