

**T.C.
KARA HARP OKULU
SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI**

KIZILÖTESİ IŞIMA EMİCİ NANOYAPILARIN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hazırlayan
Abdurrahman ÖZDEMİR**

**Tez Danışmanı
Dr.Müh.Yb. Hasan KOÇER**

ANKARA - 2015

TEZ TANITIM FORMU

TEZİN TARİHİ : 01 Haziran 2015

TEZİN TİPİ : Yüksek Lisans Tezi

TEZİN BAŞLIĞI : Kızılötesi Işıma Emici Nanoyapıların Geliştirilmesi

TEZİN YAPILDIĞI BİRİM : Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü
Teknoloji Yönetimi Ana Bilim Dalı Askeri Elektronik Sistemler Mühendisliği

SPONSOR KURULUŞ : -

DAĞITIM LİSTESİ : Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü Tez
Hazırlama, Onay, Dağıtım ve Muhafaza Esasları Kılavuzunda Belirtilen
Yerlere

TEZİN ÖZETİ : Bu çalışmada yakın kızılötesi bölgede darbant ayarlanabilir
ışılma emici 3 farklı nanoyapı tasarlanmıştır. Tasarlanan ilk nanoyapı analitik
çözüm yöntemi olan TMM ile çözülmüş ve emiciliğin mükemmel olduğu dalga
boyu belirlenmiştir. Diğer iki tasarımın simülasyonu ise sayısal bir çözüm olan
FDTD yöntemini kullanan 'Lumerical FDTD solutions' programı kullanılarak
gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ile emiciliğin maksimum olduğu rezonans
dalga boyları belirlenmiştir. Mükemmel emiciliğin görüldüğü dalga boylarında
emilen toplam güç haritaları ve nanoyapıdaki elektrik alan şiddeti haritaları
çıkartılmış ve yorumlanmıştır. Son bölümde de tasarlanmış olan
nanoyapıların potansiyel kullanım alanları belirtilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : İnce Film Yapılar, Işıma Emici Nanoyapılar,
Metamalzemeler, Faz Değiştiren Malzemeler, $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$, Emicilik,
Yansıtıcılık.

SAYFA SAYISI : 54

GİZLİLİK DERECEİ : Tasnif Dışı

**T.C.
KARA HARP OKULU
SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI**

KIZILÖTESİ IŞIMA EMİCİ NANOYAPILARIN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hazırlayan
Abdurrahman ÖZDEMİR**

**Tez Danışmanı
Dr. Müh. Yb. Hasan KOÇER**

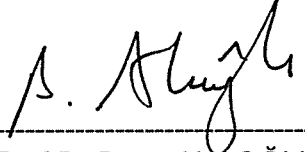
ANKARA - 2015

KARA HARP OKULU

SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Abdurrahman ÖZDEMİR'in Kızılötesi Işıma Emici Nanoyapıların Geliştirilmesi konulu tez çalışması, jürimiz tarafından TEKNOLOJİ YÖNETİMİ Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

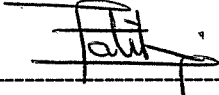
Başkan


Prof.Dr.Barış AKAOĞLU

Üye


Dr.Hasan KOÇER
(Danışman)

Üye


Dr.Fatih YAMAN

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

01.10.6/2015


(İmza ve Mühür)
Önder Haluk TEKBAS
Prof.Müh.Alb.
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Başta Kara Harp Okulu Komutanı Tümgeneral İzzet ÇETİNGÖZ olmak üzere Kara Harp Okulu Komutanlığı'na, bu çalışmanın ortaya çıkmasında tecrübeleri ile bana yol gösteren ve her konuda destek olan tez danışmanım Dr.Müh.Yb.Hasan KOÇER'e, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen Teknoloji Yönetimi Anabilim Dalı Başkanı Yrd.Doç.Dr.Müh.Alb. Celal EVCI'ye teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Hayatım boyunca beni cesaretlendiren ve eğitimim için hiç bir fedakârlıktan kaçınmayan ağabeyim Murat ÖZDEMİR'e, başarılarımda ve üzüntülerimde benimle ortak duyguları paylaşan aileme ve tez çalışmam süresince bana hep destek veren ve anlayış gösteren eşim Semra ÖZDEMİR'e minnettarım.

Son olarak, gerek derslerde gerekse tez çalışmamda desteklerini esirgemeyen değerli Kara Harp Okulu Elektronik Mühendisliği Bölümü personeline ve ayrıca Dr.Topçu Tğm. Okan Mert YÜCEDAĞ'a şükranlarımı sunarım.

T.C.
KARA HARP OKULU
SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI

KIZILÖTESİ IŞIMA EMİCİ NANOYAPILARIN
GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hazırlayan
Abdurrahman ÖZDEMİR

ÖZET

Elektromanyetik ışıma emici yapılar; fotovoltaik cihazlar, kızılötesi kamuflaj ve sensörler gibi alanlarda kullanıldığı için, çoğu mühendislerin öncelikli çalışma alanı haline gelmiştir. Bu yüzden bu çalışmada, akıllı malzeme olarak sınıflandırılan GST (Germanium Antimonide Telluride) malzemesinin yakın kızılötesi dalga boylarındaki emicilik karakteristiği incelenmiştir. Altın (Au) ve GST malzemelerinin birleştirilmesiyle üç farklı nanoyapı tasarlanmıştır. Tasarlanan nanoyapılar, TMM (Transfer Matrix Method) ve FDTD (Finite Difference Time Domain Method) ile simüle edilerek emiciliğin mükemmel olduğu rezonans dalga boyları belirlenmiştir. Bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, ışıma emici yapılar ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır.

İkinci bölümde, kızılötesi ışımanın temel prensipleri, ışıma kanunu ve malzemelerin kızılötesi bölgedeki optik özellikleri anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, faz değiştiren malzemeler ve uygulama alanları anlatılmıştır. Özellikle de bu tezde kullanılan GeSbTe (GST: Germanium Antimonide Telluride) akıllı malzemesi detaylandırılmıştır.

Dördüncü bölümde, tasarlanan nanoyapıları simüle etmek için kullanılan çözüm yöntemleri olan TMM ve FDTD anlatılmıştır. Ayrıca bu çözümlerin yapılabilmesi için gerekli olan malzemenin optik parametreleri çalışma dalga boyları aralığında spektral olarak grafiklerde gösterilmiştir.

Beşinci bölümde, nanoyapıların simülasyon sonuçları incelenmiş ve detaylı bir şekilde izah edilmiştir.

Son bölümde ise sonuçlar değerlendirilmiş ve tasarlanan nanoyapıların potansiyel kullanım alanları açıklanmıştır. Ayrıca gelecek çalışmalarda neler yapılabileceği hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler : İnce Film Yapılar, Işıma Emici Nanoyapılar, Metamalzemeler, Faz Değiştiren Malzemeler, GeSbTe, Emicilik, Yansıtıcılık.

Tez Yöneticisi : Dr.Müh.Yb.Hasan KOÇER

Sayfa Sayısı : 54

T.C.
TURKISH MILITARY ACADEMY
DEFENSE SCIENCE INSTITUTE
DEPARTMENT OF TECHNOLOGY MANAGEMENT
ANKARA 2015

DEVELOPMENT OF INFRARED RADIATION
ABSORBING NANOSTRUCTURES
MASTER THESIS

ABDURRAHMAN ÖZDEMİR

ABSTRACT

Electromagnetic radiation absorbing structures which have been used in photovoltaic devices, infrared camouflage and sensors, are turned into primary research area for many engineers. Therefore, in this study, absorption characteristics of Germanium Antimonide Telluride (GST), which is classified as smart absorber material, are investigated in the near infrared wavelengths. To achieve this goal, three different nanostructures are designed by integrating gold (Au) and the GST. Then, their simulation results are obtained by using Transfer Matrix Method (TMM) and Finite Difference Time Domain Method (FDTD) to catch near perfect absorption at some resonant wavelengths. This work is divided into five parts and ended with a conclusion part.

In the first chapter, a literature review is made related to radiation absorbing structures.

In the second chapter, the basic principles of infrared radiation, radiation laws and the optical properties of the material in the infrared region are described.

In the third chapter, phase change materials and their applications are mentioned. Especially GST smart material, which is used in this thesis is explained.

In the fourth chapter, TMM and FDTD methods are told. These methods are used to simulate the designed nanostructures. Additionally, the optical parameters of the material required to make these solutions are shown in the chart at the operating range of spectral wavelengths.

In the fifth chapter, the results of simulation of nanostructures are examined and explained in detail.

The last chapter describes the results evaluated and potential uses of designed nanostructures. It also provides information about what can be done in future studies.

Keywords : Thin Film Structures, Radiation Absorber Nanostructures, Metamaterials, Phase Change Materials, GeSbTe, Absorption, Reflection.

Advisor : Lt.Col. Hasan KOÇER (PhD)

Number of Pages : 54

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER.....	viii
KISALTMALAR.....	x

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİRİŞ	1
----------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

2. KIZILÖTESİ IŞIMA VE KIZILÖTESİ BÖLGEDE MALZEMELERİN OPTİK ÖZELLİKLERİ	5
---	---

2.1. Kızılötesi Işıma	5
-----------------------------	---

2.2. Malzemelerin Optik Özellikleri ve Kızılötesi Bölgedeki Davranışları.....	7
--	---

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. FAZ DEĞİŞİMLİ AKILLI MALZEMELER (VO_2 ve $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$).....	12
--	----

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. NANOYAPILARIN TASARIMI VE ANALİTİK/SAYISAL SİMÜLASYON YAKLAŞIMLARI 15

4.1 Tasarlanan Nanoyapılar ve Optik Parametreleri 15

4.1.1 Tasarım-1 16

4.1.2 Tasarım-2 18

4.1.3 Tasarım-3 19

4.2 Analitik ve Sayısal Çözüm Yaklaşımları 20

4.2.1 TMM Metodu-Analitik Çözüm 20

4.2.2 FDTD Metodu-Sayısal Çözüm 22

BEŞİNCİ BÖLÜM

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA 32

5.1 Tasarım-1 32

5.2 Tasarım-2 34

5.3 Tasarım-3 39

ALTINCI BÖLÜM

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 49

KAYNAKÇA 52

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil-1: Elektromanyetik Spektrum	6
Şekil-2: Bir Cisme Gelen EM Işımanın Farklı Durumları	7
Şekil-3: Bir Atomda Bağlı Elektronun Klasik Modeli (Lorentz, [Web])	9
Şekil-4: DVD-RAM'ler için Kaydetme ve Silme İşlemi (DVD-RAM, [Web]).	12
Şekil-5: $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$ Akıllı Malzemesinin Her İki Fazının Atomlarının Dizilim Modellenmesi ve Faz Değişikliğindeki Kırılma İndisinin Reel (n) ve Sanal (K) Kısımlarının Dalga Boyuna Göre Değişimleri.....	13
Şekil-6: (a) Altın Malzemesinin Bağlı Dielektrik Sabitinin Dalga Boyuna Göre Reel ve Sanal Bileşenleri (Palik, 1998), (b) GST Malzemesinin Amorf ve Kristal Fazdaki Bağlı Dielektrik Sabitinin Reel ve Sanal Bileşenleri (Shportko, 2008)	15
Şekil-7 : İnce Film Tabanlı 1. Nanoyapının Şematik Gösterimi	17
Şekil-8: İnce Film Tabanlı Işıma Emici Plazmonik İkinci Nanoyapının Şematik Gösterimi.....	18
Şekil-9: İnce Film Tabanlı Işıma Emici Plazmonik 3. Nanoyapının Şematik Gösterimi.....	19
Şekil-10: Yee Birim Hücre (Yee,1966 [web])	24
Şekil-11: Simülasyonda Kullanılan Kristal Fazdaki GST Malzemesinin Kırılma İndisinin (a) Reel ve (b) Sanal Bileşenleri	30
Şekil-12: EM Işıma Kaynağının Malzeme Normaliyle Yaptığı Açıya ve Polarizasyona (TE/TM) Göre Emicilik (a) 0° , (b) 20° , (c) 40° ve (d) 60°	33
Şekil-13: Tasarlanan Yapının Simülasyon Sonuçları; Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapının Izgarasına Dik Olarak Geldiğinde (a) Yansıtıcılık ve (b) Emicilik. Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapının Izgarasına Paralel Olarak Geldiğinde (c) Yansıtıcılık ve (d) Emicilik.....	35

Şekil-14: 2039 nm Rezonans Dalga boyunda Emilen Toplam Güç; (a) Amorf Fazdaki GST İçin (b) Kristal Fazdaki GST İçin; 2143 nm Rezonans Dalga boyunda Emilen Toplam Güç; (c) Amorf Fazdaki GST (d) Kristal Fazdaki GST.....	36
Şekil-15: 2039 nm Rezonans Dalga boyundaki Elektrik Alan Şiddetinin 2-Boyutlu Haritası; (a) Amorf Fazdaki GST. (b) Kristal Fazdaki GST. 2143 nm Rezonans Dalga boyundaki Elektrik Alan Şiddetinin 2-Boyutlu Haritası; (c) Amorf Fazdaki GST (d) Kristal Fazdaki GST	38
Şekil-16: Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Dikey Olarak Geldiğinde (a) Yansıtıcılık ve (b) Emicilik. Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Paralel Olarak Geldiğinde (c) Yansıtıcılık ve (d) Emicilik.....	40
Şekil-17: 1207 Kelvin’de Nanoyapı ile Kara cismin Plank Işıması.....	43
Şekil-18: Üçüncü Nanoyapının Kullanıldığı Örnek Askeri Platform Modellemesi.....	44
Şekil-19: Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Dikey Olarak Geldiğinde Emilen Toplam Güç (a) GST-Amorf ve (b) GST-Kristal. Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Paralel Olarak Geldiğinde Emilen Toplam Güç (c) GST-Amorf ve (d) GST-Kristal.....	45
Şekil-20: Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Dikey Olarak Geldiğinde Emilen Elektrik Alan Şiddetinin 2-Boyutlu (a) GST-Amorf ve (b) GST-Kristal Durumlarındaki Haritası. Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Paralel Olarak Geldiğinde Elektrik Alan Şiddetinin 2-Boyutlu (c) GST-Amorf ve (d) GST-Kristal Durumlarındaki Haritası.....	47

KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Absorption
Ag	: Silver
Au	: Gold
Cr	: Chrome
ϵ	: Emissivity
EM	: Electromagnetic
FDTD	: Finite Difference Time Domain
InSb	: Indium Antimonide
N-IR	: Near-Infrared
GST	: Germanium-Antimony-Tellurium
Ge	: Germanium
M-IR	: Mid-Infrared
PDE	: Partial Differential Equation
R	: Reflection
T	: Transmission
TE	: Transverse Electric
TM	: Transverse Magnetic
TMM	: Transfer Matrix Method
VO₂	: Vanadium Dioxide

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİRİŞ

Metamalzeme, doğada bulunan malzemelerin elektriksel olarak çok küçük ve farklı geometrilerde bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Metamalzemelerin optik özellikleri (kırılma indisi ve bağıl dielektrik sabiti) doğadaki malzemelerden farklı olmaktadır. Bu malzemeler elektromanyetik (EM) ışımaya açısından; emici, yansıtıcı ve geçirgen olarak tasarlanmaktadır.

Altın (Au), bakır (Cu) ve gümüş (Ag) kızılötesi banttaki EM ışımayı çok iyi yansıtan asal metallerdir. Bu tür metallerin farklı geometrilerde birleştirilmesiyle rezonans durumlar oluşabilmektedir ve rezonans durumlarda mükemmel emici yapılar tasarlanabilmektedir (Landy v.d., 2008; Liu v.d., 2010; Zhou v.d., 2011; Zhang v.d., 2011; Aydın v.d., 2011). Terahertz rejiminde de çalışmalar mevcuttur (Tao v.d., 2008; Chen v.d., 2006; Chen v.d., 2008). Faz değiştiren malzemeler (GeSbTe-GST ve VO₂) kullanılarak plazmonik olmayan emici nanoyapılar tasarlanmıştır (Kats v.d., 2012; Hosseini v.d., 2014). Faz değiştiren malzemeler kullanılarak plazmonik yapılar da tasarlanmıştır (Wen v.d., 2012; Cao v.d., 2013(a); Cao v.d., 2013(b); Cao v.d., 2014; Driscoll v.d., 2008; Voti v.d., 2012). Kızılötesi (Infrared-IR) bantta; hedef tanıma, biyo-kimyasal algılama, kamuflaj, kızılötesi imza taklit, görüntüleme, sensörler, kızılötesi dalga boyu seçici etiketleme ve IR kaynakları olarak birçok potansiyel uygulamalar vardır (Streuer v.d., 2013; Talghader v.d., 2012). Bu kapsamda IR dalga boyu aralığı için ayarlanabilir bir rezonans yanıtı sahip ısı yayıcılar (Greffet v.d., 2002), termofotovoltaik hücreler (Avitzour v.d., 2009) ve plazmonik saçıcılar tasarlanmıştır (Ferry v.d., 2008; Atwater v.d., 2010; Pala v.d., 2009). Özellikle de oda sıcaklığında kalıcı özelliği ve farklı fazları arasındaki kırılma indisleri farkından dolayı GST büyük ilgi görmektedir. Literatürdeki bu yöndeki bazı çalışmaların detayları aşağıda sunulmuştur.

Kats ve arkadaşları 150 nm kalınlığında altın tabaka üzerine sırasıyla 7 nm, 10 nm, 15 nm, 20 nm ve 25 nm kalınlığında Ge (Germanyum) ile kaplayarak tasarladıkları yapıyı TMM (Transfer Matrix Method) kullanarak çözümünü yapmışlardır. Bu çözüm sonucunda Ge kalınlığı arttıkça maksimum emicilik (absorption) değeri artmaktadır. Ayrıca Ge kalınlığının artması maksimum emicilik değerinin görüldüğü dalga boyunu da daha büyük dalga boyu değerine kaydırmaktadır (Kats v.d., 2012).

Cao ve arkadaşları teorik olarak, bir $\text{Ge}_2\text{SbTe}_4/\text{Au}$ alt-tabaka üzerinde, Au karelerden oluşan iki boyutlu periyodik dizilişler yapmış, orta kızılötesi (M-IR) dalga boyu bölgesinde, bir polarizasyon bağımsız ayarlanabilir mükemmel emici analiz etmişlerdir. Ge_2SbTe_4 'ın malzeme fazı değişimiyle emiciliğin maksimum olduğu dalga boyu % 10 oranında daha büyük bir dalga boyuna kaymıştır (Cao v.d., 2013(b)).

Michel ve arkadaşları bu çalışmalarında orta kızılötesi bölgede rezonans dalga boyunu ayarlamak için düşük kayıplı faz değiştiren malzemeler kullanmışlardır. Kullandıkları faz değiştiren malzemeler $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ ve InSb malzemeleridir. Her iki malzeme için de faz değişimi gerçekleştiğinde nanoantenin yansımasının $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 'de daha büyük bir dalga boyuna, InSb'de ise daha küçük bir dalga boyuna kaydığının deneysel sonuçları ve simülasyon sonuçlarının benzer olduğunu göstermişlerdir (Michel v.d., 2013).

Cao ve arkadaşları bu çalışmalarında 100 nm kalınlığında altın malzemesi üzerine 25 nm kalınlığında $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ malzemesi kaplamış ve $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ tabakasının üstüne de x, y ve z boyutları sırasıyla 140 nm, 140 nm, 100 nm kalınlığında altın prizmalar yerleştirilerek geniş bant mükemmel ışına emici metamalzeme tasarlamışlardır. Bu mükemmel emiciliğin olduğu dalga boyları aralığı 610 nm ile 870 nm'dir. Bu tasarımlarını $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ üzerine yerleştirdikleri altın partiküllerin kaldırarak oluşturdukları diğer yapı ile karşılaştırarak iki yapı arasındaki emicilik ve yansıtıcılık başarımları farkını gözlemlemiştir. İlk tasarımları olan altın nanopartiküllerinin yerleştirildiği yapı daha geniş bantta emicilik başarımı göstermiştir (Cao v.d., 2014).

Butun ve arkadaşları çalışmalarında bir yansıtıcı metal ve bir çapraz yamuk şeklinde metal ve iki metal arasında bir şeffaf dielektrik kullanarak

pasif ultra-ince metamalzeme ışıma emici tasarlamışlardır. Bu tasarım sadece 190 nm kalınlığa sahiptir. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarına göre 350 nm'den daha geniş bir dalga boyu aralığında mükemmel yakın bir emicilik sağlanmıştır. Bu çalışmada görünür bölgenin tamamında % 80 oranında ışımanın emilmesi sağlanmıştır (Butun ve Aydın, 2014).

Kocer çalışmasında tasarımını, geometrisi 200 nm kalınlığına ve 2 μ m genişliğe sahip altın malzemesinin içine 100 nm kalınlığında ve 1 μ m genişliğine sahip VO₂ (vanadium dioxide) akıllı malzemesi yerleştirerek oluşturmuştur. EM düzlem dalganın (2-3 μ m arası dalga boyu), elektrik alan polarizasyonun yapı üzerine dikey ve paralel olarak geldiği her iki durum için simülasyon yaparak nanoyapının ışıma emiciliğini (absorption) gözlemlemiştir. Sonuç olarak bu yapıda VO₂ malzemesinin sıcaklığının artırılarak faz değiştirmesiyle (yalıtkan fazdan metal faza geçildiğinde) rezonans dalga boyundaki kızılötesi emiciliğin % 83 oranında değiştiğini gözlemlemiştir (Kocer, 2015).

Kocer ve arkadaşları bu çalışmalarında, üst tabakada çok ince Cr olan ve alttaş malzeme olarak safirden oluşan yapı ile üst metali ince Cr olan MIM (Metal-Yalıtkan-Metal) yapısının 1.2 μ m ve 1.8 μ m dalga boylarında, gelen ışımayı emme oranlarını ölçmüş ve simüle etmiştir. Deney ve simülasyon sonuçlarına göre 1.2 μ m dalga boyunda Cr kalınlığı arttıkça emilim miktarının MIM yapıda artarken, ince Cr film yapısında azaldığı görülmüştür. Bu yapılar farklı açılarda ışıma verildiğinde TM polarizasyonundaki emilim, TE polarizasyona göre; hem MIM yapısında hem de ince film Cr yapısında belirtilen dalga boylarında ışımanın geliş açısı arttıkça artmaktadır (Kocer v.d., 2015).

Li ve arkadaşları, EM spektrumun görünür bölgesinde optik filtreler tasarlamışlardır. Bu tasarımlarında Metal-Yalıtkan-Metal yapısını kullanmışlar. Metal tabaka olarak Gümüş (Ag) ve yalıtkan olarak da SiO₂ kullanılmıştır. Gümüş tabakalar ince tutularak geçirgenlik sağlanmıştır. SiO₂ malzemesinin kalınlığı değiştirilerek her kalınlıkta malzemenin farklı bir renkte görünmesini sağlayarak renk filtresi tasarlamışlardır (Li v.d., 2015).

Chen ve arkadaşları, yakın kızılötesi bölgede 650 nm frekans aralığında olan bir ayarlanabilir plazmonik mükemmel emici tasarlamışlardır. Tasarımlarını Metal-Yalıtkan-Metal konfigürasyonuna 20 nm kalınlığında bir faz-değiştiren

malzeme olan $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ tabakasını ekleyerek gerçekleştirmişlerdir. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ faz değiştirdiğinde mükemmel emiciliğin olduğu dalga boyu 650 nm kaymıştır. Plazmonik rezonans soğurma, tüm ayar aralığı (650 nm) boyunca 0.96'nın üstünde tutulmuştur (Chen v.d., 2015).

İKİNCİ BÖLÜM

2. KIZILÖTESİ IŞIMA VE KIZILÖTESİ BÖLGEDE MALZEMELERİN OPTİK ÖZELLİKLERİ

2.1. Kızılötesi Işıma

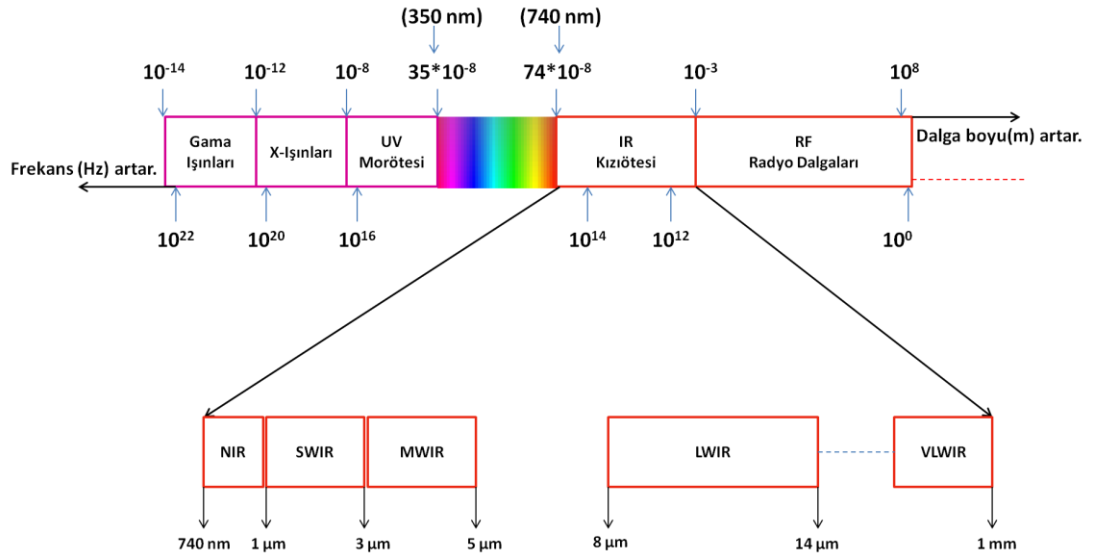
Sıcaklığı mutlak sıcaklığın üzerinde olan her cisim kızılötesi ışıma yapar. Kızılötesi ışıma elektromanyetik spektrumunun 0.75 µm ile 1 mm dalga boyu arasındaki ışık dalgalarına karşılık gelmektedir. Bütün elektromanyetik dalgalar, boşlukta ışık hızı (c) ile yayıldıkları için, frekans (f) ile dalga boyu (λ) arasındaki bağıntı;

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

şeklindedir. Enerji, dalga boyu ve frekans arasındaki bağıntı ise;

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = hf \quad (2.2)$$

ile ifade edilir. Burada; E_f foton enerjisi (Joule), h Plank sabiti, 6.626×10^{-34} (Joule.s) ve f ışığın frekansı (Hz) olmak üzere foton enerjisi frekansla doğru orantılı ve dalga boyu ile ters orantılıdır. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar yüksek enerjiye ancak kısa dalga boyuna; düşük frekanslı elektromanyetik dalgalar ise düşük enerjiye ancak uzun dalga boyuna sahiptirler. Elektromanyetik dalgalar, geniş bir frekans veya dalga boyu aralığını kapsar. Elektromanyetik spektrum ve kızılötesi bölgenin detaylı gösterimi Şekil-1'de gösterilmiştir. Elektromanyetik dalgalar, sağdan sola frekansı artacak şekilde; radyo dalgaları - kızılötesi dalgalar - morötesi - x ışını - gama ışınları olarak sınıflandırılır. Kızılötesi ışıma bölgesi de kendi içinde bölgelere ayrılmaktadır.



Şekil-1: Elektromanyetik Spektrum

Sıcaklığı mutlak sıcaklığın (0 Kelvin) üzerinde olan tüm nesneler, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kızılötesi ışıma yayar. Yayılan ışıma insan gözüyle görülmez, fakat çok yüksek sıcaklıklarda insan gözüyle görülebilir. Her nesnenin yaydığı ışıma dalga boyuna göre farklılık gösterir. Sıcaklık arttıkça yayılan ışımının maksimum değeri daha küçük dalga boyunda olur. Yayılcılığı (ϵ : emissivity) 1 olan bir kara cismin (blackbody) dalga boyuna ve sıcaklığa göre yaydığı ışıma (M) Plank kanunu ile ifade edilir. Plank kanunu;

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T) dt \quad (2.3)$$

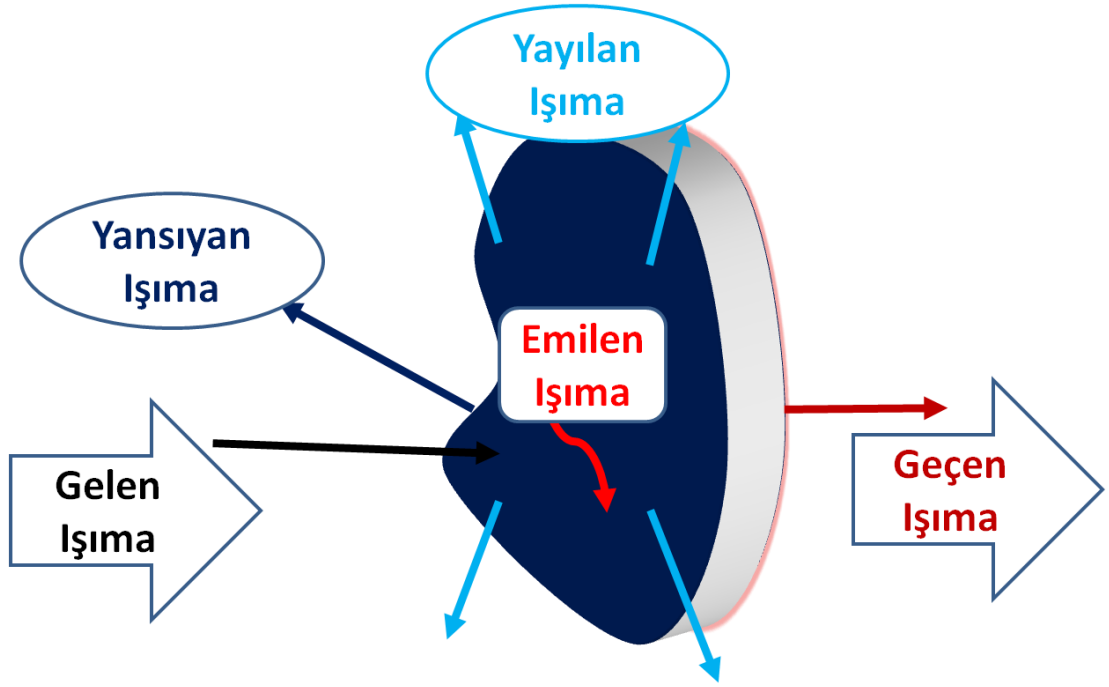
şeklindedir. Plank kanunundan spektral olarak birim alandan birim dalga boyunda yayılan ışıma gücü;

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2.4)$$

şeklindedir. Burada; $M(\lambda, T)$ birim alandan birim dalga boyunda yayılan güç ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}$), T mutlak sıcaklık (Kelvin), λ dalga boyu (μm), c_1 birinci ışıma sabiti ($3.7418 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^4$), c_2 ikinci ışıma sabitidir ($1.4388 \times 10^4 \mu\text{m.K}$).

2.2. Malzemelerin Optik Özellikleri ve Kızılötesi Bölgedeki Davranışları

Doğadaki malzemelerin optik özellikleri EM ışımaya karşı gösterdikleri tepkilerinin nasıl olacağını belirleyen parametrelerdir. Bir cisme gelen ışmanın bir kısmı cisimden yansır, bir kısmı cisim tarafından soğrulur, bir kısmı da cisim tarafından geçirilir. Cisimden yansıyan, cisim tarafından soğrulan ve cismin geçirdiği ışmanın toplamı cisme gelen ışımaya eşit olacaktır. Cisme gelen ışmanın söz konusu farklı durumları Şekil-2’de gösterilmiştir.



Şekil-2: Bir Cisme Gelen EM ışmanın Farklı Durumları

Bir cisim üzerine gelen EM ışma enerjinin korunumu prensibine göre yok olmayacaktır. Gelen enerjinin bir kısmı cisimden yansıyacak (R : Yansıtıcılık = Yansıyan Işıma Gücü / Gelen Işıma Gücü), bir kısmı cisimden geçecek (T : Geçirgenlik = Geçen Işıma Gücü / Gelen Işıma Gücü) ve bir kısmı da cisim tarafından soğrulacaktır (A : Soğurma (emicilik) = Soğurulan

Işıma Gücü/ Gelen Işıma Gücü). Soğrulan güç aynı zamanda cismin ortama yaydığı (ϵ : yayıcılık = A (Soğurma)) güce eşittir. Buna göre;

$$A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1 \quad (2.5)$$

olacaktır. Buradaki emiciliğin sıfırdan farklı olması malzemenin kayıplı bir malzeme olduğunu göstermektedir. Kayıplı malzemelerde malzemelerin optik parametreleri kompleks kırılma indisi ($\tilde{n}$) ve kompleks bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) ile incelenmektedir. Bir malzemenin kızılötesi bantta kayıplı olabilmesi, yani gelen EM ışımının emilebilmesi için kırılma indisinin sanal bileşeninin (K), veya bağıl dielektrik sabitinin sanal bileşeninin (ϵ_2) sıfırdan farklı olması gerekmektedir (Fox, 2001).

$$\tilde{n} = n + iK \quad (2.6)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.7)$$

Yukarıdaki formüller birbiri ile ilişkilidir. Bu ilişki $\tilde{n}^2 = \epsilon_r$ şeklinde ifade edilebileceği gibi reel ve sanal bileşenlerin birbirleriyle dönüştürülebilir oldukları aşağıdaki denklemler de mevcuttur.

$$\epsilon_1 = n^2 - K^2 \quad (2.8)$$

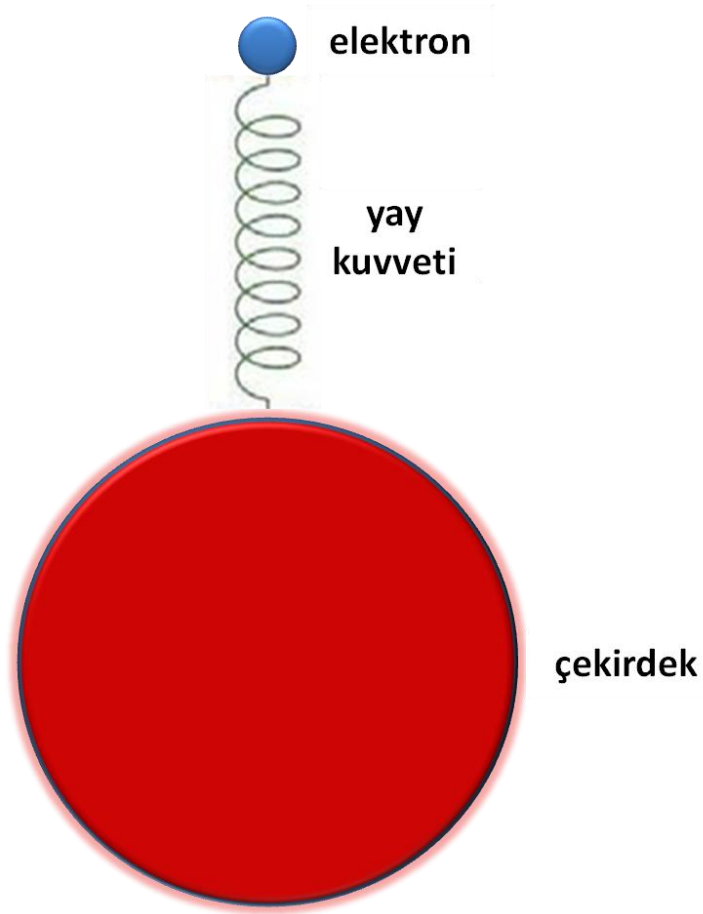
$$\epsilon_2 = 2Kn \quad (2.9)$$

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}} \quad (2.10)$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{-\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}} \quad (2.11)$$

Bağıl dielektrik sabiti ve kırılma indisi malzemelerin optik özellikleridir. Malzemelerde soğurmanın gerçekleşmesinin anlamı ortamdaki ışımının frekansı ile malzeme atomları arasındaki titreşim frekansının aynı olmasıdır. Bu durum rezonans durumudur.

Bir malzemenin yalıtkan ve metal durumları için atom modelleri bulunmaktadır. Yalıtkanlar Lorentz osilatör modeli, metaller ise Drude modeli ile modellenirler. Bir atoma bağlı olan elektronlardan bir tanesinin atom çekirdeğine bağlı atom modeli Şekil-3'teki gibidir.



Şekil-3: Bir Atomda Bağlı Elektronun Klasik Modeli (Lorentz, [Web])

Şekil-3'te elektron mavi küre şeklinde, atom çekirdeği ise kırmızı büyük küre şeklindedir. Bu modelde elektronlar, elektron ile çekirdek arasındaki bağdan dolayı çekici kuvveti temsil eden yay ile çekirdeğe tutunurlar. Her atom sahip olduğu enerjilerden dolayı bir takım rezonans frekansa sahiptirler. Şekil-3'teki modelde elektronun çekirdeğe göre daha kararlı bir yörüngede olduğu kabul

edilir. Yay ters çekim kuvvetini temsil etmektedir. Atomik dipollerin doğal rezonans frekansı ω_0 , çekirdek ve elektronun kütleleri ile küçük yer değiştirmeler için oluşan ters çekim kuvvetin büyüklüğünden faydalanılarak bulunur. Uygun olan kütle indirgenmiş kütledir ve denklem 2.12'de belirtilmiştir.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_0} + \frac{1}{m_N} \quad (2.12)$$

burada m_0 ve m_N elektron ve çekirdeğin kütleleridir. $m_0 \ll m_N$ olduğundan, $\mu \approx m_0$ alınabilir. Ters çekim kuvveti bir K_s yay sabiti ile ölçülür. K_s yay sabiti atomların doğal frekansları ω_0 'a denk gelecek şekilde seçilir ve denklem 2.13'te verilmiştir.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_s}{\mu}} \quad (2.13)$$

Yalıtkanlar için Lorentz Modelinde; denklem 2.13'te belirtildiği gibi bağlı elektronlardan dolayı sadece bir tek rezonans frekansına sahip bir atom ile bir ışık dalgası arasındaki etkileşim dikkate alınmıştır. Çekirdek ile elektron kütle farkından dolayı çekirdeğin hareketi ihmal edilir. Elektronun x yönünde yer değiştirmesinin hareket denklemi 2.14'te gösterilmiştir.

$$m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + m_0 \gamma \frac{dx}{dt} + m_0 \omega_0^2 x = -eE \quad (2.14)$$

burada γ sönüm oranı, e elektronun elektriksel yükü ve E ise ışık dalgasının elektrik alanıdır. Denklem 2.14'teki terimler sırasıyla; ivme, sönüm ve ters çekim kuvvetidir. Eşitliğin sağındaki terim ise itici kuvvettir. Bağıl dielektrik sabitinin frekansa göre değişimi denklem 2.15'te verilmiştir.

$$\epsilon_r = 1 + \frac{\omega_p^2}{[\omega_0^2 - \omega^2 - j\gamma\omega]} \quad (2.15)$$

burada ω_p plazma frekansını gösterir ve denklem 2.16'daki gibidir.

$$w_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}} \quad (2.16)$$

Burada N atom sayısını temsil etmektedir. Malzemelerde dielektrik sabitinin frekansa bağlı olarak değişmesi malzemenin dağıtıcı (dispersive) bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Çalışılan frekansın; plazma frekansı, doğal rezonans frekansı ve sönüm oranına göre durumları malzemenin ışık ile etkileşimini değiştirecektir. Yalıtkanlar için; frekans $0 < w < w_0 - \gamma$ aralığında iken malzeme geçirgen, frekans $w_0 - \gamma < w < w_0 + \gamma$ aralığında iken malzeme emici, frekans $w_0 + \gamma < w < w_p$ aralığında iken yansıtıcı ve $w > w_p$ durumunda ise geçirgen özellik göstermektedir (Fox, 2001).

Metaller için Drude Modeli ise Lorentz modelinde $w_0 = 0$ alındığı durumda oluşan modeldir. Yani metallerde bağlı dielektrik sabiti hesaplanırken doğal rezonans frekansı sıfırdır. Metallerde dielektrik sabitinin frekansa göre değişimi Drude modeline göre denklem 2.17’de gösterilmiştir.

$$\epsilon_r = 1 - \frac{w_p^2}{[w^2 + j\gamma w]} \quad (2.17)$$

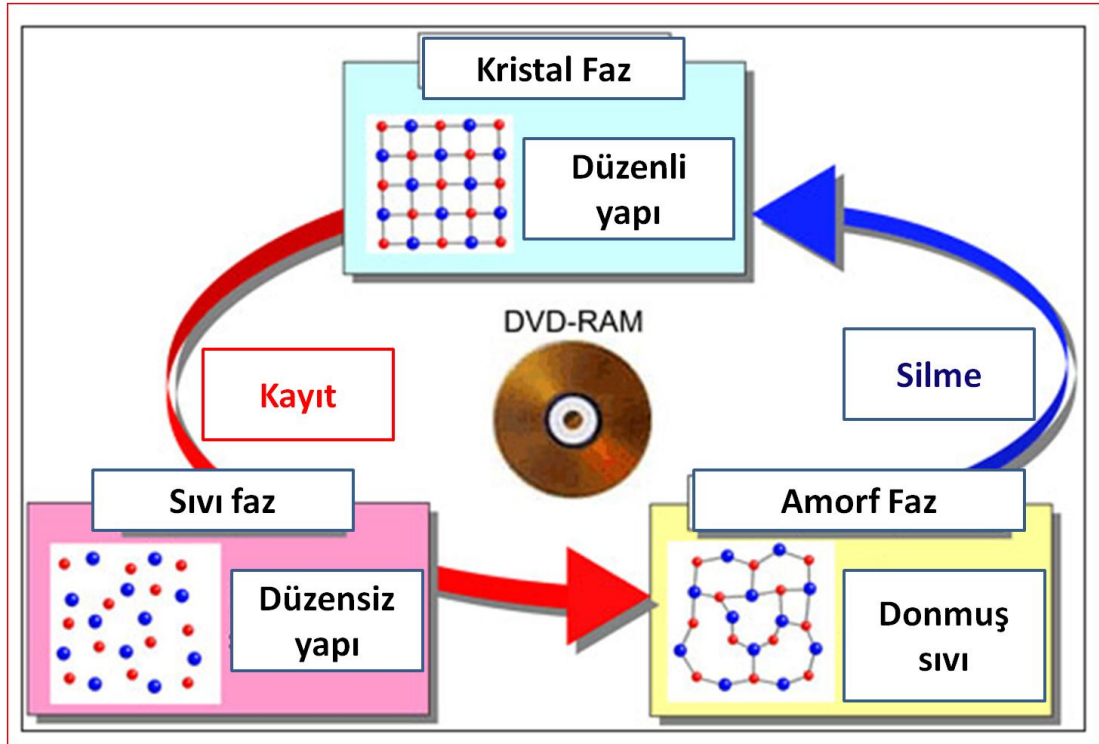
Metallerde çalışılan frekansın; plazma frekansı ve sönüm oranına göre durumları malzemenin ışık ile etkileşimini değiştirecektir. Metaller için; çalışma frekansı $0 < w < \gamma$ aralığında iken malzeme emici, çalışma frekansı $\gamma < w < w_p$ aralığında iken malzeme yansıtıcı, frekans $w_0 + \gamma < w < w_p$ aralığında iken yansıtıcı ve $w > w_p$ durumunda ise geçirgen özellik göstermektedir.

Özetle bir malzemenin bilinen modeline atom ve moleküllere bağlı elektronlardan dolayı oluşan rezonanslar EM spektrumun optik (Kızılötesi, Görünür ve Morötesi) bandında oluşur. Bu rezonanslar için uygun titreşimlerin gerçekleştiği bölge ise kızılötesi bölgedir. (Fox, 2001)

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. FAZ DEĞİŞİMLİ AKILLI MALZEMELER (VO_2 ve $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$)

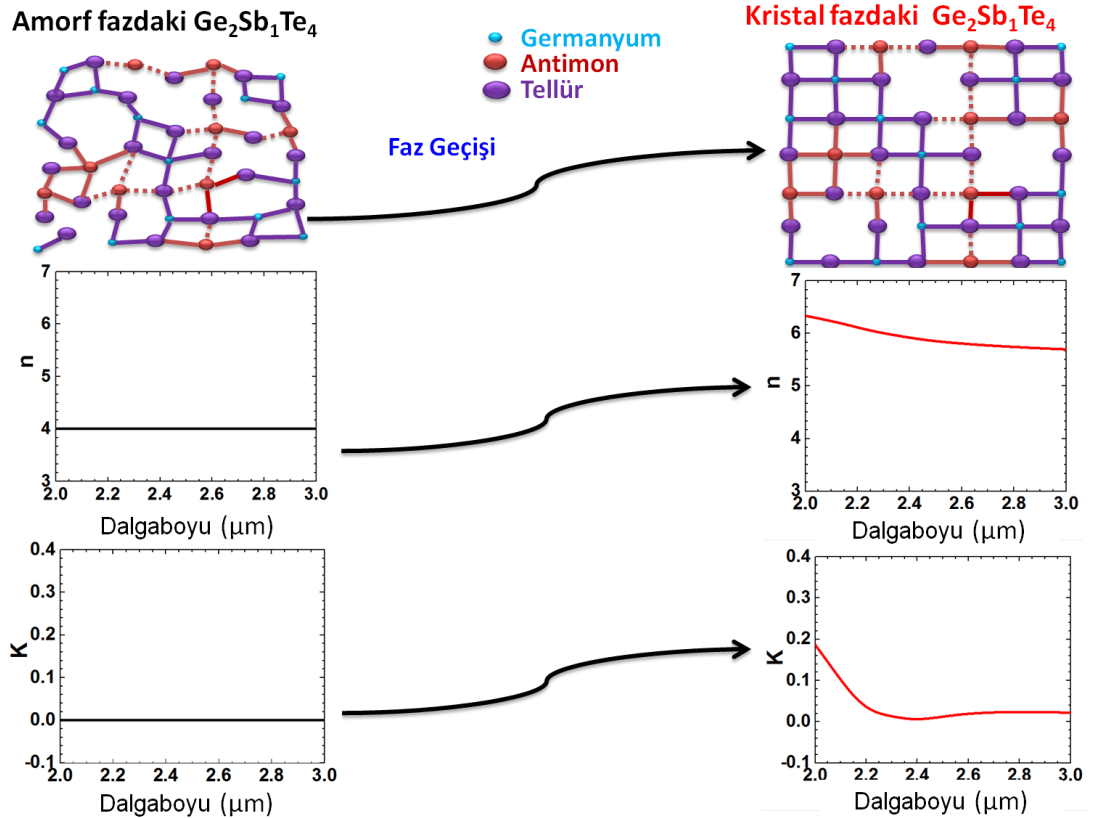
Faz değıştiren malzemeler, atomik yapılarının düzenlerini ışık veya sıcaklıkla değıştirebilen ve sonrasında stabil durumlarını koruyabilen malzemelerdir. Faz değıştiren malzemelere örnek olarak VO_2 , InSb ve GST malzemeleri verilebilir. VO_2 malzemesini kullanarak ışıma emici yapılar tasarlanmıştır (Koçer, 2015; Dicken v.d., 2009). InSb ve GST malzemelerinin başarımını karşılaştıran çalışmalar da mevcuttur. (Michel v.d., 2013). GST malzemesinin bir çok alaşımı mevcuttur (Shportko v.d., 2008). Bu çalışmada GST'nin $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$ alaşımı kullanılmıştır. Faz değıştiren malzemelerin uygulama alanlarından birisi optik veri saklamaya uygun olmasıdır (Wuttig M. ve N. Yamada, 2007). Ayrıca tekrar silinebilir CD, DVD ve RAM'lerde kullanılmaktadır. DVD-RAM'lerdeki faz değışimli malzeme kullanılmasının modeli Şekil-4'te gösterilmiştir.



Şekil-4: DVD-RAM'ler için Kaydetme ve Silme İşlemi (DVD-RAM, [Web])

Şekil-4'te faz değiştiren malzemenin kullanıldığı DVD-RAM'lerdeki kaydetme ve silme işlemi gösterilmiştir. Malzeme amorf fazda iken atom yapıları düzensizdir. Bu fazda DVD-RAM silme işlemi yapmaktadır. Ancak dış etkiyle faz değişimli malzeme kristal faz geçtiğinde DVD-RAM kaydetme işlemi yapmaktadır. Akıllı malzeme sayesinde DVD-RAM'ler silme ve kaydetme işlemini yapısı değişmeden yapabilmektedir.

Malzemeler bir dış etki ile faz değiştirdiklerinde EM ışınla etkileşimlerinde ışımaya karşı reaksiyonları farklılaşmaktadır. Çünkü optik parametreleri (kırılma indisi, bağıl dielektrik sabiti) malzeme fazı değişimiyle birlikte spektral olarak farklılaşmaktadır. Bu çalışmada kullanılan $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_4$ akıllı faz değişimli malzemenin faz değiştirmesinin atomlarının model dizilişindeki ve malzemenin kırılma indisindeki değişimler Şekil-5'teki gibidir.



Şekil-5: $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_4$ Akıllı Malzemesinin Her İki Fazının Atomlarının Dizilim Modellenmesi ve Faz Değişikliğindeki Kırılma İndisinin Reel (n) ve Sanal (K) Kısımlarının Dalga Boyuna Göre Değişimleri

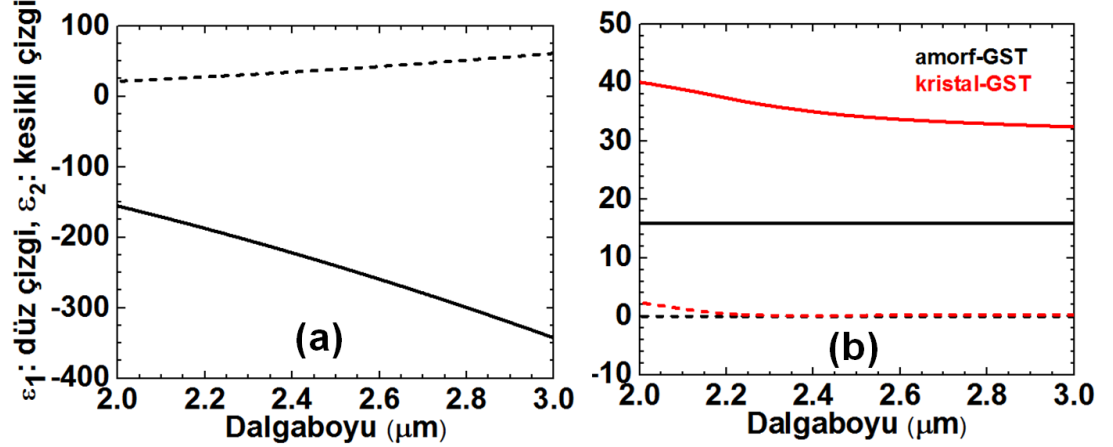
Şekil-5'e bakıldığında GST amorf fazda iken atomların dizilimi dağınıktır. GST faz değiştirdiğinde, yani kristal faza geçtiğinde atomların dizilimi daha düzenli hale gelmektedir. Bu durum GST gibi akıllı malzemelerin faz değişimlerinde optik özelliklerinin de değiştiğini göstermektedir. 2-3 μm dalga boyu aralığında; GST-amorf durumunda kırılma indisinin reel bileşeni sabit ve 4 iken sanal bileşeni sıfırdır. Ancak GST faz değiştirdiğinde aynı dalga boyları arasında; kırılma indisinin reel bileşeninin 5 ile 6.5 arasında değişim gösterdiği, sanal bileşenin ise 0 ile 0.18 arasında bir değişim gösterdiği grafiklerden anlaşılmaktadır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. NANOYAPILARIN TASARIMI VE ANALİTİK/SAYISAL SİMÜLASYON YAKLAŞIMLARI

4.1 Tasarlanan Nanoyapılar ve Optik Parametreleri

Nanoyapıların simülasyonları için tasarımda kullanılan malzemelerin (Au ve GST) simülasyonun yapılacağı dalga boyu aralığındaki optik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Optik özellik olarak kırılma indisi veya bağıl dielektrik sabitlerinin spektral davranışlarının bilinmesi yeterli olmaktadır. Optik özellikler bilindiği takdirde simülasyon gerçekleştirilebilmektedir. Şekil-6'da, tasarlanmış olan nanoyapılar için kullanılan altın ve GST malzemelerinin; 2-3 μm dalga boyları arasındaki bağıl dielektrik sabitlerinin, reel (ϵ_1) ve sanal (ϵ_2) bileşenlerinin dalga boyuna göre grafikleri görülmektedir.



Şekil-6: (a) Altın Malzemesinin Bağıl Dielektrik Sabitinin Dalga Boyuna Göre Reel ve Sanal Bileşenleri (Palik, 1998), (b) GST Malzemesinin Amorf ve Kristal Fazdaki Bağıl Dielektrik Sabitinin Reel ve Sanal Bileşenleri (Shportko, 2008)

Simülasyonlarda, kullanılan malzemelerin kırılma indislerinin reel ve sanal bileşenleri gerekmektedir. Kırılma indisi, dielektrik sabiti ile ilgilidir. $\tilde{n}^2 = \epsilon_r$ formülü bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) ile kırılma indisinin ($\tilde{n}$) doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Şekil-6(a)'da altın malzemesinin dielektrik

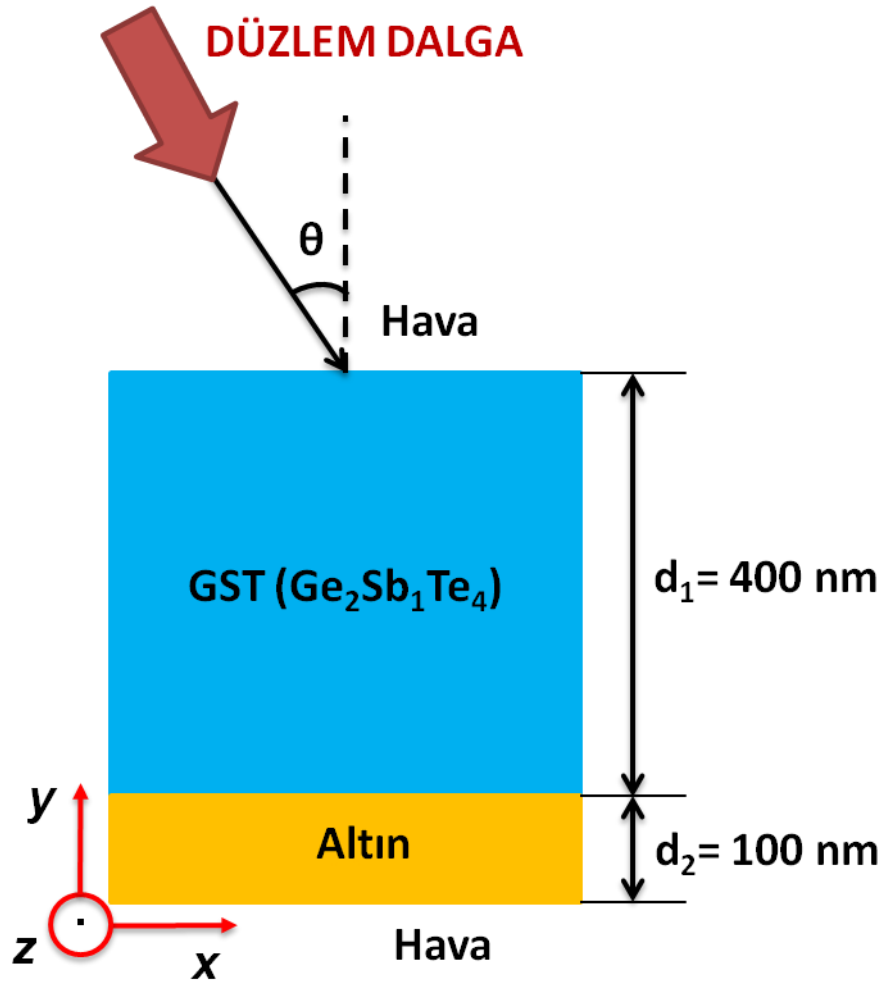
sabiti verilmiştir. Altın malzemesinin dielektrik sabitinin sanal bileşeni sıfırdan farklı olduğu için altın kayıplı malzemedir. Malzemenin kayıplı olması emiciliğinin sıfırdan farklı olmaya meyilli olduğu anlamına gelmektedir. Şekil-6(b)'de GST malzemesinin amorf ve kristal fazının bağıl dielektrik sabiti dalga boyuna göre verilmiştir.

Nanoyapılar tasarlanırken ince film yapıları ve plazmonik yapılar olmak üzere iki farklı şekilde tasarlanırlar. İnce film yapılarında farklı kalınlıklarda malzemeler üst üste eklenerek iki boyutta sürekli olan yapılar kullanılır. Yani kullanılan farklı malzemelerin sadece kalınlıkları farklı olur. Diğer boyutlar kullanılan tüm malzemelerde eşittir. Bu tür yapılar sürekli yapılardır. Plazmonik yapılarda ise malzemelerin kalınlıkları ve diğer ebatları farklılık gösterebilirler. Bu yüzden tasarımlar daha karmaşık hale gelirler. Bu tür karmaşık yapılarda, çözüm yöntemleri de değişecektir. İnce film yapılara göre çözümleri daha zor olmaktadır.

Kullanılan altın ve GST malzemelerinin geometrileri değiştirilerek 3 farklı nanoyapı tasarlanmıştır. Nanoyapıların her üçünde de yansıtıcı olarak altın malzemesi kullanılmıştır. Işımanın rezonans dalga boylarında emiciliği ise farklı geometrilerde GST malzemesi geometrisinin optimizasyonu ile sağlanmıştır. Aşağıda tasarlanmış olan nanoyapıların geometrileri sıra ile gösterilmiştir.

4.1.1 Tasarım-1

Tasarlanmış diğer iki yapıda temel olarak plazmonik bir yapı kullanılmıştır. Bu tasarımda nanofabrikasyonu plazmonik yapılara oranla litografi gerektirmemesi sebebiyle daha kolay olan ince film yapısı kullanılmıştır. Bu tasarımda da diğer tasarımlarda olduğu gibi altın ve GST malzemesi kullanılmıştır. Bu tasarımda malzemeler üst üste eklenerek tasarlanmıştır. Bu tasarımın geometrisi Şekil-7'deki gibidir.



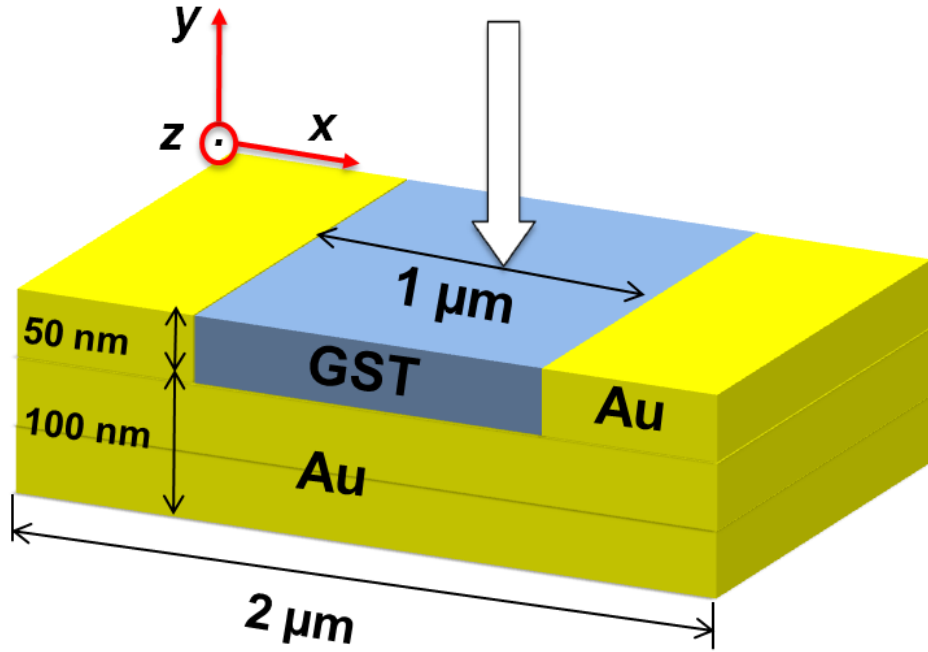
Şekil-7 : İnce Film Tabanlı 1. Nanoyapının Şematik Gösterimi

Şekil-7’de gösterildiği gibi 100 nm kalınlığında Au malzemesinin üzerine 400 nm kalınlığında $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$ (GST) malzemesi eklenerek tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapı x ve z ekseninde periyodik bir yapıdır. Malzeme kalınlıkları analitik yöntem olan TMM ile optimize edilerek belirlenmiştir. Yani yapının rezonans bir davranış gösterebildiği bir geometrik tasarım sağlanmıştır. Tasarlanmış olan yapı üzerine EM ışıma düzlem dalga olarak verilmiştir. Bu tasarımın simülasyonu için gerekli olan optik parametreler Şekil-6’te verilmiştir. Bu bilgiler ışığında TMM metodu kullanılarak nanoyapı çözülmüştür. TMM metodu 4.2.1’de detaylı şekilde anlatılmaktadır. Simülasyon yapılırken yapı üzerine gelen düzlem dalganın malzeme normaliyile yaptığı açı dikkate alınmıştır. Simülasyon sonucunda EM ışıma kaynağının geliş açısının (θ) değişiminin sonuçlara etkisi

incelenmek istenmiştir. Ayrıca elektrik alan polarizasyonunun değişmesiyle oluşabilecek değişimler de görülmek istenmiştir. Simülasyon sonuçları 5. bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir.

4.1.2 Tasarım-2

Şekil-8’da tasarlanmış olan ikinci kızılötesi ışıma emici nanoyapı görülmektedir. Bu yapıda kullanılan altın malzemesi tasarımda ışımayı yansıtıcı olarak kullanılmıştır. Altın içine gömülmüş olan GST malzemesi ise yakın kızılötesi ışımının belirli dalga boyunda (rezonans dalga boylarında) emiliminin mükemmele yakın olmasını sağlamaktadır.



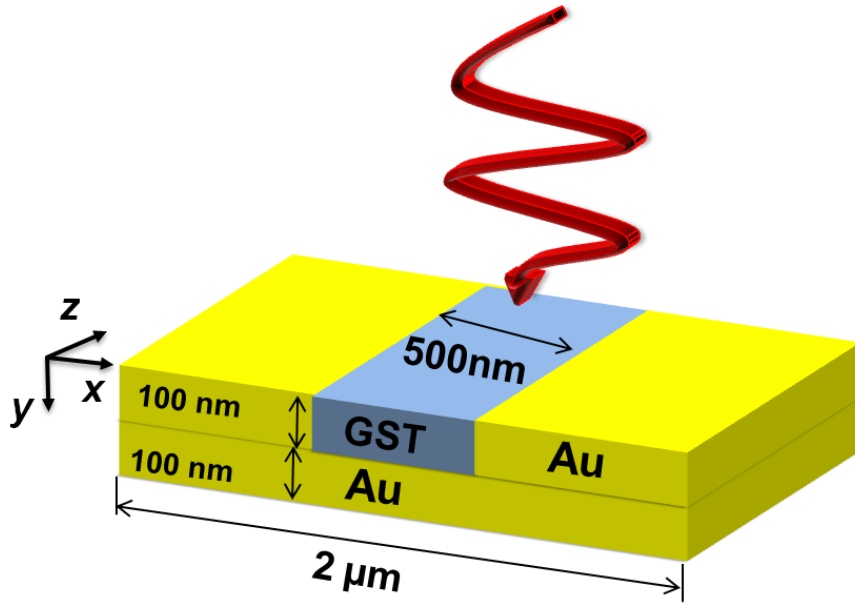
Şekil-8: İnce Film Tabanlı Işıma Emici Plazmonik İkinci Nanoyapının Şematik Gösterimi

Şekil-8’de tasarlanan yapının geometrik özelliklerine bakılacak olursa; 2 μm genişliğinde ve 150 nm kalınlığında altın malzemesi içerisine 50 nm kalınlığında ve 1 μm genişliğinde malzeme fazı değişebilen GST malzemesi yerleştirilerek tasarlandığı görülmektedir. Tasarlanmış olan yapı 2 μm periyoduna sahiptir. Yani x-ekseninde 2 μm ’lik bir tekrara sahiptir. “Lumerical

FDTD solutions” adlı ticari EM simülasyon programı ile nanoyapı üzerine y-ekseni doğrultusunda düzlem dalga uygulanarak emicilik (absorption), yansıtıcılık (reflection), emilen toplam güç (P_{abs} : Power Absorption) ve elektrik alan şiddeti ($|E|^2$: Electric Field Intensity) haritalarının gösterimi 5. Bölümde detaylı şekilde izah edilmiştir.

4.1.3 Tasarım-3

Tasarlanmış olan üçüncü nanoyapının ikinci tasarıma benzer bir geometrisi bulunmaktadır. Ancak altın ve GST malzemelerinin kalınlığı artırılmış ve GST malzemesinin genişliği daraltılmıştır. Malzemelerin geometrilerindeki bu değişimlerinin nanoyapının simülasyon sonuçlarına etkisi görülmek istenmiştir (Şekil-9).



Şekil-9: İnce Film Tabanlı Işıma Emici Plazmonik 3. Nanoyapının Şematik Gösterimi

Şekil-9’da tasarlanmış olan yapıda 200 nm kalınlığında ve x-ekseni boyunca 2 μm periyoduna sahip olan altın malzemesi içerisine 100 nm kalınlığında ve 500 nm genişliğinde GST malzemesi gömülmüştür. Bu tasarım x-ekseni doğrultusunda periyodik bir yapıya sahiptir. Tasarlanan

ikinci nanoyapıda olduğu gibi bu tasarımda GST'nin alt bölgesinde bulunan altın malzemesi elektromanyetik ışımanın geçişine izin vermeyecek kalınlıktadır. Elektromanyetik yakın kızılötesi düzlem dalga malzeme üzerine gönderilmektedir. Düzlem dalganın nanoyapıya çarptıktan sonra malzeme içinde soğurulan ışıma miktarı (absorption), nanoyapıdan yansıyan ışıma miktarı (reflection), malzeme tarafından emilen toplam gücü (P_{abs} : Power Absorption) ve elektrik alan şiddetinin yapının hangi bölgelerinde lokalize olup, yoğunlaştığı 5. Bölümde detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Tasarlanmış olan iki nanoyapı arasındaki geometrik farklılıkların malzemenin özelliklerine etkisi de 6. Bölümde anlatılmıştır.

4.2 Analitik ve Sayısal Çözüm Yaklaşımları

Çözümler yapılırken tasarlanan yapıların geometrisi dikkate alınmaktadır. 1. tasarım olan ince film yapısının çözümü için daha süratli olması sebebiyle analitik çözüm yöntemi kullanılabilir. Analitik çözüm olarak TMM kullanılmıştır. Bu çözüm yöntemi 4.2.1'de açıklanmıştır. İkinci ve üçüncü tasarımlar plazmonik yapılar olduğu için karmaşıklık artmıştır. Bu yüzden analitik çözüm zor olmaktadır. Bu yapıların çözümü için sayısal bir çözüm metodu olan FDTD yöntemini kullanan "Lumerical FDTD solutions" adlı ticari simülasyon programı kullanılmıştır. Lumerical FDTD solutions simülasyon programının temel esasları ve çözüm prensipleri ile simülasyonlarda kullanımı 4.2.2'de anlatılmıştır.

4.2.1 TMM Metodu-Analitik Çözüm

TMM metodu sürekli (continuous) yapılarda çözüm için süratli ve analitik olması sebebiyle kullanılmaktadır. İnce film tabakaların geometrik özellikleri, kullanılan malzemelerin optik özellikleri (kompleks kırılma indisi ($\tilde{n}$) ve bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r)), nanoyapı üzerine gelen EM ışımanın geliş açısı (θ) ve elektrik alan polarizasyon bilgileri biliniyorsa bu yöntemle çözüm yapmak mümkündür. Bu yöntemde 'i' tane ince film tabaka olduğu düşünüldüğünde TMM metodunun denklemleri aşağıdaki gibidir (Yeh, 2005).

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = D_{12} P_2 D_{23} P_3 \dots D_{(i)(i+1)} \quad (4.1)$$

Burada; D parametresi iki tabaka arası geçiş matrisini temsil etmektedir. P ise malzeme içinde ilerleme matrisidir.

$$D_{i,i+1} = \frac{1}{t_{i,i+1}} \begin{bmatrix} 1 & r_{i,i+1} \\ r_{i,i+1} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Bu denklemdeki $t_{i,i+1}$ ve $r_{i,i+1}$ parametreleri sırasıyla Fresnel geçirgenlik ve yansıtma katsayılarını belirtmektedir. TE polarizasyonda;

$$r_{i,i+1} = \frac{\tilde{n}_i \cos \theta_i - \tilde{n}_{i+1} \cos \theta_{i+1}}{\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_{i+1} \cos \theta_{i+1}} \quad (4.3)$$

$$t_{i,i+1} = \frac{\tilde{n}_i \cos \theta_i}{\tilde{n}_i \cos \theta_i + \tilde{n}_{i+1} \cos \theta_{i+1}} \quad (4.4)$$

TM polarizasyonda;

$$r_{i,i+1} = \frac{\tilde{n}_i \cos \theta_{i+1} - \tilde{n}_{i+1} \cos \theta_i}{\tilde{n}_i \cos \theta_{i+1} + \tilde{n}_{i+1} \cos \theta_i} \quad (4.5)$$

$$t_{i,i+1} = \frac{\tilde{n}_i \cos \theta_i}{\tilde{n}_i \cos \theta_{i+1} + \tilde{n}_{i+1} \cos \theta_i} \quad (4.6)$$

olmaktadır. Denklemlerden yansıtıcılık (R) ve geçirgenlik (T) hesabının yapılabileceği formüller aşağıdadır.

$$R = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 \quad (4.7)$$

$$T = \frac{n_s \cos \theta_s}{n_0 \cos \theta_0} \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (4.8)$$

n_s alttaş malzemenin, n_0 ise ışımının geldiği ortamın (burada hava) kırılma indisidir.

θ_s ışımının alttaş malzemeye çıkış açısı, θ_0 ise yapının üst tabakasına geliş açısıdır. R ve T bulunduğu için malzemenin ışımayı soğurma oranı (emcilik) $A=1-R-T$ ile bulunabilir.

4.2.2 FDTD Metodu-Sayısal Çözüm

FDTD yöntemi, ayrıştırılmış haldeki Maxwell denklemlerini kullanarak zaman uzayında hesaplamalar yapmaktadır. Maxwell denklemlerinde bulunan kısmi diferansiyel denklemlerin (Partial Differential Equation, PDE) özellikleri;

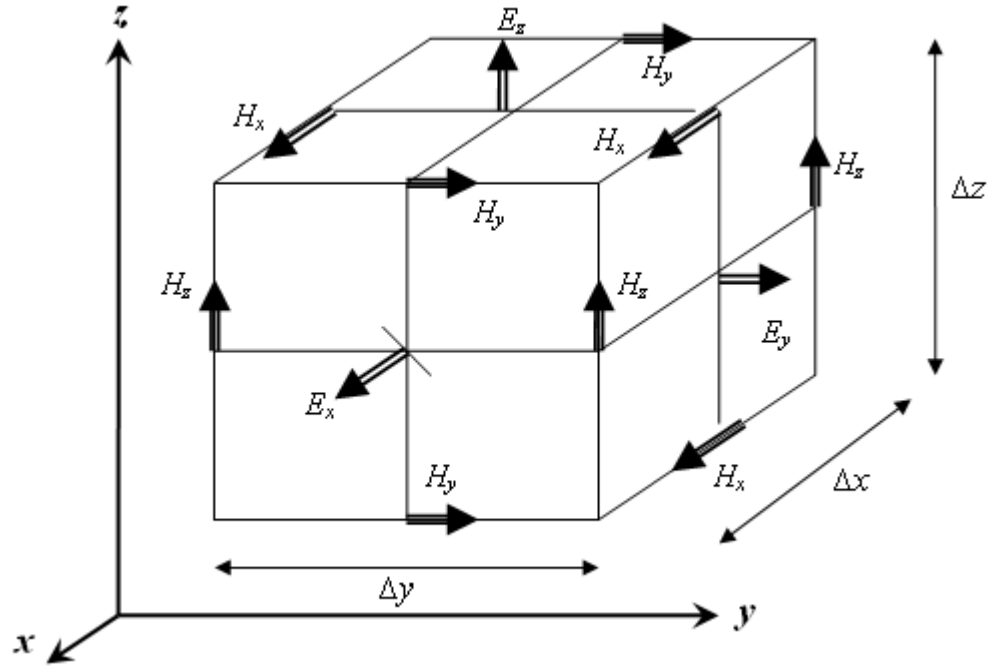
- PDE denklemleri ile çözümler, doğru sonuçlar verir.
- Zaman uzayındaki PDE'lerde matris içeren denklemler bulunmaz.
- Kullanılan malzemeler kompleks olabilir.

- PDE hesaplamalarının yapılması için bilgisayarda fazla hafıza gerekmez.

FDTD yönteminin özellikleri;

- Tek bir uyarım (puls) ile geniş band frekans cevabı hesaplamalarını gerçekleştirebilmektedir.
- 3 boyutlu tüm nesneleri modelleyip belirli bir doğrulukta çözebilmektedir.
- İletkenlikleri farklı olan cisim ya da ortamların etkilerini araştırabilmektedir.
- Elektriksel olarak kompleks olan ortam ve nesnelerin, kayıplı dielektrik malzemelerin modellenmesi için frekans bağımlı parametreler içermektedir.
- Ortamlarda bulunan elektromanyetik dalgaların saçılma, kırınım ve ışıma hesaplamalarını yapabilmektedir.

FDTD algoritması temelde Maxwell denklemlerinin zamana göre türevli elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerine dayanmaktadır. Bu denklemlerin ayrık hale getirilmesi için üç farklı yaklaşım kullanılır. Bunlar; ileri, geri ve merkezi fark denklemleri yöntemleridir. Bu üç farklı ayrık fark denklemleri yaklaşımında, sadece en yakın komşu noktalarındaki alan değerleri hesaplamaya katılarak konumdaki değişiklikler bulunur. Çözümü yapılacak ortam Şekil-10'daki gibi birim hücrelere ayrılarak hesaplamalar yapılır.



Şekil-10: Yee Birim Hücresi (Yee,1966 [web])

Modellenmesi yapılacak olan bölgenin boyutları sınırlı olmalıdır. Çözümler ayrıştırılmış denklemlerle yapılacağından modellenen ortamın sınırlarının belirtilmiş olması gerekmektedir. Sınırlar belirtilmediği takdirde konum ve zamana göre yapılan çözümler sürekli devam edecek ve kararsızlık ortaya çıkacaktır. Ayrıca sınırları belirtilmiş olan bölgede elektromanyetik dalgaların sınırlardan tekrar yansımaları sorunu ortaya çıkabilir. Bu sorun da sınırların, EM dalgayı yutabilecek bir sınır olması ile çözülmektedir.

4.2.2.1 FDTD Yöntemi için Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemlerinin FDTD algoritmasında kullanılabilmeleri için fark denklemlerine dönüştürülmeleri gerekmektedir. Fark denklemlerine dönüştürme bir, iki ve üç boyutlu modeller için ayrı ayrı gerçekleştirilir.

Kaynağın olmadığı kayıplı bir ortam düşünüldüğünde manyetik akım yoğunluğu;

$$\vec{J}_M = \rho' \vec{H} \quad (4.9)$$

ifadesiyle belirtilir. Burada; ρ' , manyetik kaybı temsil eder. $\vec{H}$, ise manyetik alan vektörüdür. Elektriksel kayıpları ifade edebilmek için elektrik akım yoğunluğu;

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilir. σ , elektriksel iletkenliği temsil etmektedir. Maxwell denklemleri aşağıdaki dört adet eşitlik ile ifade edilir (Taflove, 1995).

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \rho' \vec{H} \quad (4.11)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (4.12)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_v \quad (4.13)$$

$$\nabla \cdot (\mu \vec{H}) = 0 \quad (4.14)$$

burada ρ_v hacimsel yük yoğunluğudur.

Bu denklemlerin FDTD algoritmasında kullanılabilir olması için kullanılan kordinat sistemine göre bileşenlerine ayrılması gerekmektedir. 4.2.2.2, 4.2.2.3 ve 4.2.2.4 bölümlerinde FDTD farklı modellemelerinde (3 boyut, 2 boyut ve 1 boyut) kullanılacak olan Maxwell denklemleri gösterilmiştir.

4.2.2.2 Üç Boyutlu Modellemeler İçin Maxwell Denklemleri

Üç boyutlu kartezyen kordinatlarda modelleme yapılabilmesi için Maxwell denklemlerinde iki adet rotasyonel denklemin x, y ve z yönündeki bileşenleri olan altı adet denklem elde edilir (Stutzman ve Thiele, 1998).

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho' H_x \right) \quad (4.15a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \rho' H_y \right) \quad (4.15b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' H_z \right) \quad (4.15c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (4.16a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (4.16b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (4.16c)$$

Elde edilmiş olan bu altı adet denklem FDTD algoritması için oluşturulacak fark denklemleri için temel olmaktadır.

4.2.2.3 İki Boyutlu Modellemeler İçin Maxwell Denklemleri

İki boyutlu modellemelerde x , y ve z eksenlerinden bir tanesinde hesaplama yapılmayacaktır. Hesap yapılmayacak olan eksenindeki alan değişimi sıfır kabul edilecektir. Tasarlanan yapılar İki boyutta simüle edilmiştir. Üç boyutlu çözüme ihtiyaç duyulmamıştır. Çünkü malzemeler z eksenini boyunca değişim göstermemektedir. Modellemeler x - y düzleminde gerçekleşeceğinden z eksenini boyunca alan değişimi görülmeyeceğinden elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin z 'ye göre alınan kısmi türevleri sıfır olacaktır.

Modellemenin İki boyutlu olarak gerçekleştirildiği durumlarda Maxwell denklemlerini iki boyuta indirgenmesi sırasında TE ve TM olmak üzere iki

mod ortaya çıkacaktır. TM modunda z eksen yönünde sadece elektrik alan bileşeni bulunabilecek ya da TE modunda z eksenine dik olarak sadece elektrik alan bileşenleri olabilecektir. İki boyutlu modelleme için gerekli olan denklemler, denklem 4.15 ve 4.16'dan elde edilmiştir. TM modu ve TE modu için ayrı ayrı denklem 4.17 ve 4.18'de gösterilmiştir. TM modu bağıntıları,

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho' H_x \right) \quad (4.17a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \rho' H_y \right) \quad (4.17b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (4.17c)$$

şeklindedir.

Aynı şekilde elde edilen TE modu denklemleri,

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \sigma E_x \right) \quad (4.18a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (4.18b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' H_z \right) \quad (4.18c)$$

şeklinde olmaktadır.

4.2.2.4 Bir Boyutlu Modellemeler İçin Maxwell Denklemleri

Bir boyutlu modellemelerde incelenecek olan eksen dışındaki iki eksenindeki elektrik ve manyetik alan değişimlerinin sıfır olduğu düşünülmektedir. Burada, y ve z eksenine göre alınan kısmi türevler sıfır olacaktır. Böylece modelleme, dalga yayılımı sadece x yönünde olan bir boyutlu bir problemi içermektedir. Bir boyutlu bir problemin modellenmesi için gerekli olan denklemler, iki boyutlu TM ve TE modlarındaki denklemlerinden faydalanılabilir.

Bir boyutlu TE modü denklemlerini oluşturmak için iki boyutlu TE modü bağıntıları kullanılır. Bu durumda, bir boyutta indirgeme için y eksenindeki elektrik ve manyetik alan değerlerinde bir değişim olmayacağından y 'ye göre alınan türevler sıfırlanmış olacaktır. Bu kapsamda denklem 4.17-4.18'de düzenlemeler yapılarak bir boyutlu denklemler çıkartılabilir. Bir boyutlu TM modü denklemlerini oluştururken denklem 4.17'de verilen iki boyutlu TM modü kullanılır. Denklem 4.17'deki bağıntılarda y eksenine göre alınan kısmi türevlerin sıfır olduğu durumda düzenlenirse,

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} (-\rho' H_x) \quad (4.19a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \rho' H_y \right) \quad (4.19b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \sigma E_z \right) \quad (4.19c)$$

bağıntıları elde edilir.

TM modunda H_x bileşeni bulunmayacağından bir boyutlu TM modunun H_x bileşeninin çıkartılmış hali denklem 4.20'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \rho' H_y \right) \quad (4.20a)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \sigma E_z \right) \quad (4.20b)$$

Bir boyutlu TE modü denklemlerini oluştururken denklem 4.18'de verilen iki boyutlu TE modü kullanılır. Denklem 4.18'deki bağıntılarda y eksenine göre alınan kısmi türevlerin sıfır olduğu durumda düzenlenirse,

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} (-\sigma E_x) \quad (4.21a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (4.21b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' H_z \right) \quad (4.21c)$$

bağıntıları elde edilir.

Bir boyuta indirgeme esnasında TE ve TM modları dikkate alınırsa bir boyutlu TE modunda x yönünde elektrik alan bileşeni E_x denklemlerden çıkartılır. Bu durumda bir boyutta modelleme için TE modu bağıntıları,

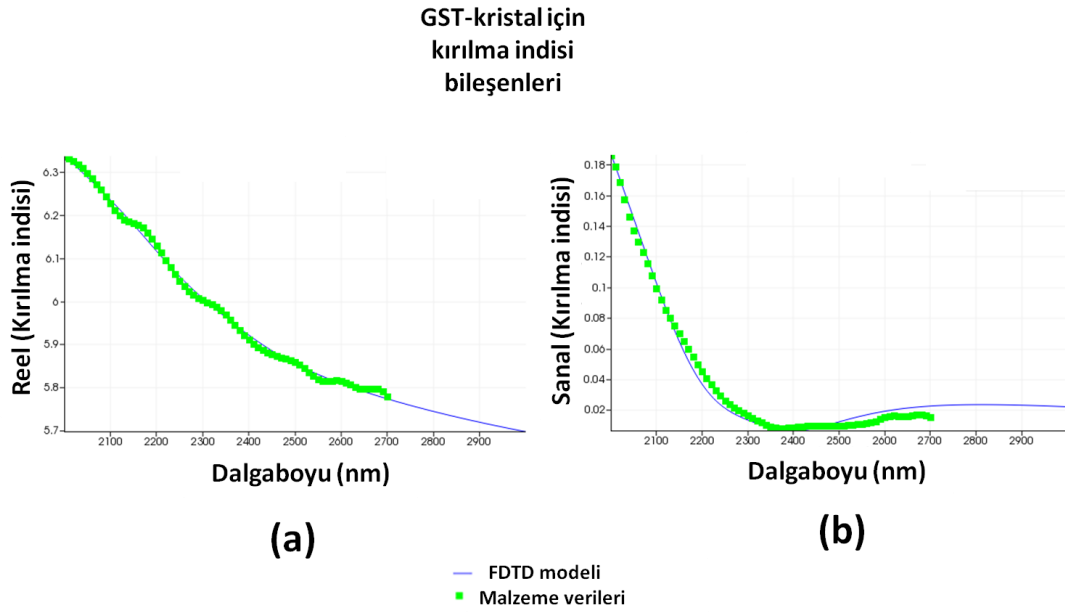
$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (4.22a)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' H_z \right) \quad (4.22b)$$

şeklinde. Bu denklemler fark yaklaşımlarına dönüştürülerek FDTD algoritması ile çözülmektedir.

Bu çalışmada çözüm yöntemi olarak FDTD yöntemini temel alan 'Lumerical FDTD solutions' simülasyon programı kullanılmıştır. Bu program FDTD yöntemine göre Maxwell denklemlerini iki boyutta çözerek sonuçları çıkartmaktadır. Bu programı kullanırken önce bir çözüm uzayı koordinatları malzemenin bir periyodunu içerisine alacak şekilde belirlenir. Bu çözüm uzayı hangi boyutta simülasyon yapacaksa ona göre ayarlanır. Çözüm uzayının sınır koşulları mutlaka belirlenmelidir. Kararlı bir çözüm bekleniyorsa sınır koşulları doğru belirlenmelidir. Daha sonra hangi malzemeler kullanılacaksa uygun geometrilerde seçilir ve koordinatlara uygun yerleştirilir. Eğer kullanılacak malzemelerin optik malzeme verileri programın kütüphanesinde yoksa veri kütüphanesine eklenebilmektedir. Kaynak olarak genelde düzlem dalga seçilir. Kaynağın yönü, açısı ve polarizasyonu ayarlanır. Daha sonra kaynağın üstüne yansıyan ışınları toplamak için yansıtma monitörü yerleştirilir. Malzemenin en alt bölgesinden uzağa geçen ışınları toplamak için geçirgenlik monitörü yerleştirilir. Geçirgenlik ve yansımaları toplamak için konulan monitörler çözüm uzayında ve nanoyapı alt/üst yüzeyinden en az bir

dalga boyu uzaklıktaki mesafede olmalıdır. Simülasyonu başlatmadan önce kullanılan malzemelerin optik parametrelerinin verisinin simülasyonla uyumlandırılması gerekmektedir. Aksi halde simülasyon sonuçları gerçekten uzak olacaktır. Şekil-11’de simülasyona başlamadan önce kullanılan malzemenin kristal fazındaki kırılma indisi verilerinin FDTD modelle uyumlandırılmış hali gösterilmiştir. Amorf fazdaki kırılma indisinin reel değeri sabit, sanal bileşeni ise sıfır olduğundan FDTD model ile uyumlandırılmasına gerek duyulmamıştır.



Şekil-11: Simülasyonda Kullanılan Kristal Fazdaki GST Malzemesinin Kırılma İndisinin (a) Reel ve (b) Sanal Bileşenleri

Şekil-11’de yeşil noktalar kristal fazdaki GST malzemesinin belirli dalga boyundaki kırılma indisi verilerini göstermektedir. Mavi çizgi ise FDTD çözümünde kullanılan malzemenin optik özelliği spektral fonksiyon modellemesini göstermektedir. Şekil-11(a)’da GST-kristal durumundaki malzemenin kırılma indisinin reel bileşeninin FDTD modeli ile uyumlandırıldığı görülmektedir. Şekil-11(b)’de aynı malzemenin kırılma indisinin sanal bileşeni ile FDTD modelinin uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Bu uyum sağlandıktan sonra simülasyon başlatılır. Simülasyon sonucunda yansıtma ve geçirgenlik ekranında malzemedan gelen ışımalar toplanmıştır. Malzemenin emiciliği ise $A=1-R-T$ olduğu için bu iki monitörde (R ve T) toplanan ışımalar sayesinde hesaplanmış olur. Nanoyapı belirli bir dalga

boyunda rezonansa girmişse rezonans dalga boyundaki emilen gücün malzemenin hangi bölgelerinde gerçekleştiğinin haritasını görmek için ayrı bir monitör eklenebilir. Bu monitör sadece rezonans dalga boyundaki emilen toplam gücü gösterecektir. Ayrıca rezonans dalga boyundaki elektrik alan şiddetinin malzemenin hangi bölgelerinde artış gösterdiği gözlemlenebilmektedir.

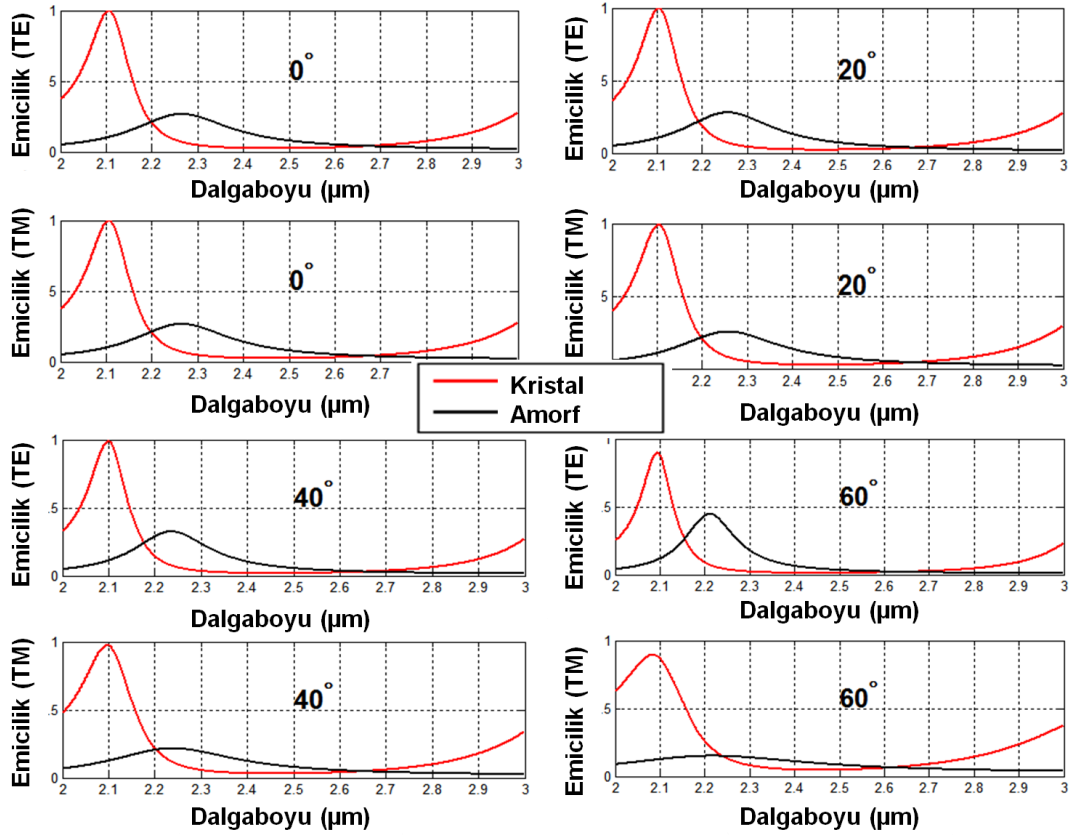
BEŞİNCİ BÖLÜM

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tasarlanmış olan 3 farklı nanoyapının simülasyon sonuçları; tasarım-1 için kaynağın geliş açısının değişmesi ve farklı polarizasyonlarda emicilik değerlerinin 2-3 μm arasındaki dalga boyuna göre değişimi Bölüm 5.1’de detaylı bir şekilde incelenmiştir. Tasarım-2 için kaynak yüzey normaliyle 0° açı yaparak geldiği durumdaki dalga boyuna göre emicilik, rezonans dalga boylarındaki emilen toplam güç haritası ve malzeme üzerindeki elektrik alan şiddeti haritaları Bölüm 5.2’de gösterilmiştir. Tasarım-3’te ise Tasarım-2’deki sonuçlara ilave olarak; elektrik alan polarizasyon vektörünün malzeme üzerine paralel olduğu durumdaki rezonans dalga boyundaki emicilik katsıyısının Plank ışımasına çarpan olarak getirilmesi ve kara cisim ışımasıyla karşılaştırılması Bölüm 5.3’te verilmiştir.

5.1 Tasarım-1

Tasarlanan yapıda EM ışıma kaynağının malzemenin normali ile yaptığı açı değişiminin ve elektrik alan polarizasyon vektörünün değişimi ile malzemenin emiciliğinin dalga boyuna göre değişimleri Şekil-12’de gösterilmiştir.



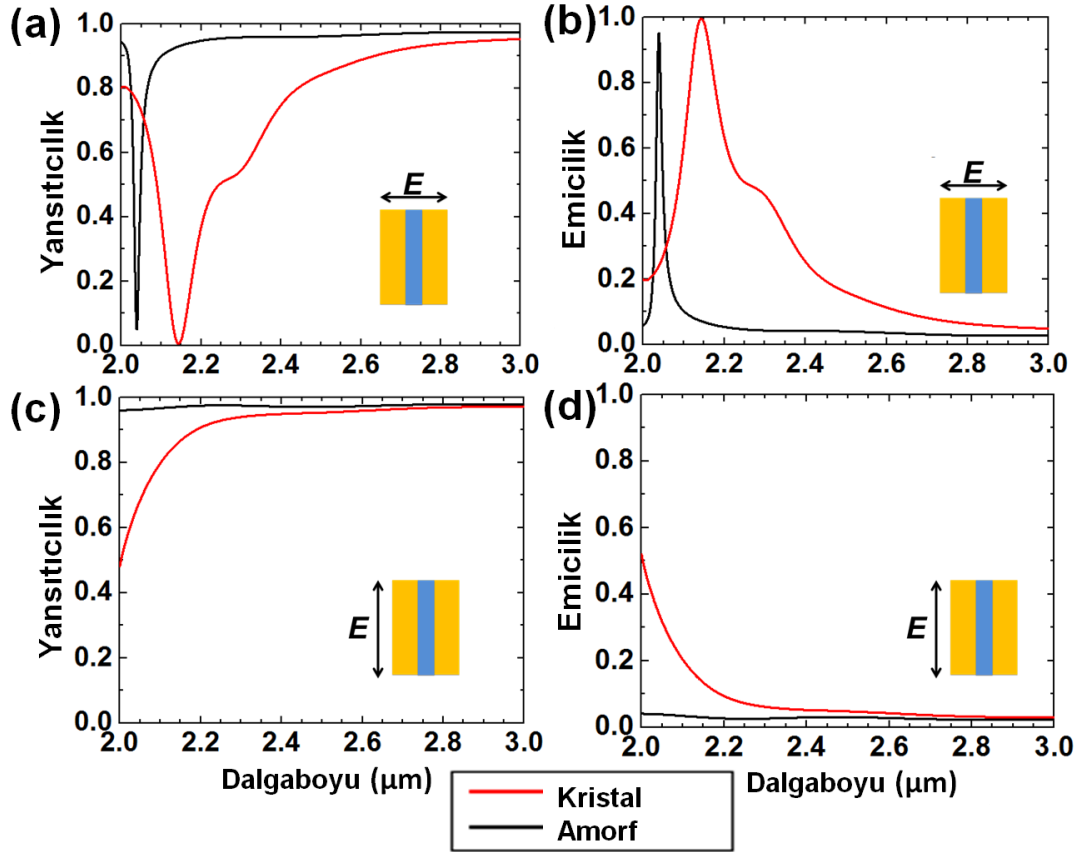
Şekil-12: EM Işıma Kaynağının Malzeme Normaliyle Yaptığı Açıya ve Polarizasyona (TE/TM) Göre Emicilik (a) 0°, (b) 20°, (c) 40° ve (d) 60°

Tasarlanan nanoyapı TMM ile çözülmüştür. Düzlem dalga nanoyapı üzerine yapının normaliyle 0°'lik açı ile geldiğinde elektrik alan polarizasyonun iki farklı durumu için emicilik grafikleri Şekil-12'de gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında Nanoyapı 2100 nm dalga boyunda rezonansa girmiştir. Bu dalga boyunda maksimum emicilik göstermiştir. Emiciliğin maksimum olduğu dalga boyu GST malzemesinin kristal fazında gerçekleşmiştir. GST malzemesi faz değiştirdiğinde yani amorf faza geçtiğinde maksimum emicilik davranışı olmamıştır. Emiciliğin kristal fazda daha fazla olmasının nedeni GST malzemesini faz değiştirdiğinde dielektrik sabitinin sanal bileşeninin değişmesiyle ilgili olduğu bilinmektedir. Grafikte iki farklı polarizasyon için emicilik değerleri incelendiğinde değişiklik olmadığı görülmektedir (Şekil-12(a)). Dolayısıyla bu tasarımın 0°'lik geliş açısı durumunda polarizasyondan bağımsız olduğunu söylemek mümkün olacaktır. Düzlem dalga nanoyapı geliş açısı (θ) değiştiğinde ve 20° olduğunda

emililiğin mükemmel olduğu dalga boyu değişmemiş ve emicilik miktarında da 0°'ye göre belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir (şekil-12(b)). Geliş ağısının 40°'ye çıkması ile rezonans dalga boyunun hala değişmediği ve GST'nin her iki fazında da benzer diğer geliş ağılarındaki davranışa benzer emicilik davranışı görülmektedir (şekil-12(c)). Ancak geliş ağısının 60° olduğu durumda malzemenin emicilik değerinin belirgin bir şekilde düştüğü ve rezonans dalga boyunun daha düşük bir dalga boyuna doğru kaymaya başladığı aşıkardır (şekil-12(d)). Grafiklerin tamamında EM ışımanın geliş ağısının değişmesi ile hem rezonans dalga boyundaki emicilik değerı hem de yüksek emiliciliğin olduğu dalga boyu değişmiştir. Ancak tasarlanan yapı literatürde sürekli yapılar (continuous structures) olarak geçmektedir. Bu yapılar ışıma kaynağının elektrik alan polarizasyonu değişiminden etkilenmeyen yapılardır. Elektrik alan vektörünün geliş düzlemine dikey (TE) ve elektrik alan vektörünün yapı üzerine paralel (TM) polarizasyonunda geldiği durumdaki sonuçlar arasında belirgin bir fark yoktur.

5.2 Tasarım-2

Tasarlanan ikinci nanoyapının belirtilen dalga boyları arasındaki mleri sayısal bir m yaklaşımı olan FDTD yöntemini kullanan Lumerical FDTD solutions simülasyon programı kullanılarak yapılmış ve nanoyapının üzerine 2-3 μm dalga boyları aralığında düzlem dalga gönderildiği durumdaki yansıtıcılık ve emicilik grafiği şekil-13'te gösterilmiştir.

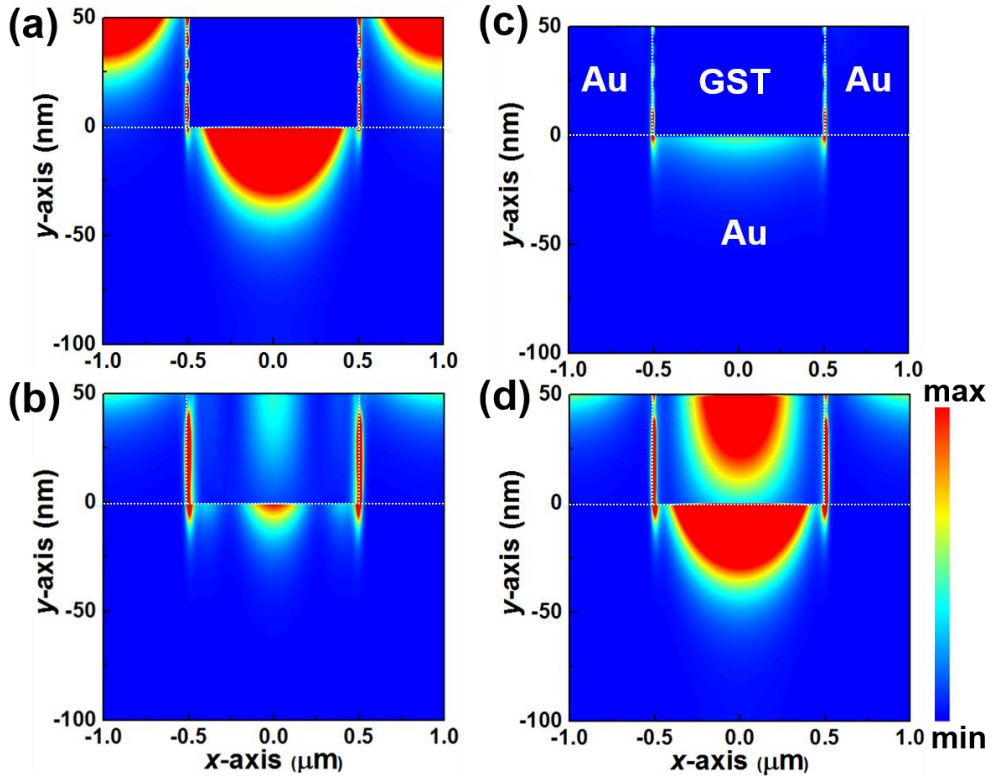


Şekil-13: Tasarlanan Yapının Simülasyon Sonuçları; Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapının İzgarasına Dik Olarak Geldiğinde (a) Yansıtıcılık ve (b) Emicilik. Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapının İzgarasına Paralel Olarak Geldiğinde (c) Yansıtıcılık ve (d) Emicilik

Şekil-13'teki grafiklerin tümünde; kırmızı renk, GST malzemesinin kristal fazını, siyah renk ise GST malzemesinin amorf fazını temsil etmektedir. Grafiklere göre elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı izgarasına dikey olarak geldiğinde; 2 farklı dalga boyunda minimum yansıtıcılık gözlemlenmektedir. Bu dalga boyları 2039 nm ve 2143 nm olarak tespit edilmiştir. Bu dalga boylarında rezonansa giren yapı, bu davranışını bir fazdan diğerine geçtiğinde sergilemiştir. Yani GST malzemesi amorf fazda iken 2039 nm dalga boyundaki yansıtıcılığı neredeyse sıfır (0) olmaktadır. Ancak malzemenin kristal faza geçmesiyle yansıtıcılığın minimum olduğu dalga boyunun daha büyük bir dalga boyu olan 2143 nm'ye kaydığı görülmektedir. (Şekil-13 (a)) Başka bir deyişle, dikey polarizasyonda nanoyapı 2039 nm ve 2143 nm dalga boylarında mükemmel bir emicilik davranışı göstermektedir. Bu davranışı iki farklı faz olan amorf ve kristal

durumlarında göstermektedir. Amorf fazda emiciliğin maksimum olduğu dalga boyu 2039 nm iken, kristal faza geçildiğinde maksimum emilimin görüldüğü dalga boyu 2143 nm dalga boyuna kaymıştır (Şekil-13(b)). Ancak elektrik alan polarizasyon vektörünün nanoyapı ızgarasına paralel geldiği durumda malzemenin yansıtıcılık veya emicilik bakımından güçlü bir rezonansa giremediği ve çok kötü yansıtıcı ya da mükemmel bir emici olamadığı görülmektedir. Sadece kristal fazda iken 2 μm dalga boyunda emicilik 0.5 olmaktadır ve 2.4 μm dalga boyuna gelene kadar emicilik sıfıra yaklaşmaktadır (Şekil-13(c)). Aynı dalga boyunda yansıtıcılık 0.5 civarındadır ve 2.4 μm dalga boyuna gediğinde yansıtıcılık mükemmel bir duruma gelmektedir (Şekil-13(d)). Bu yüzden tasarlanan yapı polarizasyon bağımlı olmaktadır.

Tasarlanmış ikinci nanoyapının rezonans dalga boylarında emilen toplam gücünün iki boyutlu haritası Şekil-14'te gösterilmiştir.

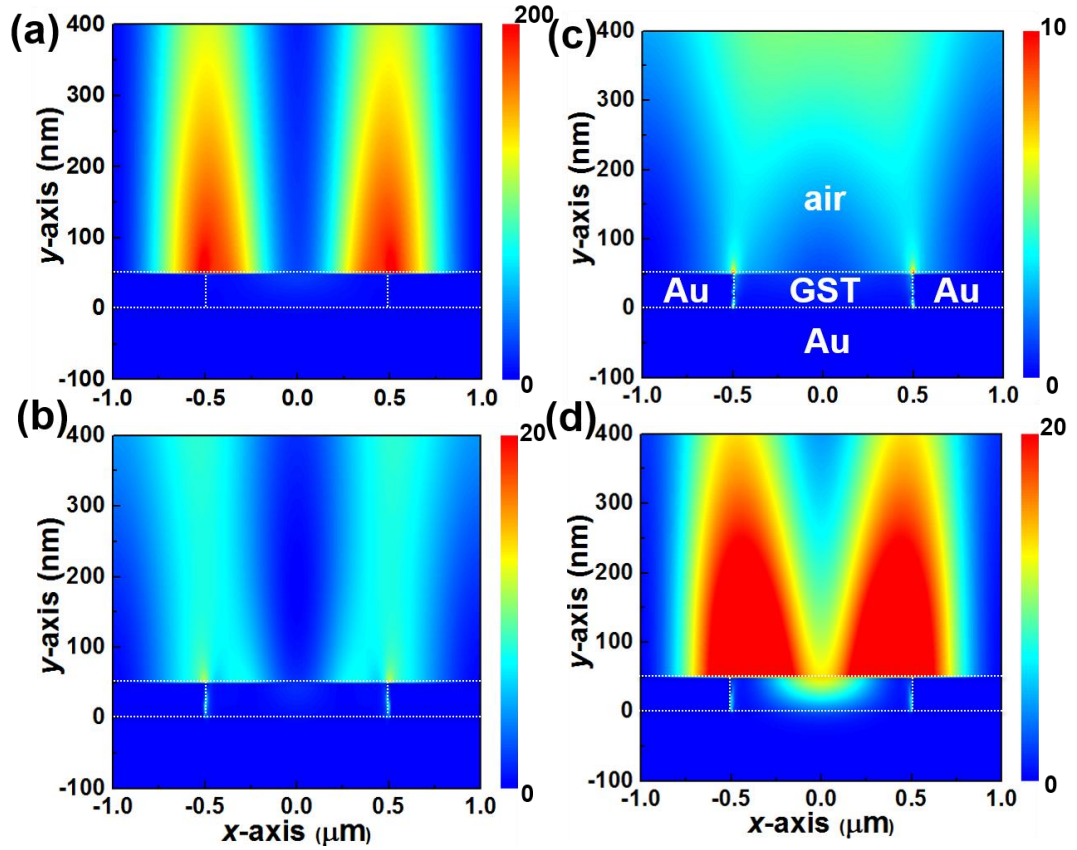


Şekil-14: 2039 nm Rezonans Dalga boyunda Emilen Toplam Güç; (a) Amorf Fazdaki GST İçin (b) Kristal Fazdaki GST İçin; 2143 nm Rezonans Dalga boyunda Emilen Toplam Güç; (c) Amorf Fazdaki GST (d) Kristal Fazdaki GST

Şekil-14'teki 2-boyutlu haritaların tamamında kırmızı renk emilen gücün en yüksek olduğu bölgeleri, mavi renk ise emilen gücün en düşük olduğu bölgeleri göstermektedir. Kullanılan renk skalası tüm 2-boyutlu haritalar için ortaktır. Tasarlanan yapı, iki farklı dalga boyunda rezonans bir davranış gösterdiği için bu dalga boylarının her biri için GST malzemesinin iki farklı fazındaki emilen güç haritaları ayrı ayrı gösterilmiştir. 2039 nm rezonans dalga boyunda, GST amorf fazda iken emilen güç haritasına bakıldığında elektromanyetik ışımanın GST malzemesini geçtiği ve GST malzemesinin altındaki Au malzemesi tarafından emildiği ve bir de GST'nin yan taraflarında bulunan altın malzemeleri tarafından emildiği görülmektedir. Ayrıca nanoyapının üst tarafındaki altın ile GST malzemelerinin birleştiği yerlerde de güç emildiği gözlemlenmiştir (Şekil-14(a)). Aynı dalga boyunda iken; GST malzemesinin fazı değiştiğinde yani kristal faza geçildiğinde malzemenin genel olarak yoğun bir güç emilimi göstermediği görülmektedir. Ancak GST ile altın malzemelerinin birleştiği sınır bölgelerde ise az da olsa güç emilimi olduğu ve çok az bir emilimin de GST malzemesinin alt tarafındaki altın bölgesinde olduğu anlaşılmaktadır (Şekil-14(b)).

İkinci rezonans dalga boyu olan 2143 nm'de, GST amorf durumdayken emilen toplam gücün 2-boyutlu haritası (Şekil-14(c))'de gösterilmiştir. Bu haritaya bakıldığında GST ve altın malzemelerinde büyük bir emilim oluşmamıştır. Sadece GST malzemesinin alt tarafında bulunan altın malzemesi tarafından az bir emilim gerçekleşmiştir. Ayrıca altın ile GST'nin birleşme bölgelerinde sınırlı bir emilim gözlemlenmektedir. Ancak aynı dalga boyunda GST kristal faza geçtiğinde yoğun bir güç emilimi gözlemlenmektedir. Gücün yoğun olarak emildiği bölgeler GST malzemesi ve GST malzemesinin alt tarafındaki altın bölgesidir (Şekil-14(d)).

Tasarlanmış olan ilk plazmonik nanoyapının rezonansa girdiği dalga boyları 2039 nm ve 2143 nm'dir. Bu rezonans dalga boylarındaki elektrik alan şiddetinin 2-boyutlu haritası Şekil-15'de gösterilmiştir.



Şekil-15: 2039 nm Rezonans Dalga boyundaki Elektrik Alan Şiddetinin 2-Boyutlu Haritası; (a) Amorf Fazdaki GST. (b) Kristal Fazdaki GST. 2143 nm Rezonans Dalga boyundaki Elektrik Alan Şiddetinin 2-Boyutlu Haritası; (c) Amorf Fazdaki GST (d) Kristal Fazdaki GST

Şekil-15'deki 2-boyutlu grafiklerin tamamında renk skalalarında elektrik alan şiddetinin en yoğun oluşu bölgeler kırmızı, elektrik alan şiddetinin yoğunlaşmadığı bölgeler ise mavi renk ile gösterilmektedir. Tasarlanan yapının rezonans dalga boyları 2039 nm ve 2143 nm'dir. Bu dalga boylarında elektrik alan şiddetinin nanoyapının hangi bölgelerinde arttığı ve hangi bölgelerinde düşük kaldığı Şekil-15'de gösterilmiştir. Rezonans dalga boylarında ve GST malzemesinin her iki fazı için ayrı ayrı elektrik alan lokalizasyonunun açıklanması mümkün olmaktadır. İlk rezonans dalga boyu olan 2039 nm'de; GST malzemesi amorf fazda iken, elektrik alan şiddeti GST malzemesi ile üst altın bölgesinin birleşim noktalarında lokalize olmuştur. Malzemenin ışımayı emebilme seviyesi bu bölgelerde yoğun olmuştur. Çünkü emilen toplam güç, elektrik alan şiddeti ile aşağıdaki gibi doğru orantılıdır (Kocer v.d., 2015).

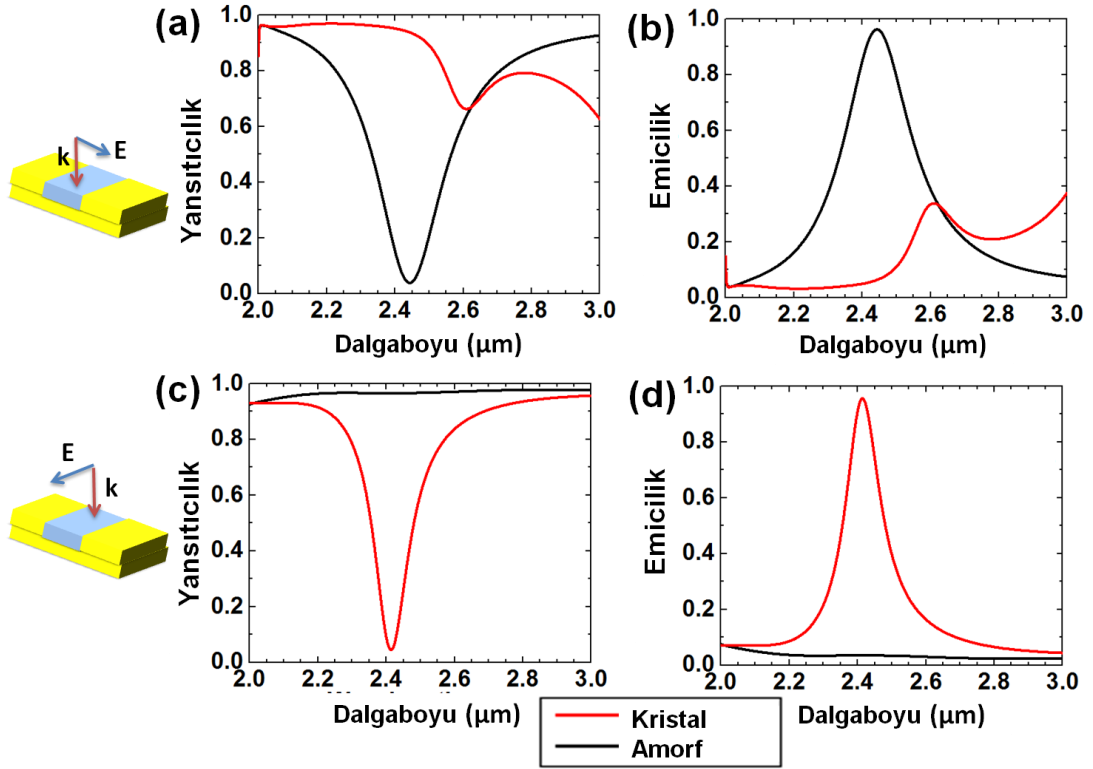
$$P_{abs} = \frac{\pi c \epsilon_0 \epsilon_2 |E|^2}{\lambda} \quad (5.1)$$

Burada, c ışık hızı, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, ϵ_2 bağıl dielektrik sabitinin sanal bileşeni, $|E|^2$ elektrik alan şiddeti ve λ boşluktaki dalga boyudur. Nanoyapının diğer bölgelerinde elektrik alan lokalizasyonu görülmemektedir (Şekil-15(a)). Aynı rezonans dalga boyu için; GST akıllı malzemesi kristal faza geçtiğinde ise belirgin bir elektrik alan lokalizasyonu görülmemektedir. Bu dalga boyundaki kristal fazın renk haritasına bakıldığında amorf fazdaki renk skalasından 20 kat küçüktür. Yani kristal fazdaki elektrik alan şiddeti daha küçük skalada bakılmasına rağmen yine de gözlemlenmemektedir (Şekil-15(b)).

İkinci rezonans dalga boyu olan 2143 nm'deki sonuçlar incelendiğinde GST'nin amorf fazında elektrik alan şiddetinin nanoyapı üzerinde lokalize olamadığı görülmektedir. Sadece GST ile altının birleştiği sınır bölgesinde çok az bir elektrik alan yoğunluğu görülmektedir (Şekil-15(c)). Bu dalga boyunda; GST faz değiştirdiğinde, yani kristal faza geçtiğinde elektrik alan şiddeti iki farklı malzemenin birleşim noktalarında yoğunlaşmış ve şiddeti artmıştır (Şekil-15(d)). Elektromanyetik ışımanın elektrik alan şiddetinin fazla olduğu ve malzemenin kayıplı bölgelerinde emildiği bilinmektedir.

5.3 Tasarım-3

Tasarlanmış olan üçüncü ince film tabanlı plazmonik yapı ile ikinci yapı arasında yapısal benzerlikler mevcuttur. Ancak kullanılan malzemelerin geometrilerinde, ikinci tasarımdan farklı olarak fiziksel boyut değişiklikleri yapılarak nanoyapının önceki tasarımdan farklı dalga boylarında rezonansa girmesi sağlanmıştır. Tasarlanmış olan nanoyapı Lumerical FDTD solutions programı ile simüle edilmiş, yansıtıcılık ve emicilik sonuçları Şekil-16'de gösterilmiştir.



Şekil-16: Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Dikey Olarak Geldiğinde (a) Yansıtıcılık ve (b) Emicilik. Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Paralel Olarak Geldiğinde (c) Yansıtıcılık ve (d) Emicilik

Grafiklerin tamamına bakıldığında kırmızı renk GST malzemesinin kristal fazını, siyah renk ise GST'nin amorf fazını temsil etmektedir. Bu tasarımın sonuçlarına genel olarak bakıldığında ikinci tasarımdan çok farklı bir sonuç göze çarpmaktadır. İkinci tasarımda rezonans dalga boyları sadece elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı izgarasına dikey olarak geldiğinde gerçekleşmişti. Ancak bu yapıya bakıldığında elektrik alan polarizasyon vektörünün izgaraya dikey ve paralel olduğu durumlar için ayrı rezonans değeri, GST'nin her fazında ve farklı dalga boyunda gerçekleşmektedir. Elektrik alan vektörü Şekil-16(a)'daki gibi nanoyapı izgarasına dikey polarizede geldiği durumda yansıtıcılığın sıfıra en yakın olduğu dalga boyu 2443 nm'dir. Yansıtıcılığın çok kötü olduğu bu dalga boyu GST'nin amorf fazı için geçerli olmaktadır. GST kristal faza geçtiğinde ise yansıtıcılık (R, Reflection) daha fazla olmaktadır ve rezonans bir davranış göstermemektedir. Çalışma dalga boylarında deri kalınlığı az olan ve bu sebeple optik olarak kalın olan nanoyapının alt bölgesindeki 100 nm kalınlığındaki altın, yakın kızılötesi ışımanın geçişine izin vermemektedir. Bu

yüzden geçirgenlik (T , Transmission) değeri sıfır olmaktadır. $A+R+T=1$ olmaktadır. Bu formülde $T = 0$ alındığında $A=1-R$ olacaktır. Bu yüzden yansıtıcılık grafiği hakkında yorumlar emicilik (A , Absorption) için de bu formüle ve Şekil-16(b)'ye göre yapılabilir. Elektrik alan polarizasyonu değişmeden emicilik grafiğine bakıldığında, rezonans dalga boyu olan 2443 nm'de maksimum emicilik gözlenmektedir. Bu mükemmel emicilik, GST malzemesinin amorf fazında gerçekleşmektedir. GST faz değiştirdiğinde yani kristal faza geçtiğinde aynı dalga boyunda maksimum emicilik davranışı görülmemektedir. Faz değişimiyle emicilik, yaklaşık olarak 0.95'ten 0.3'e düşmüştür (Şekil-16(b)).

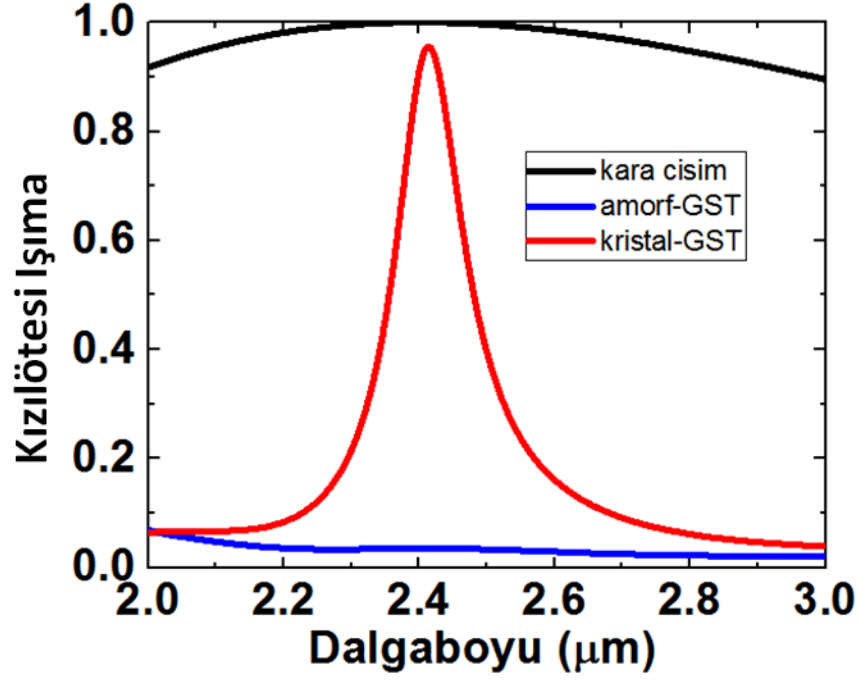
Elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı ızgarasına paralel olarak geldiğinde ise ilk plazmonik tasarımın aksine bu tasarımda rezonans bir davranış sergilenmiştir. İlk plazmonik tasarımda paralel polarizasyonda rezonans bir davranış sergilenmemiştir. Bu polarizasyonda GST malzemesi kristal fazda iken 2414 nm dalga boyunda çok kötü bir yansıtıcı gibi davranmaktadır. Ancak GST faz değiştirdiğinde yani amorf faza geçtiğinde aynı dalga boyunda mükemmel bir yansıtıcı gibi davranmaktadır. Amorf fazdayken, sadece rezonans dalga boyunda değil 2-3 μm dalga boyları arasında mükemmel bir yansıtıcı özellik göstermektedir (Şekil-16(c)). Elektrik alan polarizasyonu değişmeksizin aynı dalga boyunda, GST'nin kristal fazında mükemmel bir emicilik davranışı sergilemektedir. GST amorf faza geçtiğinde ise emicilik çok kötü olmakta ve yaklaşık sıfır olmaktadır. Amorf fazda emiciliğin sıfıra yakın olduğu dalga boyu rezonans dalga boyuyla sınırlı değildir. 2-3 μm dalga boyu aralığının tamamında emicilik sıfıra yakındır (Şekil-16(d)).

Yukarıda yorumları anlatılan grafiklerden emicilik değerleri (A), aynı malzeme için yayıcılık (ϵ) değerlerine eşit olmaktadır. Yayıcılık değeri, dalga boyunun ve sıcaklığın bir fonksiyonu olan Plank ışıma kanununda kara cisim (blackbody) için 1 olarak alınmaktadır. Ancak gerçek cisimlerde yayıcılık değeri 1 değildir ve her malzeme için ve her dalga boyu için farklı olabilmektedir. Şekil-16(d)'deki grafikte emicilik değeri kullanılarak hesaplanan Plank ışımasının GST'nin faz değiştirdiğindeki ışıma farklılığı ile kara cisim ışımasının karşılaştırılarak görülmesi beklenmektedir. Bunu

gözlemleyebilmek için Plank kanununa göre kara cismin spektral ışıması ile rezonans dalga boylarındaki emiciliğin hesaba katıldığı ışıma grafikleri aynı grafikte gösterilebilir. İki farklı rezonans mevcuttur. Bu rezonanslar yaklaşık olarak 2.4 μm dalga boyunda gerçekleşmiştir. Bu farklı polarizasyonlarda gerçekleşen rezonans durumlarında ışıma hesabı yapılabilir. Bu rezonans dalga boylarındaki emicilik değeri Plank kanunundaki yayıcılık değerine eşit olmaktadır. Elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı ızgarasına paralel olduğu durumda rezonans davranış GST'nin kristal fazında gerçekleşmiştir. Bu rezonansın gerçekleştiği yani emiciliğin maksimum olduğu dalga boyu yaklaşık 2.4 μm 'dir. Bu dalga boyunda maksimum ışıma gerçekleşmiştir. Maksimum ışmanın gerçekleştiği dalga boyu biliniyorsa sıcaklığı da Wien kanununa göre hesaplanabilmektedir. Wien kanunu;

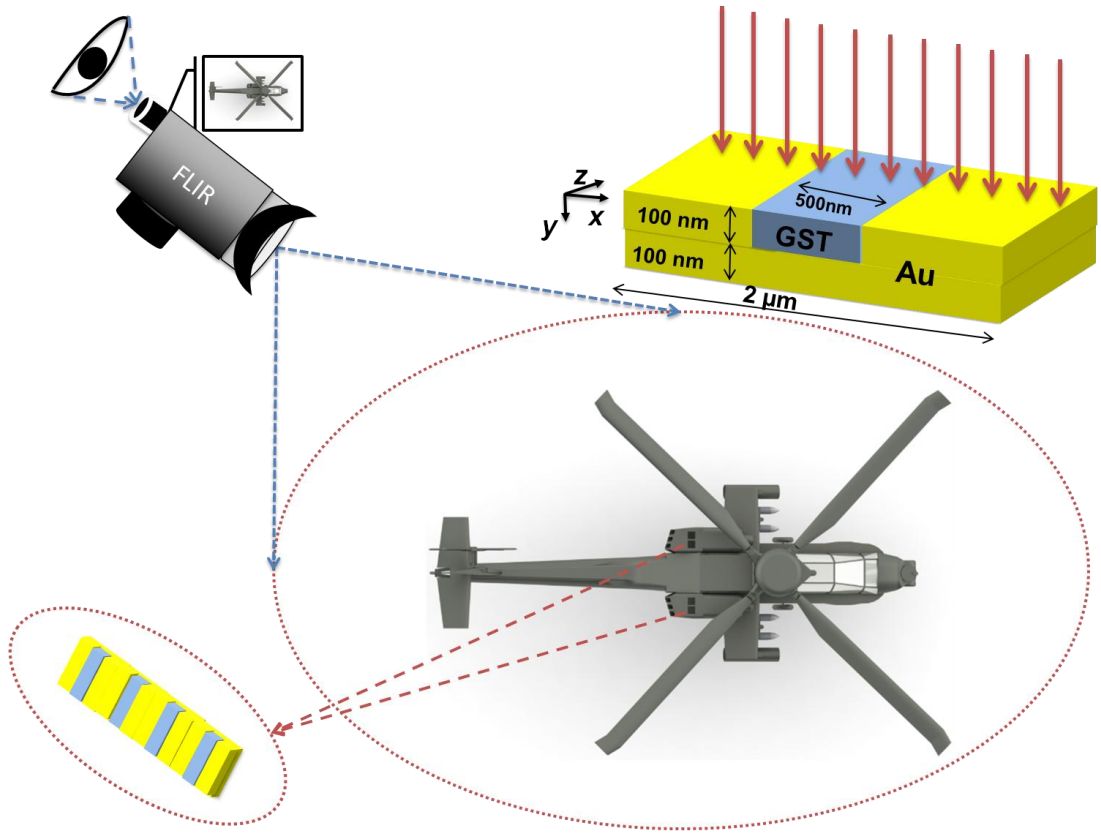
$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898 \mu\text{m.K}}{T} \quad (5.2)$$

Burada λ_{max} mikrometre olarak maksimum ışmanın görüldüğü dalga boyu (rezonans dalga boyuna eşit olacaktır), T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Rezonans dalga boyundaki sıcaklık değeri Wien kanununa göre hesaplanırsa 1207 Kelvin olmaktadır. 1207 Kelvin'de kara cisim ışıması ile polarizasyon vektörünün ızgaraya paralel olarak geldiği durumdaki ışmanın maksimum ışıma değeri ile normalize edilmiş hali aynı grafik içinde Şekil-17'de gösterilmiştir.



Şekil-17: 1207 Kelvin’de Nanoyapı ile Kara cismin Plank Işıması

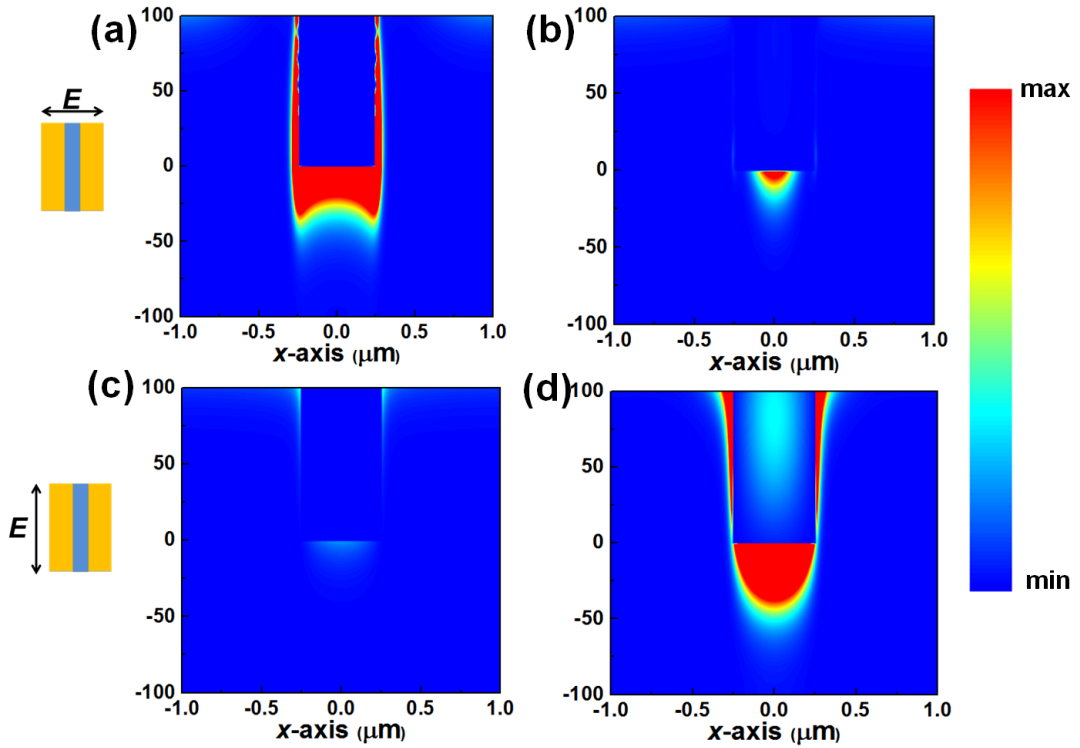
Şekil-17’de siyah renk ile kara cisim ışıması, mavi renk ile GST amorf durumdayken nanoyapının ışıması ve kırmızı renk ile de GST kristal fazındaki ışıma gösterilmiştir. Grafikte hesaplanan ışıma değerleri 1’e normalize edilmiştir. Kara cisim ışımasının en fazla olduğu sanal bir cisimdir. Gerçek cisimlerin ışımaları kara cisimden daha az olacaktır. Nanoyapının 1207 Kelvin sıcaklığında yaydığı ışıma GST malzemesinin iki farklı fazında değişkenlik göstermektedir. Çünkü yayıcılık değeri değişmektedir. 2.4 μm dalga boyunda kızılötesi ışıma değeri kara cisim ışımasına çok yakinken GST faz değiştirdiğinde ışıma sıfıra yaklaşmaktadır. Yani malzeme yapısı değiştirilmeden belirli bir sıcaklıkta; kristal fazında kızılötesi görünürlüğü mükemmel yakın iken GST’nin faz değişimiyle yani amorf faza geçtiğinde kızılötesi olarak neredeyse görünmez olacaktır. Yani kızılötesi görünürlük yaklaşık olarak % 80 ayarlanabilmektedir. Tasarlanan yapının kızılötesi görünmezlik, kızılötesi iz veya imza azaltma ve termal kamuflaj maksatlı kullanılabileceği sonucu çıkartılabilir. Tasarlanan bu yapı bir askeri aracın sıcak bölgelerine kaplanırsa askeri aracın termal kameralarda görünürlüğü kontrol edilebilir. Şekil-18’de tasarlanan yapının kullanılabileceği örnek bir askeri platform modellenmiştir.



Şekil-18: Üçüncü Nanoyapının Kullanıldığı Örnek Askeri Platform Modellemesi

Şekil-18’de bir askeri aracın en sıcak bölgelerinin tasarlanan nanomalzeme ile kaplanması modellenmiştir. Helikopterin motor kısmı nanomalzeme ile kaplanmış ve araç kızılötesi algılama yapan kamera ile izlenmektedir. Şekil-17 ve Şekil-18 birlikte düşünüldüğünde Şekil-17’deki ışıma grafiğine bakılarak, GST-kristal fazda iken helikopterin sıcak bölgelerinin ışıması termal kamerada (FLIR) çok iyi görünebileceği ve GST-amorf durumunda ise aracın termal kamerada iyi görünmeyeceği söylenebilir. Çünkü malzeme ile kaplanan aracın yayacağı ışıma amorf durumundaki nanomalzeme tarafından engellenmektedir. Işımanın yayılması engellendiğinden kameraya kızılötesi ışıma ulaşamayacak ve askeri aracın görünürlüğü minimize edilmiş olacaktır. Böylece helikopterin en sıcak bölgelerine kaplanmış olan nanomalzeme sayesinde helikopterin kızılötesi bantta görünürlüğünün kontrolü modellenmiştir.

Tasarlanan ikinci nanoyapıda emilen toplam güç haritası çıkartılırken sadece elektrik alan polarizasyonunun ızgaraya dikey olarak geldiği durum incelenmiştir. Çünkü diğer polarizasyonda herhangi bir dalga boyunda rezonans bir davranış görülmemiştir. Ancak bu tasarımda her iki polarizasyon vektöründe de rezonans davranışlar gözlemlenmiştir. Bu yüzden tasarlanan yapının emilen toplam güç haritası her iki polarizasyonda rezonans dalga boyuna göre çıkartılmıştır. Dikey polarizasyonda rezonans dalga boyu 2443 nm'dir. Bu dalga boyundaki rezonans GST malzemesinin amorf fazında gerçekleşmiştir. Paralel polarizasyonda rezonans dalga boyu ise 2414 nm'dir. Ancak bu dalga boyundaki rezonans ise GST'nin kristal fazında gerçekleşmiştir. Şekil-19'da iki farklı polarizede iki farklı rezonans davranış gösteren nanoyapının emilen toplam gücünün 2-boyutlu haritası gösterilmiştir.



Şekil-19: Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Dikey Olarak Geldiğinde Emilen Toplam Güç (a) GST-Amorf ve (b) GST-Kristal. Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Paralel Olarak Geldiğinde Emilen Toplam Güç (c) GST-Amorf ve (d) GST-Kristal

Şekil-19'daki grafiklerin tamamında emilen maksimum güç kırmızı renk ile gösterilirken, mavi renk ise emilen gücün minimum olduğunu

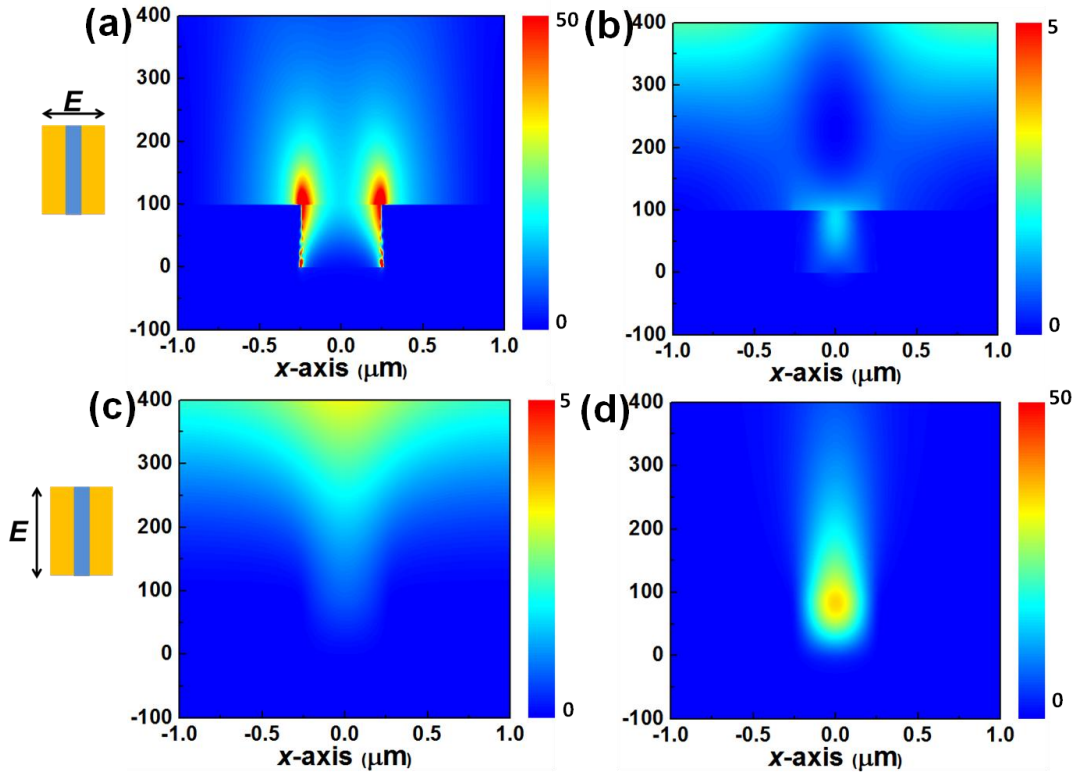
belirtmek amacıyla kullanılmıştır. 2-boyutlu haritaların tamamında renk skalalarının eşit olduğu görülmektedir. Bu yapının simülasyon sonuçlarında, önceki yapının sonuçlarıyla kıyaslandığında belirgin bir fark görülmektedir. Çünkü önceki tasarımda elektrik alanın sadece dikey polarizasyonunda rezonans davranışlar gösterirken, bu tasarımda ise elektrik alan polarizasyonunun her ikisinde de rezonans bir davranış göstermiştir. Önceki tasarımda sadece elektrik alan polarizasyonunun malzeme ızgarasına dikey olarak geldiği durum için emilen güç haritaları mevcuttur. Çünkü sadece o polarizasyonda rezonans davranış vardır. Bu tasarımda ise her iki polarizasyon için rezonans gerçekleştiği için, bu iki polarizasyon için emilen gücün 2-boyutlu haritaları çıkartılmıştır.

Şekil-19(a)'da elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı ızgarasına dikey olarak geldiği durumda; rezonansa girdiği dalga boyu olan 2443 nm'de GST-amorf fazında emilen toplam gücün fazla olduğu görülmektedir. Işıma en çok GST malzemesinin alt bölgesinde ve GST ile altının birleşim sınır bölgelerinde yoğun olarak emilmiştir. Üst metal bölgesinde ve GST malzemesi içinde emilim neredeyse sıfırdır. Elektrik alan polarizasyonu değişmeksizin aynı dalga boyunda kristal fazda emilen gücün çok az olduğu ve az olan emilimin ise GST'nin alt kısmındaki altın malzemesi tarafından emildiği gözlemlenmektedir (Şekil-19(b)). Sonuç olarak; elektrik alan polarizasyonu tasarlanan nanoyapı ızgarasına dikey olarak geldiği durumda rezonans dalga boyunda güç emiliminin GST-amorf fazında gerçekleştiği ve GST-kristal fazda ise emilen toplam gücün çok az olduğu sonucu çıkartılmıştır (Şekil-19 (a) ve (b)).

Elektrik alan polarizasyon vektörünün yönü 90° değiştirildiğinde, yani elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı ızgarasına paralel olarak geldiği durumda; 2414 nm dalga boyunda yapı rezonansa rezonansa girmiştir. Yani bu dalga boyunda yapı minimum yansıtıcılık ya da mükemmel emicilik göstermiştir. Tasarlanan yapı rezonans davranışını GST malzemesinin kristal fazında gerçekleştirmiştir. Şekil-19(c)'de rezonans dalga boyunda GST-amorf durumunda emilen toplam gücün belirgin bir değerinin olmadığı izlenmektedir. Çünkü bu dalga boyunda yapı rezonans bir davranış gösterememiştir ve çok iyi bir yansıtıcı gibi davranmıştır. Elektrik alan polarizasyon vektörü yönü değiştirilmeksizin GST faz değiştirirse emilen

gücün maksimum olduğu görülecektir. Nitekim emilim çok fazla olmuştur. Emilen toplam gücün büyük bir çoğunluğu GST alt bölgesindeki altın malzemesi tarafından ve GST ile altının birleştiği sınır bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Diğer üst metal bölgelerinde bu metalin alt bölgelerinde yakın kızılötesi elektromanyetik ışınım emilimi gözlemlenmemiştir (Şekil-19 (d)).

Tasarladığımız üçüncü plazmonik nanoyapının simülasyon sonuçlarının ikinci nanoyapının sonuçlarından farkı elektrik alan polarizasyon vektörünün yönü değiştirildiğinde bile rezonansa girdiği dalga boyunun olmasıdır. Yani elektrik alan polarizasyon vektörü tasarlanan nanoyapı ızgarasına dikey ve paralel olduğu durumda rezonansa girdiği ve elektrik alan şiddetinin her iki polarizasyonda arttığı görülmektedir. Her iki polarizasyon için iki farklı rezonans dalga boyunda elektrik alan şiddeti haritaları Şekil-20’de gösterilmiştir.



Şekil-20: Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Dikey Olarak Geldiğinde Emilen Elektrik Alan Şiddetinin 2-Boyutlu (a) GST-Amorf ve (b) GST-Kristal Durumlarındaki Haritası. Elektrik Alan Polarizasyon Vektörü Nanoyapı Izgarasına Paralel Olarak Geldiğinde Elektrik Alan Şiddetinin 2-Boyutlu (c) GST-Amorf ve (d) GST-Kristal Durumlarındaki Haritası

Şekil-20'deki iki boyutlu elektrik alan şiddeti haritalarının tamamında kırmızı renk nanoyapı üzerinde lokalize olan elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgeleri, mavi renk ise elektrik alan şiddetinin en düşük olduğu bölgeleri göstermektedir. 2-boyutlu haritalarda elektrik alan şiddetinin malzemenin farklı bölgelerindeki durumunu net bir şekilde görebilmek için en uygun renk skalaları seçilmiştir. Bu yüzden renk haritalarının skalaları birbirinden farklıdır. Elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı ızgarasına dikey olarak geldiği durumda rezonans dalga boyu 2443 nm'dir. Bu dalga boyundaki elektrik alan şiddeti en fazla amorf-GST malzemesi ile altın malzemesinin birleşim yerlerinin üst bölgesinde görülmektedir. Ayrıca çok az bir elektrik alan lokalizasyonu da GST malzemesi üzerinde gerçekleşmiştir (Şekil-20(a)). Elektrik alan polarizasyonu değişmeksizin GST'nin faz değiştirmesiyle elektrik alan şiddetinin nanoyapının herhangi bir bölgesinde artış göstermediği görülmektedir. Yani dikey polarizasyonda, elektrik alan GST'nin amorf fazında lokalize olurken, GST'nin kristal fazında rezonans bir davranışı olmadığından yapının herhangi bir bölgesinde lokalize olamamaktadır (Şekil-20(b)).

Elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı ızgarasına paralel olarak geldiği durumda 2414 nm dalga boyunda rezonans bir davranış sergilenmiştir. Rezonans dalga boyunda GST-amorf durumundaki elektrik alan şiddeti malzemenin herhangi bir bölgesinde lokalize olmamıştır. Diğer bir deyişle, elektromanyetik ışıma malzeme üzerinden yansımıştır ve malzeme üzerinde belirli bir bölgede elektrik alan şiddeti artışı olmamıştır (Şekil-20(c)). Aynı polarizasyonda GST faz değiştirip kristal duruma geldiğinde, elektrik alan şiddetinin nanoyapı üzerinde artmış olduğu ve yoğun olarak da GST malzemesi içine doğru yoğunlaştığı gözlemlenmiştir (Şekil-20(d)). Paralel polarizasyonda; GST kristal fazda iken emiciliğin fazla olmasının sebebi de nanoyapıda elektrik alan şiddetinin arttığı bir bölgenin olmasıdır.

ALTINCI BÖLÜM

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez kapsamında Au ve GST kullanılarak üç farklı nanoyapı tasarlanmıştır. Bunlardan ilki ince film yapılardan oluşturulmuş ve analiz kolaylığından dolayı emicilik değerleri TMM ile elde edilmiştir. Ayrıca bu yapıda EM ışıma kaynağının malzeme ile olan açı değişiminin sonuçlara etkisi de incelenmiştir. Diğer iki nanoyapının analizinde ise FDTD yöntemine dayanan ticari '*Lumerical FDTD Solutions*' simülasyon programı kullanılmıştır. Tasarlanan üç nanoyapıda da ışıma emciliğinin mükemmel yakın olduğu rezonans dalga boyları tespit edilmiştir.

Tasarlanan ilk nanoyapıda 2.1 μm dalga boyunda mükemmel bir emicilik başarımı gerçekleştirilmiştir. Kaynağın normalle yaptığı açının değişimi de gözlemlenmiş ve bu açı 20° ve 40° olduğunda rezonans davranışında belirgin bir değişiklik olmamıştır. Ancak açı 60° olduğunda emicilik değeri yaklaşık olarak % 20 oranında düşmüştür ve en fazla emiciliğin olduğu dalga boyu da daha kısa bir dalga boyuna kaymıştır. Yani kaynağın geliş açısının değişmesi emicilik başarımını ve rezonans dalga boyunu değiştirmiştir. Ayrıca bu nanoyapıda elektrik alan polarizasyon vektörü değiştiğinde, yapının emicilik başarımı ve rezonans dalga boyu kayda değer bir değişiklik göstermemiştir. Bu sonuç nanoyapının polarizasyondan nispeten bağımsız olduğunu göstermektedir.

Tasarlanan ikinci nanoyapıda; tasarımda kullanılan GST'nin fazının değişmesi ile rezonans dalga boyunun daha uzun dalga boyuna kaydırabilme imkanı sağlanmaktadır. Bu yapının simülasyonu sonucunda GST amorf durumdayken 2039 nm olan rezonans dalga boyu lazer etkisiyle GST kristal duruma geçtiğinde rezonans dalga boyu 2143 nm olmuştur. Nanoyapının emiciliğindeki spektral değişim 104 nm (% 5) kaydırılarak ayarlanabilmektedir. Ayrıca bu nanoyapıya, yakın kızılötesi EM düzlem dalga, elektrik alan polarizasyon vektörünün sadece dikey olarak geldiği durumdaki sonuçlar incelenmiştir. Çünkü diğer polarizasyonda nanoyapı, emicilik ve yansıtıcılık bakımından rezonans bir davranış göstermemiştir.

Üçüncü tasarım olan, GST ve altın kalınlıklarının ve genişliklerinin ikinci tasarımdan farklı olarak ayarlandığı nanoyapıda ise ikinci tasarıma göre ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Önceki tasarımda olduğu gibi iki farklı rezonans dalga boyu bulunmaktadır. Ancak bu iki farklı rezonans dalga boyunun elektrik alan polarizasyon vektörünün farklı durumlarında gerçekleştiği görülmektedir. Yani elektrik alan vektörü yapı üzerine dikey olarak geldiğinde GST amorf durumunda rezonans davranışını 2443 nm dalga boyunda göstermektedir. Bu dalga boyunda çok iyi emicilik veya çok kötü bir yansıtıcılık özelliği göstermektedir. Aynı polarizasyonda GST faz değiştirirse aynı dalga boyundaki emicilik çok kötü olmakta ve yansıtıcılık ise mükemmel yakın olmaktadır. Elektrik alan polarizasyon vektörü nanoyapı ızgarası üzerine paralel olarak geldiği durumda rezonans davranış 2414 nm dalga boyunda ve GST kristal fazda gerçekleşmiştir. GST amorf durumunda rezonans bir sonuç görülmezken faz değişimi ile 2414 nm dalga boyunda emicilik mükemmel yakın olmuştur. Dolayısıyla bu dalga boyundaki yansıtıcılık çok kötü durumdadır. Paralel polarizasyonda rezonansın gerçekleştiği dalga boyu olan yaklaşık 2.4 μm 'deki Plank ışıması hesaplanmış ve kara cisim ışıması ile aynı grafikte gösterilerek farklılıkları izah edilmiş ve kızılötesi bölgede görünürlük GST'nin faz değişimiyle % 80 oranında değiştirilerek ayarlanabilmiştir. Bu yapı, termal emisyon şiddeti ayarlanabilir (tunable) açık-kapalı (ON-OFF) yapıların bir örneğidir. Ancak iki farklı polarizasyon için farklı dalga boylarında ve GST'nin farklı fazında rezonans davranış göstermektedir. Yani dikey polarizde rezonans davranış GST amorf durumunda gerçekleşirken, yatay polarizde ise GST kristal fazda rezonans gerçekleşmiştir. Bu nanoyapı polarizasyon bağımlı bir yapıdır.

Tasarlanmış olan yapıların her üçü de dar bant kızılötesi ışıma emici yapılardır. Bu haliyle sensör ve termal görüntüleme gibi potansiyel kullanım alanları bulunmaktadır. Mevcut nanofabrikasyon teknolojisi ve yetenekleri ile de üretimi mümkündür.

İleriki çalışmalarda, Au ve GST geometrileri değiştirilerek ve 3-boyutlu simülasyonlar yaparak emiciliğin mükemmel yakın olduğu geniş bantlı tasarımların nanofabrikasyon teknikleri ile üretimi hedeflenmektedir. Üretimi

hedeflenen geniş bantta kızılötesi ışıma emici nanoyapıların; seçici kızılötesi yayıcılar, kızılötesi kamuflaj, sensörler ve fotovoltaik cihazlar gibi kullanılabileceği potansiyel uygulama alanları bulunmaktadır.

KAYNAKÇA

ATWATER, H.A. ve A. Polman, "Plasmonics for improved photovoltaic devices", **Nature Materials**, IX, 3, 2010, 205-213.

AVITZOUR, Y., ve diğerleri, "Wide-angle infrared absorber based on a negative-index plasmonic metamaterial", **Physical Review B**, LXXIX, 4, 2009, 045131.

AYDIN, K., ve diğerleri, "Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers", **Nature Communications**, II, Kasım 2011, 517.

BUTUN, S. and K. Aydin, "Structurally tunable resonant absorption bands in ultrathin broadband plasmonic absorbers", **Optics Express**, XXII,16, 2014, 19457-19468.

CAO, T.(a), ve diğerleri, "Mid-infrared tunable polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial", **Journal of Optical Society of America B**, XXX, 6, 2013, 1580-1585.

CAO, T.(b), ve diğerleri, "Rapid phase transition of a phase-change metamaterial perfect absorber", **Optical Material Express**, III, 8, 2013, 1101–1110.

CAO, T., ve diğerleri, "Broadband Polarization-Independent Perfect Absorber Using a Phase-Change Metamaterial at Visible Frequencies", **Scientific Reports**, IV, 2014, 3955.

CHEN, H.-T., ve diğerleri, "Active terahertz metamaterial devices", **Nature**, CDXLIV, 2006, 597-600.

CHEN, H.-T., ve diğerleri, "Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials", **Nature Photonics**, II, 5, 2008, 295-298.

DICKEN, M.J. ve diğerleri, "Frequency tunable near-infrared metamaterials based on VO₂ phase transition", **Optics Express**, XVII, 20, 2009, 18330-18339.

DRISCOLL, T., ve diğerleri, "Dynamic tuning of an infrared hybrid-metamaterial resonance using vanadium dioxide", **Applied Physics Letters**, XCII, 2, 2008, 024101.

DVD-RAM Kaydetme ve Silme Modeli, <<http://www.lightsources.org/press-release/2006/10/17/structural-basis-fast-phase-change-dvd-ram>> sitesinden alınmıştır.

FERRY, V.E., ve diğerleri, "Plasmonic nanostructure design for efficient light coupling into solar cells", **Nano Letters**, VIII, 12, 2008, 4391-4397.

FOX, Mark, **Optical Properties of Solids**, (2001) (Çev. Şakir Aydoğan), Ankara, Nobel Yayınevi, 2014.

GREFFET, J.-J., ve diğerleri, "Coherent emission of light by thermal sources", **Nature**, CDXVI, 2002, 61-64.

HOSSEINI, P., ve diğerleri, "An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films", **Nature**, DXI, 2014, 206–211.

KATS, M. A., ve diğerleri, "Ultra-thin perfect absorber employing a tunable phase change material," **Applied Physics Letters**, CI, 2012, 221101.

KOCER, Hasan, "Nanostructured thin film–based near-infrared tunable perfect absorber using phase-change material", **Journal of Nanophotonics**, IX,1, 2015, 093597.

KOCER, H., ve diğerleri, "Reduced near-infrared absorption using ultra-thin lossy metals in Fabry-Perot cavities", **Scientific Reports**, V, 2015, 8157.

LANDY, N., ve diğerleri, "Perfect metamaterial absorber", **Physical Review Letters**, C, 20, 2008, 207402.

LIU, N., ve diğerleri, "Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor", **Nano Letters**, X, 7, 2010, 2342-2348.

Lorentz Osilatör Modeli, <<http://www.freesandal.org/?p=12382>> sitesinden alınmıştır.

Lumerical Solutions, *Lumerical Solutions, Inc.*
<<http://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>>

MICHEL, A-K.U., ve diğerleri "Using Low-Loss Phase-Change Materials for Mid-Infrared Antenna Resonance Tuning". **Nano Letters**, XIII, 8, 2013, 3470-3475.

PALA, R.A., ve diğerleri, "Design of Plasmonic Thin-Film Solar Cells with Broadband Absorption Enhancements". **Advanced Materials**, XXI, 34, 2009, 3504-3509.

PALIK, Edward D., **Handbook of Optical Constants of Solids**, New York, Academic Press, 1998.

SHPORTKO, K., ve diğerleri, "Resonant bonding in crystalline phase-change materials". **Nature Materials**, VII, 8, 2008, 653-658.

STREYER, W. ve diğerleri, "Strong absorption and selective emission from engineered metals with dielectric coatings". **Optics Express**, XXI, 7, 2013, 9113-9122.

STUTZMAN, W.L., ve G.A., Thiele, **Antenna theory**, Boston, John Wiley&Sons, Inc., 1998.

TAO, H., ve diğerleri, "A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization", **Optics Express**, XVI,10, 2008, 7181-7188.

TAFLOVE, A., **Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method**, London, Artech House, 1995.

TALGHADER, J.J., ve diğerleri, "Spectral selectivity in infrared thermal detection", **Light: Science & Applications**, I, 2012, e24.

VOTI, R.L.ve diğerleri "Optimization of thermochromic VO₂ based structures with tunable thermal emissivity", **Journal of Applied Physics**, CXII, 3, 2012, 034305.

WEN, Q., ve diğerleri, "A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium oxide films", **Journal of Physics**, XLV, 23, 2012, 235106.

WUTTIG, M. ve Yamada, N. "Phase-change materials for rewriteable data storage", **Nature Material**, VI, 2007, 824–832.

Yee birim hücresi, 1966,
<<http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/24879/ch02.html>> sitesinden alınmıştır.

YEH, P. **Optical Waves in Layered Media**, New Jersey, John Wiley&Sons, Inc., 2005.

ZHANG, B., ve diğerleri, "Polarization-independent dual-band infrared perfect absorber based on a metal-dielectric-metal elliptical nanodisk array," **Optics Express**, XIX, 2011, 15221–15228.

ZHOU, H., ve diğerleri, "Terahertz metamaterial modulators based on absorption", **Progress in Electromagnetic Research**, CXIX, 2011, 449–460.

YÜKSEK LİSANS EĞİTİMİ SÜRESİNCE YAPILAN BİLİMSEL ÇALIŞMALAR

1. ÖZDEMİR, A., O. TORUNOĞLU, Ş. SARAYDEMİR ve H.KOÇER, 'Termal Görüntülemeye Polarite Değişiminin Yüz Tanıma Performansına Etkisi', **7.Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu**, Ankara, VIII, Mayıs 2014, 177-179.
2. OZDEMİR, A. ve H. KOCER, 'Near-Infrared Tunable Reflection and Absorption Using Nanostructured Thin Film Structures Employing Phase-Change Material', **5. International Advances In Applied Physics and Materials Science Congress&Exhibition (APMAS)**, Muğla, Nisan 2015.
3. OZDEMİR, A., S.SARAYDEMİR, B.BARUT ve H.KOCER, 'Absorption intensity tunability in the near infrared region using phase-change nanostructure', **SPIE Optics+Photonics Conference**, San Diego-California, 9-13 Ağustos 2015, 9558-9. (Çalışma konferans tarafından kabul edilmiştir. 12 Ağustos 2015'te sunulacaktır).
4. OZDEMİR, A. ve H. KOCER, 'Near-Infrared Tunable Reflection and Absorption Using Nanostructured Thin Film Structures Employing Phase-Change Material', başlıklı çalışma **ACTA PHYSICA POLONICA A** dergisinde '*under review*' durumundadır.

