

Mevcut sayıya ait içindekiler listesine [DergiPark](#) üzerinden ulaşılabilir

## Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi

Dergi web sayfası: [dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd](http://dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd)

Araştırma Makalesi

## Çok Tabakalı Hiperbolik Metamalzeme ile Oluşturulan Geniş Band Optik Soğurucu

Sevinç Eşen <sup>a,1</sup>, Haluk Şafak <sup>a,2,\*</sup><sup>a</sup> Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Kampüs, Konya, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

## Makale Geçmişi

Geliş 20 Mayıs 2022

Revizyon 20 Haziran 2022

Kabul 27 Temmuz 2022

## Anahtar Kelimeler

Çok tabakalı hiperbolik-

metamalzeme

Optik soğurucu

Transfer Matris Metodu

## ÖZ

Bu çalışmada, özellikle optik bölgede geniş band soğurma gösteren çok tabakalı bir hiperbolik metamalzeme tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıda üç farklı metal (Ag, Au ve Al) ve yarıiletken bir malzeme (InGaAs) kullanılmıştır. Hesaplamalarda Transfer Matris Metodundan (TMM) yararlanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak tasarlanan çok tabakalı yapıların optik soğurma ve yansıma spektrumları gelme açısına bağlı olarak incelenmiştir. Metal-dielektrik çok tabakalı yapıların hiperbolik dispersiyon gösterdiği bölgeler belirlenmiş, ayrıca gelme açısına bağlı kontur grafikleri elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, metal olarak gümüşün kullanıldığı heteroyapının en iyi soğurma spektrumu verdiği gözlenmiştir.

Research Article

## The Broad Band Optical Absorber Designed By Multilayered Hyperbolic Metamaterial

## ARTICLE INFO

## Article History

Received 20 May 2022

Revised 20 June 2022

Accepted 27 July 2022

## Keywords

Multilayered hyperbolic-

metamaterial

Optical absorber

Transfer Matrix Method

## ABSTRACT

In this study, a multilayered hyperbolic metamaterial has been designed that exhibits a broad band optical absorption, especially in optical region. In that proposed structure, three different metals (Ag, Au, and Al) and a semiconductor material (InGaAs) have been employed. Optical calculations are performed by using the Transfer Matrix Method. Optical absorption and reflection spectra are determined for different incident angle values. Hyperbolic dispersion regions of the metal-dielectric multilayered structures have been determined, also contour graphs of the structures, depend on the incident angles are obtained. Consequently, the best optical absorption response is found for the structure in which Ag is used as metal component.

## 1. Giriş

Metamalzemeler benzersiz elektromanyetik özelliklerinden dolayı hem deneysel hem de teorik açıdan yaygın olarak incelenmektedir (Pendry, 2000; Li ve Pendry, 2008; Cai ve Shalaev, 2010). Bu yapılar, mükemmel görüntüleme, optik filtreler ve kaplama gibi özel uygulamalara izin veren negatif iletkenlik, negatif geçirgenlik ve negatif kırılma indisi gibi farklı malzeme özelliklerini elde etmek için yapay olarak tasarlanan yapılardır. Doğada bulunan maddelerden üretilen Metamalzemeler, gizleme (Li ve Pendry, 2008), süperlensler (Pendry, 2000), negatif kırılma (Valentine ve ark., 2008), asimetric geçirgenlik (Wu ve ark., 2014) ve soğurucular (Landy ve ark., 2008) gibi farklı uygulama alanları

bulmuştur. Son yıllarda birçok araştırmacı güneş pilleri (Min ve ark., 2010; Wang ve ark., 2012), fotodetektör (Yu ve ark., 2006; Rosenberg ve ark., 2009), termo-fotovoltaik (Sergeant ve ark., 2009; Liu ve ark., 2010a) ve termal yayıcılarda (Diem ve ark., 2009; Liao ve Zhao, 2017a) kullanılabilmesi nedeniyle iki boyutlu metamalzemeyle dayalı optik soğurucular üzerine odaklanmıştır. Landy ve arkadaşlarının 2008 de (Landy ve ark., 2008) ilk metamalzeme soğurucuyu rapor etmelerinden itibaren farklı uygulama talepleri için farklı yapılara sahip çeşitli soğurucular geliştirilmiştir (Hao ve ark., 2010; Liu ve ark., 2010b; Meng ve ark., 2014; Liao ve Zhao, 2017b). Ayrıca çoğu metamalzeme tabanlı soğurucunun soğurma bant genişliği, şiddetli elektrik ve manyetik rezonansdan dolayı dardır ve ışığı yalnızca dar bir açı aralığında tamamen soğurabilmektedir. Bu dar bant

\* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: extraordinary613@gmail.com (S. Eşen), hsafak@selcuk.edu.tr (H. Şafak)

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6603-5730<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-7608-7753

Doi: 10.35238/sufefd.1119231

E-ISSN: 2458-9411

aralığı dedektör ve güneş pili gibi uygulamalarını kısıtlamaktadır. Bu kısıtlamayı aşabilmek için, metal-dielektrik tabakalarda girişim (Wang ve ark., 2014), metayüzeylerde çoklu rezonans (Deng ve ark., 2017) ve çok tabakalı yapılarda empedans eşleşmesi (Mattiucci ve ark., 2013; Deng ve ark., 2017) gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir. Metamalzemelerin özel bir sınıfı olan hiperbolik metamalzemeler, ışığın herhangi bir geliş açısı için ışığı neredeyse tamamen soğurabilme yeteneği sayesinde dar bant genişliğinin üstesinden gelebilmeye olanak sağlamaktadır.

Hiperbolik bir dispersiyona sahip metamalzemeler, süper-çözünürlükle görüntüleme (Lu ve Liu, 2012), geniş band soğurma (Zhou ve ark., 2014), kendiliğinden emisyon (Krishnamoorthy ve ark., 2012), hiperbolik metamalzeme tabanlı kavite (Saleki ve ark., 2017) gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilen ilginç elektromanyetik özelliklere sahiptir. Etkin ortam teorisine göre, metal-dielektrik çiftinden oluşan çok tabakalı basit bir yapı ile hiperbolik bir metamalzeme oluşturulabilir (Poddubny ve ark., 2013). Açılan bağımsız Bragg band aralığı, tabakalı hiperbolik metamalzeme ve dielektrik bir malzemedan oluşan bir boyutlu fotonik kristal içerisinde elde edilebilmektedir (Xue ve ark., 2016; Wu ve ark., 2018). Böyle bir bant aralığı bütün yönlerde kullanılabilen karışık bant genişliğine sahip reflektör ya da filtre tasarımı için yararlı olabilir. Ayrıca bu fotonik kristal ve bir metal tabaka heteroyapı oluşturmak üzere kullanıldığında, plazmon polaritonları yardımıyla geniş açılı ve frekans seçici mükemmel soğurucular elde edilmiştir (Xue ve ark., 2016).

Bu çalışmada metal ve dielektrik (yarıiletken) tabakalardan oluşan anizotropik metamalzeme yardımıyla geniş bir aralıkta mükemmel yakın soğurucu yapı tasarlanmıştır. Hesaplamalarda kullandığımız heteroyapı, Lu ve arkadaşları tarafından incelenen heteroyapı ile benzerdir (Lu ve ark., 2019). Belirtilen çalışmada, metal olarak gümüş, dielektrik malzemeler içinse  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{SiO}_2$  kullanılmıştır. Burada incelenen heteroyapıda ise, 3 farklı metal ve dielektrik olarak da  $x=0.48$  katkı oranına sahip bir yarıiletken olan  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  seçilmiştir. Ayrıca, tabaka kalınlıkları ve periyodun optik spektrumlar üzerine etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. İncelenen heteroyapı, nispeten geniş-açılı mükemmel optik soğurucu tasarımı için yararlı bir model olma özelliği taşımaktadır.

## 2. Teori

Üzerinde yoğun çalışma yapılan önemli bir metamalzeme türü, etkin elektrik ve manyetik tensörler ile tanımlanan ve hiperbolik metamalzeme olarak adlandırılan hiperbolik dispersiyona sahip yüksek oranda anizotropik ortamlardır. Bu tür metamalzemeler, geleneksel tek eksenli kristallerin ultra-anizotropik limitini gösterir ve permitivite veya permeabilite tensörlerinin temel bileşenlerinden biri diğer iki bileşenle zıt işaretlidir.

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{pmatrix} \quad \hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\parallel$  ve  $\perp$  ifadeleri anizotropi eksenine paralel ve dik bileşenleri göstermektedir. Permitivite matrisinin köşegen elemanlarının işaretleri ile ayırt edilebilen iki tip hiperbolik metamalzeme vardır. Ortamın dielektrik tensör bileşenleri yardımıyla tanımlanan hiperboloidin dispersiyon karakterleri  $\epsilon_{\parallel} < 0$ ;  $\epsilon_{\perp} > 0$  ya da  $\epsilon_{\perp} < 0$ ;  $\epsilon_{\parallel} > 0$  şartını

sağlamaktadır. Hiperbolik dispersiyona sahip bir metamalzeme, dielektrik ve metal tabakalardan oluşan çok tabakalı bir yapı şeklinde tasarlanabilmektedir. Etkin ortam teorisi, metamalzemenin birim hücresi içindeki elektromanyetik alanın ortalamasına bağlı bir yöntemdir ve çok tabakalı periyodik sistemlere uygulanabilmektedir. Çok tabakalı metal-dielektrik sistem, periyodik ise ve kalınlıkları dalga boyundan çok daha küçük ise etkin permitivite tensörüne sahip anizotropik bir ortam gibi davranır (Wood ve ark., 2006).

$$\epsilon_{eff} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 d_1 + \epsilon_2 d_2}{d_1 + d_2}$$

$$\epsilon_{zz} = \epsilon_0 \frac{(\epsilon_1 \epsilon_2)(d_1 + d_2)}{d_1 \epsilon_2 + d_2 \epsilon_1} \quad (2)$$

$d_1$  ve  $d_2$  sırasıyla dielektrik ve metal tabakaların kalınlığı,  $\epsilon_0$  boşluğun permitivitesi ve  $\epsilon_1$  ve  $\epsilon_2$  dielektrik ve metalin bağlı permitivitesidir. Bir anizotropik metamalzemenin dispersiyon bağıntısı

$$\frac{k_x^2}{\epsilon_{zz}} + \frac{k_y^2}{\epsilon_{xx}} = \frac{k_0^2}{\epsilon_0} \quad (3)$$

şeklinindedir. Bu malzemelerin benzersiz özellikleri, metamalzemede oluşan eş frekans yüzeylerinin şekliyle kaynaklanmaktadır.  $k_x$ ,  $k_y$  ve  $k_z$  dalga vektörünün bileşenleri,  $\omega$  dalga frekansı ve  $c$  ışık hızıdır.  $\epsilon_{zz} < 0$ ;  $\epsilon_{xx} > 0$  ise dispersiyon bağıntısı hiperboliktir (Argyropoulos ve ark., 2013). Büyük dalga vektörüne sahip dalgalar, izotropik malzemelerde eş frekans yüzeylerinden dolayı sönüme uğrarken, anizotropik ortamlarda ilerlemesini sürdürmektedir.

Bu çalışmada metal ve katkılı yarıiletken malzemedan oluşan bir heteroyapının optik spektrumları Transfer Matris Metodu (TMM) kullanılarak hesaplanmıştır. Çok tabakalı yapılarda elektromanyetik dalgaların ilerlemesi, yapıya gelen dalga için formüle edilen transfer matris metodu, ya da sonlu farklar yöntemi gibi değişik sayısal metotlar kullanılarak analiz edilebilmektedir. TMM bu metotlar arasında oldukça yaygın kullanılan bir tekniktir. TMM de, çok tabakalı yapı boyunca elektromanyetik dalganın ilerlemesi, yansımaları ve soğurulması, alan bileşenlerinin matris formunda ifade edilmesi yardımıyla belirlenmekte ve yapı boyunca ilerleyen dalganın yansıma ve geçirgenlik katsayı değerleri hesaplanabilmektedir (Lekner ve Dorf, 1987).

Tasarlanan çok tabakalı heteroyapıda metal tabaka olarak altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al), dielektrik tabaka içinse InGaAs seçilmiştir. Metallerin permitivitesi Lorentz-Drude modeli ile belirlenmekte olup

$$\epsilon_M = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} + \sum_{n=1}^n \frac{f_n \omega_n^2}{\omega_n^2 - \omega^2 - i\gamma_n \omega} \quad (4)$$

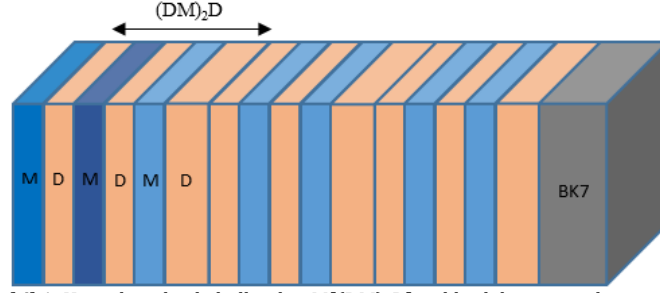
şeklinindedir. Burada  $\omega_p$  plazma frekansı,  $\gamma$  sönüm sabiti ve  $f_n$  osilatör şiddetidir. InGaAs tabakanın permitivitesi ise Drude modeli kullanılarak ifade edilmektedir;

$$\epsilon_{InGaAs} = \epsilon_{\infty} \left[ 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega/\gamma_0} \right] \quad (5)$$

Burada  $\omega_p$  plazma frekansı ve  $\gamma = 0.1 \times 10^{-12} \text{s}^{-1}$  sönüm parametresidir.  $\lambda_0$  da  $\epsilon_{InGaAs} = 0$ , yarıiletken malzemenin katkı yoğunluğu arttıkça  $\omega_p$  ye karşılık gelen dalga boyu ve

$\lambda_0$  ın değeri azalır. InGaAs tabakanın plazma frekansından uzakta  $\epsilon_{||}$ ,  $\epsilon_{\perp}$  bileşene eşit olur ve malzeme izotropik bir ortam gibi davranır. Dalga boyu arttıkça ve izotropik InGaAs tabakaların plazma frekansına yaklaştıkça  $\epsilon_{\perp}$  azalır ve sonunda  $\lambda > \lambda_0$  için negatif olur.

Hesaplamalarda kullanılan heteroyapı,  $M[(DM)_2D]_3$  şeklinde tasarlanan periyodik çok tabakalı bir yapıdır (Şekil 1). Burada M metal, D ise dielektrik tabakayı göstermektedir. Metal tabaka için Au, Ag ve Al, dielektrik tabaka içinse bir yarıiletken malzeme olan InGaAs seçilmiştir.

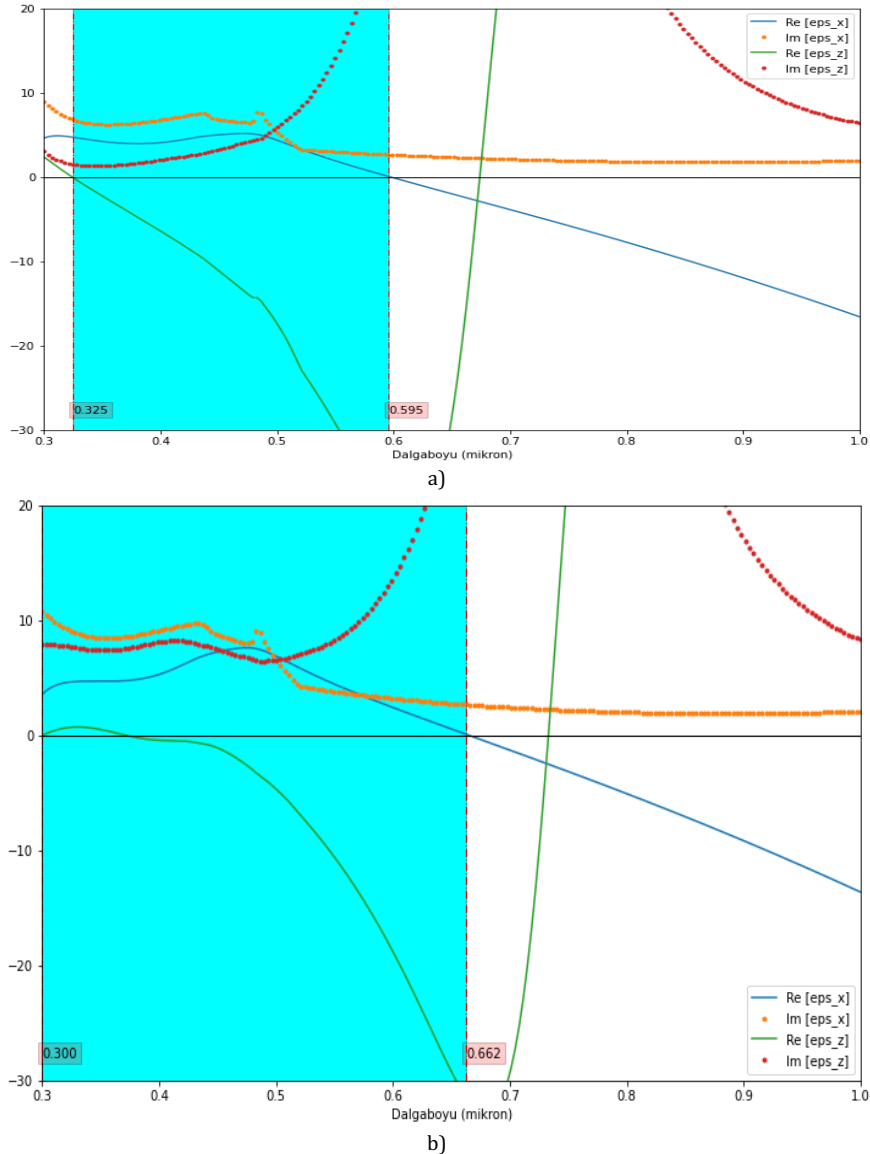


Şekil 1. Hesaplamalarda kullanılan  $M[(DM)_2D]_3$  şeklindeki metamalzeme yapısı.

### 3. Hesaplama Sonuçları

Çok tabakalı yapıda kullanılan gümüş (Ag) ve altın (Au) için etkin permittivite tensörünün dalga boyu ile değişimi Şekil 2a ve Şekil 2b'de gösterilmiştir. Her iki şekilde gösterilen taraflı bölge, hiperbolik metamalzemede

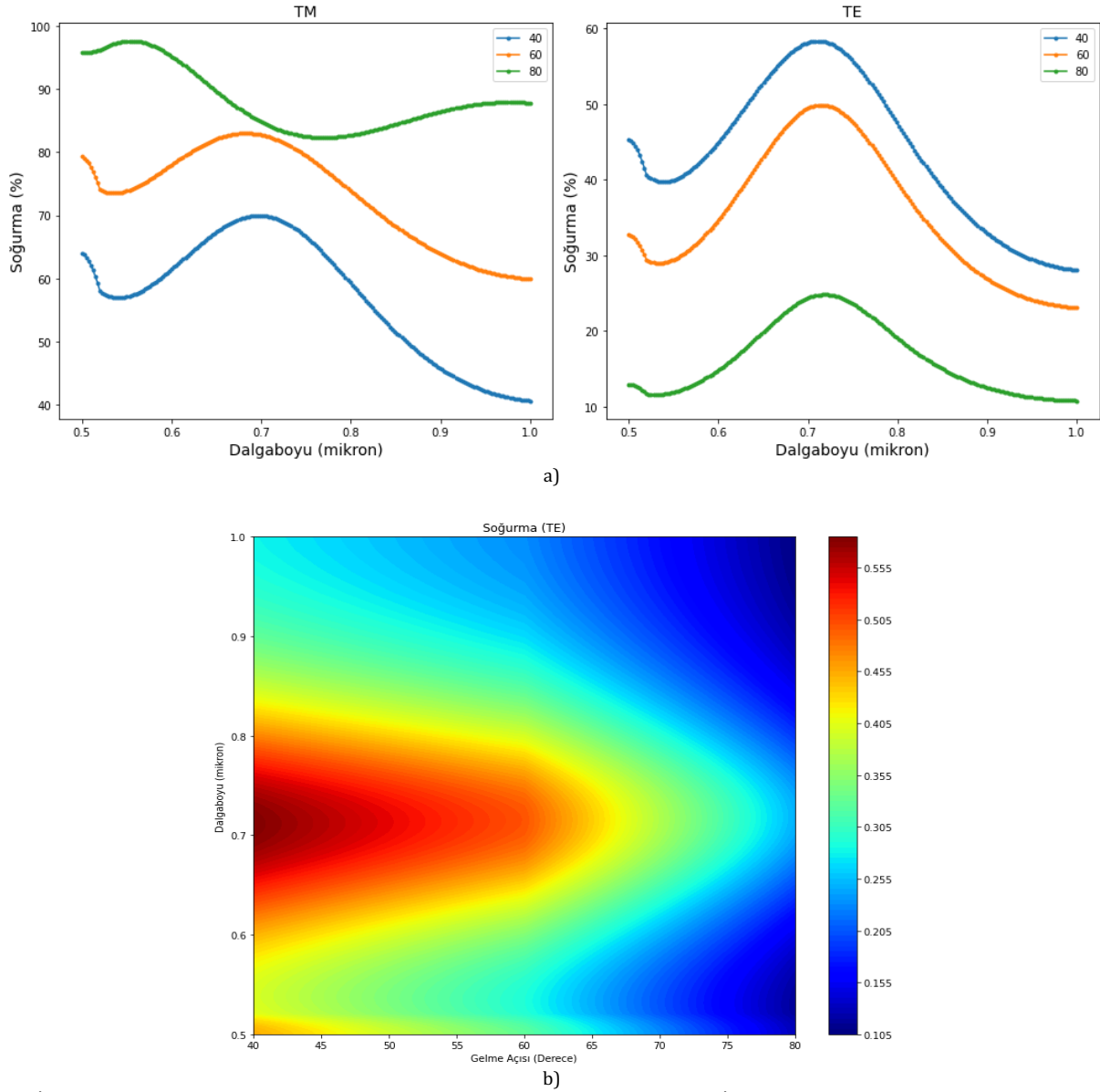
permittivite tensörünün  $\epsilon_{||}$  ve  $\epsilon_{\perp}$  bileşenlerinin birbirine zıt işaretli olduğu ( $\epsilon_{||} > 0$ ;  $\epsilon_{\perp} < 0$ ) dalga boyu aralığına karşılık gelmektedir. Buna göre, gümüşün  $0.325 \mu\text{m} - 0.595 \mu\text{m}$  dalga boyu aralığında metayapı hiperbolik dispersiyon göstermektedir. Altında ise bu bölge  $0.300 \mu\text{m} - 0.662 \mu\text{m}$  aralığındadır (Şekil 2b).



Şekil 2. a) Gümüşün etkin permittivite tensörünün dalga boyu ile değişimi. b) Altının etkin permittivite tensörünün dalga boyu ile değişimi.

Optik bölgede geniş band bir soğurma tepkisi elde edebilmek için farklı heteroyapı modelleri seçilmiştir. İlk olarak metal ve yarı iletken tabakalardan oluşan iki periyotlu  $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2$  şeklinde bir yapı ele alınmıştır. Metal tabaka için altın (Au), yarı iletken tabaka için InGaAs seçilmiş olup,  $d_{\text{InGaAs}}=50$  nm ve  $d_{\text{Au}}=5$  nm değerleri kullanılmıştır.

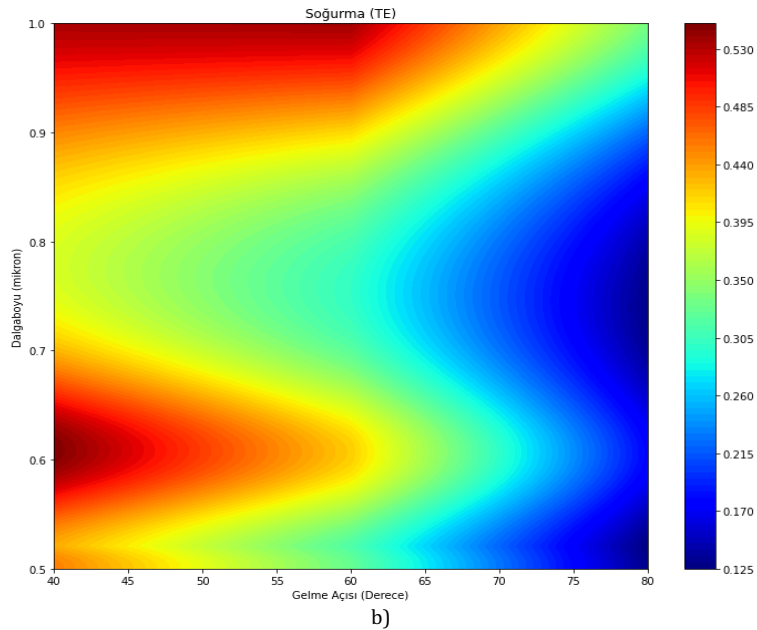
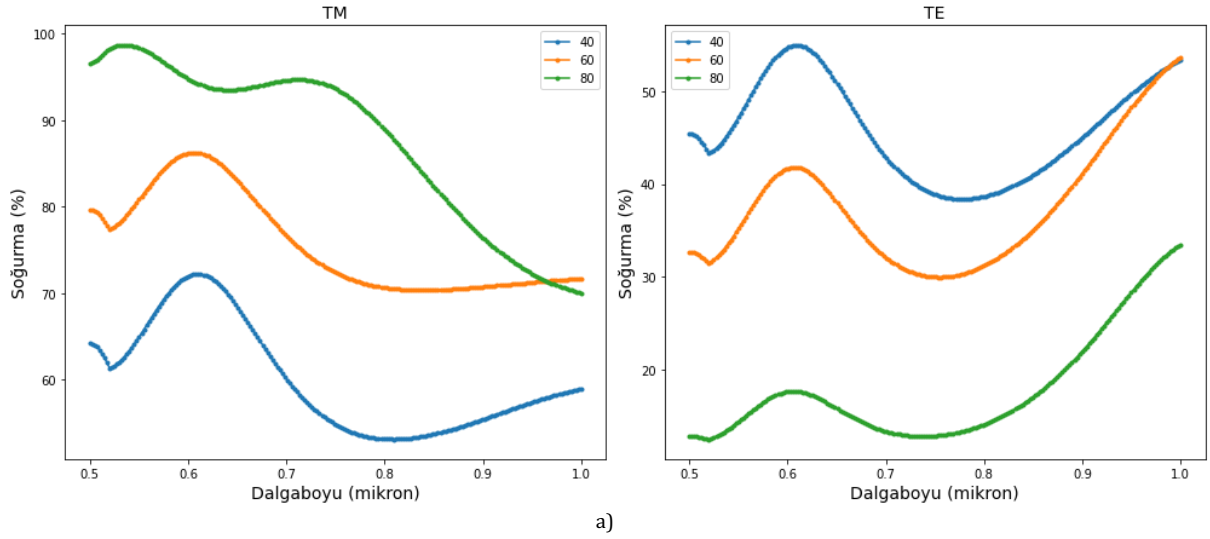
Elektromanyetik dalganın geldiği ortam hava, çıkış ortamı ise kırılma indisi  $n_{\text{BK7}}=1.52$  olan BK7 cam malzeme seçilmiştir. Transfer matris yöntemi kullanılarak ışığın gelme açısına göre TM ve TE kutuplu dalgalar için soğurma spektrumları hesaplanmıştır (Şekil 3a ve Şekil 3b).



Şekil 3. a) İki periyoda sahip InGaAs/Au yapının TM ve TE modu için soğurma spektrumu. b) İki periyotlu InGaAs/Au heteroyapının TE modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

Şekil 3a'dan iki periyotlu Au-InGaAs çiftinin TM modu için gelme açısı  $40^\circ$  ve üzerindeki açılarda  $0.7 \mu\text{m}$  dalga boyu civarında oluşan soğurma pikinin değerinin arttığı, TM modunun aksine TE modu için soğurmanın azaldığı görülmektedir. Göz önüne alınan bu yapının sonuna kalınlığı

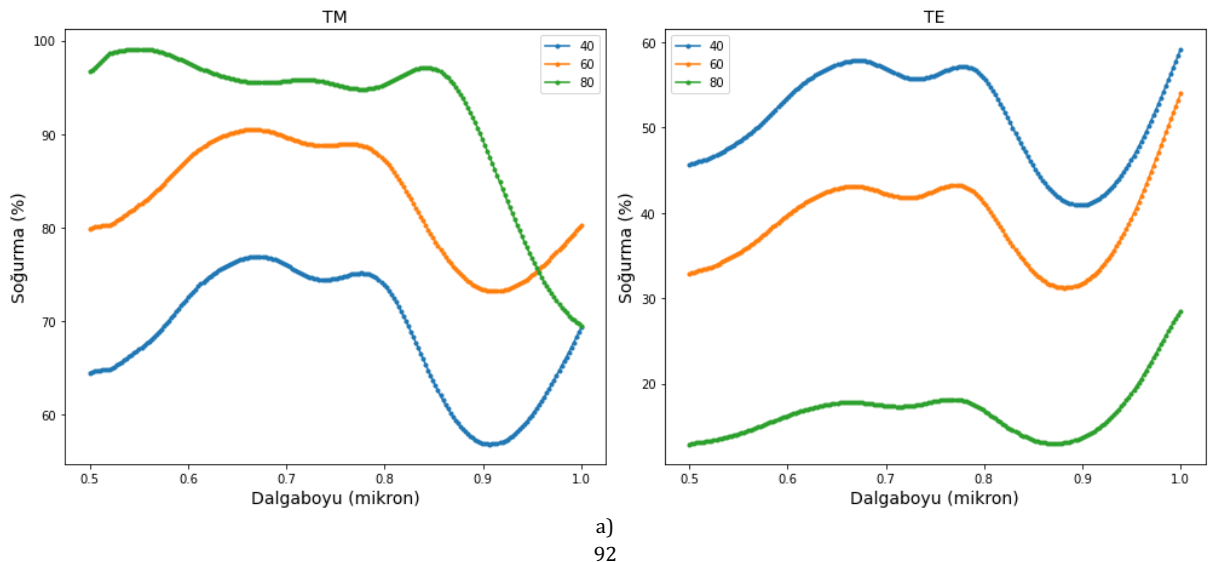
$50$  nm olan bir InGaAs tabakası daha eklenerek  $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}$  şeklinde bir yapı için hesaplanan soğurma spektrumu ve kontur grafiği sırasıyla Şekil 4a ve Şekil 4b' de gösterilmiştir.

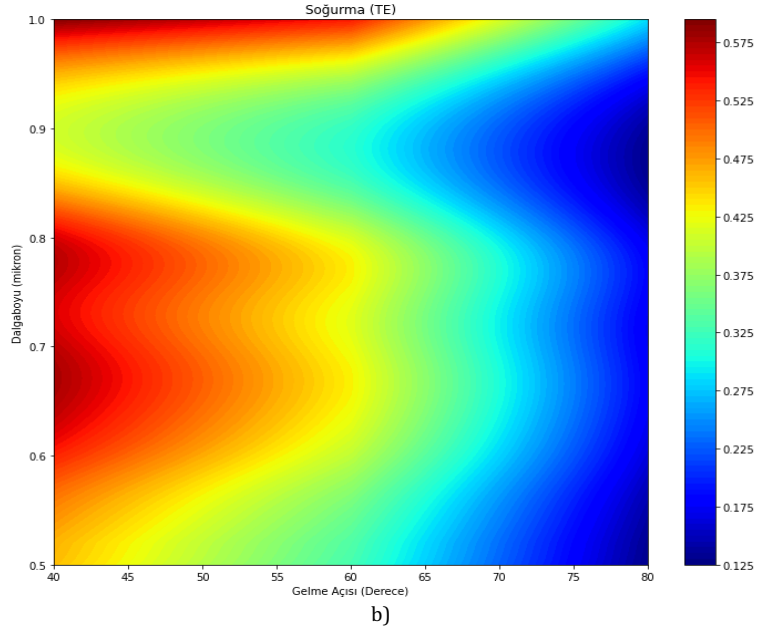


Şekil 4. a)  $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}$  heteroyapının TM ve TE modu için soğurma spektrumu. b)  $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}$  heteroyapının TE modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

Şekil 4'ten görüldüğü gibi ikinci yapının soğurma pikleri dalga boyu 0.6  $\mu\text{m}$  civarında olan bölgeye kaymış ve soğurma değeri artmıştır. Ayrıca  $80^\circ$  gelme açısında soğurma bandının genişlediği gözlenmiştir. Yapının soğurma tepkisini artırabilmek için göz önüne alınan  $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}$

heteroyapının periyodu üçe çıkartarak  $[(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}]_3$  şeklinde bir yeni bir heteroyapı tasarlanmış ve elde edilen soğurma grafikleri ise Şekil 5a ve Şekil 5b'de verilmiştir.





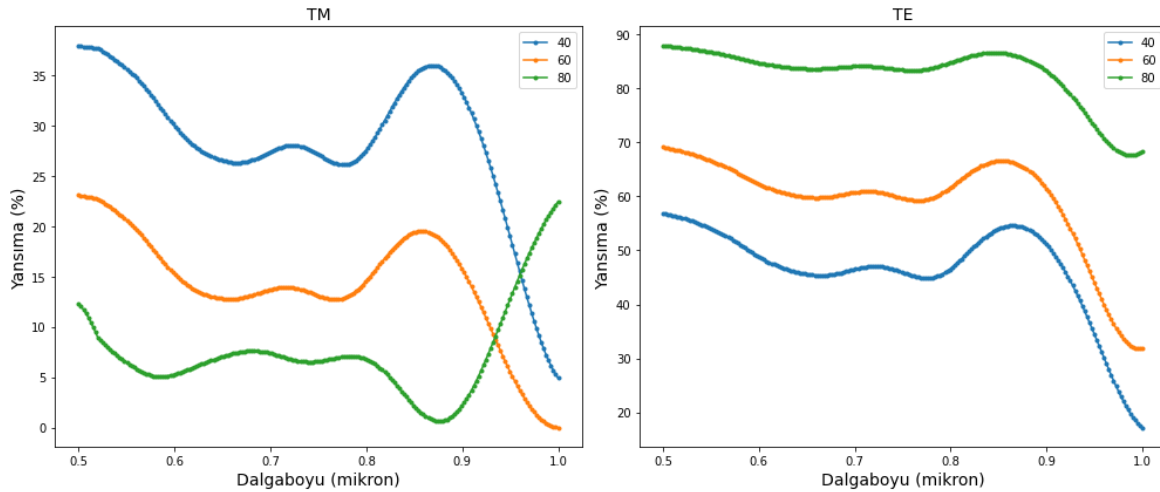
Şekil 5. a) [(InGaAs/Au)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> yapısının TM ve TE modu için soğurma spektrumu. b) [(InGaAs/Au)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> heteroyapının TE modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

Son tasarlanan [(InGaAs/Au)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> şeklindeki yapıda, Şekil 5'ten de görüldüğü gibi, soğurma band aralığı genişlemiş olup, dalga boyu 0.5 µm - 0.9 µm civarına kadar soğurmanın değerinin tüm açılarda arttığı görülmüştür.

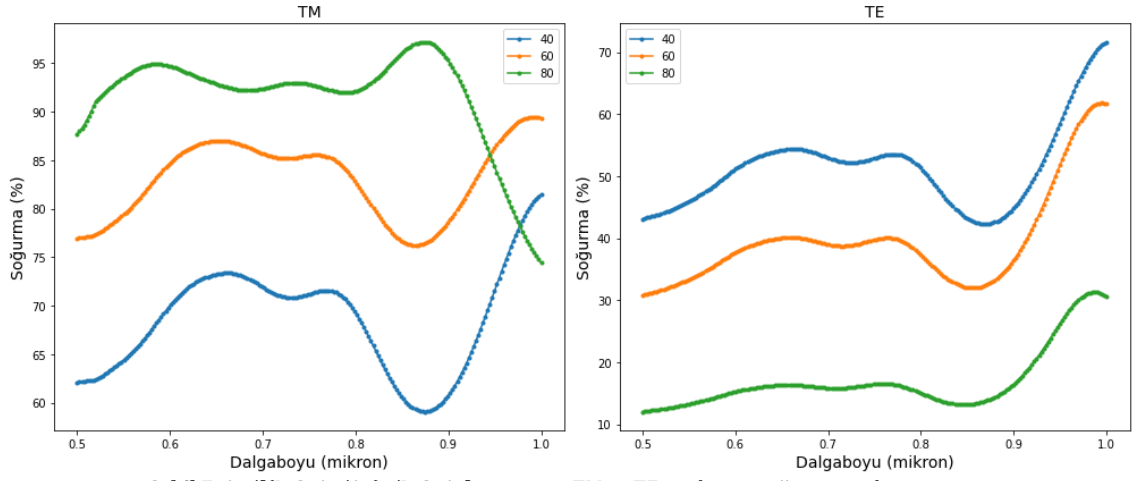
Son olarak, [(D/M)<sub>2</sub>/D]<sub>3</sub> şeklinde tasarlanan yapıda, heteroyapının ön kısmına bir metal tabaka eklenerek ve farklı metaller kullanılarak metalin türünün, yapının soğurma performansına etkisi incelenmiştir. Tasarlanan yapı Metal/[(InGaAs/Metal)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> şeklindedir.  $d_{Metal1} = 5$  nm,  $d_{InGaAs1} = 50$  nm,  $d_{Metal2} = 5$  nm ve  $d_{InGaAs} = 50$  nm alınmıştır. İlk olarak altın (Au) tabaka kullanıldı. Bu yapının yansımaya, soğurma spektrumları ve ilgili kontur grafiği sırasıyla Şekil 6,

Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Dalga boyu  $\lambda = 0.874$  µm' de soğurmanın maksimum değeri 0.95 ten 0.971' e yükselmiştir. Ayrıca tüm gelme açısı değerleri için yapının soğurma performansı oldukça yüksektir. Yapıda altın yerine gümüş (Ag) kullanılarak yansımaya ve soğurma spektrumları hesaplanmıştır (Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11).

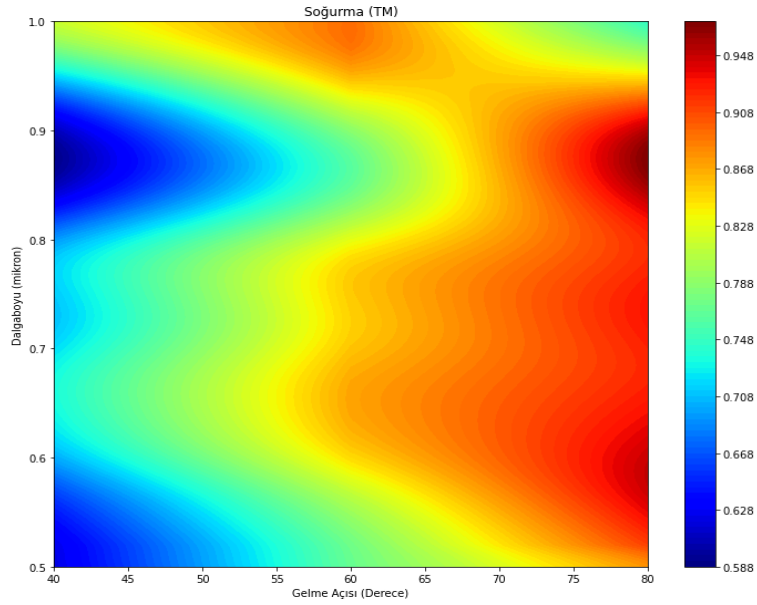
Ag tabaka kullanılarak yapılan hesaplamalarda soğurmanın maksimum değerinin 0.974 e yükseldiği gözlenmiştir. Son olarak metal tabaka için alüminyum (Al) kullanılmıştır. Alüminyum, çalışılan dalga boyu aralığında altın ve gümüş gibi hiperbolik bir dispersiyon özelliği göstermemektedir.



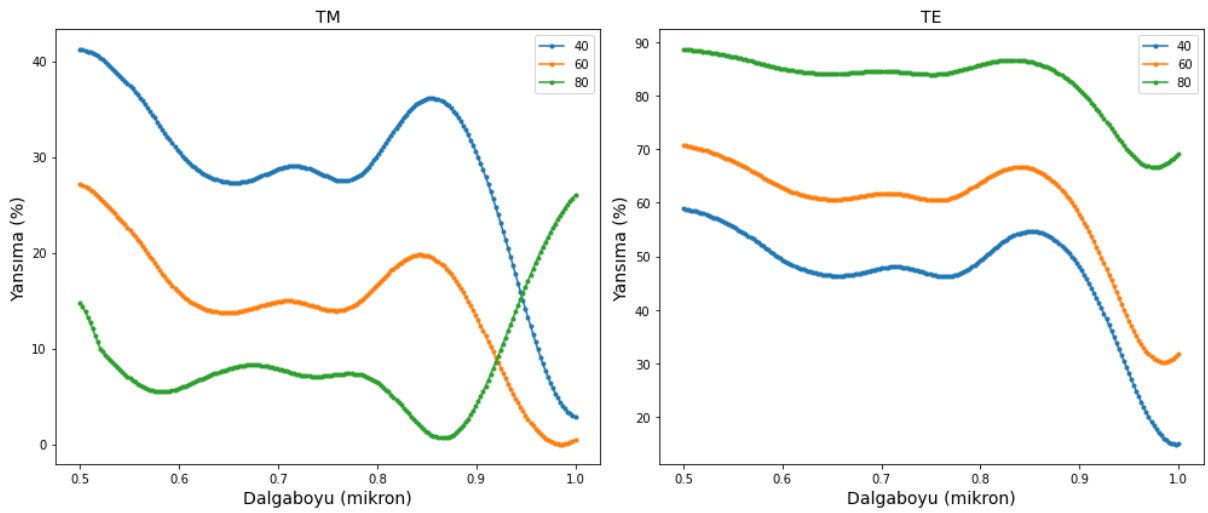
Şekil 6. Au/[(InGaAs/Au)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> yapısının TM ve TE modu için yansımaya spektrumu.



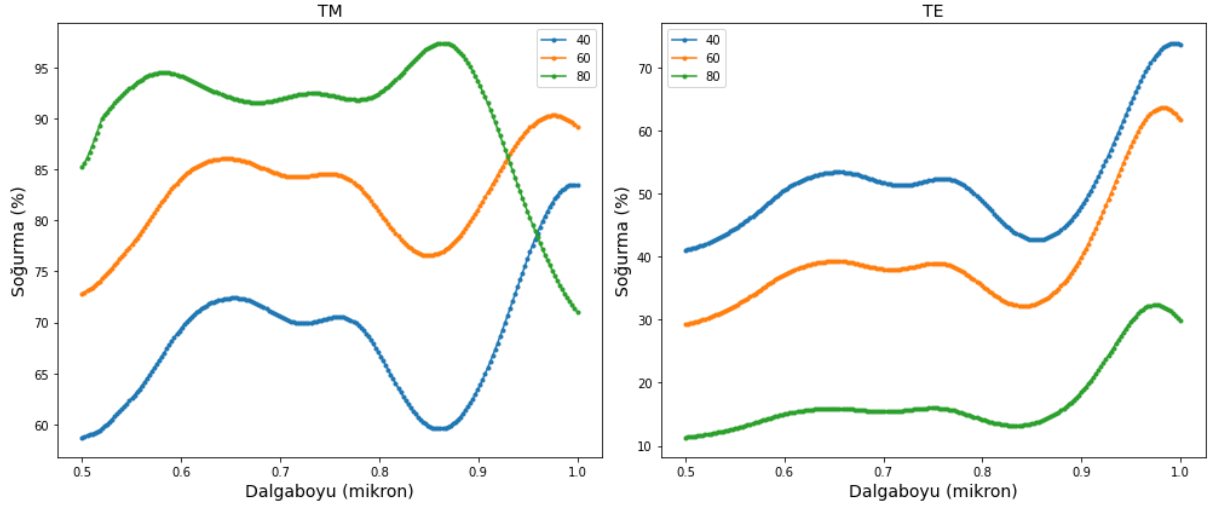
Şekil 7. Au/[(InGaAs/Au)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> yapısının TM ve TE modu için soğurma spektrumu.



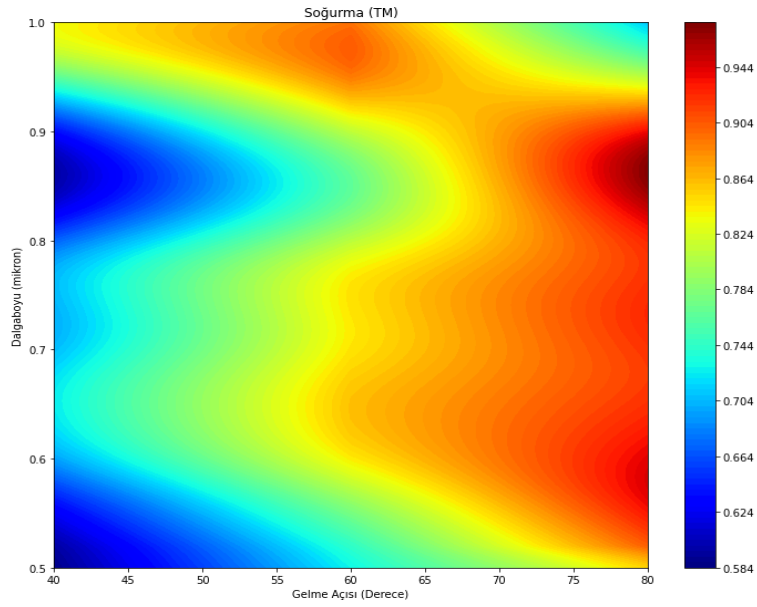
Şekil 8. Au/[(InGaAs/Au)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> heteroyapının TM modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.



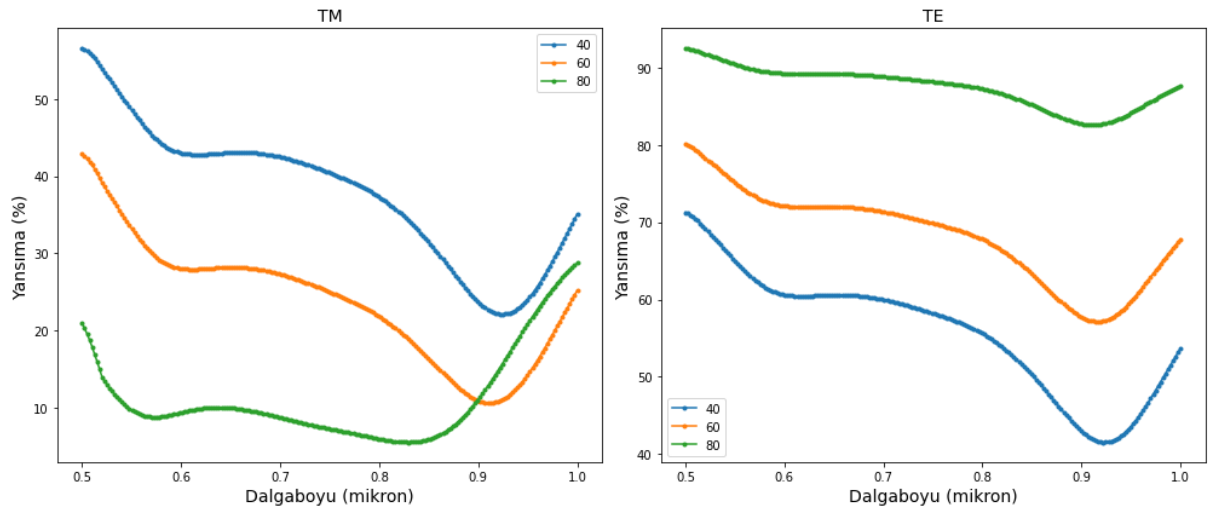
Şekil 9. Ag/[(InGaAs/Ag)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> yapısının TM ve TE modu için yansımaya spektrumu.



Şekil 10. Ag/[(InGaAs/Ag)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> yapısının TM ve TE modu için soğurma spektrumu.

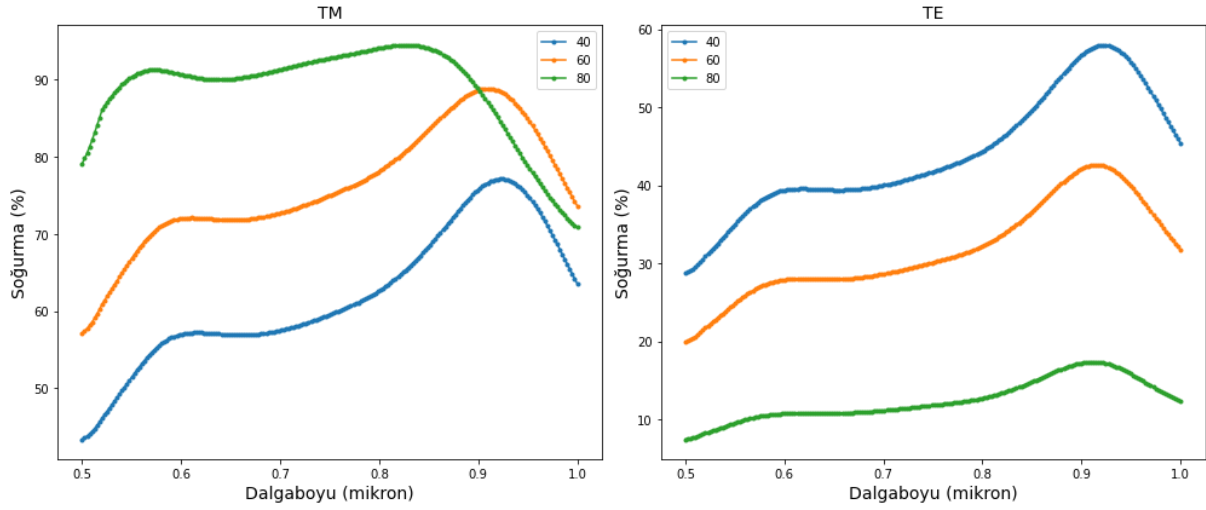


Şekil 11. Ag/[(InGaAs/Ag)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> heteroyapısının TM modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

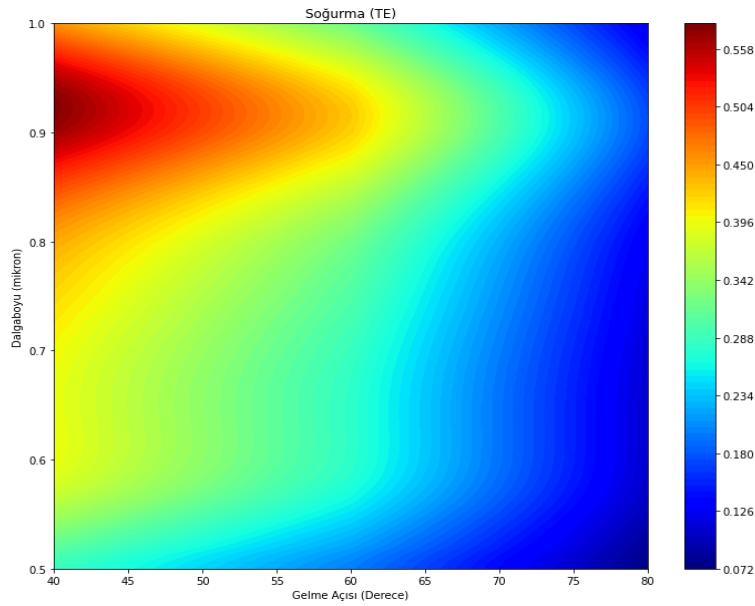


Şekil 12. Al/[(InGaAs/Al)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> yapısının TM ve TE modu için yansımaya spektrumu.





Şekil 13. Al/[(InGaAs/Al)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> yapısının TM ve TE modu için soğurma spektrumunun ışığın gelme açısı ile değişimi.



Şekil 14. Al/[(InGaAs/Al)<sub>2</sub>/InGaAs]<sub>3</sub> heteroyapının TE modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

Bu yapının ortalama soğurmasının % 0.94 civarında olduğu gözlenmiştir (Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14). Alüminyum hem yüksek yansıtıcılık özelliğine sahip olması, hem de geniş band soğurma göstermesi nedeniyle farklı optik cihaz tasarımlarında kullanılabilir uygun bir malzeme olabilir.

#### 4. Tartışma

Bu çalışmada çok tabakalı metal-dielektrikten hiperbolik metamalzeme kullanılarak tasarlanan geniş band bir optik soğurucu yapı incelenmiştir. Dielektrik tabaka için bir yarı iletken malzeme olan InGaAs, metal tabaka içinse Au, Ag ve Al kullanılmıştır. Üç farklı metal ile oluşturulan heteroyapıların hiperbolik dispersiyon gösterdiği dalga boyu aralıkları incelendiğinde, Au ve Ag'nin benzer dalga boyu aralığında hiperbolik davranış gösterdiği, ancak Al metali ile oluşturulan yapının incelenen spektral aralıkta herhangi bir hiperbolik dispersiyon göstermediği görülmüştür. Tasarlanan optik soğurucu yapıların tümü, özellikle 60° derece ve üzerindeki büyük gelme açılarında, TM modu için, 0.55 µm - 0.9 µm dalga boyu aralığında ortalama %90 ve üzeri soğurma değerlerine sahiptir. TE modu incelendiğinde, tüm yapılar için yansıma değerlerinin ilgili dalga boyu aralığında daha yüksek olduğu, soğurmanın ise daha düşük

oranlarda gerçekleştiği görülmüştür. Beklendiği gibi, TM ve TE modları arasında açıya bağlılık bakımından birbirine zıt bir davranış söz konusudur. Soğurma grafiklerinden kolayca görüleceği gibi, gelme açısı arttıkça TM modu için soğurma artmakta, TE modu için ise azalmaktadır. Aynı şekilde yansıma spektrumları incelendiğinde, genel anlamda TE modu için yansıma değerlerinin TM modundan çok daha yüksek olduğu, ayrıca gelme açısı arttıkça TE modu için yansımanın arttığı, TM modu için ise azaldığı görülmektedir.

İncelenen dalga boyu aralığında, Au ve Ag metallerinin kullanıldığı heteroyapılar birbirine çok benzer soğurma spektrumları vermiştir. Ayrıca, göz önüne alınan yapıda tabaka sayısı değiştirilerek, soğurma spektrumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Soğurma bandının genişliğinin gelme açısına fazla bağlı olmaması, tasarlanan soğurucunun iyi bir performansa sahip olduğunu ve büyük gelme açılarında geniş band optik soğurucu tasarımlarında kullanılabilirliğini göstermektedir. Farklı metal ve dielektrik malzemeler kullanılarak ve yapının geometrik parametreleri değiştirilerek, göz önüne alınan optik bölgede daha iyi soğurma spektrumuna sahip heteroyapılar tasarlanabilir. Örneğin, In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As yarıiletkeninin x stokiyometrik oranının farklı değerleri için inceleme yapılabilir. Ayrıca, uygun gelişmiş deneysel yöntemler yardımı ile, tasarlanan yapıların üretimi mümkündür.

## Kaynaklar

- Cai, W. ve Shalaev, V., 2010, Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications, *Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications*, 1-200.
- Deng, H. X., Stan, L., Czaplewski, D. A., Gao, J. ve Yang, X. D., 2017, Broadband infrared absorbers with stacked double chromium ring resonators, *Optics Express*, 25 (23), 28295-28304.
- Diem, M., Koschny, T. ve Soukoulis, C. M., 2009, Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime, *Physical Review B*, 79 (3).
- Hao, J. M., Wang, J., Liu, X. L., Padilla, W. J., Zhou, L. ve Qiu, M., 2010, High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial, *Applied Physics Letters*, 96 (25).
- Krishnamoorthy, H. N. S., Jacob, Z., Narimanov, E., Kretzschmar, I. ve Menon, V. M., 2012, Topological Transitions in Metamaterials, *Science*, 336 (6078), 205-209.
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R. ve Padilla, W. J., 2008, Perfect metamaterial absorber, *Physical Review Letters*, 100 (20).
- Lekner, J. ve Dorf, M. C., 1987, Matrix-Methods for the Calculation of Reflection Amplitudes, *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, 4 (11), 2092-2095.
- Li, J. S. ve Pendry, J. B., 2008, Hiding under the Carpet: A New Strategy for Cloaking, *Physical Review Letters*, 101 (20).
- Liao, Y. L. ve Zhao, Y., 2017a, An ultra-narrowband absorber with a dielectric-dielectric-metal structure based on guide-mode resonance, *Optics Communications*, 382, 307-310.
- Liao, Y. L. ve Zhao, Y., 2017b, Graphene-based tunable ultra-narrowband mid-infrared TE-polarization absorber, *Optics Express*, 25 (25), 32080-32089.
- Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M. ve Giessen, H., 2010a, Infrared Perfect Absorber and Its Application As Plasmonic Sensor, *Nano Letters*, 10 (7), 2342-2348.
- Liu, X. L., Starr, T., Starr, A. F. ve Padilla, W. J., 2010b, Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance, *Physical Review Letters*, 104 (20).
- Lu, D. L. ve Liu, Z. W., 2012, Hyperlenses and metalenses for far-field super-resolution imaging, *Nature Communications*, 3.
- Lu, G., Wu, F., Zheng, M. J., Chen, C. X., Zhou, X. C., Diao, C., Liu, F., Du, G. Q., Xue, C. H., Jiang, H. T. ve Chen, H., 2019, Perfect optical absorbers in a wide range of incidence by photonic heterostructures containing layered hyperbolic metamaterials, *Optics Express*, 27 (4), 5326-5336.
- Mattiucci, N., Bloemer, M. J., Akozbek, N. ve D'Aguzzo, G., 2013, Impedance matched thin metamaterials make metals absorbing, *Scientific Reports*, 3.
- Meng, L. J., Zhao, D., Ruan, Z. C., Li, Q., Yang, Y. Q. ve Qiu, M., 2014, Optimized grating as an ultra-narrow band absorber or plasmonic sensor, *Optics Letters*, 39 (5), 1137-1140.
- Min, C. J., Li, J., Veronis, G., Lee, J. Y., Fan, S. H. ve Peumans, P., 2010, Enhancement of optical absorption in thin-film organic solar cells through the excitation of plasmonic modes in metallic gratings, *Applied Physics Letters*, 96 (13).
- Pendry, J. B., 2000, Negative refraction makes a perfect lens, *Physical Review Letters*, 85 (18), 3966-3969.
- Poddubny, A., Iorsh, I., Belov, P. ve Kivshar, Y., 2013, Hyperbolic metamaterials (vol 7, pg 948, 2013), *Nature Photonics*, 7 (12).
- Rosenberg, J., Sheno, R. V., Vandervelde, T. E., Krishna, S. ve Painter, O., 2009, A multispectral and polarization-selective surface-plasmon resonant midinfrared detector, *Applied Physics Letters*, 95 (16).
- Saleki, Z., Entezar, S. R. ve Madani, A., 2017, Optical properties of a one-dimensional photonic crystal containing a graphene-based hyperbolic metamaterial defect layer, *Applied Optics*, 56 (2), 317-323.
- Sergeant, N. P., Pincon, O., Agrawal, M. ve Peumans, P., 2009, Design of wide-angle solar-selective absorbers using aperiodic metal-dielectric stacks, *Optics Express*, 17 (25), 22800-22812.
- Valentine, J., Zhang, S., Zentgraf, T., Ulin-Avila, E., Genov, D. A., Bartal, G. ve Zhang, X., 2008, Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index, *Nature*, 455 (7211), 376-U332.
- Wang, W. Y., Cui, Y. X., He, Y. R., Hao, Y. Y., Lin, Y. Y., Tian, X. M., Ji, T. ve He, S. L., 2014, Efficient multiband absorber based on one-dimensional periodic metal-dielectric photonic crystal with a reflective substrate, *Optics Letters*, 39 (2), 331-334.
- Wang, Y., Sun, T. Y., Paudel, T., Zhang, Y., Ren, Z. F. ve Kempa, K., 2012, Metamaterial-Plasmonic Absorber Structure for High Efficiency Amorphous Silicon Solar Cells, *Nano Letters*, 12 (1), 440-445.
- Wood, B., Pendry, J. B. ve Tsai, D. P., 2006, Directed subwavelength imaging using a layered metal-dielectric system, *Physical Review B*, 74 (11).
- Wu, F., Lu, G., Xue, C. H., Jiang, H. T., Guo, Z. W., Zheng, M. J., Chen, C. X., Du, G. Q. ve Chen, H., 2018, Experimental demonstration of angle-independent gaps in one-dimensional photonic crystals containing layered hyperbolic metamaterials and dielectrics at visible wavelengths, *Applied Physics Letters*, 112 (4).
- Wu, S., Xu, S., Zhang, Y., Wu, Y. N., Jiang, J. J., Wang, Q. J., Zhang, X. J. ve Zhu, Y. Y., 2014, Asymmetric transmission and optical rotation of a quasi-3D asymmetric metallic structure, *Optics Letters*, 39 (22), 6426-6429.
- Xue, C. H., Ding, Y. Q., Jiang, H. T., Li, Y. H., Wang, Z. S., Zhang, Y. W. ve Chen, H., 2016, Dispersionless gaps and cavity modes in photonic crystals containing hyperbolic metamaterials, *Physical Review B*, 93 (12).
- Yu, Z. F., Veronis, G., Fan, S. H. ve Brongersma, M. L., 2006, Design of midinfrared photodetectors enhanced by surface plasmons on grating structures, *Applied Physics Letters*, 89 (15).
- Zhou, J., Kaplan, A. F., Chen, L. ve Guo, L. J., 2014, Experiment and Theory of the Broadband Absorption by a Tapered Hyperbolic Metamaterial Array, *Acs Photonics*, 1 (7), 618-624.