

Biyo-Algılama Uygulamaları için Dört Başlı Ok Şeklinde Nano-Açıklık Tabanlı Çift Bant Plazmonik Mükemmel Soğurucular

Four Headed Arrow Shaped Nano-Aperture Based Dual Band Plasmonic Perfect Absorbers for Bio-Sensing Applications

Aytaç Onur¹, Mustafa Türkmen¹

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Erciyes Üniversitesi

aytac.onur@saglik.gov.tr, turkmen@erciyes.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılacak dört başlı ok şeklinde nano-açıklıklara dayalı yeni bir plazmonik mükemmel soğurucu (MS) dizisi sunulmuştur. Sunulan MS nanoanten dizisinin analizi FDTD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MS dizisi çift-bant spektral cevaba sahip olup rezonans frekansları yapının boyutları değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Çift-bant rezonans cevabı, ayarlanabilir frekans değişimleri, yüksek elektrik alan değerleri ve kırılma indisi hassasiyeti ile sunulan MS nanoanten dizileri kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamaları için kullanışlı olabilirler.

Abstract

In this study, a novel plasmonic perfect absorber (PA) array based on four headed arrow-shaped nanoapertures for bio-sensing applications in infrared regime is presented. The proposed PA nanoantenna array is analyzed by using the FDTD (Finite Difference Time Domain) method. The PA nanoantenna array has a dual-band spectral response, and the resonance frequencies can be tuned by varying the geometrical dimensions. Owing to the dual-band adjustable spectral response, enhanced electric fields, and refractive index sensitivity, the proposed PA nanoantenna array can be useful for bio-sensing applications in infrared regime.

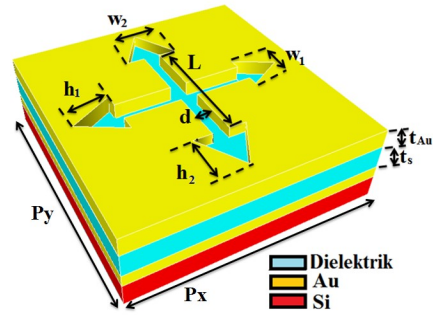
1. Giriş

Plazmonik mükemmel soğurucular (MS), rezonans frekanslarında gelen radyasyonun büyük bir bölümünü soğuran plazmonik tabanlı nano aygıtlardır [1-3]. Mükemmel soğurucular belirli bir geometride yapılandırılmış, kullanılan ışığın dalgaboyundan daha küçük metal parçacık ya da açıklık dizileri şeklinde tasarlanmaktadır. Bu yapılarda düz bir metal film ile şekillendirilmiş parçacıklar ya da açıklıklar arasına yerleştirilen bir dielektrik ara katman ile elektromanyetik soğurum artırılmaya çalışılmaktadır. Plazmon enerjisini kullanan ve metal-dielektrik kompoziti olan bu soğurucular ışığı oda sıcaklığında ve çok küçük boyutlarda hapsedebilen ve istenildiği gibi yönlendirebilen, hapsedilen yakın alan dağılımlarının geleneksel nanoanten

dizilerine göre daha yüksek olması nedeniyle ışık-madde etkileşimini artıran, nano boyutlardaki optik nanoanten dizileridir [3-8]. Bir çalışmada tasarlanan altın nanoparçacık tabanlı çift bant mükemmel soğurucu ile PMMA içerisindeki C-H ve C=O arasındaki bağlar algılanabilmiştir [9]. Yine yapılan benzer bir deneysel çalışmada mükemmel soğurucular kullanılarak PMMA içerisindeki C=O ve C-H arasındaki bağlar aynı anda algılanabilmiştir [10]. Mükemmel soğurucular bu şekilde bağların, molekül yada virüs vb. hedef analitlerin algılanmasında bir biyosensör olarak kullanılabilirler. Çift bant rezonansa sahip MS dizileri aynı anda birden fazla molekül yada benzeri maddelerin biyo-algılanmasında yararlı olabilirler.

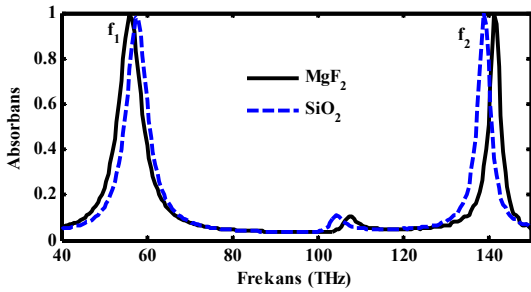
2. Nümerik Analiz

Bu çalışmada, kızılötesi bölgede biyo-algılama uygulamalarında kullanılacak dört başlı ok şeklinde nano-açıklıklara dayalı yeni bir mükemmel soğurucu (MS) sunulmuştur. Şekil 1'de görülen dört başlı ok şeklindeki açıklık nanoanten yapısında taban malzemesi olarak 500 nm kalınlığında silikon kullanılmıştır. Taban malzemesinin üzeri 200 nm altın film ile kaplanmış, altın film üzerine ise $t_s = 130$ nm kalınlığında dielektrik bir ara katman yerleştirilmiştir. Nanoanten yapının son katmanı olarak $t_{Au} = 50$ nm kalınlığında altın kullanılmıştır. Sunulan MS dizisinin periyodu 2000 nm ($P_x = P_y = 2000$ nm) olarak belirlenmiştir. Malzemelerin dielektrik sabitleri için Palik'in [11] sunmuş olduğu yaklaşım kullanılmıştır.



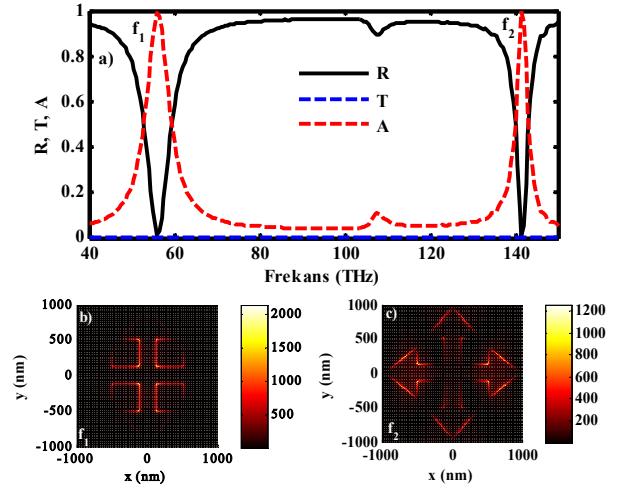
Şekil 1: MS dizisi birim hücresi

Altın katman içerisinde; enleri $d = 250$ nm ve boyları $L = 1000$ nm olan iki adet dikdörtgen açıklık asimetrik olarak oluşturulmuştur. Dikdörtgen açıklıkların uçlarına yükseklikleri $h_1 = 475$ nm ve taban genişlikleri $w_1 = 780$ nm olan 2 adet ikizkenar üçgen açıklık sol ve sağ kollara, yükseklikleri $h_2 = 475$ nm ve taban genişlikleri $w_2 = 810$ nm olan 2 adet ikizkenar üçgen açıklık üst ve alt kollarda yer alacak şekilde birim hücre meydana getirilmiştir. MS dizisinin analizi gerçekleştirilirken x yönünde polarizasyonlu ışık kaynağı kullanılmıştır. Sunulan MS dizisinin analizi zaman domeninde sonlu-farklar (FDTD) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [12]. Dört başlı ok şeklinde nanoaçıklıklara dayalı mükemmel soğurucu dizisinin farklı dielektrik ara katmanlar (MgF_2 ve SiO_2) için frekansa bağlı olarak reflektans (R), transmittans (T) ve absorptans (A) cevabı incelenmiştir. Şekil 2.de dört başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucunun farklı dielektrik katmanlar için (MgF_2 ve SiO_2) frekansa bağlı olarak elde edilen absorptans cevabı verilmiştir. Kullanılan iki dielektrik katman için de absorptans değeri bire yakın olmaktadır.



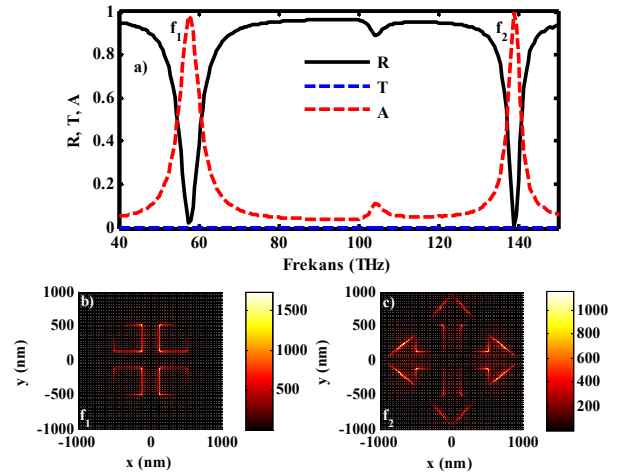
Şekil 2: Dört başlı ok şeklindeki MS dizisinin farklı dielektrik katmanlar için absorptans spektrumu

MS nanoanten dizisinde dielektrik ara katman olarak MgF_2 ($n = 1.37$) kullanılması durumunda elde edilen reflektans (R), transmittans (T) ve absorptans (A) cevabı Şekil 3(a)'da verilmiştir ($L = 1000$ nm, $d = 250$ nm, $h_1 = 475$ nm, $w_1 = 780$ nm, $h_2 = 475$ nm, $w_2 = 810$ nm, $P = 2000$ nm, $L_{Au} = 50$ nm ve $t_S = 130$ nm). Absorptans değeri $A = 1 - R - T$ formülü ile hesaplanmıştır [9]. Şekil 3(a)'da görüldüğü gibi MS dizisi kızılötesi frekans bölgesinde çift-bant rezonansa sahiptir. Elde edilen iki rezonans noktasından birincisinde ($f_1 = 56$ THz) absorptans % 99.5, ikinci rezonans noktasında ($f_2 = 141.5$ THz) absorptans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak MgF_2 kullanılması durumunda f_1 ve f_2 rezonans frekanslarında elde edilen elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 3(b) ve 3(c)'de verilmiştir. Elektrik alan dağılımlarının yapıdaki açıklıkların keskin köşelerinde yoğunlaştığı ve gönderilen ışığa göre birinci rezonans frekansında 2000 kattan, ikinci rezonans frekansında ise 1200 kattan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Bu keskin köşelerdeki moleküller metalik parçacıklardan uzakta duranlara göre elektromanyetik alan ile çok daha güçlü bir etkileşime girebilirler. Bu durum önerilen mükemmel soğurucu diziliminin yüzeye yakın bölgedeki dielektrik ortamının rezonans frekanslarını güçlü olarak etkileyebileceği anlamına gelir. Bu olgu, önerilen mükemmel soğurucu dizisinin kızılötesi algılama yeteneklerinin temelidir. Elektrik alan değerlerinin yüksek olması yüzey artırılmış kızılötesi soğurum (SEIRA: Surface Enhanced Infrared Absorption) tekniği kullanılarak yapılan biyo-algılama uygulamaları için istenen bir durumdur.

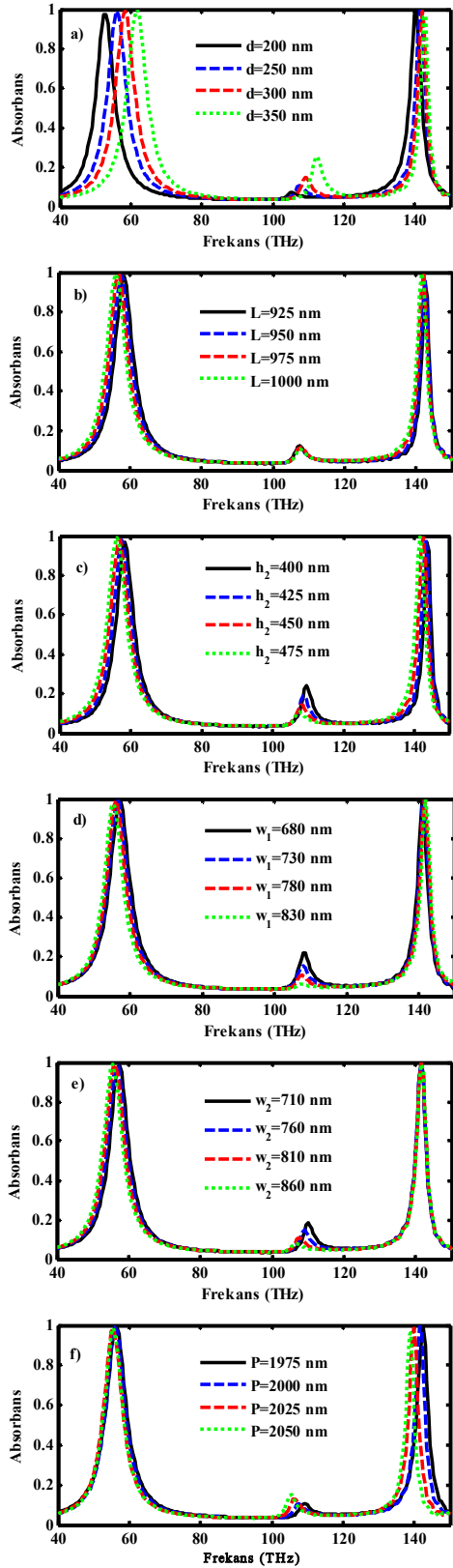


Şekil 3: (a) MgF_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. MgF_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{inc}|^2$ dağılımları

Dört başlı ok şeklindeki mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katman olarak SiO_2 ($n = 1.5$) kullanılması durumunda elde edilen spektral cevabı Şekil 4(a)'da sunulmuştur. Elde edilen iki adet rezonans noktasından birincisinde ($f_1 = 57.5$ THz) absorptans % 98.2, ikinci rezonans noktasında ($f_2 = 139$ THz) absorptans değeri % 99.9 olarak elde edilmiştir. Dielektrik ara katman olarak SiO_2 kullanılması ile rezonans frekanslarında (f_1 ve f_2) oluşan elektrik alan dağılımları sırasıyla Şekil 4(b) ve 4(c)'de verilmiştir. Mükemmel soğurucu yapısında dielektrik ara katmanı değişiminde yüksek absorptans yeteneğini koruduğu ve açıklıkların keskin köşelerinde elektrik alan dağılımlarının yüksek olduğu görülmüştür.



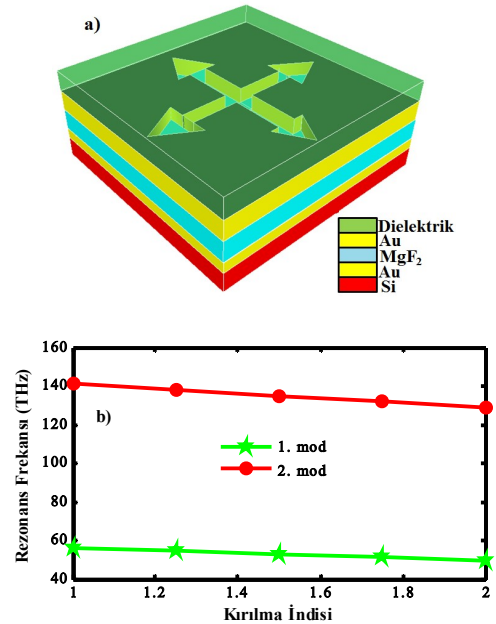
Şekil 4: (a) SiO_2 kullanılan MS dizisinin spektral cevabı. SiO_2 dielektrik ara katman için (b) f_1 ve (c) f_2 rezonans frekanslarında toplam elektrik alan $|E|^2/|E_{inc}|^2$ dağılımları



Şekil 5: Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin spektral cevabı (a) d değişimi (b) L değişimi (c) h_2 değişimi (d) w_1 değişimi (e) w_2 değişimi (f) P değişimi

Şekil 5 farklı d , L , h_2 , w_1 , w_2 ve P parametre değerleri için spektral değişimleri göstermektedir. d (dikdörtgen nanoaçıklıkların eni) arttığında tüm rezonans frekansları sağa kaymakta yani artmaktadır (Şekil 5(a)). Şekil 5(b)'de L (dikdörtgen nanoaçıklıkların boyu) değişimi için absorbans spektrası verilmiştir, dikdörtgen nanoaçıklıkların uzunluğu arttığında yapının tüm rezonans frekansları azalmaktadır. h_2 (alt ve üst üçgen nanoaçıklıkların yüksekliği) artırıldığında, iki rezonans frekansı da sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 5(c)). w_1 (sağ ve sol üçgen nanoaçıklıkların taban genişliği) arttığında, birinci rezonans frekansı hafifçe azalmakta ikinci rezonans frekansı ise hafifçe artmaktadır (Şekil 5(d)) ancak w_2 (alt ve üst üçgen nanoaçıklıkların taban genişliği) arttığında sadece ilk rezonans frekansı hafifçe sola kaymakta yani azalmaktadır (Şekil 5(e)). Absorbans spektrasının periyoda (P) bağımlılığı Şekil 5(f)'de görülmektedir, periyot değişiminden ikinci rezonans frekansı etkilenmekte ve periyot artırıldığında ikinci rezonans noktası sola kaymaktadır. Mükemmel soğurucu dizisinin optik özellikleri yapının geometrik parametrelerine bağlıdır (Şekil 5). Önerilen mükemmel soğurucu dizisinin rezonans frekansları yapının geometrik parametreleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir.

Sunulan dört başlı ok şeklindeki çift bant rezonansa sahip MS dizisinin kırılma indisi değişimine hassasiyetini analiz etmek için, Şekil 6(a)'da görüldüğü gibi MS nanoanten yapısının üzeri 100 nm kalınlığında farklı kırılma indisine sahip dielektrik ($n = 1$, $n = 1.25$, $n = 1.5$, $n = 1.75$, $n = 2$) malzemeler ile kaplanmıştır ($L = 1000$ nm, $d = 250$ nm, $h_1 = 475$ nm, $w_1 = 780$ nm, $h_2 = 475$ nm, $w_2 = 810$ nm, $P = 2000$ nm, $L_{Au} = 50$ nm ve $t_S = 130$ nm). MS dizisinin kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve farklı kırılma indislerine göre yapıya ait iki rezonans frekansının da lineer olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 6(b)).



Şekil 6: (a) Farklı kırılma indisli dielektrik malzeme ile kaplanmış MS dizisinin birim hücresi (b) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının lineer değişimi

3. Sonuçlar

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

4. Kaynaklar

- [1] Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M. ve Giessen, H., "Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor", *Nano Lett.*, Cilt.10, no.7, s.2342-2348, 2010.
- [2] Jamali, A.A., ve Witzigmann, B., "Plasmonic perfect absorbers for biosensing applications", *Plasmonics*, Cilt.9, no.6, s.1265-1270, 2014.
- [3] Hedayati, M. K., Faupel, F., ve Elbahri, M., "Review of plasmonic nanocomposite metamaterial absorber", *Materials*, cilt.7, no.2, s.1221-1248, 2014.
- [4] Anker, J.N., Hall, W. P., Lyandres, O., Shah, N. C., Zhao, J., ve Van Duyne, R.P., "Biosensing with Plasmonic Nanosensors", *Nature Materials*, Cilt.7, no.9, s.442-453, 2008.
- [5] Liu, X., Starr, T., Starr, A. F., ve Padilla, W. J., "Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance", *Phys. Rev. Lett.*, Cilt.104, s.207403-1 - 207403-4, 2010.
- [6] Li, G., Chen, X., Li, O., Shao, C., Jiang, Y., Huang, L., Ni, B., Hu, W., ve Lu, W., "A novel plasmonic resonance sensor based on an infrared perfect absorber", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Cilt.45, s.205102-1 - 205102-5, 2012.
- [7] Zhang, B., Hendrickson, J., ve Guo, J., "Multi-spectral near perfect metamaterial absorbers using spatially multiplexed plasmon resonance metal square structures", *JOSA B*, Cilt.30, no.3, s.656-662, 2013.
- [8] Hao, J., Wang, J., Liu, X., Padilla, W. J., Zhou, L., ve Qiu, M., "High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial", *Appl. Phys. Lett.*, Cilt. 96, s.251104-1 - 251104-3, 2010.
- [9] Chen, K., Adato, R. ve Altug, H., "Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy", *ACS Nano*, Cilt.6, no.9, s.7998-8006, 2012.
- [10] 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*, 2016 (accepted).
- [11] E.D. Palik, "Handbook of Optical Constants of Solids", Academic, FL, 1985.
- [12] The numerical simulations are carried out using a finite-difference-time-domain package (Lumerical FDTD Solutions). www.lumerical.com