T.C.

KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

850 NM DALGA BOYU İÇİN PLAZMONİK VE ALTERNATİF PLAZMONİK TABANLI METALENS TASARIMLARI

Hazırlayan

Büşra ERSOY

Danışman

Doç. Dr. Ekin ASLAN

Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2023, KAYSERİ

T.C.

KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

850 NM DALGA BOYU İÇİN PLAZMONİK VE ALTERNATİF PLAZMONİK TABANLI METALENS TASARIMLARI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan

Büşra ERSOY

Danışman

Doç. Dr. Ekin ASLAN

Bu çalışma; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121E518 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Temmuz 2023, KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu tezin kendi çalışmam olduğunu, planlanmasından yazımına kadar hiçbir aşamasında etik dışı davranışımın olmadığını, tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları kaynaklar listesine aldığımı, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

Büşra ERSOY

T.C.
KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Program Adı: Yüksek Lisans

Tez Başlığı: 850 nm Dalga Boyu için Plazmonik ve Alternatif Plazmonik Tabanlı Metalens Tasarımları

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Önsöz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 55 sayfalık kısmına ilişkin 07/07/2023 tarihinde ***Turnitin*** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı: **% 3'** tür.

Uygulanan filtrelemeler:

1- Giriş dahil

2- Ana Bölümler dahil

3- Sonuç dahil

4- Alıntılar dahil

5- Kapak hariç

6- Önsöz ve Teşekkür hariç

7- İçindekiler hariç

8- Kaynakça hariç

9- Özet hariç

10- Yedi (7) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Önerisi Hazırlama, Tez Yazma ve Teslim Yönergesini inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim. 07/07/2023

Danışman: Doç. Dr. Ekin ASLAN **Öğrenci:** Büşra ERSOY

YÖNERGE UYGUNLUK

“850 nm Dalga Boyu için Plazmonik ve Alternatif Plazmonik Tabanlı Metalens Tasarımları” adlı Yüksek Lisans tezi, Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Büşra ERSOY	Doç. Dr. Ekin ASLAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı

Doç. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Ekin ASLAN danışmanlığında Büşra ERSOY tarafından hazırlanan "**850 nm Dalga Boyu için Plazmonik ve Alternatif Plazmonik Tabanlı Metalens Tasarımları**" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

11/08/ 2023

JÜRİ:

Danışman	: Doç. Dr. Ekin ASLAN
Üye	: Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun …….. tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……/……../……

Doç. Dr. Ahmet TERZİ

İmza

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Gerek akademik çalışmalarımda gerekse kişisel gelişimimde ve sosyal yaşantımda her zaman yanımda olan, beni destekleyen ve moral veren, gece gündüz emeğini esirgemeyen, sabrına hayran kalıp zekâsına saygı duyduğum çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Ekin ASLAN'a destek ve katkılarından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma sürecinde bana sonsuz destek sağlayan, her adımda yanımda olan ve beni cesaretlendiren aileme, özellikle sevgili anneme ve arkadaşlarıma teşekkür borçluyum. Sizlerin desteği olmadan bu başarıya ulaşmak mümkün olmazdı. Sizlerle paylaştığım anılarım, deneyimlerim ve destekleriniz benim için çok kıymetli. Her zaman benim yanımda olduğunuz için minnettarım.

Tez sürecinde karşılaştığım zorluklar karşısında bana destek olan tüm öğretim üyelerine de teşekkür etmek istiyorum. Verdiğiniz bilgi ve tecrübelerle yoluma ışık tuttunuz. Sizinle çalışmak benim için büyük bir onur oldu.

Danışman hocamın yürütücüsü olduğu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) destekli 121E518 numaralı projede ARDEB-1001 bursiyeri olmama imkân sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür etmek istiyorum. Tüm katkılarınız için minnettarım.

En önemli ve son teşekkürümü bizlere sağlamış olduğu tüm bu imkânlar için Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e etmek istiyorum. Sonsuz sevgi, saygı ve özlemle…

Büşra ERSOY

Kayseri,2023

850 NM DALGA BOYU İÇİN PLAZMONİK VE ALTERNATİF PLAZMONİK TABANLI METALENS TASARIMLARI

Büşra ERSOY

Kayseri Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2023

Danışman: Doç. Dr. Ekin ASLAN

ÖZET

Plazmonik uygulamalarda kullanılan altın ve gümüş gibi soy metallerin belirgin optik kayıpları söz konusudur. Bunların yerine düşük maliyet ve ayarlanabilir elektron sayısı sayesinde plazma frekansı kontrol edilebilen katkılı silisyum, katkılı germanyum ve geçiş metal nitrürleri gibi alternatif plazmonik malzemeler kullanılabilir. Geçiş metal nitrürlerinden biri olan titanyum nitrür, görünür ve yakın kızılötesi dalga boylarında plazmonik davranışa sahip olan metalik özellikler sergiler. Bu çalışmada plazmonik ve alternatif plazmonik malzemelerle, metatasarım sonucu oluşturulan ve minyatürizasyon sağlayabilen düz optik lens tasarımları amaçlanmaktadır. Bu bağlamda rezonatif ışık geçişi sağlayan ve tam faz geçişi oluşturan açıklık tabanlı nanoanten dizilimleri hem plazmonik hem de alternatif plazmonik yaklaşımıyla önerilmiştir. Söz konusu dizilimlerin birim hücrelerini teşkil eden sekiz tip ayrık eşkenar dörtgen geometrili, altın ve titanyum nitrür nanoaçıklık tasarımları yakın kızılötesi frekanslarda rezonatif davranış bakımından analiz edilmiştir. Tasarlanan nanorezonatörlerin spektral geçişi belirlendikten sonra, 850 nm dalga boyunda lensleme analizleri için üç farklı geometrik parametre setlerinin, radyal doğrultuda tam faz geçişi sağlayacak ve dairesel halkalar oluşturacak şekilde üç farklı dizilimi analiz edilmiştir. Yapılan teorik analiz olanakları doğrultusunda, çoklu odak noktalarına ait alan dağılımları sunulmuştur. Bu alan dağılımları yoluyla; odak spot genişliği, nümerik açıklık, odak uzaklığı, odak derinliği ve odaklama verimi gibi teorik veriler ile önerilen yapıların odaklama performansı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok odaklı metalens, Plazmonikler ve alternatif plazmonikler, Odaklama performansı, Dairesel faz dağılımı, Nano açıklıklar.

PLASMONİC AND ALTERNATİVE PLASMONİC BASED METALENS DESİGNS FOR THE WAVELENGTH OF 850 NM

Büşra ERSOY

Kayseri University, Institute of Graduate Education

Master Thesis, July 2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ekin ASLAN

ABSTRACT

Noble metals such as gold and silver, which are commonly used in plasmonic applications, exhibit significant optical losses. Instead of these noble metals, alternative plasmonic materials can be used, such as doped silicon, doped germanium, and transition metal nitrides, which offer low cost and adjustable electron counts, allowing control over the plasma frequency. One of the transition metal nitrides, titanium nitride, exhibits metallic properties and demonstrates plasmonic behavior in the visible and near-infrared wavelengths. In this study, flat optical lens designs that are created as a result of meta-design with plasmonic and alternative plasmonic materials and that can provide miniaturization are aimed. In this context, aperture-based nanoantenna arrays that provide resonant light transmission and create perfect phase transition are proposed as both plasmonic and alternative plasmonic approaches. Gold and titanium nitride nanoaperture designs, which constitute the unit cells of these arrays, with eight different types of discrete equilateral rectangular geometries, are analyzed in terms of resonant behavior at near-infrared frequencies. After determining the spectral transitions of the designed nanoresonators, for lensing analyzes at 850 nm wavelength, three different arrangements in three different geometrical parameter-set are analyzed to provide full phase transition in the radial direction and form circular rings. These sets are designed to provide perfect phase transition in the radial direction and create circular rings. Field distributions of multiple focal points are presented in line with the theoretical analysis possibilities. Through these field distributions; the focusing performance of proposed structures are determined by theoretical data such as focal spot width, numerical aperture, focal length, depth of focus and focusing efficiency are determined.

Keywords: Multifocal metalens, Plasmonics and alternative plasmonics, Focusing performance, Circular phase distribution, Nanoapertures.

İÇİNDEKİLER

850 NM DALGA BOYU İÇİN PLAZMONİK VE ALTERNATİF PLAZMONİK TABANLI METALENS TASARIMLARI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... **i**

TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU ..... **ii**

YÖNERGE UYGUNLUK ..... **iii**

KABUL VE ONAY ..... **iv**

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR ..... **v**

ÖZET ..... **vi**

ABSTRACT ..... **vii**

İÇİNDEKİLER ..... **viii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

TABLOLAR LİSTESİ ..... **xiv**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xv**

GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM

TEMEL TANIMLAR **3**

1.1. Metamalzemeler 3

1.2. Metayüzeyler 5

1.2.1. Genlik Modülasyonu için Metayüzeyler 6

1.2.2. Faz Modülasyonu için Metayüzeyler 6

1.2.3. Pancharatnam-Berry (PB) Faz Metayüzeyleri 8

1.2.4. Yansıtıcı Tip Metayüzeyler 9

1.2.5. Huygens Metayüzeyi 10

1.2.6. Polarizasyon Modülasyonu için Metayüzeyler 12

1.2.7. Çok Boyutlu Modülasyon için Metayüzeyler 13

1.2.8. Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler 14
1.2.8.1. Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler 15
1.2.8.2. Optik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler 18
1.2.8.3. Termal Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler 19
1.2.8.4. Mekanik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler 20
1.2.8.5. Güçle Yapılandırılabilir Metayüzeyler 21
1.3. Faz Değişimi 22
1.4. Alternatif Plazmonikler 25
1.4.1. Geçiş Metal Nitrürler (Transition Metal Nitrides) 29
1.4.2. Yarı İletkenler 31

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM-ELEKTROMANYETİK MODELLEME 35

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

NÜMERİK ANALİZ SONUÇLARI 42

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ-ÖNERİLER 53

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER 57

KAYNAKÇA 58

ÖZGEÇMİŞ 78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Ag	Gümüş
Al	Aluminyum
As	Arsenik
Au	Altın
AZO	Aluminum-doped Zinc Oxide; Alüminyum Katkılı Çinko Oksit
CdO	Kadmiyum Oksit
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
Cu	Coper; Bakır
CW	Cut Wires; Kesme telleri
DC	Doğru Akım
DOF	Odak derinliği
EELS	Electron-Energy-Loss-Spectroscopy; Elektron-Enerji-Kayıp-Spektroskopi
ENZ	Epsilon-Near-Zero; Epsilon-Sıfıra Yakın
FDTD	Finite Difference Time Domain; Zaman Domaninde Sonlu Farklar
FIR	Far-InfraRed; Uzak Kızılötesi
FWHM	Full Width at Half Maximum; Maksimum Yarıda Tam Genişlik
GaAs	Galyum arsenid
Ge	Germanyum
GSP	Gap Surface Plasmon; Boşluk Yüzeyi Plazmonu
GZO	Gallium-doped Zinc Oxide; Galyum Katkılı Çinko Oksit
HfN	Hafniyum Nitrür
InAs	İndiyum Arsenit
InAsSb	İndiyum Arsenit Antimonid
IR	InfraRed; Kızılötesi
ITO	İndiyum Kalay Oksit
K	Kalium; Potasyum
LED	Light-Emitting Diode; Işık Yayan Diyot
LSPR	Localized Surface Plasmon Resonance; Lokalize Yüzey Plazmon Rezonansı
MEMS	Mikro Elektro-Mekanik Sistemler

MIM	Metal-Insulator-Metal; Metal-Yalıtkan-Metal
MIR	Mid-InfraRed; Orta kızılötesi
Na	Natrium; Sodyum
NA	Numerical Aperture; Numerik Açıklık
NC	NanoCrystals; Nanokristal
NIR	Near-InfraRed; Yakın Kızılötesi
P	Phosphorus; Fosfor
PB Faz	Pancharatnam-Berry Faz
Pt	Platin
Si	Silisyum
SiN	Silikon Nitriür
SP	Surface Plasmon; Yüzey Plazmonu
SPP	Surface Plasmon Polariton; Yüzey Plazmon Polaritonu
SRR	Split Ring Resonators; Ayrık Halka Rezonatörü
T	Transmittance; Geçiş
TaN	Tantalum Nitrür
TCO	Transparent Conductive Oxides; Saydam İletken Oksitler
TiN	Titanium Nitrür
VIS	Visible; Görünür
VO_2	Vanadyum Dioksit
ZnO	Çinko Oksit
ZrN	Zirkonyum Nitrür
$\boldsymbol{\theta_i}$	Geliş Açısı (Normal Yansımada Aynı Düzlemde)
$\boldsymbol{\theta_r}$	Kırılma Açısı (Normal Yansımada Aynı Düzlemde)
$\langle \boldsymbol{I_f} \rangle$	Odak Noktasındaki Ortalama Işık Yoğunluğu
$\langle \boldsymbol{I_i} \rangle$	Gelen Ortalama Işık Yoğunluğu
$\boldsymbol{E_x}$	$\boldsymbol{x}-$ Doğrultusundaki Elektrik Alan
$\boldsymbol{E_y}$	$\boldsymbol{y}-$ Doğrultusundaki Elektrik Alan
$\boldsymbol{E_z}$	$\boldsymbol{z}-$Doğrultusundaki Elektrik Alan
$\boldsymbol{f_1}$	Lorentz Osilatörünün Kuvveti

m_0	Elektron Kütlesi
n_i	Geliş Ortamının Kırılma İndisi
n_t	Kırılma Ortamının Kırılma İndisi
t_{Au}	Altın malzeme kalınlığı
t_{SiN}	Silisyum nitrür malzeme kalınlığı
t_{TiN}	Titanyum Nitrür Malzeme Kalınlığı
γ_p	Taşıyıcı Gevşeme Oranı
ε_b	Arka Plan Dielektrik Geçirgenliği
ε_r'	Metalin Bağıl Geçirgenliğinin Gerçel (Reel) Kısmı
ε_r''	Metalin Bağıl Geçirgenliğinin İmajiner (Sanal) Kısmı
ε_0	Vakum Geçirgenliği
θ_t	Yansıma Açısı (Normal Yansımada Aynı Düzlemde)
λ_0	Boş Uzayın Dalga Boyu
ψ_r	Düzlem Dışı Yansıma Açısı
ψ_t	Düzlem Dışı Kırılma Açısı
ω_p	Plazma Frekansı
ω_1	Lorentz Osilatörünün Merkez Frekansı
°C	Santigrad
°K	Kelvin
µm	Mikrometre
2D	2-Dimensional; 2 Boyutlu
3D	3-Dimensional; 3 Boyutlu
E	Elektrik Alan
Hz	Hertz
nm	Nanometre
P_x	$x-$ eksenindeki periyodiklik
P_y	$y-$ eksenindeki periyodiklik
rad/s	Radyal Frekans Birimi
THz	Terahertz

$\mathbf{cm}$	Santimetre
$\boldsymbol{D}$	Metalens Çapı
$\boldsymbol{N}$	Serbest Elektron Konsantrasyonu
$\boldsymbol{W}$	Nanoanten Kol Genişliği
$\boldsymbol{c}$	Nanoanten Kolları Arasındaki Uzaklık
$\boldsymbol{d}$	Nanoanten Kol Uzunluğu
$\boldsymbol{e}$	Elektron Yükü
$\boldsymbol{eV}$	Elektronvolt
$\boldsymbol{f}$	Odak Uzaklığı
$\boldsymbol{m}$	Etkin Kütle
$\boldsymbol{\Phi}$	Faz Farkı
$\boldsymbol{\nabla\Phi}$	Arayüzdeki Faz Süreksizliğinin Gradyanı
$\boldsymbol{\gamma}$	Sönümleme Oranı
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Dielektrik Geçirgenlik
$\boldsymbol{\eta}$	Odak Verimi
$\boldsymbol{\lambda}$	Dalga Boyu
$\boldsymbol{\mu}$	Manyetik Geçirgenlik
$\boldsymbol{\pi}$	Pi Sayısı
$\boldsymbol{\phi(x,y)}$	Faz Profili

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1. *Bazı Metallerin* ω_p*' si ve Sönümleme Oranı* 28

Tablo 1. 2. *Çeşitli Plazma Dalga Boylarına Ulaşmak için Gereken Taşıyıcı Yoğunluk Seviyeleri* (cm^{-3} *cinsinden). Değerler* ω_p *Denklemi (Denklem 1.6) Kullanılarak Bulunmuştur* 32

Tablo 2. 1. *Tip1, Tip2 ve Tip3 Nanoantenlerinin Geometrik Parametreleri* 38

Tablo 3. 1. *Tip1 Dizilimi için* f *Değerleri* 46

Tablo 3. 2. *Tip2 Dizilimi için* f *Değerleri* 47

Tablo 3. 3. *Tip3 Dizilimi için* f *Değerleri* 47

Tablo 3. 4. *Tip1 Diziliminin Odaklama Parametre Değerleri* 51

Tablo 3. 5. *Tip2 Diziliminin Odaklama Parametre Değerleri* 52

Tablo 3. 6. *Tip3 Diziliminin Odaklama Parametre Değerleri* 53

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. *Malzemelerin ε ve μ Değerleri ile Karakterize Edildiği ε-μ Düzlemi* 4

Şekil 1. 2. *0-2π Aralığında Faz Manipülasyonunu Etkin Bir Şekilde Gerçekleştirmek için Farklı Şekillerdeki Sekiz Metayüzey Hücresi* 7

Şekil 1. 3. *Odaklama ve Vorteks Elektromanyetik Dalga Üretimi ile Metayüzey* 8

Şekil 1. 4. *(a) Yüksek Verimli Bir Metayüzey Tasarımı b) PB Faz Metayüzey Yaklaşımına Sahip Bir Holografik Görüntüleme Plakası* 9

Şekil 1. 5. *Yansıtıcı Tip Bir Metayüzey Holografik Görüntüleme Plakası* 10

Şekil 1. 6. *Mikrodalga Frekans Bandında %86'ya Varan Elektromanyetik Dalga Kontrol Verimliliğine Sahip Bir Huygens Metayüzeyi* 10

Şekil 1. 7. *Kontrol Verimliliği %99'a Kadar Olan Faz Kontrolü Sağalayabilen Metayüzey Tasarımı* 11

Şekil 1. 8. *Holografik Mikrodalga Uygulamaları için Huygens Metayüzey Çalışması*. 11

Şekil 1. 9. *(a) Tamamen Dielektrik Bir Metayüzey (b) Dairesel Polarizeli Dalgaların Asimetrik İletimini Gerçekleştirebilen ve Polarizasyon Durumlarını Tersine Çevirebilen Çok Katmanlı Bir Metayüzey Birim Yapısı* 12

Şekil 1. 10. *(a) Polarizasyon Yönünü Değiştirebilen Çok Katmanlı Bir Metayüzey Yapısı b) Hologrofik Bir Metayüzey Yapısı* 13

Şekil 1. 11. *Geniş Bant Çift Dairesel Polarize Bir Metayüzey Anteni* 13

Şekil 1. 12. f *Kontrolü için Diyotlarla Yüklenmiş Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilen Metayüzey Tasarımı* 15

Şekil 1. 13. *Anahtarlama için Grafen ile Yüklenmiş Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilen Metayüzey Tasarımı* 16

Şekil 1. 14. *Çok Bantlı Işık Soğurumu için Sıvı Kristal ile Yüklenmiş Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilen Metayüzey* 17

Şekil 1. 15. *Yeniden Yapılandırılabilir Dalga Ön Manipülasyonu için Manyetik Dipol ile Yüklenmiş Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzey* 17

Şekil 1. 16. *Akıllı Metayüzeyler* 18

Şekil 1. 17. *(a) Faz Değişim Malzemesi ile Yüklenmiş Optik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzey (b) İlave Silikon Halka Tabakası ile Yüklenmiş Optik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzey* 19

Şekil 1. 18. *Termal Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler* 20

Şekil 1. 19. *Mekanik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler* 21

Şekil 1. 20. *Genelleştirilmiş Snell Yasası: Anormal Şekilde Kırılan ve Yansıyan Işınların Şeması* 22

Şekil 1. 21. *Genel Yansıma ve Kırılmanın Pozitif Faz Gradyanı için Şematik Gösterimi* 23

Şekil 1. 22. *Faz Kontrolü İçin Bir Metahücre Dizilim Şeması* 23

Şekil 1. 23. *Işık Modülasyonu ve Kontrolü Sağlayan V Şeklindeki Nanoantenlere Sahip Metayüzeyler* 24

Şekil 1. 24. *8 μm Dalga Boyunda Au Nanoçubukların Farklı Uzunluk ve Açılma Açısına Sahip V Şekilli Nanoantenler için Çapraz Polarize Dağınık Işığın Simüle Edilmiş Genliği ve Faz Kayması* 25

Şekil 1. 25. *Au, Ag, Al, Na ve K'nın VIS ve NIR'de Bağıl Geçirgenliği. Na ve K Daha Düşük Kayıplar Elde Etmelerine Rağmen, Su ve Hava ile Reaksiyona Girdikleri için Tercih Edilmezler.* 27

Şekil 1. 26. *Metal Nitritlerin Bağıl Geçirgenliği: VIS ve NIR'de TiN, TaN, ZrN, HfN.* $\varepsilon_0 < 0$ *Olduğundan, Bu Dalga Boyu Aralığında Olası Plazmonik Malzemelerdir.* 30

Şekil 2. 1. *Her Metamolekülün Üstten Görünümü* 37

Şekil 2. 2. *Antenlerin Dizilimleri a) Tip1 Dizilimi ve b) Tip2 Dizilimi ve c) Tip3 Dizilimi* 40

Şekil 3. 1. *Dizilimlerde Kullanılan Antenlerin Geçiş Analiz Sonuçları a) Tip1 Dizilimindeki Nanoantenler b) Tip2 Dizilimindeki Nanoantenler c) Tip3 Dizilimindeki Nanoantenler* 43

Şekil 3. 2. *Faz Farkı Gösterimi* 44

Şekil 3. 3. *Odaklama Ekseni ve Polarizasyon Doğrultusu Boyunca Normalize Edilmiş Işık Yoğunluğu Dağılımları: a) Tip1, b) Tip2 ve c) Tip3 için.* 46

Şekil 3. 4. *Tip1 Düzenlemesi için Odak Düzlemlerinden Elde Edilen Normalize Işık Yoğunluğu Dağılımları: (a)* f_1 *= 3.934 μm, (b)* f_2 *= 5.15 μm, (c)* f_3 *= 6.448 μm, (d)* f_4 *= 7.516 μm, (e)* f_5 *= 9.156 μm, (f)* f_6 *= 11.6 μm, (g))* f_7 *= 13.8 μm, (h)* f_8 *= 15.61 μm, (i)* f_9 *= 17.54 μm ve (j)* f_{10} *= 19.79 μm.* 47

Şekil 3. 5. *Tip2 Düzenlemesi İçin Odak Düzlemlerinden Elde Edilen Normalize Işık Yoğunluğu Dağılımları: (a)* f_1 *= 4.666 μm, (b)* f_2 *= 7.082 μm, (c)* f_3 *= 8.904 μm, (d)* f_4 *= 10.65 μm, (e)* f_5 *= 13.74 μm, (f))* f_6 *= 16.45 μm ve (g)* f_7 *= 18.57 μm.* 48

Şekil 3. 6. *Tip3 Düzenlemesi İçin Odak Düzlemlerinden Elde Edilen Normalize Işık Yoğunluğu Dağılımları: (a)* f_1 *= 2.88 μm, (b)* f_2 *= 4.07 μm, (c)* f_3 *= 8.14 μm, (d)* f_4 *= 9.75 μm, (e)* f_5 *= 16.76 μm* 49

GİRİŞ

Bu tezin amacı hem alternatif plazmonik hem de plazmonik tabanlı nanoyapılar kullanılarak çok noktada odaklama özelliğine sahip özgün metalenslerin tasarlanmasıdır. Bu tasarım, [0,2π] aralığında bir faz gradyanı oluşturmak için aperiyodik dizilimlerin kullanılmasını içerir. Bu şekilde, literatüre özgün düz lens tasarımları sunulabilir. Tez çalışması kapsamında, nanosaçıcıların tasarımı için zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD; Finite-difference time-domain) kullanılarak nümerik analizler yapılacaktır.

Tez dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde metamalzemeler ve metayüzeylerle ilgili temel tanımlar ele alınmaktadır. Metamalzemeler, özgün optik özelliklere sahip yapay malzemelerdir ve bu tezde kullanılan nanoyapıların tasarımında temel bir rol oynamaktadır. Metayüzeyler ise bu yapılarda kullanılan iki boyutlu (2D) yüzeylerdir ve plazmonik etkilerin oluştuğu yerlerdir.

İkinci bölümde, materyal ve yöntem-elektromanyetik modelleme kısmı altında, temel anten yapısının ve dizilimlerin oluşturulma aşaması detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Bu bölümde, tez çalışması için kullanılan anten yapısı ve bu yapının nümerik olarak nasıl analiz edildiği açıklanmaktadır.

Üçüncü bölümde, ilgili antenlerin ve dizilimlerinin nümerik analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Bu bölümde, tasarımın etkinliği ve performansı değerlendirilmektedir. Sonuçlar tablolar ve şekiller aracılığıyla görselleştirilmiştir.

Dördüncü ve son bölümde ise tartışma, sonuçlar ve öneriler sunularak tez tamamlanmaktadır. Bu bölümde, elde edilen sonuçlar üzerinde detaylı bir tartışma yapılmakta ve tasarımın avantajları, sınırlamaları ve gelecekteki geliştirme potansiyeli üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, önerilerde bulunularak ileri çalışmalar için yol gösterilmektedir.

Bu çalışmada fiber optik haberleşme dalga boylarından, saçılma kayıpları en fazla olan 850 nm’de; fiber optik hat üzerindeki mekanik kontaklarda meydana gelebilecek diğer

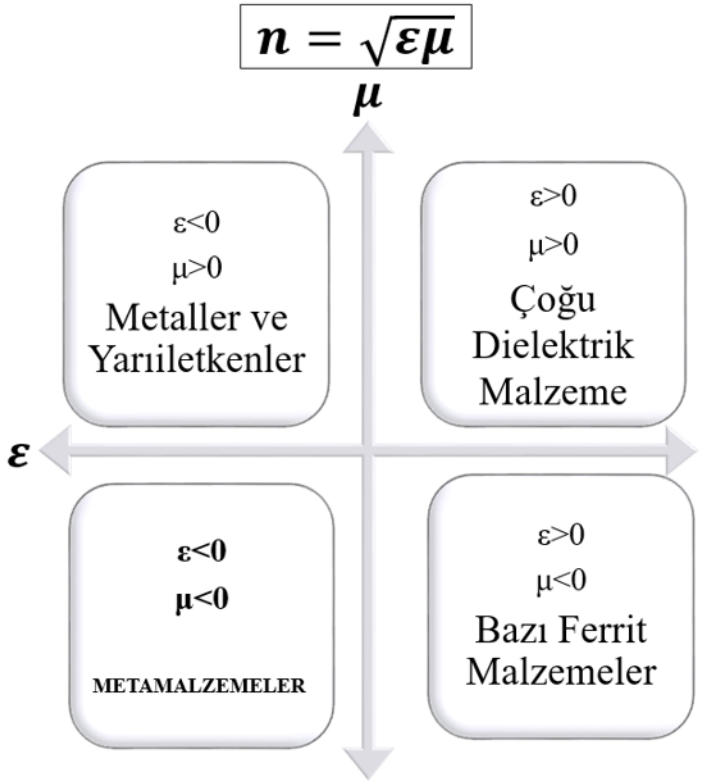
kayıpları indirgemeye yönelik olarak, odaklama sağlayabilen ve çoklu odak noktaları ile ışık yakalama kapasitesini kontrol edebilen metalens tasarımlarının elektromanyetik modellemesi sunulmuştur. Bu bağlamda alternatif plazmonik tabanlı ve plazmonik tabanlı nanoyapılarla faz gradyanı oluşturacak metamolekül yapıları belirlenmiş olup bu yapıların aperiyodik dizilimleri ile üç tip metalens tasarımı elde edilmiştir. Bu yapıların odaklama performansları ise tezde belirtilen teorik odaklama parametreleri ile belirlenmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

TEMEL TANIMLAR

1.1. Metamalzemeler

Metamalzemeler, elektromanyetik alan hakkında benzersiz işlevsellikler gösterirler. Alt dalga boyu ölçeğinde tasarlanan ve doğada bulunmayan, yapay olarak elde edilen bu malzemeler negatif kırılma indisine sahip solak malzemelerdir. Eşzamanlı negatif dielektrik geçirgenliğe ($\varepsilon<0$) ve manyetik geçirgenliğe ($\mu<0$) sahip olabilirler [1], [2]. Metamalzeme fikri ilk olarak 1968 yılında solak metamalzemeler ismiyle Veselago tarafından önerilmiştir ve metamalzemelerin sıra dışı fiziksel özellikleri Veselago tarafından ortaya çıkarılmıştır [3], [4]. Bu sıra dışı özellikler ters Doppler etkisi, sağ el kuralına uyan ve sol el kuralına uyan metamalzemeler arasındaki arayüzde ışığın ters kırılması, ters Cherenkov etkileri vb. gibidir [2], [3]. 1990 yıllarında, Pendry vd.[5] malzemenin ε ve μ değerlerinin sıra dışı negatif değerlerine erişime imkân sağlamak için, özel olarak tasarlanmış metalik kesme telleri (CW; cut wires) ve ayrık halka rezonatörleri (SRR; split ring resonators) dizilerinden yararlanmışlardır. Ardından 2001'de Smith ve diğerleri ilk olarak mikrodalga frekanslarında deneysel negatif bir kırılma indisi sunmuşlardır [6]. Pendry ayrıca, gümüş (Ag) bir levhanın (kabaca 40 nm kalınlığında), nokta kaynağının, levhanın yakın alan bölgesinde olması şartıyla, bir "süperlens" etkisi üretebileceğini belirtmiştir [2], [7], [8]. Metamalzemeler, Snell kırılma yasasına göre, kırılan açıyı negatif değerli yaparak, gelen ve kırılan dalganın normalin aynı tarafına yönelmesine sebep olur. Bu duruma negatif kırılma denir. Negatif kırılma, kartezyen bir düzlemin dört çeyreğinin hepsinde elektromanyetik dalgaların tam kontrolünü sağlayabilir [2], [9].



Şekil 1. 1. *Malzemelerin ε ve μ Değerleri ile Karakterize Edildiği ε-μ Düzlemi*

Şekil 1.1 malzemelerin ε ve μ değerleri ile karakterize edildiği ε-μ düzlemini ifade etmektedir. Bu düzlemdeki sağ üst kadrandaki kısım ε ve μ değerleri pozitif olan ve doğada var olan çoğu dielektrik malzemeleri içerir. Sol üst kadran da belirli frekanslarda negatif ε ve pozitif μ sergileyebilen metalleri, ferroelektrik malzemeleri ve katkılı yarı iletkenleri teşkil eder. Sağ alt kadran, pozitif ε ve negatif μ değerlerine sahip, bazı ferrit malzemelerden oluşur ancak manyetik tepkileri mikrodalga frekanslarının üzerinde kaybolur. Sol alt kadran ise negatif ε ve μ değerlerine sahip malzemeleri kapsar. Bu bölge tamamen doğal olmayan tasarım malzemelerdir. Metamalzemelerin bilinen en iyi sınıfı ε ve/veya μ 'nün negatif olduğu tüm kadranlarda mevcuttur ve en iyi sınıfı sol üst ve sol alt kadranlarla sağlanabilir [10].

Metamalzemeler uygulama bazında, başlangıçta negatif indisli süperlensler için önerilmiştir [8]. Süperlens (literatürde mükemmel lens olarak da geçebilir), dalga optikleri tarafından odaklamaya getirilen sınırlamaları kırar yani kırınım sınırının ötesinde olan ve negatif kırılma indisi -1'e eşit olan metamalzemelerin kullanıldığı bir mercektir [9]. Süperlens ile başlayan bu uygulama süreci, daha sonra elektromanyetik alan mühendisliği ve dalgaların yayılımının kontrolü için bir ortam sağladığından dolayı, dönüşüm optiği alanına geçmiştir [11]. Gelişen süreçte ise metamalzeme olgusu; pasif

mikro ve nano yapılı malzemelerin rezonans uyarımlarını devreye sokarak kullanılmış elektromanyetik tepkilerini kontrol edebilmiştir. Bu yolla da negatif indisli ortamları [12], kiral malzemeleri [13], [14], elektromanyetik olarak indüklenen rezonant atomik sistemlerle hemen hemen aynı şeffaflığa sahip ince filmler [15] elde edilmiştir. Işığın polarizasyon durumunu doğal optik kristallerden yüz binlerce kat daha güçlü döndüren malzemelere kiral malzeme denir [13], [14]. Kiral malzeme dışardan gelen dalganın polarizasyonunu sağ el ve sol el olmak üzere ikiye böler. Kiralite anizotropinin bir sonucudur. Kiral özellik metamalzemelerle elde edilebilir [11], [13], [14].

Metamalzemelerin hitap ettiği diğer optik uygulamalar, görünmezlik pelerinleri [16], [17], hiperlenslerle süper çözünürlüklü görüntüleme [18]–[20], optik nano devreler [21], [22] ve biyosensörlerdir [23], [24]. Sıfır indeksli malzeme ve optik kara delikler de dikkat çeken optik uygulamaların arasındadır [25], [26].

1.2. Metayüzeyler

Metayüzeyler, metamalzemelerin 2D versiyonları veya yüzeysel karşılıklarıdır. Metayüzeylerin de aynı metamalzemelerde olduğu gibi, tepkilerini elektrik ve manyetik polarizasyonları ile karakterize etmek mümkündür, yani ε ve μ değerlerini tasarlayarak optik davranışları kontrol edilebilir. Literatürde metafilmler olarak da geçerler [9], [27]. Metamalzemeler, kendilerine kazandırılan ε ve μ değerleri sebebi ile ışığın yayılmasını kontrol eder; ancak yine de elektromanyetik dalgaları manipüle etmek için yayılma etkisini kullanırlar. Bu, metayüzeylere göre karmaşık, nispeten hacimli bir metamalzeme yapısı ile sonuçlanabilirken, metayüzeyler dalgayı son derece ince tek bir katman üzerinde manipüle etmeye çalışır [28], [29]. Metayüzeylerin 2D olması, onları metamalzemelere göre daha az hacimli yapar ve daha düşük kayıplı yapılar sunar [30]. Üç boyutlu (3D) yapılarından ötürü metamalzemeleri imal etmek metayüzeylere göre daha zordur. Metayüzeyler, düzlemsel yapıları nedeniyle düzlemsel imalat araçları kullanılarak kolayca üretilebilir [31], [32]. 2D metayüzeylerin düzlemsel üretim süreci de daha karmaşık olan 3D metamalzemelerin üretimine kıyasla daha uygun maliyet teşkil eder [33]. Bu sebeple, 2D malzemeler olan metayüzeyler, diğer cihazlara kolayca bütünleştirilebilir [9].

Alt dalga boyu ölçeğine sahip metayüzeylerin güçlü dalga cephesi modülasyon yeteneklerine dayanarak, metalens [34]–[37], görünmezlik pelerini [38], [39] , soğurucu

[40]–[42], vorteks ışını üreteci [43], holografi [44]–[46], refraktif çeyrek dalga plakası [1] ve benzeri birçok metacihazı önerilmiştir.

Metayüzeyler, mikrodalga bölgesi frekanslarından görünür bölge (VIS) frekanslarına kadar olan dalgaları bloke edebilir, soğurabilir, odaklayabilir, dağıtabilir veya yönlendirebilir. Yüzey dalgaları, faz veya grup hızını manipüle etmek için gerekli empedansa sahip metayüzey birim hücreleri tasarlanarak kontrol edilebilir ve tasarlanan birim hücreler, dalgaları belirli yönlere yönlendirebilecek veya bölebilecek biçimde şekillendirilerek saçılma kontrolü için gerekli uygulamalarda kullanılabilirler [47],[48].

Metayüzeyler, elektromanyetik dalgaların hem elektrik hem de manyetik alan bileşenlerinde uyarlama yapabilme yeteneğine sahiptir. Yansıma kayıpları olmayan metayüzeyler, literatürde Huygens metayüzeyleri olarak karakterize edilir ki metayüzeyler hem elektrik hem manyetik tepki üretebilirler [9],[49].

Metayüzeyler işlevselliklerine göre genlik modülasyonu için metayüzey, faz modülasyonu için metayüzey, polarizasyon modülasyonu için metayüzey, çok boyutlu modülasyon için metayüzey ve yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler olarak sınıflandırılabilir [50].Yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler üzerine yapılan çalışmalar ise elektriksel olarak yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler, optik olarak yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler, termal olarak yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler, mekanik olarak yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler ve güçle yapılandırılabilir metayüzeyler olarak gruplandırılabilirler [50].

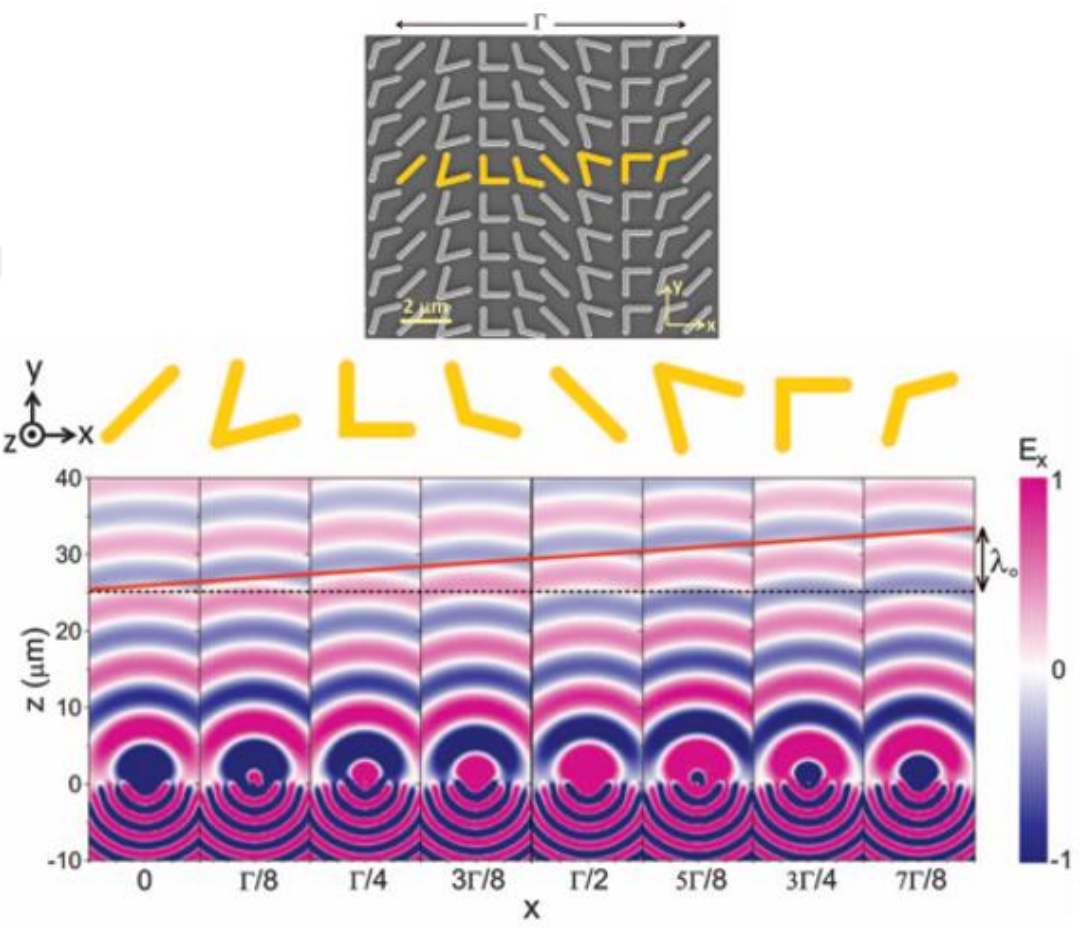
1.2.1. Genlik Modülasyonu için Metayüzeyler

Elektromanyetik dalgaların genlik kontrolünü gerçekleştiren metayüzey, asıl olarak gelen elektromanyetik dalga enerjisini yansıtmak, soğurmak veya iletmek için kullanılır. Son yıllarda, geniş bant metayüzey soğurucu [51]–[55], metayüzey boşluk filtresi [56], [57], metayüzey renkli baskı [58], grafen metayüzey anormal kırılma plakası [59], seçici kırınım için dielektrik metayüzey [60] ve yakın alan plazmonik ışın mühendisliği için metayüzey [61] gibi çok sayıda sonuç rapor edilmiştir [50].

1.2.2. Faz Modülasyonu için Metayüzeyler

Her metayüzey birim hücresinin, elektromanyetik dalganın faz kontrolünü sağlamak için belirli faz dağılımına göre tasarlandığı metayüzeylerdir. Bu bağlamda istenen faz tepkisi özellikleri metayüzeyin faz tepkisi özellikleri metayüzey biriminin boyutu, şekli, dönme

modu ve substrat malzeme tipi ile yakından ilgilidir. 2011 yılında Şekil 1.2'de gösterilen 0-2π aralığında faz manipülasyonunu etkin bir şekilde gerçekleştirmek için farklı şekillerde sekiz metayüzey hücresi (birimi) tanımlanmıştır [43], [50]. Şekildeki üst blok silikon üzerine üretilmiş altın (Au) nanoantenlerin dizilimini göstermektedir. Alt blok ise her bir Au nanoantenin teşkil ettiği faz farkı gösterilmiştir.

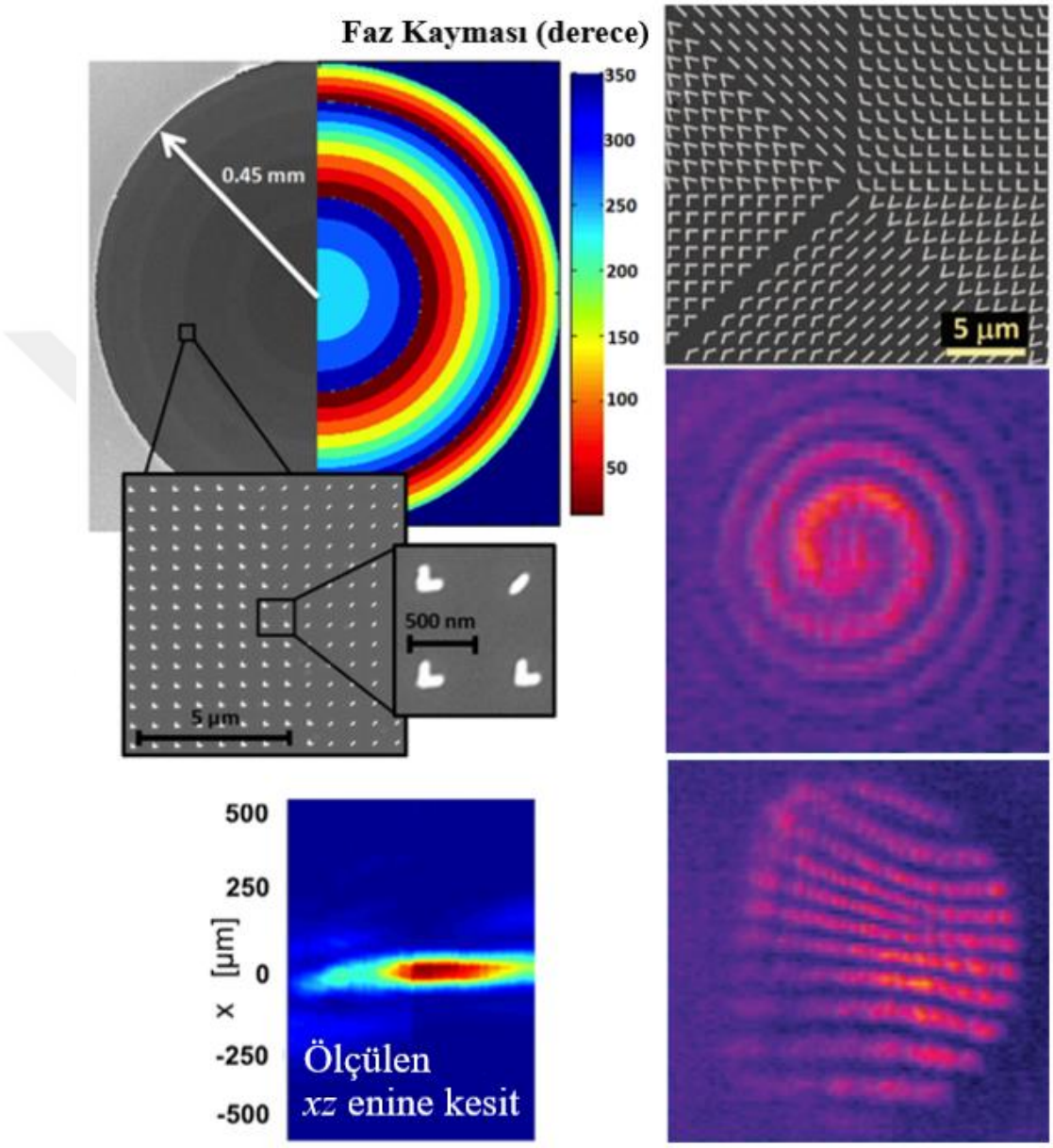


Şekil 1. 2. *0-2π Aralığında Faz Manipülasyonunu Etkin Bir Şekilde Gerçekleştirmek için Farklı Şekillerdeki Sekiz Metayüzey Hücresi*
Kaynak: [43], [50].

Şekil 1.3 tasarımında ise [29], [43], [62] görüldüğü gibi faz manipülasyonuna dayalı düz odaklama işlevine ve girdap (vorteks) elektromanyetik dalga üretme işlevine sahip bir metayüzey geliştirilmiştir [50]. Bu çalışmada ise V şeklindeki nanoantenlerin dizilimi vorteks elektromanyetik dalga üretimine uygun olacak şekilde yapılmıştır.

Literatüre ilk sunulan faz modülasyonlu metayüzeylerin elektromanyetik dalga dönüştürme verimliliği çok düşüktü ve bu sorunu çözüp, yüksek verimli elektromanyetik dalga manipülasyonunu gerçekleştirmek için araştırmacılar tarafından Pancharatnam-

Berry (PB) faz metayüzeyi, yansıtıcı tip metayüzey, Huygens metayüzey, çift katmanlı ve çok katmanlı metayüzey gibi çeşitli yeni yapılar önerilmiştir [50], [63], [64].

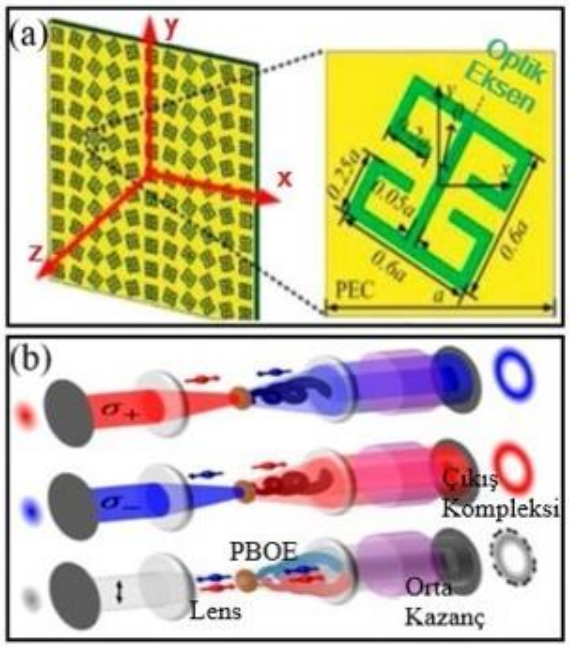


Şekil 1. 3. *Odaklama ve Vorteks Elektromanyetik Dalga Üretimi ile Metayüzey*
Kaynak:[29], [43], [50], [62]**.**

1.2.3. Pancharatnam-Berry (PB) Faz Metayüzeyleri

Bu tür metayüzey birim hücrelerinin dönüş açısını değiştirerek yani antenlere rotasyon açısı sağlanarak elektromanyetik dalgaların fazını sürekli olarak kontrol edebilen bir yapı türüdür. 2015 yılında araştırmacıların tasarladığı ilk PB faz meta yüzey yapısı Şekil 1.4'te

gösterilmiştir ve yaklaşık %25 elektromanyetik dalga kontrol verimliliği elde eden yüksek performanslı bir düz odaklı lens geliştirilmiştir [65]. Tasarımın şematik gösterimini sunan Şekil 1.4.a'ya bakıldığında büyütülmüş bloktaki birim hücrenin döndürülerek diziliminin yapıldığı anlaşılmaktadır. Şekil 1.4.a'daki gibi bir yaklaşımla Şekil 1.4.b'deki gibi holografik görüntüleme yapabilen başka bir PB faz metayüzey yapısı tasarlanabilir [50], [66].

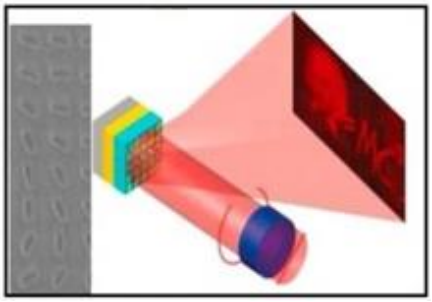


Şekil 1. 4. *(a) Yüksek Verimli Bir Metayüzey Tasarımı b) PB Faz Metayüzey Yaklaşımına Sahip Bir Holografik Görüntüleme Plakası*
Kaynak:[50], [65], [66].

1.2.4. Yansıtıcı Tip Metayüzeyler

Metayüzey tasarımlarına metal/yansıtıcı arka plaka eklenerek yansıtıcı tip metayüzey tasarımları gerçekleştirilebilir. Metayüzey üst katmanı ile metal arka plaka arasında böylece manyetik rezonanslar oluşturulabilir. Bu da gelen elektromanyetik dalgaların kontrolünde verim sağlayabilir. Yansıtıcı tip metayüzey yapılarındaki metayüzey birimi ile metal arka plaka arasında manyetik rezonans özellikleri oluşturulabilir ve böylece gelen elektromanyetik dalgaların kontrolündeki verimlilik büyük ölçüde geliştirilebilir. Önerilen bir yansıtıcı tip P-B fazı metayüzeyinde, terahertz dalgasını kontrol etmek için kodlanmış bir dizilim sunulmuştur ve geniş bant radar kesitinin azaltıldığı gözlemlenmiştir [46]. Böylece yansıtıcı tip metayüzey ile holografik görüntüleme plakası

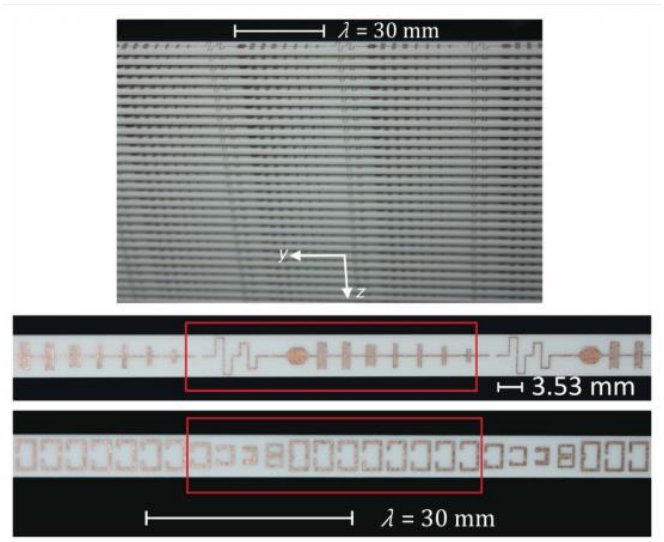
tasarlanmış ve kontrol verimliliği %80'e ulaşan elektromanyetik dalgaların faz kontrolü sağlanabilmiştir [46], [50].



Şekil 1. 5. *Yansıtıcı Tip Bir Metayüzey Holografik Görüntüleme Plakası*
Kaynak:[46], [50].

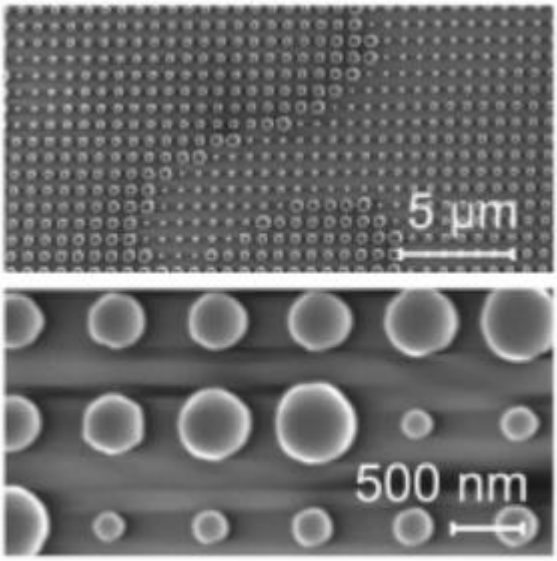
1.2.5. Huygens Metayüzeyi

Huygens metayüzeyi hem elektrik hem de manyetik rezonans üretebilen, gelen elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenlerini kontrol etmek için tasarlanan metayüzey türüdür. Bu metayüzeyler, elektromanyetik dalganın kontrol verimliliğini maksimum düzeye çıkarmak için neredeyse hiç yansıtmayan ve tamamen eşleşen iletim özelliklerine sahiptir. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi mikrodalga frekans bandında %86'ya varan elektromanyetik dalga kontrol verimliliğine sahip bir Huygens metayüzeyi tasarlanmış ve geliştirilmiştir [49]. Aynı zamanda elektromanyetik ışın iletim yönü kontrolünü sağlanmış ve Gauss-Bessel ışın dönüşümünü gerçekleştirilmiştir [49], [50].



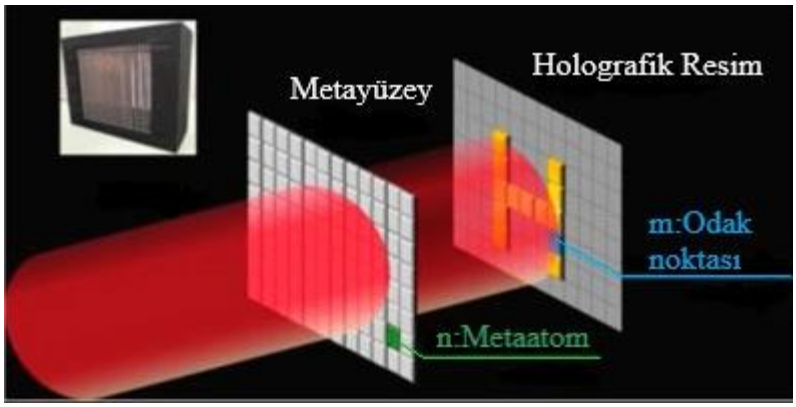
Şekil 1. 6. *Mikrodalga Frekans Bandında %86'ya Varan Elektromanyetik Dalga Kontrol Verimliliğine Sahip Bir Huygens Metayüzeyi*
Kaynak: [49], [50].

Daha sonra, daha da yakın kızılötesi (NIR; near-infrared) bantta bir Huygens metayüzeyi geliştirilmiştir [67]. L. Wang vd. [68] tarafından Huygens ilkesine dayanarak, Şekil 1.7'de görülebileceği gibi gri tonlamalı bir metahologram tasarlanmıştır. Bu şekilde faz kontrolü, kontrol verimliliği %99 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir [50], [68].



Şekil 1. 7. *Kontrol Verimliliği %99'a Kadar Olan Faz Kontrolü Sağalayabilen Metayüzey Tasarımı*
Kaynak:[50], [68].

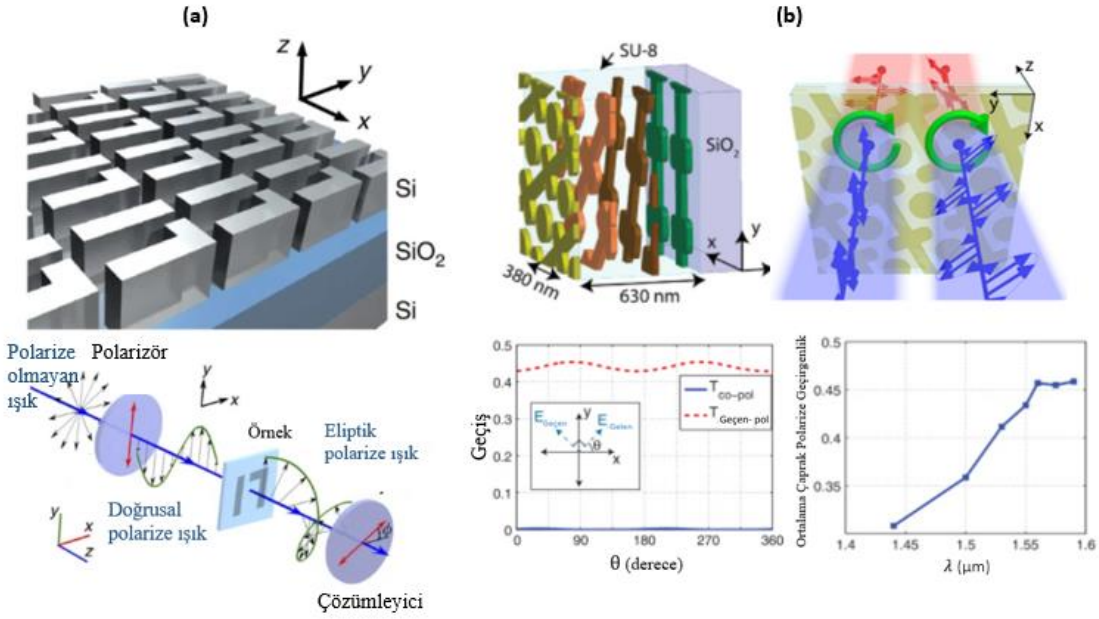
2018 yılında, kontrol arayüzündeki elektromanyetik alan dağılımı ve modülasyon odak noktaları ile mikrodalga görüntüleme arasındaki enerji dağılımı için detaylı çalışmalar içeren mikrodalga frekansında yeni bir Huygens metayüzey hologramı önerilmiştir [69]. Huygens'in metayüzeyi, Şekil 1.8'de gösterildiği gibi holografik mikrodalga uygulamaları yaklaşımını genişletmektedir [50], [69].



Şekil 1. 8. *Holografik Mikrodalga Uygulamaları için Huygens Metayüzey Çalışması*
Kaynak: [50], [69].

1.2.6. Polarizasyon Modülasyonu için Metayüzeyler

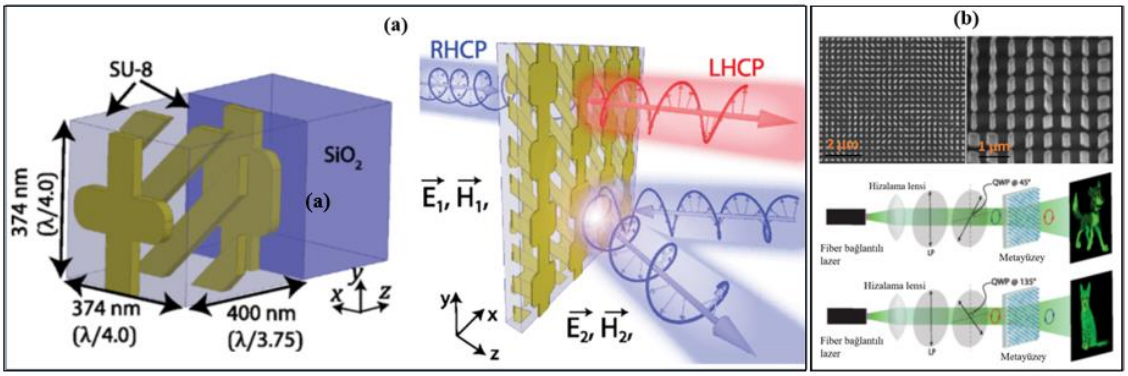
Asimetrik bir metayüzey birimi tasarlayarak, iletilen veya yansıyan elektromanyetik dalgaların ortogonal yöndeki faz farkı gerçekleştirilebilir. Bunun sonucunda elektromanyetik dalganın polarizasyon yönünün kontrolü ve elektromanyetik dalganın çeşitli polarizasyon durumları arasında dönüşüm sağlanabilir [63], [64]. Örneğin, 2014 yılında Wu vd. [70] asimetrik rezonans özelliklerine sahip olan Şekil 1.9.a'da gösterildiği gibi tamamen dielektrik bir metayüzey geliştirmiştir ve bu metayüzey doğrusal polarizasyonu dairesel polarizasyona dönüştürebilmiştir. Aynı yıl, Şekil 1.9.b'de görülebileceği gibi dairesel polarize dalgaların asimetrik iletimini gerçekleştirebilen ve polarizasyon durumlarının tersine çevrilmesini sağlayabilen çok katmanlı bir metayüzey birim yapısı geliştirilmiştir [71].



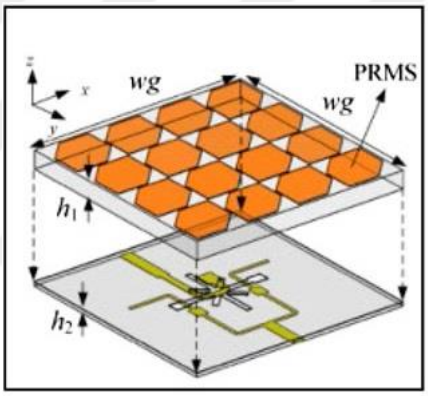
Şekil 1. 9. *(a) Tamamen Dielektrik Bir Metayüzey (b) Dairesel Polarizeli Dalgaların Asimetrik İletimini Gerçekleştirebilen ve Polarizasyon Durumlarını Tersine Çevirebilen Çok Katmanlı Bir Metayüzey Birim Yapısı*
Kaynak: (a) [50], [70] (b) [50], [71].

2016 yılında doğrusal polarizeli dalgalarının polarizasyon yönünün kontrolünü sağlayabilen çok katmanlı bir metayüzey yapısı geliştirilmiştir (Şekil 1.10.a) [72]. 2017'de de bu türdeki metayüzeyleri baz alarak, Şekil 1.10.b'deki gibi, farklı polarizeli elektromanyetik dalga uyarımları için farklı tepki özellikleri sergileyen bir holografik metayüzey tasarlanmıştır [73]. Aynı yıl içinde, anizotropik metayüzeylere dayalı olarak, dairesel polarizasyonlu dalgalar için geniş bir frekans aralığında yüksek dönüşüm

verimliliği sağlanmıştır [74]. 2018 yılında da düşük profilli geniş bant çift dairesel polarizeli bir metayüzey anteni önerilmiştir (Şekil 1.11) [50].



Şekil 1. 10. *(a) Polarizasyon Yönünü Değiştirebilen Çok Katmanlı Bir Metayüzey Yapısı b) Hologrofik Bir Metayüzey Yapısı*
Kaynak: (a)[50], [72], (b) [50], [73].



Şekil 1. 11. *Geniş Bant Çift Dairesel Polarize Bir Metayüzey Anteni*
Kaynak: [50], [75].

1.2.7. Çok Boyutlu Modülasyon için Metayüzeyler

Yukarıda bahsi geçen tüm metayüzeyler yalnızca tek bir amaca hizmet eder, örneğin gelen elektromanyetik dalgaların genliğini, fazını veya polarizasyonunu kontrol edebilir. Yüksek performanslı holografik görüntüleme ve özel ışın üretimi için elektromanyetik dalgaların daha hassas bir şekilde kontrolünü gerçekleştirmek için, gelen elektromanyetik dalgaların genliğini ve fazını (veya faz ve polarizasyonunu) aynı anda kontrol etmek gerekir [50].

2014 yılında L. Liu vd. [76] elektromanyetik dalganın genlik ve fazının eşzamanlı kontrolünü sağlamak amacıyla genlik modülasyonlu metayüzey birimleri ile faz modülasyonlu metayüzey birimlerinin bir kombinasyonu önerilmiştir ve terahertz bandında geniş bantlı bir metayüzey geliştirilmiştir [76]. Daha sonra bir grup araştırmacı elektromanyetik dalga genliği ve fazının eşzamanlı kontrolü için I-şekilli metayüzey

birimleri ve C-şekilli metayüzey birimlerine dayanarak NIR frekans bandında kırılmayan ışın radyasyon metayüzeyini tasarlamışlardır [77], [78]. 2018 yılında G. Lee vd. [79] geniş bant VIS dalga boyu bölgesinde tam karmaşık genlik ve faz modülasyonu elde etmek için X-şekilli metaatomlardan oluşan yeni bir metayüzey önerdiler. Bu metayüzey ideal bir 3D hologram olarak değerlendirilebilir ve ışın şekillendirme, 3D biyogörüntüleme, optik hesaplama ile optik çipler, bu tür bir metayüzey ile sağlanabilir [50], [79].

2015 yılında araştırmacılar tarafından; elektromanyetik dalgaların polarizasyonunu ve fazını aynı anda kontrol edebilen, dairesel polarizeli gelen elektromanyetik dalgaları doğrusal polarizeli dalgalara dönüştürebilen ve doğrusal polarizeli dalganın iletim yönünü saptırabilen farklı dikdörtgen kanallara sahip bir metayüzey ünitesi önerilmiştir [80]. Yine 2015 yılında metayüzey biriminin eliptikliğini ve farklı dönüş açılarını tasarlayarak tamamen dielektrik eliptik metayüzey birim yapısı önerilmiştir. Bu metayüzey yapısına dayanarak, polarizasyon ayırma ve odaklama, polarizasyon dönüşümü ve odaklama, holografik görüntüleme ve vorteks elektromanyetik dalga oluşturma fonksiyonlarını gerçekleştirebilen, %97'ye kadar elektromanyetik dalga kullanım verimliliğine sahip çeşitli yüksek performanslı düzlemsel fonksiyonel cihazlar geliştirilmiştir [50], [81].

2018 yılında bir çalışmada elektromanyetik dalganın kontrol yeteneğini tam olarak yansıtan genlik, faz ve polarizasyon modülasyonuna dayalı, çok işlevli yeniden yapılandırılabilir metayüzey elde etmek için kafes tasarımı ve farklı düzenlemeler kullanılmıştır [82]. Farklı olarak; elektromanyetik dalgaların genliğini, fazını ve polarizasyon parametrelerini bağımsız olarak kontrol edebilen çok katmanlı C-şekilli bir kiral metayüzey yapısı geliştirilmiş ve çift odaklı prizmalar, havadar ışınlar ve çok ışınlı şekillendirme gibi çeşitli fonksiyonel düz yapılar önerilmiştir [83]. Bunlara ek olarak, çok boyutlu parametre kontrol yeteneğine sahip bu metayüzeyler, gelen elektromanyetik dalgaların gerçek zamanlı dinamik kontrolünü hala başaramamaktadır [50].

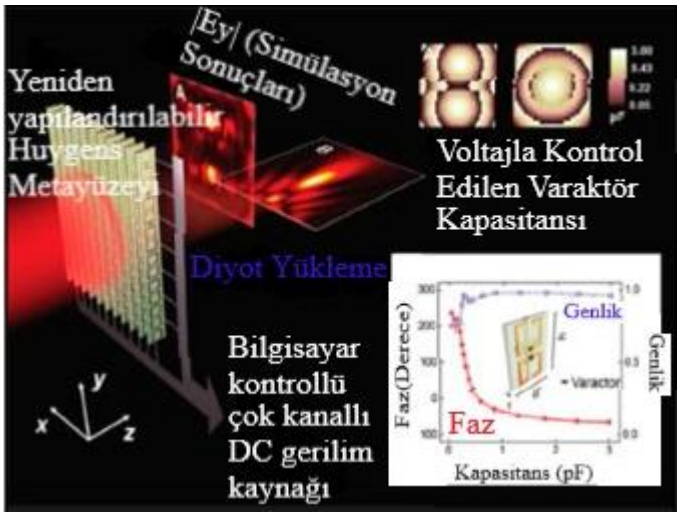
1.2.8. Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler

Daha önce de bahsedildiği gibi, metayüzeylerin elektromanyetik tepki özellikleri, metayüzey biriminin boyutu, şekli, dönüş yönü ve substrat malzeme tipi ile yakından alakalıdır. Metayüzeyin elektromanyetik tepki özellikleri, metayüzey birim yapısını ve alt katman malzeme özelliklerini ek olarak ayarlayarak dinamik olarak kontrol edilebilir.

Bunun sonucunda elektromanyetik dalgaların modülasyonları gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilir. Bu da aktif ayarlanabilir, yeniden yapılandırılabilir, programlanabilir ve diğer çok yönlü metayüzeyler elde etmek dolayısıyla da bu tür metayüzeylere dayalı çok yönlü optoelektronik cihazlar ve sistemler elde etmek anlamına gelir. Son yıllarda bildirilen aktif ayarlanabilir/yeniden yapılandırılabilir metayüzey yapıları, elektronik kontrolü, ışık kontrolü, sıcaklık kontrolü, mekanik kontrolü ve güç kontrolünü içerir [50].

1.2.8.1. Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler

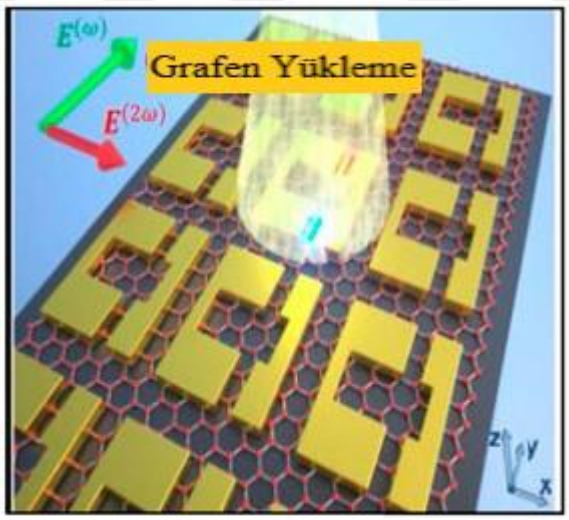
Diyotlar [84], transistörler [85], MEMS (mikro elektro-mekanik sistemler) [86]–[88] , grafen [89] ve sıvı kristaller [90], [91] vb. tarafından yüklenen ayarlanabilir metayüzeyler için; elektromanyetik tepki özellikleri, bu metayüzeylerdeki malzemelere/bileşenlere uygulanan öngerilim voltajı ayarlanarak dinamik olarak kontrol edilebilir. 2017'de Chen vd. [84], bağımsız/ortak kontrol diyotları tarafından yüklenen yeniden konfigüre edilebilir metayüzey dizisindeki her bir hücre üzerindeki voltajı saptırarak bir tür elektromanyetik ayarını elde edebilmişlerdir. Bu sayede gelen elektromanyetik dalga cephesinin kontrolünü sağlayıp Şekil 1.12'de gösterildiği gibi odak uzaklığı (f) ayarlanabilir duruma getirilmiştir [50], [84].



Şekil 1. 12. f *Kontrolü için Diyotlarla Yüklenmiş Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilen Metayüzey Tasarımı*
Kaynak: [50], [84].

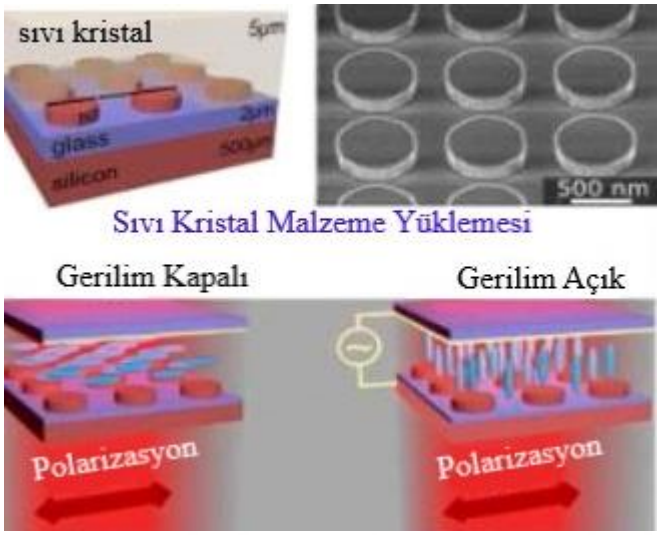
2018 yılında slot tipi bir alt dalga boyu metamalzeme hücresinin "AÇIK" ve "KAPALI" geçiş durumlarını dinamik olarak ayarlamak için bir PIN diyotu [85] kullanılmıştır. Dalga kılavuzu modu, bir hedef radyasyon modeli oluşturmak için ikili bir ayarlama kullanılarak serbest uzay radyasyonuna dönüştürüldükten sonra elektron ışını yönlendirme amaçlarına izin veren dinamik olarak yeniden yapılandırılabilir bir holografik metayüzey açıklığı

tasarlanmıştır. Yine aynı yıl Gao vd. [92] tarafından voltaj kontrollü varaktör diyotları ile gömülü kelebek şekilli birim hücrelerden oluşan aktif bir metayüzey önerilmiştir. Bu çalışmada yeniden yapılandırılabilir polarizasyon dönüştürücü, varaktörün öngerilim voltajının ayarlanmasıyla dinamik olarak doğrusaldan doğrusala, doğrusaldan elipse ve doğrusaldan dairesele dönüştürülmüştür. 2018 yılında öngerilim voltajının büyüklüğünü ayarlayarak metayüzey biriminin rezonans özelliklerini kontrol edip, böylece gelen elektromanyetik dalganın polarizasyon durumunun kontrolünü sağlayarak MEMS yüklü yeniden yapılandırılabilir bir metayüzey tasarlanmıştır [86]. Teorik olarak, grafen malzemesi yansıtıcı metayüzeye yüklendiğinde, grafenin öngerilim voltajını değiştirerek, ışın oryantasyonu/odak ve elektromanyetik perde arasında isteğe bağlı geçişin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir (Şekil 1.13) [50], [89]**.** Daha sonralarda; ayarlanabilir polarizasyon anahtarlama/dönüştürme [93] ve ışın yönlendirme [94], geniş bant ve ayarlanabilir mükemmel soğurucu [95]–[98] gibi birçok yüksek performanslı grafen tabanlı ayarlanabilir/yeniden yapılandırılabilir metayüzey, farklı işlevlerle rapor edilmiştir [50].



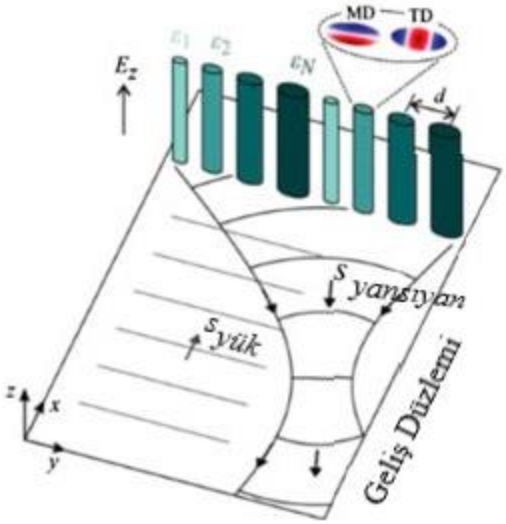
Şekil 1. 13. *Anahtarlama için Grafen ile Yüklenmiş Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilen Metayüzey Tasarımı*
Kaynak: [50], [89].

Literatürde, sıvı kristalleri metayüzey dizilerine entegre etmek için tasarımlar da önerilmiştir. Sıvı kristallere uygulanan polarizasyon geriliminin ayarlanmasıyla, metayüzey rezonans frekansının kontrolü ve farklı polarizasyonlardaki elektromanyetik dalgaların isteğe bağlı seçici soğurumunun kontrolü sağlanmıştır [90], [91] ve Şekil 1.14'de gösterilmiştir [50].



Şekil 1. 14. *Çok Bantlı Işık Soğurumu için Sıvı Kristal ile Yüklenmiş Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilen Metayüzey*
Kaynak: [50].

2018 yılında Tsilipakos vd. [99] eliptik bir dielektrik çubuktan yapılmış metayüzey hücresinde, halka dipol rezonatörlü bir manyetik dipol kullanmışlardır. Çubuk dielektrik sabiti değiştirildiğinde, Şekil 1.15'de görülen, iki rezonansı doğru bir şekilde eşleştirme etkisi elde edilebilir. Bunu da ayarlanabilir bir gradyan metayüzey inşa etme ve dalga cephesini [99] yeniden yapılandırma manipülasyonunu gerçekleştirerek yapmak mümkündür [50].

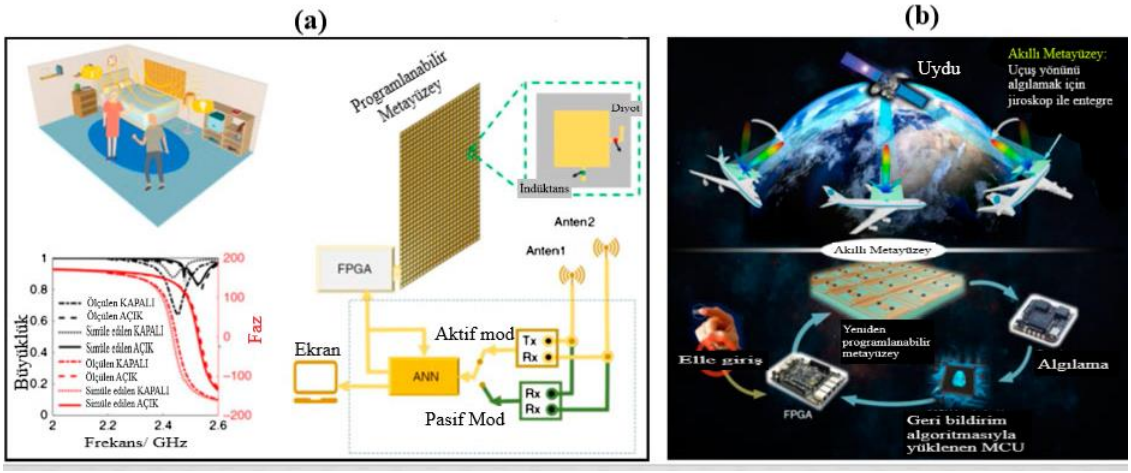


Şekil 1. 15. *Yeniden Yapılandırılabilir Dalga Ön Manipülasyonu için Manyetik Dipol ile Yüklenmiş Elektriksel Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzey*
Kaynak: [50].

Diyotlar tarafından yüklenen elektronik olarak kontrol edilen yeniden yapılandırılabilir metayüzeyin mühendislik uygulanabilirliği göz önüne alındığı zaman, araştırmacılar kodlama ve yeniden programlanabilir metayüzey tasarımları fikrini önermişlerdir. Bu

çalışmalardan biri olarak dijital kodlama metayüzeyi ve yeniden programlanabilir metayüzey tasarım yönteminin çalışma prensibini incelenmiştir [50], [100].

Başka bir çalışmada da 2018 yılında Zhang vd. [101] elektromanyetik dalga frekans alanı ve uzayın eşzamanlı manipülasyonunu sağlamak amacıyla uzay-zaman modülasyonlu dijital kodlama metayüzey kavramını önermişlerdir. Bu yolla harmonik ışın kontrolü elde edebilmişlerdir [101]. Uzay-zaman dijital kodlu metayüzeyin tasarım prensibi, kablosuz iletişim ve holografik görüntüleme gibi çeşitli alanlara uygulanabilir. Bir araştırma grubu tarafından da uyarlanabilir kontrol veri akışı için bir yapay sinir ağı tarafından desteklenen akıllı metayüzey görüntüleyici, tanıyıcı ve insan katılımı olmadan kendi kendine uyarlanabilir yeniden programlanabilir işlevlere sahip akıllı metayüzey tasarlamışlardır (Şekil 1.16) [50], [102], [103].

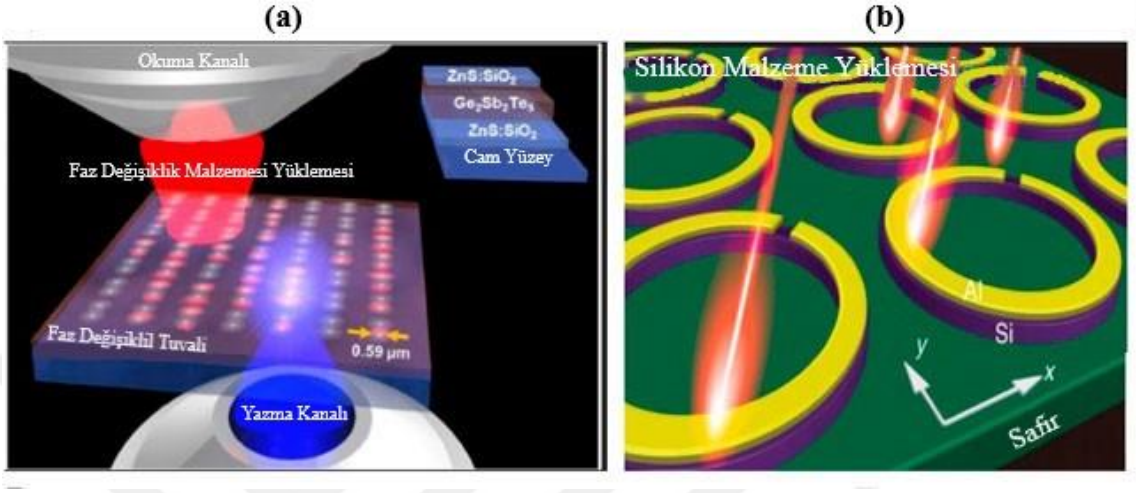


Şekil 1. 16. *Akıllı Metayüzeyler*
Kaynak: a)[50], [102] b) [50], [103].

1.2.8.2. Optik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler

Metayüzey yapılarına ışığa duyarlı yapılar da yüklenebilir. Buradaki amaç ışık kaynaklarının yoğunluğunu ayarlayarak optik olarak yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler elde etmektir. Örneğin, 2016'da Wang vd. [104] Şekil 1.17.a'da görülen ışık kontrollü çift odaklı yeniden konfigüre edilebilir bir metayüzey yapısını [104] gerçekleştirmek için metayüzey substrat malzemesi olarak bir faz değişim materyali (Kalkojenit GST: Germanyum-Antimon-Tellerium) kullanmışlardır. 2018 yılında Cong vd. [105] Şekil 1.17.b'de gösterildiği gibi, geleneksel bir C-şekilli metayüzey birimi ve bir safir substrat arasında bir silikon halka tabakası kullanmışlardır. Gelen

elektromanyetik dalganın polarizasyon durumunun hızlı değiştirilmesi ve kopolarize/çapraz polarize dalganın hızlı ayrılmasını sağlamak için ışığının yoğunluğunu değiştirmişlerdir [50], [105].



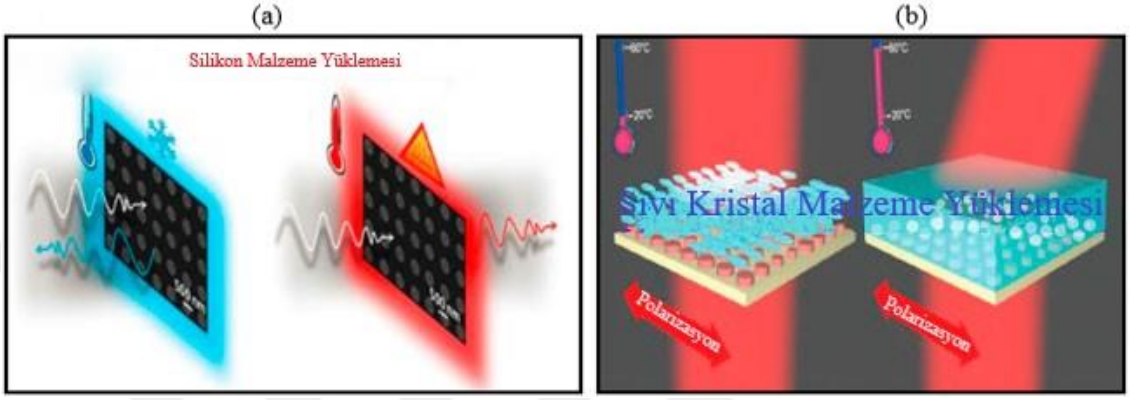
Şekil 1. 17. *(a) Faz Değişim Malzemesi ile Yüklenmiş Optik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzey (b) İlave Silikon Halka Tabakası ile Yüklenmiş Optik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzey*
Kaynak: a)[50], [104] b)[50], [104].

Araştırmacılar, dinamik dielektrik Huygens metayüzeyinin optik olarak ayarlanabilen özelliklerini önermişlerdir ve bu öneri doğrulanmıştır. Bu bağlamda fotodiyodu metayüzey dizisine entegre ederek, LED aydınlatma durumunu dijital olarak kodlayarak ışık kontrollü yeniden yapılandırılabilir metayüzey yapısı geliştirilmiştir [50], [106].

1.2.8.3. Termal Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler

Bazı alt-tabaka malzemelerinin polarlama voltajına, ışık yoğunluğuna ve ayrıca arka plan sıcaklığına duyarlı olduğu iyi bilinmektedir ki bu malzemelerin birkaçı silikon, sıvı kristal ve faz değişim malzemesi gibi örneklendirilebilir. Araştırmacılar, bu malzemelerin sıcaklık duyarlılığına dayanarak termal olarak yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler önermişlerdir. Şekil 1.18.a ve 1.18.b'de görülebileceği gibi, metayüzeyin substrat malzemesi olarak silikon ve sıvı kristal kullanıp metayüzey etrafındaki sıcaklığı ayarlayarak, gelen elektromanyetik dalgaların yansıma/iletiminin dinamik kontrolünü ve gelen elektromanyetik dalgaların iletim yönünün dinamik kontrolünü gerçekleştirebilmişlerdir [107]. 2018 yılında vanadyum dioksit (VO_2) bazlı bir hibrit metayüzey önerilmiştir ve hibrit metayüzey, ısıtma veya optik pompalama yoluyla terahertz dalgalarının iletiminin kontrolünü gerçekleştirebilmiştir [108]. Aynı yıl bir elektrik ve bir manyetik dipol arasında metaatomun tepkisini değiştirmek için sıcaklığı

değiştirerek bir kristal ve bir amorf kristal arasında malzeme faz durumunu değiştirmek için bir faz değişim malzemesi kullanılmıştır. Termal olarak yeniden yapılandırılabilen metayüzey bir dereceye kadar bir çözüm sağlar çünkü tasarlanan metayüzey, çevresel sıcaklık değişikliklerinden büyük ölçüde etkilenir. Bunun dışında uygulanabilirliği ve çalışabilirliği sınırlıdır [50].

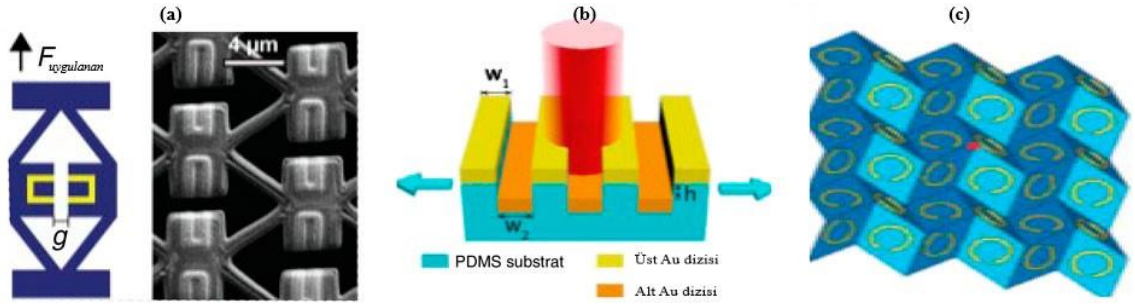


Şekil 1. 18. *Termal Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler*
Kaynak:[50].

1.2.8.4. Mekanik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler

Elastik/esnek substrat malzemesi üzerine metayüzey dizisi hazırlanırsa, elastik/esnek substrat malzemesinin şekli mekanik olarak ayarlanabilir. Bu sayede mekanik olarak yeniden yapılandırılabilir bir metayüzey elde etmek için metayüzey biriminin elektromanyetik tepkisi de değiştirilebilir. 2018 yılında, Reeves vd. [109] bu tarz bir metayüzey tasarlamışlardır (Şekil 1.19.a). C şeklindeki metayüzey ünitesi, ilave germe/sıkıştırma yumuşak polimerizasyonu ile yumuşak bir polimer iskele üzerinde hazırlanmıştır. Düzlemsel olmayan bir metayüzey yapısı Liu vd. [110] tarafından önerilmiştir (Şekil 1.19.b). Mekanik olarak yeniden yapılandırılabilir bu metayüzey, iki metayüzey dizisi arasındaki bağlantı özelliklerini değiştirmek için esnek malzemesinin gerilmesiyle elde edilmiştir. Wang vd. [111], katlanabilir bir dielektrik substrat üzerinde C şeklinde bir metayüzey birimi hazırlamışlardır. Bu dielektrik substratın katlanma modu değiştirilerek gelen elektromanyetik dalgalara farklı kiral tepkiler elde edilmiştir (Şekil 1.19.c). Chen vd. [112], yansıyan ışının yeniden yapılandırılabilir işlevini gerçekleştirebilmek adına metayüzey metal yansıtıcı yüzeyinin, yansıtıcı yüzeyinin metayüzey katmanından uzaklığını mekanik yollarla değiştirmişlerdir. Elektromanyetik dalgaların gerçek zamanlı dinamik kontrolü için uygulanabilir bir çözüm sunan mekanik

olarak yeniden yapılandırılabilir metayüzeylerin mekanik kontrol sistemi karmaşıktır ve yüksek performanslı metayüzey uygulamaları ile hassas kontrol elde etmek zordur [50].



Şekil 1. 19. *Mekanik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Metayüzeyler*
Kaynak: [50].

1.2.8.5. Güçle Yapılandırılabilir Metayüzeyler

Araştırmacılar daha yüksek harmoniklerin üretilmesini ve özelliklerinin manipülasyonunu sağlamak için doğrusal olmayan metayüzey tasarım fikrini önermişlerdir [113]. 2014 yılında yarı iletken bir hetero yapıda asimetrik çapraz şekilli bir birim ve bir metayüzey dizisi geliştirilmiştir ve bunun sonucunda yüksek dönüştürme verimliliğine sahip ikinci dereceden doğrusal olmayan harmonik bir çıktı elde edilmiştir. 2017 yılında, elektromanyetik dalganın polarizasyon yönünü hızla ayarlayabilen bir metayüzey tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan bu metayüzey, farklı yoğunluklardaki elektromanyetik dalgaların uyarılması ile 60°'ye kadar elektromanyetik dalgaların polarizasyon sapmasını gerçekleştirebilmiştir [114]. 2018'de Xu vd. [115] kalkojenit cam kullanarak tam dielektrik bir metayüzey hazırlamışlardır. Kalkojenit camın yüksek doğrusalsızlık özelliğinden faydalanarak, girdap (vorteks) elektromanyetik dalga durumunun anahtarlama kontrolü, gelen elektromanyetik dalga yoğunluğunun ayarlanmasıyla sağlanmıştır. 2018 yılında Wang vd. [116] üçüncü bir harmonik sinyal üreten ve kendisi tarafından üretilen herhangi bir karmaşık parametre dalgasının doğrusal olmayan dalga cephesini verimli bir şekilde kontrol eden doğrusal olmayan, tamamen dielektrik bir metayüzey önerdi ki bu metayüzeyin kontrol verimliliği %92 olarak verilmiştir [117]. Doğrusal olmayan metayüzey enerjisi, elektromanyetik dalganın kendi kendini kontrol etme yeteneğinin yeniden yapılandırılabilir özelliğini, sadece gelen elektromanyetik dalga yoğunluğunu ayarlayarak gerçekleştirebilir. Aynı zamanda, bildirilen doğrusal olmayan bu metayüzeyde, her bir metayüzey hücresini etkin bir şekilde kontrol etmek zordur, bu nedenle daha çok yönlü yeniden yapılandırılabilir bir metayüzey yapısının gerçekleştirilmesi de zordur[50].

1.3. Faz Değişimi

Bir arayüz boyunca faz süreksizliği mühendisliği yaparak, ışığı tamamen yönlendirebilir ve genelleştirilmiş Snell yasası tarafından tanımlanan anormal yansıma ve kırılmanın benzersiz kontrolünü gerçekleştirebiliriz [43], [118]:

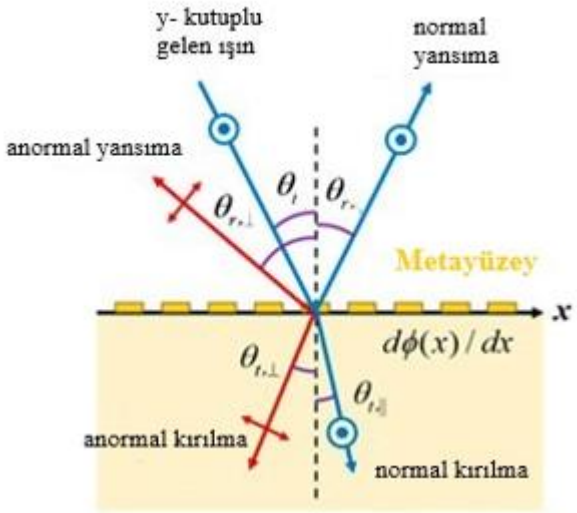
$$\sin(\theta_t)\, n_t - \sin(\theta_i)\, n_i = \lambda_0 \nabla\Phi/2\pi \quad (1.1a)$$

$$\cos(\theta_t)\sin(\psi_t)\, n_t = \lambda_0 \nabla\Phi/2\pi \quad (1.1b)$$

$$\sin(\theta_r) n_i - \sin(\theta_i) n_i = \lambda_0 \nabla\Phi/2\pi \quad (1.2a)$$

$$\cos(\theta_r)\sin(\psi_r)\, n_i = \lambda_0 \nabla\Phi/2\pi \quad (1.2b)$$

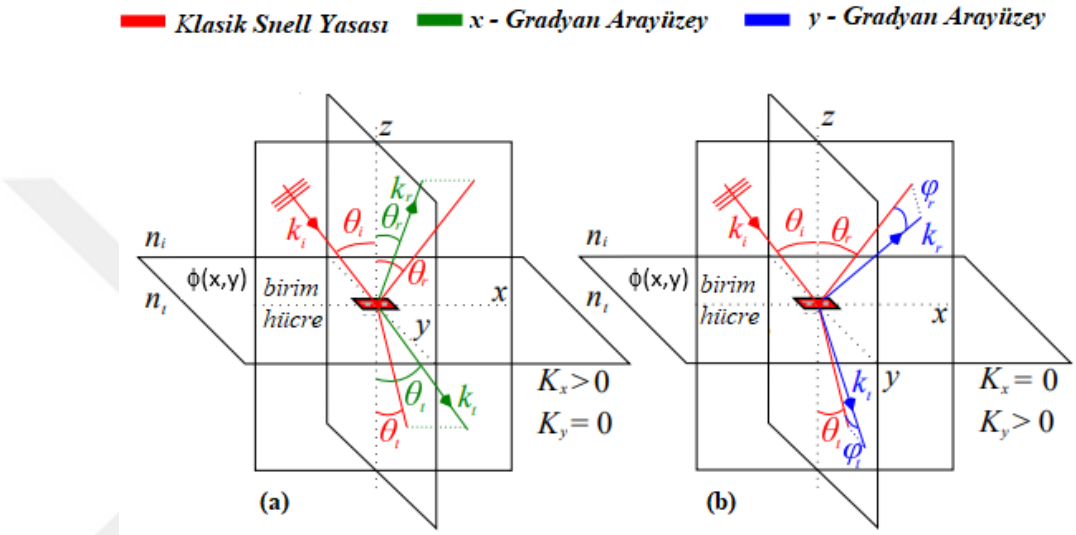
Denklem 1.1a,b ve Denklem 1.2a,b'deki genelleştirilmiş Snell yasasında θ_t, θ_i ve θ_r sırasıyla düzlem içi kırılma, geliş ve yansıma açıları; n_t ve n_i, sırasıyla iletim ve geliş tarafındaki ortamların kırılma indeksleridir ve λ_0, boş uzayın dalga boyudur. $\nabla\Phi$ metayüzeyin metaatomları tarafından sağlanan arayüzdeki faz süreksizliğinin gradyanını gösterir. Geliş düzlemi üzerindeki faz gradyanı düzlem içi yansıma ve kırılma olaylarına neden olurken, geliş düzlemi üzerinde olmayan faz gradyanları düzlem dışı davranışa neden olur. Denklemlerdeki ψ_t ve ψ_r, sırasıyla söz konusu düzlem dışı kırılma ve yansıma açılarıdır. Tüm bu ifadeler, bir arayüz boyunca bir faz gradyanı sağlayabilen çok ince bir tabakada elde edilebileceğini göstermektedir [118].



Şekil 1. 20. *Genelleştirilmiş Snell Yasası: Anormal Şekilde Kırılan ve Yansıyan Işınların Şeması*
Kaynak: [1].

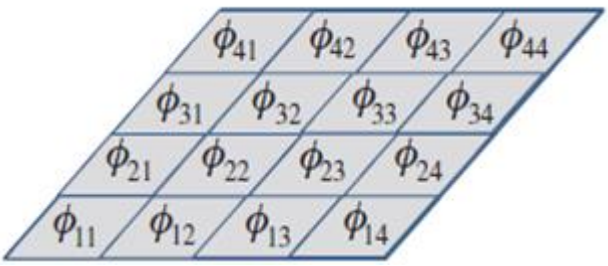
Snell yasasından kaynaklı arayüze gelen ışının aynı açıyla yansımasını ve farklı açıyla diğer ortama geçmesi beklenir. İşin içine ışık madde etkileşimi (fotonik) girdiğinde gelen ışın geliş açısından farklı bir yansıma açısıyla yansıyabilir. Standart yansıma ve

kırılmanın dışında çift kırılma, ters tarafa kırılma gibi olaylar meydana gelebilir. Bu olayları oluşturan olgu arayüzdeki ϕ ile gösterilen ve arayüzeyin koordinatlarına bağlı olarak değişen fazın değişimidir. Bu faz profilinin ($\phi(x,y)$) istenilen işlevselliğine göre olması gereken fonksiyon bellidir. Bu da ilgili düzlemi birim hücrelere bölerek elde edilebilir. Bu hücreler farklı birim $\phi(x,y)$'ler oluşturması için farklı nanoantenler ile tasarlanabilir.



Şekil 1. 21. *Genel Yansıma ve Kırılmanın Pozitif Faz Gradyanı için Şematik Gösterimi*
Kaynak:[119].

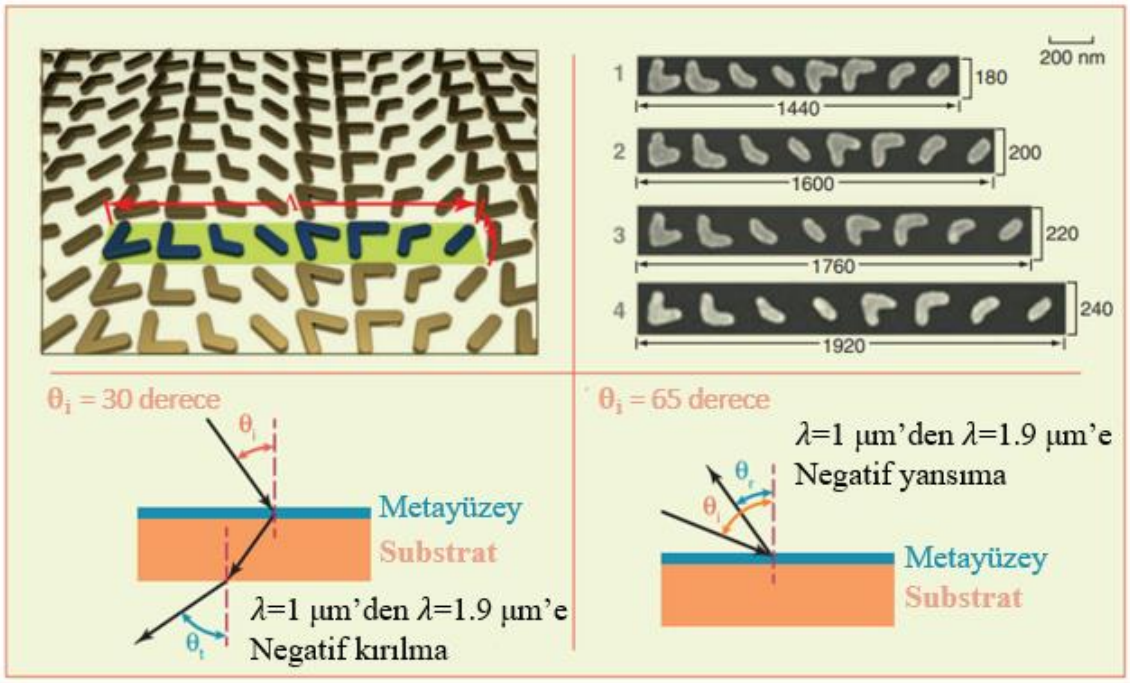
Şekil 1.22'de de görüldüğü üzere, düz bir yüzey, ayrı piksellere bölünüp her piksel için farklı bir $\phi(x,y)$ oluşturularak, uygulamanın türüne göre istenilen faz değişimi ne ise türetilen metamoleküller bu faz değişimine göre yüzeye yerleştirilir. Bu şekilde istenilen işlevselliği elde edeceğimiz faz gradyanına sahip metayüzeyler tasarlanmış olur [122].



Şekil 1. 22. *Faz Kontrolü İçin Bir Metahücre Dizilim Şeması*
Kaynak: [120].

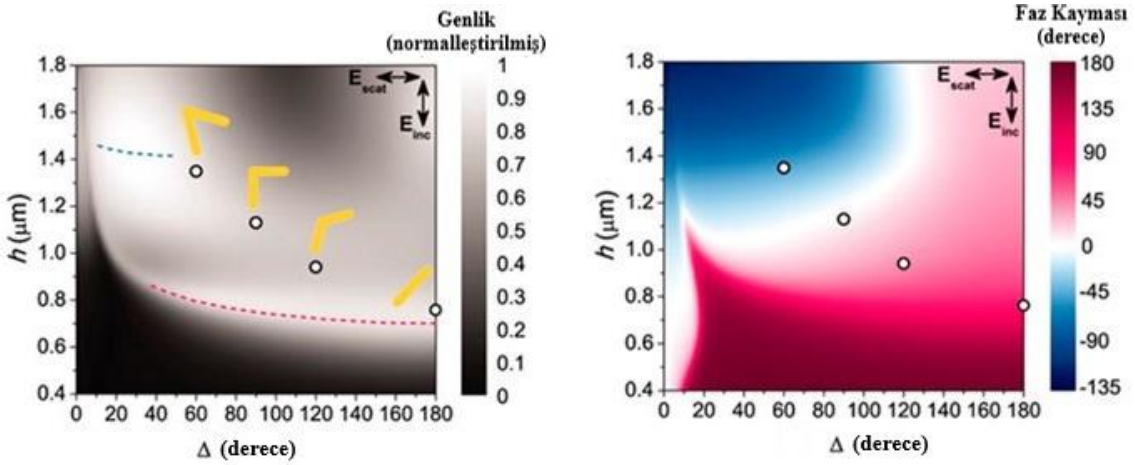
Literatürde tanımlanan gradyan metayüzeyi olarak kullanılan V şeklindeki nanoantenlere sahip metayüzeyler, çapraz polarize ışıkta 0'dan 2π'ye ani faz kaymaları oluşturabilmiştir (Şekil 1.23). Örneğin, lensleme işlevselliğini elde etmek için, bu nanoantenler eşmerkezli

halkalar halinde dizilebilir. Farklı şekillerinin yanı sıra, nanoantenler ani faz kaymaları, arayüz boyunca yayılan dalgaların f mesafesinde tamamen yapıcı bir girişim yaşamasına neden olacak şekilde dağıtılabilir ve bu sayede de giden çapraz polarize ışık f'ye odaklanabilir ve lensleme elde edilmiş olur [62], [121]. Bu tür ultra ince tasarlanan metalensler, örnek olarak lazer işleme, yüksek hassasiyetli konum hizalaması ve algılama için çok önemli olan kırınımsız Bessel ışınları [62] için tasarlanabilir [118].



Şekil 1. 23. *Işık Modülasyonu ve Kontrolü Sağlayan V Şeklindeki Nanoantenlere Sahip Metayüzeyler*
Kaynak: [118], [122].

V şekilli plazmonik nanoçubukların uzunluğunu ve açılma açısını değiştirerek, Şekil 1.24'de gösterildiği gibi, π faz aralığında ve farklı genliklerde ani bir faz kayması elde edilebilmiştir [1], [123].



Şekil 1. 24. *8 µm Dalga Boyunda Au Nanoçubukların Farklı Uzunluk ve Açılma Açısına Sahip V Şekilli Nanoantenler için Çapraz Polarize Dağınık Işığın Simüle Edilmiş Genliği ve Faz Kayması*
Kaynak: [1], [123].

Tam faz regülasyonu elde etmek için, faz kaydırma aralığı 2π faz kapsama alanından az olmamalıdır. Yu vd. [123], doğrusal polarize geliş ışığı için, V şeklindeki antenlerin 90° dönüşünün, çapraz polarize dağınık dalgalarda kalan π aralığına erişilmesine izin verdiğini fark ettiler [43], [122]. Şekil 1.2'deki gibi, arayüzün $x-$ konumundaki her nanoanten, 2π faz kapsamı üzerinde farklı bir faz değişimi taşımaktadır. Bu da anormal kırılma ve yansımaya neden olmaktadır [1]. Gradyan metayüzey teorisine daha sonra, C şeklinde antenler [76], nanoçubuklar [124] ve nanotuğlalar [125] gibi diğer birçok yapı tasarımı önerilmiştir ve bu yapıların tam faz kontrol yeteneğine sahip oldukları gösterilmiştir[1].

Düz lenslerin odaklama yapabilmesi için yüzeyindeki faz değişimi, yüzey düzleme $x-y$ olmak üzere

$$\Phi(\mathrm{x},\mathrm{y}) = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\sqrt{(x^2+y^2)+f^2}-f\right) \tag{1.3}$$

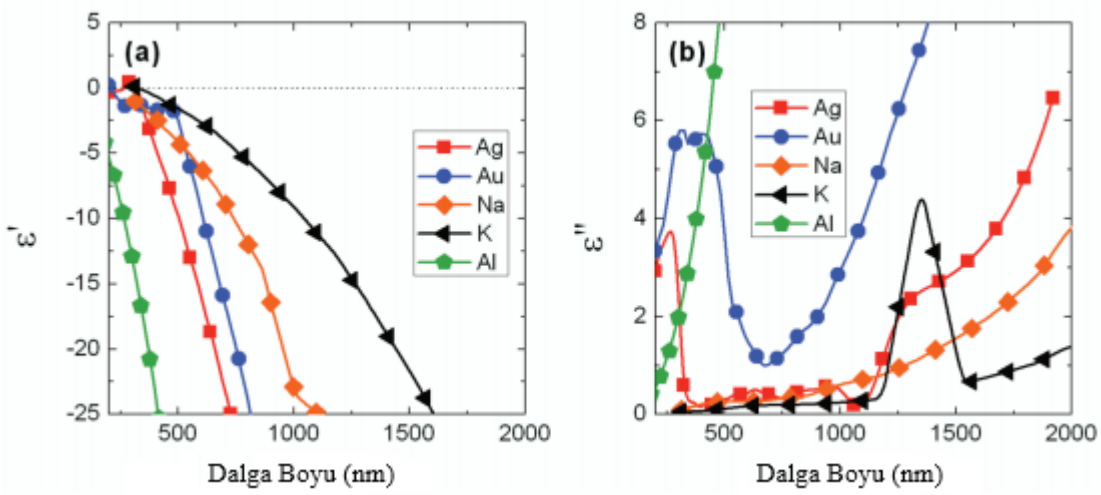
gibi olmalıdır. Burada λ çalışma dalga boyunu, $x-$ ve $y-$ arayüzdeki koordinatları belirtmektedir. Bu eşitlikle istenilen bir f'de odaklama sağlanabilir [62].

1.4. Alternatif Plazmonikler

Metaller ile optik dalgaların etkileşimi, metallerdeki toplu serbest elektron osilasyonlarına sebep olur ki buna plazmon denir [126]. Plazmonlar, metallerin yüzeyinde oluşan elektron salınımları olan yüzey plazmonları, metal içindeki elektron

salınımları olan hacim plazmonları ve metal yüzeyinde duran dalgalar şeklinde tabir edilebilecek olan lokalize yüzey plazmonları olarak sınıflandırılabilir [127]–[129]. Plazmonik, metal/dielektrik ara yüzeylerinde elektronlar ile elektromanyetik radyasyon arasındaki etkileşimi inceleyen, nanofotoniğin alt dalıdır [130]. Plazmonikler, plazmon enerjisini kullanarak ve çalışılan dalga boyundan daha küçük boyutlarda (nanometre yelpazesinde) metalik nanoyapılar kullanarak, ışık madde etkileşimini artırıp -ki bu etkileşim yüzey dalgalarını oluşturur- ışığın bu çok küçük boyutlardaki yapılarda sınırlandırılması ve yönlendirilmesiyle ilgilenir [126], [127]. Plazmonikler, metaldeki elektron salınımı olan plazmonlar yoluyla ışığı oda sıcaklığında hapsetmeyi mümkün kılar [126]. Bu sebeple plazmonikler, verimli optik algılama araçlarıdır [126], [131]. Plazmonik devreler, mikroskopların çözünürlüğünün geliştirilmesi, ışık saçan diyotların etkinliğinin arttırılması, kimyasal ve biyolojik algılayıcıların/sensörlerin hassasiyetlerinin veya duyarlılığının artırılmasında kullanılmaktadır [132]. Bazı bilim insanları, kanserli dokuların yok edilmesi gibi bazı tıbbi uygulamalar üzerine yoğunlaşarak, tasarlamış oldukları küçük taneciklerin plazmon rezonans soğurma özelliklerini kullanarak çalışmalar yapmaktadır [133], [134].

Plazmonik uygulamalarda genellikle Au ve Ag gibi soy metaller kullanılsalar da çok sayıda serbest elektron ve bantlar arası geçiş nedeniyle yüksek miktardaki optik kayıplardan etkilenirler ve bu yüzden son zamanlarda; katkılı silisyum (Si), katkılı germanyum (Ge), III-Nitrürler ve saydam iletken oksitler (TCO'lar; Transparent Conductive Oxides) gibi alternatif plazmonik malzemeler üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Çoğu yarı iletken olan bu alternatif plazmonik malzemelerin en çekici tarafı, metallere göre daha az sayıda serbest elektronları olması sebebiyle özellikle kızılötesi (IR; infrared) dalga boylarında daha az kayıplarının olmasıdır. Alternatif plazmonik malzemelerin metallere göre daha başka avantajları da mevcuttur ki o avantajlar düşük maliyet ve ayarlanabilir elektron sayısı (efektif katkılama yoğunluğu) sayesinde plazma frekansının (ω_p) kontrol edilebilmesi olarak sıralanabilir. Metallerde gerçekleşen kayıp metalin bağıl geçirgenliğinin (ε_r'') imajiner (sanal) kısmı ile ilişkilendirilebilir. ε_r'' ne kadar düşük ise o kadar az kayıp verir[135]. Bazı metallerin bağıl geçirgenliği Şekil 1.25'de verilmiştir [135], [136].



Şekil 1. 25. *Au, Ag, Al, Na ve K'nın VIS ve NIR'de Bağıl Geçirgenliği. Na ve K Daha Düşük Kayıplar Elde Etmelerine Rağmen, Su ve Hava ile Reaksiyona Girdikleri için Tercih Edilmezler.*
Kaynak:[135], [136].

Plazmonik malzemelerde frekans bağımlı dielektrik geçirgenliği ω_p ile tanımlamak önemlidir. Örneğin sanal ve reel bağıl geçirgenlikler ω_p'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\varepsilon_r' = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \tag{1.4a}$$

$$\varepsilon_r'' = 1 - \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \tag{1.4b}$$

Burada, γ birkaç terahertz mertebesinde olan sönümleme oranıdır ve malzemeye has bir parametredir. Optik frekanslarda ($\omega \ll \gamma$) iken Denklem 1.4b Denklem 1.5'e evrilebilir:

$$\varepsilon_r'' = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3} \tag{1.5}$$

Bu denklem, plazmonik malzemelerdeki optik kayıpları azaltmak için, ω_p'yi veya sönümleme hızını azaltabilmek gerektiğini göstermektedir. Sönümleme hızı sıcaklığın bir fonksiyonudur ve metaldeki elektron saçılma mekanizmalarıyla ilgilidir

Kriyojenik sıcaklıklara ($< 100°K$) soğutularak, sönümleme hızı azaltılabilir ve böylece daha düşük kayıp elde edilebilir [135], [137]. Ancak, bu soğutucu ihtiyacı vb. gibi birçok sebepten dolayı pratik bir çözüm değildir. O yüzden verilen ω_p'yi azaltmaya çalışmak

daha iyi bir yaklaşım olacaktır. ω_p malzeme parametrelerine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N\,e^2}{\varepsilon_0\,m}} \tag{1.6}$$

Burada N metalin serbest elektron konsantrasyonudur ε_0 vakum geçirgenliğidir, e ve m sırasıyla elektron yükü ve elektron etkin kütledir. Denklem 1.6 ω_p'nin sadece serbest elektron yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğunu gösterirken, N malzemeye bağlıdır ve bu nedenle metaller için ayarlanamayan bir parametredir. Diğer yandan, yarı iletkenler için elektron yoğunluğunu katkılama (doping, uyarıcı) yoluyla ayarlamak (bir dereceye kadar) önemsizdir. Plazmonik uygulamalarda yarı iletkenlerin kullanılmasının arkasındaki ana motivasyon budur[135].

Bazı metallerin ω_p ve sönümleme oranı aşağıdaki Tablo 1.1'de verilmiştir [138], [139]. ω_p'nin radyal frekans (rad/s) değil, Hz cinsinden normal frekans olarak verildiğine dikkat edilmelidir [135].

Tablo 1. 1. *Bazı Metallerin $\boldsymbol{\omega_p}$' si ve Sönümleme Oranı*

Metal	ω_p (THz)	Sönümleme Oranı (THz)
Au	2183	6.46
Ag	2180	4.35
Pt	1244	16.73
Al	3570	19.79
Cu	1914	8.34
Na	1381	6.37
K	889.6	4.45

Kaynak: [135].

Plazmonik uygulamalarda katkılı yarı iletkenlerin metallere göre birtakım avantajları vardır. Bunlardan birincisi, ω_p katkılama konsantrasyonunun bir fonksiyonu olduğu için yarı iletkenlerin dielektrik sabiti uygulamaya bağlı olarak ayarlanabilir. Mesela plazmonik malzemeler için tanımlanan iki önemli değer, plazmon yayılım uzunluğu ve mod sınırlama genişliğidir ve bu değerler arasında bir ilişki vardır. Bu iki değer belirli metallerde sabit olmalarına rağmen, plazmonik malzeme yarı iletken olduğunda ince ayar yapmak mümkündür [135], [140]. İkinci avantaj, iyi kurulmuş tamamlayıcı-metal-oksit-yarı iletken (CMOS; complementary-metal-oxide-semiconductor) süreçleriyle uyumluluklarından kaynaklanmaktadır. Au ve Ag, Si'ye yayılır ve bu safsızlıklar Si'nin

bant aralığı içinde alıcı / donör seviyelerini ortaya çıkarır ve sonuç itibariyle Si tabanlı cihazların elektronik performansı etkilenmiş olur [144, 138]. Diğer yandan, tantalum nitrür (TaN) ve titanium nitrür (TiN) gibi yarı iletkenler plazmonik malzemeler olarak gösterilmekte ve CMOS cihazlarında kapı malzemesi olarak kullanımları da bulunmaktadır [135], [141].

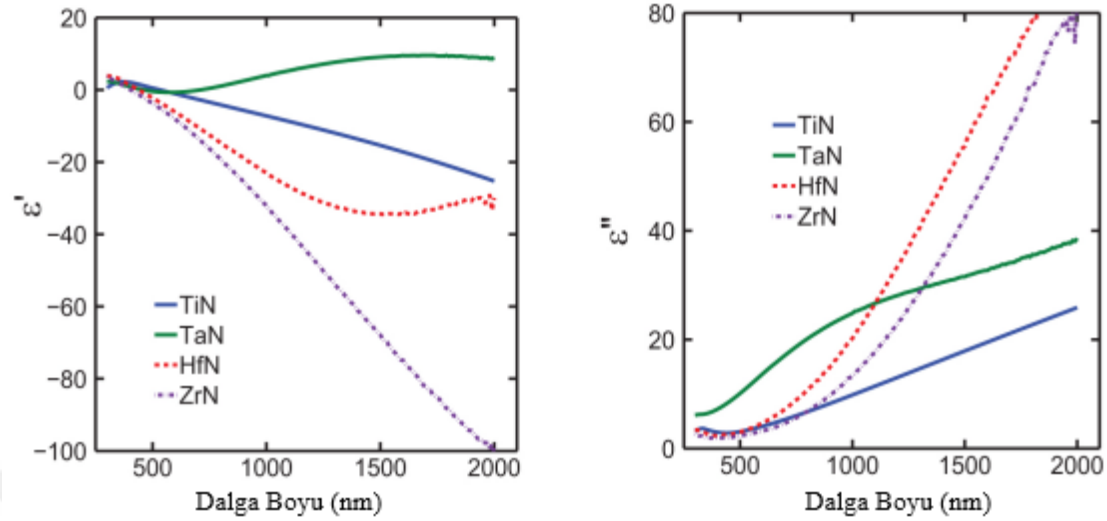
Bu bahsi geçen nedenler, bilim adamlarını alternatif plazmonik malzemeler aramaya teşvik etmiş. Çeşitli metaller, metal alaşımları ve intermetalikler de incelenmekle birlikte, araştırmalar geçiş metali nitritleri, yarı iletkenler ve grafen üzerine odaklanmıştır [135], [136].

Soy metallere alternatif tarzda malzeme olabilmesi için kullanılacak malzemenin negatif reel geçirgenliğinin istenen spektral alanda yüzey plazmonlarını (SP; surface plasmon) destekleyecek kadar yüksek olması önemlidir. Şimdiye kadar toplu sıfır kayıplı metallerin gerçekleştirilmesinin mümkün olmadığı gerçeği düşünüldüğünde, plazmonik malzemelerde tolere edilebilir bir ölçüde kayıplar gereklidir. Düşük kayıpların yanında optik özellikleri değiştirme yeteneği, dinamik veya aktif cihazlar için potansiyel uygulamaları mümkün kılabilir. Çok çeşitli gereksinimlere hitap eden birçok yeni alternatif malzeme türü önerilmiştir. Tüm alternatifler, ultraviyoleden orta kızılötesi (MIR; middle-infrared) bölgelere kadar optik aralıktaki uygulamalar için umut vaat etmektedir, ancak bazı malzemeler metayüzeyin deneysel gerçekleştirilme düzeyine ulaşmamaktadır [64].

Aşağıda belirli bir alternatif malzemenin (TCO, geçiş metali nitrür vb.) öneminden ve deneysel olarak gösterilen pratik kavramlarından veya metayüzey tasarımlarından bahsedilecektir.

1.4.1. Geçiş Metal Nitrürler (Transition Metal Nitrides)

TiN, zirkonyum nitrür (ZrN), hafniyum nitrür (HfN) ve TaN, VIS ve NIR'de alternatif plazmonik malzemeler olarak tanımlanan geçiş metal nitrür sınıfı metalik özellikler gösterirler (Şekil 1.26) [142]. Yukarıda değinildiği gibi bu malzemelerin temel avantajı, CMOS prosedürleri ile uyumluluklarıdır. Bu uyumluluk onları plazmoniklerin Si elektroniği ile entegrasyonu için ana aday yapar. Aynı zamanda, azot bakımından veya metal bakımından zengin koşullarda yetiştirilebilirler ve ikincisi daha metalik özellikler gösteren filmlerle sonuçlanır. Bu nedenle, ω_p ayarlanabilir[135].



Şekil 1. 26. *Metal Nitritlerin Bağıl Geçirgenliği: VIS ve NIR'de TiN, TaN, ZrN, HfN.* $\boldsymbol{\varepsilon_0 < 0}$ *Olduğundan, Bu Dalga Boyu Aralığında Olası Plazmonik Malzemelerdir.*
Kaynak:[135], [142].

Geçiş metali nitrürlerinin soy metallere göre en çok avantaj gösteren özellikleri refrakter olmamalarıdır ki bu özellik 2000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda termal olarak istikrarlı kalmalarını açıklar [64], [143], [144]. Geleneksel plazmonik metaller erime noktalarının düşük oluşu ve yumuşak yapıları sebebiyle, zorlu çalışma koşullarında problemlere neden olduğu için, geçiş metali nitrürleri, yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması gereken nanofotonik cihazları gerçekleştirmek için çözüm sağlayabilir. TiN'ün ve ZrN'ün optik özellikleri, Au'a çok benzer şekilde, VIS aralıkta sıfır çapraz dalga boyuna sahiptir ve bu da onları VIS ve NIR'de aralıkta plazmonik hale getirir.

Metal nitrür üzerindeki elektron-enerji-kayıp-spektroskopi (EELS; electron-energy-loss-spectroscopy) ölçümleri, bu malzemelerin plazmonik özellikleri hakkında bilgi verir [65, 149, 150]. Bu malzemelerin çoğu, metal bakımından zengin olduğunda büyük bir ω_p ile metalik özellikler sergiler, azot bakımından zengin filmler büyük bant arası kayıplara sahip dielektrik özellikler gösterir [64].

Metal nitrürlerin plazmonik özellikleri, TiN filmleri üzerinde yüzey plazmon polaritonu (SPP; surface plasmon polariton) uyarımı ile deneysel olarak gösterilmiştir. 2012 yılında TiN ve Au küresel parçacıklarının yakın alan dağılımı üzerine yapılan karşılaştırmalı çalışma [145], TiN rezonans nanoyapısının değerinin anlaşılmasını sağlamıştır. TiN parçacıklarının yerel alan geliştirmesi, biyolojik şeffaflık penceresi olarak bilinen önemli

bölgede spektral olarak bulunur (650~950 nm). Litografik olarak imal edilmiş TiN nanopartikül dizisi, TiN'in biyolojik şeffaflık penceresinde aynı geometrilere sahip Au nanopartiküllerine kıyasla daha iyi ısıtma verimliliği sağlayabileceğini göstermek için çalışılmıştır [64], [146]. 2014 yılında, TiN tabanlı bir metayüzeyin, VIS ve NIR'de empedans eşleşmesine ve azaltılmış yansımaya sebep olan desenli dikdörtgen halkalardan oluşan tasarımın geniş bir emilim sağladığı gösterilmiştir[147]. Bu çalışmada, TiN nanoyapılarının gücü test edilmiş ve her iki emicinin soğurucunun da yüksek soğuruma sahip olduğu 550 nm'de 5 sn darbeli bir lazerle aydınlatılıp Au ile karşılaştırılmıştır. Lazer aydınlatma sonrasında, TiN nanoyapıları, Au nanoyapılarının başarısız olduğu yüksek yoğunluklu darbelere karşı durabilir. Soğurucuların ötesinde, TiN'ün refrakter özellikleri yüksek verimli termal yayıcılar sağlayabilir. TiN bir boyutlu ızgaralı metamalzemelerden gelen termal emisyon, 3 μm civarında ortalanmış MIR radyasyon ile 540°C'lik çalışma sıcaklıkları üzerinde çalışılmıştır [148]. Bu çalışma, ızgara yüzeyindeki plazmon polaritonların termal uyarımının, yarı tek renkli olan 32λ (açısal ayrışma 1.8°) uzamsal tutarlılık uzunluğuna ve maksimum 70 nm'de tam genişliğe sahip iyi kolimlenmiş bir ışın ürettiğini deneysel olarak göstermektedir[64].

1.4.2. Yarı İletkenler

Yarı iletkenlerin plazmonik malzemeler olarak kullanılabilmesi için yüksek katkılama gereklidir. Bu nedenle, plazmonik malzeme olarak yalnızca yüksek katkı çözünürlüğüne sahip yarı iletkenler tercih edilir. Yüksek bant aralığı enerjisine sahip yarı iletkenler avantajlıdır çünkü bantlar arası geçişler soğurma ve kayıp ile sonuçlanır. Silikon (Si), germanyum (Ge) ve galyum arsenid (GaAs) gibi elementler veya bileşikler, plazmonik malzeme olarak kullanılabilecek uygun özelliklere sahip yarı iletkenlerdir [135].

Si $1.12\ eV$'luk bir bant aralığı enerjisine sahiptir ve bantlar arası geçişlere izin vermez. Bu özelliği nedeniyle plazmonik bir malzeme olarak büyük ilgi görür. Denklem 1.6'yı kullanarak, çeşitli dalga boylarına karşılık gelen ω_p'ye ulaşmak için gerekli olan N hesaplanır (Tablo 1.2). ω_p'nin radyal frekans (rad/s) değil, Hz cinsinden normal frekans olarak verilmiştir. Si'deki elektron etkin kütlesi $1.18\times m_o$ 'dur, burada m_o elektron kütlesidir [135], [149].

Tablo 1. 2. *Çeşitli Plazma Dalga Boylarına Ulaşmak için Gereken Taşıyıcı Yoğunluk Seviyeleri (cm^{-3} cinsinden). Değerler ω_p Denklemi (Denklem 1.6) Kullanılarak Bulunmuştur.*

λ	500 (nm)	1550 (nm)	5000 (nm)
Si	5.27×10^{21}	5.48×10^{20}	5.27×10^{19}
Ge	2.45×10^{21}	2.55×10^{20}	2.45×10^{18}
GaAs	2.94×10^{21}	3.06×10^{19}	2.94×10^{18}

Kaynak:[135].

Germanyum (Ge) 0.66 eV'luk bir bant aralığı enerjisine sahiptir ve soğurucu olarak hizmet verebilir. Bu sayede Silikon teknolojisine giderek daha fazla entegre olmaktadır. Ancak düşük bant aralığı enerjisi nedeniyle plazmonik uygulamalar için tercih edilmez [135]. Ge'un plazmonik uygulamaları için gerekli katkılama yoğunlukları, Si'nin yaklaşık yarısıdır (Tablo 1.2) [149]. Buna Ge'daki daha düşük etkin elektron kütlesi neden olur. Bununla birlikte, Ge'de en yaygın n tipi katkı olan antimon için katı çözünürlük sınırları $1.56\times10^{19}\ cm^{-3}$civarındadır[150]. Bu nedenle, Ge sadece uzak kızılötesinde (FIR; far-infrared) plazmonik bir malzeme olabilir.

Hem optoelektronik hem de güç elektroniği uygulamaları için yaygın olarak kullanılmakta olan Galyum arsenid (GaAs), düşük elektron etkin kütleye sahip olduğu için düşük taşıyıcı konsantrasyonu gerektirir (Tablo 1.2). Si'ye benzer şekilde, GaAs sadece MIR ve daha uzun dalga boylarında plazmonik bir malzeme olarak kullanılabilir [135].

TCO'lar; [142], [151], metalik özellikler gösteren yarı iletken oksitlerdir metalik özelliklerini yüksek seviyelerde katkılama kabiliyetlerine borçludur [64], [135], [136]. TCO'lar, NIR ve MIR aralığında plazmonik malzeme olarak kullanılabilir.[135]. İndiyum-kalay-oksit (ITO) gibi TCO'lar, yüksek iletkenlikleri ve şeffaflıkları nedeniyle optoelektronik uygulamalarda popülerdir. TCO'ların katkılama oranları ve işleme koşulları ayarlanarak ω_p kontrol edilebilir [64], [135], [142], [152]–[156].

TCO'lar, nanoyapılar şeklinde sentezlenebilir ve plazmonik özellikler gösterebilir. Nanoküreler [153], [157], [158] ve nanoteller [152], [159] gibi TCO nano yapıları, NIR ve MIR aralığında lokalize yüzey plazmon rezonansını lokalize yüzey plazmon rezonansını (LSPR; localized surface plasmon resonance) uyarlayabilir. TCO nanoyapıları, yüzey geliştirilmiş spektroskopi ve plazmonik cihazlar için potansiyel olarak kullanılabilir [135], [136].

Galyum katkılı çinko oksit (GZO; gallium-doped zinc oxide) veya alüminyum katkılı çinko oksit (AZO; aluminum-doped zinc oxide) içeren litografik desenli bir nanodisk rezonatör metayüzeyinin, NIR aralıktaki (telekomünikasyon dalga boyu [156] dahil) TCO'ların LSPR özelliklerini gösterdiği bildirilmiştir.

TCO'ların yeni plazmonik cihazların tasarımında asil metallere başarılı alternatifler olarak uyumluluğu gösterilmiştir. Örneğin, metal-yalıtkan-metal (MIM; metal-insulator-metal) çok katmanlı rezonatörlerdeki boşluk yüzeyi plazmon (GSP; gap surface plasmon) modları, metalik bileşen olarak GZO ve dielektrik bileşen olarak ZnO ile bildirilmiştir [64], [160]. Gregory vd. [161] deneysel olarak ITO'dan yapılan bölünmüş halka rezonatörü (SRR; Split-ring resonators) metayüzeyini, MIR'de belirgin bir rezonans optik tepkisi ile göstermiştir. Kim vd.[162] doğrusal polarizasyonu dairesel polarizasyona dönüştüren metayüzeylerin pratik tasarımlarında TCO'ları başarıyla uygulamışlar. Bu metayüzey, gelen ışığın polarizasyon durumunu kontrol etmek için yansıyan ışığın telekomünikasyon dalga boyundaki fazını manipüle edebilir. İletilen ışığın fazını kontrol etmek için başka bir metayüzey kavramı olduğundan, Francesco vd. [163] teorik olarak, AZO ile metailetim dizisinin, iletilen ışının tam kontrolünü MIR aralıkta maksimum verimlilikle sağlayabileceğini göstermiştir [64].

TCO'lar, NIR'deki gerçel (reel) geçirgenliklerinde sıfır geçişe sahiptir ve aynı aralıkta küçük kayıplara sahiptir. Bu nedenle iyi ENZ (epsilon-near-zero) malzemeleri olabilirler. TCO'ların bu özellikleri, metatronik nanodevreler [164] gibi tamamen yeni uygulama türlerini mümkün kılmaktadır. ITO, NIR metatronik devrelerini NIR metamalzeme filtreleri için yapı taşları olarak gerçekleştirmek için tanıtılmıştır. ITO ızgara dizileri, kesitsel geometrileri aracılığıyla empedanslarını mühendislik yaparak veya malzeme ekleyerek optik tepkilerini uyarlayabilir [64].

Katkılı ZnO ve ITO'da elde edilemeyen sıra dışı özelliklere sahip başka metal oksit türleri de vardır. Örneğin, VO_2, NIR aralığında [165] metalik özellikler sergileyebilir ve 100°C'den daha küçük sıcaklıklarda metalden yarı iletkene geçiş sergiler. Sonuçta, anahtarlama ve dinamik uygulamalarda yararlı olabilir ve optik özelliklerde güçlü bir değişiklik sağlar. Termal olarak değiştirilebilir VO_2 metamalzemeleri, çözelti bazlı kolloidal nanokristaller (NCs; nanocrystals) kullanılarak gösterilmiştir [166]. Bu çalışma, VO_2 NC'lerin nano baskı (nanoimprinting) tekniği ile desenlenebileceğini bildirmiştir. Tungsten katkısı, faz geçiş davranışlarının sıcaklıkla ayarlanabilirliğini sağlayabilir [64].

Yukarıda bahsedilen malzemelere ek olarak asil metallere potansiyel alternatifler olarak deneysel olarak gösterilmiştir. Katkılı yarı iletkenler MIR aralıkta plazmonik bileşenler olarak incelenmiştir. N-tipi katkılı indiyum arsenit (InAs) nanoanten dizileri, nanosfer litografisi kullanılarak üretilir ve nano ölçekli yapıların uygun maliyetli ve geniş alanlı üretimine izin verir [167]. Anten dizileri, MIR'de (8~10 μm) güçlü absorpsiyon sağlar ve IR absorpsiyon spektroskopisi ile biyo-algılama sunar. İndiyum arsenit antimonid (InAsSb), MIR'de (8 μm) bir ENZ ortamı olarak incelenmiştir. ENZ ile geliştirilmiş iletimi alt dalga boyu optik özellikleri aracılığıyla gösterilmiştir [168]. Boşluğun içine gömülü InAsSb olmayan nonoslitler, TM polarize ışığın InAsSb'in ENZ dalga boyunda veya yakınında yarık yapısına bağlanması için ciddi bir iyileştirme sağlar [64].

Birkaç grup araştırmacı, terahertzde grafende plazmonik rezonanslar ve IR rejimler göstermiştir [169]–[173]. Şimdiye kadar tartışılan malzemelerden farklı olarak, grafen, farklı fiziksel ve optik özelliklerle sonuçlanan 2D elektron plazmasını kullanır. Ayrıca, grafenin plazmon dağılım ilişkisi bile diğer malzemelerden farklıdır [135], [173]

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM-ELEKTROMANYETİK MODELLEME

Bu bölümde, ilk olarak metalens birim hücresi görevi yapan nanoantenlerin nümerik modelleme yöntemine değinilmekte ve rezonans ile faz analizlerinden bahsedilmektedir. Nümerik analiz sonuçlarına geçmeden önce, kullanılan nümerik model kurulum ayrıntıları ve elektromanyetik analiz yöntemleri sunulmaktadır.

Bu çalışmada metalens birim hücrelerini teşkil eden ve [0,2π] aralığında faz gradyanı oluşturabilen nanorezonatör geometrilerinin belirlenmesinde, Yu vd.'nin [43] çalışmasındaki V-şekilli metamoleküllerin geometrik yapısını ve açısal sıralanışını göz önünde bulundurarak yapılan tasarımlar verilmektedir. Her bir metahücrenin faz tepkisinin yanında rezonatif davranışının da etkili olması nedeniyle, başta belirlenen anten geometrilerinin NIR bölgesindeki geçiş spektrumları elde edilmiştir. Analiz edilen bu birim hücreler plazmonik veya alternatif plazmonik tabanlı, silikon nitrür (SiN) membran üzerine kaplanmış nanokalınlıktaki Au veya TiN filmlerde açılmış ayrık eşkenar dörtgen geometrili nanoaçıklıklardır. 850 nm fiber optik haberleşme dalga boyunda rezonatif olduğu belirlenen, belirli geometrik parametrelerdeki Au veya TiN nanoaçıklıkların metalens oluşturabilmek amacıyla üç tip aperiyodik dizilimleri üzerinde durulmaktadır. Bu bağlamda alternatif plazmonik tabanlı Tip1 ve Tip2 olarak kodlanan iki anten dizilimi ve plazmonik tabanlı Tip3 olarak kodlanan aperiyodik bir anten dizilim sunulmaktadır. Bu üç tip anten dizilimi de SiN membran üzerine kaplanmış Au veya TiN nanofilmlerdeki nanoaçıklık dizilimleri şeklindedir. Tip1 ve Tip2 dizilimlerinde katman kalınlıkları sırasıyla t_{SiN}=100 nm ve t_{TiN}=50 nm, Tip3 diziliminde ise katman kalınlıkları sırasıyla t_{SiN}=100 nm ve t_{Au}=50 nm olararak seçilmiştir. Burada t_{SiN} SiN membran kalınlığını, t_{TiN} TiN film kalınlığını ve t_{Au} Au film kalınlığını ifade etmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi metalensler, ışığın karşılaştığı arayüzde odaklama sağlayacak faz dağılımlarının oluştuğu metayüzeylerdir. Noktasal odaklamalar için metayüzey üzerinde dairesel faz dağılımları oluşturulmalıdır. Bu bağlamda, Tip1, Tip2, Tip3 dizilimleri,

aksikon odaklama işlevi için gerekli olan yüzeysel faz düzenini oluşturmak için tam faz aralığında faz manipülasyonu sağlayan sekizer metalens birim hücresinin eşit radyal mesafelerde dairesel dizilimleri ile oluşturulmuştur. Bu nanoaçıklıklar, aralarındaki mesefeler en az 100 nm olacak şekilde konumlandırılmıştır. Aksikon faz denklemi Denklem 2.1 ile verilmektedir.

$$\Phi(\mathrm{x},\mathrm{y}) = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\sqrt{(x^2+y^2)}\sin\beta\right) \tag{2.1}$$

Burada β metalensler tarafından kabul edilen aksikon odaktaki maksimum ışık konisinin yarı açısını belirtmektedir [62].

Analizlerin teknik altyapısının sınırlamaları altında aksikon nitelikte, Tip1 dizilimi ile 10 odak noktası, Tip2 dizilimi ile 7 odak noktası ve Tip3 dizilimi ile 5 odak noktası gösterilmiştir. Odak noktaları aksikon nitelikte olduğu için odaklama doğrultusunda uzun spotlar şeklindedir.

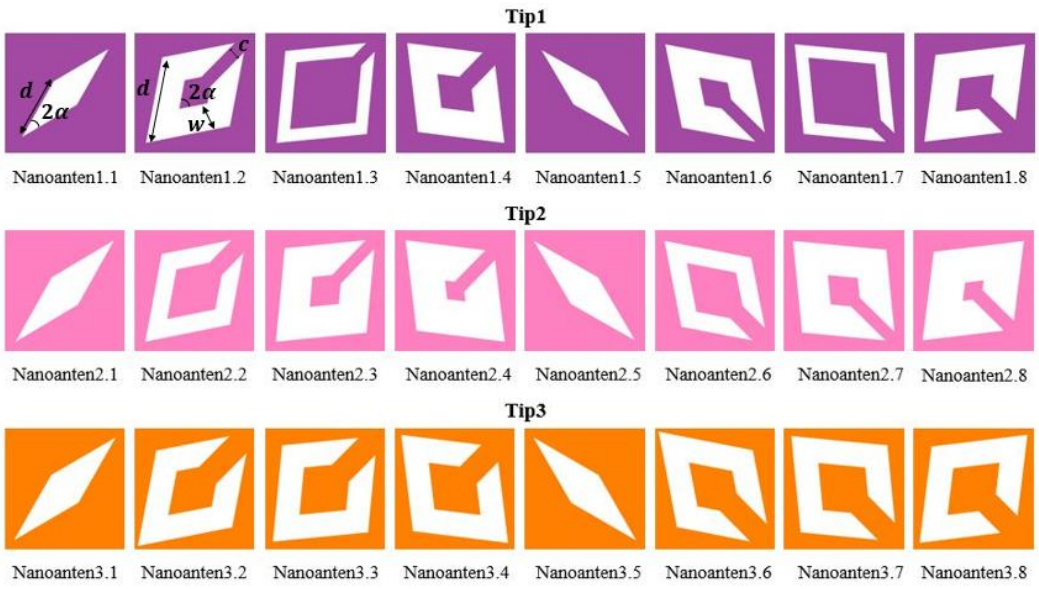
Nanoyapıların elektromanyetik modellemesi için zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD; finite-difference time-domain) kullanılmıştır. Metayüzey çalışmalarında rezonatif dalga boylarında her bir birim hücrenin teşkil ettiği faz farkının belirlenip aperiodik dizilimli tasarımın odaklama analizlerine geçilmesi elzemdir. Bu nedenle her bir nanoaçıklığın başta geçiş spektrumları analiz edilerek 850 nm dalga boyunda rezonatif olan ve [0,2π] aralığında düzgün faz değişimi teşkil eden geometrik parametre değerleri belirlenmiştir. Nanoaçıklık geometrilerinin belirlenme aşamasında Yu vd.'deki [43] faz dizilimi esas alınarak ilerlenmiştir.

Verimli odaklamanın koşullarından biri kullanılacak antenlerin istenen dalga boyunda rezonatif davranış sergilemesidir. Rezonatif davranışın belirlendiği analizlerde her bir metamolekülün periyodik dizileri analiz edilerek uzak alanda ölçülen spektral geçişleri (transmittance, T) elde edilmiştir. Bunun için alan ve güç ölçer monitör, yapının uzak alanına yerleştirilmiştir. Periyodiklikler P_{x} ve P_{y} metamoleküllerin $x-$ ve $y-$ doğrultusundaki tekrarlanma mesafaleridir. Simülasyon hacminin ve $z-$ eksenine yerleştirilen düzlem dalga kaynağının genişlikleri de P_{x} ve P_{y} olarak belirlenmiştir. Daha doğru bir modelle için konumsal modelleme bölgesinin diferansiyel hacim adımları yapıyı kaplayan bölgede özelleştirilmiş. Analiz edilen yapılar, VIS ve NIR dalga boylarında dikey olarak gelen $x-$ polarize ışıkla $-z$ yönünde aydınlatılmıştır. Simülasyonlar 400-2000 nm dalga boyları arasında yapılmış olup önerilen antenler hem

VIS bölgede hem de NIR'de incelenmiştir. Rezonatif davranış analiz sonuçları Nümerik Analiz sonuçları bölümünde sunulmaktadır.

Bir dizi analizden sonra belirlenen birim hücreler Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu birim hücrelerin belirlenmesinde çok fazla rezonatif analiz yapıldığı için hepsi burada sunulmamıştır. Şekil 2.1'deki metahücrelerin eşit radyal mesafelerde üç dairesel düzeni söz konusudur.

Her bir birim hücre için ortak geometrik parametreler; eşkenar dörtgen geometrinin bir iç açısı 2α, eşkenar dörtgenin kol uzunluğu d, antenlerin kol genişliği w ve antenlerin ayrık kolları arasındaki mesafe c şeklinde belirlenmiştir. Bu geometrik parametrelerin belirlenmesinde rezonatif davranışın yanısıra her bir anten türünün teşkil ettiği faz profilinin analizi de önemlidir. Her bir anten tipinin faz analizinin nasıl yapıldığı ise aşağıda açıklanmaktadır. Tip1 ve Tip2 dizilimlerindeki antenler için; aynı radyal sıra içerisinde, anten türleri ve geometrik parametre değerleri aynıdır; fakat farklı radyal doğrultuda farklı radyal sıralar içindeki antenlerin türleri ve geometrik parametreleri farklıdır. Tip3 dizilimindeki antenlerde ise tüm radyal sıralarda kullanılan sekiz tip antenin geometrik parametre değerleri aynı, farklı radyal sıralarda türü farklıdır. Tip1, Tip2 ve Tip3 dizilimlerine ait her bir nanoanten için geometrik parametreler Tablo 2.1'de verilmektedir. Görüldüğü gibi Tip3 dizilimi için geometrik parametreler d = 1000 nm, w = 200 nm ve c = 200 nm sabittir. 1 nolu antenlerden 8 nolu antenlere doğru α parametresindeki değişim üç tip dizilimde de aynı tutulmuştur.



Şekil 2. 1. *Her Metamolekülün Üstten Görünümü*

Tablo 2. 1. *Tip1, Tip2 ve Tip3 Nanoantenlerinin Geometrik Parametreleri*

		Geometrik Parametreler			
Dizilimler	**Antenler**	d	w	c	α
Tip1	Nanoanten1.1	1000 nm	-	-	15°
	Nanoanten1.2	1300 nm	400 nm	200 nm	34°
	Nanoanten1.3	1500 nm	200 nm	200 nm	39,5°
	Nanoanten1.4	1000 nm	300 nm	200 nm	52°
	Nanoanten1.5	1000 nm	-	-	15°
	Nanoanten1.6	1300 nm	400 nm	200 nm	34°
	Nanoanten1.7	1500 nm	200 nm	200 nm	39,5°
	Nanoanten1.8	1000 nm	300 nm	200 nm	52°
Tip2	Nanoanten2.1	1300 nm	-	-	15°
	Nanoanten2.2	1000 nm	200 nm	200 nm	34°
	Nanoanten2.3	1500 nm	500 nm	200 nm	39,5°
	Nanoanten2.4	1300 nm	500 nm	200 nm	52°
	Nanoanten2.5	1300 nm	-	-	15°
	Nanoanten2.6	1000 nm	200 nm	200 nm	34°
	Nanoanten2.7	1500 nm	500 nm	200 nm	39,5°
	Nanoanten2.8	1300 nm	500 nm	200 nm	52°
Tip3	Nanoanten3.1	1000 nm	-	-	15°
	Nanoanten3.2	1000 nm	200 nm	200 nm	34°
	Nanoanten3.3	1000 nm	200 nm	200 nm	39,5°
	Nanoanten3.4	1000 nm	200 nm	200 nm	52°
	Nanoanten3.5	1000 nm	-	-	15°
	Nanoanten3.6	1000 nm	200 nm	200 nm	34°
	Nanoanten3.7	1000 nm	200 nm	200 nm	39,5°
	Nanoanten3.8	1000 nm	200 nm	200 nm	52°

Her bir birim hücrenin faz analizinde geliş düzlemine paralel alan dağılımları monitörleri kullanılarak geçen alanlardaki faz kaymaları belirlenmiştir. Antenlerin faz cevapları Nümerik Analiz bölümünde sunulmaktadır.

Tüm teorik analizlerde TiN alternatif plazmonik katmanın dielektrik fonksiyonu Boltaseva vd. [143]'dan, SiN membranın kırılma indisi verisi Vogt [174]'dan ve Au plazmonik katmanın dielektrik fonksiyon verisi ise Palik [175]'den alınmıştır. TiN'ün elektromanyetik modellenmesinde hem serbest elektronların hem de bağlı yüklerin etkilerini açıklayan bir Drude-Lorentz modeli kullanılmaktadır. Drude-Lorentz parametreleri, kırılma indisi ve dispersif dielektrik fonksiyonu gibi malzemelerin optik davranışını içerir. Bu parametreler, malzemenin elektromanyetik dalgalara tepkisi ve plazmonik davranış hakkında bilgi sağlayan elipsometrik verilerinin analizi yoluyla

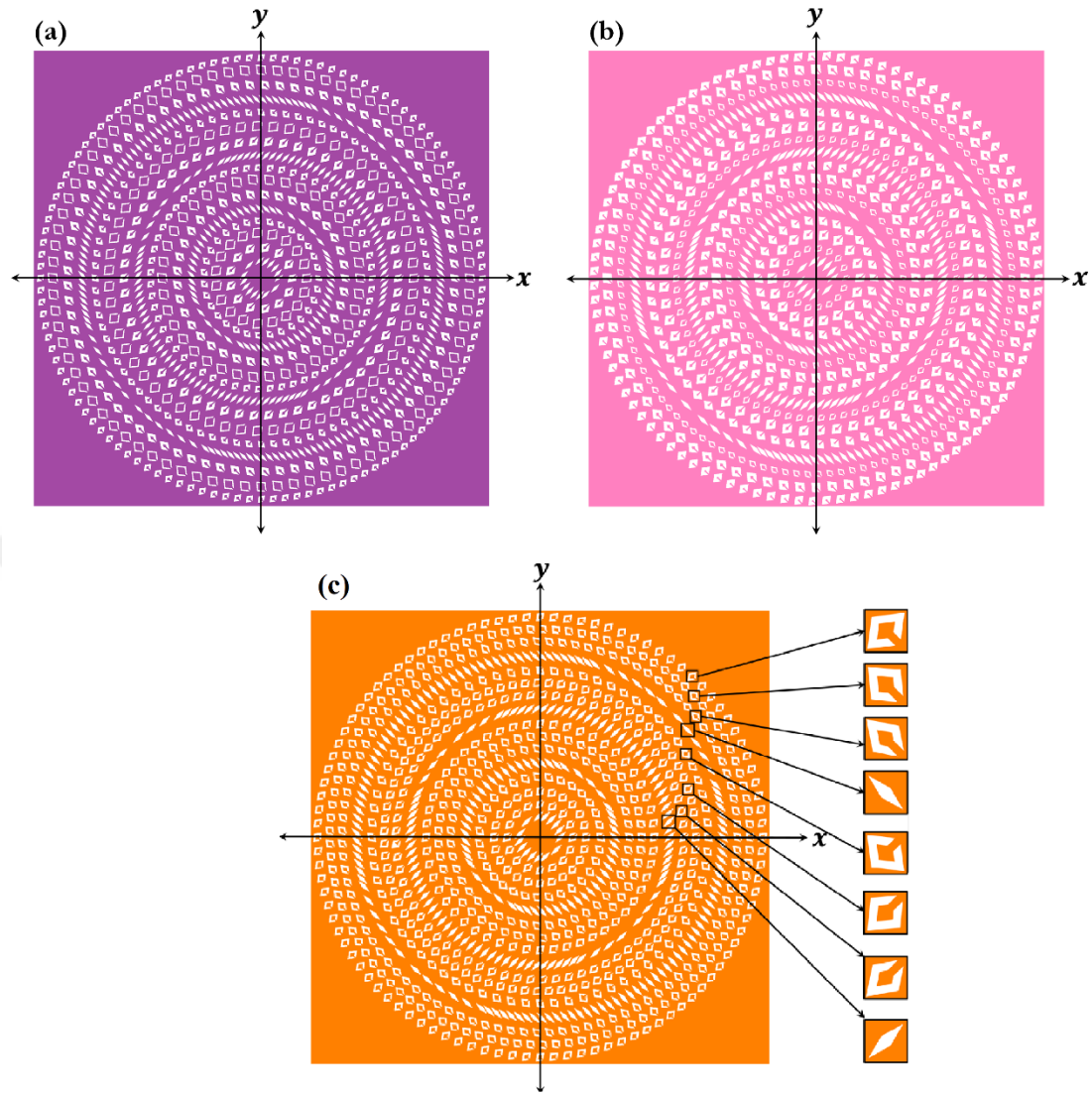
belirlenir [143]. Drude-Lorentz parametrelerinin belirgin değerleri her malzeme için değişebilir ve tipik olarak literatürde birçok bilimsel araştırma makalesinde rapor edilmiştir. Bunlardan Naik vd. [143], TiN dâhil olmak üzere birkaç alternatif plazmonik malzeme için Drude-Lorentz parametrelerini hesaplamışlardır. Burada belirtilen malzemelerin dielektrik fonksiyonları, 350-2000 nm dalga boyu aralığında Denklem 2.2 kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanmıştır:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\mathrm{b}} - \frac{\omega_{\mathrm{p}}^2}{\omega(\omega + i\gamma_{\mathrm{p}})} + \frac{f_1\omega_1^2}{(\omega_1^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_1)} \tag{2.2}$$

Bu denklemdeki ikinci terim Drude modelini ifade ederken, üçüncü terim Lorentz osilatörünü temsil etmektedir. Burada ε_{b} parametresi ise çekirdek elektronlarından gelen polarizasyon tepkisi (arka plan geçirgenliği), γ_{p} taşıyıcı gevşeme oranı, f_1 Lorentz osilatörünün kuvveti, ω_1 Lorentz osilatörünün merkez frekansı ve γ_1 Lorentz osilatörünün sönümlemesidir. Böylece (500 °C'de biriktirilen) TiN'ün optik özellikleri ε_{b}=2,485, ω_{p}=5,953 eV, γ_{p}=0,5142 eV, f_1=2,0376, ω_1=3,9545 eV, γ_1=2,4852 eV olarak alınmıştır [143].

Şekil 2.1'deki birim hücreler, bu tez çalışmasında, metalenslerin merkezinden radyal doğrultuda tam bir faz geçişini sağlayacak şekilde, periyodik olmayan düzende, dairesel halkalar halinde ve üç tipte inşa edilmiştir. Bu şekilde her üç dizilimde de metalenslerin arayüzünde tam faz geçişini sağlayan dairesel faz halkaları oluşturulmaktadır. Bu üç tipteki metalens dizilimlerinin düzenleme görüntüleri Şekil 2.2'de verilmektedir. Daha iyi görsel netlik için, Tip1 düzenlemesi (Şekil 2.2a), Tip2 düzenlemesi (Şekil 2.2b) ve Tip3 düzenlemesi (Şekil 2.2c) için farklı renkler sunulmuştur. Burada Şekil 2.2a ve Şekil 2.2b panelleri SiN membran üzerine kaplanmış TiN ince filmdeki, Tip1 ve Tip2'deki nanoaçıklıkların radyal dizilimlerini gösterirken Şekil 2.2c SiN membran üzerine kaplanmış Au ince filmdeki, Tip3 nanoaçıklıkların radyal dizilimini göstermektedir.

Şekil 2.2'deki yapıların odaklanma performansını göstermek için $xz-$ ekseni boyunca dikey alan monitörleri yerleştirilmiştir. Bu alan monitörlerinden elde edilen alan dağılımları ile belirlenen $\frac{|E|^2}{|E_{\mathrm{in}}|^2}$ normalize ışık şiddeti dağılımları yoluyla odak noktaları ve metalens arayüzeyine olan f'leri belirlenmiştir. Odak noktaları, normalize ışık yoğunluğunun 1'i geçtiği en yoğun noktalar olarak belirlenir.



Şekil 2. 2. *Antenlerin Dizilimleri a) Tip1 Dizilimi ve b) Tip2 Dizilimi ve c) Tip3 Dizilimi*

Metalenslerin elektromanyetik modellemesi sonucu dikey alan monitörleriyle belirlenen odak noktalarına yerleştirilen $xy-$ düzlemi boyunca uzanan yatay alan monitörleri yoluyla; her bir odak noktası için f, nümerik açıklık (NA), odak derinliği (DOF), odak spot genişliği (full width at half maximum; FWHM) ve odak verimliliği (η) gibi odaklama parametreleri teorik olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerinin neler olduğu aşağıda açıklanmaktadır. Odaklama performans parametreleri sonuçları ise tezin üçüncü bölümünde verilmektedir. Bu parametrelerin ilki NA'dır. NA, lensin çapı ile f arasındaki oranı temsil eder. Optik sistemlerde önemli bir rol oynar. Bir metalense ait NA, metal veya dielektrik yapıların nano ölçekte tasarımı ve çalışma frekansı tarafından belirlenen çözünürlük seviyesini ifade eder ve şu şekilde hesaplanır:

$$NA = n * sin(\theta) \tag{2.3}$$

Burada, n metayapının bulunduğu ortamın kırılma indisi; θ metalensler tarafından kabul edilen maksimum ışık konisinin yarı açısını belirtir. Bu değer, ışığın metalensin merceğinde nasıl yansıyacağını belirleyerek lensin çözünürlüğünü etkiler. Plazmonik metayüzeylerin kırılma indisi çoğunlukla değişken olabilir ve tasarımın parametrelerine bağlıdır [62].

Hesaplanacak ikinci parametre, ışık yoğunluğu dağılımının maksimum değerinin yarısındaki genişliğini temsil eden FWHM'dır. Mikromerceklerde FWHM, ışık yoğunluğunun yarısını kesen iki nokta arasındaki mesafeyi temsil eden yatay doğrultudaki odak spot genişliğidir. Bu mesafe, ışık huzmesinin genişliğini belirler ve bir noktadan diğerine geçiş sırasında ışık yoğunluğunun orta noktasını temsil eder. FWHM, şu şekilde hesaplanır [176]–[178]:

$$FWHM = \frac{\lambda}{2NA} \tag{2.4}$$

Bir diğer parametremiz DOF'tur. DOF, odak noktasının ötesindeki bir bölgede nesnelerin hala net olarak görülebildiği mesafeyi temsil eder. DOF, şu şekilde hesaplanır [176], [178]:

$$DOF = 4\lambda \frac{f^2}{D^2} \tag{2.5}$$

Burada, D ise metalensin çapıdır [179].

Son önemli parametre η'dir. η, optik sistemde toplanan ve odak spotunda yoğunlaşan ışık enerjisinin oranını temsil eder. Odak spotundaki ortalama ışık yoğunluğunun, gelen ortalama ışık yoğunluğuna bölünmesiyle hesaplanır:

$$\eta = \frac{\langle I_f \rangle}{\langle I_i \rangle} \tag{2.6}$$

Burada, $\langle I_f \rangle$ odak spotundaki konumsal ortalama ışık yoğunluğunu, $\langle I_i \rangle$ ise gelen ortalama ışık yoğunluğu temsil etmektedir [179].

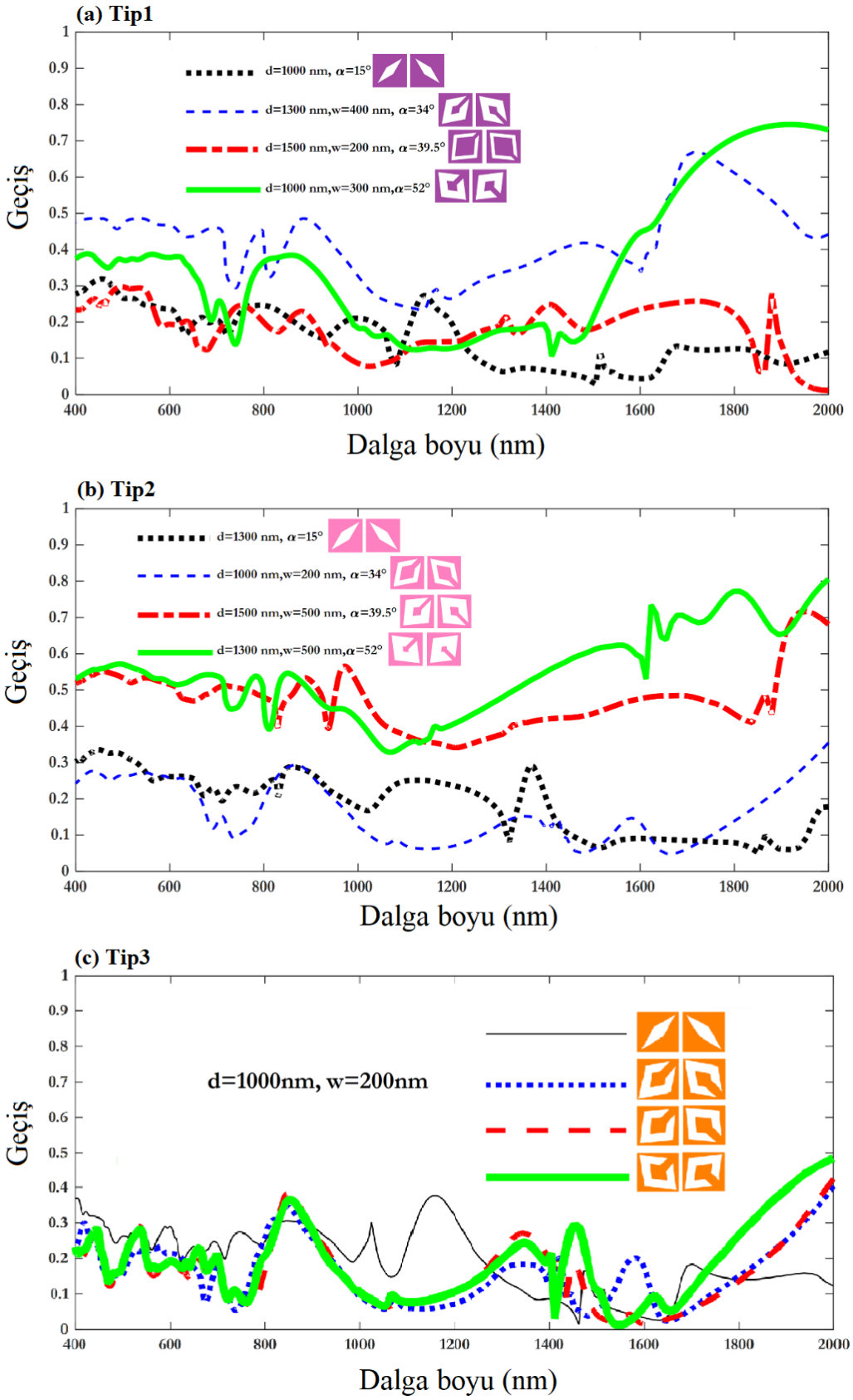
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

NÜMERİK ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde, tasarlanan alternatif plazmonik ve plazmonik tabanlı nanoyapılarla çoklu odaklama özelliğine sahip üç tipte özgün metalens tasarımlarının nümerik analiz sonuçları sunulmaktadır. Bu analizler, kullanılan nanosaçıcıların 850 nm çalışma dalga boyunda rezonatif olduğunu gösteren teorik geçiş spektrumları, her bir nanosaçıcının bu dalga boyunda $[0,2\pi]$ aralığında teşkil ettiği faz cevapları ve bu nanosaçıcıların aperiyodik dizilimlerinin sergilediği odaklama davranışını gösteren alan dağılımı analizleridir. Söz konusu alan dağılımları analizleri ile önerilen metalens tasarımlarının odaklama karakteristiğini gösteren odaklama performans parametreleri de bu bölümde verilmektedir. Bu parametrelere, tasarımın performansını değerlendirmek ve özgün düz lens tasarımlarının etkinliğini ortaya koymak amacıyla başvurulmaktadır. Tablolar ve şekiller, sonuçların görsel olarak daha anlaşılır olması amacıyla her bir tasarım için tek renkle ifade edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, tasarımın etkinliği ve performansı üzerinde detaylı bir değerlendirme sağlayacak ve dördüncü bölümdeki tartışma ve önerileri destekleyecektir.

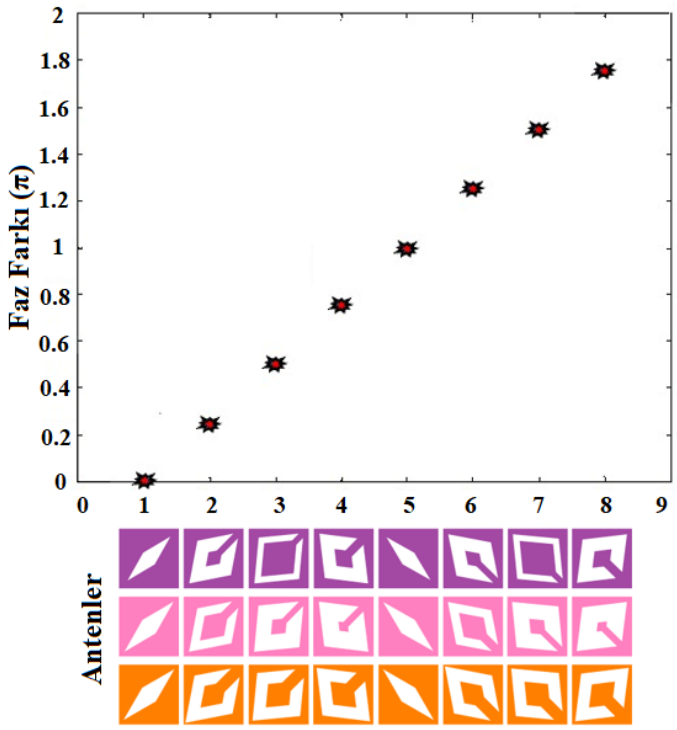
Tez çalışmasında Tip1 ve Tip2 olarak tanıtılan alternatif plazmonik tabanlı ve TiN nanoaçıklıklar şeklindeki tasarımlar ile Tip3 olarak tanıtılan plazmonik tabanlı ve Au nanoaçıklıklar şeklindeki tasarım için rezonatif ışık geçişi sağlayan ve tam faz geçişi oluşturan sekizer tip, farklı geometrik parametrelerde nanoanten tasarımı belirlenmiştir. Bunun için uzak alanda hesaplanan ışık geçişi analizleriyle geçiş spektrumları elde edilmiş ve 850 nm dalga boyunda rezonatif olan geometrik parametreler dikkate alınmıştır.

.



Şekil 3. 1. *Dizilimlerde Kullanılan Antenlerin Geçiş Analiz Sonuçları a) Tip1 Dizilimindeki Nanoantenler b) Tip2 Dizilimindeki Nanoantenler c) Tip3 Dizilimindeki Nanoantenler*

Bu geometrik parametrelerin belirlenmesinde birçok rezonatif davranış analizi yapılmış olup hepsi burada sunulmamıştır. Sadece seçilen geometrik parametrelere yönelik sonuçlar burada verilmektedir. Şekil 3.1 seçilen bu geometrik parametrelerdeki nanoaçıklık yapılarının VIS ve NIR için geçiş spektrumlarını ifade etmektedir. Şekil 3.1a Tip1 metalens tasarımı için kullanılan sekiz çeşit nanoanten yapısının spektral geçiş davranışını göstermektedir. Bu set, Şekil 2.1'de de Tip1 olarak gösterildiği gibi, geometrik parametreleri birbirinden farklı ilk dört antenin 90° rotasyonlu versiyonunun da olduğu sekiz çeşit nanoanten modeli içermektedir. Şekil 3.1b'de de yine TiN tabanlı Tip2 metalens tasarımı için kullanılan sekizli nanoanten setinin spektral geçiş davranışı verilmektedir. Bu anten setinde de Şekil 2.1'de de Tip2 olarak gösterilen, geometrik parametreleri birbirinden farklı dört anten ve bunların 90° rotasyonlu versiyonu kullanılmaktadır. Şekil 3.1c'de ise Au tabanlı Tip3 metalens tasarımı için kullanılan sekizli nanoanten setinin geçiş spektrumları verilmektedir. Diğer iki anten setinde de oldupu gibi ilk dört antenin 90° rotasyonlu versiyonu da sete dâhil edilmiştir ancak set içindeki her bir antenin geometrik parametreleri ortaktır. Şekil 3.1'de tüm setlerdeki nanoaçıklık anten yapıları için geometrik parametreler grafik açıklamalarında verildiği gibi anlaşılırlığı arttırmak için ilgili anten görüntüleri de grafik iç ekinde verilmektedir.



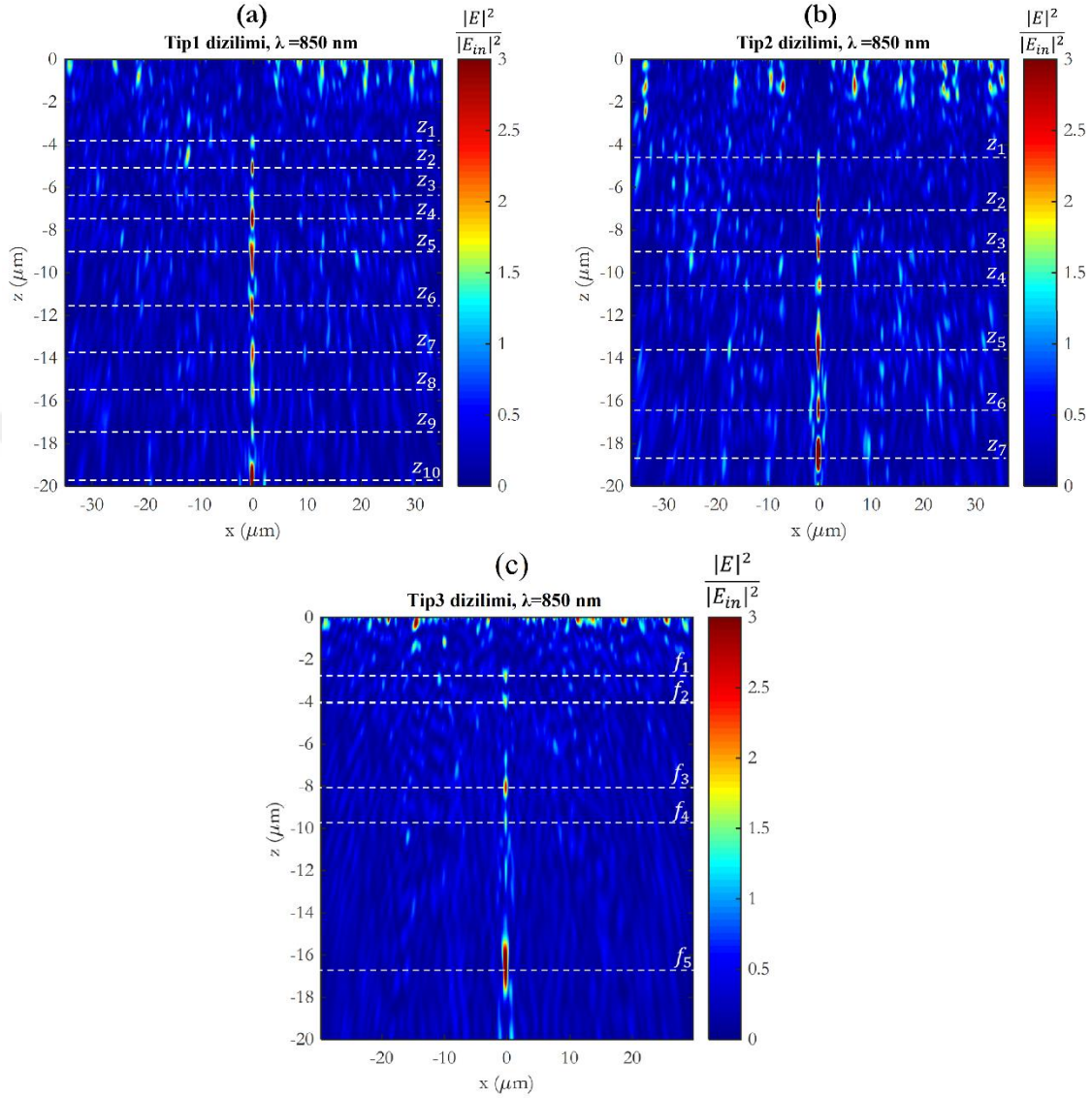
Şekil 3. 2. *Faz Farkı Gösterimi*

Faz modülasyonlu metayüzeyler; her metayüzey birim hücresinin, elektromanyetik dalganın faz kontrolünü sağlamak için belirli faz dağılımına göre tasarlandığı metayapılardır. Metayüzeyin istenen faz tepkisi özellikleri metayüzey biriminin boyutu, şekli, rotasyonu ve membran veya alttaş malzeme tipine göre değişiklik gösterir. Noktasal odaklama sağlayan metalensler ise ışığın karşılaştığı arayüz üzerinde dairesel faz dağılımlarının oluşturulduğu metayüzeylerdir. Bu bağlamda bu çalışmada kullanılan sekizli nanoanten setlerinin içerdiği nanoanten yapılarının tam faz aralığında faz manipülasyonu sağlayabilmesi gereklidir. Bu nedenle yapılan analizlerde geliş düzlemine paralel modellenen alan monitörleri ile söz konusu her bir nanosaçıcının teşkil ettiği elektomanyetik faz belirlenmiştir. Şekil 3.2 her bir nanoantenin 850 nm dalga boyundaki faz analiz sonuçlarını üç set için de göstermektedir. Görüldüğü gibi tasarlanan metamoleküller $[0,2\pi]$ aralığında eşit adımlarla tam faz geçişi sergilemektedir.

Aksikon odaklama sağlamada gerekli olan yüzeysel faz düzeni oluşturmak için tasarlanan hücrelerin eşit radyal mesafelerde dairesel olarak dizilimi modellenmiştir. Bu sayede metalens arayüzü üzerinde tam faz geçişi sağlayan dairesel faz halkaları oluşturulmuştur. Böylece hedeflenen çalışma dalga boyunda rezonatif olduğu ve $[0,2\pi]$ aralığında düzgün faz değişimi sunduğu belirlenen nanoaçıklıkların aperiyodik dizilimlerinin yapıldığı üç metalens tasarımı Şekil 2.2'de de verilmektedir. Önerilen bu metalens tasarımlarının dikey alan monitörleri yoluyla odak noktaları ile f'leri ve odaklara yerleştirilen yatay alan monitörleri ile de odaklama performans parametreleri teorik olarak belirlenmiştir.

Dikey alan monitörü analizleri sonucunda elde edilen alan dağılımları ile belirlenen $\frac{|E|^2}{|E_{\mathrm{in}}|^2}$ normalize edilmiş ışık şiddeti dağılımları Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Normalize ışık şiddetinin 1'den büyük olduğu spotlar noktası olarak değerlendirilmektedir ve Şekil 3.3 üç tipteki metalens tasarımı için de kaç noktada odak oluştuğunu göstermektedir. Odaklamanın $z-$ ekseni boyunca hangi konumda oluşacağının belirlenmesiyle odak noktalarının konumu teorik olarak elde edilir. Şekil 3.3a Tip1 diziliminde 10 odak spotu, Şekil 3.3b Tip2 diziliminde 7 odak spotu ve Şekil 3.3c de Tip3 diziliminde 5 odak spotu olduğu göstermektedir. Odaklanma performansına ilişkin bu analizler, her üç dairesel tasarımın da ışığın geçiş doğrultusunda çoklu odak noktaları sergilediğini göstermektedir. Şekilde 3.3'de gösterilen beyaz kesikli çizgiler, belirlenen odak noktalarının konumlarını, $z-$ ekseni boyunca Tip1 için z_{1-10}, Tip2 için z_{1-7} ve Tip3 için z_{1-5} olarak ifade

etmektedir. Her üç tasarım için f değerleri; Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3. 3. *Odaklama Ekseni ve Polarizasyon Doğrultusu Boyunca Normalize Edilmiş Işık Yoğunluğu Dağılımları: a) Tip1, b) Tip2 ve c) Tip3 için.*

Tablo 3. 1. *Tip1 Dizilimi için **f** Değerleri*

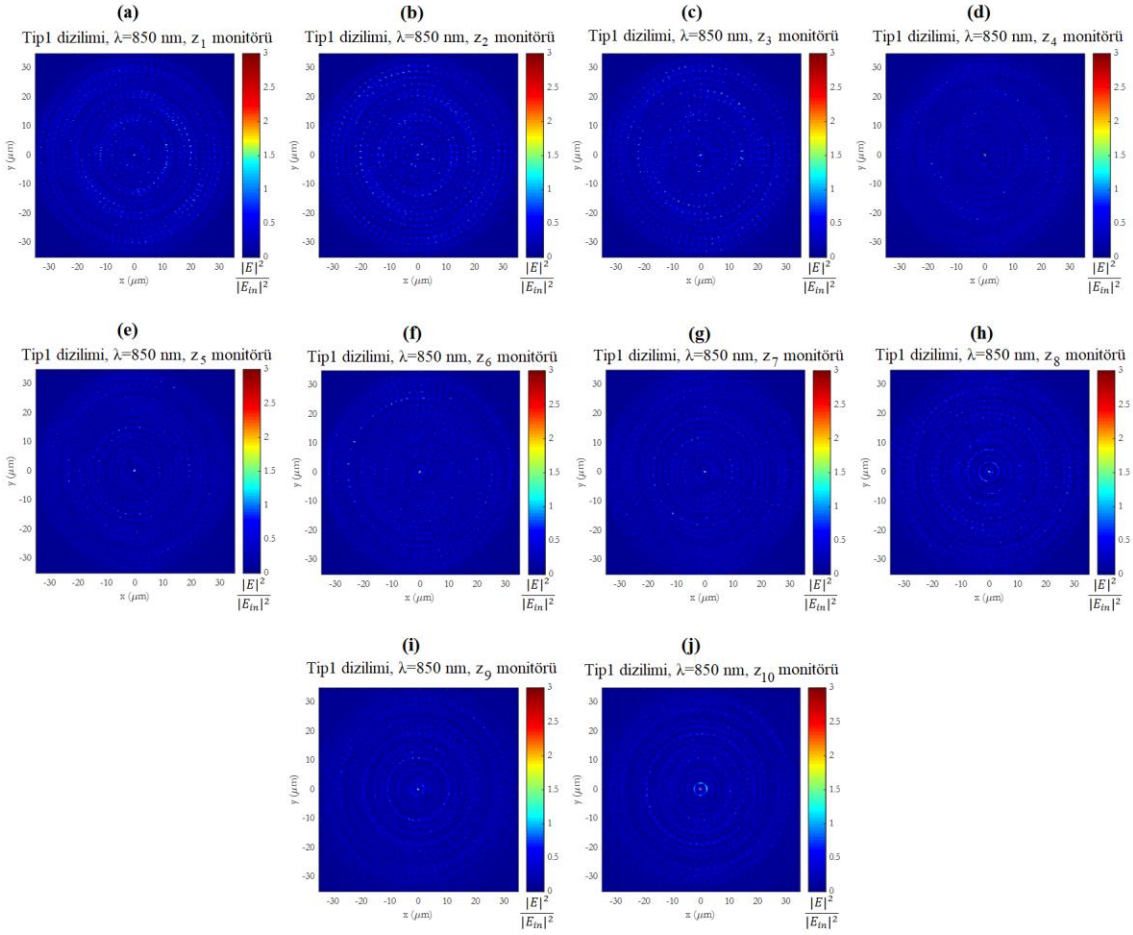
f_1	**3.934 µm**
f_2	5.15 µm
f_3	**6.448 µm**
f_4	7.516 µm
f_5	**9.156 µm**
f_6	11.6 µm
f_7	**13.8 µm**
f_8	15.61 µm
f_9	**17.54 µm**
f_{10}	19.79 µm

Tablo 3. 2. *Tip2 Dizilimi için* $\boldsymbol{f}$ *Değerleri*

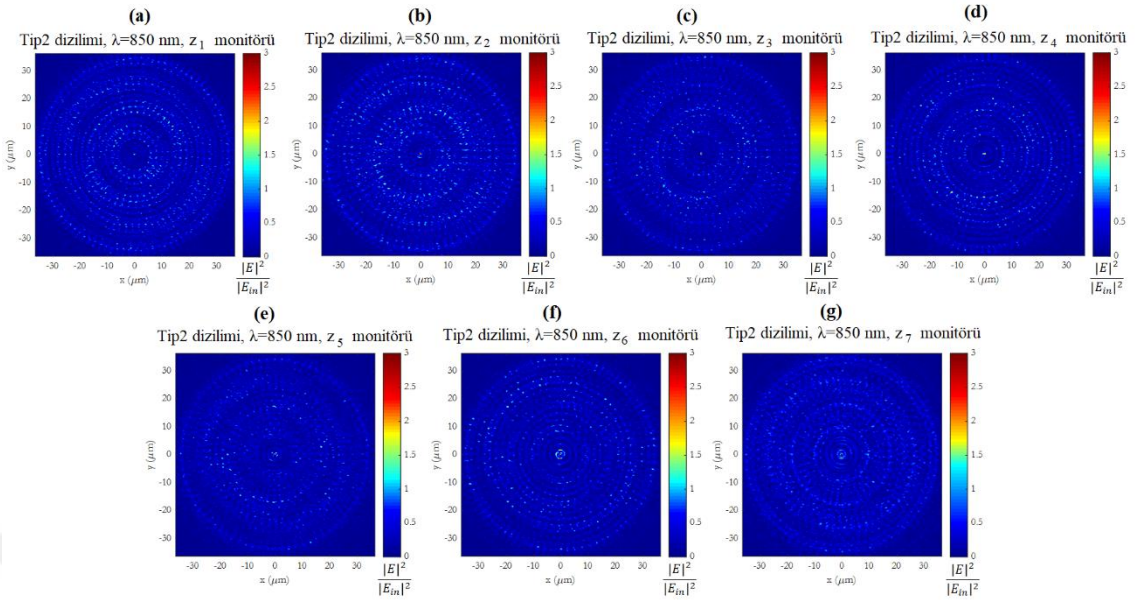
f_1	**4.666 µm**
f_2	7.082 µm
f_3	**8.904 µm**
f_4	10.65 µm
f_5	**13.74 µm**
f_6	16.45 µm
f_7	**18.57 µm**

Tablo 3. 3. *Tip3 Dizilimi için* $\boldsymbol{f}$ *Değerleri*

f_1	**2.88 µm**
f_2	4.07 µm
f_3	**8.14 µm**
f_4	9.75 µm
f_5	**16.79 µm**

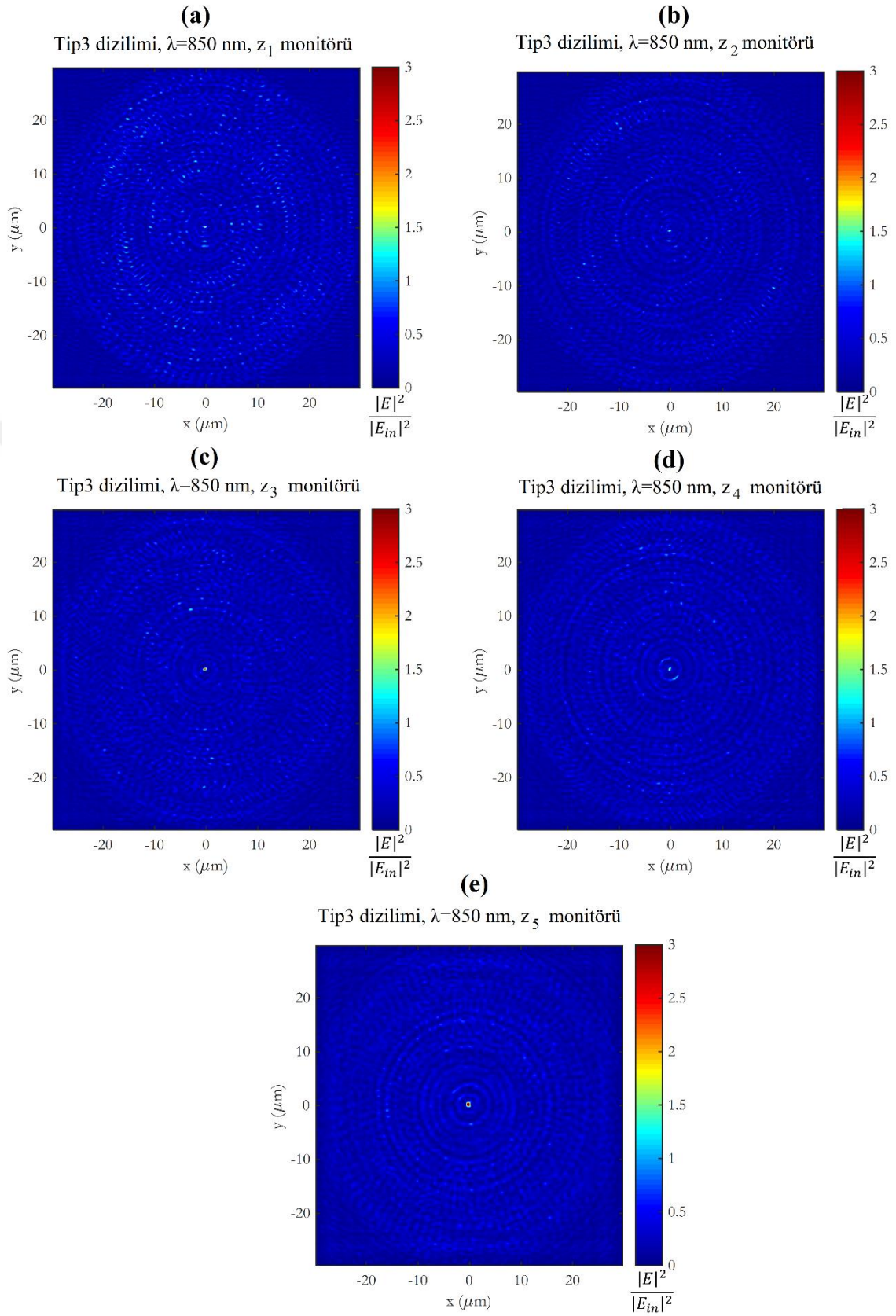


Şekil 3. 4. *Tip1 Düzenlemesi için Odak Düzlemlerinden Elde Edilen Normalize Işık Yoğunluğu Dağılımları: (a)* $\boldsymbol{f_1}$ *= 3.934 µm, (b)* $\boldsymbol{f_2}$ *= 5.15 µm, (c)* $\boldsymbol{f_3}$ *= 6.448 µm, (d)* $\boldsymbol{f_4}$ *= 7.516 µm, (e)* $\boldsymbol{f_5}$ *= 9.156 µm, (f)* $\boldsymbol{f_6}$ *= 11.6 µm, (g)* $\boldsymbol{f_7}$ *= 13.8 µm, (h)* $\boldsymbol{f_8}$ *= 15.61 µm, (i)* $\boldsymbol{f_9}$ *= 17.54 µm ve (j)* $\boldsymbol{f_{10}}$ *= 19.79 µm.*



Şekil 3. 5. *Tip2 Düzenlemesi İçin Odak Düzlemlerinden Elde Edilen Normalize Işık Yoğunluğu Dağılımları: (a)* $\boldsymbol{f_1}$ *= 4.666 μm, (b)* $\boldsymbol{f_2}$ *= 7.082 μm, (c)* $\boldsymbol{f_3}$ *= 8.904 μm, (d)* $\boldsymbol{f_4}$ *= 10.65 μm, (e)* $\boldsymbol{f_5}$ *= 13.74 μm, (f)* $\boldsymbol{f_6}$ *= 16.45 μm ve (g)* $\boldsymbol{f_7}$ *= 18.57 μm.*

Önerilen metalens tasarımlarının odaklama performansını belirleyebilmek için odak spotu merkezlerine yerleştirilen yatay monitörler yoluyla alan dağılımları analiz edilip normalize ışık şiddeti haritaları elde edilmiştir. Her dizilim için ayrı ayrı gerçekleştirilen bu analizler sonucunda elde edilen normalize ışık şiddeti dağılımları Tip1, Tip2 ve Tip3 dizilimleri için sırasıyla Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'te sunulmaktadır. Şekillerdeki her bir panel, ilgili metalens tasarımının farklı odak noktalarındaki, metalens yüzeyine paralel olan yani odak düzlemlerindeki yatay dağılımları temsil etmektedir. Gözlemlendiği gibi, her bir eksen oldukça dar ve aksikon nitelikte bir odak noktası sergilemektedir.



Şekil 3. 6. *Tip3 Düzenlemesi İçin Odak Düzlemlerinden Elde Edilen Normalize Işık Yoğunluğu Dağılımları: (a)* f_1 *= 2.88 μm, (b)* f_2 *= 4.07 μm, (c)* f_3 *= 8.14 μm, (d)* f_4 *= 9.75 μm, (e)* f_5 *= 16.76 μm*

Yatay monitör analizlerine dayanarak hesaplanan teorik odaklama parametreleri, Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te sunulmaktadır. Bu tablolar, her bir dizilim için farklı odaklama parametrelerini içermektedir. Tablo 3.1 Tip1 dizilimi için, Tablo 3.2 Tip2 dizilimi için ve Tablo 3.3 Tip3 dizilimi için hesaplanan teorik odaklama parametrelerini sunmaktadır. Bu parametreler, tasarımın odaklama performansını ve etkinliğini değerlendirmek için kullanılmıştır.

NA arttıkça metalensin ışık yakalama, toplama ve yoğunlaştırma yeteneği artar. NA'nın 0.99'a yakın bir değerde olması, metalensin yüksek bir odaklama yeteneğine sahip olduğunu gösterir. Yani, metalens ışınları geniş açıda, büyük bir verimlilikle toplayabilir ve odaklayabilir. Bu, daha yüksek çözünürlüğe, daha küçük odak noktasına ve daha geniş bir alan derinliğine sahip olma potansiyelini gösterir. FWHM hesabı 1/NA oranını içerdiği için, aynı dalga boyunda NA arttıkça FWHM değeri azalır. Daha küçük bir FWHM değeri, daha yüksek bir çözünürlük ve daha keskin bir odak noktası anlamına gelir. Çünkü daha küçük bir FWHM değeri genellikle daha dar bir odaklama profili ve daha yüksek bir ışık yoğunlaştırma verimliliği demektir. DOF değeri ise, odaklama düzleminin netlik sınırlarını belirler. DOF, bir noktanın odak düzleminden ne kadar uzakta olabileceğini ifade ederken hala kabul edilebilir bir netlikte görüntülenebileceğini gösterir. Daha büyük bir DOF, daha geniş bir odaklama aralığına ve daha fazla derinlikte net görüntülerin elde edilebilmesine olanak tanır. Aksikon nitelikteki odak spotları DOF değeri yüksek odaklama karakteristiğine sahiptir.

Tip1, Tip2 ve Tip3 dizilimlerinde f arttıkça NA düşmektedir. NA ve FWHM parametrelerinin aynı dalga boyunda birbirlerine formülsel olarak ters orantılı olması sonucunda, NA azalırken FWHM değerinde bir artış gözlemlemek kaçınılmazdır. NA değeri tüm odak noktaları için oldukça yüksektir ve FWHM değerleri oldukça küçük olduğu için odak spotları da oldukça dardır. f arttıkça NA değerindeki düşüşlerin fiziksel yorumu bu antenin yakın mesafede ışık toplama özelliğinin daha iyi olacağı şeklinde yapılabilir. Bu yorum, f arttıkça FWHM değerindeki artışı da hesaba katarak; odak noktası metalensten uzaklaştıkça odaklamanın keskinliğinde ve çözünürlüğünde azalma olurak genişletilebilir. DOF değerleri f mesafesi arttıkça artmaktadır. DOF'un yakın mesafeli odaklarda düşük olması son derece dar bir netlik aralığına sahip olduğu ve bu metalensin odak düzlemine çok hassas bir şekilde odaklanması gerektiği anlamına gelir.

Bu durumda, odak ekseni boyunca odak düzleminden uzaklaştıkça netlik azalır ve kaybolur.

Tablo 3. 4. *Tip1 Diziliminin Odaklama Parametre Değerleri*

Lens Özellikleri	Odak noktaları	Sonuçlar
NA	**f_1= 3.934µm**	**0.99**
	f_2= 5.15 µm	0.99
	f_3=6.448 µm	**0.98**
	f_4=7.516 µm	0.98
	f_5=9.156 µm	**0.97**
	f_6=11.6 µm	0.95
	f_7=13.8 µm	**0.93**
	f_8=15.61 µm	0.91
	f_9=17.54 µm	**0.89**
	f_{10}=19.79 µm	0.87
FWHM	**f_1= 3.934µm**	**0.43**
	f_2= 5.15 µm	0.43
	f_3=6.448 µm	**0.43**
	f_4=7.516 µm	0.44
	f_5=9.156 µm	**0.44**
	f_6=11.6 µm	0.45
	f_7=13.8 µm	**0.46**
	f_8=15.61 µm	0.47
	f_9=17.54 µm	**0.48**
	f_{10}=19.79 µm	0.49
DOF (µm)	**f_1= 3.934µm**	**0.01**
	f_2= 5.15 µm	0.02
	f_3=6.448 µm	**0.03**
	f_4=7.516 µm	0.04
	f_5=9.156 µm	**0.06**
	f_6=11.6 µm	0.09
	f_7=13.8 µm	**0.13**
	f_8=15.61 µm	0.17
	f_9=17.54 µm	**0.21**
	f_{10}=19.79 µm	0.27
η (%)	**f_1= 3.934µm**	**0.3**
	f_2= 5.15 µm	0.6
	f_3=6.448 µm	**0.4**
	f_4=7.516 µm	0.8
	f_5=9.156 µm	**0.7**
	f_6=11.6 µm	0.6
	f_7=13.8 µm	**0.5**
	f_8=15.61 µm	0.4
	f_9=17.54 µm	**0.2**
	f_{10}=19.79 µm	1.5

Odak verimliliği odak noktasında ne kadar çok ışık yoğunlaştırıldığı ile ilgilidir. Bu nedenle daha dar ve ışık şiddeti daha yoğun odak spotları için verimin yüksek olması beklenir. Çoklu odaklarda ise %100'lük verim değerinin odak spotları arasında paylaşılması beklenen bir durumdur. Bu tez çalışmasında önerilen metalens tasarımlarında alternatif plazmonik malzeme olan TiN kullanarak da, plazmonik malzeme olan Au kullanarak da çoklu odak noktaları elde edilmiştir. Aynı simülasyon bölgesi için verim değerleri birbirine yakın çoklu odak noktaları belirlenmiştir.

Tablo 3. 5. *Tip2 Diziliminin Odaklama Parametre Değerleri*

Lens Özellikleri	Odak Noktaları	Sonuçlar
NA	**f_1=4.666 µm**	**0.99**
	f_2=7.082 µm	0.98
	f_3=8.904 µm	**0.97**
	f_4=10.65 µm	0.96
	f_5=13.74 µm	**0.94**
	f_6=16.45 µm	0.91
	f_7=18.57 µm	**0.89**
FWHM	f_1=4.666 µm	0.43
	f_2=7.082 µm	**0.43**
	f_3=8.904 µm	0.44
	f_4=10.65 µm	**0.44**
	f_5=13.74 µm	0.45
	f_6=16.45 µm	**0.47**
	f_7=18.57 µm	0.48
DOF (µm)	**f_1=4.666 µm**	**0.01**
	f_2=7.082 µm	0.03
	f_3=8.904 µm	**0.05**
	f_4=10.65 µm	0.07
	f_5=13.74 µm	**0.12**
	f_6=16.45 µm	0.17
	f_7=18.57 µm	**0.22**
η (%)	f_1=4.666 µm	0.3
	f_2=7.082 µm	**0.7**
	f_3=8.904 µm	0.8
	f_4=10.65 µm	**0.3**
	f_5=13.74 µm	0.7
	f_6=16.45 µm	**0.6**
	f_7=18.57 µm	2.3

Tablo 3. 6. *Tip3 Diziliminin Odaklama Parametre Değerleri*

Lens Özellikleri	Odak Noktaları	Sonuçlar
NA	**f_1=2.88 µm**	**0.99**
	f_2=4.07 µm	0.99
	f_3=8.14 µm	**0.96**
	f_4=9.752 µm	0.95
	f_5=16.79 µm	**0.87**
FWHM	f_1=2.88 µm	0,.3
	f_2=4.07 µm	**0.43**
	f_3=8.14 µm	0.44
	f_4=9.752 µm	**0.45**
	f_5=16.79 µm	0.49
DOF (µm)	**f_1=2.88 µm**	**0.008**
	f_2=4.07 µm	0.016
	f_3=8.14 µm	**0.064**
	f_4=9.752 µm	0.092
	f_5=16.79 µm	**0.272**
η (%)	f_1=2.88 µm	0.4
	f_2=4.07 µm	**0.3**
	f_3=8.14 µm	0.7
	f_4=9.752 µm	**0.5**
	f_5=16.79 µm	2

Alternatif plazmonik tabanlı Tip1 ve Tip2 tasarımlarında aynı simülasyon bölgesinde plazmonik tabanlı Tip3 tasarımına göre odak sayısının daha fazla olup tüm tasarımlardaki dak noktalarında verim değerlerinin yakın değerler olması; TiN'ın uzak alanda daha saçıcı olması, buna rağmen Au'ın optik kayıplarının daha yüksek olması ve daha fazla serbest yük taşıyıcısına bağlı olarak yakın alan yükseltmesinin (near field enhancement) Au tabanlı Tip3 tasarımında daha belirgin olması nedeniyle uzak alan saçıcılığının düşük olması ile açıklanabilir.

Düşük verimlilik değerleri ise birim hücrelerin 850 nm'de önemli ölçüde yüksek rezonatif geçiş değerleri sergilememesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte, ışık enerjisinin birden çok odak arasında paylaşılması, literatürdeki tek odaklı çalışmalara kıyasla daha düşük odak verimini de açıklayabilir. Ayrıca aksikon nitelikteki odaklar için de, ışık yakalama toleransı sağlanırken, sadece odak düzleminde hesaplanan verim değerinin aksikon olmayan odaklara göre daha düşük olması da beklenir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ-ÖNERİLER

Bu tez çalışması, alternatif plazmonik ve plazmonik tabanlı nanoyapılar kullanılarak çok noktada odaklama özelliğine sahip özgün metalenslerin tasarımını amaçlamaktadır. Aperiyodik dizilimlerin kullanıldığı bu tasarım, [0,2π] aralığında bir faz gradyanı oluşturmak için benimsenmiştir ve literatüre özgün düz lens tasarımlarını sunmayı hedeflemektedir. Nanosaçıcıların tasarımı için FDTD kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, tasarlanan metamoleküllerin rezonant davranışlarını ve odaklama performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına dayanarak elde edilen normalize edilmiş ışık yoğunluğu dağılımları, odak noktalarındaki dar ışık demetlerinin gözlendiğini göstermiştir. Her bir dizilim için hesaplanan teorik odaklama parametreleri sunulmuştur.

Bölünmüş eşkenar dörtgen şeklindeki metahücrelerin üç farklı dizilimi şeklinde metalens tasarımlarının yer aldığı bu plazmonik ve alternatif plazmonik malzemeli çalışmada, multifokal davranışlar sayısal analizlerle gösterilmiştir. Bu metahücreler, alt dalga boyu kalınlığına sahip bir SiN membran üzerinde nano ölçekli bir TiN film tabakasına gömülü açıklık tabanlı nanoantenlerden ve alt dalga boyu kalınlığına sahip bir SiN membran üzeride nano ölçekli bir Au film tabakasına gömülü açıklık tabanlı nanoantenlerden oluşur. Birim hücreler, eşit radyal mesafelerde dairesel bir düzende düzenlenir ve metalens arayüzünde tam faz geçişini indükleyen dairesel faz halkaları oluşturur. Analitik analiz altyapısının sınırlamalarını dikkate alarak, önerdiğimiz alternatif plazmonik metalens tasarımımız çok odaklı noktaların tanımlanmasını sağladı. İlk önce hücrelerin teorik spektral geçirgenliği sunulmuştur. Gözlemlenen sonuçlar, tüm kullanılan birim hücrelerin 850 nm dalga boyunda rezonans gösterdiğini göstermektedir. Bu bulgular, tasarımın hedeflenen rezonans özelliklerini başarıyla gerçekleştirdiğini ve metamoleküllerin belirli bir dalga boyunda rezonant olma yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Bu rezonans özelliği, nanoyapıların istenen optik özellikleri

sergilemesini sağlamaktadır. Ardından, bu düz lens yapılarının odaklama performansları, odak noktalarındaki ışık yoğunluğu dağılımları aracılığıyla 850 nm fiber optik dalga boyunda sunulur. f, NA, DOF, FWHM ve η dâhil olmak üzere her odak noktası için temel odaklama parametrelerini belirlemek için teorik hesaplamalar yapılır. Ancak, bu çalışma bazı sınırlamalarla karşılaşmıştır. Örneğin, kullanılan materyallerin optik kayıpları ve saçılma kısıtlamaları, tasarımın genel performansını etkileyebilir. Düşük verimlilik ve geniş dalga boyu aralıklarında odaklama gibi diğer tasarım zorlukları da dikkate alınmalıdır. Çoklu odaklardaki düşük verimlilik değerleri, 850 nm'de önemli ölçüde yüksek rezonans geçiş değerlerinin bulunmamasına bağlanabilir. Bununla birlikte, ışık enerjisinin birden çok odak arasında paylaşılması, literatürdeki tek odaklı çalışmalara kıyasla daha düşük odak verimini de açıklayabilir. Elde edilen çoklu odaklar, eksen benzeri odak kalitesine benzeyen, odaklama yönünde uzatılmış eliptik odak noktaları ile karakterize edilir. Bu, metalens tasarımına ışık yakalama yeteneği kazandırır. Alternatif plazmonik malzemeli metalensin yüksek ışık toplama verimliliği, yüksek ışık geçirgenliği ve geniş dalga boyu aralığında etkinliği, onu farklı uygulama alanlarında kullanılabilir hale getirmektedir. Bu tasarımın özellikle mikroskopik ve nanoskopik görüntüleme, biyomedikal görüntüleme, optik iletişim sistemleri ve güneş hücresi teknolojisi gibi alanlarda büyük potansiyeli olduğunu düşünmekteyiz.

Sonuçlarımız, alternatif plazmonik malzemeli metalens tasarımının, geleneksel mercek sistemlerine kıyasla çeşitli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Plazmonik malzemeler, özellikle SPP'ler gibi fiziksel olayların kullanılmasıyla optik iletişim, görüntüleme ve algılama alanlarında büyük potansiyele sahiptir.

Gelecekteki çalışmalar, bu tasarımın optimize edilmesi ve daha geniş bir dalga boyu aralığında etkin odaklama sağlamak için farklı materyal sistemlerinin incelenmesi üzerine odaklanabilir. Ayrıca, metalenslerin diğer optik özellikleri, örneğin polarizasyon seçiciliği ve faz manipülasyonu gibi konuların da detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, alternatif plazmonik ve plazmonik tabanlı nanoyapılar kullanarak özgün metalenslerin tasarımlarını sunmuş ve simülasyon sonuçlarıyla bu tasarımların odaklama yeteneklerini göstermiştir. Bu çalışma, nanoskala optik sistemlerin geliştirilmesi ve uygulama potansiyellerinin ilerletilmesi için önemli bir adımdır. Alternatif plazmonik malzemeli metalens tasarımı, geleneksel mercek sistemlerine

kıyasla daha kompakt ve daha hafif bir seçenek sunmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, alternatif plazmonik malzemeli metalenslerin optik iletişim, görüntüleme ve algılama teknolojilerinde gelecekteki uygulamaları için önemli bir adım olabilir. Bu alanda daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılması, plazmonik ve alternatif plazmonik malzemeli metalenslerin potansiyelini tam olarak ortaya çıkarabilecektir.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Teze özgü olarak yapılan çalışmalar 24 Mayıs 2023 tarihinde 3. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi'nde (3. International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies) İngilizce olarak sunulmuş olup "**Multifocal Metalens with Titanium Nitride Aperiodic Nanoapertures For Fiber Optical Wavelengths**" ve "**Axicon Metalens Design with Gold Aperture-based Nanoantennas**" başlığı ile *Current Debates on Natural and Engineering Sciences 9 (Bilgin Kültür Sanat Yayınları)* kitabında 25 Haziran 2023 tarihinde İngilizce tam metin halinde iki kitap bölümü olarak yayımlanmıştır. Bu yayınların atıfları;

- Ersoy B., Aslan E., Aslan E. (2023). "Axicon Metalens Design with Gold Aperture-Based Nanoantennas". Hikmet Y. Çoğun, İshak Parlar, Hasan Üzmuş (Editörler). ***Current Debates on Natural and Engineering Sciences 9.*** 1.baskı. Ankara. Bilgin Kültür Sanat Yayınları, ss. 83-92.
- Ersoy B., Aslan E., Aslan E. (2023, 24 Mayıs). Axicon Metalens Design with Gold Aperture-Based Nanoantennas. 3. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi'nde sunuldu (ICENSS2023), Ankara.
- Ersoy B., Aslan E., Aslan E. (2023). "Multifocal Metalens with Titanium Nitride Aperiodic Nanoapertures For Fiber Optical Wavelengths". Hikmet Y. Çoğun, İshak Parlar, Hasan Üzmuş (Editörler). ***Current Debates on Natural and Engineering Sciences 9.*** 1.baskı. Ankara. Bilgin Kültür Sanat Yayınları, ss. 93-105.
- Ersoy B., Aslan E., Aslan E. (2023, 24 Mayıs Multifocal Metalens with Titanium Nitride Aperiodic Nanoapertures For Fiber Optical Wavelengths. 3. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi'nde sunuldu (ICENSS2023), Ankara.

şeklindedir.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121E518 numaralı proje ve Kayseri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Merkezi tarafından FBA-2022-1057 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

[1] J. Hu, S. Bandyopadhyay, Y. H. Liu, and L. Y. Shao, "A Review on Metasurface: From Principle to Smart Metadevices," *Front Phys*, vol. 8, p. 502, Jan. 2021, doi: 10.3389/FPHY.2020.586087/BIBTEX.

[2] A. O. Pinchuk and G. C. Schatz, "Metamaterials with gradient negative index of refraction," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 24, no. 10, p. A39, Oct. 2007, doi: 10.1364/JOSAA.24.000A39.

[3] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ε and μ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968, Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: https://www.academia.edu/5322023/THE_ELECTRODYNAMICS_OF_SUBSTANCES_WITH_SIMULTANEOUSLY_NEGATIVE_VALUES_OF_AND_%CE%BC

[4] Erdem Aslan, "Yüzeyde Güçlendirilmiş Spekstroskopi Uygulamaları İçin Plazmonik Nanoanten Tabanlı Fotonik Metamalzemelerin Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu," Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2017.

[5] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures.," *Phys Rev Lett*, vol. 76, no. 25, pp. 4773–4776, 1996, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.76.4773.

[6] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," *Phys Rev Lett*, vol. 84, no. 18, p. 4184, May 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184.

[7] S. Xiao, T. Wang, T. Liu, C. Zhou, X. Jiang, and J. Zhang, "Active metamaterials and metadevices: A review," *J Phys D Appl Phys*, vol. 53, no. 50, Dec. 2020, doi: 10.1088/1361-6463/ABACED.

[8] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys Rev Lett*, vol. 85, no. 18, pp. 3966–3969, Oct. 2000, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.85.3966.

[9] S. S. Bukhari, J. Vardaxoglou, and W. Whittow, “A Metasurfaces Review: Definitions and Applications,” *Applied Sciences 2019, Vol. 9, Page 2727*, vol. 9, no. 13, p. 2727, Jul. 2019, doi: 10.3390/APP9132727.

[10] Y. Liu and X. Zhang, “Metamaterials: a new frontier of science and technology,” *Chem Soc Rev*, vol. 40, no. 5, pp. 2494–2507, Apr. 2011, doi: 10.1039/C0CS00184H.

[11] N. I. Zheludev and Y. S. Kivshar, “From metamaterials to metadevices,” *Nat Mater*, vol. 11, no. 11, pp. 917–924, 2012, doi: 10.1038/NMAT3431.

[12] Z. Jaksic, N. Dalarsson, and M. Maksimovic, “Negative Refractive Index Metamaterials: Principles and Applications,” *Microwave Review* , vol. 12, no. 1, Apr. 2006, Accessed: Mar. 28, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/200162674_Negative_Refractive_Index_Metamaterials_Principles_and_Applications

[13] A. V. Rogacheva, V. A. Fedotov, A. S. Schwanecke, and N. I. Zheludev, “Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure,” *Phys Rev Lett*, vol. 97, no. 17, 2006, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.97.177401.

[14] M. Decker, M. W. Klein, M. Wegener, and S. Linden, “Circular dichroism of planar chiral magnetic metamaterials,” *Opt Lett*, vol. 32, no. 7, p. 856, Apr. 2007, doi: 10.1364/OL.32.000856.

[15] S. Kocaman, “Elektromanyetik Olarak İndüklenmiş Geçirgenliğin Fotonik Kristal Dalga Kılavuzlari ile Optik Benzerinin Optimizasyonu,” Dec. 31, 2017. https://open.metu.edu.tr/handle/11511/62059 (accessed Mar. 28, 2023).

[16] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, “Controlling electromagnetic fields,” *Science (1979)*, vol. 312, no. 5781, pp. 1780–1782, Jun. 2006, doi: 10.1126/SCIENCE.1125907.

[17] D. Schurig *et al.*, “Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies,” *Science (1979)*, vol. 314, no. 5801, pp. 977–980, Nov. 2006, doi: 10.1126/SCIENCE.1133628/SUPPL_FILE/SCHURIG.SOM.PDF.

[18] Z. Jacob *et al.*, "Optical Hyperlens: Far-field imaging beyond the diffraction limit," *Opt Express*, vol. 14, no. 18, pp. 8247–8256, Sep. 2006, doi: 10.1364/OE.14.008247.

[19] A. Salandrino and N. Engheta, "Far-field subdiffraction optical microscopy using metamaterial crystals: Theory and simulations," *Phys Rev B*, vol. 74, no. 075103, 2006, Accessed: Mar. 28, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/298783246_Far-field_subdiffraction_optical_microscopy_using_metamaterial_crystals_Theory_and_simulations

[20] Z. Liu, H. Lee, Y. Xiong, C. Sun, and X. Zhang, "Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects," *Science (1979)*, vol. 315, no. 5819, p. 1686, Mar. 2007, doi: 10.1126/SCIENCE.1137368.

[21] N. Engheta, A. Salandrino, and A. Alù, "Circuit elements at optical frequencies: Nanoinductors, nanocapacitors, and nanoresistors," *Phys Rev Lett*, vol. 95, no. 9, p. 095504, Aug. 2005, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.95.095504/FIGURES/4/MEDIUM.

[22] N. Engheta, "Circuits with light at nanoscales: Optical nanocircuits inspired by metamaterials," *Science (1979)*, vol. 317, no. 5845, pp. 1698–1702, Sep. 2007, doi: 10.1126/SCIENCE.1133268.

[23] J. Henzie, M. H. Lee, and T. W. Odom, "Multiscale patterning of plasmonic metamaterials.," *Nat Nanotechnol*, vol. 2, no. 9, pp. 549–554, 2007, doi: 10.1038/NNANO.2007.252.

[24] A. V. Kabashin *et al.*, "Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing," *Nature Materials* , vol. 8, no. 11, pp. 867–871, Oct. 2009, doi: 10.1038/nmat2546.

[25] F. Ding, A. Pors, and S. I. Bozhevolnyi, "Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications," *Reports on Progress in Physics*, vol. 81, no. 2, p. 026401, Dec. 2017, doi: 10.1088/1361-6633/AA8732.

[26] M. H. Bistervels, M. Kamp, H. Schoenmaker, A. M. Brouwer, and W. L. Noorduin, "Light-Controlled Nucleation and Shaping of Self-Assembling Nanocomposites," *Adv Mater*, vol. 34, no. 5, Feb. 2022, doi: 10.1002/ADMA.202107843.

[27] D. G. Ovejero, G. Minatti, M. Faenzi, F. Caminita, E. Martini, and S. Maci, "Shared-aperture modulated metasurface antennas," *2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, vol. 2017-January, pp. 1–3, Nov. 2017, doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8105100.

[28] W. Cai, V. Shalaev, and D. K. Paul, "Optical Metamaterials: Fundamentals and ApplicationsOptical Metamaterials: Fundamentals and Applications," *Phys Today*, vol. 63, no. 9, pp. 57–58, Sep. 2010, doi: 10.1063/1.3490504.

[29] N. Yu and F. Capasso, "Flat optics with designer metasurfaces," *Nat Mater*, vol. 13, no. 2, Jan. 2014, doi: 10.1038/nmat3839.

[30] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. A. Gordon, J. O'Hara, J. Booth, and D. R. Smith, "An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 54, no. 2, pp. 10–35, 2012, doi: 10.1109/MAP.2012.6230714.

[31] G. Yoon, I. Kim, and J. Rho, "Challenges in fabrication towards realization of practical metamaterials," *Microelectron Eng*, vol. 163, pp. 7–20, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.MEE.2016.05.005.

[32] C. M. Soukoulis and M. Wegener, "Past Achievements and Future Challenges in 3D Photonic Metamaterials," *Nat Photonics*, vol. 5, no. 9, pp. 523–530, Aug. 2011, doi: 10.1038/nphoton.2011.154.

[33] N. Meinzer, W. L. Barnes, and I. R. Hooper, "Plasmonic meta-atoms and metasurfaces," *Nat Photonics*, vol. 8, no. 12, pp. 889–898, Nov. 2014, doi: 10.1038/NPHOTON.2014.247.

[34] B. H. Chen *et al.*, "GaN Metalens for Pixel-Level Full-Color Routing at Visible Light," *Nano Lett*, vol. 17, no. 10, pp. 6345–6352, Oct. 2017, doi: 10.1021/ACS.NANOLETT.7B03135/ASSET/IMAGES/MEDIUM/NL-2017-031352_0006.GIF.

[35] X. Chen *et al.*, "Dual-polarity plasmonic metalens for visible light," *Nature Communications* , vol. 3, no. 1, pp. 1–6, Nov. 2012, doi: 10.1038/ncomms2207.

[36] R. J. Lin *et al.*, “Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging,” *Nature Nanotechnology* , vol. 14, no. 3, pp. 227–231, Jan. 2019, doi: 10.1038/s41565-018-0347-0.

[37] S. Wang *et al.*, “A broadband achromatic metalens in the visible,” *Nat Nanotechnol*, vol. 13, no. 3, pp. 227–232, Jan. 2018, doi: 10.1038/S41565-017-0052-4.

[38] L. Hsu, A. Ndao, and B. Kanté, “Broadband and linear polarization metasurface carpet cloak in the visible,” *Opt Lett*, vol. 44, no. 12, pp. 2978–2981, Jun. 2019, doi: 10.1364/OL.44.002978.

[39] C. Qian *et al.*, “Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention,” *Nat Photonics*, vol. 14, no. 6, pp. 383–390, Jun. 2020, doi: 10.1038/S41566-020-0604-2.

[40] J. Hu, T. Lang, C. Shen, and L. Shao, “Combined Mie Resonance Metasurface for Wideband Terahertz Absorber,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 9, p. 1679, Sep. 2018, doi: 10.3390/APP8091679.

[41] W. J. Padilla, K. Fan, X. Liu, and I. V. Shadrivov, “Experimental realization of a terahertz all-dielectric metasurface absorber,” *Opt Express*, vol. 25, no. 1, pp. 191–201, Jan. 2017, doi: 10.1364/OE.25.000191.

[42] Y. Yao *et al.*, “Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators,” *Nano Lett*, vol. 14, no. 11, pp. 6526–6532, Nov. 2014, doi: 10.1021/NL503104N/SUPPL_FILE/NL503104N_SI_001.PDF.

[43] N. Yu *et al.*, “Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction,” *Science (1979)*, vol. 334, no. 6054, pp. 333–337, Oct. 2011, doi: 10.1126/SCIENCE.1210713/SUPPL_FILE/YU-SOM.PDF.

[44] X. Guo, M. Pu, Y. Guo, X. Ma, X. Li, and X. Luo, “Flexible and Tunable Dielectric Color Meta-hologram,” *Plasmonics*, vol. 15, no. 1, pp. 217–223, Feb. 2020, doi: 10.1007/S11468-019-01025-5.

[45] X. Ni, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, “Metasurface holograms for visible light,” *Nat Commun*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, Nov. 2013, doi: 10.1038/ncomms3807.

[46] G. Zheng, H. Mühlenbernd, M. Kenney, G. Li, T. Zentgraf, and S. Zhang, "Metasurface holograms reaching 80% efficiency," *Nature Nanotechnology* , vol. 10, no. 4, pp. 308–312, Feb. 2015, doi: 10.1038/nnano.2015.2.

[47] F. Capasso, "The future and promise of flat optics: A personal perspective," *Nanophotonics*, vol. 7, no. 6, pp. 953–957, Jun. 2018, doi: 10.1515/NANOPH-2018-0004/MACHINEREADABLECITATION/RIS.

[48] R. Quarfoth and D. Sievenpiper, "Artificial Tensor Impedance Surface Waveguides," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 61, no. 7, pp. 3597–3606, Jul. 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2254433.

[49] C. Pfeiffer and A. Grbic, "Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets.," *Phys Rev Lett*, vol. 110, no. 19, May 2013, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.110.197401.

[50] S. Zahra *et al.*, "Electromagnetic Metasurfaces and Reconfigurable Metasurfaces: A Review," *Front Phys*, vol. 8, p. 615, Jan. 2021, doi: 10.3389/FPHY.2020.593411/BIBTEX.

[51] P. Yu *et al.*, "Broadband Metamaterial Absorbers," *Adv Opt Mater*, vol. 7, no. 3, p. 1800995, Feb. 2019, doi: 10.1002/ADOM.201800995.

[52] P. Yu *et al.*, "Metamaterial perfect absorber with unabated size-independent absorption," *Opt Express*, vol. 26, no. 16, pp. 20471–20480, Aug. 2018, doi: 10.1364/OE.26.020471.

[53] Y. Huang, G. Wen, W. Zhu, J. Li, L.-M. Si, and M. Premaratne, "Experimental demonstration of a magnetically tunable ferrite based metamaterial absorber," *Opt Express*, vol. 22, no. 13, p. 16408, Jun. 2014, doi: 10.1364/OE.22.016408.

[54] W. Zhu, Y. Huang, I. D. Rukhlenko, G. Wen, and M. Premaratne, "Configurable metamaterial absorber with pseudo wideband spectrum," *Optics Express, Vol. 20, Issue 6, pp. 6616-6621*, vol. 20, no. 6, pp. 6616–6621, Mar. 2012, doi: 10.1364/OE.20.006616.

[55] G. M. Akselrod *et al.*, "Large-Area Metasurface Perfect Absorbers from Visible to Near-Infrared," *Advanced Materials*, vol. 27, no. 48, pp. 8028–8034, Dec. 2015, doi: 10.1002/ADMA.201503281.

[56] Y. Horie, A. Arbabi, A. Faraon, E. Arbabi, and S. M. Kamali, “Wide bandwidth and high resolution planar filter array based on DBR-metasurface-DBR structures,” *Opt Express*, vol. 24, no. 11, pp. 11677–11682, May 2016, doi: 10.1364/OE.24.011677.

[57] H. Sun, G. Wen, Y. Huang, J. Li, W. Zhu, and L. M. Si, “Tunable band notch filters by manipulating couplings of split ring resonators,” *Appl Opt*, vol. 52, no. 31, pp. 7517–7522, Nov. 2013, doi: 10.1364/AO.52.007517.

[58] Z. Li, W. Wang, D. Rosenmann, D. A. Czaplewski, X. Yang, and J. Gao, “All-metal structural color printing based on aluminum plasmonic metasurfaces,” *Opt Express*, vol. 24, no. 18, pp. 20472–20480, Sep. 2016, doi: 10.1364/OE.24.020472.

[59] T. T. Kim *et al.*, “Amplitude Modulation of Anomalously Refracted Terahertz Waves with Gated-Graphene Metasurfaces,” *Adv Opt Mater*, vol. 6, no. 1, Nov. 2017, doi: 10.1002/ADOM.201700507.

[60] X. Song *et al.*, “Selective Diffraction with Complex Amplitude Modulation by Dielectric Metasurfaces,” *Adv Opt Mater*, vol. 6, no. 4, p. 1701181, Feb. 2018, doi: 10.1002/ADOM.201701181.

[61] X. Song *et al.*, “Near-field plasmonic beam engineering with complex amplitude modulation based on metasurface,” *Appl Phys Lett*, vol. 112, no. 7, p. 073104, Feb. 2018, doi: 10.1063/1.5013327.

[62] F. Aieta *et al.*, “Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces,” *Nano Lett*, vol. 12, no. 9, pp. 4932–4936, Sep. 2012, doi: 10.1021/NL302516V/SUPPL_FILE/NL302516V_SI_001.PDF.

[63] L. Zhang, S. Mei, K. Huang, and C. W. Qiu, “Advances in Full Control of Electromagnetic Waves with Metasurfaces,” *Adv Opt Mater*, vol. 4, no. 6, pp. 818–833, Jun. 2016, doi: 10.1002/ADOM.201500690.

[64] A. M. Shaltout *et al.*, “Development of Optical Metasurfaces: Emerging Concepts and New Materials,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 12, pp. 2270–2287, Dec. 2016, doi: 10.1109/JPROC.2016.2590882.

[65] X. Ding *et al.*, “Ultrathin Pancharatnam–Berry Metasurface with Maximal Cross-Polarization Efficiency,” *Advanced Materials*, vol. 27, no. 7, pp. 1195–1200, Feb. 2015, doi: 10.1002/ADMA.201405047.

[66] D. Wen *et al.*, “Helicity multiplexed broadband metasurface holograms,” *Nat Commun*, vol. 6, Sep. 2015, doi: 10.1038/NCOMMS9241.

[67] C. Pfeiffer, N. K. Emani, A. M. Shaltout, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, and A. Grbic, “Efficient light bending with isotropic metamaterial Huygens’ surfaces,” *Nano Lett*, vol. 14, no. 5, pp. 2491–2497, May 2014, doi: 10.1021/NL5001746/SUPPL_FILE/NL5001746_SI_001.PDF.

[68] L. Wang *et al.*, “Grayscale transparent metasurface holograms,” *Optica*, vol. 3, no. 12, pp. 1504–1505, Dec. 2016, doi: 10.1364/OPTICA.3.001504.

[69] Z. Wang *et al.*, “Huygens Metasurface Holograms with the Modulation of Focal Energy Distribution,” *Adv Opt Mater*, vol. 6, no. 12, Jun. 2018, doi: 10.1002/ADOM.201800121.

[70] C. Wu *et al.*, “Spectrally selective chiral silicon metasurfaces based on infrared Fano resonances,” *Nat Commun*, vol. 5, no. 1, pp. 1–9, May 2014, doi: 10.1038/ncomms4892.

[71] C. Pfeiffer, C. Zhang, V. Ray, L. J. Guo, and A. Grbic, “High performance bianisotropic metasurfaces: Asymmetric transmission of light,” *Phys Rev Lett*, vol. 113, no. 2, p. 023902, Jul. 2014, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.113.023902/FIGURES/2/MEDIUM.

[72] C. Pfeiffer, C. Zhang, V. Ray, L. Jay Guo, and A. Grbic, “Polarization rotation with ultra-thin bianisotropic metasurfaces,” *Optica*, vol. 3, no. 4, p. 427, Apr. 2016, doi: 10.1364/OPTICA.3.000427.

[73] J. P. Balthasar Mueller, N. A. Rubin, R. C. Devlin, B. Groever, and F. Capasso, “Metasurface Polarization Optics: Independent Phase Control of Arbitrary Orthogonal States of Polarization,” *Phys Rev Lett*, vol. 118, no. 11, Mar. 2017, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.118.113901.

[74] X. Huang, J. Chen, and H. Yang, “High-efficiency wideband reflection polarization conversion metasurface for circularly polarized waves,” *J Appl Phys*, vol. 122, no. 4, p. 043102, Jul. 2017, doi: 10.1063/1.4996643.

[75] W. Yang, Q. Meng, W. Che, L. Gu, and Q. Xue, “Low-Profile Wideband Dual-Circularly Polarized Metasurface Antenna Array with Large Beamwidth,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 17, no. 9, pp. 1613–1616, Sep. 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2857625.

[76] L. Liu *et al.*, “Broadband Metasurfaces with Simultaneous Control of Phase and Amplitude,” *Advanced Materials*, vol. 26, no. 29, pp. 5031–5036, Aug. 2014, doi: 10.1002/ADMA.201401484.

[77] Z. Li, H. Cheng, Z. Liu, S. Chen, and J. Tian, “Plasmonic Airy Beam Generation by Both Phase and Amplitude Modulation with Metasurfaces,” *Adv Opt Mater*, vol. 4, no. 8, pp. 1230–1235, Aug. 2016, doi: 10.1002/ADOM.201600108.

[78] E. Y. Song *et al.*, “Compact Generation of Airy Beams with C-Aperture Metasurface,” *Adv Opt Mater*, vol. 5, no. 10, May 2017, doi: 10.1002/ADOM.201601028.

[79] G. Y. Lee *et al.*, “Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces.,” *Nanoscale*, vol. 10, no. 9, pp. 4237–4245, 2017, doi: 10.1039/C7NR07154J.

[80] J. Li *et al.*, “Simultaneous Control of Light Polarization and Phase Distributions Using Plasmonic Metasurfaces,” *Adv Funct Mater*, vol. 25, no. 5, pp. 704–710, Feb. 2015, doi: 10.1002/ADFM.201403669.

[81] A. Arbabi, Y. Horie, M. Bagheri, and A. Faraon, “Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission,” *Nat Nanotechnol*, vol. 10, no. 11, pp. 937–943, Aug. 2015, doi: 10.1038/nnano.2015.186.

[82] J. Gao, Y. Zhou, H. Yang, X. Cao, and S. Li, “Reconfigurable metasurface for multiple functions: magnitude, polarization and phase modulation,” *Opt Express*, vol. 26, no. 22, pp. 29451–29459, Oct. 2018, doi: 10.1364/OE.26.029451.

[83] H. X. Xu *et al.*, “Chirality-Assisted High-Efficiency Metasurfaces with Independent Control of Phase, Amplitude, and Polarization,” *Adv Opt Mater*, vol. 7, no. 4, Feb. 2019, doi: 10.1002/ADOM.201801479.

[84] K. Chen *et al.*, “A Reconfigurable Active Huygens’ Metalens,” *Advanced Materials*, vol. 29, no. 17, p. 1606422, May 2017, doi: 10.1002/ADMA.201606422.

[85] A. Li, S. Kim, Y. Luo, Y. Li, J. Long, and D. F. Sievenpiper, “High-Power Transistor-Based Tunable and Switchable Metasurface Absorber,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 65, no. 8, pp. 2810–2818, Aug. 2017, doi: 10.1109/TMTT.2017.2681650.

[86] X. Zhao *et al.*, “Electromechanically tunable metasurface transmission waveplate at terahertz frequencies,” *Optica*, vol. 5, no. 3, p. 303, Mar. 2018, doi: 10.1364/OPTICA.5.000303.

[87] E. Arbabi, A. Arbabi, S. M. Kamali, Y. Horie, M. S. Faraji-Dana, and A. Faraon, “MEMS-tunable dielectric metasurface lens,” *Nature Communications* , vol. 9, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-03155-6.

[88] M. Manjappa *et al.*, “Reconfigurable MEMS Fano metasurfaces with multiple-input–output states for logic operations at terahertz frequencies,” *Nat Commun*, vol. 9, no. 1, pp. 1–10, Oct. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06360-5.

[89] S. R. Biswas *et al.*, “Tunable Graphene Metasurface Reflectarray for Cloaking, Illusion, and Focusing,” *Phys Rev Appl*, vol. 9, no. 3, p. 034021, Mar. 2018, doi: 10.1103/PHYSREVAPPLIED.9.034021/FIGURES/7/MEDIUM.

[90] A. Komar *et al.*, “Electrically tunable all-dielectric optical metasurfaces based on liquid crystals,” *Appl Phys Lett*, vol. 110, no. 7, p. 071109, Feb. 2017, doi: 10.1063/1.4976504.

[91] W. Ji *et al.*, “Liquid-crystal-loaded chiral metasurfaces for reconfigurable multiband spin-selective light absorption,” *Opt Express*, vol. 26, no. 19, pp. 25305–25314, Sep. 2018, doi: 10.1364/OE.26.025305.

[92] X. Gao, W. L. Yang, H. F. Ma, Q. Cheng, X. H. Yu, and T. J. Cui, “A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface,”

IEEE Trans Antennas Propag, vol. 66, no. 11, pp. 6086–6095, Nov. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2866636.

[93] D. Chen *et al.*, "The novel graphene metasurfaces based on split-ring resonators for tunable polarization switching and beam steering at terahertz frequencies," *Carbon N Y*, vol. 154, pp. 350–356, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.CARBON.2019.08.020.

[94] S. Quader, J. Zhang, M. R. Akram, and W. Zhu, "Graphene-Based High-Efficiency Broadband Tunable Linear-to-Circular Polarization Converter for Terahertz Waves," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 5, Sep. 2020, doi: 10.1109/JSTQE.2020.2969566.

[95] J. Zhang, W. Zhu, X. Wei, and M. Premaratne, "Experimental demonstration of an electrically tunable broadband coherent perfect absorber based on a graphene-electrolyte-graphene sandwich structure," *Photonics Res*, vol. 7, no. 8, pp. 868–874, Aug. 2019, doi: 10.1364/PRJ.7.000868.

[96] X. Chen *et al.*, "Electrically Tunable Perfect Terahertz Absorber Based on a Graphene Salisbury Screen Hybrid Metasurface," *Adv Opt Mater*, vol. 8, no. 3, p. 1900660, Feb. 2020, doi: 10.1002/ADOM.201900660.

[97] M. S. Islam *et al.*, "Tunable localized surface plasmon graphene metasurface for multiband superabsorption and terahertz sensing," *Carbon N Y*, vol. 158, pp. 559–567, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.CARBON.2019.11.026.

[98] Y. Yuan *et al.*, "A Fully Phase-Modulated Metasurface as An Energy-Controllable Circular Polarization Router," *Advanced Science*, vol. 7, no. 18, p. 2001437, Sep. 2020, doi: 10.1002/ADVS.202001437.

[99] O. Tsilipakos, A. C. Tasolamprou, T. Koschny, M. Kafesaki, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, "Pairing Toroidal and Magnetic Dipole Resonances in Elliptic Dielectric Rod Metasurfaces for Reconfigurable Wavefront Manipulation in Reflection," *Adv Opt Mater*, vol. 6, no. 22, p. 1800633, Nov. 2018, doi: 10.1002/ADOM.201800633.

[100] S. Liu, T. J. Cui, S. Liu, and T. J. Cui, "Concepts, Working Principles, and Applications of Coding and Programmable Metamaterials," *Adv Opt Mater*, vol. 5, no. 22, p. 1700624, Nov. 2017, doi: 10.1002/ADOM.201700624.

[101] L. Zhang *et al.*, “Space-time-coding digital metasurfaces,” *Nat Commun*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, Oct. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06802-0.

[102] L. Li *et al.*, “Intelligent metasurface imager and recognizer,” *Light: Science & Applications* , vol. 8, no. 1, pp. 1–9, Oct. 2019, doi: 10.1038/s41377-019-0209-z.

[103] Q. Ma, G. D. Bai, H. B. Jing, C. Yang, L. Li, and T. J. Cui, “Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions,” *Light: Science & Applications* , vol. 8, no. 1, pp. 1–12, Oct. 2019, doi: 10.1038/s41377-019-0205-3.

[104] Q. Wang *et al.*, “Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials,” *Nat Photonics*, vol. 10, no. 1, pp. 60–65, Dec. 2015, doi: 10.1038/nphoton.2015.247.

[105] L. Cong, Y. K. Srivastava, H. Zhang, X. Zhang, J. Han, and R. Singh, “All-optical active THz metasurfaces for ultrafast polarization switching and dynamic beam splitting,” *Light Sci Appl*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, Jul. 2018, doi: 10.1038/s41377-018-0024-y.

[106] X. G. Zhang *et al.*, “Light-Controllable Digital Coding Metasurfaces,” *Advanced Science*, vol. 5, no. 11, Nov. 2018, doi: 10.1002/ADVS.201801028.

[107] A. Komar *et al.*, “Dynamic Beam Switching by Liquid Crystal Tunable Dielectric Metasurfaces,” *ACS Photonics*, vol. 5, no. 5, pp. 1742–1748, May 2018, doi: 10.1021/ACSPHOTONICS.7B01343/SUPPL_FILE/PH7B01343_SI_001.PDF.

[108] H. Cai *et al.*, “Multifunctional Hybrid Metasurfaces for Dynamic Tuning of Terahertz Waves,” *Adv Opt Mater*, vol. 6, no. 14, p. 1800257, Jul. 2018, doi: 10.1002/ADOM.201800257.

[109] J. B. Reeves, R. K. Jayne, T. J. Stark, L. K. Barrett, A. E. White, and D. J. Bishop, “Tunable Infrared Metasurface on a Soft Polymer Scaffold,” *Nano Lett*, vol. 18, no. 5, pp. 2802–2806, May 2018, doi: 10.1021/ACS.NANOLETT.7B05042/ASSET/IMAGES/MEDIUM/NL-2017-050423_0006.GIF.

[110] X. Liu, Z. Huang, C. Zhu, L. Wang, and J. Zang, “Out-of-Plane Designed Soft Metasurface for Tunable Surface Plasmon Polariton,” *Nano Lett*, vol. 18, no. 2, pp. 1435–1441, Feb. 2018, doi: 10.1021/ACS.NANOLETT.7B05190.

[111] Z. Wang *et al.*, “Origami-Based Reconfigurable Metamaterials for Tunable Chirality,” *Advanced Materials*, vol. 29, no. 27, p. 1700412, Jul. 2017, doi: 10.1002/ADMA.201700412.

[112] L. Chen, H. L. Ma, and H. Y. Cui, “Wavefront manipulation based on mechanically reconfigurable coding metasurface,” *J Appl Phys*, vol. 124, no. 4, p. 043101, Jul. 2018, doi: 10.1063/1.5039679.

[113] A. Krasnok, M. Tymchenko, and A. Alù, “Nonlinear metasurfaces: a paradigm shift in nonlinear optics,” *Materials Today*, vol. 21, no. 1, pp. 8–21, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATTOD.2017.06.007.

[114] L. H. Nicholls *et al.*, “Ultrafast synthesis and switching of light polarization in nonlinear anisotropic metamaterials,” *Nat Photonics*, vol. 11, no. 10, pp. 628–633, Oct. 2017, doi: 10.1038/S41566-017-0002-6.

[115] A. Tsukernik *et al.*, “Reconfiguring structured light beams using nonlinear metasurfaces,” *Opt Express*, vol. 26, no. 23, pp. 30930–30943, Nov. 2018, doi: 10.1364/OE.26.030930.

[116] L. Wang, S. Kruk, K. Koshelev, I. Kravchenko, B. Luther-Davies, and Y. Kivshar, “Nonlinear Wavefront Control with All-Dielectric Metasurfaces,” *Nano Lett*, vol. 18, no. 6, pp. 3978–3984, Jun. 2018, doi: 10.1021/ACS.NANOLETT.8B01460/SUPPL_FILE/NL8B01460_SI_001.PDF.

[117] H. Zhu, F. Yi, and E. Cubukcu, “Plasmonic metamaterial absorber for broadband manipulation of mechanical resonances,” *Nat Photonics*, vol. 10, no. 11, pp. 709–714, Oct. 2016, doi: 10.1038/nphoton.2016.183.

[118] A. V. Kildishev, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev, “Planar Photonics with Metasurfaces,” *Science (1979)*, vol. 339, no. 6125, pp. 12320091–12320096, Mar. 2013, doi: 10.1126/SCIENCE.1232009.

[119] O. Danila and D. Manaila-Maximean, “Bifunctional Metamaterials Using Spatial Phase Gradient Architectures: Generalized Reflection and Refraction Considerations,” *Materials*, vol. 14, no. 9, p. 2201, Apr. 2021, doi: 10.3390/MA14092201.

[120] J. Scheuer, “Metasurfaces-based holography and beam shaping: Engineering the phase profile of light,” *Nanophotonics*, vol. 6, no. 1, pp. 137–152, Jan. 2017, doi: 10.1515/NANOPH-2016-0109/ASSET/GRAPHIC/J_NANOPH-2016-0109_FIG_008.JPG.

[121] X. Ni, S. Ishii, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, “Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses,” *Light Sci Appl*, vol. 2, no. APRIL, p. e72, 2013, doi: 10.1038/LSA.2013.28.

[122] X. Ni, N. K. Emani, A. V. Kildishev, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev, “Broadband light bending with plasmonic nanoantennas,” *Science (1979)*, vol. 335, no. 6067, p. 427, Jan. 2012, doi: 10.1126/SCIENCE.1214686/SUPPL_FILE/NI.SOM.PDF.

[123] N. Yu *et al.*, “Flat Optics: Controlling Wavefronts With Optical Antenna Metasurfaces,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 3, 2013, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2241399.

[124] L. Huang *et al.*, “Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface,” *Nat Commun*, vol. 4, Nov. 2013, doi: 10.1038/NCOMMS3808.

[125] A. Pors, O. Albrektsen, I. P. Radko, and S. I. Bozhevolnyi, “Gap plasmon-based metasurfaces for total control of reflected light,” *Sci Rep*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, Jul. 2013, doi: 10.1038/srep02155.

[126] Semih Korkmaz, “Biyosensör uygulamalarında kullanılabilecek plazmonik tabanlı mükemmel soğurucuların tasarımı ,” Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2015.

[127] Ekin Aslan, “Biyosensör uygulamaları için fraktal geometrili plazmonik nanoanten dizileri tasarım ve üretimi,” Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2017.

[128] S. A. Maier, “Surface Plasmon Polaritons at Metal / Insulator Interfaces,” in *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, Springer, New York, NY, 2007, pp. 21–37. doi: 10.1007/0-387-37825-1_2.

[129] A. A. Toropov and T. V. Shubina, *Plasmonic effects in metal-semiconductor nanostructures*, Oxford University P…. 2015.

[130] Gülten Onay, "Grafen Tabanlı Plazmonik Sensörler ve Uygulamaları," Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2019.

[131] J. Homola, "Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species," *Chem Rev*, vol. 108, no. 2, pp. 462–493, Feb. 2008, doi: 10.1021/CR068107D/ASSET/CR068107D.FP.PNG_V03.

[132] H. Altug, D. Englund, and J. Vučković, "Ultrafast photonic crystal nanocavity laser," *Nature Physics* , vol. 2, no. 7, pp. 484–488, Jul. 2006, doi: 10.1038/nphys343.

[133] K. Sokolov *et al.*, "Real-Time Vital Optical Imaging of Precancer Using Anti-Epidermal Growth Factor Receptor Antibodies Conjugated to Gold Nanoparticles1 | Cancer Research | American Association for Cancer Research," *Cancer Res*, vol. 63, no. 9, 2003, Accessed: Mar. 30, 2023. [Online]. Available: https://aacrjournals.org/cancerres/article/63/9/1999/511179/Real-Time-Vital-Optical-Imaging-of-Precancer-Using

[134] L. Josephson, M. F. Kircher, U. Mahmood, Y. Tang, and R. Weissleder, "Near-infrared fluorescent nanoparticles as combined MR/optical imaging probes.," *Bioconjug Chem*, vol. 13, no. 3, pp. 554–560, 2002, doi: 10.1021/BC015555D.

[135] Y. E. Kesim, "Ald grown zno as an alternative material for plasmonic and uncooled infrared imaging applications," Bilkent Universitesi, 2014. Accessed: Mar. 30, 2023. [Online]. Available: https://core.ac.uk/display/52926405?source=1&algorithmId=15&similarToDoc=52923596&similarToDocKey=CORE&recSetID=80bf561f-4d80-4a6e-beb8-58278a16672c&position=4&recommendation_type=same_repo&otherRecs=480563030,154803930,52936873,52926405,52926415

[136] G. V Naik, "New materials and devices for plasmonics and metamaterial applications," *Theses and Dissertations Available from ProQuest*, Jan. 2013, Accessed: Mar. 30, 2023. [Online]. Available: https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI3605040

[137] J. S. G. Bouillard, W. Dickson, D. P. O'Connor, G. A. Wurtz, and A. V. Zayats, "Low-temperature plasmonics of metallic nanostructures," *Nano Lett*, vol. 12, no. 3, pp. 1561–1565, Feb. 2012, doi: 10.1021/NL204420S.

[138] M. A. Ordal *et al.*, “Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared,” *Appl Opt*, vol. 22, no. 7, pp. 1099–1119, Apr. 1983, doi: 10.1364/AO.22.001099.

[139] M. G. Blaber, M. D. Arnold, and M. J. Ford, “Search for the ideal lasmonic nanoshell: the effects of surface scattering and alternatives to gold and silver,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 113, no. 8, pp. 3041–3045, Feb. 2009, doi: 10.1021/JP810808H.

[140] Y. E. Kesim, E. Battal, and A. K. Okyay, “Plasmonic materials based on ZnO films and their potential for developing broadband middle-infrared absorbers,” *AIP Adv*, vol. 4, no. 7, p. 77106, 2014, doi: 10.1063/1.4887520.

[141] D. G. Park *et al.*, “Robust ternary metal gate electrodes for dual gate CMOS devices,” *International Electron Devices Meeting. Technical Digest (Cat. No.01CH37224)*, pp. 671–674, 2001, doi: 10.1109/IEDM.2001.979597.

[142] G. V. Naik, A. Boltasseva, and J. Kim, “Oxides and nitrides as alternative plasmonic materials in the optical range [Invited],” *Opt Mater Express*, vol. 1, no. 6, pp. 1090–1099, Oct. 2011, doi: 10.1364/OME.1.001090.

[143] G. V. Naik, V. M. Shalaev, and A. Boltasseva, “Alternative plasmonic materials: Beyond gold and silver,” *Advanced Materials*, vol. 25, no. 24, pp. 3264–3294, Jun. 2013, doi: 10.1002/ADMA.201205076/ABSTRACT.

[144] U. Guler, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev, “Refractory Plasmonics,” *Science*, vol. 344, no. 6181, pp. 263–264, Apr. 2014, doi: 10.1126/SCIENCE.1252722.

[145] U. Guler, G. V. Naik, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, and A. V. Kildishev, “Performance analysis of nitride alternative plasmonic materials for localized surface plasmon applications,” *Appl Phys B*, vol. 107, no. 2, pp. 285–291, May 2012, doi: 10.1007/S00340-012-4955-3/FIGURES/3.

[146] U. Guler *et al.*, “Local heating with lithographically fabricated plasmonic titanium nitride nanoparticles,” *Nano Lett*, vol. 13, no. 12, pp. 6078–6083, Dec. 2013, doi: 10.1021/NL4033457/SUPPL_FILE/NL4033457_SI_001.PDF.

[147] W. Li *et al.*, “Refractory Plasmonics with Titanium Nitride: Broadband Metamaterial Absorber,” *Advanced Materials*, vol. 26, no. 47, pp. 7959–7965, Dec. 2014, doi: 10.1002/ADMA.201401874.

[148] U. Guler *et al.*, “Quasi-coherent thermal emitter based on refractory plasmonic materials,” *Opt Mater Express*, vol. 5, no. 12, pp. 2721–2728, Dec. 2015, doi: 10.1364/OME.5.002721.

[149] R. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison Wesley. 2007.

[150] F. A. Trumbore, “Solid Solubilities of Impurity Elements in Germanium and Silicon*,” *Bell System Technical Journal*, vol. 39, no. 1, pp. 205–233, Jan. 1960, doi: 10.1002/J.1538-7305.1960.TB03928.X.

[151] P. R. West, S. Ishii, G. V. Naik, N. K. Emani, V. M. Shalaev, and A. Boltasseva, “Searching for better plasmonic materials,” *Laser Photon Rev*, vol. 4, no. 6, pp. 795–808, Nov. 2010, doi: 10.1002/LPOR.200900055.

[152] S. Q. Li *et al.*, “Infrared plasmonics with indium-tin-oxide nanorod arrays,” *ACS Nano*, vol. 5, no. 11, pp. 9161–9170, Nov. 2011, doi: 10.1021/NN203406F.

[153] M. Kanehara, H. Koike, T. Yoshinaga, and T. Teranishi, “Indium tin oxide nanoparticles with compositionally tunable surface plasmon resonance frequencies in the near-IR region,” *J Am Chem Soc*, vol. 131, no. 49, pp. 17736–17737, Dec. 2009, doi: 10.1021/JA9064415.

[154] S. Franzen, “Surface Plasmon Polaritons and Screened Plasma Absorption in Indium Tin Oxide Compared to Silver and Gold,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 112, no. 15, pp. 6027–6032, Apr. 2008, doi: 10.1021/JP7097813.

[155] S. H. Brewer and S. Franzen, “Optical properties of indium tin oxide and fluorine-doped tin oxide surfaces: Correlation of reflectivity, skin depth, and plasmon frequency with conductivity,” *J Alloys Compd*, vol. 338, no. 1-2 SPEC., pp. 73–79, May 2002, doi: 10.1016/S0925-8388(02)00217-7.

[156] J. Kim, G. V. Naik, N. K. Emani, U. Guler, and A. Boltasseva, “Plasmonic resonances in nanostructured transparent conducting oxide films,” *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 3, 2013, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2238611.

[157] G. Garcia *et al.*, “Dynamically modulating the surface plasmon resonance of doped semiconductor nanocrystals,” *Nano Lett*, vol. 11, no. 10, pp. 4415–4420, Aug. 2011, doi: 10.1021/NL202597N.

[158] B. T. Diroll *et al.*, “Synthesis of N-type plasmonic oxide nanocrystals and the optical and electrical characterization of their transparent conducting films,” *Chemistry of Materials*, vol. 26, no. 15, pp. 4579–4588, Aug. 2014, doi: 10.1021/CM5018823/SUPPL_FILE/CM5018823_SI_002.PDF.

[159] S. Q. Li *et al.*, “Plasmonic-Photonic Mode Coupling in Indium-Tin-Oxide Nanorod Arrays,” *ACS Photonics*, vol. 1, no. 3, pp. 163–172, Mar. 2014, doi: 10.1021/PH400038G.

[160] J. Kim, A. Dutta, B. Memarzadeh, A. V. Kildishev, H. Mosallaei, and A. Boltasseva, “Zinc Oxide Based Plasmonic Multilayer Resonator: Localized and Gap Surface Plasmon in the Infrared,” *ACS Photonics*, vol. 2, no. 8, pp. 1224–1230, Aug. 2015, doi: 10.1021/ACSPHOTONICS.5B00318/SUPPL_FILE/PH5B00318_SI_001.PDF.

[161] S. A. Gregory, Y. Wang, C. H. De Groot, and O. L. Muskens, “Extreme Subwavelength Metal Oxide Direct and Complementary Metamaterials,” *ACS Photonics*, vol. 2, no. 5, pp. 606–614, May 2015, doi: 10.1021/ACSPHOTONICS.5B00089.

[162] J. Kim *et al.*, “Controlling the Polarization State of Light with Plasmonic Metal Oxide Metasurface,” *ACS Nano*, vol. 10, no. 10, pp. 9326–9333, Oct. 2016, doi: 10.1021/ACSNANO.6B03937/ASSET/IMAGES/MEDIUM/NN-2016-039379_0009.GIF.

[163] F. Monticone, N. M. Estakhri, and A. Alù, “Full Control of Nanoscale Optical Transmission with a Composite Metascreen,” *Phys Rev Lett*, vol. 110, no. 20, p. 203903, May 2013, doi: 10.1103/PhysRevLett.110.203903.

[164] H. Caglayan, S. H. Hong, B. Edwards, C. R. Kagan, and N. Engheta, “Near-infrared metatronic nanocircuits by design,” *Phys Rev Lett*, vol. 111, no. 7, p. 073904, Aug. 2013, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.111.073904/FIGURES/4/MEDIUM.

[165] H. W. Verleur, A. S. Barker, and C. N. Berglund, “Optical Properties of VO2 between 0.25 and 5 eV,” *Physical Review*, vol. 172, no. 3, p. 788, Aug. 1968, doi: 10.1103/PhysRev.172.788.

[166] T. Paik *et al.*, “Solution-processed phase-change VO2 metamaterials from colloidal vanadium oxide (VOx) nanocrystals,” *ACS Nano*, vol. 8, no. 1, pp. 797–806, Jan. 2014, doi: 10.1021/NN4054446/SUPPL_FILE/NN4054446_SI_001.PDF.

[167] S. Law, L. Yu, A. Rosenberg, and D. Wasserman, “All-semiconductor plasmonic nanoantennas for infrared sensing,” *Nano Lett*, vol. 13, no. 9, pp. 4569–4574, Sep. 2013, doi: 10.1021/NL402766T/ASSET/IMAGES/MEDIUM/NL-2013-02766T_0006.GIF.

[168] D. Slocum *et al.*, “Funneling Light Through a Subwavelength Aperture with Epsilon-Near-Zero Materials,” *Phys Rev Lett*, vol. 107, no. 13, Mar. 2011, doi: 10.1103/PhysRevLett.107.133901.

[169] A. N. Grigorenko, M. Polini, and K. S. Novoselov, “Graphene plasmonics,” *Nature Photonics* , vol. 6, no. 11, pp. 749–758, Nov. 2012, doi: 10.1038/nphoton.2012.262.

[170] L. Ju *et al.*, “Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials,” *Nat Nanotechnol*, vol. 6, no. 10, pp. 630–634, Sep. 2011, doi: 10.1038/nnano.2011.146.

[171] F. H. L. Koppens, D. E. Chang, and F. J. García De Abajo, “Graphene plasmonics: A platform for strong light-matter interactions,” *Nano Lett*, vol. 11, no. 8, pp. 3370–3377, Aug. 2011, doi: 10.1021/NL201771H/SUPPL_FILE/NL201771H_SI_001.PDF.

[172] M. Jablan, H. Buljan, and M. Soljačić, “Plasmonics in graphene at infrared frequencies,” *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 80, no. 24, p. 245435, Dec. 2009, doi: 10.1103/PHYSREVB.80.245435/FIGURES/5/MEDIUM.

[173] E. H. Hwang and S. Das Sarma, “Dielectric function, screening, and plasmons in two-dimensional graphene,” *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 75, no. 20, p. 205418, May 2007, doi: 10.1103/PHYSREVB.75.205418/FIGURES/2/MEDIUM.

[174] M. R. Vogt, “Development of Physical Models for the Simulation of Optical Properties of Solar Cell Modules,” 2015. Accessed: Mar. 31, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/303300115_Development_of_Physical_Models_for_the_Simulation_of_Optical_Properties_of_Solar_Cell_Modules

[175] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic. Orlando, 1985.

[176] F. Ali and S. Aksu, “A hybrid broadband metalens operating at ultraviolet frequencies,” *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-81956-4.

[177] E. Aslan and E. Aslan, “A Microlens by Gallium Doped Zinc Oxide-Nanoantenna,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 8, no. 3, pp. 931–942, Sep. 2020, doi: 10.21923/JESD.784056.

[178] E. Bayati, R. Pestourie, S. Colburn, Z. Lin, S. G. Johnson, and A. Majumdar, “Inverse Designed Metalenses with Extended Depth of Focus,” *ACS Photonics*, vol. 7, no. 4, pp. 873–878, Apr. 2020, doi: 10.1021/ACSPHOTONICS.9B01703/ASSET/IMAGES/LARGE/PH9B01703_0004.JPEG.

[179] E. Aslan, “Lensing for optical communication by diffraction from Peano curve-based fractal with alternative plasmonic material,” *Optik (Stuttg)*, vol. 242, p. 167072, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.IJLEO.2021.167072.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı: Büşra Ersoy

Uyruğu: Türkiye (T.C.)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Kayseri Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.	2023
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Böl.	2020
Lise	Sema Yazar Anadolu Lisesi	2015

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Kitap &Kitap Bölümleri

- Ersoy B., Aslan E., Aslan E. (2023). "Axicon Metalens Design with Gold Aperture-Based Nanoantennas". Hikmet Y. Çoğun, İshak Parlar, Hasan Üzmuş (Editörler). ***Current Debates on Natural and Engineering Sciences 9.*** 1.baskı. Ankara. Bilgin Kültür Sanat Yayınları, ss. 83-92.
- Ersoy B., Aslan E., Aslan E. (2023). "Multifocal Metalens with Titanium Nitride Aperiodic Nanoapertures For Fiber Optical Wavelengths". Hikmet Y. Çoğun, İshak Parlar, Hasan Üzmuş (Editörler). ***Current Debates on Natural and Engineering Sciences 9.*** 1.baskı. Ankara. Bilgin Kültür Sanat Yayınları, ss. 93-105.

Uluslararası Hakemli Kongre / Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar

- Ersoy B., Aslan E., Aslan E. (2023, 24-25 Mayıs). Axicon Metalens Design with Gold Aperture-Based Nanoantennas. 3. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi'nde sunuldu (ICENSS2023), Ankara.
- Ersoy B., Aslan E., Aslan E. (2023, 24-25 Mayıs). Multifocal Metalens with Titanium Nitride Aperiodic Nanoapertures For Fiber Optical Wavelengths. 3. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi'nde sunuldu (ICENSS2023), Ankara.

PROJELER

Aslan E. (Yürütücü), Aslan E. (Araştırmacı), Gümüşcü D. (Araştırmacı), Ersoy B. (Araştırmacı) (2022-2023). Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Tungsten Disülfit Destekli Plazmonik Metayüzey Tasarımı.

Aslan E. (Yürütücü), Aslan E. (Araştırmacı), Ersoy B. (Araştırmacı) (2022-2023). Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) destekli 121E518 numaralı Kızılötesi ve Görünür Dalga Boyları için Meta-Lenslerin Tasarım, Üretim ve Karakterizasyonu

BURSLAR

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ARDEB 1001 Bursiyeri (Proje No : 121E518)