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

PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİ TABANLI BİYOALGILAMA UYGULAMALARI

Hazırlayan Semih KORKMAZ

Danışman Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Doktora Tezi

Ocak 2020 KAYSERİ



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

PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİ TABANLI BİYOALGILAMA UYGULAMALARI (Doktora Tezi)

Hazırlayan Semih KORKMAZ

Danışman Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Bu çalışma, Türkiye Cumhuriyeti Yüksek Öğretim Kurumu tarafından 100/2000 Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

Ocak 2020 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.

Semih KORKMAZ

"Plazmonik Nanoanten Dizilerinin Tasarımı, Üretimi, Karakterizasyonu Ve Kızılötesi Spektroskopi Tabanlı Biyoalgılama Uygulamaları" adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Semih KORKMAZ

lor luni

Danışman Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Elektrik – Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında Semih KORKMAZ tarafından hazırlanan "Plazmonik Nanoanten Dizilerinin Tasarımı, Üretimi, Karakterizasyonu Ve Kızılötesi Spektroskopi Tabanlı Biyoalgılama Uygulamaları" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

08/01/2020

JURI:

Danışman : Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Üye : Prof. Dr. İbrahim DEVELİ

Üye : Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serap Aksu RAMAZANOĞLU

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erdem ASLAN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 21/21/20 tarih ve 2020/06-99. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

blime Prof. Dr. Mehmet Enstitü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini aktaran, isabetli öngörüleri ile her zaman yolumu aydınlatan sayın danışman hocam Doç. Dr. Mustafa Türkmen'e teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmalarım süresince teze özgü tasarlanan yapıların deneysel olarak gerçekleştirilmesi ve ölçümlerin yapılmasında Bilkent Üniversitesi bünyesinde bulunan Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde bana çalışma imkânı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Serap Aksu RAMAZANOĞLU'na değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına destek veren Türkiye Cumhuriyeti Yüksek Öğretim Kurumu'na teşekkür ederim.

Özellikle hayatım boyunca her zaman destek olan aileme de teşekkürü her zaman bir borç bilirim.

Semih KORKMAZ Ocak 2020, KAYSERİ

PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİ TABANLI BİYOALGILAMA UYGULAMALARI

Semih KORKMAZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ocak 2020 Danışman: Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ÖZET

Plazmonik nanoanten dizileri, metaldeki elektron osilasyonu olan plazmonlar yoluyla ışığı çok küçük boyutlarda hapsedebilme, istenilen dalga boyunda ışığı tutma, kontrol etme ve yönlendirme özelliklerine sahiptirler. Yüksek parametre hassasiyeti, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde çoklu bant spektruma sahip olma ve üzerine gelen sinyalin kuvvetlendirilmesi diğer önemli özellikleridir. Plazmonik nanoanten dizilerinin sahip olduğu bu özellikler, 10 nm'den daha küçük polimer malzemelerin yüksek verimlilikle algılanmasını sağlamaktadır. Bu amaçla, bu tez çalışmasında literatürden farklı dört geometrik yapılı nanoanten dizilerinin tasarımı, üretimi, karakterizasyonu ve biyolojik ve kimyasal numunelerin güçlü bir şekilde algılanmasında kullanılması hedeflenmiştir. Bu yapıların, optik frekanslardaki temel karakteristikleri zaman domeninde sonlu farklar (FDTD) metodunu kullanan simülasyon programıyla ortaya konulmuştur. Nanoanten dizilerinin üretimi elektron demet litografisi (EBL) yöntemiyle, optik karakterizasyonu ise Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, kutuplama bağımsız nanoanten dizilerinin temel spektral özellikleri nümerik olarak incelenmiştir. Tasarlanan diğer üç yapının ise nümerik analizlerine ek olarak deneysel olarak üretilmesi sağlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen iki yapının ilki ile 10 nm kalınlığında polimetil metakrilat (PMMA)'ın iki temel kimyasal bağının algılanması sağlanmıştır. İkinci yapı ile 8 nm kalınlığına sahip protein A/G ve protein immünoglobulin (IgG) bileşeninden oluşan yapının temel kimyasal bağı algılanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plazmonik nanoanten dizileri; zaman domeninde sonlu farklar; elektron demet litografisi; Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi; optik parametre hassasiyeti; biyoalgılama.

DESIGN, FABRICATION, CHARACTERIZATION AND INFRARED SPECTROSCOPY BASED BIOSENSING APPLICATIONS OF PLASMONIC NANOANTENNA ARRAYS

Semih KORKMAZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences PhD Thesis, January 2020 Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ABSTRACT

Plasmonic nanoantenna arrays have the ability to trap light in very small dimensions by means of electron oscillations in the metal, as well as to hold, control and direct light at the desired wavelength. High parameter sensitivity, having multiband spectra in the infrared region of the electromagnetic spectrum and the enhancing of the incoming signal are other important features. These properties of plasmonic nanoantenna arrays enable the detection of polymer materials with a thickness of less than 10 nm with high efficiency. For this purpose, in this thesis, it is aimed to design, fabricate and characterize four nanoantenna arrays with different geometric structure from literature and detect the biological and chemical samples by using these nanoantennas. The basic characteristics of these structures in optical frequencies are determined by a simulation program based on finite difference time domain (FDTD) method. Electron beam lithography (EBL) method has been used to fabricate nanoantenna arrays and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy has been used for optical characterization of these arrays. Firstly, the basic spectral properties of polarization independent nanoantenna arrays have been examined numerically. In addition to the numerical analyses, the other three structures have also been obtained experimentally. With the first of the two produced structures, the detection of the two basic chemical bonds of polymethyl methacrylate (PMMA), which has a thickness of 10 nm, has been provided. By means of the second structure, the basic chemical bond of the structure consisting of protein A/G and protein immunoglobulin (IgG) component having a thickness of 8 nm has been detected.

Keywords: Plasmonic nanoantennas arrays; finite difference time domain; electron beam lithography; Fourier transform infrared spectroscopy; optical parameter sensitivity; biosensing.

İÇİNDEKİLER

PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİ TABANLI **BİYOALGILAMA UYGULAMALARI**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER	Х
TABLOLAR LİSTESİ	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ	XV

GİRİŞ

	GİRİŞ	
G.1.	Motivasyon	1
G.2.	Tezin Amacı	2

1. BÖLÜM

TEMEL KAVRAMLAR

1.1.	Nanoantenler	3
1.1.1.	Nanoantenlerin Işığı Soğurma İlkeleri	4
1.2.	Yüzey Plazmonları ve Yüzey Plazmon Polaritonlarının Uyarımı	6
1.2.1.	Prizma Kuplajı	14
1.2.2.	Izgaralı Yapılarda Kuplaj	15
1.2.3.	. Metal Nanoparçacıklarda Yüzey Plazmon Polaritonların Uyarımı	
1.3.	Çok Katmanlı Yapıların Teorik Altyapısı	
1.4.	Plazmonik Algılama1	
1.5.	Yüzey Plazmon Rezonansı Tabanlı Algılama Yöntemleri1	
1.6.	Kızılötesi Spektroskopi	21
1.7.	Plazmonik Nanoantenlerin Kızılötesi Spektroskopi Tabanlı Biyoalgılama	a
	Uygulamalarında Kullanılması	23

2. BÖLÜM

PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN NÜMERİK ANALİZİ

2.1.	Giriş	.25
2.2.	3D-FDTD Metodu	.25
2.3.	Plazmonik Nanoanten Dizilerinin Tasarımı ve Nümerik Analizi	.30

3. BÖLÜM

PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN ÜRETİMİ VE ANALİZİ

3.1.	Giriş	31
3.2.	Nanoanten Dizilerinin Üretim Yöntemleri	31
3.2.1.	Metal ve Dielektrik Malzemelerin Alt Taban Üzerine Kaplanması	31
3.2.2.	Üretilen Alt Taban Üzerine Nanoantenlerin Aktarılması	32
3.3.	Nanoanten Dizilerinin Elektron Mikroskobu İle Görüntülenmesi	34
3.4.	Nanoanten Dizilerinin Optik Karakterizasyonu	35

4. BÖLÜM

TEZE ÖZGÜ PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN NÜMERİK VE DENEYSEL ANALİZİ VE KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİ TABANLI BİYOALGILAMA UYGULAMALARI

4.1.	Giriş
4.2.	Teze Özgü Üretilen Plazmonik Nanoanten Dizileri
4.2.1.	N#1 Kutuplama Bağımsız Pencere Şeklindeki Nanoanten Dizilerine Ait
	Nümerik Sonuçlar
4.2.2.	D#1 Geometrik Desenli Nanoanten Dizilerine Ait Nümerik ve Deneysel
	Sonuçlar40
4.2.3.	D#2 Belirli Aralıklarla Boyutları Azalan Dikdörtgen Nanoanten Dizilerine
	Ait Nümerik, Deneysel ve PMMA'ın Algılanma Sonuçları48
4.2.4.	D#3 Asimetrik Üçgen Çifti Nanoanten Dizilerine Ait Nümerik, Deneysel ve
	Protein'in Algılanma Sonuçları58

5. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1.	Tartışma-Sonuç ve Öneriler	56
KAYN	JAKÇA	69
ÖZGE	CÇMİŞ	78

KISALTMALAR VE SİMGELER

	Au	Altın
	ATR	Attenuated total reflectance - Zayıflatılmış toplam yansıma
	C=O	Karbonil
	CH ₃	Metil
	CH ₂	Metilen
	EBL	Electron beam lithography - Elektron demet litografisi
	FDTD	Finite difference time domain- Zaman domeninde sonlu farklar
	FIR	Far-infrared - Uzak-kızılötesi
	FOM	Figure of merit- Algılama başarı ölçütü
	FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy - Fourier dönüşümlü kızılötesi
		spektroskopi
	FWHM	Full width at half maximum- Yarım maksimumda tam genişlik
	IPA	Isopropil alcohol- İzopropil alkol
	IR	Infrared - Kızılötesi
	kV	Kilovolt
	kHz	Kilohertz
	LSP	Localized surface plasmon - Yerelleşmiş yüzey plazmonu
]	LSPR	Localized surface plasmon resonance - Yerelleşmiş yüzey plazmon
		rezonansi
	MgF ₂	Magnezyum florür
	MIR	Mid-infrared - Orta-kızılötesi
	MIBK	Methyl isobutyl ketone- Metil izobütil keton
	NIR	Near-infrared - Yakın-kızılötesi
	NPGS	Nanometer pattern generation system- Nanoboyutta desen üretme sistemi
	PBS	Phosphate buffered saline- Fosfat katkılı tuz
	PMMA	Polymethyl methacrylate- Polimetil metakrilat
	Protein A/G	Protein A ve protein G birleşimi
	Protein IgG	Protein Immunoglobulin - Protein İmmünoglobulin
	RIU	Refractive index unit - Birim kırıcılık İndisi
	rpm	Revolution per minute- Dakikada dönme sayısı

SEIRA	Surface enhanced infrared absorption-Yüzeyde güçlendirilmiş kızılötesi
	soğurum
SEM	Scanning electron microscopy-Taramalı elektron mikroskobu
SP	Surface plasmon- Yüzey plazmonu
SPP	Surface plasmon polariton- Yüzey plazmon polaritonu
TE	Transverse electric- Enine elektrik
Ti	Titanyum
THz	Terahertz
TM	Transverse magnetic- Enine manyetik
cm	Santimetre
mm	Milimetre
mg	Miligram
mL	Mililitre
μm	Mikrometre
μg	Mikrogram
nm	Nanometre
E	Foton enerjisi
h	Planck sabiti
J	Joule
S	Saniye
v	Işığın frekansı
$\widetilde{ u}$	Işığın dalga sayısı
с	Isığın hızı
<i>c</i> ₀	Isığın boşluktaki hızı
λ	Dalga boyu
k	Dalga sayısı
A	Genlik
ω	Açısal frekans
t	Zaman
δ	Faz açısı
arphi	Kutuplama açısı
n	Kırıcılık indisi
n^*	Kırıcılık indisinin kompleks formu

n_m	Metalin kırıcılık indisi
n_a	Analitin kırıcılık indisi
α	Soğurum katsayısı
Ι	Işık şiddeti
l	Soğurucu ortam içerisindeki ışığın ilerlediği mesafe
E	Molar soğurum katsayısı
С	Soğurucu bileşik yoğunluğu
D	Vektörel elektriksel yerdeğiştirme veya elektrik akı yoğunluğu
Ε	Vektörel elektrik alan
Н	Vektörel manyetik alan
В	Vektörel manyetik indüksiyon veya manyetik akış yoğunluğu
J	Vektörel akım yoğunluğu
Р	Vektörel elektrik kutuplanma
\mathbf{M}	Vektörel manyetik kutuplanma
Ν	Avogadro sayısı
ρ	Harici yük yoğunluğu
е	Elektron yükü
С	Coulomb
m_e	Elektron kütlesi
Е	Mutlak elektriksel geçirgenlik
ε_0	Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
ε_m	Metalin elektriksel geçirgenliği
ε_a	Analitin elektriksel geçirgenliği
μ	Mutlak manyetik geçirgenlik
μ_0	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
σ	Elektriksel iletkenlik
χe	Elektriksel alınganlık
β	Yayılma sabiti
E_{x}	Elektrik alanın x doğrultusundaki bileşeni
$E_{\mathcal{Y}}$	Elektrik alanın y doğrultusundaki bileşeni
E_z	Elektrik alanın z doğrultusundaki bileşeni
H_{x}	Manyetik alanın x doğrultusundaki bileşeni
H_y	Manyetik alanın y doğrultusundaki bileşeni

H_z	Manyetik alanın z doğrultusundaki bileşeni
γ	Sönümleme sabiti
ω_p	Plazma frekansı
ω_{sp}	Yüzey plazmon frekansı
θ	Işığın yüzeye geliş açısı
λ_{eff}	Efektif dalga boyu
R	Küresel metal parçacığın yarıçapı
d_m	Metalin kalınlığı
d_d	Dielektrik malzeme kalınlığı
Z_k	Ortamın karakteristik empedansı
Г	Yansıma oranı
R	Yansıtıcılık
S	Işığın ortamın değişimine karşı gösterdiği hassasiyet
ī	i birim vektör
Ĵ	j birim vektör
\vec{k}	k birim vektör
Δx	x doğrultusunda konumundaki değişim
Δy	y doğrultusunda konumundaki değişim
Δz	z doğrultusunda konumundaki değişim
Δt	Zamandaki değişim
sn	Saniye
$ E^2 / E_0^2 $	Elektrik alan güçlendirme
$ H^2 / H_0^2 $	Manyetik alan güçlendirme
f	Frekans
cm ⁻¹	Dalga sayısı birimi
x	Katsayı
а	Izgaralı yapılardaki periyot değeri
<i>g</i>	Ters vektör

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde yer alan bölgeler.22



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Farklı boyut ve tasarımda nanoanten dizileri
Şekil 1.2. Beer Lambert yasası için temel şematik gösterim
Şekil 1.3. SP uyarımının gerçekleştirilmesi için kullanılan metal-dielektrik arayüz8
Şekil 1.4. Metal-dielektrik arayüzeyde, <i>hv</i> enerjili fotonlar ile uyarılan metaldeki yüzey
plazmonların oluşması ve TM modunda metal-dielektrik arayüzeyde yüzey
plazmon polaritonların oluşumu10
Şekil 1.5. İhmal edilebilir çarpışma frekanslı bir Drude metal ve hava arasındaki
SPP'lerin dağınım ilişkisi (gri eğri) ve Drude metal ve silisyum arasındaki
SPP'lerin dağınım ilişkisi (siyah eğri)14
Şekil 1.6. Prizma kuplajı: (a) Kretschmann, (b) Otto tasarımı
Şekil 1.7. Periyodu a olan metal bir ızgara kullanarak SPP'lerle ışığın faz eşleşmesinin
sağlanması
Şekil 1.8. İki farklı kutuplama (x- ve y) için metal parçacıklarda meydana gelen yakın-
alan kuplajı
Şekil 1.9. Çok katmanlı yapıların genel görünümü
Şekil 1.10. (a) Kretschmann tasarımında, metal/dielektrik arayüzeyde boylamsal yük
yoğunluğunun üretilmesi (ε_p , prizmanın elektriksel geçirgenliği, θ_i , ışığın
yüzeye geliş açısı ve d_m , metal kalınlığı). (b) δ_m , δ_a , sırasıyla metal ve analit
bölgesindeki dik alanların yüzeye olan sönüm mesafeleri21
Şekil 1.11. CH ₂ (metilen) fonksiyonel grubunun simetrik ve asimetrik titreşim davranışı
ve rezonans frekansları22
Şekil 1.12. (a) Algılamada kullanılan dikdörtgen nanoanten dizileri. (b) Nanoantenin
üzerine protein kaplanmadan önceki (kesikli çizgi) ve kaplandıktan sonraki
(düz çizgi) deneysel yansıma spektrumu. Nanoantenin üretim periyodu 1.6
μm24
Şekil 2.1. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin Yee hücresindeki konumları
Şekil 3.1. (a) Elektron demet buharlaştırma cihazı. (b) Kaplama sonrasında elde edilen
çipler
Şekil 3.2. (a) Elektron demet litografi cihazı. (b) EBL yöntemi ile desenlerin aktarılması
ve elde edilmesi
Şekil 3.3. (a) Taramalı elektron mikroskop cihazı. (b) Cihazın temel bileşenleri
Şekil 3.4. (a) Mikroskoplu FTIR cihazı. (b) Ölçümler için kullanılan temel bileşenler. 35

Sekil 4.1. (a) x-yönündeki kutuplama altında pencere şeklindeki nanoantenin şematik
görünümü. (b) Nanoantenin üstten görünümü. (c) Belirlenmiş parametreler
için elde edilen yansıma, geçiş ve soğurum spektumu

- Sekil 4.2. x-yönündeki kutuplama altında (a) L₁ değişimi için elde edilen yansıma eğrisi. (b) D değişimi için elde edilen yansıma eğrisi. (c) L₃ değişimi için elde edilen vansıma eğrisi. (d) Kutuplama açısının değisimine bağlı olarak elde
- Sekil 4.3. x-yönündeki kutuplama altında (a) rezonans dalga sayısı değeri 1094 cm⁻¹ (32.8 THz) için elde edilen yakın alan dağılımı ve değerleri (b) rezonans dalga sayısı değeri 3185 cm⁻¹ (95.5 THz) için elde edilen yakın alan dağılımı
- Şekil 4.4. (a) Ortam içerisine gömülen nanoantenin görünümü. (b) Her bir ortamda elde
- Sekil 4.5. (a) x-yönündeki kutuplama altında geometrik desenli nanoantenin şematik görünümü. (b) Nanoantenin üstten görünümü. (c) Belirlenmiş parametreler için nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumu. (d) Diziler
- Sekil 4.6. x-yönündeki kutuplama altında nümerik (a) yansıma, geçiş ve soğurum spektrumu ve (b) birinci mod, (c) ikinci mod (d) üçüncü mod (e) dördüncü
- Sekil 4.7. x-yönündeki kutuplama altında elde edilen nümerik ve deneysel soğurum spektrumu (a) L₁ değişimi (b) L₂ değişimi. Deneysel spektrumları gösteren grafiklerde sırasıyla L_1 =400 nm ve L_2 =550 nm için birim hücrenin SEM görüntüsü görülmektedir. (c) L₁ ve (d) L₂ nanoanten dizilerinin değişimlerine
- Şekil 4.8. x-yönündeki kutuplama altında elde edilen nümerik ve deneysel soğurum spektrumu (a) L_3 değişimi (b) L_6 değişimi. Deneysel spektrumları gösteren grafiklerde sırasıyla L₃=800 nm ve L₆=1200 için birim hücrenin SEM görüntüsü görülmektedir. (c) L₃ ve (d) L₆ nanoanten dizilerinin değişimlerine **Sekil 4.9.** x-yönündeki kutuplama altında elde edilen yansıma eğrileri (a) D değişimi b)

- Şekil 4.16. x-yönündeki kutuplama altında tüm değerlerin sabit sadece (a) L₁, L₂, L₃, L₄ değişimi için elde edilen nümerik soğurum spektrumu (b) L₅ değişimi için elde edilen nümerik soğurum spektrumu (c) L₁, L₂, L₃, L₄ değişimi için elde edilen deneysel soğurum spektrumu (d) L₅ değişimi için elde edilen deneysel soğurum spektrumu. Deneysel spektrumları gösteren grafiklerde sırasıyla L₁=2200 nm ve L₅=820 nm için birim hücrenin SEM görüntüsü görülmektedir. (e) L₅=820 nm iken L₁, L₂, L₃, L₄ nanoanten dizilerinin

değisimi ve (f) $L_1=2000$ nm iken L_5 nanoanten dizilerinin değisimlerine ait Sekil 4.17. (a) PMMA'ın çok katmanlı yapı üzerine kaplanmasının şematik görünümü. (b) 1µm kalınlığında PMMA'ın ATR-FTIR cihazı ile ölçülmüş yansıma spektrumu. (c) L₁=2400 nm ve L₅=790 nm değerlerinde her iki rezonansta **Şekil 4.18.** (a) PMMA kaplandıktan sonra L_1 değişimi için elde edilen soğurum spektrumu. (b) İlk rezonans için soğurum farkı. (c) PMMA kaplandıktan sonra L_5 değisimi icin elde edilen soğurum spektrumu. (d) İkinci rezonans Sekil 4.19. (a) x-yönündeki kutuplama altında asimetrik üçgen çifti şeklindeki nanoantenin şematik görünümü. (b) Nanoantenin üstten görünümü. (c) Belirlenmiş parametreler için nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumu. (d) Diziler halinde üretilen nanoanten dizilerinin bir bölümünün SEM görüntüsü......59 Sekil 4.20. x-yönündeki kutuplama altında elde edilen (a) yansıma, geçiş ve soğurum spektrumu. (b) 1751 cm⁻¹ (52.46 THz) rezonans dalga sayısı değeri için elde edilen yakın alan dağılımı. (c) 3059 cm⁻¹ (91.70 THz) rezonans dalga sayısı değeri için elde edilen yakın alan dağılımı......60 **Şekil 4.21.** x-yönündeki kutuplama altında (a) L_1 değişimi için elde edilen nümerik soğurum spektrumu (b) L_2 değişimi için elde edilen nümerik soğurum spektrumu (c) L_1 değişimi için elde edilen deneysel soğurum spektrumu (b) L₂ değişimi için elde edilen deneysel soğurum spektrumu. Deneysel spektrumları gösteren grafiklerde sırasıyla L₁=920 nm ve L₂=2200 nm için birim hücrenin SEM görüntüsü görülmektedir. (e) L₂=2100 nm iken L₁ nanoanten dizilerinin değişimi ve (f) $L_1=1520$ nm iken L_2 nanoanten Sekil 4.22. (a) Nanoanten üzerine sırayla kaplanan protein A/G ve protein IgG'nin sematik görünümü. (b) Protein A/G ve protein IgG birleşiminin ATR-FTIR ile ölçülmüş soğurum spektrumu. (c) Proteinlerin nanoanten üzerine kaplanmadan önceki (kırmızı eğri) ve kaplandıktan sonraki (mavi eğri)

ölçülen soğurum spektrumu. (d) Nanoantenin soğurum spektrumunda protein

A/G ve protein IgG'nin kaplanmasından sonra meydana gelen belirgin	
değişim	64



GİRİŞ

G.1. Motivasyon

Işık-madde etkileşimi hayatın her anında gerçekleşen bir olaydır. Işığın herhangi bir madde ile etkilesimi fiziksel olarak ışığın saçılmasına, soğurulmasına ve yansıtılmasına neden olmaktadır [1]. Organik polimerler, farklı kimyasal bileşenlerden oluşur ve kendine has fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Işığın bu tür malzemelerle etkileşmesi sonucu sahip oldukları farklı özelliklerin kızılötesi spektroskopi ile ortaya çıkarılması mümkündür [2]. Ancak bu polimer malzemelerin 10 nm gibi ince kalınlıkta olması durumunda parmak izlerinin ortaya çıkarılması çok yüksek teknolojileri gerektirmektedir. Plazmonik nanoantenler, ışığı iletmek, yönlendirmek ve hapsetmek için kullanılan temel yapılardır [3]. Plazmonik nanoantenlerin ışığı dalga boyundan daha küçük hacimlere sıkıştırabilme özelliğinden dolayı bu yapılar, son yıllarda araştırma konularının önde gelen unsurlarından biri olmuştur [4-11]. Plazmonik nanoyapılar metal-dielektrik arayüzünde meydana gelen plazmon enerjisini kullanırlar ve yakın alan yükseltmeleriyle ışık-madde etkileşimini arttırarak birden fazla molekülü aynı anda algılama imkânı vermektedirler [12-18]. Bakteri ve virüs gibi zararlı canlıların temel yapıtaşlarından biri de proteinlerdir. Bu canlıların insanlarda meydana getirebileceği hastalıkların teşhisi sahip oldukları kimyasalların tespiti ile mümkündür. Moleküler bileşiklerin sahip olduğu kimyasal bağların tespiti bu canlıların insanlara vermiş olduğu zararların önüne tamamen geçilmesini sağlayacaktır [19,20]. İnsanlardan ve diğer canlılardan alınan vücut sıvılarında bulunan temel moleküllerin plazmonik nanoantenler ile doğru ve hızlı bir şekilde tespiti, bakteri ve virüs gibi canlıların neden olduğu hastalıkların belirlenmesinde önemli bir yere sahip olmaktadır. Antenlerin tasarlanması ve deneysel olarak üretilip biyoalgılama uygulamalarında bu şekilde kullanılması oldukça heyecan verici çalışmaların ortaya çıkmasını sağlamaktadır [21-24].

G.2. Tezin Amacı

Plazmonikler, nanoboyutta ışık-madde etkileşimini ve elektromanyetik alanların moleküler boyutta hapsedilmesini sağlarlar [25-27]. Son yıllarda, plazmonik nanoyapıların tasarlanması, biyoalgılama uygulamaları için güçlü platformların ortaya çıkmasını sağladı. Plazmonik nanoantenler, güçlü yakın alan rezonansları nedeniyle protein gibi biyomoleküllerin parmak izlerinin hassas tespiti ile kızılötesi soğurum spektroskopisinde yeni uygulamalar için imkân sağlarlar. Özellikle, tasarlanan bu antenler ile sağlanan yüzeyde arttırılmış kızılötesi soğurum (surface enhanced infrared absorption: SEIRA) spektroskopisi ile de 10 nm'den daha ince polimerlerin kızılötesi bölgede birbirinden ayrı parmak izlerinin tespiti mümkün olmaktadır [28-33]. Kızılötesi (titreşimsel) spektroskopi, yağlar ve proteinler gibi biyoörneklerin moleküler yapılarının atomik boyutlarda tanımlama imkânı verir [34-36]. Plazmonik nanoanten dizilerinin ortakızılötesi bölgede ayarlanabilir rezonansları ile protein vb. polimerlerin sahip olduğu titreşimsel parmak izlerinin tespiti mümkün olmaktadır [37-39]. Polimerlerin kendine özgü temel kimyasal bağlarının tespiti ile de Tip II şeker hastalığı, Alzheimer ve Parkinson gibi nörodejeneratif hastalıkların belirgin bir şekilde ortaya çıkmadan önce tespiti çok daha kolay olacaktır [40,41].

Bu amaçla, bu tez çalışmasında, yakın-alanda yüksek enerji hapsedebilen, kızılötesi bölgede hedeflenen rezonanslara yüksek parametre hassasiyeti ile kolaylıkla ulaşılabilen, özgün geometriye sahip, plazmonik nanoanten dizilerinin tasarımı, üretimi, karakterizasyonu ve kızılötesi spektroskopi tabanlı biyoalgılama uygulamalarında kullanılması hedeflenmiştir. Bu çalışma sırasında öncelikle, özgün geometriye sahip nanoantenler nümerik olarak bilgisayar ortamında tasarlanmıştır. Elde edilen soğurum, yansıma ve geçiş spektrumları ile nanoantenlerin rezonans frekansları belirlenmiş ve rezonans frekansları kullanılarak simülasyon programı ile yakın-alanda anten üzerinde depolanan enerjinin miktarı ve bölgeleri ortaya konmuştur. Yapının rezonans frekansları elde edildikten sonra üretim teknikleri kullanılarak nanoantenler deneysel olarak üretilmiş ve üretimi sağlanan nanoantenlerin kızılötesi bölgedeki spektrumlarının deneysel olarak elde edilmesi sağlanmıştır. Hedef moleküllerin titreşimsel parmak izleri tasarlanan nanoantenler ile deneysel olarak algılanmıştır. Nümerik ve deneysel tüm aşamalar, tez içerisinde ayrı ayrı detaylarıyla birlikte anlatılacaktır.

1. BÖLÜM TEMEL KAVRAMLAR

1.1. Nanoantenler

Anten, boşlukta yayılan elektromanyetik dalgaları toplayarak bu dalgaların iletim hatları içerisinde yayılmasını sağlayan (alıcı anten) veya iletim hatlarından gelen sinyalleri boşluğa dalga olarak yayan (verici anten) cihazlardır [42]. Işığı yönlendirebilmek ve hapsedebilmek için geliştirilmiş deneysel bir teknoloji olan optik antenler veya bir başka tanımla nanoantenler, serbestçe yayılan optik bir radyasyonu lokalize bir enerjiye dönüştürebilen cihazlardır (Şekil 1.1) [43-46]. Bu özellikleri ile kuantum ışık kaynakları, optik haberleşme, fotovoltaikler, biyolojik ve kimyasal algılama, güneş pilleri, lineer olmayan spektroskopi, moleküler spektroskopi teknikleri ve mevcut mikroskopların hassasiyetlerinin geliştirilmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar [47,48].



Şekil 1.1. Farklı boyut ve tasarımda nanoanten dizileri.

1.1.1. Nanoantenlerin Işığı Soğurma İlkeleri

Işığın teorik olarak tanımlanması iki şekilde yapılabilir. Işık, akıp giden fotonlar (parçacık) ya da bir elektromanyetik dalga olarak tanımlanır. Fotonların davranışı, özellikle fotonlar ve moleküller arası etkileşimde, kuantum optiği yasaları ile açıklanır. Elektromanyetik bir dalganın bir ortamla etkileşimi ise Maxwell denklemlerini içeren elektromanyetik teori ile açıklanır [48]. İlk durumda, foton enerjisi;

$$E = h v \tag{1.1}$$

olarak tanımlanır. *h*, Planck sabiti ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ J.s) ve v ışığın frekansıdır. Vakumda ışığın hızı *c* ve dalga boyu λ ise ışığın frekansı *v*;

$$v = \frac{c}{\lambda} \tag{1.2}$$

olarak tanımlanır. Böylece, elektromanyetik dalgaların enerjisi, dalga boyu ile ters orantılıdır. Özellikle titreşimsel (kızılötesi) spektroskopide, ters dalga boyu (λ^{-1}) kullanılır ve bu durum dalga sayısı (k) olarak kabul edilir.

$$E = hc \ \tilde{v} \tag{1.3}$$

Genellikle dalga sayısı (k),

$$\tilde{v}[cm^{-1}] = \frac{10000}{\lambda[\mu m]} \tag{1.4}$$

şeklinde yazılır. Işığın bir elektromanyetik dalga olarak tanımlanması durumunda, yayılması ise

$$A(\varphi) = A_0(\varphi)e^{i(\omega t - \delta)}$$
(1.5)

denklemiyle açıklanır. Burada, *A*, genlik, ω , açısal frekans, *t*, zaman, δ , faz açısı ve φ ise kutuplama açısıdır. Açısal frekans, dalga boyu (λ) ve kırıcılık indisi (*n*) cinsinden tanımlanırsa;

$$\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda n} \tag{1.6}$$

olarak elde edilir. Denklem (1.5), ışığın soğrulmadığı ortamlarda ışığın yayılımı için uygulanır. Işığın soğurulduğu ortamlarda ise bu denklemde kırıcılık indisi (*n*), kompleks formu (*n**) ile değiştirilir. $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ ile ifade edilir. Burada, ϵ ve μ sırasıyla mutlak elektriksel geçirgenliği ve mutlak manyetik geçirgenliği ifade etmektedir.

$$n^* = n + i\kappa \tag{1.7}$$

Burada *n* ve κ daima pozitiftir. Soğurucu ortamda, soğurum katsayısı α ,

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \tag{1.8}$$

olarak tanımlanır. Denklem (1.5) temel alınarak, ışık şiddeti I,

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \tag{1.9}$$

olarak tanımlanır [48]. Buradaki *l*, soğurucu ortam içerisindeki ışığın yol uzunluğudur. Beer Lambert yasası (Şekil 1.2) direkt denklem (1.9)'un bir sonucu olarak aşağıdaki şekilde yazılır.

$$I = I_0 e^{-\epsilon cl} \tag{1.10}$$

Burada, ϵ , molar soğurum katsayısı ve *c* ise soğurucu bileşiğin yoğunluğudur.



Şekil 1.2. Beer Lambert yasası için temel şematik gösterim.

Beer Lambert yasası aşağıdaki gibi genellikle logaritmik formda açıklanır. *A*, soğurumdur [48].

$$\log(\frac{l_0}{l}) = A = \epsilon c l \tag{1.11}$$

1.2. Yüzey Plazmonları ve Yüzey Plazmon Polaritonlarının Uyarımı

Metallerle optik dalgaların etkileşimi serbest elektron osilasyonları olarak adlandırılan plazmonların oluşmasına neden olur. Bu plazmonlar, metalin yüzeyinde meydana gelirse yüzey plazmonları (surface plasmon; SP) olarak adlandırılırlar. Yüzey plazmonlarının optik sinyallerle sürekli olarak etkileşmesi ile metal ve dielektrik (örneğin; hava) arayüzeyde yayılan yüzey plazmon polaritonları (surface plasmon polaritons; SPP) olarak adlandırılan elektromanyetik dalgalar oluşur. Bu elektromanyetik yüzey dalgaları, elektromanyetik alanların iletken elektron plazmasının salınımlarına bağlanmasıyla ortaya çıkar [49]. SPP'lerin fiziksel özelliklerini ortaya çıkarmak için, temel Maxwell denklemlerinden (1.12)'den yararlanılır

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{harici} \tag{1.12a}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{1.12b}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{1.12c}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{harici} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$
(1.12d)

Burada vektörel **D**, elektriksel yerdeğiştirme veya elektrik akı yoğunluğu, **E**, elektrik alan şiddeti, **H**, manyetik alan şiddeti ve **B**, manyetik indüksiyon veya manyetik akış yoğunluğu olarak tanımlanır. Ayrıca harici yük yoğunluğu ρ ve akım yoğunlukları **J**, bu temel parametrelere eşlik eder. **D**, elektrik akı yoğunluğu ve **H**, manyetik alan şiddeti aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \tag{1.13}$$

$$\mathbf{H} = \frac{B}{\mu_0} - \mathbf{M} \tag{1.14}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \tag{1.15}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{1.16}$$

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \tag{1.17}$$

Burada, ε_0 , serbest uzayın elektriksel geçirgenliği, μ_0 ise serbest uzayın manyetik geçirgenliğidir. **P** ve **M** ise sırasıyla birim hacimdeki elektrik dipol moment yoğunluğunu ve birim hacimdeki manyetik dipol moment yoğunluğunu ifade etmektedir. σ , elektriksel iletkenliği, μ mutlak manyetik geçirgenliği ve χ_e elektriksel alınganlığı ifade etmektedir. Bu temel parametreler, lineer ortamlar için alan, homojen ortamlar için konum ve izotropik ortamlar için ise yön bağımsızdırlar [49]. SPP'lerin fiziksel özelliklerini belirlemek için Maxwell denklemleri (1.12) iletken ve dielektrikten oluşan bir arayüzeye uygulanır. Harici yük ve akım yoğunluklarının olmadığı durumda, dalga denklemleri (1.12c) ve (1.12d) birleştirilerek eşitlik (1.18) elde edilir.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2}$$
(1.18)

Temel eşitlikler (1.19) ve (1.20),

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$$
(1.19)

$$\nabla(\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}) = \mathbf{E} \cdot \nabla \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \nabla \mathbf{E}$$
(1.20)

ve harici bir uyarımın olmadığı $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$ durumu dikkate alınarak eşitlik (1.18) tekrar yazılırsa, eşitlik (1.21) aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\nabla \left(-\frac{1}{\varepsilon} \mathbf{E} \cdot \nabla \varepsilon \right) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$
(1.21)

Nanoantenler, ışığın dalga boyundan daha küçük yapılar olduğu için ε 'nun ışığın dalga boyundan daha büyük mesafelerdeki değişimi ihmal edilerek (1.21) eşitliği sadeleştirilerek (1.22)'deki **E**'ye ait homojen dalga denklemi elde edilir.

$$\nabla^2 \mathbf{E} \ -\frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \tag{1.22}$$

Elektrik alanın zamana göre harmonik dalga denklemi $E(r,t) = E(r)e^{-iwt}$ olarak ifade edilerek (1.22) eşitliği (1.23)'teki gibi yazılabilir.

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0 \tag{1.23}$$

Bu denklem, Helmholtz denklemi olarak bilinir. Burada $k_0 = \omega/c_0$ olup, yayılan dalganın dalga vektörüdür. ω ve c_0 ise sırasıyla ışığın açısal hızı ve boşluktaki hızıdır. Yukarıda verilen temel denklemlerden sonra, ışığın bir dalga olarak yayılacağı temel bölgeler Şekil 1.3'te verilmektedir. Şekilde görülen düzlemsel dalga kılavuzu, herhangi bir enerjiyi soğurmayan ve pozitif reel bağıl dielektrik geçirgenliğine ($\varepsilon_2(w)$) sahip bir dielektrik ortam (z>0) ile negatif reel dielektrik fonksiyonu $\varepsilon_1(\omega)$ olan iletken(metal) ortamın (z<0) aralarında düzlemsel arayüz oluşturacak şekilde birleştirilmesiyle elde edilir. Bu yapı, normali z eksenine paralel olan z=0 düzleminde yayılan dalgaların bulunduğu bir arayüzeydir [49].



Şekil 1.3. SP uyarımının gerçekleştirilmesi için kullanılan metal-dielektrik arayüz.

Arayüzeyde yayılan dalgalar için elektrik alan ifadesi, $\mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{E}(z)e^{i\beta x}$ olarak ifade edilebilir. Kompleks parametre olan $\beta = k_x$, yayılan dalgaların yayılma sabiti ve yayılma yönündeki dalga vektörünün bileşeni olarak tanımlanır. Bu ifade, eşitlik (1.23)'e eklenirse, dalga denkleminin istenen formu (1.24)'teki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}(z)}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) \mathbf{E} = 0$$
(1.24)

Eşitlik (1.24), dalga kılavuzlarında kılavuzlanmış elektromanyetik modların genel analizleri için hareket noktası olarak kabul edilir. Dalga denklemlerini, yayılan dalgaların dağınım özelliklerini belirlemek üzere kullanmak için, **E** ve **H**'nin farklı alan bileşenleri için ayrı ayrı denklemler elde edilmelidir. Bu amaçla, dalga denklemlerinin (1.12c ve 1.12d) kullanılması gerekir. Zamana göre harmonik durum ifadesine ($\frac{\partial}{\partial t} = -i\omega$) yine bu denklemlerde yer vererek aşağıdaki denklemler elde edilir [49].

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega\mu_0 H_x \tag{1.25a}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega\mu_0 H_y$$
 (1.25b)

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu_0 H_z \tag{1.25c}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_x \tag{1.25d}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_y \tag{1.25e}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon E_z \tag{1.25f}$$

x-yönünde yayılım için $(\frac{\partial}{\partial x} = i\beta)$ ve y-yönündeki homojen durum için $(\frac{\partial}{\partial y} = 0)$ denklemler (1.26) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_x \tag{1.26a}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - i\beta E_z = i\omega\mu_0 H_y \tag{1.26b}$$

$$i\beta E_y = i\omega\mu_0 H_z \tag{1.26c}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_x \tag{1.26d}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - i\beta H_z = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon E_y \tag{1.26e}$$

$$i\beta H_y = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_z \tag{1.26f}$$

(1.26)'da elde edilen denklemler, yayılan dalgalar için iki ayrı kutuplama özelliğini sağlamaktadır. Bunlar E_x , E_z ve H_y alan bileşenlerinin var olduğu enine manyetik (transverse magnetic: TM) modu ve H_x , H_z ve E_y alan bileşenlerinin var olduğu enine elektrik (transverse electric: TE) modudur.

TM modları için (1.26)'daki denklem sistemleri, (1.27)'deki denklemlere indirgenebilir.

$$E_x = -i\frac{1}{\omega\varepsilon_0\varepsilon}\frac{\partial H_y}{\partial z} \tag{1.27a}$$

$$E_z = -\frac{\beta}{\omega\varepsilon_0\varepsilon} H_y \tag{1.27b}$$

TM modları için dalga denklemi (1.28)'deki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) H_y = 0$$
(1.28)

TE modları için (1.26)'daki denklem sistemleri, (1.29)'daki denklemlere indirgenebilir.

$$H_x = i \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial z} \tag{1.29a}$$

$$H_z = \frac{\beta}{\omega\mu_0} E_y \tag{1.29b}$$

TE modları için dalga denklemi (1.30)'daki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) E_y = 0$$
(1.30)



Şekil 1.4. Metal-dielektrik arayüzeyde, *hv* enerjili fotonlar ile uyarılan metaldeki yüzey plazmonların oluşması ve TM modunda metal-dielektrik arayüzeyde yüzey plazmon polaritonların oluşumu.

Şekil 1.4'te görülen düzlemsel dalga kılavuzu, herhangi bir enerjiyi soğurmayan ve pozitif reel bağıl dielektrik geçirgenliğine ($\varepsilon_2(\omega)$) sahip bir dielektrik ortam (z>0) ile negatif reel dielektrik fonksiyonu $\varepsilon_1(\omega)$ olan iletken ortamın (z<0) aralarında düzlemsel arayüz oluşturacak şekilde birleştirilmesiyle elde edilir. Bu geometri, normali z eksenine paralel olan z=0 düzleminde yayılan dalgaların bulunduğu bir arayüzeydir.

TM modu için (1.27) ve (1.28)'de verilen denklemler dielektrik ortam (z>0) için tekrar düzenlenirse;

$$H_{\nu}(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z}$$
(1.31a)

$$E_x(z) = iA_2 \frac{1}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_2} k_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z}$$
(1.31b)

$$E_z(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_2} e^{i\beta x} e^{-k_2 z}$$
(1.31c)

ve iletken ortam (z<0) için yeniden düzenlenirse;

$$H_{y}(z) = A_{1}e^{i\beta x}e^{k_{1}z}$$
(1.32a)

$$E_{x}(z) = -iA_{1}\frac{1}{\omega\varepsilon_{0}\varepsilon_{1}}k_{1}e^{i\beta x}e^{k_{1}z}$$
(1.32b)

$$E_z(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1} e^{i\beta x} e^{k_1 z}$$
(1.32c)

ifadeleri elde edilir. İletken ve dielektrik ortamları birleştiren arayüzeye dik dalga vektörleri bileşenleri sırasıyla k_1 ve k_2 olarak ifade edelim. H_y ve $\varepsilon_i E_z$ bileşenlerinin arayüzeyde sürekliliğinin sağlanması için $A_1 = A_2$ olması ve

$$\frac{k_2}{k_1} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \tag{1.33}$$

şartının sağlanmasını gerekir. Bu arada, H_y ifadesi (1.28) eşitliğini sağlamalıdır. Bu durumda;

$$k_1^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_1 \tag{1.34a}$$

$$k_2^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_2 \tag{1.34b}$$

elde edilir. (1.33) ve (1.34) eşitlikleri birleştirildiğinde metal-dielektrik arayüzeyinde ilerleyen SSP'ler için dağınım ilişkisi, eşitlik (1.35)'te ifade edilen haliyle elde edilir.

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \tag{1.35}$$

Bu ifade, sönümlü ya da sönümsüz metal olsun ε_1 'in hem kompleks hem de gerçek bileşenleri için geçerlidir. Eşitlik (1.35)'teki dağınım ilişkisinin özelliklerini detaylı bir şekilde tartışmadan önce, TE yüzey modlarının olası varlığını analiz etmek gerekir. TE modu için (1.29) ve (1.30)'da verilen eşitlikler dielektrik ortam (z>0) için yeniden düzenlenirse;

$$E_{\gamma}(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z}$$
(1.36a)

$$H_x(z) = -iA_2 \frac{1}{\omega\mu_0} k_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z}$$
(1.36b)

$$H_z(z) = A_2 \frac{\beta}{\omega\mu_0} e^{i\beta x} e^{-k_2 z}$$
 (1.36c)

ve iletken ortam (z<0) için yeniden düzenlenirse;

$$E_{\nu}(z) = A_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \tag{1.37a}$$

$$H_{x}(z) = iA_{1} \frac{1}{\omega\mu_{0}} k_{1} e^{i\beta x} e^{k_{1}z}$$
(1.37b)

$$H_z(z) = A_1 \frac{\beta}{\omega\mu_0} e^{i\beta x} e^{k_1 z}$$
(1.37c)

ifadeleri elde edilir. E_y ve H_x bileşenlerinin arayüzeyde sürekliliği eşitlik (1.38)'in oluşmasını sağlar.

$$A_1(k_1 + k_2) = 0 \tag{1.38}$$

Modların yüzeyde hapsedilmesi gerektiğinden (Re $[k_1] > 0$ ve Re $[k_2] > 0$), bu koşul $A_1 = 0$ ya da ayrıca $A_1 = A_2 = 0$ olması durumunda sağlanır. Böylece, TE kutuplamada herhangi bir yüzey modu elde edilmez. Yüzey plazmon polaritonları, sadece TM

kutuplamada gerçekleştirilir. SPP'lerin dağınım ilişkilerine yakından bakarak incelemek gerekirse bu konuda Şekil (1.5) bize yardımcı olacaktır.

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$
(1.39)

$$\omega_p^2 = Ne^2 / (\epsilon_0 m_e) \tag{1.40}$$

Burada, ω_p , serbest elektron gazinin plazma frekansı, $N = 6.02 \times 10^{23}$ olup avogadro sayısını, $e=1.6 \times 10^{-19}$ C olup elektron yükünü ve m_e ise elektron kütlesini belirtmektedir. Şekil (1.5), gerçek Drude dielektrik fonksiyonu (1.39) ile tanımlanan sönümü ihmal edilen bir metal için eşitlik (1.35)'in grafikleştirilmiş halidir. Burada, hava için ($\varepsilon_2=1$), dielektrik malzeme (silisyum) için (ε_2 =2.25) olarak kullanılmıştır. Bu çizimde, ω frekansı, ω_p serbest elektron gazının plazma frekansına normalize edilmiş olarak ve dalga vektörünün β , gerçek kısımları sürekli çizgi ile sanal kısımları ise kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 1.5'te hava (gri kesikli çizgi) ve silisyum (siyah kesikli çizgi) ortamında yayılan elektromanyetik dalga için dağınım ilişkileri verilmiştir. Düşük frekans değerlerinde, hava ortamındaki yüzey plazmonları için dalga vektörleri dielektrik ortamdaki dalga sayılarına yakın değerlere sahiptir. Eşitlik (1.41)'de verilen karakteristik yüzey plazmon frekansına (ω_{sp}) yaklaştıkça iletim elektronlarının osilasyonu ihmal edildiğinden dolayı hem hava hem de dielektrik malzemenin bulunduğu durumda yüzey plazmonları için dalga vektörü sonsuza gider. Aynı zamanda bu bölgede grup hızı sıfıra yaklaşır. Bundan dolayı yayılım modu elektrostatik davranış gösterir ve bu durum yüzey plazmon modu olarak adlandırılır [49].

$$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1+\varepsilon_2}} \tag{1.41}$$

Hava ortamı için $\omega_{sp} = 0.707 \omega_p$ ve dielektrik ortam için ise $\omega_{sp} = 0.555 \omega_p$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 1.5'te verilen dağınım ilişkisinde $\omega_p > \omega > \omega_{sp}$ için dalga vektörü sanaldır ve herhangi bir yayılım yoktur. $\omega > \omega_p$ olduğu kısım ışınımlı bölge olarak bilinir ve elektromanyetik dalga metalin içinde yayılabilir. Yüzey plazmon polaritonların uyarımı temel olarak iki farklı sistemle sağlanır. Bunlardan ilki prizma şeklinde tasarlanmış yapılardır. Bu yapıda iki farklı tasarım Kretschmann ve Otto tarafından sunulmuştur. Diğer sistem ise ızgara şeklinde tasarlanmış yapılardır [49].



Şekil 1.5. İhmal edilebilir çarpışma frekanslı bir Drude metal ve hava arasındaki SPP'lerin dağınım ilişkisi (gri eğri) ve Drude metal ve silisyum arasındaki SPP'lerin dağınım ilişkisi (siyah eğri).

1.2.1. Prizma Kuplajı

Şekil 1.6 (a)'da Kretschmann, Şekil 1.6 (b)'de ise Otto'ya ait prizma kuplaj şemaları görülmektedir. Bu şemalar, sönümlü elektromanyetik alanlar ile yüzey plazmon polaritonlarının kuplajını göstermek için sıklıkla kullanılan şemalardır [50].



Şekil 1.6. Prizma kuplajı: (a) Kretschmann, (b) Otto tasarımı.

Kretschmann tasarımında, metal film cam prizma üzerine buharlaştırma tekniğiyle kaplanır [51]. Metal film, toplam yansıma açısıdan daha büyük geliş açılı bir kaynakla dielektrik prizma boyunca aydınlatılır. Işığın dalga vektörü, optik olarak yoğun ortamda

arttırılır. Fotonun belirli bir açıda yüzey plazmon polariton vektörüyle çakışması durumunda rezonant ışık metal boyunca ilerler [49].

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{\text{prizma}}} \sin \theta \tag{1.42}$$

Bu rezonant koşullar altında, ışık SPP'ler ile %100'e yakın verimle kuple olurken, prizma arayüzeyinden çok küçük bir yansıma gözlenir. Diğer bir geometri, ince hava boşluğu tarafından metal filmden ayrılan prizma türü olan Otto geometrisidir [52]. Toplam dahili yansıma, prizma-hava arayüzeyinde gerçekleşir. SPP'lerin uyarımı ışığın metal hava arayüzeyine geçmesiyle gerçekleşir. Bu tasarım, direkt metal yüzeyle etkileşime geçilmek istenmediği örneğin yüzey kalite çalışmaları yapıldığı zaman tercih edilir.

1.2.2. Izgaralı Yapılarda Kuplaj

Metal bir yüzeye çarpan fotonların düzlem momentumu ($k_x = k \sin \theta$) ve β arasında meydana gelen dalga vektöründeki uyumsuzluk, metal yüzeyleri örgü sabiti a olan sığ kanal veya delik ızgaralarla modelleyerek giderilebilir. Örnek olarak, Şekil 1.7'de tek boyutlu ızgara kanal görülmektedir [49].

Faz eşleşmesi, aşağıdaki koşul gerçekleştiği zaman sağlanır.

$$\beta = k \sin \theta \pm x \, \mathrm{g} \tag{1.43}$$



Şekil 1.7. Periyodu a olan metal bir ızgara kullanarak SPP'lerle ışığın faz eşleşmesinin sağlanması.
g = $\frac{2\pi}{a}$ ızgaranın ters vektörü ve x = (1,2,3...). Prizma kuplajlamasında olduğu gibi, SPP'lerin uyarımı, yansıyan ışıkta minimum olarak tespit edilir.

1.2.3. Metal Nanoparçacıklarda Yüzey Plazmon Polaritonların Uyarımı

Temel plazmonik uyarımlardan diğeri ise, yerelleşmiş yüzey plazmonudur. Yerelleşmiş yüzey plazmonları (localized surface plasmon; LSP), metal nanoparçacıklar üzerindeki yayılmayan plazmon uyarımlarıdır. Küçük izoleli metal parçacıklar için elektromanyetik alanların nüfuz derinliği (gümüş metali için optik mesafede yaklaşık 20 nm) farklılık gösterir. Harici bir elektromanyetik alan metal içerisine nüfuz edebilir ve iletim elektronlarını hareket ettirebilir (Şekil 1.8). Alanlarla birlikte hareket eden elektronlar, osilasyon meydana getirir. Bu davranış, efektif elektron kütlesi ve yük yoğunluğu hakkında bilgi verir. Yerelleşmiş yüzey plazmonlarıyla ilgili pek çok fiziksel etki, bu temel modelle açıklanabilir.



Şekil 1.8. İki farklı kutuplama (x- ve y) için metal parçacıklarda meydana gelen yakınalan kuplajı.

Spektral olarak yerelleşmiş yüzey plazmon rezonansları elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinden yakın-kızılötesi bölgeye kadar meydana gelebilir. Metaller rezonans frekanslarında uyarılırlarsa, indüklenen elektromanyetik alanların genliği, uyarıcı alanlardan 10 kat daha fazla değere ulaşır [49]. Küçük metal parçacıklarda yerelleşmiş SPP'ler, yayılmayan sabit kalan modlardır. Bu modlar, boyut olarak optik dalga boyundan daha küçük ve yapısal olarak homojen olmayan ortamlarda uyarılır. R, bir küresel metal parçacığın yarıçapı olarak kabul edilsin. 1/*R*, paralel SPP dalga vektörü gibi davranır. Bir yüzey dalgasını ($\lambda = 2\pi/k$) dalga boyuna benzetmede, küresel parçacık

için, yerel mod, efektif dalga boyu (λ_{eff}) ile tanımlanabilir. Burada $\lambda_{eff} = 2\pi R$ olarak tanımlanırken, bu durum bize $k \sim 1/R$ eşitliğini sağlar [53].

1.3. Çok Katmanlı Yapıların Teorik Altyapısı

Şekil 1.9'da alt taban üzerine konumlandırılmış metal ve dielektrikten oluşan çok katmanlı bir yapı görülmektedir. Metallerin kalınlığı d_m , dielektriklerin kalınlığı d_d ile tanımlanmıştır. Z_k , ortamların karakteristik empedanslarıdır [54]. Periyodik yapılardaki soğurum analizi, TE dalgasının (Z(z) = -Ey/Hx) dalga empedansını kullanarak empedans dönüştürme metodu [55] ile sağlanabilir. Her bir ortamın karakteristik empedansı denklem (1.44) ile tanımlamıştır. μ_k , ortamın manyetik geçirgenliği, ε_k ise ortamın elektriksel geçirgenliğidir. θ , ışığın geliş açısıdır.



Şekil 1.9. Çok katmanlı yapıların genel görünümü.

$$Z_k = \frac{1}{\cos\theta} \sqrt{\frac{\mu_k}{\varepsilon_k}} \tag{1.44}$$

Periyodik problemlerle ilgili olarak, (k + 1). ve k. katmalar arasındaki dalga empedansı Z(k) olarak tanımlanmıştır. Dalga empedansı 1. metal/dielektrik arayüz için denklem (1.45) olarak elde edilmiştir [54].

$$Z(1) = Z_1 \frac{Z(0) - iZ_1 \tan \varphi_1}{Z_1 - iZ(0) \tan \varphi_1}$$
(1.45)

 $\varphi_1 = k_z d$, katmanın faz kayması ve Z(0) değeri denklem (1.46) ile açıklanabilir.

$$Z(0) = \frac{1}{\cos\theta} \sqrt{\frac{\mu_{\text{alt taban}}}{\varepsilon_{\text{alt taban}}}}$$
(1.46)

k. katman için dalga empedansı denklem (1.45)'in yeniden düzenlenmesiyle denklem(1.47) ile ifade edilebilir.

$$Z(k) = Z_k \frac{Z(k-1) - iZ_k \tan \varphi_k}{Z_k - iZ(k-1) \tan \varphi_k}$$
(1.47)

Sistemin yansıması denklem (1.48)'deki gibi verilebilir.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_n}{Z_{in} + Z_n} \tag{1.48}$$

 Z_{in} , giriş ortamının (hava) karakteristik empedansıdır. Sonuç olarak, mükemmel soğurum, aşağıdaki iki temel durumun sağlanması ile elde edilebilir.

(i) Alt taban, geçişin ihmal edilebilmesi için gelen bütün ışığı yansıtmalıdır.

(ii) $Z_{in} = Z_n$ eşitliğinin sağlanması gerekir.

Gelen ışığın dalga boyuna göre, metal katman kalınlığı çok ince ise, alt tabanın kırıcılık indisinin reel kısmı ihmal edilebilir. Bu durumda Z_n (denklem 1.47'de) tan $(k_z d_d)$ 'nin bir fonksiyonu olarak periyodik olarak değişecektir. Bu durum, farklı soğurum bantlarına neden olacaktır. En üstteki katman, belirli dalga boylarında ışığı soğurmak için değişik metalik yapılarda tasarlanabilir [54].

1.4. Plazmonik Algılama

Metal nanoparçacık tabanlı optik algılayıcıların performansları, yerelleşmiş plazmon rezonansı sayesinde oldukça yüksektir [55]. Rezonans dalga boyu, malzemelerin hassasiyeti kadar boyutu ve geometrisine de bağlıdır. Önceki çalışmalarda rezonans dalga boyu çevresel değişiklikler ile değiştirilebilirken, günümüzde yapılan çalışmalarda yerelleşmiş yüzey plazmon rezonansı (localized surface plasmon resonance; LSPR) elektromanyetik spektumun görünür bölgesinden yakın-kızılötesi bölgeye kadar değiştirilebilir. Plazmonik nanoyapıların algılama performansı algılama başarı ölçütü (figure of merit; FOM) parametresiyle belirlenir. FOM ise temel olarak eşitlik (1.49) ile belirlenir.

$$FOM = \frac{s}{\Delta\lambda} \tag{1.49}$$

Burada, S = $\partial \lambda_{rez} / \partial n$ (nm/RIU), rezonans dalga boyunun (λ_{rez}), çevresel birim kırıcılık indisi (refractive index unit; RIU) değişimine karşı göstermiş olduğu hassasiyettir. $\Delta \lambda$ ise rezonans dalga sayısında yarım maksimumda tam genişlik (full width at half maximum; FWHM) değeridir [56]. Özellikle tek nanoparçacık kullanılan tasarımlarda metallerde meydana gelen omik kayıplar nedeniyle, her iki parametreyi güçlendirmek oldukça zordur [56-58]. Ancak, soğurum kayıplarına göre ihmal edilebilir saçılma kayıplarına sahip aşırı küçük metal parçacıklar kullanılarak istenilen elektrostatik limitlere ulaşılabilir. Diğer yandan, pratik uygulamalarda sinyallerin ölçülebilir olması için nispeten daha büyük nanoparçacıklar seçilmelidir [59].

1.5. Yüzey Plazmon Rezonansı Tabanlı Algılama Yöntemleri

Optik biyoalgılayıcılar, biyomedikal arastırma, sağlık hizmetleri, eczacılık, cevre izleme ve ülke güvenliği gibi geniş uygulamalara sahip güçlü algılama ve analiz araçlarıdır [60-64]. Genel olarak, iki çeşit algılama protokolü vardır. Bunlar, floresans ve etiketsiz (label-free) algılamadır [65]. Floresans tabanlı algılamada ya hedef molekül ya da biyotanımlama molekülü boya gibi floresans etiketler kullanılarak tespit edilir. Floresansın şiddeti, hedef moleküllerin varlığı ve hedef ve biyo-tanımlama molekülünün etkileşiminin gücünü belirtir. Floresans tabanlı algılama yöntemi genellikle aşırı hassas olmasına rağmen, bu yöntem zahmetli etiketleme işlemleri içerir [65]. Diğer yandan, etiketsiz algılama yönteminde, herhangi bir etiketleme işlemi gerek duyulmaksızın, moleküller kendi doğal şekillerinde tespit edilir. Bu yöntem, dinamik izleme sağladığı kadar nispeten gerçekleştirilmesi daha kolaydır. Ayrıca, bazı etiketsiz prosedürler, genellikle numunenin konsantrasyonu veya yüzey yoğunluğu ile ilgili olan moleküler etkileşimler tarafından indüklenen kırılma indisi değişimini ölçer. Bu nedenle, büyük miktarlarda örneğe ihtiyaç yoktur. Bu özellik, etiketsiz algılama yöntemini nanolitreden femtolitreye kadar aşırı küçük hacimli örneklerin tespiti için oldukça avantajlı yapar [65]. Molekülün yüzeye bağlanması ile yüzeyin kırıcılık indisi değişir. Bu nedenle, rezonans dalga boyunda kaymalar meydana gelmektedir. Bu sayede, floresan boyaya ihtiyaç duymadan yüzey üzerinde molekülün varlığı tespit edilir. Yüzey plazmon polaritonları, 1şığın metal boyunca ilerlemesi sırasında metal ve dielektrik arayüzeyde oluşan boylamsal yük yoğunluğu dağılımlarıdır. Metalin kırıcılık indisi $n_m = \sqrt{\varepsilon_m}$, algılanan numune (analit)/ortamın kırıcılık indisi ise $n_a = \sqrt{\varepsilon_a}$ olarak tanımlanabilir. ε_m ve ε_a , sırasıyla metalin ve analitin elektriksel geçirgenliğidir. Yüzey plazmon rezonansı tabanlı algılayıcılar da SPP uyarımını göstermek için temel olarak Şekil 1.10'daki Kretschmann tasarımı kullanılır. SPP tabanlı optik biyoalgılayıcılarda, analitin SPP'nin uyarıldığı arayüze yakın olması algılama sürecindeki en önemli konudur. Burada, SPP yayılımı metal ve analit arayüzeyinde gerçekleşir [66]. Arayüzeyde yük yoğunluğu üretebilmek için, gelen dalganın enine manyetik olması bir başka ifade ile y-yönünde olması gerekmektedir. Metal ve analit bölgesindeki alan ifadeleri ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$E_i(r,t) = (E_{ix}, 0, E_{iz})e^{-k_{zi}|z|}e^{i(k_{xi}x - wt)}$$
(1.50)

$$H_{i}(r,t) = (0, H_{i\nu}, 0)e^{-k_{zi}|z|}e^{i(k_{xi}x - wt)}$$
(1.51)

Burada k_{zi} , dalga vektörünün z bileşeni, k_{xi} ise dalga vektörünün x bileşenini ifade eder. Yukarıdaki denklemleri Maxwell denklemlerine yerleştirip, süreklilik koşulları uygulanırsa; SPP'lerin farklı bir ortamda yayılırken sahip olduğu dalga vektörü ifadesi denklem (1.52) ortaya çıkar.

$$k_{x} = k_{SP} = \frac{w}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_{m} \varepsilon_{a}}{\varepsilon_{m} + \varepsilon_{a}}}$$
(1.52)

Gelen dalganın x-bileşeni k_{SP} ile örtüşür. Yukarıdaki denklemde tanımlanan durum gelen ışın havadan geliyorsa uygun olmayabilir. Bu nedenle, metal/dielektrik arayüzeyde oluşan yüzey plazmon dalga vektörlerine uyumlu olabilmesi için gelen dalganın dalga vektörü prizmanın yüksek kırıcılık indisi tarafından arttırılır (Şekil 1.10 (a)). Metalin $(\varepsilon_m = \varepsilon_{mr} + i\varepsilon_{mi})$ ve analitin $(\varepsilon_a = \varepsilon_{ar} + i\varepsilon_{ai})$ elektriksel geçirgenlikleri ve k_{SP} , kompleks bileşenler ve k_{zi} sanal bileşenler içerdiği için, arayüzey boyunca ve analit içerisinde dalga sönümlenmesi eksponansiyel olarak meydana gelir. Şekil 1.10 (b), metal ve analit içerisindeki alanların z-bileşeninin davranışını göstermektedir. SP uyarımı koşulları sağlandığında, yansıtıcılıkta ($R = I_r/I_i$) bir dip noktası elde edilir. Burada, I_i , gelen sinyalin şiddetini, I_r ise yansıtılan sinyalin şiddetini belirtir. $k_x = k_0 n_p sin \theta_i = k_{SP}$ eşitliği, ışığın dalga boyu sabit iken rezonans açısını ve ışığın geliş açısı sabit iken ise rezonans dalga boyunu vermektedir. Analit kırıcılık indisinin değişmesiyle, plazmonların yayılımı değişecek ve bu sayede rezonans noktası değişecektir.



Şekil 1.10. (a) Kretschmann tasarımında, metal/dielektrik arayüzeyde boylamsal yük yoğunluğunun üretilmesi (ε_p , prizmanın elektriksel geçirgenliği, θ_i , ışığın yüzeye geliş açısı ve d_m , metal kalınlığı). (b) δ_m , δ_a , sırasıyla metal ve analit bölgesindeki dik alanların yüzeye olan sönüm mesafeleri.

1.6. Kızılötesi Spektroskopi

Moleküllerin varlığı hakkında detaylı bilgi sağlaması nedeniyle kullanılan yöntemlerden biri de elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde gerçekleştirilen kızılötesi spektroskopi yöntemidir. Elektromanyetik spektrumun kızılötesi (infrared; IR) bölgesi üç temel bileşenden oluşur. Bu üç bileşen sırasıyla yakın, orta ve uzak kızılötesidir. Tablo 1'de her bir bölgenin dalga boyu, dalga sayısı ve frekans değerleri verilmiştir. Kızılötesi spektroskopisi, spektroskopik yöntemler arasında en fazla kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, hızlı, hassas, uygulaması kolay, tekrar edilebilir ve güvenli bir yöntemdir. Bu yöntem, ayrıca nicel ve nitel olarak değerlendirme imkânı vermektedir [48]. Kızılötesi spektrumun standart formatı yansıma, geçiş ve soğurumun değişimine karşılık dalga sayısı (cm⁻¹) şeklindedir.

Kızılötesi	Dalga boyu	Dalga sayısı	Frekans
Yakın-kızılötesi	$800 \text{ nm} - 2.5 \mu \text{m}$	12500 cm ⁻¹ - 4000 cm ⁻¹	374 THz - 120 THz
Orta-kızılötesi	2.5 μm - 25 μm	4000 cm ⁻¹ - 400 cm ⁻¹	120 THz – 12 THz
Uzak-kızılötesi	25 µm - 1 mm	400 cm^{-1} - 10 cm^{-1}	12 THz – 0.3 THz

Tablo 1.1. Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde yer alan bölgeler.

Bu spektrumun özellikleri (IR soğurum bantları, bantların şiddetleri ve şekilleri) bileşiğin moleküler yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu spektrumlar, moleküllerin parmak izlerini de göstermektedir. IR bölgesi, bağ atomlarının temel titreşimlerini içerir. Bağ atomları ne zaman titreşirse, IR enerjiyi soğurur ve IR soğurum bantları sergilerler [48]. İnorganik bileşiklerde, karakteristik titreşimler genellikle IR spektrumun 4000 ve 1500 cm⁻¹ arasında meydana gelmektedir. İnorganik bileşikler, ağır metal içeriklerinden dolayı karakteristik titreşimler daha düşük frekanslarda görülür. Karakteristik titreşimler, fonksiyonel gruplarda bulunan gerilme titreşimleri halindedir (Şekil 1.11). Tek bantlar, molekülün tanımlanması için yeterli değilken, molekülün tipi ve miktarı hakkında yararlı bilgi vermektedirler [48]. Organik bileşiklerin 1500 cm⁻¹ in altındaki tüm frekansları, moleküler titreşimleri ve genellikle moleküllerin büyük parçalarının veya tamamının karakteristik parmak izlerini belirten bükülme hareketlerini içerir.



Şekil 1.11. CH₂ (metilen) fonksiyonel grubunun simetrik ve asimetrik titreşim davranışı ve rezonans frekansları.

Saf bileşenlerin ve karışımların bant şiddetleri, bileşenlerin konsantrasyonlarıyla doğru orantılıdır. Ölçülen şiddetler ve konsantrasyon arasındaki ilişki denklem (1.11)'deki Beer Lambert yasası ile açıklanır. Böylece, tek veya çoklu bileşen analizi, bant yüksekliği ve bant şiddeti gibi temel sayısal araştırmalar yapmak mümkün olmaktadır [48].

1.7. Plazmonik Nanoantenlerin Kızılötesi Spektroskopi Tabanlı Biyoalgılama Uygulamalarında Kullanılması

Plazmonik nanoantenler, ışığı dalga boyundan daha küçük hacimlere sıkıştırılabilme özelliğinin yanında kolaylıkla günümüz teknolojileri ile üretilebilme, tekrar tekrar kullanılabilme [67-69], rezonans frekanslarının algılama bölgelerine kaydırılabilme [70-72] ve üzerine gelen sinyalin şiddetini kuvvetlendirme [73-77] gibi kızılötesi spektroskopide verimli bir şekilde kullanılabilmelerini sağlayan özelliklere de sahiptirler. Nanofabrikasyon teknikleri ile üretilen metalik nanoantenler, orta-kızılötesi bölgede iyi tanımlanmış plazmonik rezonanslar sağlarlar. Zengin spektroskopik bilgiye ulaşmak için bu rezonanslar, moleküllerin titreşim bantlarını hedefleyecek şekilde ayarlanabilir [68]. Titreşimsel parmak izleri, tespit, tanımlama ve teşhis amaçlı lipitler ve proteinler gibi moleküller hakkında atomik düzeyde bilgi sağlarlar [78,79]. Özellikle, orta-kızılötesi spektroskopide biyolojik ve kimyasal numunelerin kendilerine has parmak izleri elde edilmektedir. Bu bölgede rezonans frekanslara sahip plazmonik nanoantenler, 10 nm veya daha düşük kalınlıktaki protein, lipit gibi biyolojik [80], PMMA [81] gibi kimyasal numunelerin parmak izlerinin algılanması için sıklıkla kullanılmaktadırlar. Şekil 1.12 (a)'da periyodu 1.6 µm olan dikdörtgen nanoanten dizilerinin elektron mikroskop görüntüsü verilmektedir. Adato vd. [68] yaptığı bu çalışmada, uygun kutuplama koşulları altında, orta-kızılötesi bölgede çalışan bu nanoanten dizisi ile üzerine damlatılan proteinin etkileşmesi sonucu nanoantenin, yansıma spektrumunda belirli frekanslarda değişim olmaktadır (Şekil 1.12 (b)). 1660 cm⁻¹ rezonans dalga sayısı değerinde proteinin Amide I bandı, 1537 cm⁻¹ rezonans dalga sayısı değerinde ise proteinin Amide II bandı antenin enerjisinin bir kısmını soğurmaktadır. Bunun nedeni, bir metalik nanoanten ile aynı rezonans frekansında titreşim yapan bir molekül etkileştiğinde bu iki sistem arasında kuplaj meydana gelir ve sonuçta spektral özellikler ortaya çıkar [68]. Nanoanten spektrumlarında bu izlerin kolaylıkla gözlemlenmesi, nanoantenleri biyolojik örneklerin tespiti ve incelenmesi için etkili bir şekilde çalışan spektroskopik biyoalgılayıcılar haline getirir [80,81].



Şekil 1.12. (a) Algılamada kullanılan dikdörtgen nanoanten dizileri. (b) Nanoantenin üzerine protein kaplanmadan önceki (kesikli çizgi) ve kaplandıktan sonraki (düz çizgi) deneysel yansıma spektrumu. Nanoantenin üretim periyodu 1.6 μm.

2. BÖLÜM

PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN NÜMERİK ANALİZİ

2.1. Giriş

Elektromanyetik problemlerin çözülmesinde analitik yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık yapılarda, sayısal yöntemleri temel alan simülasyon programları kullanılmaya başlanmıştır. Zaman domeninde sonlu farklar (finite difference time domain; FDTD) yöntemini kullanan Lumerical FDTD Solutions simülasyon programı, üç boyutlu tasarımların elektromanyetik simülasyonlarının hızlı ve deneysel sonuçlarla yüksek derecedeki uyumu nedeniyle bu tez çalışmasında tercih edilmiştir.

2.2. 3D-FDTD Metodu

FDTD yöntemi, elektromanyetik problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılır. FDTD yöntemi ile diferansiyel formdaki Maxwell denklemleri doğrudan zaman domeninde ayrıklaştırılabilir. 1966 yılında Yee tarafından ortaya atılan bu yöntem, uzayın seçilen farklı noktalarında elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin hesaplanabilmesini sağlar [82]. İzotropik bir uzay bölgesi ele alınırsa Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [83,84].

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$
(2.2)

Eşitlik (2.1) ve (2.2)'de verilen Maxwell denklemlerindeki **E** ve **H** alanlarına ait kısmi diferansiyel denklemlerdeki gerekli vektörel çarpımlar yapılırsa, manyetik alan;

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \begin{vmatrix} \vec{l} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix}$$
(2.3)

ile ifade edilebilir. Burada manyetik alanın 3 adet bileşeni vardır. Bunlar;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right)$$
(2.3a)

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right)$$
(2.3b)

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right)$$
(2.3c)

Elektrik alan;

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \begin{bmatrix} \vec{l} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{bmatrix} - \sigma(\vec{l} \cdot E_x + \vec{j} \cdot E_y + \vec{k} \cdot E_z) \end{bmatrix}$$
(2.4)

olarak ifade edilebilir. Burada elektrik alanın 3 adet bileşeni vardır. Bunlar,

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right)$$
(2.4a)

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right)$$
(2.4b)

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right)$$
(2.4c)

şeklinde yazılabilir. Uzayın herhangi bir noktasındaki elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirlerine bağlıdır ve bu bağlılık ortamın manyetik geçirgenliği ve dielektrik sabitiyle de ilgilidir. Yukarıda elde edilen 2.3 (a, b, c) ve 2.4 (a, b, c) eşitlikleri zamana bağlıdır. Bu eşitliklerin bilgisayar ortamında çözülebilmesi için ayrıklaştırılması gerekir.

Bu nedenle, Taylor serisinden faydalanılarak merkezi sonlu farklar açılımı yapılır. Öncelikle, çözüm bölgesindeki noktalar aşağıdaki gibi tanımlansın.

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$$
(2.5)

Konum ve zamanın herhangi bir fonksiyonu ise

$$F^{n}(i,j,k) = F(i\delta,j\delta,k\delta,n\Delta t)$$
(2.6)

olsun. Burada, $\delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ olup konumdaki artış, Δt ise zamandaki artışı temsil etmektedir. *i*, *j*, *k*, *n* değerleri ise birer tamsayıdır. İkinci derecede gerçekleşen konum ve zaman için sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak,

$$\frac{\partial F^n(i,j,k)}{\partial x} = \frac{F^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - F^n\left(i - \frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta x}$$
(2.7)

konumda ayrıklaştırmayı sağlarken,

$$\frac{\partial F^n(i,j,k)}{\partial t} = \frac{F^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - F^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k)}{\Delta t}$$
(2.8)

ise zamanda ayrıklaştırmayı sağlamaktadır. Yee, elektrik ve manyetik alan bileşenlerini kübik sistemde Şekil 2.1'deki gibi konumlandırmaktadır. Malzeme, her biri μ (manyetik geçirgenlik) ve ε (elektriksel geçirgenlik) değerine sahip olan ve uygun bir şekilde boyutlandırılmış Yee hücrelerine bölünerek analiz edilir. Alan elemanlarının hepsi için başlangıç değeri verilir. Daha sonra uygun bir cevap elde edilene kadar, alan denklemleri üzerinde iterasyon yapılır. E değerleri $t = n \cdot \Delta t$ 'de ve H değerleri $t = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta t$ 'de yenilenir. Ana döngü olan zaman döngüsü, seçilen maksimum zaman adımı tamamlanıncaya kadar işler. Eğer zaman Δt uzunluğunda ayrık adımlara ayrılırsa, şimdiki zamanda hesaplanan alan değerleri, önceki değerlere göre artar veya azalır.



Şekil 2.1. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin Yee hücresindeki konumları.

Eşitlik (2.7), denklemler (2.3) ve (2.4)'teki temel bileşenlerde uygulanırsa, elektrik ve manyetik alanlara ait ayrıklaştırılmış eşitlikler (2.9) ve (2.10) elde edilir. Elektrik alan bileşenleri;

$$E_{x}^{n+1}\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) = \left(1 - \frac{\sigma\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)\delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)}\right) E_{x}^{n}\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) + \frac{\delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)\delta}.$$

$$\left[H_{z}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right) - H_{z}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k\right) + H_{y}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}\right) - H_{y}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right)\right]$$

$$(2.9a)$$

$$E_{y}^{n+1}\left(i,j+\frac{1}{2},k\right) = \left(1 - \frac{\sigma\left(i,j+\frac{1}{2},k\right)\delta t}{\varepsilon\left(i,j+\frac{1}{2},k\right)}\right) E_{y}^{n}\left(i,j+\frac{1}{2},k\right) + \frac{\delta t}{\varepsilon\left(i,j+\frac{1}{2},k\right)\delta}.$$

$$\left[H_{x}^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) - H_{x}^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}\right) + H_{z}^{n+\frac{1}{2}}\left(i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right) - H_{z}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right)\right]$$
(2.9b)

$$E_{z}^{n+1}\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right) = \left(1 - \frac{\sigma\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right)\delta t}{\varepsilon\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right)}\right) E_{z}^{n}\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\delta t}{\varepsilon\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right)\delta}.$$

$$\left[H_{y}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right) - H_{y}^{n+\frac{1}{2}}\left(i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right) + H_{x}^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) - H_{x}^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right)\right]$$

$$(2.9c)$$

Manyetik alan bileşenleri,

$$H_{x}^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) = H_{x}^{n-\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\delta t}{\mu\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right)\delta} \cdot \left[E_{y}^{n}\left(i,j+\frac{1}{2},k+1\right) - E_{y}^{n}\left(i,j+\frac{1}{2},k\right) + E_{z}^{n}\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right) - E_{z}^{n}\left(i,j+1,k+\frac{1}{2}\right)\right]$$
(2.10a)

$$H_{y}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right) = H_{y}^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right)\delta}.$$

$$\left[E_{z}^{n}\left(i+1,j,k+\frac{1}{2}\right) - E_{z}^{n}\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right) + E_{x}^{n}\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) - E_{x}^{n}\left(i+\frac{1}{2},j+1,k+1\right)\right]$$
(2.10b)

$$H_{z}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right) = H_{z}^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right) + \frac{\delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right)\delta}.$$

$$\left[E_{x}^{n}\left(i+\frac{1}{2},j+1,k\right) - E_{x}^{n}\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) + E_{y}^{n}\left(i,j+\frac{1}{2},k\right) - E_{y}^{n}\left(i+1,j+\frac{1}{2},k\right)\right]$$

$$(2.10c)$$

olarak elde edilir [85].

2.3. Plazmonik Nanoanten Dizilerinin Tasarımı ve Nümerik Analizi

Literatürde sunulan çalışmalarda üç boyutlu yapıların tasarımı ve elektromanyetik analizleri için yaygın bir şekilde kullanılan simülasyon programı, Lumerical FDTD Solutions programıdır [86]. Tez çalışması sırasında plazmonik nanoanten dizilerinin tasarımları ve analizleri bu programla yapılmıştır. Lumerical FDTD Solutions, üç boyutlu nanoanten dizilerini tasarlamaya olanak tanıyan bir arayüze sahiptir. Bu program ile tasarlanan nanoantenlerin elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinden uzakkızılötesi bölgeye kadar frekans ve zaman domeninde yansıma ve geçiş karakteristikleri, bu karakteristiklere bağlı soğurum karakteristiğinin belirlenmesi sağlanır. Elde edilen rezonans frekanslarında nanoantenler üzerindeki yakın-alan dağılımları net bir şekilde gözlenebilmektedir. Antenlerin boyutlarının değiştirilmesiyle farklı genlik ve frekanslı spektrumlar elde edilerek geometrik parametre hassasiyetleri ortaya çıkarılabilmektedir. Tasarlanan yapıların bulundukları ortamın kırıcılık indisi değişimine ve ışığın kutuplanmasına bağlı göstermiş olduğu hassasiyet gibi önemli parametreler de belirlenebilir. Bu program ile plazmonikler, metamalzemeler, fotonik kristaller ve kırınım optiği, parçacık ve yüzey saçılımı, mikroskop ve litografi, sıvı kristaller, fotonik entegreli devreler, manyeto-optik ve güneş pilleri gibi pek çok alanda analizler yapılabilmektedir [87-93].

3. BÖLÜM Plazmonik nanoanten dizilerinin üretimi ve analizi

3.1. Giriş

Lumerical FDTD Solutions simülasyon programı ile tasarlanan nanoanten dizilerinin, deneysel olarak üretilmesi ve analizi İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi bünyesinde bulunan Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM)'da gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, nanoanten dizilerinin üretimi, görüntülenmesi ve soğurum spektrumunun elde edilirken kullanılan deneysel yöntemler hakkında bilgi verilecektir.

3.2. Nanoanten Dizilerinin Üretim Yöntemleri

Nanoanten dizilerinin üretimi temel olarak üç aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada silikon alt taban üzerine sırasıyla titanyum (Ti), altın (Au) ve magnezyum florür (MgF₂) elektron demet buharlaştırma yöntemi ile kaplanır. İkinci olarak hazırlanan bu alt taban üzerine her biri birbirinden farklı nanoanten desenleri elektron demet litografisi yöntemi kullanılarak aktarılır. Son olarak, aktarılan nanoanten desenlerinin üzerine yapıştırıcı katman olarak 5 nm Ti ve farklı kalınlıkta Au kaplanarak nanoantenler elde edilir.

3.2.1. Metal ve Dielektrik Malzemelerin Alt Taban Üzerine Kaplanması

İlk aşamada elektron buharlaştırma cihazı kullanılarak çok katmanlı alt taban hazırlanır. Elektron buharlaştırma cihazı, tekrarlanabilir, biyoalgılama uygulamaları için kullanışlı ve yüksek kalitede ince filmlerin oluşturulması imkânını vermektedir [94]. Bu cihazlar, her bir malzeme için ayarlanabilir akım ve gerilim altında metal ve dielektrik malzemelerin kaplanmasını sağlar. Buharlaştırılması hedeflenen malzemeler, metal ve dielektrik malzemelere göre çok daha yüksek erime noktasına sahip farklı grafit potaların içerisine yerleştirilir. Bu potalar, cihaz içerisinde bulunan hazneler içerisine konulur. Silikon alt tabanlar ise haznelerin yaklaşık 30 cm yukarısında bulunan bir tutucu üzerine yerleştirilir. Daha sonra cihaz kapakları kapatılarak, vakum pompaları çalıştırılır. Ortam basıncı 6×10^{-6} Torr'a gelince kaplama işlemine başlanır. Buharlaştırma, ısıtılan flamandan yayılan elektron demetinin manyetik alan ile hedef malzemeye yönlendirilmesi ile gerçekleşir. Çalışmalar sırasında 2 cm × 2 cm'lik silikon alt taban üzerine uygun akım ve gerilim altında ısıtılan filamanlar sayesinde sırasıyla 5 nm Ti, 200 nm Au ve 100 nm kalınlığında ise dielektrik ayırıcı olarak MgF₂ kaplanır. Bu çalışmalar için VAKSIS firmasının ürünü olan 4 potalı elektron demet buharlaştırma sistemi kullanılmış (Şekil 3.1 (a)) ve çip üzerine cihaz vakumu bozulmadan Ti, Au ve MgF₂ malzemeleri kaplanmıştır (Şekil 3.1 (b)).



Şekil 3.1. (a) Elektron demet buharlaştırma cihazı. (b) Kaplama sonrasında elde edilen çipler.

3.2.2. Üretilen Alt Taban Üzerine Nanoantenlerin Aktarılması

Elektron demet litografisi (electron beam lithography; EBL) yöntemi, 10 nm altındaki çözünürlüğe kadar desenler aktarabilme fırsatı veren bir yöntemdir [95]. EBL cihazı temel olarak, taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscopy; SEM), demet kesici, nanoboyutta desen üretme sistemi (nanometer pattern generation system; NPGS) yazılımı yüklü bilgisayar kontrollü bir cihazdır (Şekil 3. 2 (a)). SEM birimi desenin çip üzerinde hangi bölgeye aktarılacağını ve elektron demetlerinin çip üzerine odaklanmasını

sağlayan birimdir. Demet kesici, elektronların sadece desenlerin aktarılacağı bölge üzerine düşürülmesini sağlar. NPGS yazılımı ile aktarılması hedeflenen desenler cihaza tanıtılır.



Şekil 3.2. (a) Elektron demet litografi cihazı. (b) EBL yöntemi ile desenlerin aktarılması ve elde edilmesi.

Bu işlem için öncelikle Şekil 3. 2 (b)'de görüldüğü üzere hazırlanan 2 cm × 2 cm'lik alt taban üzerine elektron demetine duyarlı malzeme olan polimetil metakrilat (polymethyl methacrylate; PMMA) yaklaşık 200 nm kalınlığında olacak şekilde döndürme tekniği kullanılarak kaplanır. Kaplanan PMMA'ın çip üzerine tamamen yapışması için çip, 180°C'deki düzlemsel yüzeye sahip bir ısıtıcıda 5 dakika ısıtılır. Hazırlanan bu çok katmanlı alt taban üzerine EBL tekniği uygulanarak nanoboyuttaki desenler aktarılır. Çip metil izobütil keton (methyl isobutyl ketone; MIBK) ve izopropil alkol (isopropil alcohol; IPA) (1:3) oranındaki karışımında 50 sn boyunca tutularak desenlerin ortaya çıkarılması

sağlanır. Çip üzerine sırasıyla 5 nm kalınlığında Ti ve farklı kalınlıklarda Au kaplanır. Daha sonra PMMA ve istenmeyen altın kaplanan bölümlerin kaldırılması için çip 30 dakika 80°C'de aseton içerisinde bekletilerek lift-off (kaldırma) tekniği uygulanır. Son olarak, çip IPA ile yıkandıktan sonra kurutularak istenilen nanoanten dizilerinin elde edilmesi sağlanır.

3.3. Nanoanten Dizilerinin Elektron Mikroskobu ile Görüntülenmesi

Çip üzeri aktarılan nanoantenlerin görüntülerinin alınması için taramalı elektron mikroskop cihazı kullanılır (Şekil 3. 3 (a)). SEM cihazı, ışığın kırınım limitinden dolayı optik mikroskoplar ile elde edilemeyen yüksek çözünürlükteki görüntülerin alınması için sıklıkla kullanılan bir cihazdır [95]. 10 nm ve daha küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzey topografyasının taranması prensibiyle çalışır. Uygun vakum koşulları altında, 5 kV ile 30 kV arasında değişen gerilimi ile hızlandırılan ve manyetik lensler tarafından yoğunlaştırılan elektron demeti, tarama bobinleri arasından geçirilerek numune üzerine düşürülür. Geri saçılan ve ikincil elektron dedektörü tarafından eş zamanlı olarak numune yüzeyi hakkında iki boyutlu görüntü oluşturulabilir (Şekil 3.3 (b)). Bu çalışmalar için Nova NanoSEM 450 firmasının ürünü olan taramalı elektron mikroskop cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.3. (a) Taramalı elektron mikroskop cihazı. (b) Cihazın temel bileşenleri.

3.4. Nanoanten Dizilerinin Optik Karakterizasyonu

Plazmonik nanoanten dizilerinin kızılötesi bölgede yansıma, geçis ve soğurum gibi spektrumlarının elde edilmesi için mikroskoplu Fourier dönüşümlü kızılötesi (Fourier transform infrared; FTIR) [96] cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, bilgisayar kontrollü bir cihaz olup temel olarak Bruker firmasının Vertex 70 model FTIR spektrometre ve buna optik olarak bağlanmış Hyperion 2000 model mikroskoptan oluşmaktadır (Sekil 3.4 (a)). Ölçümler sırasında sıvı nitrojen soğutmalı civa kadmiyum tellür algılayıcı, potasyum bromür ışın ayırıcı ve silisyum karbür orta-kızılötesi ışık kaynağı kullanılmıştır. Ölçümler sırasında yapılan ayarlamalar ve elde edilen verilerin incelenmesi ise bilgisayara yüklü OPUS 6.5 yazılım programı ile gerçekleştirilmiştir. Ayna tarama hızı 20 kHz olarak seçilmiştir. Ölçümler sırasında 2 cm⁻¹ ve 4 cm⁻¹ spektral çözünürlük değerleri kullanılmıştır. Sinyal gürültü oranını arttırmak amacıyla her spektrum 256 ile 1024 arasında değişen tekrar sayılarında alınmıştır. Hyperion 2000 mikroskop ünitesi üzerinde 15x Opticon objektif ve nanoanten dizilerini sınırlayacak 85 µm x 85 µm ile 160 µm x 160 µm aralığında değişen boyutlarda diyafram açıklıkları kullanılmıştır. Aynı zamanda bu cihaz ile zayıflatılmış toplam yansıma (attenuated total reflectance; ATR) ölçümleri de yapılabilmektedir. Şekil 3.4 (b)'de ölçümde kullanılan temel bileşenler görülmektedir.



Şekil 3.4. (a) Mikroskoplu FTIR cihazı. (b) Ölçümler için kullanılan temel bileşenler.

4. BÖLÜM

TEZE ÖZGÜ PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİNİN NÜMERİK VE DENEYSEL ANALİZİ VE KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİ TABANLI BİYOALGILAMA UYGULAMALARI

4.1. Giriş

Plazmonik nanoanten dizileri, metaldeki elektron osilasyonu olan plazmonlar yoluyla ışığı çok küçük boyutlarda hapsedebilirler. Belirli frekanslarda ışığı soğurmak, kontrol etmek ve yönlendirmek için kullanılan plazmonik nanoanten dizileri, geometrik parametre değişimleri ile kızılötesi bölgede spektroskopi uygulamaları için büyük avantajlar sağlamaktadır [97,98].

4.2. Teze Özgü Üretilen Plazmonik Nanoanten Dizileri

Plazmonik nanoanten dizileri, enerjinin hapsedilmesi ve yönlendirilmesi gibi temel özellikleri ile biyoalgılama yapan sistemler için uygun anten yapılarıdır. Bu bölümde, teze özgü ve literatürden farklı dört adet nanoanten dizisinin nümerik ve deneysel sonuçları verilmiştir. İlk nanoanten dizisinin sadece nümerik sonuçları paylaşılırken, diğer üç nanoanten dizisinin ise nümerik ve deneysel sonuçları paylaşılmıştır. Nümerik sonuçları verilen nanoanten dizisi, N#1 kodu ile tanımlanırken, nümerik ve deneysel sonuçları verilen nanoanten dizileri ise sırasıyla D#1, D#2 ve D#3 kodları ile tanımlanmıştır. Deneysel üretimler yapılırken bir sonraki aşama olan kızılötesi spektroskopi tabanlı biyoalgılama uygulamalarında verimli bir şekilde kullanılabilmeleri için plazmonik nanoanten dizilerinin kalınlık, boyut vb. temel parametreleri bu doğrultuda ele alınmıştır. Deneysel çalışmalar, nanoanten yapılarının SEM cihazı ile görüntülenmesi ve mikroskoplu FTIR cihazı ile soğurum spektrumlarının elde edilmesi gibi temel analizleri içermektedir. Ayrıca, üretilen nanoanten dizilerinden ikisi ile gerçekleştirilen biyoalgılama uygulamaları hakkında da detaylı bilgi verilecektir.

4.2.1. N#1 Kutuplama Bağımsız Pencere Şeklindeki Nanoanten Dizilerine Ait Nümerik Sonuçlar

Plazmonik nanoanten dizileri için ilk örnek çok katmanlı alt taban üzerine tasarlanmıs pencere şeklindeki nanoantenlerdir (Şekil 4.1 (a)). Tüm yapı 500 nm kalınlığındaki silikon (Si) alt taban üzerine konumlandırılmıştır. Silikon alt taban üzerine ise sırasıyla 200 nm kalınlığında Au ve 100 nm kalınlığında MgF₂ dielektrik malzemesi film olarak tamamen kaplanmıştır. Malzemelerin tüm optik sabitleri Palik ve Dodge'den [99,100] alınmıştır. En üste ise yapının özgün optik karakterini ortaya çıkaran farklı boyutlardaki pencere şeklindeki nanoantenler, 50 nm kalınlığında altın parçacıklardan oluşmaktadır. Şekil 4.1 (b)'de yapının üstten görünümü verilmektedir. Şekildeki yapının boyutları L₁=2400 nm, L₂=1900 nm, L₃=700 nm, D=500 nm ve w=250 nm olarak belirlenmiştir. Yapının x- ve y- eksenindeki periyodikliği ($P_x=P_y$) ise 3000 nm'dir. Şekil 4.1 (c)'de ise yukarıda belirlenmiş parametre değerleri için elektrik alanın x-yönünde kutuplanması ile elde edilen yansıma, geçiş ve soğurum spektrumu görülmektedir. Yapı çift bant rezonans özelliği göstermektedir. İlk rezonans dalga sayısı değeri 1094 cm⁻¹ (32.8 THz) iken ikinci rezonans dalga sayısı değeri ise 3185 cm⁻¹ (95.5 THz)'dir. İlk rezonans değerinde %97 olan soğurum değeri, ikinci rezonansta ise %87 olarak elde edilmiştir. En alttaki Au filmin kalınlığından dolayı tüm sinyaller yansıtılır ve geçiş sıfır olur. Yansıma (Y) = 1-Soğurum (S) formülüyle elde edilir.



Şekil 4.1. (a) x-yönündeki kutuplama altında pencere şeklindeki nanoantenin şematik görünümü. (b) Nanoantenin üstten görünümü. (c) Belirlenmiş parametreler için elde edilen yansıma, geçiş ve soğurum spektumu.

Şekil 4.2'de yapının x-yönünde kutuplama altında parametre hassasiyeti nümerik olarak hesaplanmıştır. L₁, L₂ ve D değerleri değiştirilerek yansıma eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 4.2 (a)'da sabit L₂=1900 nm, L₃=700 nm, D=500 nm ve w=250 nm değerleri için L₁ değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen yansıma eğrisi görülmektedir. L₁ değerleri arttıkça rezonans dalga sayısı değerleri de azalmaktadır. Tasarım bütünleşik bir yapıya sahip olduğu için rezonanslar birlikte değişmektedir. Şekil 4.2 (b)'de L₁=2400 nm L₂=1900 nm, L₃=700 nm ve w=250 nm değerleri için D değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen yansıma eğrisi görülmektedir. D değerleri azaldıkça ilk rezonansta hafif bir değişim gözlenirken, ikinci rezonansta ise yansıma değerleri belirgin bir şekilde azalmaktadır. Şekil 4.2 (c)'de L₁=2400 nm L₂=1900 nm, D=500 nm ve w=250 nm değerleri için L₃ değerlerinin değişimine bağlı olarak elde edilen yansıma eğrisi görülmektedir. L₃ değerlerinin değişimi rezonans dalga sayısı ve yansıma değerlerinde hafif değişime sebep olmaktadır. Şekil 4.2 (d)'de L₁=2400 nm, L₂=1900 nm, L₃=700 nm, D=500 nm ve w=250 nm değerleri için yapı üzerine gönderilen ışığın kutuplama açısının değişimine bağlı olarak elde edilen yansıma eğrisi görülmektedir. Yapı tamamen kutuplama bağımsız bir davranış sergilemektedir.



Şekil 4.2. x-yönündeki kutuplama altında (a) L_1 değişimi için elde edilen yansıma eğrisi. (b) D değişimi için elde edilen yansıma eğrisi. (c) L_3 değişimi için elde edilen yansıma eğrisi. (d) Kutuplama açısının değişimine bağlı olarak elde edilen yansıma eğrisi.

Şekil 4.3'te yapının L₁=2400 nm, L₂=1900 nm, L₃=700 nm, D=500 nm ve w=250 nm değerleri için çift bant rezonansın fiziksel orijinini belirlemek için x-yönünde kutuplama altında yakın alan arttırım değerleri ($|E^2|/|E_0^2|$) ve dağılımları nümerik olarak elde edilmiştir. Şekil 4.3 (a)'da rezonans dalga sayısı değeri 1094 cm⁻¹ (32.8 THz) için elde edilen yakın alan arttırım değeri 1400 kattan fazladır. Yüzeye gelen enerji nanoantenin uç noktalarında hapsedilmektedir. Şekil 4.3 (b)'de ise rezonans dalga sayısı değeri 3185 cm⁻¹ (95.5 THz) için elde edilen bu değer 600 kattan fazladır. Burada ise gelen enerji nanoantenin iç bölgelerinde depolanmaktadır. Bu iki değer oldukça yüksek olup ışık-madde etkileşimi uygulamaları için verimin arttırılmasında önemli bir yere sahiptir.



Şekil 4.3. x-yönündeki kutuplama altında (a) rezonans dalga sayısı değeri 1094 cm⁻¹ (32.8 THz) için elde edilen yakın alan dağılımı ve değerleri (b) rezonans dalga sayısı değeri 3185 cm⁻¹ (95.5 THz) için elde edilen yakın alan dağılımı ve değerleri.

Kutuplama bağımsız nanoanten dizilerinin rezonans frekanslarının bulunduğu ortamdaki kırıcılık indisi değişimine göstermiş olduğu hassasiyeti belirlemek için yapı 100 nm kalınlığında farklı ortamlara nümerik olarak Şekil 4.4 (a)'daki gibi gömülmüştür. Bu ortamlar, sırasıyla hava (n=1), iyonize olmamış su (n=1.33), aseton (n=1.36) ve gliseroldür (n=1.47). Ortamların kırıcılık indis değerleri Çetin vd. [101] çalışmasından alınmıştır. Şekil 4.4 (b)'de L₁=2400 nm, L₂=1900 nm, L₃=700 nm, D=500 nm ve w=250 nm sabit değerleri için yapının bulunduğu ortamın değişimine bağlı olarak elde edilen yansıma spektrumu görülmektedir. Kırıcılık indisi değeri arttıkça nanoantenin rezonans değerleri düşük frekanslı bölgeye doğru kaymaktadır.



Şekil 4.4. (a) Ortam içerisine gömülen nanoantenin görünümü. (b) Her bir ortamda elde edilen yansıma spektrumu.

Sonuç olarak, bu çalışmada orta-kızılötesi bölgede çift bant özelliği gösteren nanoanten dizilerinin nümerik olarak incelenmesine ve kırıcılık indisi değişimine göstermiş olduğu hassasiyete ilişkin sonuçlar verilmiştir. Çift bant rezonans davranışının fiziksel kökeni, yakın alan dağılımlarıyla ve spektral özellikleri de geometrik parametre analizi ile kontrol edilerek ince bir ayar mekanizması elde edilmiştir. Kırıcılık indisi değişimine karşı nanoanten dizilerinin göstermiş olduğu hassasiyet, bu tasarımın orta-kızılötesi bölgede biyoalgılama uygulamalarında kullanılabileceğini göstermiştir.

4.2.2. D#1 Geometrik Desenli Nanoanten Dizilerine Ait Nümerik ve Deneysel Sonuçlar

Çok katmanlı alt taban üzerine üretilen ilk yapı geometrik desenli nanoantenlerdir (Şekil 4.5 (a) ve (b)). Öncelikle 500 nm Si alt taban üzerine sırasıyla 5 nm kalınlığında Ti, 200 nm kalınlığında Au, 100 nm kalınlığında MgF₂ malzemeleri film şeklinde elektron demet buharlaştırma tekniği ile kaplanmıştır. Hazırlanan bu alt taban üzerine 200 nm kalınlığında PMMA döndürme tekniği ile kaplanmıştır. Elektron demet litografi tekniği kullanılarak bu çip üzerine geometrik desenli nanoantenler 50×50 diziler halinde aktarılmıştır. Her bir dizi boyutu 85 μ m × 85 μ m'dir. Daha sonra hazırlanan bu çip MIBK-IPA (1:3) oranındaki karışımda 50 sn boyunca tutularak desenlerin ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Elektron demet buharlaştırma tekniği kullanılarak öncelikle yapıştırıcı katman olarak 5 nm kalınlığında Ti kaplanmıştır. Ti üzerine ise 100 nm kalınlığında Au kaplanmıştır. Son olarak bu çip 80°C'de aseton içerisinde 30 dakika bekletilerek deneysel işlemlerin üretim kısmı tamamlanarak istenilen nanoanten dizileri

elde edilmiştir. Şekil 4.5 (c)'de $L_1=L_5=550$ nm, $L_2=L_4=700$ nm, $L_3=600$ nm, $L_6=1200$ nm, S=200 nm, D=100 nm ve w=100 nm ve x- ve y- eksenindeki periyodikliği (P_x=P_y) 1700 nm olarak belirlenen yapının nümerik ve mikroskoplu FTIR ile ölçülen deneysel soğurum spektrumu görülmektedir. Nümerik ve deneysel sonuçlar %100'e yakın uyumludur. İlk rezonans dalga sayısı (1283 cm⁻¹ (38.46 THz)) değerinde %26, ikinci rezonans dalga sayısı (2529 cm⁻¹ (75.81 THz)) değerinde %90, üçüncü rezonans dalga sayısı (3542 cm⁻¹ (106.19 THz)) değerinde %80, dördüncü rezonans dalga sayısı (4936 cm⁻¹ (147.98 THz)) değerinde %80 soğurum elde edilmiştir. Deneysel spektrumun 4000 cm⁻¹ dalga sayısı bölgesinde küçük bir pik görülmektedir. Bu pikin oluşma nedeni, yapıştırıcı katman olarak kullanılan 5 nm kalınlığındaki titanyumdur. Şekil 4.5 (d)'de üretilen nanoanten dizilerinin bir bölümünün taramalı elektron mikroskobu ile alınmış görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.5. (a) x-yönündeki kutuplama altında geometrik desenli nanoantenin şematik görünümü. (b) Nanoantenin üstten görünümü. (c) Belirlenmiş parametreler için nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumu. (d) Diziler halinde üretilen nanoanten dizilerinin SEM görüntüsü.

Şekil 4.6'da yapının sabit $L_1=L_3=L_5=600$ nm, $L_2=L_4=700$ nm, $L_6=1600$ nm, S=200 nm, D=100 nm ve w=100 nm değerleri için x-yönünde kutuplama altında nümerik yansıma, geçiş ve soğurum spektrumları ve rezonans frekanslarında elde edilen yakın alan arttırım değerleri ($|E^2|/|E_0^2|$) görülmektedir. Şekil 4.6 (a)'da geçiş tamamen en alttaki Au film tarafından yansıtıldığı için sıfırdır. Soğurum (S=1-Y) bu durumda yansımanın tersi olmaktadır. Rezonansların fiziksel olarak meydana geldiği noktaları bulmak için yakın alan dağılım analizi yapılmıştır.



Şekil 4.6. x-yönündeki kutuplama altında nümerik (a) yansıma, geçiş ve soğurum spektrumu ve (b) birinci mod, (c) ikinci mod (d) üçüncü mod (e) dördüncü mod için elde edilen yakın alan dağılımları ve değerleri.

Şekil 4.6 (b-e)'de sırasıyla rezonans dalgasayısı 1200 cm⁻¹ (36 THz) değerinde yakın alan arttırım değeri 1500, 2171 cm⁻¹ (65.1 THz) değerinde 6500, 3298 cm⁻¹ (98.9 THz))

değerinde 3600, 4854 cm⁻¹ (145.53 THz) değerinde ise 5500 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, yapının üzerine gelen sinyalin gücünün 10^3 mertebesinde yükseltilmesi anlamına gelir. Yapının nümerik ve deneysel boyut analizi yapılmıştır. Şekil 4.7 (a)'da yapının x-yönünde kutuplanmış aydınlatma altında L₁ parametresi değişimine bağlı olarak elde edilen nümerik ve deneysel soğurum spektrumları görülmektedir.



Şekil 4.7. x-yönündeki kutuplama altında elde edilen nümerik ve deneysel soğurum spektrumu (a) L_1 değişimi (b) L_2 değişimi. Deneysel spektrumları gösteren grafiklerde sırasıyla L_1 =400 nm ve L_2 =550 nm için birim hücrenin SEM görüntüsü görülmektedir. (c) L_1 ve (d) L_2 nanoanten dizilerinin değişimlerine ait SEM görüntüleri.

Nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumunda sabit L₂=L₄=700 nm, L_3 =600 nm, L_6 =1400 nm, S=200 nm, D=100 nm ve w=100 nm değerleri için L_1 değeri arttıkça, ikinci rezonans dışındaki tüm rezonanslarda soğurum miktarı artarken rezonans dalga sayısı değerleri azalmaktadır. Şekil 4.7 (b)'de yapının x-yönünde kutuplanmış aydınlatma altında L₂ parametresi değişimine bağlı olarak elde edilen nümerik ve deneysel soğurum spektrumları görülmektedir. Nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumunda sabit L₁=L₅=550 nm, L₃=600 nm, L₆=1400 nm, S=200 nm, D=100 nm ve w=100 nm değerleri için L₂ değeri arttıkça, ikinci rezonans dışındaki tüm rezonanslarda rezonans dalga sayısı değerleri azalırken, birinci rezonansın soğurum miktarı azalmakta ve üçüncü ve dördüncü rezonansların soğurum miktarında önemli bir değişim görülmemektedir. Şekil 4.7 (c) ve (d)'de üretilen nanoanten dizileri görülmektedir. Şekil 4.8 (a)'da yapının x- yönünde kutuplanmış aydınlatma altında L₃ parametresi değişimine bağlı olarak elde edilen nümerik ve deneysel soğurum spektrumları görülmektedir. Nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumunda sabit $L_1=L_5=550 \text{ nm}$, $L_2=L_4=700 \text{ nm}$, $L_6=1400 \text{ nm}$, S=200 nm, D=100 nmve w=100 nm değerleri için L₃ değeri arttıkça, ilk iki rezonansta herhangi bir değişiklik gözlenmezken üçüncü ve dördüncü rezonansta hem soğurum miktarında hem de rezonans frekans değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmiştir. Şekil 4.8 (b)'de ise yapının xyönünde kutuplanmış aydınlatma altında L₆ parametresi değişimine bağlı olarak elde edilen nümerik ve deneysel soğurum spektrumları görülmektedir. Nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumunda sabit $L_1=L_5=550$ nm, $L_2=L_4=700$ nm, $L_3=600$ nm, S=200 nm, D=100 nm ve w=100 nm değerleri için L_6 değeri arttıkça, ikinci rezonans dışında herhangi bir değişiklik gözlenmemektedir. L₆ değeri arttıkça ikinci rezonansta soğurum miktarında önemli bir değişim gözlenmezken, frekans değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Dört parametre değişimi de bu yapının yakın alan dağılım analizini doğrulamaktadır. Şekil 4.8 (c) ve (d)'de üretilen nanoanten dizileri görülmektedir. Şekil 4.9'da ise yapının x-yönündeki kutuplama altında diğer parametre hassasiyetleri nümerik olarak incelenmiştir. D ve S'nin boyutları değiştirilerek yansıma eğrileri cıkarılmıştır. Şekil 4.9 (a)'da sabit $L_1=L_3=L_5=600$ nm, $L_2=L_4=700$ nm, $L_6=1600$ nm, S=200 nm ve w=100 nm değerleri için D değerleri arttıkça, üçüncü rezonansta dalga sayısı değerlerinde herhangi bir değişim yokken, yansıma değerleri artmaktadır. Diğer rezonanslarda önemli bir değişim olmamıştır.



Şekil 4.8. x-yönündeki kutuplama altında elde edilen nümerik ve deneysel soğurum spektrumu (a) L_3 değişimi (b) L_6 değişimi. Deneysel spektrumları gösteren grafiklerde sırasıyla L_3 =800 nm ve L_6 =1200 için birim hücrenin SEM görüntüsü görülmektedir. (c) L_3 ve (d) L_6 nanoanten dizilerinin değişimlerine ait SEM görüntüleri.

Şekil 4.9 (b)'de ise sabit $L_1=L_3=L_5=600$ nm, $L_2=L_4=700$ nm, $L_6=1600$ nm, D=100 nm ve w=100 nm değerleri için S değerleri arttıkça, ikinci rezonans dışındaki tüm rezonanslarda değişim görülmektedir. Rezonans frekans değerlerinde değişim gözlenirken, soğurum değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır.



Şekil 4.9. x-yönündeki kutuplama altında elde edilen yansıma eğrileri (a) D değişimi b) S değişimi.

Şekil 4.10 (a)'da L₁=L₃=L₅=600 nm, L₂=L₄=700 nm, L₆=1600 nm, S=200 nm, D=100 nm ve w=100 nm için tasarlanan yapının bulunduğu ortamın kırıcılık indisi değişimine karşı göstermiş olduğu hassasiyeti belirlemek için yapı 100 nm kalınlığında farklı ortamlara nümerik olarak gömülmüştür. Bu ortamlar, sırasıyla hava (n=1), iyonize olmamış su (n=1.33), aseton (n=1.36) ve gliseroldür (n=1.47). Şekil 4.10 (b)'de görüldüğü üzere elde edilen yansıma spektrumu yapının bulunduğu ortamın değişimine oldukça hassastır. Kırıcılık indisi değeri arttıkça nanoantenlerin rezonans dalga boyu değerleri artmaktadır. Bunun nedeni ise denklem (1.40)'ta belirtildiği gibi kırıcılık indisinin dalga sayısı ile ters, dalga boyu ile doğru orantılı olmasıdır. Şekil 4.10 (c-f)'de kırıcılık indisi değişimine karşılık olarak rezonans dalga boyunun değişimi görülmektedir. Kırıcılık indisi arttıkça yapının rezonans dalga boyu değerleri artmakta ve aralarında doğrusal bir ilişki görülmektedir. Yapının kırıcılık indisi değişimine karşı gösterdiği hassasiyet (S = $\Delta\lambda/\Delta n$) birinci mod için 3251.76 nm/RIU, ikinci mod için 1871.39 nm/RIU, üçüncü mod için 1335.69 nm/RIU ve dördüncü mod için 885.46 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan bu sistemin dört rezonans bandı sırasıyla 1010 nm, 400 nm, 210 nm ve 156 nm FWHM değerlerini sağlamaktadır. Rezonans piklerinde FOM değerleri ise sırasıyla 3.23 RIU⁻¹, 4.68 RIU⁻¹, 6.35 RIU⁻¹, 5.67 RIU⁻¹ olarak elde edilmiştir. Kararlı ve yüksek parametre hassasiyeti nedeniyle bu yapı, elektromanyetik spektrumun orta-kızılötesinden yakın-kızılötesi bölgesine kadar biyoalgılama uygulamaları için oldukça elverişlidir.



Şekil 4.10. (a) Ortam içerisine gömülen nanoantenlerin görünümü. (b) Her bir ortamda elde edilen yansıma spektrumu. Rezonans dalga boyunun kırıcılık indisi değişimine bağlı elde edilen doğrusal ilişki (c) 1. mod (d) 2. mod (e) 3. Mod (f) 4. Mod için.

Sonuç olarak, bu çalışmada orta-kızılötesi ve yakın-kızılötesi bölgede dörtlü bant özelliği gösteren nanoanten dizilerinin nümerik ve deneysel olarak tasarlanması ve kırıcılık indisi değişimine göstermiş olduğu hassasiyetine ilişkin sonuçlar verilmiştir. Dörtlü bant rezonans davranışının fiziksel kökeni, yakın alan dağılımlarıyla ve spektral özellikleri de geometrik parametrelerle kontrol edilerek ince bir ayar mekanizması elde edilmiştir. Kırıcılık indisi değişimine karşı nanoanten dizilerinin göstermiş olduğu hassasiyet, bu tasarımın kızılötesi bölgedeki geniş bir spektrumda biyoalgılama uygulamalarında kullanılabileceğini göstermiştir.

4.2.3. D#2 Belirli Aralıklarla Boyutları Azalan Dikdörtgen Nanoanten Dizilerine Ait Nümerik, Deneysel ve PMMA'ın Algılanma Sonuçları

Cok katmanlı alt taban üzerine üretilen ikinci yapı ise belirli aralıklarla boyutları azalan dikdörtgenler topluluğundan oluşan nanoantenlerdir (Şekil 4.11 (a) ve (b)). Öncelikle 500 nm Si alt taban üzerine sırasıyla 5 nm kalınlığında Ti, 200 nm kalınlığında Au, 100 nm kalınlığında MgF_2 malzemeleri film seklinde elektron demet buharlaştırma tekniği ile kaplanmıştır. Hazırlanan bu alt taban üzerine ise 200 nm kalınlığında PMMA, döndürme tekniği ile kaplanmıştır. Elektron demet litografi tekniği kullanılarak bu çip üzerine belirli aralıklarla boyutları azalan dikdörtgenler şeklindeki desenler 50×50 diziler halinde aktarılmıştır. Her bir dizi boyutu 160 µm × 160 µm'dir. Daha sonra hazırlanan bu cip MIBK-IPA (1:3) oranındaki karışımda 50 sn tutulmuş ve aktarılan desenler tamamen ortaya çıkarılmıştır. Son olarak, elektron demet buharlaştırma tekniği kullanılarak sırasıyla yapıştırıcı katman olarak 5 nm Ti ve 80 nm Au kaplanarak istenilen kalınlıkta nanoantenler elde edilmiştir. Son olarak bu çip 80°C'de aseton içerisinde 35 dakika bekletilerek deneysel işlemlerin üretim kısmı tamamlanarak istenilen nanoanten dizileri elde edilmiştir. Şekil 4.11 (c)'de L₁=2600 nm, L₂=2400 nm, L₃=2200 nm, L₄=2000 nm, L₅=840 nm, w₁=400 nm, w₂=200 nm ve x- ve y- eksenindeki periyodikliği $(P_x=P_y)$ 3200 nm olarak belirlenen yapının x- yönündeki kutuplama altında nümerik ve mikroskoplu FTIR ile ölçülen deneysel soğurum spektrumu görülmektedir. İlk rezonans dalga sayısı (1830 cm⁻¹ (54.86 THz)) değerinde %92, ikinci rezonans dalga sayısı (2800 cm⁻¹ (83.94 THz)) değerinde %90 soğurum elde edilmiştir. Nümerik ve deneysel analizde elde edilen rezonans frekansları ve soğurum miktarları oldukça uyumlu olup, sadece ikinci rezonansta elde edilen soğurum miktarı %70'tir. Deneysel soğurum değerinin nispeten daha düşük olmasının nedeni birim hücredeki yatay ve dikey olarak konumlandırılmış çubuklar arasında elektromanyetik kuplajın yeteri kadar güçlü olmamasıdır. Deneysel FWHM değerleri, nümerik soğurum spektrumundaki ilk rezonans göre 2 kat, ikinci rezonansa göre 1.5 kat daha dardır. Bunun nedeni, simülasyonlarda tasarlanan nanoantenlerin köşelerinin sivri, deneysel olarak elde edilen nanoantenlerin ise köselerinin nispeten daha oval olmasıdır. Bundan dolayı bu yapı dar bant mükemmel soğurucu olarak tanımlanabilir. Şekil 4.11 (d)'de üretilen yapının taramalı elektron mikroskobu ile alınmış görüntüsü verilmiştir. Birim hücre kırmızı kare içerisinde görülmektedir.



Şekil 4.11. Geometrik desenli nanoantenin (a) üstten (b) kesit görünümü. (c) Belirlenmiş parametreler için x-yönündeki kutuplama altında nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumu. (d) Diziler halinde üretilen nanoanten dizilerinin SEM görüntüsü. Kırmızı kare içerisindeki ise birim hücredir.

Çok katmanlı yapılarda rezonanslar, tek katmanlı yapılara göre daha dar bant özelliği göstermektedir. Bu amaçla, en üstteki nanoanten boyutları aynı olmak şartıyla tek ve çok katmanlı yapıların x-kutuplu aydınlatma altında davranışları incelenmiştir. Şekil 4.12 (a)'da tek katmanlı yapının nümerik yansıma spektrumu görülmektedir. Çift bant özelliği göstermesine rağmen ilk rezonansta 300 cm⁻¹, ikinci rezonansta ise 670 cm⁻¹ FWHM değeri göstermektedir. Şekil 4.12 (b)'de nümerik çok katmanlı yapı aynı kutuplama koşulları altında, yine çift bant özelliği göstermesine karşın tek katmanlı yapıya göre daha dar spektrumlara sahiptir. İlk rezonansta 170 cm⁻¹, ikinci rezonansta ise 165 cm⁻¹ FWHM değeri göstermektedir. Şekil 4.12 (c)'de deneysel çok katmanlı yapı ise nümerik olana göre daha dar spektrum sunmaktadır. İlk rezonansta 85 cm⁻¹, ikinci rezonansta ise 123 cm⁻¹ FWHM değeri göstermektedir. Kritik kuplajın sağlanmasında ve soğurum değerinin belirlenmesinde ise dielektrik MgF2 arayüzey kalınlığının önemli bir etkisi vardır. Şekil 4.12 (d)'de deneysel olarak elde edilen farklı dielektrik kalınlıklara sahip yapıların soğurum spektrumu görülmektedir. Dielektrik kalınlığı 55 nm iken ilk rezonansta elde edilen soğurum miktarı %70 iken, kalınlık 70-100 nm aralığında olduğunda soğurum miktarı %100'e yaklaşmaktadır. İkinci rezonansta da benzer bir şekilde dielektrik kalınlığı arttıkça soğurum değerinde artış görülmektedir.



Şekil 4.12. x-yönünde kutuplama altında tek ve çok katmanlı yapıların FWHM değerlerinin karşılaştırılması. (a) Nümerik tek katmanlı yapının yansıma spektrumu. (b) Nümerik çok katmanlı yapının soğurum spektrumu. (c) Deneysel çok katmanlı yapının soğurum spektrumu. (d) Deneysel MgF₂ kalınlık değişiminin soğurum spektrumuna etkisi.

Daha geniş bir frekans aralığında kolay ayarlanabilir rezonanslara ulaşmak için, aynı genişlikte tek bir çubuk kullanmak yerine, belirli aralıklarla boyutları azalan bir tasarım tercih edilmiştir. Çubukların toplam genişlikleri iki yapı için de 800 nm'dir. X-kutuplu aydınlatma kaynağı altında, L₁'in boyutu 200'er nm değiştirildiğinde rezonans değişikliği, belirli aralıklarla boyutları azalan yapı için daha fazladır (Şekil 4.13 (a)). İlk moddaki rezonans frekanslarında tek çubuklu yapı için çok az bir değişiklik vardır (Şekil 4.13 (b)). Uzunluktaki meydana gelen değişime karşılık daha fazla aralıkta rezonans değişimi,

yüzeyde arttırılmış kızılötesi spektroskopisi uygulamalarında hedef moleküllerin rezonans frekanslarına ulaşmak için oldukça önemlidir.



Şekil 4.13. x-kutuplu aydınlatma kaynağı altında (a) belirli aralıklarla boyutları azalan yapı ve (b) tek çubuk için ilk modda elde edilen soğurum spektrumu.

Rezonans frekanslarının fiziksel orijinini ortaya cıkarmak için FDTD simülasyonları ile yakın-alan dağılım ($|E^2|/|E_0^2|$) analizi yapılmıştır. Şekil 4.14 (a)'da yapının x-yönünde kutuplama altında L₁=2600 nm, L₂=2400 nm, L₃=2200 nm, L₄=2000 nm, L₅=840 nm, w_1 =400 nm ve w_2 =200 nm değeri için elde edilen yansıma, geçiş ve soğurum spektrumu görülmektedir. Burada geçiş sıfırdır. Soğurum ise yansımanın tam tersi spektruma sahiptir. Yukarıdaki boyutlar için ilk rezonans dalga sayısı değeri 1741 cm⁻¹ (52.2 THz) iken ikinci rezonans dalga sayısı ise 2962 cm⁻¹ (88.8 THz) olarak elde edilmiştir. Yatay monitör kullanılarak yapılan analiz ile Şekil 4.14 (b)'de orta-kızılötesi bölgede (1400-3200 cm⁻¹) yapı (z=300 nm'de) her bölgede enerji hapsetmektedir. İlk rezonansta dikey olarak konumlandırılmış antenler üzerinde 3800 kat enerji yükseltme değeri elde edilirken, ikinci rezonansta ise yatay olarak konumlandırılmış antenler üzerinde 5800 kat enerji yükseltme değeri elde edilmiştir. Şekil 4.14 (c) ve (d)'de sırasıyla ilk ve ikinci rezonans değerlerindeki dikey monitör kullanılarak elde edilen kesitsel yakın-elektrik alan dağılımı ve değerleri görülmektedir. Şekil 4.14 (e) ve (f) ise sırasıyla ilk ve ikinci rezonans değerlerindeki kesitsel yakın-manyetik alan dağılımını $(|H^2|/|H_0^2|)$ ve değerlerini göstermektedir. Çok katmanlı yapıların doğası gereği enerji iki metal arasında hapsedilmektedir. Elde edilen yakın-elektrik alan yükseltme değerleri oldukça yüksek olup ışık-madde etkileşimi uygulamaları için verimin arttırılmasında önemli bir yere
sahiptir. Çünkü ne kadar fazla enerji anten üzerinde hapsedilirse üzerine damlatılacak molekül ile ışık o kadar fazla etkileşecektir. Bu durum ise 10 nm veya daha düşük kalınlığa sahip polimerlerin kimyasal bağlarının algılanma performansını arttıracaktır.



Şekil 4.14. (a) Yansıma, geçiş ve soğurum spektrumu. (b) Orta-kızılötesi bölgede yapının yakın-alan yükseltme eğrisi ve değerleri. Rezonans dalga sayısı değeri (c) 1754.6 cm⁻¹ (yz kesiti x=-800 nm'de) ve (d) 3191 cm⁻¹ (xz kesiti y=1200 nm'de) kesitsel yakın-elektrik alan dağılımı. Rezonans dalga sayısı değeri (d) 1754.6 cm⁻¹ (yz kesiti x=-800 nm'de) ve (e) 3191 cm⁻¹ (xz kesiti y=1200 nm'de) kesitsel yakın-manyetik alan dağılımı ve değerleri.

Şekil 4.15 (a)'da, tasarlanan yapının sırasıyla üstten ve kesit görüntüsü verilmektedir. Burada, ϕ yapı üzerine gelen ışığın kutuplama açısını, θ ise ışığın geliş açısını göstermektedir. Yapının periyodikliğinin soğurum spektrumu üzerindeki etkisini göstermek için, L₁=2200 nm, L₂=2000 nm, L₃=1800 nm, L₄=1600 nm, L₅=820 nm, w₁=400 nm ve w₂=200 nm uzunluklarının sabit kalması koşuluyla yapının birim hücresinin periyodikliği 100 nm'lik adımlarla değiştirildi. Şekil 4.15 (b)'de, periyodikliği arttırdığımızda, ilk rezonansta önemli bir değişiklik olmazken, ikinci rezonansta hafif değişimler gözlenmiştir. Tüm rezonanslar için maksimum seviyede soğurum değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.15. (a) Yapının üstten ve kesit görüntüsü. (b) Yapının periyodikliğinin değişimine karşılık elde edilen soğurum spektrumu. (c) Kutuplama açısının (ϕ) ve (d) geliş açısının (θ) değişiminin soğurum spektrumuna etkisi. Nanoantenlerin periyodikliği (P) ise 3,2 µm'dir.

Şekil 4.15 (c)'de, ışığın yapı üzerine dik gelişi ($\theta = 0$) için, yapının kutuplama açısının değişimine göstermiş olduğu hassasiyet görülmektedir. Kutuplama açısı 0°(x-)'den 90°(y-)'e değiştirildiğinde, ilk moddaki rezonans frekansları daha düşük frekans bölgesine kayarken, ikinci rezonansta herhangi bir değişiklik yoktur. Kutuplama açısı 30°'den 60°'ye değiştirildiğinde ise, birim hücredeki dikey ve yatay çubuklar arasında kayda değer kuplajlar meydana geldiği için ilk rezonans bölgesinde küçük modlar oluşmaktadır. Şekil 4.15 (d), geliş açısının değişiminin sabit x-kutuplamalı aydınlatma kaynağı altında soğurum spektrumunun üzerindeki etkisini göstermektedir. Dik gelişte maksimum soğurum değerleri elde edilirken, geliş açısı arttırıldıkça (10°den 30°ye) tüm rezonanslarda düşük soğurum değerlerine ulaşıldı. Şekil 4.16'da yapının x-yönünde kutuplanmış aydınlatma altında elde edilen parametre hassasiyeti nümerik ve deneysel olarak verilmektedir. L_1 ve L_5 değerleri değiştirilerek soğurum spektrumları elde edilmiştir. Analizlerde L₁, L₂, L₃, L₄ değerleri arasında 200 nm'lik farklar vardır. Sekil 4.16 (a)'da sabit $L_5=850$ nm, $w_1=400$ nm ve $w_2=200$ nm değerleri için $L_1=1800$ nm, L₂=1600 nm, L₃=1400 nm, L₄=1200 nm değişimine bağlı olarak elde edilen nümerik soğurum spektrumu görülmektedir. L_1 boyutunun artması sırasında L_2 , L_3 , L_4 değerleri de aynı miktarda artmaktadır. L₁, L₂, L₃, L₄ değerlerinin artmasına bağlı olarak soğurum spektrumunun sadece ilk rezonans bölgesinde hapsedilen enerjinin frekansları daha düşük frekanslı sinyallere kaymaktadır. Soğurum miktarında herhangi bir değişim olmamıştır. Şekil 4.16 (b)'de sabit L₁=2400 nm, L₂=2200 nm, L₃=2000 nm, L₄=1800 nm, w₁=400 nm ve $w_2=200$ nm değerleri için L_5 değerlerinin değişimine bağlı olarak elde edilen nümerik soğurum spektrumu görülmektedir. L₅ boyutunun artması ile soğurum spektrumunun sadece ikinci rezonans bölgesinde hapsedilen enerjinin frekansları daha düşük frekanslı sinyallere kaymaktadır. Soğurum miktarında herhangi bir değişim olmamıştır. Şekil 4.16 (c)'de sabit $L_5=850$ nm, $w_1=400$ nm ve $w_2=200$ nm değerleri için $L_1=1800$ nm, L₂=1600 nm, L₃=1400 nm, L₄=1200 nm değişimine bağlı olarak elde edilen deneysel soğurum spektrumu görülmektedir. L1, L2, L3, L4 değerlerinin artmasına bağlı olarak nümerik sonuçlarda olduğu gibi deneysel soğurum spektrumunda sadece ilk rezonans bölgesinde hapsedilen enerjinin frekansları daha düşük frekanslı sinyallere kaymakta ve soğurum miktarı değişmemektedir. Şekil 4.16 (d)'de sabit $L_1=2400$ nm, $L_2=2200$ nm, L₃=2000 nm, L₄=1800 nm, w₁=400 nm ve w₂=200 nm değerleri için L₅ değerlerinin değişimine bağlı olarak elde edilen deneysel soğurum spektrumu görülmektedir.



Şekil 4.16. x-yönündeki kutuplama altında tüm değerlerin sabit sadece (a) L₁, L₂, L₃, L₄ değişimi için elde edilen nümerik soğurum spektrumu (b) L₅ değişimi için elde edilen nümerik soğurum spektrumu (c) L₁, L₂, L₃, L₄ değişimi için elde edilen deneysel soğurum spektrumu (d) L₅ değişimi için elde edilen deneysel soğurum spektrumları gösteren grafiklerde sırasıyla L₁=2200 nm ve L₅=820 nm için birim hücrenin SEM görüntüsü görülmektedir. (e) L₅=820 nm iken L₁, L₂, L₃, L₄ nanoanten dizilerinin değişimi ve (f) L₁=2000 nm iken L₅ nanoanten dizilerinin değişimlerine ait SEM görüntüleri.

L₅ boyutunun artmasına bağlı olarak nümerik sonuçlarda olduğu gibi deneysel soğurum spektrumunun sadece ikinci rezonans bölgesinde hapsedilen enerjinin frekansları daha düşük frekanslı sinyallere kaymakta ancak soğurum miktarında farklılıklar vardır. Soğurumdaki düşük değerlerin nedeni, birim hücredeki yatay ve dikey olarak konumlandırılmış çubuklar arasında EM kuplajın yeteri kadar güçlü olmamasıdır ve anten boyutu arttıkça çubuklar arasındaki kuplaj arttığı için soğurum miktarı artış göstermektedir. Şekil 4.16 (c)'de ve (d)'de görüldüğü üzere 2300 cm⁻¹ dalga sayısı civarında titanyumdan kaynaklanan modlar sabit değildir. Bunun nedeni ise üretim sırasında, amaçlanan Ti film kalınlığı, simülasyonlardaki Ti film kalınlığına göre nm mertebesinde de olsa farklılık göstermektedir. Şekil 4.16 (e)'de ve (f)'de üretilen nanoanten dizileri görülmektedir. L₁ ve L₅ boyutunun değişimine bağlı olarak birbirinden bağımsız elde edilen rezonans frekansları, algılanması hedeflenen PMMA'ın içerisinde bulunan C=O (karbonil) (1729 cm⁻¹) ve asimetrik -CH₃ (metil) (2950 cm⁻¹) fonksiyonel grupların sahip olduğu rezonans frekanslarına rahatlıkla ayarlanabilir.



Şekil 4.17. (a) PMMA'ın çok katmanlı yapı üzerine kaplanmasının şematik görünümü. (b) 1 μ m kalınlığında PMMA'ın ATR-FTIR cihazı ile ölçülmüş yansıma spektrumu. (c) L₁=2400 nm ve L₅=790 nm değerlerinde her iki rezonansta fonksiyonel grupların algılanması.

Bu bağlamda, Şekil 4.17 (a)'da şematik olarak görüldüğü üzere öncelikle deneysel olarak tasarlanan nanoantenlerin üzerine 1/16 oranında toluen cözeltisi ile seyreltilen PMMA, 5000 rpm hızında döndürme tekniği ile 10 nm kalınlığında kaplanmıştır. Şekil 4.17 (b)'de 1µm kalınlığında PMMA'ın ATR-FTIR cihazı ile ölçülmüş yansıma spektrumu görülmektedir. Şekil 4.17 (c)'de anten boyutları $L_1=2400$ nm, $L_2=2200$ nm, $L_3=2000$ nm, $L_4=1800$ nm, $L_5=790$ nm, $w_1=400$ nm ve $w_2=200$ nm iken PMMA kaplandıktan sonra elde edilen mikroskoplu FTIR cihazı ile ölçülmüş soğurum spektrumu görülmektedir. Elde edilen bu spektrumda enerjinin maksimum seviyede hapsedildiği rezonans frekanslarında soğurum miktarında azalmalar gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, molekülün antenin soğurduğu enerjinin bir kısmını soğurmasıdır. İlk rezonansta C=O (1729 cm⁻¹), ikinci rezonansta ise asimetrik (-CH₃) (2950 cm⁻¹) fonksiyonel grupları bu sayede tespit edilebilmektedir. Şekil 4.18 (a)'da L1 değişimleri ile elde edilen nanoantenlerin üzerine aynı kalınlıkta PMMA kaplandıktan sonra ölçülen soğurum spektrumlarında moleküle ait parmak izleri görülmektedir. L1 değişimindeki tüm spektrumlarda C=O (karbonil) (1729 cm⁻¹) grubu görülmektedir. Rezonans dalga sayısı 1729 cm⁻¹'den büyük olan nanoanten (L₁=1800-2200 nm) spektrumlarında dip noktalar 1729 cm⁻¹'den daha büyük frekanslarda görülürken rezonans dalga sayısı 1729 cm⁻¹'den küçük olan nanoanten (L1=2600 nm) spektrumlarında dip noktalar 1729 cm-1'den daha küçük frekanslarda görülmektedir. Şekil 4.18 (b), deneysel olarak elde edilen nanoanten spektrumlarından, PMMA kaplandıktan sonra elde edilen nanoanten spektrumlarının arasındaki soğurum farkını göstermektedir. Enerjinin maksimum seviyede hapsedildiği L₁=2400 nm anten boyutundaki fark en fazla olup %32 civarındadır. Şekil 4.18 (c)'de L₅ değişimindeki spektrumlarda asimetrik -CH₃ (2950 cm⁻¹) grubu sadece L₅=790 nm iken görülmektedir. Şekil 4.18 (d)'de ise deneysel olarak elde edilen nanoanten spektrumundan, PMMA kaplandıktan sonra elde edilen nanoanten spektrumu arasındaki soğurum farkı görülmektedir. Enerjinin maksimum seviyede hapsedildiği L₅=790 nm anten boyutundaki fark en fazla olup %1.5 civarındadır. Soğurum farkı ilk rezonans için %13 and %32 arasında değişirken, ikinci rezonansta ise sadece %1.5'tir.

Sonuç olarak, bu çalışmada orta-kızılötesi bölgede çift bant özelliği gösteren nanoanten dizilerinin nümerik ve deneysel olarak tasarlanması ve PMMA molekülünün temel kimyasal bağlarının algılanması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.18. (a) PMMA kaplandıktan sonra L_1 değişimi için elde edilen soğurum spektrumu. (b) İlk rezonans için soğurum farkı. (c) PMMA kaplandıktan sonra L_5 değişimi için elde edilen soğurum spektrumu. (d) İkinci rezonans için soğurum farkı.

Bu amaçla, öncelikle çift bant rezonans davranışının fiziksel kökeni yakın alan dağılımları ile ortaya konulmuştur. Daha sonra, nanoantenlerin spektral özellikleri geometrik parametrelerle kontrol edilerek ince bir ayar mekanizması elde edilmiştir. Son aşamada, uzunlukları belirlenen nanoantenlerin deneysel üretimi sağlanarak 10 nm kalınlığındaki PMMA filmindeki moleküler parmak izleri deneysel olarak saptanmıştır. Bu çalışma ile sunulan dar bantlı çift modlu nanoanten sisteminin, canlı hücre zarları gibi çok ince protein-lipit kombine sistemleri inceleme çalışmalarında kullanması için temel bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir.

4.2.4. D#3 Asimetrik Üçgen Çifti Nanoanten Dizilerine Ait Nümerik, Deneysel ve Protein'in Algılanma Sonuçları

Çok katmanlı alt taban üzerine üretilen üçüncü yapı ise asimetrik üçgen çifti şeklindeki nanoantenlerdir (Şekil 4.19 (a) ve (b)). Öncelikle 500 nm Si alt taban üzerine sırasıyla 5

nm kalınlığında Ti, 200 nm kalınlığında Au, 100 nm kalınlığında MgF₂ dielektrik malzemeleri film şeklinde elektron demet buharlaştırma tekniği ile kaplanmıştır. Hazırlanan bu alt taban üzerine 200 nm kalınlığında PMMA döndürme tekniği ile kaplanmıştır. Elektron demet litografi tekniği kullanılarak bu çip üzerine asimetrik üçgen çifti şeklindeki desenler 50×50 diziler halinde aktarılmıştır. Her bir dizi boyutu 130 μ m × 130 μ m'dir. Hazırlanan bu çip MIBK-IPA (1:3) oranındaki karışımda 50 sn tutulmuş ve aktarılan desenlerin tamamen ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Daha sonra hazırlanan bu çip üzerine elektron demet buharlaştırma tekniği kullanılarak öncelikle yapıştırıcı katman olarak 4 nm kalınlığında Ti kaplanmıştır.



Şekil 4.19. (a) x-yönündeki kutuplama altında asimetrik üçgen çifti şeklindeki nanoantenin şematik görünümü. (b) Nanoantenin üstten görünümü. (c) Belirlenmiş parametreler için nümerik ve deneysel olarak elde edilen soğurum spektrumu. (d) Diziler halinde üretilen nanoanten dizilerinin bir bölümünün SEM görüntüsü.

Ti üzerine ise 80 nm kalınlığında Au kaplanmıştır. Son olarak, bu çip 80°C'de aseton içerisinde 40 dakika bekletilerek deneysel işlemlerin üretim kısmı tamamlanarak istenilen nanoanten dizileri elde edilmiştir. Şekil 4.19 (c)'de $L_1=1720$ nm, $L_2=2100$ nm, $L_3=1050$ nm, $L_4=840$ nm, D=200 nm ve x- ve y- eksenindeki periyodikliği (P_x=P_y) ise

2600 nm olarak belirlenen yapının nümerik ve mikroskoplu FTIR ile ölçülen deneysel soğurum spektrumları görülmektedir. Nümerik ve deneysel sonuçlar, %100'e yakın uyum içerisindedir. İlk rezonans dalga sayısı değeri 1680 cm⁻¹ (50.36 THz) iken ikinci rezonans dalga sayısı değeri ise 2937 cm⁻¹ (88.05 THz)'dir. Yapının her iki rezonans değerinde %90'a yakın soğurum elde edilmiştir. Şekil 4.19 (d)'de üretilen nanoanten dizilerinin 4×4 'lük bölümünün SEM ile alınmış görüntüsü verilmektedir. Şekil 4.20 (a)'da yapının x-yönünde kutuplama altında L₁=1720 nm, L₂=2100 nm, L₃=1050 nm, L₄=840 nm ve D=200 nm değeri için elde edilen yansıma, geçiş ve soğurum spektrumları görülmektedir.



Şekil 4.20. x-yönündeki kutuplama altında elde edilen (a) yansıma, geçiş ve soğurum spektrumu. (b) 1751 cm⁻¹ (52.46 THz) rezonans dalga sayısı değeri için elde edilen yakın alan dağılımı. (c) 3059 cm⁻¹ (91.70 THz) rezonans dalga sayısı değeri için elde edilen yakın alan dağılımı.

İlk rezonans dalga sayısı değeri 1751 cm⁻¹ (52.46 THz) iken ikinci rezonans dalga sayısı ise 3059 cm⁻¹ (91.70 THz) olarak elde edilmiştir. Elde edilen rezonansların fiziksel olarak hangi parçalardan geldiğini görmek için yapının aynı boyutlarında yakın-elektrik alan arttırım değerleri ($|E^2|/|E_0^2|$) nümerik olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.20 (b)'de rezonans

dalga sayısı değeri 1751 cm⁻¹ (52.46 THz) icin elde edilen yakın alan arttırım değeri 5000 kattan fazla olup y-ekseni boyunca konumlandırılmıs ücgen cifti tarafından meydana getirilmektedir. Şekil 4.20 (c)'de ise rezonans dalga sayısı değeri 3059 cm⁻¹ (91.70 THz) için elde edilen yakın alan arttırım değeri 7000 kattan fazla olup x-ekseni boyunca konumlandırılmış üçgen çifti tarafından meydana getirilmektedir. Bu iki değer oldukça yüksek olup ışık-madde etkileşimi uygulamaları için verimin arttırılmasında önemli bir yere sahiptir. Şekil 4.21'de yapının x-yönünde kutuplanmış aydınlatma altında elde edilen parametre hassasiyeti nümerik ve deneysel olarak verilmektedir. L1 ve L2 değerleri değiştirilerek soğurum spektrumları elde edilmiştir. Şekil 4.21 (a)'da L₂=2100 nm, $L_3=1050$ nm, $L_4=840$ nm ve D=200 nm iken L_1 değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen nümerik soğurum spektrumu görülmektedir. L₁ boyutunun artmasına bağlı olarak soğurum eğrisinin sadece ikinci rezonans bölgesinde hapsedilen enerjinin frekansları daha düşük frekanslı sinyallere kaymaktadır. Şekil 4.21 (b)'de L₁ =1720 nm, $L_3=1050$ nm, $L_4=840$ nm ve D=200 nm iken L_2 değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen nümerik soğurum spektrumu görülmektedir. L2 boyutunun artmasına bağlı olarak soğurum eğrisinin sadece birinci rezonans bölgesinde hapsedilen enerjinin frekansları daha düşük frekanslı sinyallere kaymaktadır. Şekil 4.21 (c)'de L₂=2100 nm, L₃=1050 nm, L_4 =840 nm ve D=200 nm iken L_1 değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen deneysel soğurum spektrumu görülmektedir. L₁ boyutunun artmasına bağlı olarak nümerik analiz sonucunda olduğu gibi soğurum spektrumunda sadece ikinci rezonans bölgesinde hapsedilen enerjinin frekansları daha düşük frekanslı sinyallere kaymaktadır. Şekil 4.21 (d)'de ise $L_1 = 1720$ nm, $L_3 = 1050$ nm, $L_4 = 840$ nm ve D = 200 nm iken L_2 değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen deneysel soğurum spektrumu görülmektedir. L2 boyutunun artmasına bağlı olarak nümerik analiz sonucunda olduğu gibi soğurum spektrumunda sadece birinci rezonans bölgesinde hapsedilen enerjinin frekansları daha düşük frekanslı sinyallere kaymaktadır. L1 ve L2 boyutlarının deneysel ve nümerik analizleri sonuçları birbirleriyle uyumludur. Spektrumların 2300 cm⁻¹ dalga sayısı bölgesinde küçük pikler görülmektedir. Bu piklerin oluşmasının nedeni, yapıştırıcı katman olarak kullanılan 5 nm kalınlığındaki titanyumdan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.21 (e) ve (f)'de üretilen nanoanten dizilerine ait SEM görüntüleri görülmektedir. L_1 ve L_2 boyutunun değişimine bağlı olarak birbirinden bağımsız elde edilen bu rezonans frekansları, algılanması hedeflenen biyomoleküllerin rezonans frekanslarına rahatlıkla ayarlanabilir. Pek çok biyomolekülün moleküler rezonans frekansları 400-4000 cm⁻¹

dalga sayısı aralığında olduğu için tasarlanan bu nanoanten dizileri biyoalgılama uygulamalarında oldukça kullanışlı olmaktadır.



Şekil 4.21. x-yönündeki kutuplama altında (a) L_1 değişimi için elde edilen nümerik soğurum spektrumu (b) L_2 değişimi için elde edilen nümerik soğurum spektrumu (c) L_1 değişimi için elde edilen deneysel soğurum spektrumu (b) L_2 değişimi için elde edilen deneysel soğurum spektrumu. Deneysel spektrumları gösteren grafiklerde sırasıyla $L_1=920$ nm ve $L_2=2200$ nm için birim hücrenin SEM görüntüsü görülmektedir. (e) $L_2=2100$ nm iken L_1 nanoanten dizilerinin değişimi ve (f) $L_1=1520$ nm iken L_2 nanoanten dizilerinin değişimlerine ait SEM görüntüleri.

Bu anten tasarımı ile deneysel olarak protein molekülünün temel kimyasal bağının (C=O) algılanması sağlanmıştır. Bu amacla, Protein A ve protein G'nin birlesimi olan protein A/G ve protein Immunoglobulin G (İmmünoglobulin G; IgG) kullanılmıştır. Protein A/G, kolaylıkla protein IgG'ye tutunması ve Au nanoantenlere geniş yüzeyleri ile sorunsuz bağlanması nedeniyle seçilmiştir. Öncelikle, Thermo Fisher Scientific firmasından 5 mg'lık tüp içerisinde bulunan protein A/G tercih edilmiştir. Protein A/G, öncelikle fosfat katkılı tuz (phosphate buffered saline; PBS) çözeltisi ile 1/1 oranında karıştırılmıştır. Yeni protein A/G, 1 mg/1mL oranına sahiptir. Biyoalgılama uygulamasında çok fazla olduğu için bu miktar on eşit tüpe paylaştırılmış ve her bir tüpte 100 µg/mL olması sağlanmıştır. Bu sayede 5 mg'lık protein A/G'den elli tüp elde edilmiştir. İkinci olarak, Sigma Aldrich firmasından 1mg'lık tüp içerisinde bulunan protein IgG tercih edilmiştir. Bu proteinin konsantrasyonu ise 2.2 mg/mL'dir. Bundan dolayı, PBS çözeltisinden protein IgG'ye 2.2 mL eklenerek konsantrasyon 1 mg/1mL oranına düşürülmüştür. Bu miktar on eşit tüpe paylaştırılmış ve her bir tüpte 100 µg/mL olması sağlanarak biyoalgılama uygulamasına hazır hale getirilmiştir. Protein konsantrasyonları istenilen miktara geldikten sonra biyoalgılama uygulamasına geçilmiştir. Yapılan işlemler aşağıda sırasıyla verilmektedir.

- 1. Nanoanten dizilerinin olduğu çip izopropil alkol ve aseton ile organik kalıntılardan tamamen arındırılır.
- 2. Mikroskoplu FTIR ile nanoantenlerin soğurum spektrumları çıkarılır.
- Temizlenen çip üzerine, protein A/G damlatılarak yaklaşık bir saat beklenir ve nanoantenlere tutunması sağlanır.
- 4. Protein A/G tutturulmuş çip 10 dk PBS ve 5 dk iyonize olmamış su ile sırasıyla yıkanır ve nanoanten dizileri üzerinde sadece protein A/G'nin kalması sağlanır.
- 5. Mikroskoplu FTIR ile protein A/G tutturulmuş nanoantenlerin soğurum spektrumları çıkarılır.
- 6. Protein A/G tutturulmuş çip üzerine ise protein IgG damlatılıp yine bir saat beklenerek protein IgG'nin protein A/G'ye tutturulması sağlanır.
- Bir saat beklendikten sonra 10 dk PBS ve 5 dk iyonize olmamış su ile sırasıyla yıkanarak nanoanten + protein A/G + protein IgG kombinasyonu elde edilmiş olur.
- 8. Mikroskoplu FTIR ile ölçüm alınır ve daha önceki nanoantenlere ait soğurum spektrumları ile karşılaştırılır.

Şekil 4.22 (a)'da asimetrik üçgen çifti şeklindeki nanoanten dizilerinin üzerine sırayla kaplanan protein A/G ve protein IgG'nin şematik görünümü verilmektedir. Protein A/G'nin tek katmanı 3 nm ve protein IgG'nin ise 5 nm kalınlığındadır. Şekil 4.22 (b)'de protein A/G ve protein IgG birleşiminin ATR-FTIR ile ölçülmüş soğurum spektrumu görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere (C=O) fonksiyonel grubu, üzerine gelen sinyalin sadece %10'unu soğurmaktadır. Şekil 4.22 (c)'de proteinlerin kaplanmasından önce (kırmızı eğri) ve sonra (mavi eğri) ölçülen nanoantenin soğurum spektrumu görülmektedir. Şekil 4.22 (d)'de nanoanten spektrumunda 1660 cm⁻¹ dalga sayısında proteinler içerisinde bulunan (C=O) fonksiyonel grubu nedeniyle bir dip noktası görülmektedir. Bunun nedeni, nanoantenin soğurum spektrumunda proteinin (C=O) fonksiyonel grubunun 1660 cm⁻¹ rezonans frekanslı sinyalleri soğurmasıdır.



Şekil 4.22. (a) Nanoanten üzerine sırayla kaplanan protein A/G ve protein IgG'nin şematik görünümü. (b) Protein A/G ve protein IgG birleşiminin ATR-FTIR ile ölçülmüş soğurum spektrumu. (c) Proteinlerin nanoanten üzerine kaplanmadan önceki (kırmızı eğri) ve kaplandıktan sonraki (mavi eğri) ölçülen soğurum spektrumu. (d) Nanoantenin soğurum spektrumunda protein A/G ve protein IgG'nin kaplanmasından sonra meydana gelen belirgin değişim.

Sonuç olarak, bu çalışmada orta-kızılötesi bölgede çift bant özelliği gösteren nanoanten dizilerinin nümerik ve deneysel olarak tasarlanması ve protein çiftinin temel kimyasal bağının (C=O) algılanması gerçekleştirilmiştir. Çift bant rezonans davranışının fiziksel kökeni yakın alan dağılımlarıyla ve spektral özellikleri de geometrik parametrelerle kontrol edilerek ince bir ayar mekanizması elde edilmiştir. Uzunlukları belirlenen nanoantenlerin deneysel üretimi sağlanarak 8 nm kalınlığındaki protein çiftinin moleküler parmak izleri deneysel olarak saptanmıştır. Bu çalışma ile sunulan sonuçların, proteinde meydana gelen bozukluklar nedeniyle ortaya çıkan nörodejeneratif hastalıkların tedavi yöntemlerinin geliştirilmesi çalışmalarında temel bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, parçacık tabanlı plazmonik nanoantenlerin çok katmanlı alt taban üzerindeki özgün tasarımı, nümerik analizi, deneysel gerçeklenmesi, optik karakterizasyonu ve kızılötesi spektroskopi tabanlı biyoalgılama uygulamalarında kullanılmasına ilişkin sonuçlar sunulmuştur. Özgün plazmonik nanoantenler, öncelikle Lumerical FDTD Solutions simülasyon programında tasarlanmıştır. Nanoantenlerin yansıma, geçiş ve soğurum gibi temel spektral özellikleri incelenmiştir. Boyutları belirlenen nanoantenlerin üretimi, optik karakterizasyonları ve biyoalgılama uygulamalarındaki verimleri ortaya konmuştur. Nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında yüksek bir oranda uyum sağlanmıştır. Tez çalışmasında önerilen plazmonik nanoantenler ile ilgili yapılan nümerik ve deneysel analizler aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir. Buna göre, nümerik sonuçları verilen yapı **N#1**, nümerik ve deneysel sonuçları verilen yapılar ise sırasıyla **D#1, D#2, D#3** olmak üzere;

N#1 çalışmasında, pencere şeklinde plazmonik nanoanten dizilerinin nümerik sonuçları verilmiştir. FDTD yöntemi kullanılarak yapılan nümerik analizde tasarımın orta kızılötesi bölgede çift bant rezonanslara sahip olduğu belirlenmiştir. Gönderilen sinyalin kutuplama açısının değiştirilmesine karşın yapının spektral davranışında herhangi bir değişiklik olmamıştır. Bu durum, nanoanten dizilerinin kutuplama bağımsız olduğunu göstermektedir. Yapının soğurum değerleri oldukça yüksektir. Nanoantenin boyutları değiştirilerek rezonans frekansları rahatlıkla değiştirilebilmektedir. Bütünleşik bir yapıya sahip olduğu için çift bant rezonanslar birlikte değişmektedir. Rezonansların fiziksel olarak meydana geldiği bölgeleri bulabilmek için yakın-alan analizi yapılmıştır. Tasarımın kırıcılık indisi değişimine karşı göstermiş olduğu hassasiyeti belirlemek için yapı birbirinden farklı ortamlara yerleştirilip nümerik olarak analiz edilmiştir.

D#1 çalışmasında, geometrik desenli plazmonik nanoanten dizilerinin nümerik ve deneysel sonuçları verilmiştir. Nümerik ve deneysel analizde tasarımın orta kızılötesi ve yakın kızılötesi bölgede dört bant rezonansa sahip olduğu belirlenmiştir. Rezonansların fiziksel olarak meydana geldiği bölgeleri bulabilmek için yakın-alan analizi yapılmıştır. Nümerik ve deneysel geometrik parametre analizinde, nanoantenin belirli boyutları değiştirilerek rezonansların istenilen frekanslara rahatlıkla ayarlanabildiği gösterilmiştir. EBL yöntemi ile üretilen nanoantenlerin optik karakterizasyonu mikroskoplu FTIR spektroskopi ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar oldukça uyumludur. Üretimi gerçekleştirilen nanoanten dizilerinin görüntüleri SEM cihazı ile alınmıştır. Tasarımın kırıcılık indisi değişimine karşı göstermiş olduğu hassasiyeti belirlemek için yapı birbirinden farklı ortamlara yerleştirilip nümerik olarak analiz edilmiştir.

D#2 çalışmasında, belirli aralıklarla boyutları değişen dikdörtgenler topluluğundan oluşan plazmonik nanoanten dizilerinin nümerik ve deneysel sonuçları verilmiştir. Nümerik ve deneysel analizde tasarımın orta kızılötesi bölgede çift bant rezonanslara sahip olduğu belirlenmiştir. Rezonansların fiziksel olarak meydana geldiği bölgeleri bulabilmek için yakın-alan analizi yapılmıştır. Nümerik ve deneysel geometrik parametre analizinde, nanoantenin belirli boyutları değiştirilerek rezonansların istenilen frekanslara birbirlerinden bağımsız bir şekilde rahatlıkla ayarlanabildiği gösterilmiştir. EBL yöntemi ile üretilen nanoantenlerin optik karakterizasyonu mikroskoplu FTIR spektroskopi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar oldukça uyumludur. Üretimi gerçekleştirilen nanoanten dizilerinin görüntüleri SEM cihazı ile alınmıştır. Tasarım ile kızılötesi spektroskopi tabanlı biyoalgılama uygulaması gerçekleştirilmiş ve PMMA'ın temel kimyasal bağları başarılı bir şekilde algılanmıştır.

D#3 çalışmasında, asimetrik üçgen çifti şeklindeki plazmonik nanoanten dizilerinin nümerik ve deneysel sonuçları verilmiştir. Nümerik ve deneysel analizde tasarımın orta kızılötesi bölgede çift bant rezonanslara sahip olduğu belirlenmiştir. Rezonansların fiziksel olarak meydana geldiği bölgeleri bulabilmek için yakın-alan analizi yapılmıştır. Nümerik ve deneysel geometrik parametre analizinde, nanoantenin belirli boyutları değiştirilerek rezonansların istenilen frekanslara birbirinden bağımsız bir şekilde rahatlıkla ayarlanabildiği gösterilmiştir. EBL yöntemi ile üretilen nanoantenlerin optik karakterizasyonu mikroskoplu FTIR spektroskopi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar oldukça uyumludur. Üretimi gerçekleştirilen nanoanten dizilerinin görüntüleri SEM cihazı ile alınmıştır. Protein A/G ve protein IgG'nin deneysel çalışma için hazırlanma aşamaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Tasarım ile kızılötesi spektroskopi tabanlı biyoalgılama uygulaması gerçekleştirilmiş ve protein çiftinin temel kimyasal bağı başarılı bir şekilde algılanmıştır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların literatüre sunumu aşağıda verilmiştir.

- 1- N#1 çalışması, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi'nde 8-11 Temmuz 2019 tarihleri arasında düzenlenen uluslararası 4. Biyosensör Bilimsel Konferansı'nda "Grating Nanoantenna Array Based Perfect Absorber for Refractive Index Sensing Sensitivity" başlıklı bildiri olarak yayınlanmıştır.
- 2- **D#1** çalışması, literatüre sunulmak üzere hazırlanmaktadır.
- 3- D#2 çalışması, SCI kapsamındaki "Sensors and Actuators A-Physical" dergisinde "Mid-Infrared Narrow Band Plasmonic Perfect Absorber for Vibrational Spectroscopy" başlıklı makale olarak yayınlanmıştır.
- 4- D#2 çalışması ayrıca, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nün organizatörlüğünde 22-25 Eylül 2018 tarihleri arasında düzenlenen uluslararası 14. Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı'nda "Reflection Spectrum Analysis of Plasmonic Nanoantennas for Biosensing Applications" başlıklı bildiri olarak yayınlanmıştır.
- 5- D#3 çalışması, Karatay Üniversitesi'nde 6-8 Eylül 2018 tarihleri arasında düzenlenen URSI-TÜRKİYE'2018 Bilimsel Kongresi'nde "Çift-bant plazmonik mükemmel soğurucunun yansıma, geçiş, soğurum ve kırıcılık indisi hassasiyeti" başlıklı bildiri olarak yayınlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmalar Bilkent Üniversitesi bünyesinde bulunan Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde tarafımca gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında Sabancı Üniversitesi bünyesinde bulunan Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi katkı sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, laboratuvar koşullarında kompleks sistemlerle algılanan biyomoleküllerin hızlı, güvenilir ve kompleks olmayan sistemlerle algılanabileceği çalışmalara katkı sunacaktır.

KAYNAKÇA

- Weiner J., Nunes F., 2013. Light-Matter Interaction: Physics and Engineering at the Nanoscale, Oxford University Press, Oxford, UK, 261 ss.
- Lasch, P., Kneipp, J., 2008. Biomedical Vibrational Spectroscopy, John Wiley and Sons, New Jersey, ABD, 379 ss.
- Giannini, V., Fernández-Domínguez, A. I., Heck, S. C., Maier, S. A., 2011. Plasmonic nanoantennas: fundamentals and their use in controlling the radiative properties of nanoemitters. Chemical Reviews, 111 (6): 3888-3912.
- Roxworthy, B. J., Ko, K. D., Kumar, A., Fung, K. H., Chow, E. K., Liu, G. L., Fang, N. X., Toussaint Jr, K. C., 2012. Application of plasmonic bowtie nanoantenna arrays for optical trapping, stacking, and sorting. Nano Letters, 12 (2): 796-801.
- Liu, N., Tang, M. L., Hentschel, M., Giessen, H., Alivisatos, A. P., 2011. Nanoantenna-enhanced gas sensing in a single tailored nanofocus. Nature Materials, 10 (8): 631-636.
- Hoang, T. B., Akselrod, G. M., Argyropoulos, C., Huang, J., Smith, D. R., Mikkelsen, M. H., 2015. Ultrafast spontaneous emission source using plasmonic nanoantennas. Nature Communications, 6: 7788-7795.
- Knight, M. W., Liu, L., Wang, Y., Brown, L., Mukherjee, S., King, N. S., Everitt, H. O., Nordlander, P., Halas, N. J., 2012. Aluminum plasmonic nanoantennas. Nano Letters, 12 (11): 6000-6004.
- Fischer, H., Martin, O. J., 2008. Engineering the optical response of plasmonic nanoantennas. Optics Express, 16 (12): 9144-9154.
- Aslan, E., Aslan, E., Wang, R., Hong, M. K., Erramilli, S., Turkmen, M., Saraçoğlu,
 Ö. G., Dal Negro, L., 2016. Multispectral Cesaro-type fractal plasmonic nanoantennas. ACS Photonics, 3 (11): 2102-2111.
- Aslan, E., Turkmen, M., 2013. Novel dual-band resonator nanoantenna array for infrared detection applications. Sensors and Materials, 25 (9): 689-696.
- Luk'yanchuk, B., Zheludev, N. I., Maier, S. A., Halas, N. J., Nordlander, P., Giessen, H., Chong, C. T., 2010. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials. Nature Materials, 9 (9): 707-715.

- 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.
- Lal, S., Link, S., Halas, N. J., 2007. Nano-optics from sensing to waveguiding. Nature Photonics, 1 (11): 641-648.
- 14. Yanık, A. A., Çetin, A. E., Huang, M., Artar, A., Mousavi, S. H., Khanikaev, A., Connor, J. H., Shvets, G., Altug, H., 2011. Seeing protein monolayers with naked eye through plasmonic Fano resonances. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108 (29): 11784-11789.
- Chen, K., Adato, R., Altug, H., 2012. Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy. ACS Nano, 6 (9): 7998-8006.
- 16. Aksu, S., Yanık, A. A., Adato, R., Artar, A., Huang, M., Altug, H., 2010. Highthroughput nanofabrication of infrared plasmonic nanoantenna arrays for vibrational nanospectroscopy. Nano Letters, 10 (7): 2511-2518.
- Dong, L., Yang, X., Zhang, C., Cerjan, B., Zhou, L., Tseng, M. L., Zhang, Y., Alabastri, A., Nordlander, P., Halas, N. J., 2017. Nanogapped Au antennas for ultrasensitive surface-enhanced infrared absorption spectroscopy. Nano Letters, 17 (9): 5768-5774.
- Limaj, O., Etezadi, D., Wittenberg, N. J., Rodrigo, D., Yoo, D., Oh, S. H., Altug, H.,
 2016. Infrared plasmonic biosensor for real-time and label-free monitoring of lipid membranes. Nano Letters, 16 (2): 1502-1508.
- Yanık, A. A., Huang, M., Kamohara, O., Artar, A., Geisbert, T. W., Connor, J. H., Altug, H., 2010. An optofluidic nanoplasmonic biosensor for direct detection of live viruses from biological media. Nano Letters, 10 (12): 4962-4969.
- López, M. M., Bertolini, E., Olmos, A., Caruso, P., Gorris, M. T., Llop, P., Penyalver, R., Cambra, M., 2003. Innovative tools for detection of plant pathogenic viruses and bacteria. International Microbiology, 6 (4): 233-243.
- Adato, R., Aksu, S., Altug, H., 2015. Engineering mid-infrared nanoantennas for surface enhanced infrared absorption spectroscopy. Materials Today, 18 (8): 436-446.
- Rodrigo, D., Tittl, A., Ait-Bouziad, N., John-Herpin, A., Limaj, O., Kelly, C., D. Yoo,
 J. W. Nathan, Oh, S.-H., Lasuel, H. A., Altug, H., 2018. Resolving molecule-

specific information in dynamic lipid membrane processes with multi-resonant infrared metasurfaces. **Nature Communications**, **9** (1): 2160-2169.

- Cai W., Shalaev V. M., 2010. Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications, Springer, New York, ABD, 200 ss.
- Tong, L., Wei, H., Zhang, S., Xu, H., 2014. Recent advances in plasmonic sensors. Sensors, 14 (5): 7959-7973.
- Stockman, M. I., 2015. Nanoplasmonic sensing and detection. Science, 348 (6232): 287-288.
- 26. Brolo, A. G., 2012. Plasmonics for future biosensors. Nature Photonics, 6 (11): 709-713.
- 27. Stanley, R., 2012. Plasmonics in the mid-infrared. Nature Photonics, 6 (7): 409-411.
- Chen X., Wang, C., Yao, Y., Wang, C., 2017. Plasmonic vertically coupled complementary antennas for dual-mode infrared molecule sensing. ACS Nano, 11 (8): 8034-8046.
- Srajer, J., Schwaighofer, A., Ramer, G., Rotter, S., Guenay, B., Kriegner, A., Knoll, W., Lendl, B., Nowak, C., 2014. Double-layered nanoparticle stacks for surface enhanced infrared absorption spectroscopy. Nanoscale, 6 (1): 127-131.
- Etezadi, D., Warner IV, J. B., Ruggeri, F. S., Dietler, G., Lashuel, H. A., Altug, H.,
 2017. Nanoplasmonic mid-infrared biosensor for in vitro protein secondary structure detection. Light: Science and Applications, 6 (8): 17029-17039.
- 31. Pryce, I. M., Kelaita, Y. A., Aydin, K., Atwater, H. A., 2011. Compliant metamaterials for resonantly enhanced infrared absorption spectroscopy and refractive index sensing. ACS Nano, 5 (10): 8167-8174.
- Neubrech, F., Pucci, A., Cornelius, T. W., Karim, S., García-Etxarri, A., Aizpurua, J., 2008. Resonant plasmonic and vibrational coupling in a tailored nanoantenna for infrared detection. Physical Review Letters, 101 (15): 157403-157407.
- 33. Ataka, K., Kottke, T., Heberle, J., 2010. Thinner, smaller, faster: IR techniques to probe the functionality of biological and biomimetic systems. Angewandte Chemie International Edition, 49 (32): 5416-5424.
- López-Lorente, Á. I., Mizaikoff, B., 2016. Mid-infrared spectroscopy for protein analysis: potential and challenges. Analytical and bioanalytical chemistry, 408 (11): 2875-2889.

- Kwak, J. T., Kajdacsy-Balla, A., Macias, V., Walsh, M., Sinha, S., Bhargava, R., 2015. Improving prediction of prostate cancer recurrence using chemical imaging. Scientific Reports, 5: 8758-8768.
- Berweger, S., Nguyen, D. M., Muller, E. A., Bechtel, H. A., Perkins, T. T., Raschke, M. B., 2013. Nano-chemical infrared imaging of membrane proteins in lipid bilayers. Journal of the American Chemical Society, 135 (49): 18292-18295.
- Adato, R., Altug, H., 2013. In-situ ultra-sensitive infrared absorption spectroscopy of biomolecule interactions in real time with plasmonic nanoantennas. Nature Communications, 4, 2154-2164.
- 38. Çetin, A. E., Etezadi, D., Altug, H., 2014. Accessible nearfields by nanoantennas on nanopedestals for ultrasensitive vibrational spectroscopy. Advanced Optical Materials, 2 (9): 866-872.
- Wu, C., Khanikaev, A. B., Adato, R., Arju, N., Yanik, A. A., Altug, H., Shvets, G., 2012. Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers. Nature Materials, 11 (1): 69-75.
- Knowles, T. P., Vendruscolo, M., Dobson, C. M., 2014. The amyloid state and its association with protein misfolding diseases. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 15 (6): 384-396.
- Irwin, D. J., Lee, V. M. Y., Trojanowski, J. Q., 2013. Parkinson's disease dementia: convergence of α-synuclein, tau and amyloid-β pathologies. Nature Reviews Neuroscience, 14 (9): 626-636.
- Balanis, C. A., 2005. Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley and Sons, New Jersey, ABD, 1099 ss.
- 43. Brown, L. V., Yang, X., Zhao, K., Zheng, B. Y., Nordlander, P., Halas, N. J., 2015. Fan-shaped gold nanoantennas above reflective substrates for surface-enhanced infrared absorption (SEIRA). Nano Letters, 15 (2): 1272-1280.
- 44. Rodrigo, D., Tittl, A., John-Herpin, A., Limaj, O., Altug, H., 2018. Self-similar multiresonant nanoantenna arrays for sensing from near-to mid-infrared. ACS Photonics, 5 (12): 4903-4911.
- 45. Chen, K., Dao, T. D., Nagao, T., 2017. Tunable nanoantennas for surface enhanced infrared absorption spectroscopy by colloidal lithography and post-fabrication etching. Scientific Reports, 7: 44069-44077.

- 46. Turkmen, M., Aksu, S., Çetin, A. E., Yanik, A. A., Altug, H., 2011. Multi-resonant metamaterials based on UT-shaped nano-aperture antennas. Optics Express, 19 (8): 7921-7928.
- 47. Brongersma, M. L., 2008. Plasmonics: Engineering optical nanoantennas. Nature Photonics, 2 (5): 270-272.
- 48. Gauglitz, G., Vo-Dinh, T., 2002. Handbook of Spectroscopy. Wiley VCH, Weinheim, Germany, 1156 ss.
- Maier S. A., 2007. Plasmonics: Fundamentals and Applications. Springer, New York, ABD, 224 ss.
- 50. Zayats, A. V., Smolyaninov, I. I., 2003. Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 5 (4): S1-S35.
- Kretschmann, E., Raether, H., 1968. Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light. Zeitschrift f
 ür Naturforschung A, 23 (12): 2135-2136.
- 52. Otto, A., 1968. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. Zeitschrift für Physik, 216 (4): 398-410.
- 53. Stockman, M. I., 2011. Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future. **Optics Express**, **19** (22): 22029-22106.
- 54. Nguyen, D. M., Lee, D., Rho, J., 2017. Control of light absorbance using plasmonic grating based perfect absorber at visible and near-infrared wavelengths. Scientific Reports, 7 (1): 2611-2619.
- 55. Haus, H. A., 1984. Waves and Fields in Optoelectronics. Prentice-Hall, New Jersey, ABD, 391 ss.
- 56. Anker, J. N., Hall, W. P., Lyandres, O., Shah, N. C., Zhao, J., Van Duyne, R. P., 2008. Biosensing with plasmonic nanosensors. Nature Materials, 7: 442-453.
- 57. Sherry, L. J., Chang, S. H., Schatz, G. C., Van Duyne, R. P., Wiley, B. J., Xia, Y., 2005. Localized surface plasmon resonance spectroscopy of single silver nanocubes. Nano Letters, 5 (10): 2034-2038.
- Sherry, L. J., Jin, R., Mirkin, C. A., Schatz, G. C., Van Duyne, R. P., 2006. Localized surface plasmon resonance spectroscopy of single silver triangular nanoprisms. Nano Letters, 6 (9): 2060-2065.

- Shahbazyan, T. V., Stockman, M., 2013. Plasmonics: Theory and Applications. Springer, The Netherlands, 581 ss.
- 60. Borisov, S. M., Wolfbeis, O. S., 2008. Optical biosensors. Chemical Reviews, 108 (2): 423-461.
- Cooper, M. A., 2002. Optical biosensors in drug discovery. Nature reviews: Drug Discovery, 1 (7): 515-528.
- 62. Yoo, S. M., Lee, S. Y., 2016. Optical biosensors for the detection of pathogenic microorganisms. Trends in Biotechnology, 34 (1): 7-25.
- 63. Narsaiah, K., Jha, S. N., Bhardwaj, R., Sharma, R., Kumar, R., 2012. Optical biosensors for food quality and safety assurance-a review. Journal of Food Science and Technology, 49 (4): 383-406.
- 64. Long, F., Zhu, A., Shi, H., 2013. Recent advances in optical biosensors for environmental monitoring and early warning. **Sensors**, **13** (10): 13928-13948.
- 65. Szunerits, S., Boukherroub, R., 2015. Introduction to Plasmonics: Advances and Applications, Jenny Stanford Publishing, New York, ABD, 378 ss.
- 66. Szunerits, S., Shalabney, A., Boukherroub, R., Abdulhalim, I., 2012. Dielectric coated plasmonic interfaces: their interest for sensitive sensing of analyte-ligand interactions. **Reviews in Analytical Chemistry**, **31** (1): 15-28.
- 67. Neubrech, F., Pucci, A., 2013. Plasmonic enhancement of vibrational excitations in the infrared. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 19 (3): 4600809-4600818.
- 68. Adato, R., Yanik, A. A., Amsden, J. J., Kaplan, D. L., Omenetto, F. G., Hong, M. K., Erramilli, S., Altug, H., 2009. Ultra-sensitive vibrational spectroscopy of protein monolayers with plasmonic nanoantenna arrays. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106 (46): 19227-19232.
- 69. Enders, D., Nagao, T., Nakayama, T., Aono, M., 2007. In situ surface-enhanced infrared absorption spectroscopy for the analysis of the adsorption and desorption process of Au nanoparticles on the SiO₂/Si surface. Langmuir, 23 (11): 6119-6125.
- 70. Williams, S. M., Stafford, A. D., Rodriguez, K. R., Rogers, T. M., Coe, J. V., 2003. Accessing surface plasmons with Ni microarrays for enhanced IR absorption by monolayers. The Journal of Physical Chemistry B, 107 (43): 11871-11879.

- 71. Coe, J. V., Rodriguez, K. R., Teeters-Kennedy, S., Cilwa, K., Heer, J., Tian, H., Williams, S. M., 2007. Metal films with arrays of tiny holes: spectroscopy with infrared plasmonic scaffolding. The Journal of Physical Chemistry C, 111 (47): 17459-17472.
- 72. Brehm, M., Taubner, T., Hillenbrand, R., Keilmann, F., 2006. Infrared spectroscopic mapping of single nanoparticles and viruses at nanoscale resolution. Nano Letters, 6 (7): 1307-1310.
- 73. 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.
- 74. Cubukcu, E., Zhang, S., Park, Y. S., Bartal, G., Zhang, X., 2009. Split ring resonator sensors for infrared detection of single molecular monolayers. Applied Physics Letters, 95 (4): 043113-043117.
- 75. Liberman, V., Adato, R., Jeys, T. H., Saar, B. G., Erramilli, S., Altug, H., 2012. Rational design and optimization of plasmonic nanoarrays for surface enhanced infrared spectroscopy. **Optics Express**, **20** (11): 11953-11967.
- Cataldo, S., Zhao, J., Neubrech, F., Frank, B., Zhang, C., Braun, P. V., Giessen, H., 2011. Hole-mask colloidal nanolithography for large-area low-cost metamaterials and antenna-assisted surface-enhanced infrared absorption substrates. ACS Nano, 6 (1): 979-985.
- 77. Enders, D., Pucci, A., 2006. Surface enhanced infrared absorption of octadecanethiol on wet-chemically prepared Au nanoparticle films. Applied Physics Letters, 88 (18): 184104-184108.
- 78. Roy, S., Covert, P. A., FitzGerald, W. R., Hore, D. K., 2014. Biomolecular structure at solid–liquid interfaces as revealed by nonlinear optical spectroscopy. Chemical Reviews, 114 (17): 8388-8415.
- 79. Peng, C. S., Baiz, C. R., Tokmakoff, A., 2013. Direct observation of ground-state lactam–lactim tautomerization using temperature-jump transient 2D IR spectroscopy. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110 (23): 9243-9248.
- Brown, L. V., Zhao, K., King, N., Sobhani, H., Nordlander, P., Halas, N. J., 2013. Surface-enhanced infrared absorption using individual cross antennas tailored to

chemical moieties. Journal of the American Chemical Society, 135 (9): 3688-3695.

- Çetin, A. E., Korkmaz, S., Durmaz, H., Aslan, E., Kaya, S., Paiella, R., Turkmen, M., 2016. Quantification of multiple molecular fingerprints by dual resonant perfect absorber. Advanced Optical Materials, 4 (8): 1274-1280.
- 82. 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.
- 83. Arı, N., Özen, Ş., Çolak, Teşneli, A. Y., Ö. H., 2008. Elektromanyetikte Sonlu Farklar Metodu. Palme Yayınları, Ankara, Türkiye, 152 ss.
- Sevgi, L., 1999. Elektromagnetik Problemler ve Sayısal Yöntemler. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 214 ss.
- Sadiku, M. N., 2000. Numerical Techniques in Electromagnetics. CRC press, Florida, ABD, 760 ss.
- 86. Nümerik simülasyonlar, zaman domeninde sonlu farklar paketi, Lumerical FDTD[™], ile gerçekleştirilmiştir. (<u>https://www.lumerical.com</u>), (Erişim tarihi: Ocak 2018).
- Hess, O., Pendry, J. B., Maier, S. A., Oulton, R. F., Hamm, J. M., Tsakmakidis, K. L., 2012. Active nanoplasmonic metamaterials. Nature Materials, 11 (7): 573-584.
- Çetin, A. E., Topkaya, S. N., 2019. Photonic crystal and plasmonic nanohole based label-free biodetection. Biosensors and Bioelectronics, 132: 196-202.
- Chen, H. T., Padilla, W. J., Zide, J. M., Gossard, A. C., Taylor, A. J., Averitt, R. D., 2006. Active terahertz metamaterial devices. Nature, 444: 597-600.
- 90. Chong, T. K., Wilson, J., Mokkapati, S., Catchpole, K. R., 2012. Optimal wavelength scale diffraction gratings for light trapping in solar cells. Journal of Optics, 14 (2): 024012-024021.
- Deceglie, M. G., Ferry, V. E., Alivisatos, A. P., Atwater, H. A., 2012. Design of nanostructured solar cells using coupled optical and electrical modeling. Nano Letters, 12 (6): 2894-2900.
- Çetin, A. E., Mertiri, A., Huang, M., Erramilli, S., Altug, H., 2013. Thermal tuning of surface plasmon polaritons using liquid crystals. Advanced Optical Materials, 1 (12): 915-920.

- De Cort, W., Beeckman, J., Claes, T., Neyts, K., Baets, R., 2011. Wide tuning of silicon-on-insulator ring resonators with a liquid crystal cladding. Optics Letters, 36 (19): 3876-3878.
- Ohring, M., 2002. Materials Science of Thin Films, Academic Press, New Jersey, ABD, 794 ss.
- 95. Bhushan, B., 2012. Encyclopedia of Nanotechnology. Springer, London, UK, 2868 ss.
- Griffiths, P. R., De Haseth, J. A., 2007. Fourier Transform Infrared Spectrometry. John Wiley and Sons, New Jersey, ABD, 536 ss.
- 97. Soler, M., Belushkin, A., Cavallini, A., Kebbi-Beghdadi, C., Greub, G., Altug, H., 2017. Multiplexed nanoplasmonic biosensor for one-step simultaneous detection of Chlamydia trachomatis and Neisseria gonorrhoeae in urine. Biosensors and Bioelectronics, 94: 560-567.
- 98. 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.
- Palik, E., 1985. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, London, UK, 535 ss.
- 100. Dodge, M. J., 1984. Refractive properties of magnesium fluoride. Applied Optics, 23 (12): 1980-1985.
- 101. Çetin, A. E., Kaya, S., Mertiri, A., Aslan, E., Erramilli, S., Altug, H., Turkmen, M., 2015. Dual-band plasmonic resonator based on Jerusalem cross-shaped nanoapertures. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 15: 73-80.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı	: Semih KORKMAZ
Uyruğu	: Türkiye (T.C.)
Doğum Tarihi ve Yeri	: 12 Kasım 1989, Erzincan
Medeni Durumu	: Bekar
E-mail	: smhkorkmaz@gmail.com
Yazışma Adresi	: Vişnelik Mah. Taşköprü Cad. 63/3, 26020, Odunpazarı/ESKİŞEHİR

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
	ERÜ, Mühendislik Fak.,	
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	2015
	Böl.	
	ERÜ, Mühendislik Fak.,	
Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	2013
	Böl.	
Yabancı Dil	ERÜ, Yabancı Diller Y.O.	2009
	Mimar Sinan Lisesi	
Lise	(Ankara)	2007

İŞ DENEYİMLERİ VE BURSLAR

Yıl	Kurum	Görev
2017-2020	ERÜ, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Böl.	YÖK 100/2000 Doktora Bursiyeri
2018-2019	Bilkent Üniversitesi, Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM)	Misafir Araştırmacı
2013-2015	ERÜ, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Böl.	Tübitak Proje Asistanı

YABANCI DİL

İngilizce: 82.5 (YÖKDİL – Mart 2019)

YAYINLAR

SCI Kapsamına Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler

- Çetin A.E., Korkmaz S., Durmaz H., Aslan E., Kaya S., Paiella R., Türkmen, M., 2016. Quantification of multiple molecular fingerprints by dual-resonant perfect absorber, Advanced Optical Materials, 4: 1274-1280.
- 2- Aslan E., Kaya S., Aslan E., Korkmaz S., Saraçoğlu Ö. G., Türkmen M., 2017. Polarization insensitive plasmonic perfect absorber with coupled antisymmetric nanorod array, Sensors and Actuators B-Chemical, 243: 617-625.
- 3- Korkmaz S., Türkmen M., Aksu S., 2020. Mid-infrared narrow band plasmonic perfect absorber for vibrational spectroscopy, Sensors and Actuators A-Physical, 301: 111757.

Hakemli ulusal ve uluslararası konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

- Aslan E., Korkmaz S., Saraçoğlu Ö.G., Türkmen M., Characterization of a plasmonic absorber structure for infrared detection applications, OSA Advanced Photonics Congress, Barcelona, Spain, 27-31 Temmuz 2014, ss. SeM2C.4-1-SeM2C.4-3.
- 2- Aslan E., Korkmaz S., Kaya S., Türkmen M., Rotated first iteration square fractal shaped perfect absorbers, Optical Society of America: In Optical Sensors, 27 Haziran- 1 Temmuz 2015, ss. SeW1B-6.
- 3- Korkmaz S., Aslan E., Kaya S., Türkmen M., Rhombic nanoantenna arrays with extended arms on different dielectric substrates for infrared applications, OSA Advanced Photonics Congress, Boston, A.B.D., 27 Haziran- 1 Temmuz 2015, ss. SeS1B.5-1-SeS1B.5-3.
- 4- Korkmaz S., Aslan E., Kaya S., Turkmen M., Reflectance spectra comparisons of different multilayered plasmonic nanoantenna arrays, META'15, the 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (Poster Session), New York, A.B.D., 4-7 Ağustos 2015, ss.1-2.

- 5- Onur A., Korkmaz S., Türkmen M., Kaya S., Biyoalgılama uygulamaları ve nanobiyosensörler, Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi (EEMKON 2015), İstanbul, Türkiye, 19-21 Kasım 2015, ss.1-7.
- 6- Aslan E., Aslan E., Korkmaz S., Saraçoğlu Ö.G., Türkmen M., Kaya S., Transmission and reflection characteristics of fourfold rotationally symmetric rectangular nanoaperture antenna arrays, International Conference on Advanced Technology and Sciences (ICAT'16), Konya, Türkiye, 1-3 Eylül 2016, ss.632-634.
- 7- Aslan E., Aslan E., Korkmaz S., Kaya S., Saraçoğlu Ö.G., Türkmen M., Biyoalgılama uygulamaları için çoklu-rezonant metamalzeme soğurucu tasarımı,
 20. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı (BİYOMUT 2016), İzmir, Türkiye, 3-5 Kasım 2016, ss. 206-209.
- 8- Durmaz H., Cetin A. E., Korkmaz S., Aslan E., Kaya S., Paiella R., Turkmen M., Dual-resonant perfect absorber for detecting multiple molecular fingerprints, MRS Spring Meeting, Arizona, A.B.D., 17-21 Nisan 2017, ss. 1.
- 9- Korkmaz S., Aksu S., Turkmen M., Çift-bant plazmonik mükemmel soğurucunun yansıma, geçiş, soğurum ve kırıcılık indisi hassasiyeti, IX. URSI Türkiye Bilimsel Kongresi, Konya, Türkiye, 6-8 Eylül 2018, ss.1-3.
- 10- Korkmaz S., Aksu S., Turkmen M., Reflection spectrum analysis of plasmonic nanoantennas for biosensing applications, 14th Nanoscience and Nanotechnology Conference, İzmir, Türkiye 22-25 Eylül 2018, ss.1-3.
- 11- Korkmaz S., Turkmen M., Grating nanoantenna array based perfect absorber for refractive index sensing sensitivity, 4th International Congress on Biosensors, Çanakkale, Türkiye, 8-11 Temmuz 2019, ss.1-3