



Numerical analysis of spectrally tunable and polarization independent dual band plasmonic perfect absorber

Mustafa Kırilar*^{ID}, Mustafa Türkmen^{ID}

Department of Electrical and Electronics Eng., Faculty of Engineering, Erciyes University, 38039, Kayseri, Türkiye

Highlights:

- Near-unity absorption in dual band
- Spectral tunability
- Polarization insensitivity
- High near-field enhancement

Graphical/Tabular Abstract

In this paper, a novel dual band plasmonic perfect absorber nanoantenna arrays consisting of horizontal and vertical nanorods for mid-infrared spectroscopy applications is presented. The dependence of the spectral response on the geometrical parameters and polarization insensitivity for three different polarization angles are investigated. Near-field distributions at the corresponding resonance frequencies are also determined by using the FDTD (Finite Difference Time Domain) method. Due to its tunable spectral characteristics, polarization insensitivity, enhanced electric and magnetic field responses, the proposed plasmonic perfect absorber can be a good candidate for mid-infrared spectroscopy applications.

Keywords:

- Perfect absorbers
- Plasmonics
- Bio sensing applications
- Nano photonic

Article Info:

Research Article

Received: 01.06.2021

Accepted: 25.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.946218

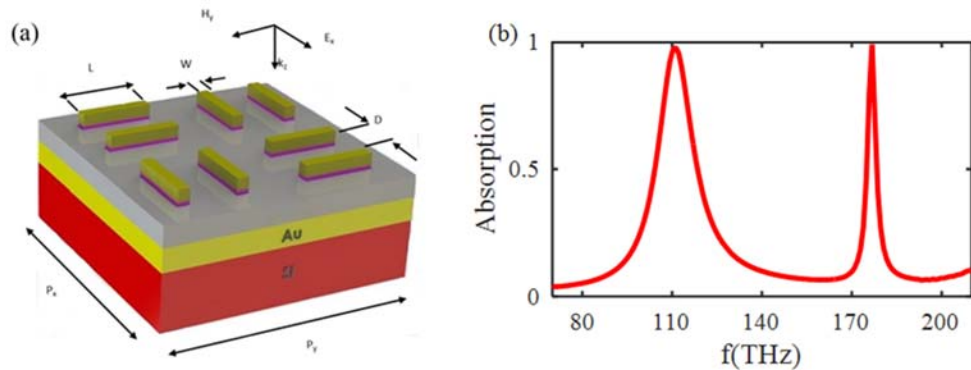


Figure A. (a) Plasmonic perfect absorber unit cell (b) Absorption spectrum response [8].

Correspondence:

Author: Mustafa Kırilar

e-mail:

mustafakirilar@erciyes.edu.tr

phone: +90 352 207 6666 /

32279

Purpose:

The aim of the study is to design perfect absorber devices with spectrally tunable, near-unity absorption, multi-band, polarization insensitive for mid-infrared spectroscopy.

Theory and Methods:

Numerical analysis of the structure are carried out with the help of the Lumerical FDTD software. FDTD Solutions has an interface that allows making 3D designs. With this program, reflection and transmission characteristics of the designed the perfect absorber nanoantenna arrays in frequency and time domain are obtained and the absorption characteristic is determined based on these results. Electric and magnetic field distributions at determined resonance frequencies of the created structures can be obtained with field monitors placed in desired areas of the structure.

Results:

The proposed perfect absorber structure absorbs the incident laser beam over 98% in lower frequency mode and over 99% in higher frequency mode. The structure is also polarization insensitive and spectrally tunable.

Conclusion:

In this study, a novel plasmonic perfect absorber that can be used in mid-infrared spectroscopy applications is presented. It is observed that the resonance response of perfect absorber is highly dependent on geometric parameters and thus the resonance frequency can be easily tuned by changing the geometry of the structure. Thanks to the tunable spectral response, high electric and magnetic field gains, and the structure being polarization independent, the proposed plasmonic perfect absorber can be used in mid-infrared spectroscopy applications.



Spektral olarak ayarlanabilir ve polarizasyon bağımsız çift bant plazmonik mükemmel soğurucunun sayısal analizi

Mustafa Kırklar*^{ID}, Mustafa Türkmen^{ID}

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Çift bantta mükemmel soğurum
- Spektral olarak ayarlanabilirlik
- Kutuplanma bağımsızlığı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.06.2021

Kabul: 25.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.946218

Anahtar Kelimeler:

Mükemmel soğurucular,
plazmonikler,
biyo algılama uygulamaları,
nano fotonik

ÖZ

Bu çalışmada, orta kızılötesi bölgede çalışan çift bant rezonans frekansına sahip yeni bir plazmonik mükemmel soğurucu yapısı sunulmuştur. Yapının analizleri, Lumerical FDTD isimli elektromanyetik analiz programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen mükemmel soğurucu yapısı, gelen ışını düşük frekans modunda %98' in üzerinde ve yüksek frekans modunda % 99' un üzerinde soğurmaktadır. Soğurma mekanizmasında etkili bir rol oynayan iletken ve dielektrik tabaka kalınlıklarının değişimi incelenerek çalışmada kullanılacak olan kalınlık değerleri belirlenmiştir. Dielektrik tabaka üzerine konumlandırılmış nanoanten dizisinin geometrik parametreleri değiştirilerek bu parametrelerin rezonans modlara etkisi incelenmiş ve bu modların ayarlanabilirliği nanoanten dizisi için analiz edilmiştir. Yapının kutupluluktan bağımsızlığı üç farklı kutuplanma açısı için analiz edilmiştir. İncelenen açı değerlerinde yapının kutupluluktan bağımsız olduğu ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca yük yoğunluğu dağılımları ile rezonans modları için elektrik ve manyetik alan dağılımlarının soğurma spektrumları incelenmiştir. Sunulan yapı gelen ışığı elektrik alanda 100 kata kadar, manyetik alanda 40 kata kadar güçlendirebilmektedir. Ayarlanabilir spektral özellikleri, kutupluluktan bağımsız olması, güçlendirilmiş elektrik ve manyetik cevapları sayesinde önerilen plazmonik mükemmel soğurucu, orta kızılötesi spektroskopi uygulamalarında kullanılabilir.

Numerical analysis of spectrally tunable and polarization independent dual band plasmonic perfect absorber

HIGHLIGHTS

- Near-unity absorption in dual band
- Spectral tunability
- Polarization insensitivity

Article Info

Research Article

Received: 01.06.2021

Accepted: 25.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.946218

Keywords:

Perfect absorbers,
plasmonics,
bio sensing applications,
nano photonics

ABSTRACT

In this study, a novel plasmonic perfect absorber (PA) structure with dual band resonance frequency operating in the mid-infrared region is presented. The analysis of the structure is carried out with the help of the electromagnetic analysis program called Lumerical FDTD. The proposed PA absorbs the incident beam over 98% in lower frequency mode and over 99% in higher frequency mode. The thickness values to be used in the structure are determined by variation of conductor and dielectric layer thicknesses, which play an effective role in the absorption mechanism. By changing the geometric parameters of the nanoantenna arrays positioned on the dielectric layer, the effects of these parameters on the resonance modes are investigated and the tunability of these modes is analyzed. Polarization independence is analyzed for three different polarization angles. It is observed that the structure is insensitive to polarization at the studied angle values. In the study, the charge density distributions and the absorption spectra of the electric and magnetic field distributions for resonance modes are also investigated. The proposed structure can enhance the incident light up to 100 times in the electric field and up to 40 times in the magnetic field. Due to its tunable spectral characteristics, polarization insensitivity, enhanced electric and magnetic field responses, the proposed plasmonic PA can be used in mid-infrared spectroscopy applications.

1. Giriş (Introduction)

Metamalzemeler, yapay olarak üretilebilen ve mikroskobik yapıları ile geometrilerine bağlı olarak optik ve elektromanyetik özellikler kazanan dalga boyu altı malzemelerdir. Metamalzemeler, son yıllarda, olağanüstü elektromanyetik özellikleri ve üstün soğurma verimlilikleri sayesinde büyük ilgi görmektedir. Söz konusu özelliklere örnek olarak negatif kırılma [1], yüksek yakın alan güçlendirme [2, 3], süper lensler [4] ve mükemmel soğurucular [5-8] verilebilir.

Mükemmel soğurucular, dar bir frekans aralığında üzerine düşen ışığı yüzde yüze yakın soğurma sağlayabilen metamalzemelerdir [9-12]. Performansları empedans eşleşmesine dayanır ve empedanslarını ($Z = \mu / \epsilon$) çevreleyen ortamınkiyle eşleşecek şekilde ayarlayarak hem elektrik hem de manyetik rezonansları desteklerler [12, 13]. Bu eşleşme, gelen ışığın büyük ölçüde soğurulması için sıfır yansıma katsayısına sebep olur. Bu nedenle, bir metal levha ile iletim zayıflatılırken empedans uyumu ile yansımayı en aza indirmek, mükemmel soğurma elde edilmesini sağlar. Metal-dielektrik-metal katmanlardan oluşan mükemmel soğurucu yapılarında, üst metal katman, rezonatör görevi gören dalga boyu altı antenlerle desenlenir ve alt kısım, geçirgenliği önemli ölçüde azaltan bir optik ayna görevi görmektedir [14]. Işığın oda sıcaklığında nanoantennelere hapsedilmesi bir elektrik alanı indüklerken, antenler ve metal levha arasındaki yakın alan bağlantıları alt katmanda ayna görüntüsü yüklerine neden olur. Bu durum manyetik alanı indükleyen bir akım döngüsü oluşturur [15].

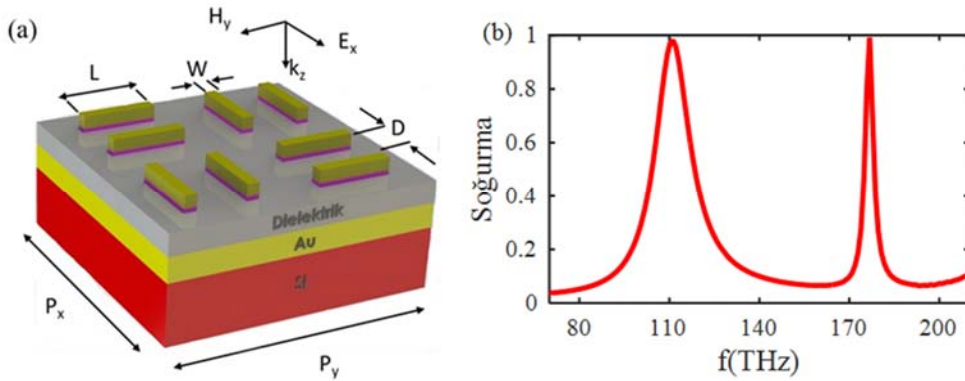
Mükemmel soğurucu yapılarında plazmonik rezonanslar, belirli frekanslarda yapıyı çevreleyen dielektrik ortama bağlıdır [16]. Bu nedenle, mükemmel soğurucular son derece hassas spektroskopik uygulamalarında, yüzeyde artırılmış kızılötesi soğurma spektroskopisi (SEIRA: Surface-Enhanced Infrared Absorption) kullanılmıştır [13, 16]. SEIRA uygulamaları; yakın alan güçlendirme, kutupluluktan bağımsız, multi spektral soğurma ve ayarlanabilir rezonans modlarına ihtiyaç duymaktadır.

Bununla birlikte, mükemmel soğurucular elde etmek, dalga boyu altı antenlerin plazmonik rezonanslarının bulunduğu dar bir spektral pencere içinde sınırlıdır. Bu problem, çoklu rezonansları destekleyen nanoparçacık temelli konfigürasyonlar kullanılarak çözülebilir [17-19]. Son zamanlarda, mikrodalgadan yakın kızılötesi frekans aralıklarına kadar çeşitli uygulamalara hizmet etmek için farklı çok bantlı ve geniş bantlı mükemmel soğurucu yapıları literatüre sunulmuştur [20-23].

Bu çalışmada, orta kızılötesi bölgede çalışan parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin karakterizasyonu ve tasarımı analiz edilmiştir. Yapıyı oluşturan tabaka kalınlıkları ve geometrik parametre değişiminin simülasyonları ile rezonans modların spektral tepkisi ve ayarlanabilirliği nanoanten dizisi için analiz edilmiştir. Biyoalgılama uygulamaları için kritik bir çalışma olan kutupluluk bağımsızlığı farklı kutuplanma açıları için incelenmiştir. Yük yoğunluğu dağılımları ile rezonans modları için manyetik ve elektrik alan dağılımları incelenmiştir. Parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının yatay ve dikey altın çubuklar arasındaki yakın alan kuplajından ve altın çubukların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Düşük ve yüksek rezonans modlarının desteğiyle; kutupluluktan bağımsızlık, yakın alan güçlendirme, spektral ayarlanabilirlik ve neredeyse yüzde yüze yakın soğurma kabiliyeti sayesinde, önerilen nanoanten dizisi, çok bantlı biyomoleküler algılama uygulamalarında kullanılabilir.

2. Teorik Metot (Theoretical Method)

Sunulan teorik çalışmada simülasyonlar Lumerical FDTD isimli elektromanyetik analiz programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir [24]. Parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi Şekil 1a'da gösterilmektedir. Burada $D = 400 \text{ nm}$; altın nanoçubuklar arasındaki mesafeyi, $L = 600 \text{ nm}$; altın nanoçubukların uzunluğunu ve $W = 100 \text{ nm}$; altın nanoçubukların genişliğini göstermektedir. Dizinin periyotları $P_x = P_y = 2200 \text{ nm}$ 'dir. Nanoanten dizisi, silikon (Si) üzerinde kaplı altın (Au) tabaka üzerine dielektrik ara katman alüminyum oksit (Al_2O_3) ve yatay ve dikey olarak yerleştirilmiş ikili altın nanoçubukların altına yerleştirilen titanyum (Ti) yapıştırıcıdan oluşmaktadır [8]. Yapıyı oluşturan blokların kalınlığı aşağıdan yukarıya, Silisyum (Si) 500 nm, Altın (Au) 100 nm, Alüminyum Oksit (Al_2O_3) 90 nm, Titanyum (Ti) 5 nm, birbirlerine dik olarak konumlandırılmış altın nanoçubukların kalınlığı ise 110 nm'dir. FDTD simülasyonlarında, Al_2O_3 dielektrik katmanının kırılma indisi 1,76 olarak alınmıştır [25]. Ayrıca altın ve titanyum için gerçekçi dağılım verileri referans [42]'tan alınmıştır. Simülasyonlar x polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z ekseni boyunca kullanılmıştır. Ayrıca simülasyonlar yapılırken kullanılan geniş bant düzlem dalga kaynağının nanoanten dizisi üzerine dik konumlanmış k vektörü Şekil 1a'da gösterilmektedir. Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin soğurma spektral cevabı Şekil 1b'de gösterilmektedir. Nanoanten dizisinin, soğurma (absorption; A) spektrumu $A = I - R - T$ formülü



Şekil 1. (a) Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin birim hücresi, yukarıdan aşağıya doğru katmanlar, Au nanoanten dizileri, Ti yapıştırma katmanı, Al_2O_3 dielektrik katman, Au film katmanı ve Si substrat. (b) Soğurma spektrum cevabı.

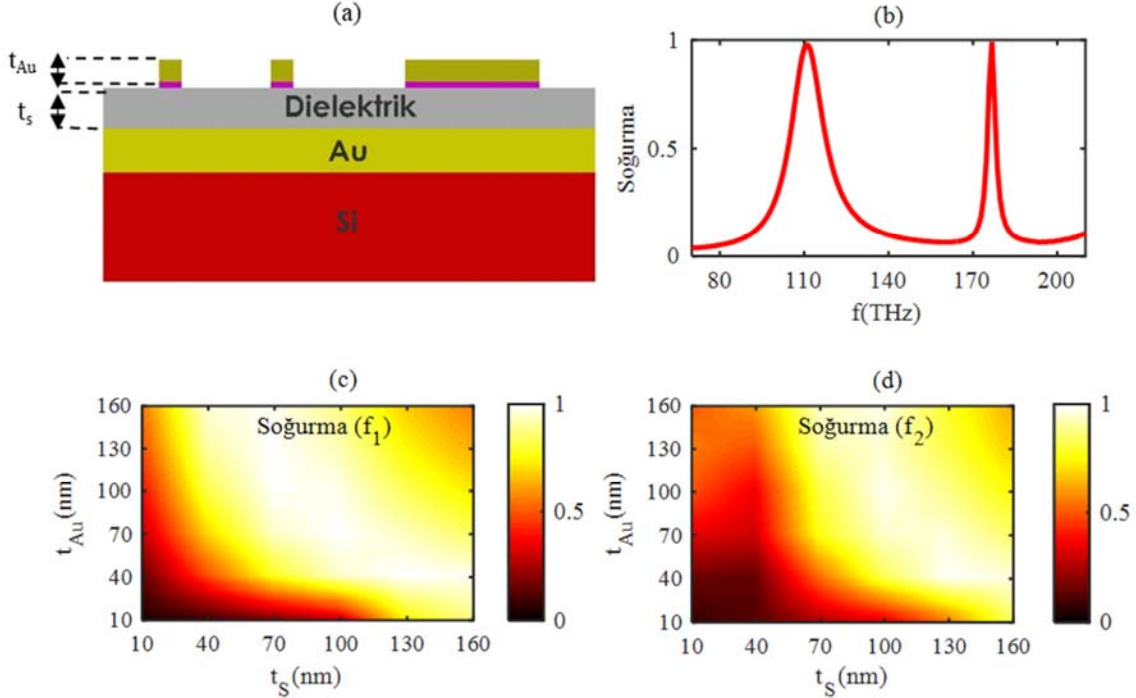
((a) Unit cell of the perfect absorber nanoantenna arrays, layers from top to bottom, Au nanoantenna arrays, Ti adhesive layer, Al_2O_3 dielectric layer, Au film layer and Si substrate (b) Spectrum response of the absorption.)

ile hesaplanmıştır [8]. Bu formülde R parametresi ile yansımaya (reflectance) ve T parametresi ile iletim (transmittance) değerleri ifade edilmektedir. Formülden anlaşılacağı üzere mükemmel soğurma elde edebilmek için yansımaya ve iletime olmamalıdır. Şekil 1b'de görüldüğü gibi parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çift bant rezonans cevabına sahiptir.

2.1. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi (The effect of geometric parameter variations on resonance frequency)

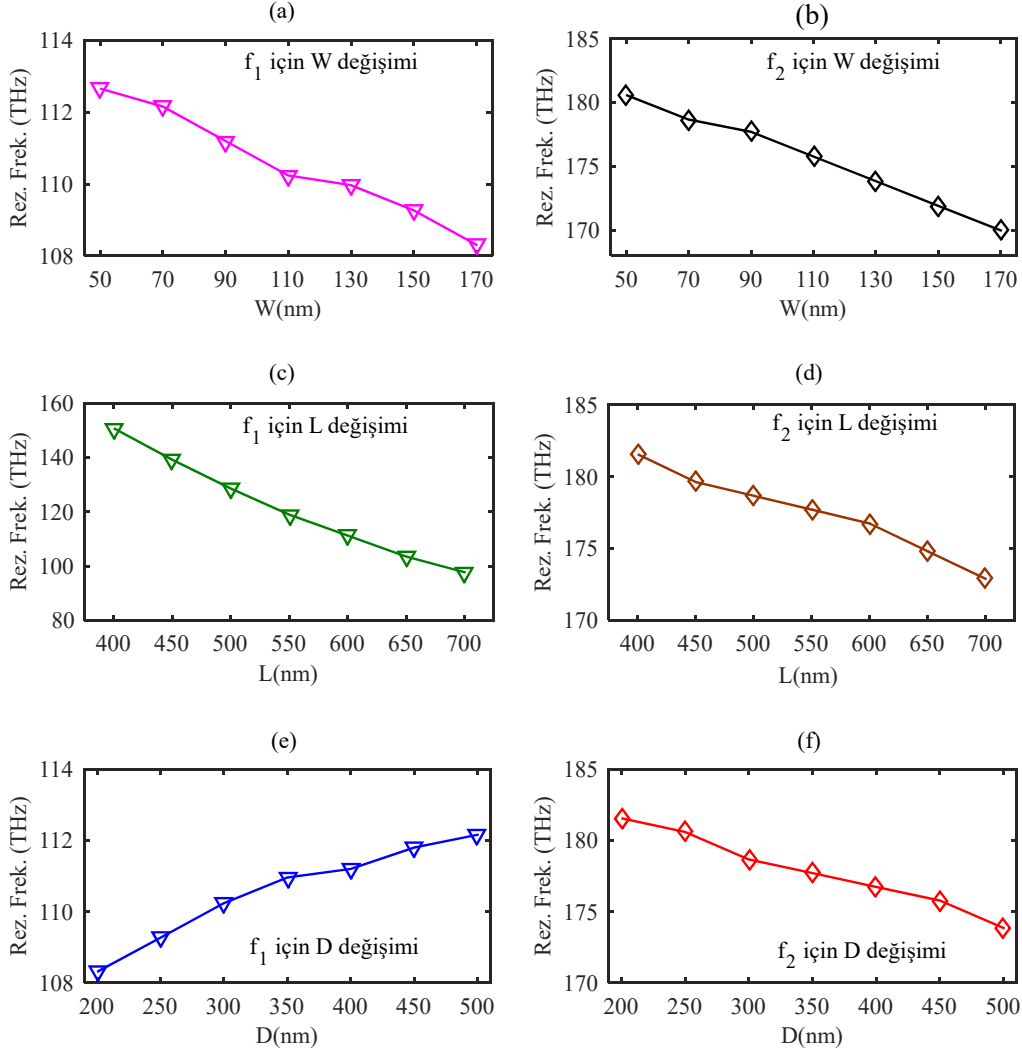
Tasarlanan nanoanten dizisi için elde edilen spektral cevap, dizinin periyodu, altın nanoçubukların kalınlığı, dielektrik ara katman kalınlığı gibi parametrelere bağlı olduğu kadar rezonatör görevi gören anten dizilerinin D , L , W gibi boyut parametrelerine de bağlıdır. Tabaka kalınlığının soğurma genliğine etkisini inceleyebilmek için dielektrik ara katman (Al_2O_3) kalınlığı (t_s) ve altın nanoçubuk kalınlığı (t_{Au}) 10 nm'den başlanarak 160 nm'ye kadar 30'ar nm aralıklarla değiştirilmiştir. Şekil 2a'da tasarlanan parçacık tabanlı nanoanten dizisinin kesit görünüşü ve kalınlık ifadelerinin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2c ve Şekil 2d'de ise sırasıyla düşük frekans modunda ($f_1 = 111,21$ THz, $\lambda_1 = 2695$ nm) ve yüksek frekans modunda ($f_2 = 176,75$ THz, $\lambda_2 = 1696$ nm) tabaka kalınlığı değişiminin soğurma genliğine etkisi görülmektedir. t_s ve t_{Au} parametrelerinin yüksek ve düşük değerlerinde soğurma genliğinin düştüğü Şekil 2c ve Şekil 2d'de görülmektedir. Bu çalışmada yapılacak simülasyonlarda mükemmel bir soğurma elde edebilmek için t_s ve t_{Au} parametreleri sırasıyla 90 nm ve 110 nm olarak seçilecektir. Bu değerlerin seçilme sebebi Şekil 2c ve Şekil 2d'den de anlaşılacağı üzere her iki rezonans modu için mükemmel soğurmanın bu değerlerde elde edilmesidir. Şekil 2b'de t_s ve t_{Au} parametrelerinin sırasıyla 90 nm ve 110 nm olarak alınıp diğer geometrik

parametrelerin ise $D = 400$ nm, $L = 600$ nm ve $W = 100$ nm dizinin periyodunun x ve y eksenleri boyunca $P_x = P_y = 2200$ nm olarak sabit tutulduğu ve mükemmel bir soğurma elde edildiği grafik gösterilmektedir. Biyoalgılama uygulamaları için, özellikle SEIRA uygulamalarında, parçacık boyutlarının değiştirilerek plazmonik rezonans frekanslarının ayarlanabilmesi arzu edilen bir durumdur. Bu amaçla; yapıyı oluşturan blokların kalınlık değişimlerinin yanı sıra, rezonatör görevi gören altın nanoçubukların geometrik parametre değişimleri de incelenmiştir [8]. Şekil 3a ve Şekil 3b'de altın nanoçubukların genişliğini temsil eden W parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. İncelenen değerlerde düşük ve yüksek frekans modunda, W parametresinin artan değerleri için rezonans frekansının düştüğü söz konusu şekillerden görülebilmektedir. Şekil 3c ve Şekil 3d'de ise altın nanoçubukların uzunluğunu temsil eden L parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. L uzunluğu arttıkça düşük ve yüksek frekans modu için rezonans frekansı değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3e ve Şekil 3f'de altın nanoçubuklar arasındaki mesafeyi temsil eden D parametre değişiminin sırasıyla düşük ve yüksek frekans modları için rezonans frekansına etkisi gösterilmiştir. Düşük frekans modu için altın nanoçubuklar arasındaki mesafe arttıkça rezonans frekansının da arttığı görülürken yüksek frekans modu için bu durumun tam tersi olduğu görülmektedir. Burada incelenen altın nanoçubuk boyutlarının artan-azalan parametre değişimleriyle yapının rezonans frekansının ayarlanabildiği gösterilmektedir. Dolayısıyla sunulan yapı spektral olarak ayarlanabilir özellik sergilemektedir. Altın nanoçubukların parametre değişimleri incelenirken tabaka kalınlıkları ve dizinin periyodu sırasıyla $t_{Au} = 110$ nm, $t_s = 90$ nm ve $P_x = P_y = 2200$ nm olarak alınmıştır.



Şekil 2. (a) Mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin enine kesit şematik gösterimi. (b) $t_s = 90$ nm ve $t_{Au} = 110$ nm için soğurma spektrumu, (c) $f_1 = 111,21$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurma genliğine etkisi, (d) $f_2 = 176,75$ THz için tabaka kalınlığı değişiminin soğurma genliğine etkisi.

(a) Cross-sectional schematic representation of the perfect absorber nanoantenna arrays, (b) Absorption spectrum for $t_s = 90$ nm and $t_{Au} = 110$ nm (c) The effect of variation in layer thickness on the absorption amplitude for $f_1 = 111,21$ THz, (d) The effect of variation in layer thickness on the absorption amplitude for $f_2 = 176,75$ THz.)



Şekil 3. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi, (a, b) W değişimi, $D = 400 \text{ nm}$ ve $L = 600 \text{ nm}$, (c, d) L değişimi, $D = 400 \text{ nm}$ ve $W = 100 \text{ nm}$, (e, f) D değişimi, $W = 100 \text{ nm}$ ve $L = 600 \text{ nm}$.
(The effect of geometric parameter variations on resonance frequency (a, b) W variation, $D = 400 \text{ nm}$ and $L = 600 \text{ nm}$, (c, d) L variation, $D = 400 \text{ nm}$ and $W = 100 \text{ nm}$, (e, f) D variation, $W = 100 \text{ nm}$ and $L = 600 \text{ nm}$.)

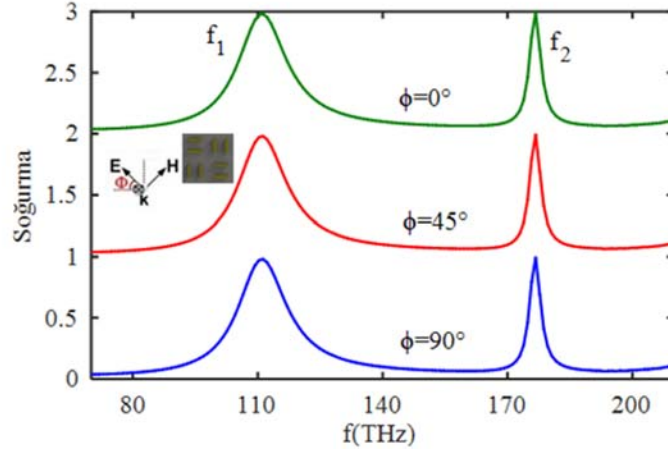
2.2. Kutupluluktan Bağımsızlığın Farklı Açılar için İncelenmesi (Investigation of Polarization Insensitivity for Different Angles)

Mükemmel soğurucuların spektral tepkilerinin geometrilerine bağlı olarak kutuplanmaya duyarlı olması, bu aygıtların biyoalgılama sistemlerinde kullanımı için bir kısıtlamadır. Bu nedenle kutupluluktan bağımsız plazmonik algılama cihazlarına ihtiyaç vardır. Bu bağlamda sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi çalışılan frekans aralığında kutuplanma bağımlılığı sorununu çözmekte ve ayarlanabilir çift bantlı rezonanslar sağlamaktadır. Şekil 4'de Φ kutuplanma açısının 0° , 45° ve 90° değerleri için soğurma spektrumunun neredeyse aynı kaldığı görülmektedir. Soğurma spektrumu grafiğinde kutuplanma açısının farklı değerlerinde çakışmayı önlemek için eğriler 1° er birim kaydırılarak çizdirilmiştir.

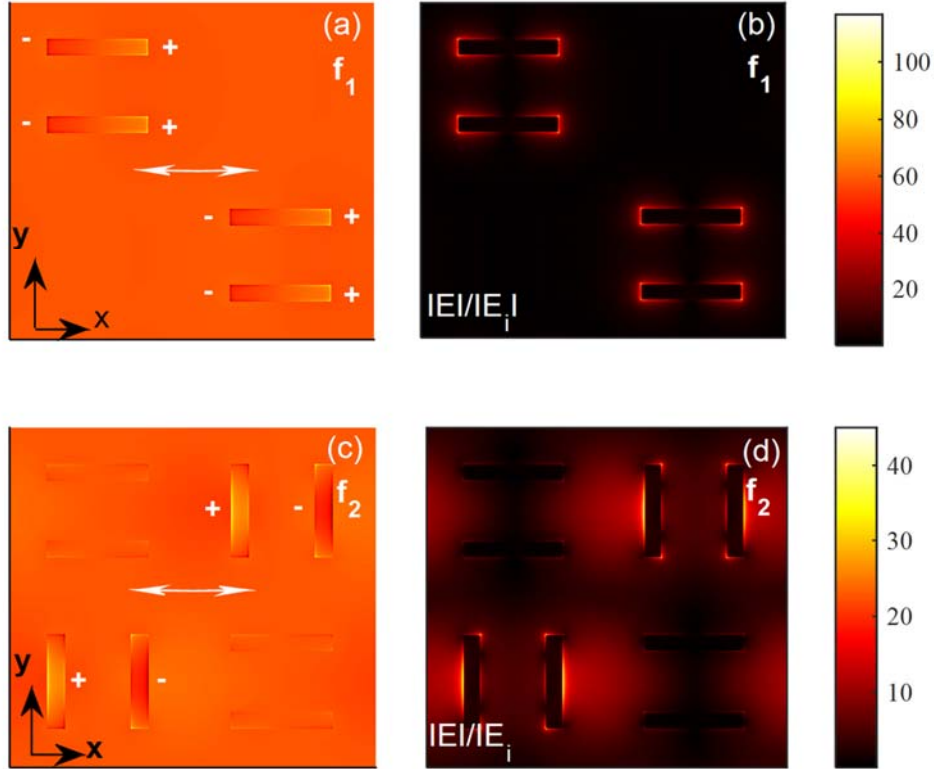
2.3. Soğurma mekanizmasının araştırılması (Investigation of the absorption mechanism)

Tasarlanan mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin rezonans modlarındaki yük yoğunluğu ile elektrik alan dağılımları bize soğurma rezonanslarının kökeni hakkında fikir verir. Şekil 5a'da

düşük frekans modu için altın nanoçubukların alt ara yüzeyinde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. X eksenine paralel yatay yönlendirilmiş ikili nanoçubuklar etrafında yüklerin dipolar bir salınımı görülmektedir. Şekil 5b'de ise düşük frekans modu için altın nanoçubukların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E_x/E_0|$) görülmektedir. Elektrik alan, Şekil 5a'da görüldüğü üzere yatay yönlendirilmiş nanoçubukların dipolar karakteristiği sebebiyle uç kısımlarda oldukça fazladır. Yüksek frekans modu için Şekil 5c'de altın nanoçubukların alt kısmındaki ara yüzeyde yük yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Bu modda yüklerin dikey yönlendirilmiş ikili nanoçubuklar üzerinde dağıldığı görülmektedir. Yüksek frekans modu için altın nanoçubukların alt kısmındaki ara yüzeyde elektrik alan dağılımı ($|E_x/E_0|$) Şekil 5d'de verilmiştir. Şekil 5b ve Şekil 5d'de sırasıyla elektrik alan dağılımının yatay ve dikey ikili nanoçubukların uç kısımlarında gelen ışığın şiddetine oranla 100 kattan ve 40 kattan fazla güçlendirildiği görülmektedir. Tasarlanan nanoanten dizisinin elektrik alan değerlerinin yüksek olması ile ışık-madde etkileşimi artacağı için sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi yüksek elektrik alan değerleri ile SEIRA temelli biyosensör uygulamalarında kullanılabilir.



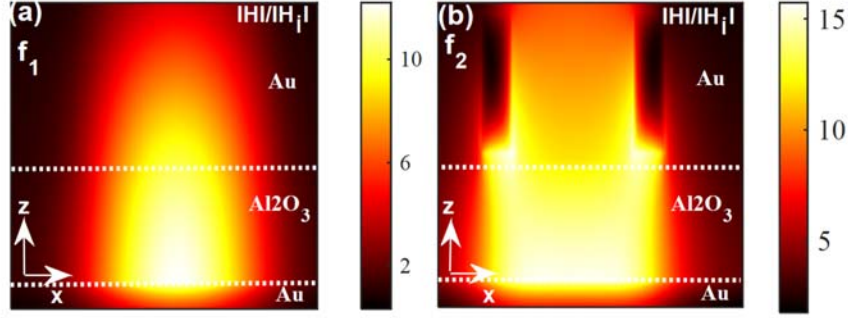
Şekil 4. Kutupluluk bağımsızlığının farklı açılar için incelenmesi ve “ k ” vektörünün birim hücreye göre yönelimi. (Investigation of polarization insensitivity for different angles and the orientation of the vector “ k ” with respect to the unit cell).



Şekil 5. Altın nanoçubukların alt ara yüzeyinde; $f_1 = 111,21 \text{ THz}$ için (a) yük yoğunluğu dağılımı, (b) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). $f_2 = 176,75 \text{ THz}$ için (c) yük yoğunluğu dağılımı, (d) elektrik alan dağılımı ($|E|/|E_i|$). (At the lower interface of the gold nanorods; for $f_1 = 111,21 \text{ THz}$ (a) charge density distribution, (b) electric field distribution ($|E|/|E_i|$). For $f_2 = 176,75 \text{ THz}$ (c) charge density distribution, (d) electric field distribution ($|E|/|E_i|$).

Soğurma rezonans modlarının fiziksel kökenini daha iyi anlayabilmek için altın nanoçubuklar ve altın tabaka düzlemi arasındaki bölgede manyetik alan dağılımı incelenmiştir. Şekil 6a’da düşük frekans modu için dielektrik tabaka içinde manyetik alan genişliğinin $y = 0$ düzleminde gelen ışığın manyetik alan genişliğine oranla 10 kattan fazla arttırıldığı görülmektedir. Şekil 6b’de ise yüksek frekans modunda aynı durumun 15 kata yaklaştığı görülmektedir. Şekil 5 ve

Şekil 6’daki sonuçlar soğurma rezonanslarının fiziksel kökeni hakkında bilgi vermektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere soğurmanın sebebi yatay ve dikey nanoçubuklar yüzeyindeki yük salınımlarıdır, bu altın parçacıklar gelen ışık enerjisini yakın alan kuplajıyla yakalar ve bu enerjiyi altın tabaka düzlemiyle altın nanoçubuklar sebep olduğu anti-paralel akımların omik kayıplarıyla dağıtır.



Şekil 6. $y = 0$ düzleminde altın nanoçubuklar ile altın tabaka düzlemi arasında manyetik alan dağılımı (a) $f_1 = 111,21$ THz için ($|H_x|/|H_0|$), (b) $f_2 = 176,75$ THz için ($|H_x|/|H_0|$) (Magnetic field distribution between gold nanorods and gold layer plane in the $y = 0$ plane (a) for $f_1 = 111,21$ THz ($|H_x|/|H_0|$), (b) for $f_2 = 176,75$ THz ($|H_x|/|H_0|$)).

3. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, spektroskopi uygulamalarında kullanılmak üzere çift bant frekans cevabına sahip parçacık tabanlı yeni bir plazmonik mükemmel soğurucu nanoanten dizisi literatüre sunulmuştur. Orta kızılötesi bölgede çalışan parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapıyı oluşturan tabaka kalınlıkları ve geometrik parametre değişiminin simülasyonları ile rezonans modların spektral tepkisi ve ayarlanabilirliği nanoanten dizisi için analiz edilmiştir. Biyoalgılama uygulamaları için kritik bir çalışma olan kutupluluk bağımsızlığı incelenmiş ve yapının farklı kutuplanma açıları için kutupluluktan bağımsız olduğu ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca yük yoğunluğu dağılımları ile rezonans modları için manyetik ve elektrik alan dağılımları incelenmiştir. Parçacık tabanlı mükemmel soğurucu nanoanten dizisinin çift bant rezonansının yatay ve dikey altın çubuklar arasındaki yakın alan kuplajından ve altın çubukların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak literatüre sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi, çift bantta %100'e yakın soğurma değerleri ve gelen ışığa oranla 100 kata kadar güçlendirme yapabilen elektrik alan ile 40 kata kadar güçlendirme yapabilen manyetik alan değerleri sayesinde elektromanyetik spektrumun orta kızılötesi bölgesinde biyoalgılama ve spektroskopi uygulamalarında kullanılabilecek karakteristiğe sahiptir. Ayarlanabilir spektral cevapları ile nanoanten dizisi, farklı rezonans frekanslarında da kullanılabilme avantajına sahiptir. Tasarlanan nanoanten dizisinin elektrik alan değerlerinin yüksek olması ile madde-ışık etkileşimi artacağı için sunulan mükemmel soğurucu nanoanten dizisi yüksek elektrik alan değerleri ile SEIRA tekniği kullanılarak biyosensör uygulamalarında kullanılabilir. Biyolojik malzemelerin rezonans frekansları büyük oranda orta kızılötesi bölgesinde olduğundan biyosensör uygulamaları için sunulan çalışma bu frekans bandında oldukça iyi bir performans göstermektedir.

Kaynaklar (References)

- Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S., Experimental verification of a negative index of refraction, *Science*, 292, 77-79, 2001.
- Cetin A.E., Turkmen M., Aksu S., Altug H., Nanoparticle-Based Metamaterials as Multiband Plasmonic Resonator Antennas, *Ieee Transactions on Nanotechnology*, 11, 208-212, 2012.
- Anam M. K. and Choi S., Bowtie Nanoantenna Array Integrated With Artificial Impedance Surfaces for Realizing High Field Enhancement and Perfect Absorption Simultaneously, *Ieee Access*, 8, 99858-99869, 2020.
- Pendry J. B., Negative refraction makes a perfect lens, *Physical Review Letters*, 85, 3966-3969, 2000.
- Wu D., Li R. F., Liu Y. M., Yu Z. Y., Yu L., Chen L., Liu C., Ma R., and Ye H., Ultra-narrow Band Perfect Absorber and Its Application as Plasmonic Sensor in the Visible Region, *Nanoscale Research Letters*, 12, 2017.
- Nguyen D. M., Lee D., and Rho J., Control of light absorbance using plasmonic grating based perfect absorber at visible and near-infrared wavelengths, *Scientific Reports*, 7, 2017.
- Wu D., Liu Y. M., Li R. F., Chen L., Ma R., Liu C., Ye H., Infrared Perfect Ultra-narrow Band Absorber as Plasmonic Sensor, *Nanoscale Research Letters*, 11, 2016.
- Aslan E., Kaya S., Aslan E., Korkmaz S., Saracoglu O.G., Turkmen M., Polarization insensitive plasmonic perfect absorber with coupled antisymmetric nanorod array, *Sensors and Actuators B-Chemical*, 243, 617-625, 2017.
- Alipour A., Mir A., and Farmani A., Ultra high-sensitivity and tunable dual-band perfect absorber as a plasmonic sensor, *Optics and Laser Technology*, 127, 2020.
- Ninawe A., Dhawan A., and Xu X. F., Numerical investigation of a narrowband absorber with a simple structure, *Osa Continuum*, 3, 3582-3594, 2020.
- Mahmud S., Islam S. S., Almutairi A. F., and Islam M. T., A Wide Incident Angle, Ultrathin, Polarization-Insensitive Metamaterial Absorber for Optical Wavelength Applications, *Ieee Access*, 8, 129525-129541, 2020.
- Ali F. and Aksu S., A Narrow-Band Multi-Resonant Metamaterial in Near-IR, *Materials*, 13, 2020.
- Cetin A. E., Korkmaz S., Durmaz H., Aslan E., Kaya S., Paiella R., and Turkmen M., Quantification of Multiple Molecular Fingerprints by Dual-Resonant Perfect Absorber, *Advanced Optical Materials*, 4, 1274-1280, 2016.
- Korkmaz S., Turkmen M., and Aksu S., Mid-infrared narrow band plasmonic perfect absorber for vibrational spectroscopy, *Sensors and Actuators a-Physical*, 301, 2020.
- Chen K., Dao T. D., Ishii S., Aono M., and Nagao T., Infrared Aluminum Metamaterial Perfect Absorbers for Plasmon-Enhanced Infrared Spectroscopy, *Advanced Functional Materials*, 25, 6637-6643, 2015.
- Aslan E., Aslan E., Turkmen M., and Saracoglu O. G., Metamaterial plasmonic absorber for reducing the spectral shift between near- and far-field responses in surface-enhanced spectroscopy applications, *Sensors and Actuators a-Physical*, 267, 60-69, 2017.
- Shu J., Gao W. L., Reichel K., Nickel D., Dominguez J., Brener I., Mittleman D. M., and Xu Q. F., High-Q terahertz Fano resonance with extraordinary transmission in concentric ring apertures, *Optics Express*, 22, 3747-3753, 2014.
- Serebryannikov A. E., Beruete M., Mutlu M., and Ozbay E., Multiband one-way polarization conversion in complementary split-ring resonator based structures by combining chirality and tunneling, *Optics Express*, 23, 13517-13529, 2015.

19. Jahn M., Patze S., Hidi I. J., Knipper R., Radu A. I., Muhlig A., Yuksel S., Peksa V., Weber K., Mayerhofer T., Cialla-May D., and Popp J., Plasmonic nanostructures for surface enhanced spectroscopic methods, *Analyst*, 141, 756-793, 2016.
20. Aslan E., Aslan E., Turkmen M., and Saracoglu O. G., Experimental and numerical characterization of a mid-infrared plasmonic perfect absorber for dual-band enhanced vibrational spectroscopy, *Optical Materials*, 73, 213-222, 2017.
21. Bagci F., A Terahertz Metamaterial Absorber-Based Temperature Sensor Having Nine Resonance Peaks, *Gazi University Journal of Science*, 34, 1163-1177, 2021.
22. Ozden K., Ozer A., Yucedag O.M., Kocer H., Reduction of radar cross section using metamaterial based broadband absorbers, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (4) 1105-1112, 2016.
23. Aytekin R., Durmaz H., Metamalzeme tabanlı iki bantlı mükemmel soğurucu, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 25, 28-33, 2021.
24. Finite-Difference-Time Domain Package, Lumerical FDTD Solutions, www.lumerical.com, 2017.
25. Palik E.D., Ghosh G., *Handbook of optical constants of solids*. San Diego: Academic Press, 1998.