



**TERAHERTZ BÖLGESİNDE TEK KATMANLI
YÜKSEK VERİMLİ VE GENİŞ BANT
POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI**

Fatih KADİROĞLU

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2024

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TERAHERTZ BÖLGESİNDE TEK KATMANLI YÜKSEK VERİMLİ VE GENİŞ
BANT POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI**

(The Polarization Converter Design Based on Single-Layer High Efficiency and Broadband in
Terahertz Region)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih KADİROĞLU

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Erzurum
Ocak, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Fatih KADIROĐLU tarafından hazırlanan “Terahertz Bölgesinde Tek Katmanlı, Yüksek Verimli ve Geniş Bant Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı” başlıklı çalışması 17/01/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga TekniĐi Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Fatih ÇORAPSIZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Alptekin ENGİN <i>Bayburt Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim YönetmeliĐi’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk BuĐrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK* danışmanlığında sunulan “Terahertz bölgesinde tek katmanlı, yüksek verimli ve geniş bant polarizasyon dönüştürücü tasarımı” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	8	30
Kuramsal Temeller	2	30
Materyal ve Metot	1	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	4	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Fatih KADİROĞLU	Doç Dr. Gökhan ÖZTÜRK
17.1.2024	17.1.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimi sırasında bilgilerini, tecrübelerini esirgemeyen hoşgörü ve özveri ile akademik çalışmalarına katkı sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK'e ve bu aşamada desteğini esirgemeyen eşime teşekkür ederim.

Fatih KADİROĞLU



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TERAHETZ BÖLGESİNDE TEK KATMANLI YÜKSEK VERİMLİ VE GENİŞ BANT POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

Fatih KADİROĞLU

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Amaç: Bu çalışmanın amacı, terahertz bölgesinde uyarlanabilir, yüksek verimli ve geniş bant polarizasyon dönüştürücü tasarımı bilgisayar ortamında gerçekleştirmektir.

Yöntem: Çalışmada, polarizasyon dönüştürücü metamalzeme, bir elektromanyetik benzetim programı olan CST Microwave Studio ile tasarlanmıştır. Rezonans frekanslarında akım yoğunluğu, polarizasyon dönüştürücü için yansıma katsayıları, polarizasyon dönüştürme oranları, ortogonal bileşenler ve faz farkları CST Microwave Studio ile simüle edilmiştir. Vanadyum dioksitin dielektrik sabiti Bruggeman etkili ve Drude modeli ile gerçekleştirilerek karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Tasarlanan metamalzeme, Bruggeman etkili modeli ile vanadyum dioksitin dielektrik sabiti 9 alındığında 5,29-13,68 THz aralığında %90 üzeri polarizasyon dönüştürme oranı (PCR), göreceli bant genişliği (RBW) %88,40, 5,46-13,62 THz aralığında PCR değeri en az %96 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, tasarlanan metamalzeme Drude modeli ile vanadyum dioksitin dielektrik sabiti 12 alınarak 5,20-13,61 THz aralığında %90 üzeri PCR, RBW %89,39, 5,35-9,62 THz ile 10,47-12,64 THz aralığında PCR değeri en az %96 olarak hesaplanmıştır.

Sonuç: Bu tez çalışmasında Bruggeman etkili modeli ile vanadyum dioksitin dielektrik sabiti 9 alındığında yaklaşık 8,38 THz, Drude modeli ile 12 alındığında yaklaşık 8,41 THz bant genişliğinde %90 üzerinde polarizasyon dönüşüm yapan ve 5,4 µm kalınlığında uyarlanabilir, yüksek verimli bir model oluşturulmuştur. Vanadyum dioksitin sıcaklığa göre iletkenlik seviyesinin değişmesinden dolayı dinamik bir metamalzeme tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: mikrodalga, polarizasyon dönüştürücü, vanadyum dioksit, metamalzeme, PCR, RBW, geniş bant, terahertz.

Ocak 2024, 71 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

THE POLARIZATION CONVERTER DESIGN BASED ON SINGLE-LAYER HIGH EFFICIENCY AND BROADBAND IN TERAHERTZ REGION

Fatih KADİROĞLU

Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan ÖZTÜRK

Purpose: The aim of this study is to design an adaptable, high-efficiency and broadband polarization converter in the terahertz region in a computer environment.

Method: In this study, the polarization converter metamaterial is designed with CST Microwave Studio, an electromagnetic simulation program. Current density at resonant frequencies, reflection coefficients for the polarization converter, polarization conversion ratios, orthogonal components and phase differences were simulated with CST Microwave Studio. The dielectric constant of vanadium dioxide is compared with the Bruggeman effective and Drude model.

Findings: The designed metamaterial has a polarization conversion rate (PCR) of over 90% in the range of 5.29-13.68 THz, relative bandwidth (RBW) of 88.40%, and PCR value of at least 96% in the range of 5.46-13.62 THz by taking the dielectric constant of vanadium dioxide 9 with the Bruggeman effective model. At the same time, by taking the dielectric constant of vanadium dioxide as 12 with the designed metamaterial Drude model, PCR over 90% in the range of 5.20-13.61 THz, RBW 89.39%, PCR value at least 96% in the range of 5.35-9.62 THz and 10.47-12.64 THz were calculated.

Conclusion: In this thesis study, an adaptable, high-efficiency model with a polarization conversion of over 90% and a thickness of 5.4 μm was created with a bandwidth of approximately 8.38 THz when the dielectric constant of Vanadium dioxide was taken as 9 with the Bruggeman effect model, and approximately 8.41 THz when the dielectric constant of Vanadium dioxide was taken as 12 with the Drude model. A dynamic metamaterial was designed because the conductivity level of vanadium dioxide changes according to temperature.

Keywords: microwave, polarization converter, vanadium dioxide, metamaterial, PCR, RBW, broadband, terahertz.

January 2024, 71 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
Metamalzeme Tasarımlarında Altının İletken Olarak Kullanılması	6
Metamalzemedede Rogers RT5880LZ	6
Vanadyum Dioksit (VO ₂)	7
Terahertz Polarizasyon Dönüştürücüler	8
KURAMSAL TEMELLER.....	16
Elektromanyetik Dalgaların Polarizasyonu	24
Lineer/Doğrusal Polarizasyon	24
Dairesel Polarizasyon	25
Eliptik Polarizasyon.....	26
Polarizasyon Elips	27
Elektromanyetik Dalgaların Polarizasyonu için Jones Hesabı	28
Çapraz Polarizasyon Dönüşümü.....	29
Lineer-Dairesel Polarizasyon (LTC) Dönüşümü.....	32
MATERYAL VE YÖNTEM	34
Polarizasyon Dönüşüm Oranı	34
Saçılma Parametreleri.....	35
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	39
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	51
KAYNAKÇA	52
ÖZGEÇMİŞ.....	58

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Fu-yuan <i>et al.</i> Oluşturduğu Modelin Parametreleri.....	13
Tablo 2. Farklı Sıcaklıklarında VO ₂ 'nin İletkenliği	13
Tablo 3. Oluşturulan Polarizasyon Dönüştürücünün Ölçüleri	37
Tablo 4. Oluşturulan Polarizasyon Dönüştürücünün VO ₂ Dielektrik Sabiti $\epsilon=9$ ve $\epsilon=12$ Rezonans Noktaları Karşılaştırması	40
Tablo 5. Modelde Polarizasyon Dönüştürücünün VO ₂ Dielektrik Sabitine Göre Yansıması .	41
Tablo 6. Oluşturulan Polarizasyon Dönüştürücünün VO ₂ Dielektrik Sabitine Göre Polarizasyon Dönüştürme Oranı.....	41
Tablo 7. Metamalzemedeki Parçaların Polarizasyon Dönüştürme Etkileri	49
Tablo 8. Önerilen Polarizasyon Dönüştürücünün Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. (a) Geleneksel malzeme için güç akışı, (b) Metamalzeme için güç akışı.	1
Şekil 2. Pendry'nin önerdiği negatif elektriksel geçirgenliği sağlayan ince sonsuz uzunluktaki metal yapı.....	2
Şekil 3. Pendry'nin önerdiği negatif manyetik geçirgenliği sağlayan SRR yapıları geometrisi.	2
Şekil 4. İletim modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün (a) 3 boyutlu görünümü, (b) ön yüzey görünümü, (c) orta yüzey görünümü, (d) arka yüzey görünümü.	5
Şekil 5. Yansıma modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün (a) 3 boyutlu görünüşü, (b) önden görünüşü, (c) yandan görünüşü.....	6
Şekil 6. Polyimide, VO ₂ ve Au kullanılarak tasarlanan Polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin şematik diyagramı.	10
Şekil 7. Fr-4, VO ₂ ve Au kullanılarak tasarlanan Polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin şematik diyagramı.	11
Şekil 8. VO ₂ Kullanılarak Yu <i>et al.</i> tasarladıkları metamalzeme.	12
Şekil 9. Polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin şematik diyagramı.	14
Şekil 10. Polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin şematik diyagramı.	14
Şekil 11. THz dalgalarının EM Spektrumunda gösterilmesi.....	16
Şekil 12. THz boşluğuna sahip EM spektrum.	17
Şekil 13. Temel parametrelere göre (ϵ ve μ) malzemelerin sınıflandırılması.	18
Şekil 14. (a) 2 boyutlu metayüzeyin 3 boyutlu görünümü, (b) birim hücrenin ön yüzeyinin görünümü, (c) birim hücrenin arka yüzeyinin görünümü.....	20
Şekil 15. Üç boyutlu metayüzeyin: (a) perspektif görünüşü, (b,c) SEM görüntüsü.	21
Şekil 16. Önerilen metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünüşü, (b) eşdeğer devresi.	22
Şekil 17. Genelleştirilmiş Snell kırılma yasasının şematik gösterimi.	23
Şekil 18. Lineer polarizasyonun şematik gösterimi.	25
Şekil 19. Dairesel polarizasyonun şematik gösterimi.	26
Şekil 20. Eliptik polarizasyonun şematik gösterimi.	27
Şekil 21. Polarizasyon Elips diyagramı.....	28
Şekil 22. Boşluğu bulunan altıgen metayüzey.	31
Şekil 23. Kiral metamalzeme.	32
Şekil 24. LP'den CP'ye dönüşüm için metayüzeyin kavramsal diyagramı.	33
Şekil 25. İki kapılı devre modeli.	36

Şekil 26. Oluşturulan polarizasyon dönüştürücünün: (a) Ön görünümü, (b) Yan görünümü, (c) Perspektif görünümü ve malzeme yapısı.	38
Şekil 27. Oluşturulan polarizasyon dönüştürücü modelin $\varepsilon(\text{VO}_2)=9$ ve $\varepsilon(\text{VO}_2)=12$ R_{yy} ve R_{xy} grafikleri.	39
Şekil 28. Tasarlanan değiştirilebilir çok işlevli metamalzemenin yansıma grafiği.	40
Şekil 29. Tasarlanan değiştirilebilir çok işlevli metamalzemenin polarizasyon dönüştürme oranı değerinin frekansa göre değişimi (normal açı).	41
Şekil 30. Tasarlanan metamalzemenin ortogonal bileşenleri grafiği.	42
Şekil 31. Tasarlanan değiştirilebilir çok işlevli metamalzemenin faz farkı grafiği.	43
Şekil 32. Tasarlanan metamalzemenin geliş açısına göre PCR grafiği.	44
Şekil 33. Tasarlanan modelde t (kalınlık) parametresinin, bir alt ve bir üst değerlerinin PCR çizimi.	44
Şekil 34. Tasarlanan modelde h (kalınlık) parametresinin, bir alt ve bir üst değerlerinin PCR çizimi.	45
Şekil 35. Tasarlanan modelde L (en-boy) parametresinin, bir alt ve bir üst değerlerinin PCR grafiği.	46
Şekil 36. Tasarlanan modelin $\varepsilon(\text{VO}_2) = 9$ akım yoğunluğu.	47
Şekil 37. Tasarlanan modelin $\varepsilon(\text{VO}_2) = 12$ akım yoğunluğu.	47
Şekil 38. Tasarlanan modelin, modelin VO_2 'siz ve iç halkasız PCR grafiği.	48
Şekil 39. Tasarlanan modelde VO_2 'nin farklı iletkenlik seviyesine göre PCR grafiği.	49

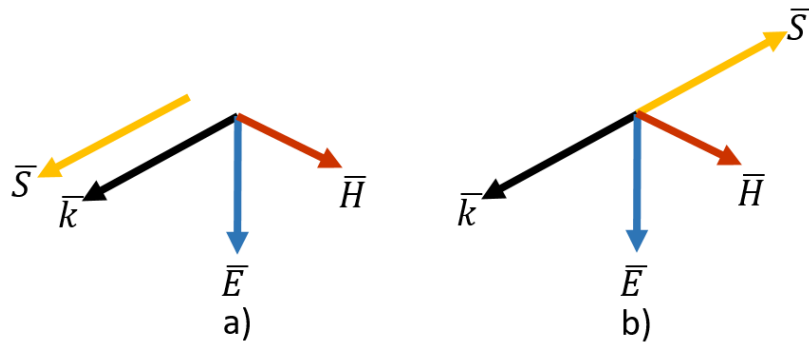
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

EM	: Elektromanyetik
THz	: Terahertz
GHz	: Gigahertz
Au	: Altın
VO ₂	: Vanadyum Dioksit
CST	: Computer Simulation Technology (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi)
LHCP	: Sol Elli Dairesel Polarizasyon
RHCP	: Sağ Elli Dairesel Polarizasyon
RAM	: Radar Soğurucular
KMM	: Kiral Metamalzeme
CP	: Dairesel Polarizasyon
CPC	: Dairesel Polarizasyon Dönüştürücü
LTC	: Lineer Polarizasyondan Dairesel Polarizasyona Dönüşüm
PCR	: Polarizasyon Dönüştürme Oranı
RBW	: Göreceli Bant Genişliği
E	: Elektrik Alan Şiddeti
H	: Manyetik Alan Şiddeti
D	: Elektrik Akı Yoğunluğu
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
°C	: Santigrat Derece
°F	: Fahrenheit Derece
Ω	: Ohm
n	: Kırılma İndisi
J	: Elektrik Akım Yoğunluğu
ϵ	: Dielektrik Sabiti
ϵ_r	: Bağıl Dielektrik Sabiti
ϵ''	: Dielektrik Kayıp Faktörü
μ_r	: Bağıl Manyetik Geçirgenlik
μ	: Manyetik Geçirgenlik
μ_0	: Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği
ϵ_0	: Boş Uzayın Elektrik Geçirgenliği
e	: Eliptiklik

λ	: Dalga Boyu
r_{uu}	: u yönündeki ortogonal birleşen yansıma katsayısı
r_{vv}	: v yönündeki ortogonal birleşen yansıma katsayısı
ϕ_{uu}	: u yönündeki ortogonal birleşenin faz açısı
ϕ_{vv}	: v yönündeki ortogonal birleşenin faz açısı
ϕ_{uv}	: u-v ortogonal birleşenlerin faz farkı
η	: Öz Empedans
η_0	: Boş Uzayın Öz Empedans
σ	: İletkenlik
ρ_v	: Elektrik Yük Yoğunluğu
α	: Zayıflama Sabiti
β	: Faz Sabiti
γ	: Yayılma Sabiti
δ	: Deri Kalınlığı
σ	: Elektrik İletkenliği
$\tan\delta$	: Kayıp Tanjantı
f	: Frekans
w	: Açısal Frekans
f_c	: Merkez Frekansı
f_H	: Yüksek Frekans
f_L	: Düşük Frekans
S	: Saçılma Parametreleri
S_{11}	: Giriş Kapısı Yansıma Katsayısı
S_{22}	: Çıkış Kapısı Yansıma Katsayısı
S_{12}	: Ters Voltaj Kazancı
S_{21}	: İleri Voltaj Kazancı Çıkış

GİRİŞ

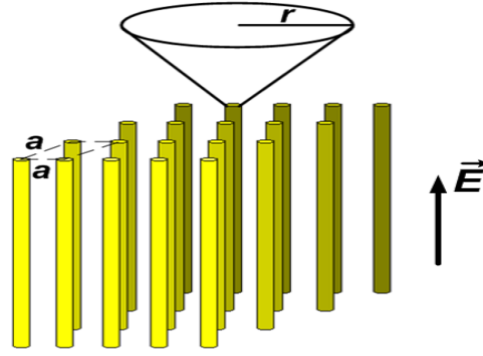
Metamalzemeler negatif kırılma indisine sahip doğada bulunmayan ve yapay olarak üretilen periyodik veya aperyodik yapılardır (Ozturk *et al.* 2020). Geleneksel malzemeler (sağ elli malzemeler)'in aksine metamalzemeler negatif elektriksel (permittivity) ve manyetik (permeability) geçirgenliğe aynı anda sahip olabilen malzemelerdir. Kelime manası olarak meta kelimesi “ötesi” manasına gelmektedir. Metamalzemeler ise doğada olmayan bu özellikleri ile malzeme ötesi manasına gelen kelime grubu ile oluşturulmuştur. Bunun aksine geleneksel malzemelerin elektriksel ve manyetik geçirgenlikleri negatif olmayıp, kırılma indisleri de doğal olarak negatif olamamaktadır (Cui *et al.* 2010). Sol elli malzemelerin olması durumunda nasıl davranması gerektiği ile ilgili ilk fikir Veselago tarafından ortaya atılmıştır. Veselago yapmış olduğu çalışmada malzemenin sol elli malzeme olarak davranması için, matematiksel olarak hem elektriksel geçirgenliğinin hem de manyetik geçirgenliğinin negatif olması gerektiğini ispatladı. Sol elli malzemede, güç vektörünün (Pointing Vektör) geleneksel malzemede gerçekleşenin aksine dalga yayılımının zıttına yayıldığı görüldü (Veselago 1968). Sağ elli ve sol elli malzeme için elektrik alan şiddeti ($\vec{E}$), manyetik alan şiddeti ($\vec{H}$), dalga yayılım vektörü ve güç vektörlerinin davranışı Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1 (a)’da görüleceği gibi güç vektörü ($\vec{S}$) ile dalga vektörü ($\vec{k}$) geleneksel malzeme için (sağ elli malzeme) aynı yönde iken Şekil 1 (b)’de sol elli malzeme için bu akış zıt yöndedir (Öztürk 2023).



Şekil 1. (a) Geleneksel malzeme için güç akışı, (b) Metamalzeme için güç akışı (Öztürk 2023).

Sol elli metamalzemeler teorik olarak ispatlandıktan sonra, bu malzemelerin deneysel olarak üretimi için ilk kez Pendry tarafından negatif elektriksel geçirgenliğe sahip malzeme gerçekleştirilmiştir. Pendry'nin önerdiği yapı ile tıpkı gazların plazma frekansında davrandığı gibi sonsuz uzunluktaki iyi iletkene uygulanan elektrik alan ile elektronların bir gaz bulutu davranışı sergilediğini ve Lorentz modeli ile bu durumun modellenebileceğini gösterdi. Bu

durumda elektriksel geçirgenlik belirli frekans aralıkları için negatif olabilecekti. Pendry'nin önerdiği yapı için geometrik tasarım aşağıdaki gibi verilmiştir (Pendry *et al.* 1998).

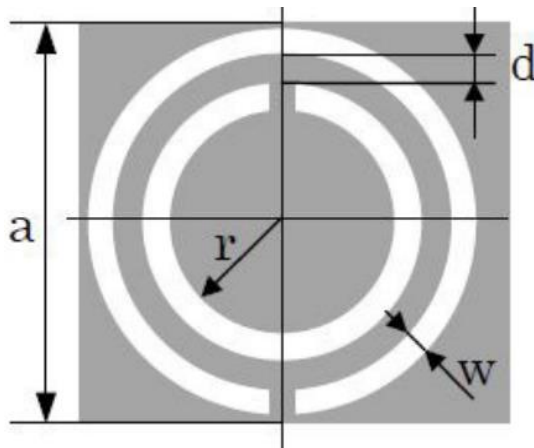


Şekil 2. Pendry'nin önerdiği negatif elektriksel geçirgenliği sağlayan ince sonsuz uzunluktaki metal yapı (Pendry *et al.* 1998).

Pendry'nin önerdiği yapı için elektriksel geçirgenliği Lorentz modeli ile aşağıdaki gibi matematiksel olarak ifade edilebilir.

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\gamma)} \quad (1)$$

Denklem 1'de $\varepsilon(\omega)$, Şekil 2'de verilen yapının elektriksel geçirgenliğini, ω_p plazma frekansını, ω çalışma frekansını ve γ kayıplı ortamın yayılma sabitini temsil eder. Denklem 1'de görüleceği üzere çalışma frekansı değişimi ile negatif elektrik geçirgenliğinin sağlanması mümkün olmaktadır. Pendry çalışmalarını bir adım ileri götürerek negatif manyetik geçirgenliğine sahip malzemeleri deneysel olarak elde etmek için yarık halka rezonatörlerini (Split Ring Resonator - SRR) üretmiştir (Pendry 1999). Pendry'nin negatif kırılma indisini garanti eden yapının geometrik dizaynı Şekil 3'te verildiği gibidir.



Şekil 3. Pendry'nin önerdiği negatif manyetik geçirgenliği sağlayan SRR yapıları geometrisi (Bute 2018).

Pendry'nin yaptığı deneysel yapıları birleştirerek negatif kırılma indisine sahip çift negatif malzemeler (sol elli malzemeler) Smith tarafından ilk kez gerçekleştirilmiştir. Smith'in

önerdiği yapıda SRR yapılarının arkasına konulan sonsuz uzunluktaki iyi iletkenler ile hem negatif elektriksel geçirgenlik hem de negatif manyetik geçirgenlik sağlanabilmekteydi (Smith *et al.* 2000).

Kundtz ve arkadaşları metamalzeme kullanarak optik uygulamalar için mükemmel bir lens tasarımı önerdiler (Kundtz and Smith 2010). Pendry ve arkadaşları metamalzemeleri kullanarak ilk kez görünmezlik pelerin uygulamasını gerçekleştirdiler (Pendry *et al.* 2006). Landy ve arkadaşları metamalzeme yapılarını kullanarak Terahertz (THz) frekans aralığı için mükemmel bir emici tasarımı gerçekleştirdiler (Landy *et al.* 2008). Lim ve arkadaşları metamalzeme kontrollü anten ürettiriler (Lim *et al.* 2004). İsmuharu ve arkadaşları sensör uygulamaları için metamalzeme yapıları kullandılar (Ishimaru *et al.* 2005).

Metamalzemelerin tarihçesi, bu alandaki hızlı gelişmelerle devam etmekte ve bu özel malzemelerin farklı alanlarda uygulamalarını görebilmek için daha çok çalışma ve araştırma gerektirmektedir. Bu alandaki ilerlemeler, haberleşme, tıp, savunma ve elektronik gibi birçok sektörü etkileme potansiyeline sahiptir.

Son yıllarda, Elektromanyetik (EM) dalganın temel özelliği olarak adlandırılan polarizasyon dönüştürücü tasarımlar, bilgi işleme, görüntüleme ve algılama gibi kullanım alanlarında ön plana çıkmıştır (Yu *et al.* 2022). Metamalzemenin iki boyutlu bir yapı formu olarak, metayüzey, kolay üretimi ve diğer cihazlarla entegrasyonu sayesinde dikkatleri üzerine çekmiştir (Yu *et al.* 2022).

Vanadyum dioksit (VO_2) kullanılarak metayüzeye dayalı THz polarizasyon dönüştürücü ile ilgili literatürde sınırlı sayıda (Xiao *et al.* 2017; Yang *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2021; Li *et al.* 2023) çalışma bulunmaktadır. THz dalgaları EM spektrumunda geniş bir bölgede yer almasına karşın fazla keşfedilmemiş, yeniliklere ve yeni araştırma alanlarına açık bir bant aralığıdır (Akkaş 2018). THz dalgalarının birçok kullanım alanı mevcut olup sadece kablosuz iletişimde değil aynı zamanda görüntüleme teknolojisinde, savunma sanayinde, nesnelerin internetinde, nano telsiz duyurga ağlarının haberleşmesi gibi yeni teknoloji alanlarının önünün açılmasına imkân sağlayacaktır (Pawar *et al.* 2013; Nagatsuma *et al.* 2016).

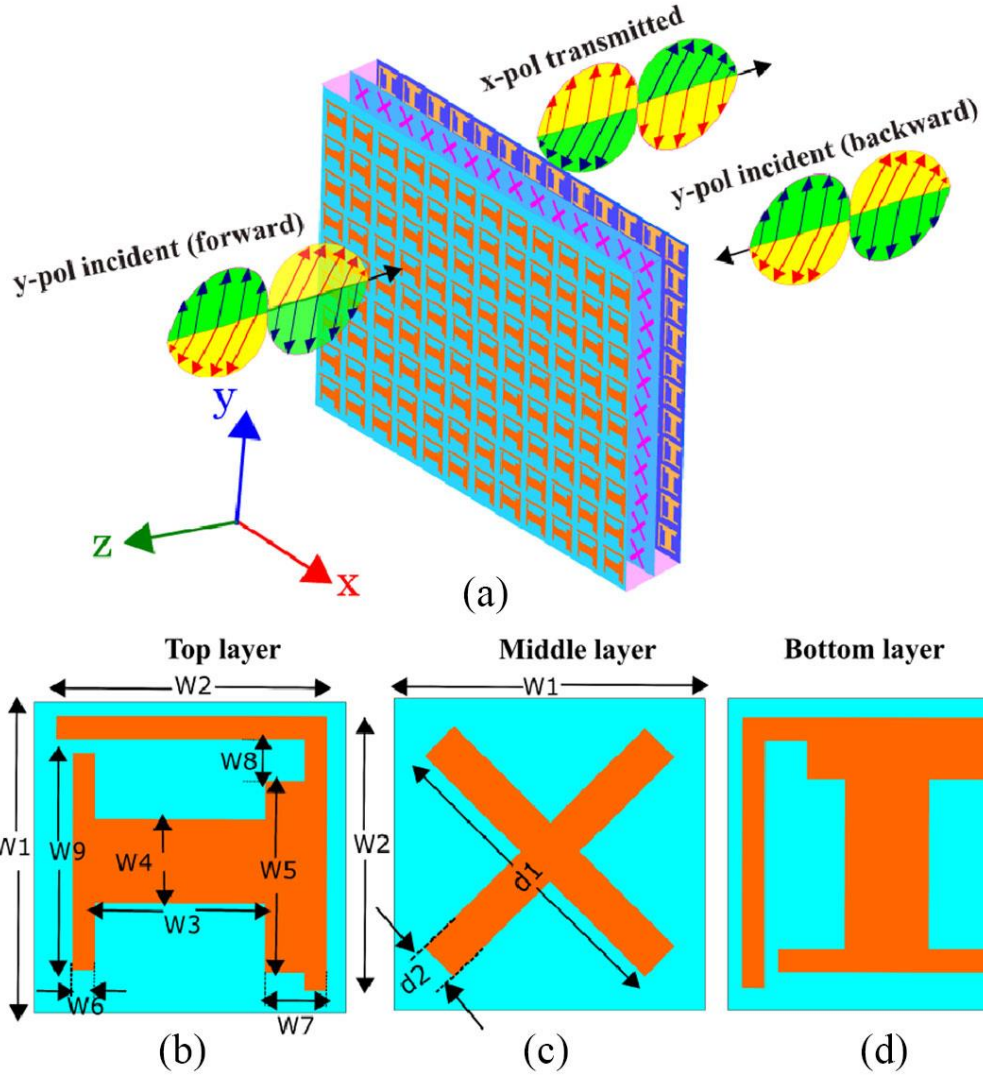
Metayüzeyler lensler ve reflektörler, antenler, dalga plakaları, optik vorteks kırışlar, hologramlar vb. gibi birçok uygulama alanlarına sahiptir (Hsiao *et al.* 2017). Son zamanlarda, EM dalganın hapsedilmesi için optik metayüzeyler kullanıldı, böylece istenmeyen sinyal sızıntısını azaltıldı ve EM cihazların ve aletlerin genel verimliliğinin iyileştirilmesi gerçekleştirildi. Ultra-ince kalınlık, yüksek soğurma ve düşük üretim maliyeti nedeniyle metayüzeylerin kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır.

Faraday Etkisi, optik fraksiyon gibi geleneksel yöntemlerle elde edilen polarizasyon dönüştürücülerin büyük hacim, dar bant çalışma, eğik açı hassasiyetsizliği ve ekonomik olmamaları sebebi ile metamalzeme polarizasyon dönüştürücüler üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda giderek artmaktadır (Ozturk 2022). Metamalzeme temelli polarizasyon dönüştürücüler kullanım alanına göre yansıma ve iletim tipi olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Daha az parametre analizi gerektiren yansıma tipli polarizasyon dönüştürücüler lineer ve dairesel tipli olarak Gigahertz (GHz) ve THz bölgelerinde çeşitlenmiştir. Bu çalışmalar kullanılan alttaşı, bant genişliği ve tipi, eğik açı hassasiyeti ve dalga boyu cinsinden malzeme kalınlığı gibi üstünlüklerine göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca metamalzeme ve metal sonlandırma kısımları bakır, altın (Au), VO₂, ITO (indiumtinoksit) gibi iletken kısımlarla üretilerek kullanım avantajına göre üretilmektedir (Tutar and Ozturk 2022).

Metamalzemeli polarizasyon dönüştürücüler, metamalzemelerin özel tasarımlarını kullanarak EM dalgaların polarizasyon durumunu etkili bir şekilde değiştiren optik veya EM bileşenlerdir. Bu tür dönüştürücüler, geleneksel polarizasyon dönüştürücülerden farklı olarak metamalzemelerin benzersiz özelliklerinden yararlanır ve polarizasyon kontrolünü daha hassas hale getirir. Metamalzemeler, özellikle mikrodalga, THz ve optik frekansta çalışan cihazlarda, daha geniş bir bant genişliği sağlar.

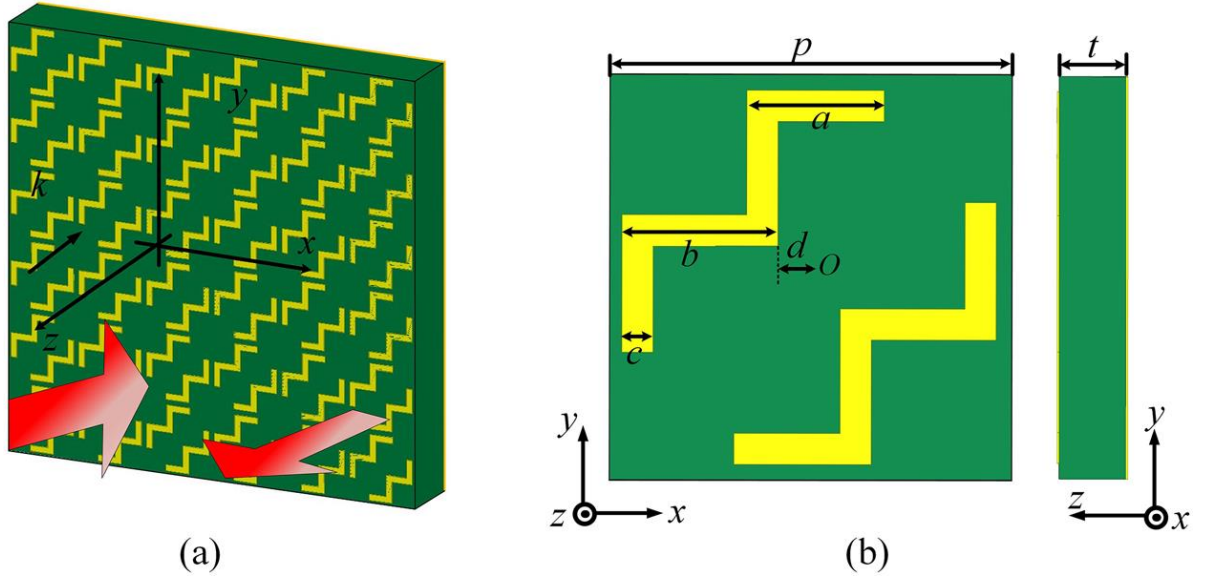
Metamalzemeler, genellikle daha geniş bir frekans aralığında çalışabildiğinden birçok farklı frekansta çalışan cihazlar için tasarlanabilirler. Metamalzemeli polarizasyon dönüştürücüler, EM dalgaların polarizasyon durumunu etkili bir şekilde değiştirebilirler. Örneğin, lineer polarize bir ışığı dairesel veya eliptik polarize dönüştürebilirler. Metamalzemeler, polarizasyon dönüştürme işlemi için optik olarak özelleştirilebilir. Metamalzemeler, geleneksel optik bileşenlere göre daha kompakt tasarlanabilirler. Bu, optik sistemlerin daha küçük ve hafif olmasına olanak tanır. Metamalzemeler, düşük kayıplarla çalışabilirler, bu da daha yüksek verimlilik sağlar.

Metamalzemeli polarizasyon dönüştürücüler, optik iletişim, görüntüleme, radar ve mikrodalga uygulamaları gibi birçok alanda kullanılır. Polarizasyon dönüşümünde geleneksel yöntemlerdeki dezavantajları ortadan kaldırmak için popülerlik kazanan metayüzey tabanlı polarizasyon dönüştürücüler uygulanabilmektedir. Bu dönüştürücüler, yansıma modunda veya iletim modunda, gelen EM dalganın polarizasyonunun kontrolünü sağlamaktalar (Mao *et al.* 2017).



Şekil 4. İletim modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün (a) 3 boyutlu görünümü, (b) ön yüzey görünümü, (c) orta yüzey görünümü, (d) arka yüzey görünümü (Khan *et al.* 2020).

İletim modu prensibine göre çalışan polarizasyon dönüştürücüler genellikle çok katmanlı yapılara sahiptir (Mao *et al.* 2017; Huang *et al.* 2020; Nguyen *et al.* 2021). Bu nedenle üretimleri maliyetli, zaman alıcı ve zordur (Mao *et al.* 2017). Öte yandan yansıma modunda çalışan polarizasyon dönüştürücüler, metal-dielektrik-metal yapı sayesinde tek katmanda gerçekleştirilebilmektedirler (Khan *et al.* 2020). Bu nedenle, EM dalganın polarizasyonunu manipüle ve kontrol etmekte yansıma modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün kullanımı iletim modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün kullanımından daha yaygındır.



Şekil 5. Yansıma modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün (a) 3 boyutlu görünüşü, (b) önden görünüşü, (c) yandan görünüşü (Zhao *et al.* 2019).

Metamalzeme Tasarımlarında Altının İletken Olarak Kullanılması

Altın, polarizasyon dönüştürücülerde özellikle optik ve THz frekansta çalışan cihazlarda sıklıkla kullanılan önemli ve değerli bir malzeme olup optik frekansta plazmonik etkileri destekleyen bir malzemedir. Plazmonlar, EM dalgalarla etkileşime girdiğinde yüzey plazmon rezonansları oluşturabilirler. Bu, altının optik özelliklerini özelleştirme ve EM dalgaların polarizasyonunu dönüştürme yeteneği sağlar.

Altın, yüksek iletkenliği nedeniyle polarizasyon dönüştürücülerde istenen polarizasyon değişikliklerini elde etmek için EM dalgaları etkili bir şekilde yönlendirebilir ve manipüle edebilir. Biyouyumluluğu ve kimyasal istikrarı nedeniyle biyomedikal uygulamalarda da kullanılabilir. Bu nedenle altını polarizasyon dönüştürücülerin biyomedikal cihazlarda kullanılması için çok uygun bir malzemedir. Altın, THz ve GHz aralığında yüksek performanslı polarizasyon dönüştürücülerin tasarımında iyi iletkenliği sebebiyle ($\sigma = 4.56 \times 10^7$ S/m) sıklıkla kullanılır.

Metamalzemede Rogers RT5880LZ

Rogers RT5880LZ, mikrodalga ve Radyo Frekans uygulamalarda kullanılan bir yüksek frekanslı PCB laminat malzemesidir. Bu malzeme, polarizasyon dönüştürücüler ve benzeri EM cihazların tasarımında kullanılmaktadır.

Rogers RT5880LZ, düşük dielektrik sabiti ($\epsilon_r = 2$) ve düşük kayıba ($\tan\delta = 0.0021$) sahip olduğundan empedans eşleme ve az kayıp avantajlarından dolayı polarizasyon dönüştürücülerin verimli çalışmasına katkı sağlar. Yüksek izolasyon özellikleri sunması polarizasyon dönüştürücülerin tasarımında önemlidir, çünkü istenmeyen sinyal karışımlarını

engellemeye yardımcı olur. Bu malzeme, mekanik dayanıklılığı ve termal kararlılığı nedeniyle cihazların çeşitli çevresel koşullara karşı dayanıklı olmasını sağlar. Rogers RT5880LZ ve benzeri yüksek frekanslı laminatlar, plakalar, levhalar veya film şeklinde kolayca kesilebilir ve şekillendirilebilir, bu da polarizasyon dönüştürücülerin tasarımında esneklik sağlar.

Vanadyum Dioksit (VO₂)

VO₂, polarizasyon dönüştürücüler ve benzer EM cihazların tasarımında kullanıldığında önemli avantajlar sunabilen bir malzemedir. Morin (1950'lerde) VO₂'yi keşfederek malzemenin temel olarak iki farklı kategoriye ayrıldığını bildirmiştir (Morin 1959). Bir grupta V_nO_{2n+1} formülüne denk VO₂ ve V₂O₅ ve diğer grupta V_nO_{2n-1} formülüne denk Magneli tipi olarak tanımlanan V₄O₇, V₅O₉, V₆O₁₁, V₇O₁₃ ve V₈O₁₅ fazları mevcuttur. Magneli tipinde, faz geçişi ile iletkenliğindeki değişim 10 katı olmakta iken VO₂'nin faz geçişi ile iletkenliğindeki değişim 10⁵ civarına kadar yükselmektedir. VO₂ faz geçiş sıcaklığı boyutuyla incelendiğinde, 68°C ile oda sıcaklığına daha yakındır. Dolayısıyla, VO₂ faz geçişiyle oluşan elektriksel ve optik özelliklerindeki keskin değişim ile teknolojik uygulamalar için daha fazla fırsat sağlamaktadır (Wu *et al.* 2013).

VO₂, elektriksel olarak uyarıldığında anlık olarak bir faz değişikliği gösterir. Bu özellik, elektrooptik etkileri kullanarak polarizasyon dönüştürücülerin tasarımını kolaylaştırır. Elektrik alan kontrolü ile polarizasyon durumu değiştirir. VO₂'nin elektrooptik tepki süresi çok hızlıdır ve nanosaniyeler içinde polarizasyon durumunu değiştirebilir. Bu hızlı tepki süresi, cihazların hızlı çalışmasını sağlar. THz frekansından kızılötesi frekansa kadar geniş bir bant aralığında etkili çalışabilir. VO₂'nin metalik ve yalıtkan fazları arasındaki geçiş, sıcaklık değişimine hassastır. Bu özellik, termal olarak uyarıldığında polarizasyon dönüşümünü sağlamak için kullanılabilir. Sıcaklık kontrolüyle cihazın çalışma performansı kolayca ayarlanabilir. VO₂'nin ince film veya nano yapıları, cihazların kompakt tasarımını ve diğer bileşenlerle entegrasyonunu kolaylaştırır. Elektrooptik özellikleri, optik iletişim, termal görüntüleme, mikrodalga ve THz cihazları, hızlı anahtarlar ve polarizasyon dönüştürücüler gibi birçok uygulama alanında kullanılmasını sağlar. VO₂, düşük optik kayıplara sahiptir, bu da EM sinyallerin zayıflatılmasını en aza indirir ve cihazların verimliliğini artırır.

VO₂ polarizasyon dönüştürücüler ve EM cihazlar için çok yönlü bir malzemedir. Elektrooptik özellikleri, hızlı tepki süresi, geniş bant aralığı ve kolay entegrasyon yeteneği, VO₂'nin bu tür uygulamalarda kullanımını cazip kılar. VO₂, polarizasyon dönüştürücülerin tasarımında esneklik sağlar ve birçok farklı frekansta çalışan cihazların gereksinimlerini karşılayabilir. VO₂, vanadyum ve oksijen elementlerinin bir bileşiğidir ve ilginç bir özelliğe sahiptir. VO₂, belirli bir sıcaklık eşiğini geçtiğinde metalik özelliklerden yarıiletken özelliklere

dönüşen bir malzemedir. Bu geçiş, yaklaşık 68°C (154°F) sıcaklıkta gerçekleşir. Bu özellik, EM alanlarda kullanımı açısından önemlidir.

VO₂'nin bu özellikleri, özellikle mikrodalga teknolojisi ve optik cihazlar gibi alanlarda kullanılmasını sağlar. VO₂, belirli bir sıcaklıkta geçiş yaptığından, EM radyasyonu emme kabiliyeti artar. Bu nedenle, VO₂ tabanlı malzemeler, EM radyasyona karşı etkili kalkanlar oluşturmak için kullanılabilir. VO₂'nin optik özellikleri sıcaklıkla değiştiğinden, optik anahtarlar ve modülatörler için kullanılabilir. Bu, optik sinyallerin kontrol edilmesine ve yönlendirilmesine olanak tanır. VO₂'nin ısıya tepkisi, enerji verimliliğini artırmak için ısı yönetimi uygulamalarında kullanılabilir. Örneğin, binalarda akıllı camların geliştirilmesi için kullanılabilir.

Yüksek kalitede fotoelektrik fonksiyonel bir malzeme olarak VO₂ ise benzersiz bir yalıtkan ve metal oksittir. Isı, ışık veya stresin harici uygulanması ile yalıtkan fazdan iletken faza geçiş söz konusudur. VO₂ ince filmin iletkenliği ile değiştirilebilir faz geçişi picosaniyeler içerisinde tamamlanabilir (Fu *et al.* 2006; Choi *et al.* 2011). Faz geçiş sıcaklığı açısından ele alındığında, VO₂ 68°C ile oda sıcaklığına daha yakın ve teknolojinin uygulama alanı koşullarına daha uyumlu bir geçiş sıcaklığına sahip olup, faz geçişi ile meydana gelen elektriksel ve optik özelliklerindeki keskin değişim ile uygulamalar için daha çok imkân sunmaktadır (Wu *et al.* 2013).

THz polarizasyon dönüştürücü, VO₂ termal modülasyonunu gerçekleştirmek için de kullanılabilir. Lv *et al.* (2016) faz değişim malzemesi VO₂ kullanarak termal kontrollü meta malzeme elde etmek için yeni bir meta malzemeyi teorik olarak incelemiştir. Termal kontrollü malzeme ile ilgili olarak, VO₂ filmi yalıtkindan metale faz geçişi yeteneğine sahiptir (Lv *et al.* 2016). Faz geçişi yoluyla, VO₂'nin iletkenliği çeşitli sıcaklıklara bağlı olarak değişir. Başka bir deyişle, VO₂ tabanlı metamalzemeler, THz bandında güçlü ayarlanabilirlik avantajına sahiptir (Zheng *et al.* 2018; Qiu *et al.* 2022). Bu nedenle, polarizasyon dönüştürücü tasarımında VO₂'nin ayarlanabilir özelliklerinin kullanılması avantaj sağlamaktadır.

Terahertz Polarizasyon Dönüştürücüler

THz polarizasyon dönüştürücüleri, THz frekans aralığında EM dalgaların polarizasyonunu manipüle etmek veya dönüştürmek için kullanılan optik veya EM cihazlardır. Bu cihazlar, THz dalgalarının polarizasyon özelliklerini değiştirmek veya kontrol etmek amacıyla tasarlanır. THz dalgaları, EM spektrumun düşük frekanslı bir bölümünü temsil eder ve genellikle görünmez ışık ve mikrodalga aralığı arasında yer alır. THz dalgalarının polarizasyonu, dalga boyunun titreşim düzlemi boyunca nasıl hareket ettiğini tanımlar. THz

polarizasyon dönüştürücüleri, gelen THz dalgasının polarizasyonunu değiştirerek veya dönüştürerek çalışır. Örneğin, doğrusal polarizasyonu dairesel polarizasyona dönüştürebilir veya farklı bir polarizasyon açısı sağlayabilir. THz polarizasyon dönüştürücüleri uygulamaları THz görüntüleme, spektroskopi, iletişim sistemleri, malzeme karakterizasyonu ve güvenlik taraması gibi alanlar bulunur.

Polarizasyon dönüştürücü, EM dalgaların polarizasyonunu değiştiren bir optik veya EM cihazdır. Polarizasyon, bir dalga boyunun titreşim düzlemi boyunca nasıl hareket ettiğini tanımlar. Polarizasyon dönüştürücüler, bir polarizasyon tipinden (örneğin, doğrusal polarizasyon) başka bir tip (örneğin, dairesel polarizasyon) veya farklı bir polarizasyon açısı elde etmek için kullanılır. Bu tür cihazlar, optik iletişim, lazer teknolojileri, radar sistemleri ve mikrodalga cihazlar gibi birçok uygulamada kullanılır. Polarizasyon dönüştürücüler, EM dalga manipülasyonu gereken yerlerde önemli bir rol oynar.

Polarizasyon, elektrik alanının uzayda sabit bir noktada salınım şeklini temsil eden EM dalgaların temel bir özelliğidir (Fei *et al.* 2020; Ahmed *et al.* 2021; Nguyen *et al.* 2021; Hu *et al.* 2022). Polarizasyon ışını bölücüler, dalga plakaları ve antenler gibi polarizasyona duyarlı birçok uygulama ve cihazdaki temel rolü nedeniyle, EM dalgaların polarizasyonunu kontrol ve manipüle etmek için cihaz ve teknikler tasarlama araştırmacıların ilgi odağı olmuştur (Lin *et al.* 2020; Kamal *et al.* 2021; Li *et al.* 2021). EM dalgaların polarizasyonu, Faraday etkisi ve kristallerin optik aktivitesi gibi geleneksel teknikler kullanılarak manipüle edilebilir (Mei *et al.* 2017; Lin *et al.* 2020; Li *et al.* 2021; Nguyen *et al.* 2021). Çift kırınımlı kristal, doğrusal bileşenin fazını diğer ortogonal bileşene göre geciktirerek EM dalganın polarizasyonunu manipüle eder (Mei *et al.* 2017; Lin *et al.* 2020; Kamal *et al.* 2021). Kristalin çıkışında ölçülen bir bileşenin fazı, diğer ortogonal bileşene göre 90° 'nin tek katları kadar geciktirilirse, doğrusal olarak polarize bir dalga, dairesel veya eliptik olarak polarize dalgaya dönüştürülür (Xu *et al.* 2022). Öte yandan, iki ortogonal bileşenin büyüklüğü aynı ve faz farkı 90° ise, dalga dairesel polarize olur. İki ortogonal bileşenin büyüklüğü aynı değilse ve faz farkı 90° veya büyüklük aynıysa ancak faz farkı 90° veya 180° değilse, dalga eliptik polarize olur. Benzer şekilde, eğer çift kırınımlı kristalin faz gecikmesi 180° ise, lineer polarize bir dalga, ortogonal lineer polarize dalgaya dönüşür. Belirli bir faz gecikmesi olması için, kristalin belirli bir kalınlığa ($d = \Delta\Phi\lambda/2\pi$) sahip olması gerekir, burada d kristalin kalınlığıdır, $\Delta\Phi$ faz farkıdır ve λ dalga boyudur. Bu durum, büyük dalga boylarında polarizasyonu manipüle etmek için çok kalın veya hacimli kristallerin gerekli olduğu anlamına gelir. Örnek olarak, yatay polarize bir dalgayı dikey polarize hale dönüştürmek için kristalin kalınlığı, $\lambda/2$ olmalıdır (Khan 2018). Hacimli boyutların yanı sıra, geleneksel teknikler çok dar banda sahiptir ve sadece belirli dalga

boyarında polarizasyon dönüşümü sağlar (Zhao and Cheng 2016). Ayrıca, geleneksel teknikler yoluyla polarizasyon manipülasyonu, gelen dalganın geliş açısına bağımlıdır (Khan *et al.* 2020; Couto *et al.* 2021). Bir başka deyişle, geleneksel tekniklerin kullanımı ile polarizasyon dönüşümünde geliş açısı arttığında polarizasyon dönüştürme oranının veriminde azalma olur (Xu *et al.* 2018). Bu nedenle, büyük hacim, dar bant genişliği ve geliş açısına bağımlılık, geleneksel teknikleri modern minyatür polarize kontrol cihazlarıyla uyumsuz hale getirir (Gao *et al.* 2015; Xu *et al.* 2018; Khan *et al.* 2019; Lin *et al.* 2020; Li *et al.* 2021; Nguyen *et al.* 2021). Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için bilim adamları, EM dalgaların polarizasyonunu manipüle eden metamalzemeler ve metayüzeyler adı verilen yapay yapılar geliştirdiler.

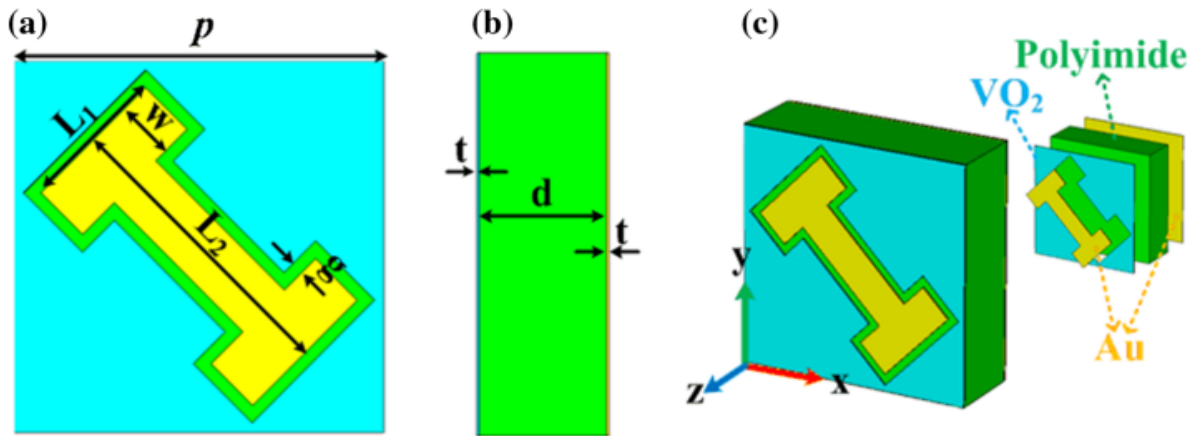
Xiao *et al.* tasarladıkları polarizasyon dönüştürücüde, bir hibrit katman, Au film ve dielektrik bir aralıktan oluşur. Au Metalik malzeme, Drude modeli ile ele alındığında THz spektral bölgesindeki metallerin etkili permittivitesi (elektriksel geçirgenliği) aşağıdaki denklem (2) ile verilir (Xiao *et al.* 2017):

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)} \quad (2)$$

ω_p Plazma Frekansını temsil eder, ω_c ise Çarpışma Frekansını temsil eder. Au için, Drude modelinde kullanılan parametreler şu şekildedir (Xiao *et al.* 2017).

$$\omega_p = 2\pi \times 2175 \text{ THz} \quad (3)$$

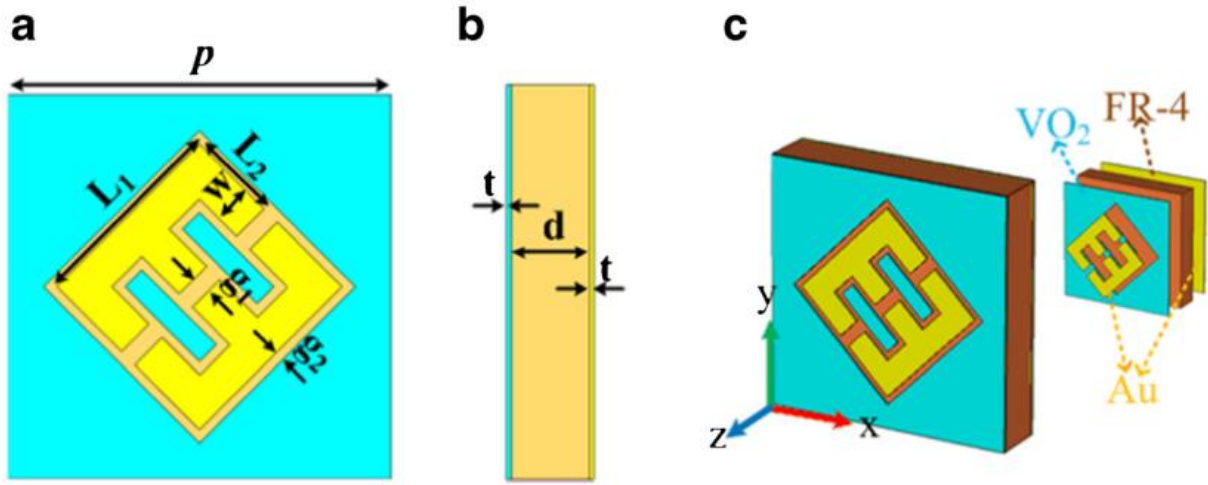
$$\omega_c = 2\pi \times 4.35 \text{ THz} \quad (4)$$



Şekil 6. Polyimide, VO₂ ve Au kullanılarak tasarlanan Polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin şematik diyagramı (Xiao *et al.* 2017).

$\varepsilon(\text{VO}_2)$ 12 alınarak Şekil 6'da Au, VO₂ ve Polyimide kullanılarak oluşturulan model ile Bruggeman etkili modeli ile VO₂'nin dielektrik iletim sabiti 9 olarak alınmış hem doğrusal hem

daireesel polarizasyon dönüşümü 2,10-5,03 THz aralığında %90 ve üzeri polarizasyon dönüşünü sağlayan model oluşturmuştur. Oluşturdukları modelin bant genişliği 2,93 THz, göreceli bant genişliği %82,19 ve modelin kalınlığı 10,4 μm 'dir (Xiao *et al.* 2017).



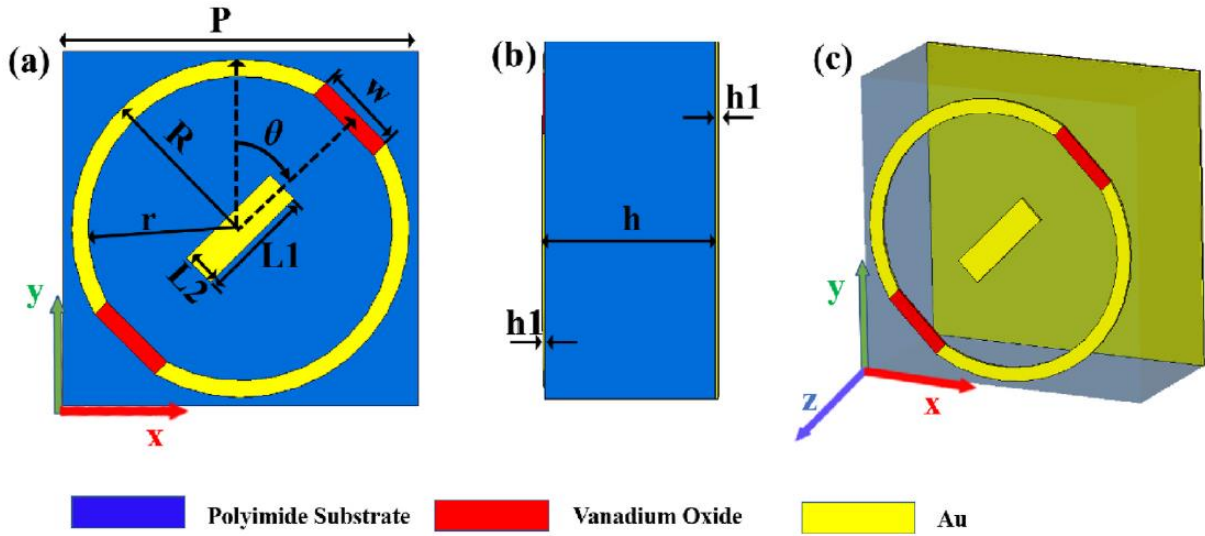
Şekil 7. Fr-4, VO₂ ve Au kullanılarak tasarlanan Polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin şematik diyagramı (Zheng *et al.* 2018).

Zheng *et al.* (2018) Şekil 7'de Au, VO₂ ve FR-4 kullanılarak oluşturulan model ile Bruggeman etkili modeli ile VO₂'nin dielektrik iletim sabiti 9 olarak alınmış 4,95-9,39 THz aralığında %90 ve üzeri polarizasyon dönüşünü sağlayan model oluşturmuştur. Oluşturdukları modelin bant genişliği 4,44 THz, göreceli bant genişliği %61,92 ve modelin kalınlığı 4,42 μm (Zheng *et al.* 2018).

Bruggeman etkili model (Bruggeman Effective Model), karmaşık malzeme karışımlarının dielektrik özelliklerini hesaplamak için kullanılan bir teorik modeldir. Bu model, özellikle homojen olmayan malzeme karışımlarının dielektrik sabitlerini tahmin etmek için kullanılır. Bruggeman etkili model, birçok farklı malzeme karışımının dielektrik davranışını açıklamak için kullanılabilir, ancak en yaygın olarak kompozit malzemelerin dielektrik sabitlerini tahmin etmek için kullanılır. Bruggeman etkili model, matematiksel olarak karmaşık bir denkleme dayanır ve farklı fazların oranlarına ve özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Bu model, maddenin EM davranışını anlamak, malzeme tasarımı ve simülasyonlar için önemli bir araçtır. Denklem (9) ile bir malzeme karışımının etkili dielektrik sabitini hesaplamak için kullanılır (Yu *et al.* 2022).

Yu *et al.* (2022) Şekil 8 (c)'de tasvir edilen metayüzey cihazının tam ünite hücresi, üst kritik rezonant bileşenlerin eğik kesilmiş teller ve VO₂ ile doldurulmuş bölünmüş metal daire halkaları tarafından değiştirildiğini gösterir. Bu bileşenler y eksenini etrafında 45° döndürülmüşlerdir. Ardından, göreceli dielektrik sabiti 3,5 olan polyimide substrate ve ardışık olarak metal yansıtıcı düzlem gelir. Au metal malzemenin tamamı Drude modeli ile hesaplanan

denklem (5) ve denklem (6) aynı altın malzemeden yapılmıştır. En üst bileşik yansıtıcı rezonatörlerden biri olan VO₂ yapısının özellikleri denklem (7) Bruggeman etkili modeli ile ifade edilebilir (Yu *et al.* 2022).



Şekil 8. VO₂ Kullanılarak Yu *et al.* tasarladıkları metamalzeme (Yu *et al.* 2022).

$$\omega_p = 2\pi \times 2175 \text{ THz} \quad (5)$$

$$\omega_c = 2\pi \times 4.35 \text{ THz} \quad (6)$$

$$\varepsilon(\text{VO}_2) = \frac{1}{4} \left\{ \varepsilon_d(2 - 3V) + \varepsilon_m(3V - 1) + \sqrt{[\varepsilon_d(2 - 3V) + \varepsilon_m(3V - 1)]^2 + 8\varepsilon_d\varepsilon_m} \right\} \quad (7)$$

Burada ε_d ve ε_m , sırasıyla yalıtım ve metalik fazın dielektrik sabitlerini karakterize eder ve V, metalik bileşenin hacim kesrini gösterir. Dolayısıyla, VO₂'nin dielektrik sabiti $\varepsilon(\text{VO}_2)$, denklem (7) aracılığıyla istenilen şekilde elde edilebilir. Fu *et al.* (2022) simülasyonunda, VO₂'nin göreceli permittivitesi 9 olarak alınmış bu sırada iletkenlik yaklaşık olarak 25 °C sıcaklıkta 200 S/m olarak kabul edilmiştir (Xiao *et al.* 2017; Zheng *et al.* 2018; Yang *et al.* 2018). Şekil 8 (a) ve (b)'de işaretlenen ilgili diğer parametreler ve Tablo 1'de verilen tüm tasarımlar, frekans alanı çözücüsüne dayalı olarak Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio ile simüle edilebilir ve bu simülasyonlarda, sonsuz iki boyutlu diziyi analoji yapmak için periyodik sınır koşulları uygulanır ve mükemmel emici tabakayı taklit etmek için genellikle Z yönünde açık sınır kullanılır (Yu *et al.* 2022). Xiao *et al.* (2017) Au, VO₂ ve Polyimide kullanılarak oluşturulan model ile Bruggeman etkili modeli ile VO₂'nin dielektrik iletim sabiti 9 olarak alınmış yansıma modunda çapraz polarizasyon dönüşümü 2,03-5 THz aralığında %90 ve üzeri polarizasyon dönüşümünü sağlayan model oluşturmuştur (Yu *et al.* 2022). Oluşturdukları modelin bant genişliği 2,97 THz, göreceli bant genişliği %84,5 ve modelin kalınlığı 10,4 μm (Yu *et al.* 2022).

Tablo 1. Fu-yuan *et al.* Oluşturduğu Modelin Parametreleri (Yu *et al.* 2022)

Dimension Parameter	R	L1	L2	P	r	w	h	h1
Value(μm)	10	12	2	21	9	5	10	0,2

Frekansa bağlı VO₂'nin dielektrik sabitini Drude modeli ile açıklamak gerekirse,

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{(\infty)} - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{(\infty)} = 12 \quad (9)$$

$$\gamma = 5,75 \times 10^{13} \text{ rad/s} \quad (10)$$

$$\omega_p^2(\sigma) = \frac{(\sigma)}{(\sigma_0)} \omega_p^2(\sigma_0) \quad (11)$$

$$\sigma_0 = 3 \times 10^5 \text{ S/m} \quad (12)$$

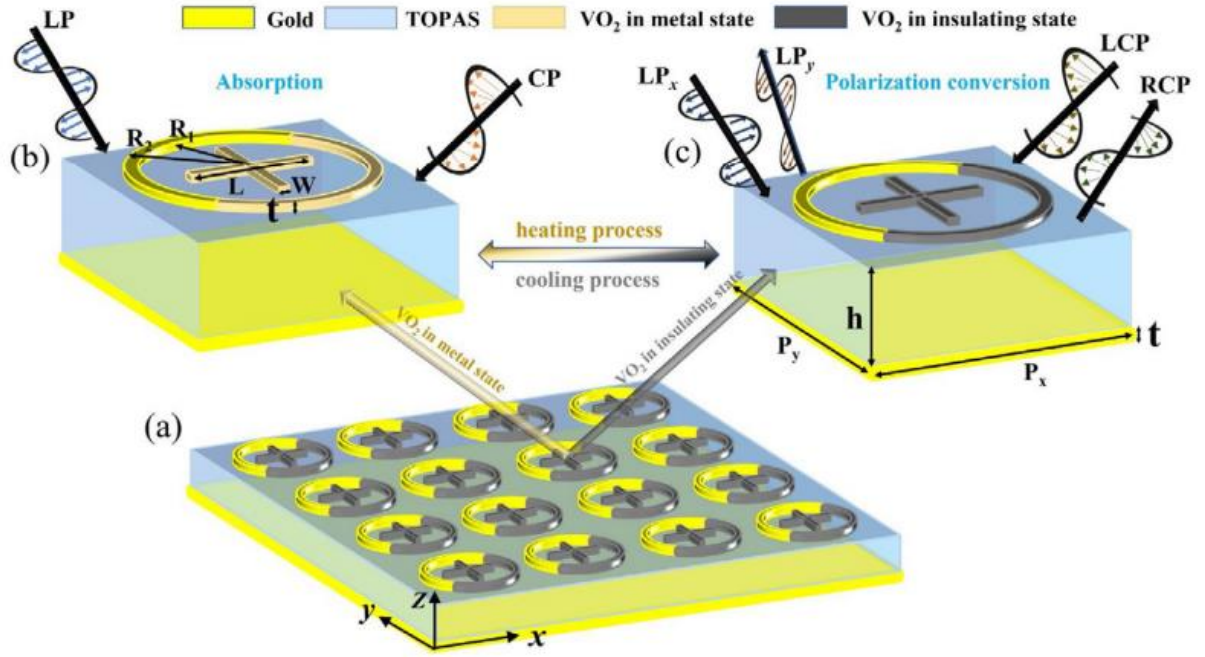
$$\omega_p(\sigma_0) = 1,40 \times 10^{15} \text{ rad/s} \quad (13)$$

Genel olarak THz bölgesinde VO₂'nin geçirgenliği Drude modeliyle denklem (8) ile tanımlanabilir. Denklem (8)'da ω olay açısı frekansını, eşitlik (9) yüksek frekansta dielektrik sabitini, eşitlik (10) çarpışma frekansını, σ VO₂'nin iletkenliğini ve $\omega_p(\sigma_0)$ plazma frekansını ifade eder. VO₂'nin iletkenliği ile plazma frekansı arasındaki ilişki denklem (11) ile ifade edilebilir. Denklem (11)'de σ_0 eşitlik (12)'de, $\omega_p(\sigma_0)$ ise eşitlik (13)'te verilmiştir. VO₂'nin faz geçiş süreci elektriksel iletkenliğinde önemli bir değişikliğe yol açacaktır. Simülasyon süreci, VO₂'nin metal fazda (yalıtkan faz) olduğunu varsayar ve iletkenliği $3 \times 10^5 \text{ S/m}$ 'dir (Niu *et al.* 2023).

Yüksek frekansta, $\varepsilon_{(\infty)}$ malzemenin maksimum polarizasyon tepkisine ulaştığı ve artık elektrik alanından etkilenmediği değeri temsil eder. VO₂'nin farklı ısıtma sıcaklıklarındaki iletkenliği kısmen Tablo 2'de gösterilmiştir. VO₂ iletkenliğinin ayarlanması, sıcaklık, harici elektrik alan ve pompalama ışığı ile uygulanabilir. Elektriksel ve optik uyarım, VO₂'nin faz geçişini hızlı ve kesin bir şekilde tetikleyebilir. Termal modülasyon için 25°C ile 120°C arasında sıcaklık aralığını ayarlayabilen ısıtıcı levhası ile başarılabılır. Açıkça görüldüğü gibi, termal modülasyon nispeten kolay bir şekilde uygulanabilir (Zhang *et al.* 2023).

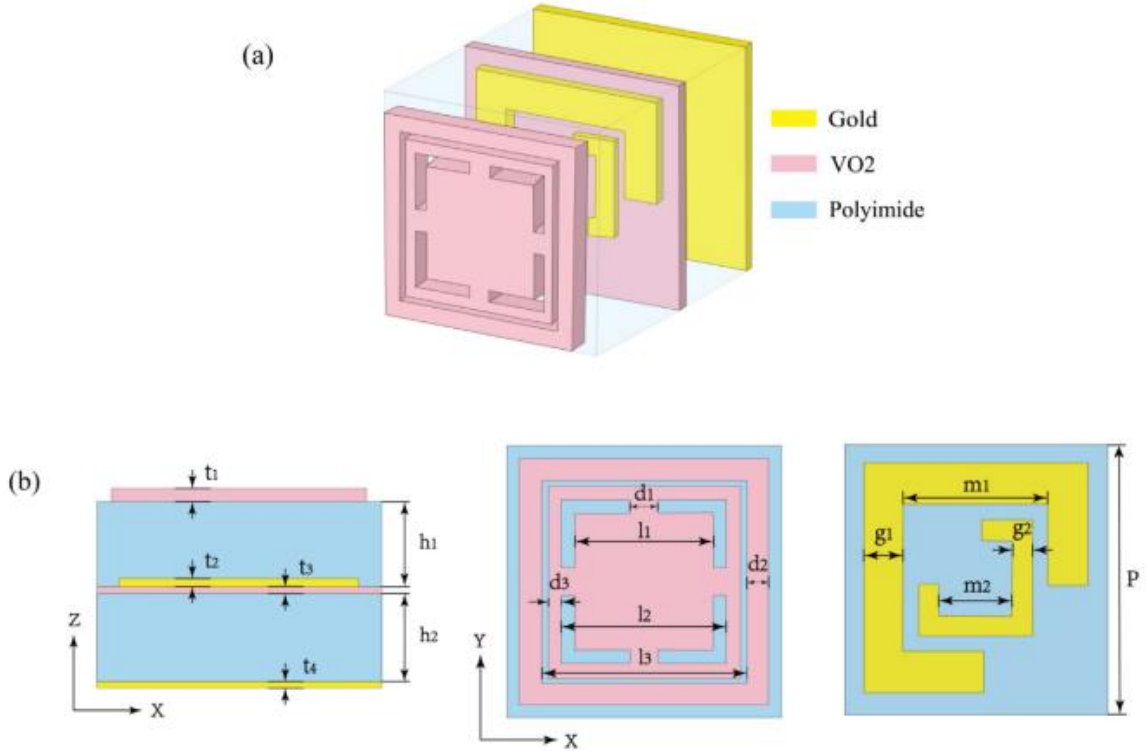
Tablo 2. Farklı Sıcaklıklarında VO₂'nin İletkenliği (Zhang *et al.* 2023)

Temperature/°C	35	60	67	69	80
Conductivity/(S/m)	200	820	21700	158000	212000



Şekil 9. Polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin şematik diyagramı (Zhang *et al.* 2023).

Zhang *et al.* (2023) Şekil 9’da Au, Topas ve VO₂, oluşturulan model ile Drude modeli ile VO₂’nin dielektrik iletim sabiti 12 olarak alınmış 2,9-8,4 THz aralığından %90 ve üzeri polarizasyon dönüşünü sağlayan model oluşturmuştur. Oluşturdukları modelin bant genişliği 5,5 THz, göreceli bant genişliği %97,35 ve modelin kalınlığı 18,9 μm ’dir (Zhang *et al.* 2023).



Şekil 10. Polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin şematik diyagramı (Niu *et al.* 2023).

Niu *et al.* (2023) Şekil 10’da Au, Polyimide ve VO₂ oluşturulan model ile Drude modeli ile VO₂’nin dielektrik iletim sabiti 12 olarak alınmış 2,54-4,55 THz aralığından %90 ve üzeri

polarizasyon dönüşünü sağlayan model oluşturmuştur. Oluşturdukları modelin bant genişliği 2,01 THz, göreceli bant genişliği %56,70 ve modelin kalınlığı 8,84 μm 'dir (Niu *et al.* 2023).

Literatürde metamalzemelere dayalı farklı THz soğurucular ve polarizasyon dönüştürücüler olmasına rağmen, bu tasarımlar benzer işlevler sağlamaktadır. Zheng *et al.* (2018), oluşturdukları modelde VO₂ meta malzeme yapısına dayalı 4,95-9,39 THz'den %90'ın üzerinde bir geniş bant polarizasyon dönüşüm oranının (PCR) elde edildiğini ve üç tepe noktasında %98,9'un üzerinde PCR'nin elde edilebileceğini göstermiştir. Liu *et al.* (2019) 1,2-3,2 THz frekans aralığında %5- %90 absorpsiyon modülasyonu elde edebilen VO₂'yi işleyerek geniş bant ayarlanabilir bir soğurucu önermiştir. Zheng *et al.* (2019) 8 ila 23 GHz arasında %90'ın üzerinde bir PCR ile fraktal yapıya dayalı bir yansıtıcı geniş bant polarizasyon dönüştürücü önermiştir. Zhu *et al.* (2020), VO₂ yalıtkan durumdayken 1,06-2,58 THz aralığında %90'a kadar soğurma ile grafen ve VO₂'ye dayalı değiştirilebilir bir geniş bant ve çok bant soğurucu tasarlamıştır. Qiu *et al.* (2022) oluşturdukları modelde VO₂ metamalzeme yapısına dayalı 2,17-4,94 THz frekans bandında soğurma oranının %90'ı aştığını ve bant genişliği oranının %77,8 olduğunu göstermiştir. Yu *et al.* (2022) oluşturdukları modelde VO₂ filmi ve yansıtıcı zemin katmanına doldurulmuş eğimli ayrı dairesel halkanın kombinasyonuna dayalı olarak, %90'ın üzerindeki yansıtıcı çapraz polarizasyon dönüşümünün geniş bant genişliği normalde yaklaşık 25°C sıcaklıkta 2,03-5 THz'den elde edildiğini tespit etmiştir.

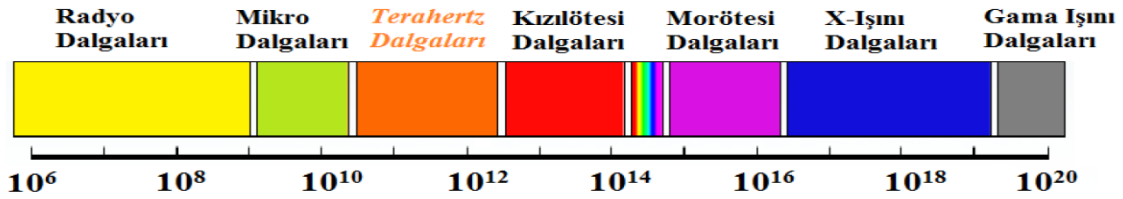
Bu tez çalışmasında metamalzeme tabanlı VO₂-Au bileşimi üst katman, orta katman Rogers RT5880LZ ve alttaş malzeme olarak Au kullanılarak THz bölgesinde tek katmanlı, yüksek verimli ve geniş band polarizasyon dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Literatür araştırmasında yaklaşık 2-7 THz aralığından polarizasyon dönüştürücülerin olduğu görülmüş olup, çalışma sonucu yaklaşık 8 THz band genişliğine sahip, ayarlanabilir, yüksek verimli bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modelle Bruggeman etkili modeli ve Drude modeli ile VO₂'nin dielektrik sabiti alınarak iki model arasında farklarda gösterilmektedir. Literatürde THz dalga boyunda VO₂ kullanılarak tasarlanan polarizasyon dönüştürücü metamalzemeler incelenerek, daha geniş banta sahip dinamik bir lineer metamalzeme polarizasyon dönüştürücü sunulmuştur. Uygun malzeme ve uygun boyutta malzeme kullanımı için CST Microvawe Studio ile çok fazla deneme bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş ve en uygun model ortaya çıkarılmıştır. Üst katman Au- VO₂ orta katman Rogers alt katman Au olarak belirli bir geometride oluşturulan metamalzemede Bruggemen etkili modeli ile VO₂'nin dielektrik iletim sabiti 9 olarak alınmış aynı zamanda Drude modeli ile VO₂'nin dielektrik iletim sabiti 12 olarak alınmış ve kıyaslaması yapılmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

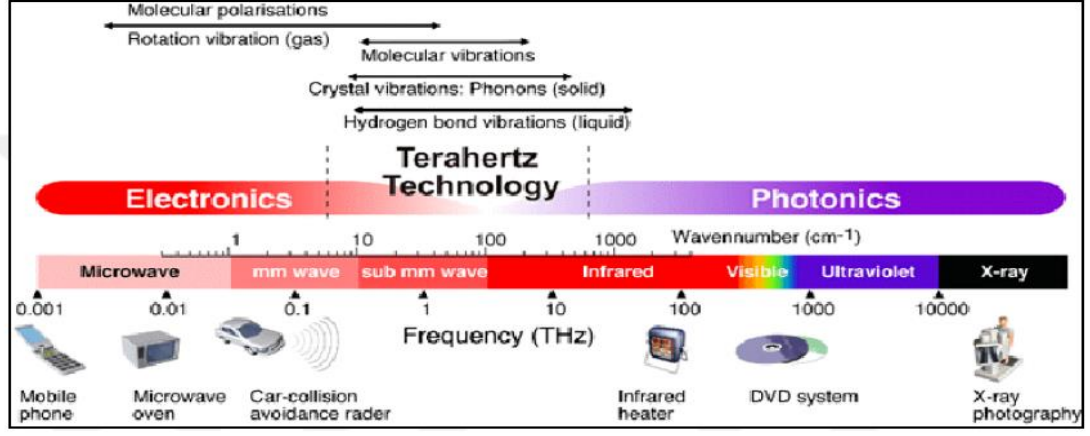
Bu bölümde EM dalgaların polarizasyon çeşitleri detaylı olarak incelenecektir. Polarizasyon dönüşümü hakkında temel bilgiler verilecektir.

EM spektrumu, “belirli bir nesne tarafından emilen ya da yayılan EM radyasyonun karakteristik dağılımı” şeklinde tanımlanır. Diğer bir ifadeyle, EM spektrum, EM radyasyonda gözlemlenen bütün frekansların bölgesidir. Bu bölgedeki üst-sınır, evrenin büyüklüğü ve kısa-boy sınırı Planck uzunluğu yakınında olması nedeniyle spektrum, sonsuz ve sürekli olarak kabul edilmektedir. EM dalgalar, frekans, dalga boyu ve foton enerjisi olmak üzere 3 farklı fiziksel özelliğe sahiptir. Foton enerjisiyle dalga frekansı arasında doğrudan bir orantı mevcuttur. Bu durum, gama ışınlarında en yüksek enerjinin ve radyo dalgalarında çok düşük enerjinin olmasına neden olur (Dobroiu *et al.* 2006).

EM radyasyon dalga boyuna göre; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi bölge, görünür bölge, ultraviyole bölge, X-ışınları ve gama ışınları şeklinde sınıflandırılır. THz radyasyonunun spektrumunda yer aldığı alan uzak kızılötesi ve mikrodalga arasında bir bölgededir. “300 GHz= 3×10^{11} Hz ile 3 THz= 3×10^{12} Hz frekans aralığındaki EM radyasyon” THz radyasyonu şeklinde tanımlanır (1 THz= 10^{12} Hz=1 ps, $\lambda=300$ m=0,3 mm). Mikrodalga bölgesiyle kızılötesi bölgesi arasındaki bu bölge, elektronikten optiğe geçiş bölgesidir ve EM spektrumunda kalan son bölge olarak kabul edilmiştir (Şekil 11 ve Şekil 12) (Ozyuzer *et al.* 2007; Fukunaga *et al.* 2009; Akkaş 2018).



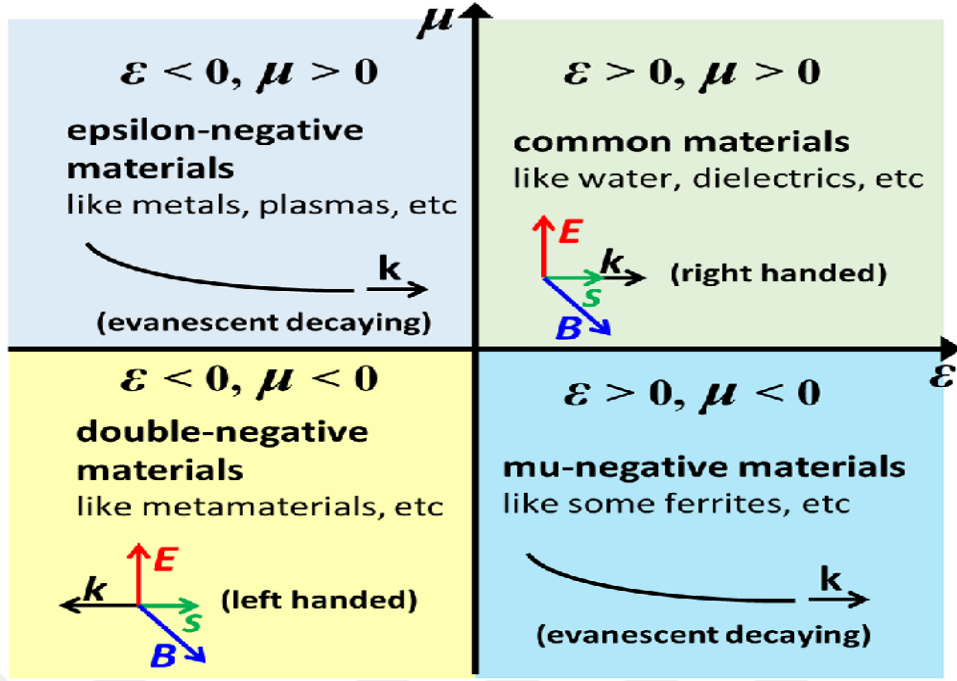
Şekil 11. THz dalgalarının EM Spektrumunda gösterilmesi (Akkaş 2018).



Şekil 12. THz boşluğuna sahip EM spektrum (Fukunaga *et al.* 2009).

EM spektrumu, “belirli bir nesne tarafından emilen ya da yayılan EM radyasyonun karakteristik dağılımı” şeklinde tanımlanır. Diğer bir ifadeyle, EM spektrum, EM radyasyonda gözlemlenen bütün frekansların bölgesidir. Bu bölgedeki üst-sınır, evrenin büyüklüğü ve kısa-boy sınırı Planck uzunluğu yakınında olması nedeniyle spektrum, sonsuz ve sürekli olarak kabul edilmektedir. EM dalgalar, frekans, dalga boyu ve foton enerjisi olmak üzere 3 farklı fiziksel özelliğe sahiptir. Foton enerjisiyle dalga frekansı arasında doğrudan bir orantı mevcuttur. Bu durum, gama ışınlarında en yüksek enerjinin ve radyo dalgalarında çok düşük enerjinin olmasına neden olur (Dobroiu *et al.* 2006).

Permittivity (elektriksel geçirgenlik) ve permeability (manyetik geçirgenlik), malzemelerin elektrik, manyetik veya EM alanlardaki tepkisini tanımlayan iki temel fiziksel parametredir. Permittivity (elektriksel geçirgenlik) ve permeability (manyetik geçirgenlik) işaretine göre malzemeler, ortak malzemeler, çift negatif malzemeler, mu-negatif malzemeler ve epsilon-negatif malzemeler dahil olmak üzere dört çeyrekte sınıflandırılır (Şekil 13). Pozitif geçirgenliğe ve pozitif geçirgenliğe sahip yaygın malzemeler, gelen EM dalgalara karşı şeffaftır ve elektrik vektörü (E), manyetik vektör (B) ve dalga vektörü (k), sağ el kuralına karşılık gelir (Fan *et al.* 2021).



Şekil 13. Temel parametrelere göre (ϵ ve μ) malzemelerin sınıflandırılması (Fan *et al.* 2021).

Metamalzemelerin mikrodalga ile etkileşimleri temel olarak Maxwell denklemleri ile açıklanabilir. James Clerk Maxwell, elektrik, radyo ve optik teknolojiler için, güç üretimini, elektrik motorlarını, telekomünikasyonu, lensleri vb. kapsayan matematiksel model sundu. Bu denklemler herhangi bir ortamdaki EM dalgaları ve ışık-madde etkileşiminde kullanılmaktadır. Maxwell EM dalgalarının yayılma hızının ışık hızına eşit olduğu belirledi. Maxwell denklemleri zaman alanında şu şekilde ifade edilir (Mahmood 2020):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (14)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (16)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (17)$$

Burada $\vec{E}$ (V/m) ve $\vec{H}$ (A/m) sırasıyla elektrik ve manyetik alan yoğunlukları olup $\vec{D}$ (C/m²) ve $\vec{B}$ (W/m²) sırasıyla elektrik ve manyetik akı yoğunluklarıdır. ρ_v (C/m³) ise elektrik yükü yoğunluğudur.

Metamalzemeler, doğal malzemelerde bulunmayan üstün EM özelliklere sahip yapay yapılardır (Mei *et al.* 2017; Xu *et al.* 2018; Li *et al.* 2018; Salman *et al.* 2020; Phan *et al.* 2021). Bu malzemeler, negatif kırılma indisidir ve negatif ϵ ve μ değerine sahiptir; bu nedenle

metamalzemelere negatif kırılma indisli malzemeler de denir. Saçılma matrisinin katsayılarını saçılma (S) parametreleri oluşturmaktadır. EM parametreler, maddenin EM dalgalarla etkileşimini belirler. Şekil 13'te malzemelerin EM özelliklerine göre sınıflandırılmasını gösterir. Şekil 13'te görüleceği üzere bir malzeme $\varepsilon > 0$ ve $\mu > 0$ ise çift pozitif (DPS), $\varepsilon < 0$ ve $\mu > 0$ ise epsilon negatif (ENG), $\varepsilon > 0$ ve $\mu < 0$ ise μ negatif (MNG) ve $\varepsilon < 0$ ve $\mu < 0$ ise çift negatif (DNG) olarak sınıflandırılır. Dispersiyon denkleminde ε ve μ değerleri, monokromatik dalganın frekansı (ω) ve dalga vektörü (K) arasındaki ilişkiyi belirleyen malzemenin izotropik bir ortam için, denklem aşağıdaki gibidir (Mahmood 2020).

$$K = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} n^2} \quad (18)$$

Burada $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$, ışığın boş uzaydaki hızını tanımlar ve n , malzemenin kırılma indisidir. Kırılma indisi ve yapısal parametreler arasındaki ilişki aşağıdaki denklemdeki gibidir (Asim 2017; Mahmood 2020).

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu} \quad (19)$$

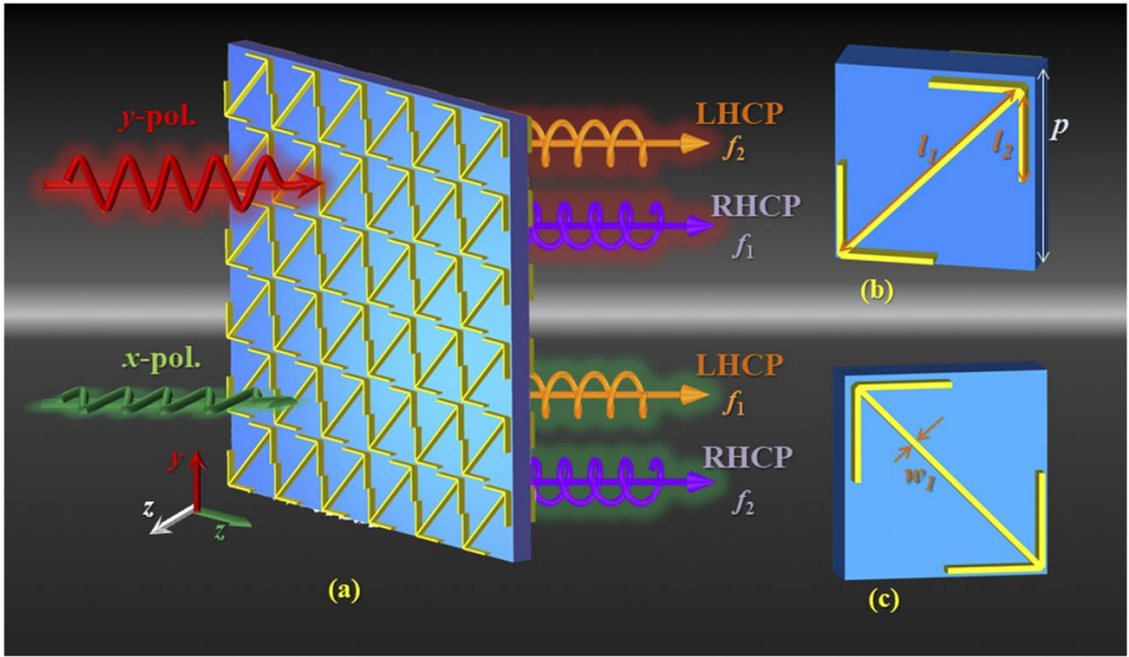
Kayıpsız bir malzeme için ε ve μ reel sayılar olarak kabul edilir ve malzemenin kırılma indisi reel sayıdır. Temel parametreler, dielektrik malzemeler ve EM dalgaların etkileşimi hakkında önemli bilgi verir (Asim 2017; Mahmood 2020).

$$D = \varepsilon_0 E + P_e = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) E = \varepsilon E \quad (20)$$

Burada P_e elektrik polarizasyonu temsil eder ve χ_e dielektrik malzeme için elektrik duyarlılığıdır ve $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0(1 + \chi_e)$ şeklinde ifade edilir (Mahmood 2020).

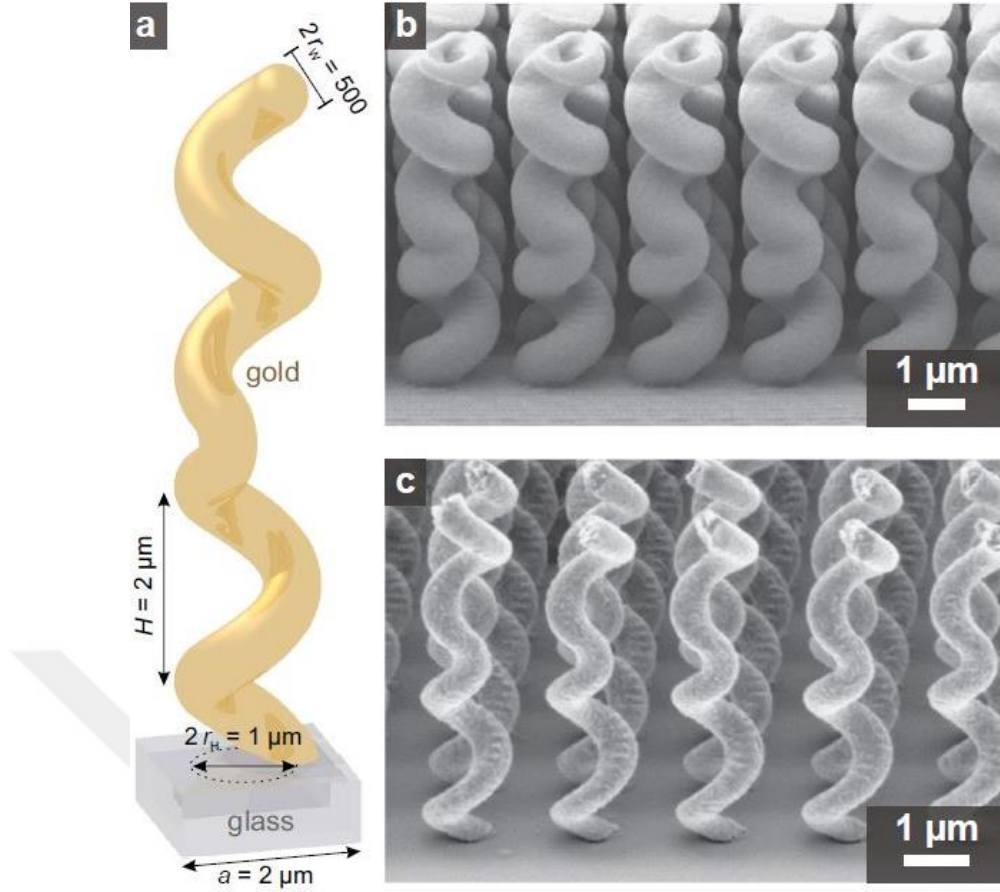
$$B = \mu_0 (H + P_m) = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu H \quad (21)$$

Yukarıdaki denklemde P_m manyetizasyonu veya manyetik polarizasyonu tanımlar ve χ_m manyetik malzeme için manyetik duyarlılıktır. Ayrıca, $\mu = \mu' - j\mu'' = \mu_0(1 + \chi_m)$, $\varepsilon' = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ve $\mu' = \mu_0 \mu_r$ şeklinde ifade edilir.



Şekil 14. (a) 2 boyutlu metayüzeyin 3 boyutlu görünümü, (b) birim hücrenin ön yüzeyinin görünümü, (c) birim hücrenin arka yüzeyinin görünümü (Han *et al.* 2020).

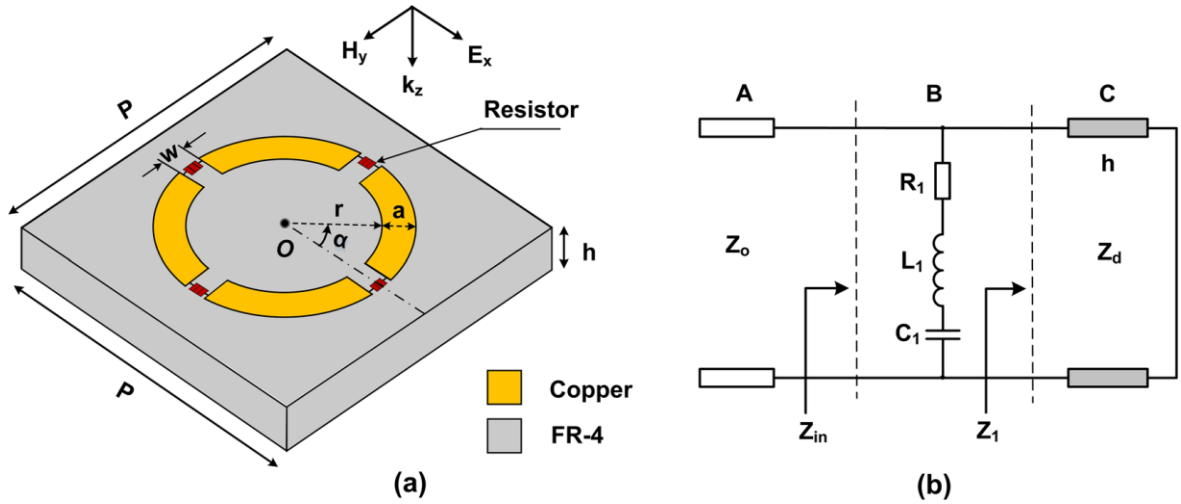
Meta-yapılar geliştikten sonra, mikrodalga frekans rejiminde negatif ϵ ve μ yapılar keşfedilmiş ve daha sonra bu yapıların negatif kırılma indisinden kaynaklanan olağanüstü EM özelliklerinden yararlanmak için kullanılmıştır. Metamalzemeler, Şekil 14'teki gibi basit iki boyutlu düzlemsel veya Şekil 15'teki gibi karmaşık üç boyutlu yapı ile EM dalgayı kontrol ve manipüle edebilir (Kaschke *et al.* 2015). Metamalzemelerin negatif kırılma indisi, negatif kırılma, negatif Doppler etkisi, Cherenkov radyasyonunun tersine çevrilmesi, mükemmel merceklemeye, EM gizleme vb. gibi olağandışı EM özelliklere sahiptir (Khan 2018). Bu olağanüstü özelliklerin yanı sıra, metamalzemeler EM soğurucular, polarizasyon dönüştürücüler, antenler, manyetik rezonans görüntüleme ve sensörler gibi daha önce geleneksel malzemelerin kullanıldığı uygulamalarda da kullanılmaktadır.



Şekil 15. Üç boyutlu metayüzeyin: (a) perspektif görünüşü, (b,c) SEM görüntüsü (Kaschke *et al.* 2015).

Metayüzeyler, metalmalzemelerin iki boyutlu eşdeğeri olarak kabul edilebilir. Metayüzeyler, levha empedansı ve sınır koşulları ile karakterize edilir. Ayrıca, metalmalzemelerin 3 boyutlu geometrisi nedeniyle mikro ve nano düzeyde üretilmesi zordur. Öte yandan, metayüzeylerin düzlemsel alt tabakalar üzerine periyodik yapıların modellenmesi yoluyla üretilmesi daha kolaydır (Wu *et al.* 2017; Gao *et al.* 2018; Leitis *et al.* 2021; Xu *et al.* 2022). Metayüzeyler tek veya çok katmanlı olabilir, ancak toplam kalınlık çalışma dalga boyundan çok daha küçük olmalıdır (Kamal *et al.* 2021). Metayüzeyler, yayılma yönünde düşük kayıplıdır. Düzlemsel yapılarına rağmen, metayüzeylerin EM dalgalarla etkileşimi, yararlı işlevsellikler sağlayacak şekilde oldukça güçlüdür.

Son on yılda, metayüzeylerin analizi ve tasarımı için teorik olarak önemli ilerleme kaydedilmiştir. Metayüzeylerin analizi ve tasarımında iletim hattı teorisine göre direnç, kapasitans ve endüktans kombinasyonunun olduğu eşdeğer devre modellemesi mevcuttur. Şekil 16'da literatürdeki metayüzeyin eş değer devre modellemesi görülmektedir (Nguyen *et al.* 2020).



Şekil 16. Önerilen metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünüşü, (b) eşdeğer devresi (Nguyen *et al.* 2020).

Metayüzeyler, yansıyan ve iletilen dalgaların genliğini, fazını ve polarizasyonunu kontrol edebilen birim hücre tasarımıyla üretilebilir (Sun *et al.* 2017; Khan *et al.* 2019; Kamal *et al.* 2021). Birim hücre içindeki optik saçıcıların izotropik özelliği ile etkileşen EM dalgayı yansıma veya iletim modunda istenen yönlere saptırılabilir. Bu nedenle, araştırmacılar çarpan dalgaların anormal yansımasını, iletim ve aynasal yansımalarını tamamen ortadan kaldıran yansıma-dizi metayüzeyleri geliştirdiler (Zheng *et al.* 2015). Anormal yansımanın yönü, genelleştirilmiş Snell yasasından bulunabilir. Konvansiyonel Snell yasası, iki farklı izotropik ortam arasındaki ara yüzden geçerken EM dalgaların geliş açısını ve kırılmasını ilişkilendirmede kullanılır (Yu *et al.* 2013; Michel *et al.* 2021). Deneysel olarak, geliş ve kırılma açısı yardımıyla herhangi bir malzemenin kırılma indisi belirlenebilir. Genelleştirilmiş Snell yasası, iki ortam arasındaki ara yüzde ani faz kaymasını sağlayan geleneksel Snell yasasının gelişmiş veya değiştirilmiş bir şeklidir. Fermat ilkesi, A ve B noktaları arasındaki bir ışık ışını tarafından seçilen yörüngenin en kısa sürede geçilebilecek yörünge olduğunu belirtir. Ani faz değişimi $\phi(\mathbf{r})$, alt dalga boyu optik saçıcılarla ara yüzü tasarlayarak yayılan ışık yolu boyunca tahmin edilebilir. Bu durumda, toplam faz, aşağıdaki denklemde açıklandığı gibi yayılma ve ani faz kaymasının toplamı olacaktır (Mahmood 2020):

$$\phi_t = \int_A^B \mathbf{K} d\mathbf{r} + \phi(\mathbf{r}) \quad (22)$$

Burada $\mathbf{K}$ EM dalgaının dalga vektörü, $\phi(\mathbf{r}_s)$ iki ortam arasındaki sınır boyunca koordinatların bir fonksiyonu olan ani faz kaymasıdır. Şekil 17’de görüldüğü üzere, yapının yüzey normaline göre θ_i geliş açısında arayüze çarpan bir düzlem dalgasını ele alalım ve iki optik yolun ışık yörüngesine sonsuz derecede yakın olduğunu varsayalım. Fermat ilkesine göre,

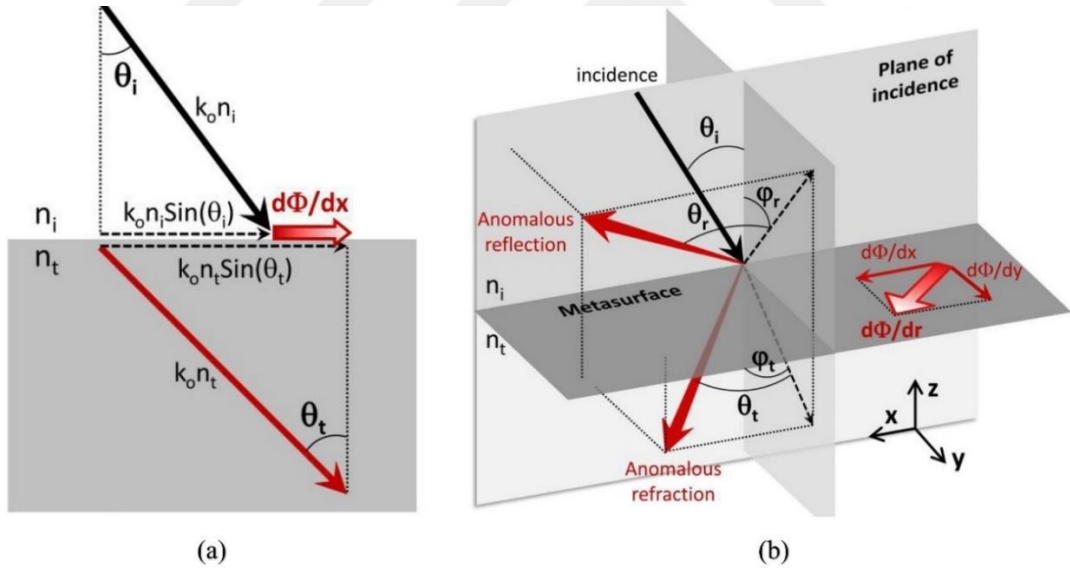
bu iki yol arasındaki fazın türevi sıfırdır ve matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir (Mahmood 2020):

$$K_0 n_i \sin(\theta_i) dx + (\phi + d\phi) - [k_0 n_t \sin(\theta_t) dx + \phi] = 0 \quad (23)$$

K_0 boş uzay dalga boyu ile ilgili boş uzay dalga sayısı olduğunda, ϕ arayüz boyunca koordinatların bir devamı olarak tanımlanan herhangi bir noktadaki sabit faz, $d\phi$ x eksenini boyunca artan faz, dx iki yakın ışık demetinin kesişme noktaları ile arasındaki mesafe n_i ve n_t ortamların kırılma indisleridir. Sınır boyunca sabit faz gradyanı kabul edildiğinde, denklem (24-25) olarak yazılabilen genelleştirilmiş Snell yasası yansıma ve kırılmasına yol açar (Mahmood 2020):

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{d\phi}{dx} \frac{1}{K_0 n_i} \quad (24)$$

$$n_t \sin(\theta_t) - n_i \sin(\theta_i) = \frac{d\phi}{dx} \frac{1}{k_0} \quad (25)$$



Şekil 17. Genelleştirilmiş Snell kırılma yasasının şematik gösterimi (Yu *et al.* 2013).

Bu denklemlere göre, sabit faz gradyanının ($d\phi/dx$) ne kadar doğru tasarlandığına bağlı olarak, kırınımlı ışığın hangi yayılma yönünde olabileceği belirlenir. Son olarak, toplam iç yansıma için kritik açı aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanır (Yu *et al.* 2013).

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\pm \frac{n_t}{n_i} - \frac{d\phi}{dx} \frac{1}{K_0 n_i} \right) \quad (26)$$

Bununla birlikte, optik rezonatörlerin uygun tasarlanmasıyla kırılan ışığın sabit genliği ve sabit faz değişimi elde edilebilir. Yukarıdaki açıklamalardan, genelleştirilmiş Snell yasasına

göre, sonsuz derecede yakın iki yol arasındaki faz farkının sıfır olacağı, bu da ışık ışınlarını verimli bir şekilde kontrol etmek için yapıların tasarlanmasında daha fazla esneklik sağlayacağı belirtilmektedir. Konvansiyonel Snell yasası, iki farklı izotropik ortam arasındaki ara yüzden geçerken EM dalgaların geliş açısını ve kırılmasını ilişkilendirmek için kullanılır.

Metayüzeyler, iletim modunda Snell yasasına göre ışığın anormal kırılmasını sağlamak için de tasarlanabilir. Bu tür metayüzeylerde yansıma olmaması için, metayüzeyin giriş empedansı, havanın empedansı olan 377Ω değerine yakın olması gerekir ve bu durumda empedans eşleşmesi olur. Literatürde, mikrodalga frekans rejiminde %86 iletim verimliliğine sahip anormal kırılma sergileyen metayüzey rapor edilmiştir (Pfeiffer *et al.* 2014). Ayrıca, optik nano-devre kavramına dayanan, iletilen ışığın fazını tam olarak kontrol etmek için donatılmış başka bir metayüzey rapor edilmiştir (Monticone *et al.* 2013). Benzer şekilde, literatürde rapor edilen başka bir çalışmada metayüzey, THz, kızılötesi ve görünür ışık frekanslarında negatif kırılma göstermiştir (Cheng *et al.* 2015).

Elektromanyetik Dalgaların Polarizasyonu

EM dalgaların polarizasyonu, dalganın titreşim yönünü tanımlayan bir özelliktir. EM dalgalar, elektrik alan ve manyetik alanın birbirine dik olarak yayıldığı dalgalardır. Polarizasyon, bu elektrik alanın titreşim yönünü ifade eder. EM dalgalar, boşlukta ışık hızında yayılan zamana ve konuma göre elektrik ve manyetik alanların senkronize salınımlarıdır. Elektrik ve manyetik alanların salınımları birbirine diktir ve enine dalga oluşturur (Khan *et al.* 2020). Bir noktadan başka bir noktaya yayılmak için ortama ihtiyaç duymazlar. EM dalgalar, enerji, polarizasyon, çizgisel ve açısal momentum gibi özelliklere sahip olup etkileşimde bulundukları maddelere bu özelliklerini transfer edebilirler. EM dalgaların polarizasyonu EM dalganın madde ile etkileşiminde değişebilir. EM dalgaların polarizasyonu, uzayda sabit bir yerde elektrik alan vektörünün zamanla değişen yönü ve bağlı büyüklüğü ile belirlenir. Polarizasyon, moleküler biyoteknoloji, optik algılama ve telekomünikasyon, optik ve kontrast görüntüleme gibi çok sayıda uygulamada kullanılmaktadır (Asim 2017; Khan *et al.* 2019).

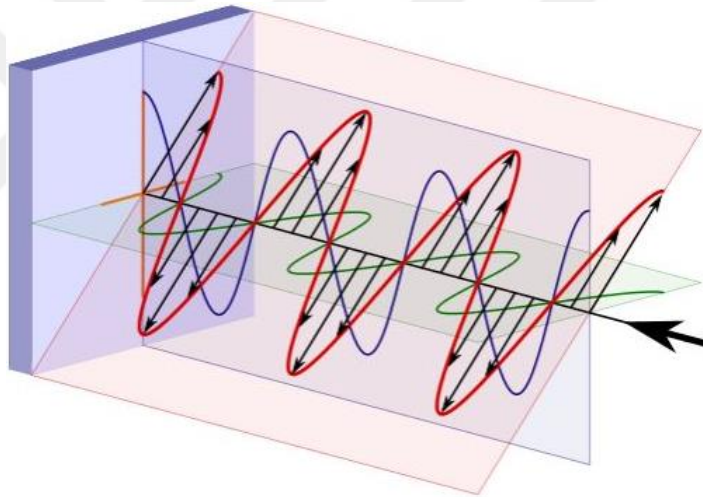
Lineer/Doğrusal Polarizasyon

Lineer Polarizasyon EM dalgaların elektrik alanının titreşim yönünün belirli bir düzlemde olduğu bir polarizasyon türüdür. Bu düzlem, dalga boyunca sabit kalır. Doğrusal polarizasyon, dalga hareketinin bir çizgi veya çubuk şeklinde olduğu bir dalga türünü tanımlar. Bu polarizasyon türü, dalgaların hareket yönünü ve elektrik alanının hareket yönünü belirlemek için kullanılır. Elektrik alan vektörünün veya manyetik alan vektörünün iz düşümü düz bir çizgi ise, zaman-harmonik dalga uzayda bir noktada lineer olarak polarize olur. Elektrik veya

manyetik alan vektörü yalnızca bir bileşen veya faz farkı 0° olan faz ya da faz farkı 180° olan iki ortogonal lineer bileşenler varsa lineer polarizasyon sağlanır (Khan 2018).

Lineer polarizasyonun özelliklerinden titreşim düzlemi, doğrusal polarize bir dalga, elektrik alanının titreşim düzlemi olarak adlandırılan belirli bir düzlemde titreşir. Bu düzlem, dalga boyunca sabit kalır ve dalga yayıldıkça değişmez. Lineer polarizasyonun özelliklerinden polarizasyon açısı, doğrusal polarize bir dalga, titreşim düzlemi ile dalga yayılma yönü arasındaki açıyı ifade eden bir polarizasyon açısına sahiptir. Bu açı, dalga kutuplamasını tanımlar.

Doğrusal polarizasyon, birçok optik ve EM uygulamada yaygın olarak kullanılır. Örneğin, güneş gözlükleri polarize edilmiş ışığın yatay veya dikey bileşenlerini filtrelemek için doğrusal polarize edilmiş lensler kullanır. Ayrıca, fotoğrafçılık ve teleskopçuluk gibi optik uygulamalarda da doğrusal polarize dalgaların kullanımı yaygındır. Lineer olarak polarize bir dalga, Şekil 18'de görülmektedir.



Şekil 18. Lineer polarizasyonun şematik gösterimi (Wikipedia 2023).

Dairesel Polarizasyon

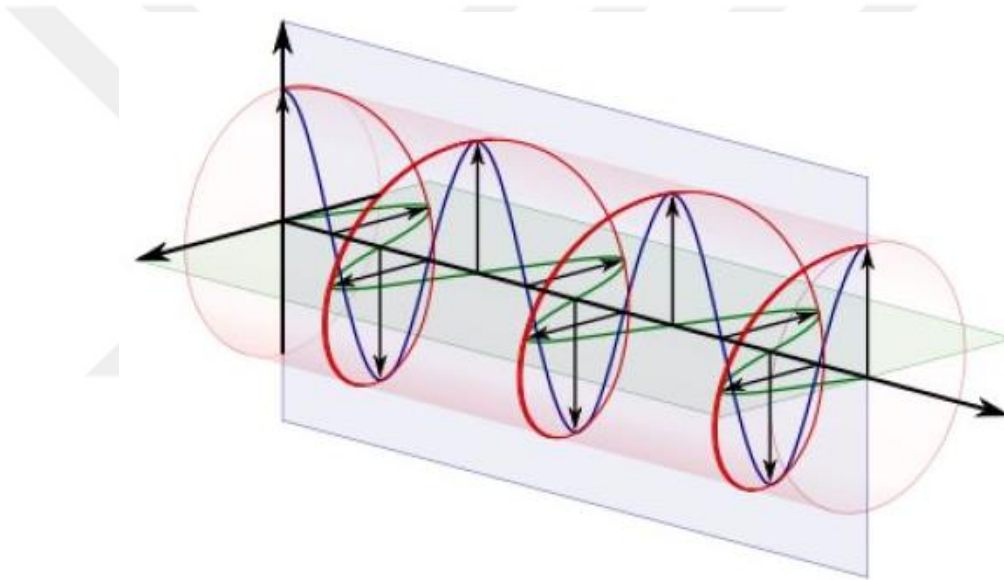
Dairesel polarizasyon, EM dalgaların elektrik alanının titreşim yönünün bir dairesel şekilde döndüğü bir polarizasyon türüdür. Bu polarizasyon türünde, elektrik alanının yönü saat yönünde veya saat yönünün tersine dairesel bir şekilde döner. Dairesel polarizasyon, özellikle bazı özel uygulamalarda kullanılır. Dairesel polarizasyonun dönme yönü, dairesel polarize bir dalga, elektrik alanının bir çizgi boyunca dairesel bir şekilde döndüğü bir dalgadır. Bu dönme ya saat yönünde (saat yönünün tersine) olabilir. Sabit amplitüd ise dairesel polarizasyonlu dalgaların elektrik alanının amplitüdü sabittir, yani dalga boyunca değişmez.

Dairesel polarizasyon, bazı tıbbi görüntüleme tekniklerinde, kablosuz iletişimde, optik fiber iletişimde, mikrodalga radar sistemlerinde ve optik mikroskopide kullanılır. Özellikle

optik uygulamalarda, dairesel polarizasyonla çalışmak, optik elemanların ve cihazların tasarımı ve işlevselliği için önemlidir. Dairesel polarizasyon, belirli uygulamalar için daha avantajlı olabilir çünkü bu tür polarizasyon, dalga yayılma yönünü değiştirmeksizin dönme hareketi gerçekleştirir.

Zaman-harmonik dalga, uzayda belirli bir noktada elektrik alan vektörünün ucu zamanın bir fonksiyonu olarak daire çiziyorsa dairesel olarak polarize olur. Dairesel polarizasyon elde etmek için gerekli koşul, alanın aynı büyüklükte ve 90° 'nin tek katı olan bir faz farkına sahip iki dik doğrusal bileşene sahip olmalıdır (Khan 2018).

Elektrik alanının dönme şekli saat yönünde ise, dalga sağ yönlü dairesel polarize (RHCP) olur. Dönme saat yönünün tersinde ise, dalga sol yönlü dairesel polarize (LHCP) olur. Dairesel polarizasyonun şematik bir diyagramı Şekil 19'da görülmektedir (Nguyen *et al.* 2021).



Şekil 19. Dairesel polarizasyonun şematik gösterimi (Wikipedia 2023).

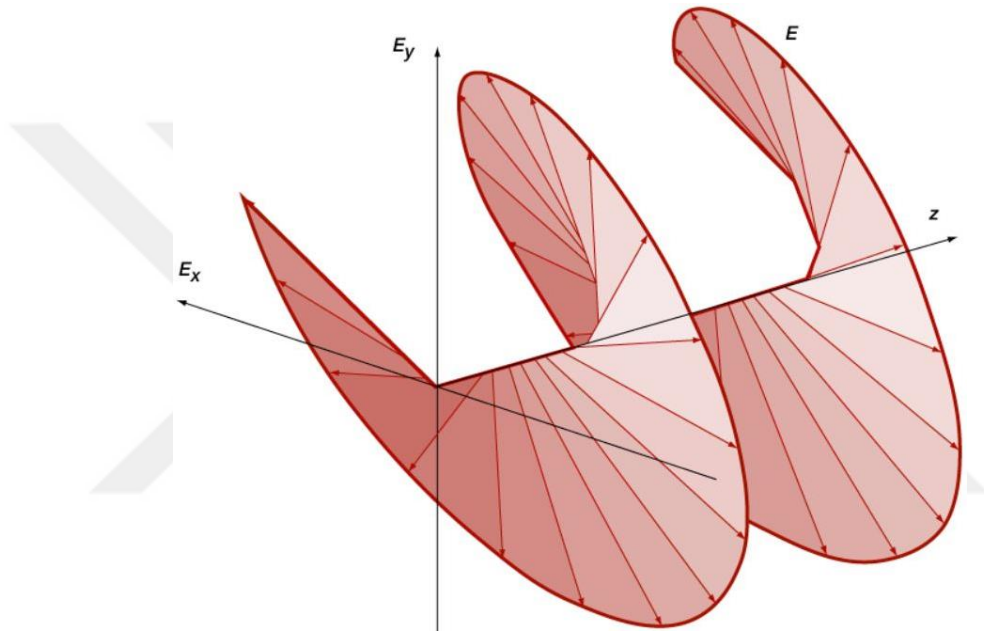
Eliptik Polarizasyon

Eliptik polarizasyon, EM dalgaların elektrik alanının titreşim yönünün bir elips şeklinde döndüğü bir polarizasyon türüdür. Doğrusal ve dairesel polarizasyonun bir kombinasyonu olarak düşünülebilir. Elektrik alanı, hem yatay hem de dikey bileşenler içeren bir karmaşık dönme hareketi yapar. Eliptik polarizasyonun dönme yönü, eliptik polarize bir dalga, elektrik alanının bir elips üzerinde dairesel bir şekilde döndüğü bir dalgadır. Bu dönme hareketi hem saat yönünde hem de saat yönünün tersine olabilir. Elipsin Eksenleri ise Eliptik polarizasyonun elipsi, büyük ve küçük eksenleri olan bir elips şekline sahiptir. Bu eksenler, elektrik alanının dönme hareketinin yönünü ve hızını belirler.

Eliptik polarizasyon, bazı optik ve EM uygulamalarda kullanılır. Özellikle optik spektroskopi, optik mikroskopi ve bazı lazer uygulamaları gibi alanlarda eliptik polarizasyon

kullanılır. Eliptik polarizasyon, dalga polarizasyonunun daha karmaşık bir biçimini temsil eder ve belirli deneyler veya cihazlar için gerekli olabilir. Örneğin, bazı moleküler yapının incelenmesi veya optik aygıtların belirli özelliklerin kontrol edilmesi gerektiğinde eliptik polarizasyon tercih edilebilir.

Elektrik alanının ucu uzayda sabit bir noktada zamanın bir fonksiyonu olarak elips çiziyorsa, zaman-harmonik dalgası eliptik olarak polarize olur. Dairesel polarizasyondaki aynı kurallardan faydalanarak dönme şeklinin türü belirlenir. Ayrıca, bir dalga ne doğrusal ne de dairesel olarak polarize değilse eliptik olarak polarize olur (Khan 2018). Eliptik polarizasyonun şematik gösterimi Şekil 20'de verilmiştir.



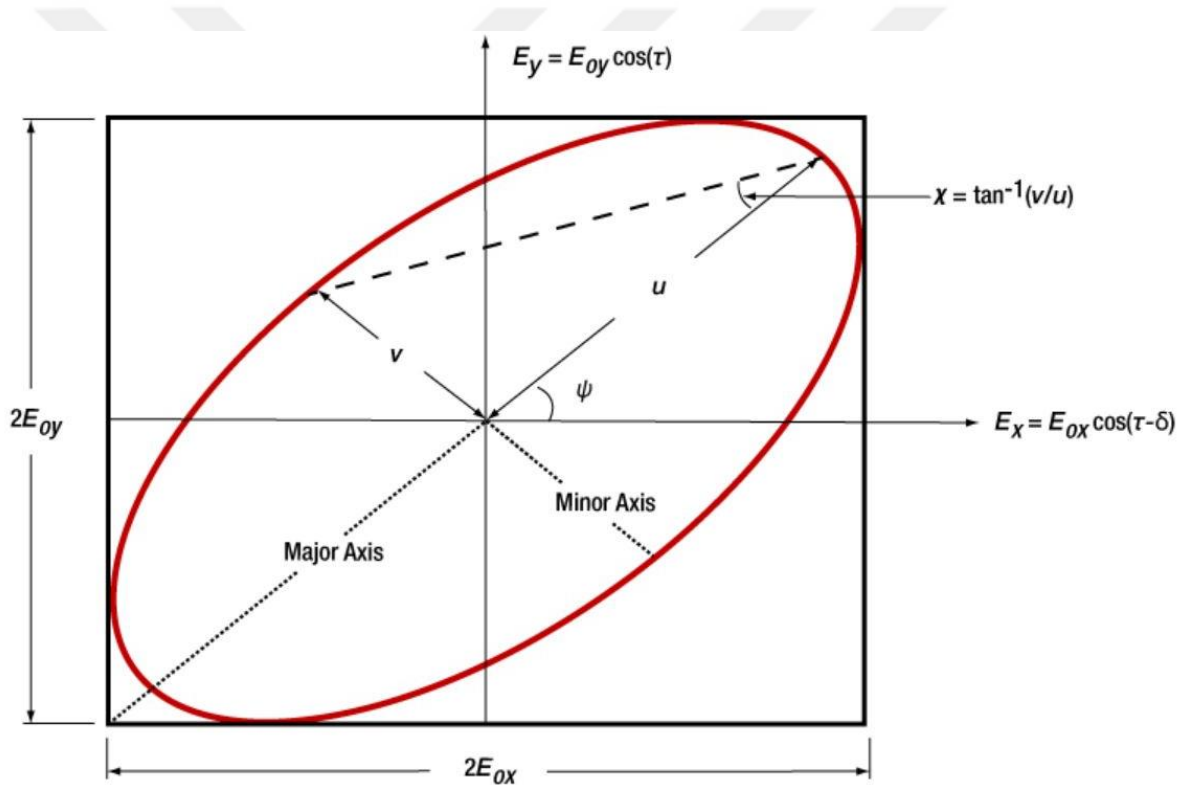
Şekil 20. Eliptik polarizasyonun şematik gösterimi (Thorlabs 2023).

Polarizasyon Elips

Polarizasyon elipsi, EM dalgaların elektrik alanının titreşim yönünün bir elips şeklinde döndüğü bir polarizasyon durumunu tanımlar. Bu elipsin büyük ve küçük eksenleri vardır ve bu eksenlerin boyutları ve dönme hızı dalga polarizasyonunun özelliklerini belirler. Polarizasyon elipsinin büyük eksen (Majör Eksen), polarizasyon elipsinin uzun eksen, elektrik alanının en büyük değere ulaştığı yönü temsil eder. Bu eksen de elektrik alanının amplitüdü maksimumdur. Küçük Eksen (Minör Eksen) ise polarizasyon elipsinin kısa eksen, elektrik alanının en küçük değere ulaştığı yönü ifade eder. Bu eksen de elektrik alanının amplitüdü minimumdur. Dönme yönü ise polarizasyon elipsi, bir zaman dilimi içinde döner, dönme hareketi saat yönünde veya saat yönünün tersine olabilir ve dönme hızı, dalga polarizasyonunun frekansına ve dalga boyuna bağlıdır.

Polarizasyon elipsi, EM dalga polarizasyonunun karmaşık bir gösterimidir ve doğrusal, dairesel ve eliptik polarizasyonun herhangi bir kombinasyonunu temsil edebilir. Polarizasyon elipsi, bir dalga'nın tam polarizasyon durumunu ayrıntılı bir şekilde gösterir ve bu, özellikle optik uygulamalarda ve spektroskopi çalışmalarında çok önemlidir. Özellikle polarize ışık mikroskopisi gibi alanlarda polarizasyon elipsini kullanarak madde özelliklerini ve yapısını incelemek mümkündür.

EM dalga'nın polarizasyon durumu, polarizasyon elipsi kullanılarak da tanımlanabilir. Polarizasyon elipsinin genel bir şekli Şekil 21'de gösterilmektedir. ψ açısı ana eksen ile x eksenindeki açıdır. Eliptiklik parametresi, Şekil 21'de gösterildiği gibi elipsin dış merkezinin veya elips açısının bir alternatifidir ($\chi = \tan^{-1}(v/u)$). Dairesel ve lineer polarizasyon durumları sırasıyla χ değerinin 45° ve 0° eliptiklik değerine karşılık gelir (Khan 2018).



Şekil 21. Polarizasyon Elips diyagramı (Thorlabs 2023).

Elektromanyetik Dalgaların Polarizasyonu için Jones Hesabı

EM dalgaların polarizasyonunun analizi için Jones hesabı veya Jones matrisi, optik ve EM dalga analizinde kullanılan bir matematiksel yöntemdir. Bu yöntem, dalga polarizasyonunu, optik elemanların etkilerini ve polarizasyon değişikliklerini incelemek için kullanılır. Jones matrisi, özellikle doğrusal polarizasyonlu dalgaları açıklamak için kullanışlıdır. Jones matrisi hesaplamalarının temeli, bir dalga durumunu temsil eden Jones vektörü dalga polarizasyonunu tanımlar. Jones vektörü bir optik elemanın (örneğin, bir

polarizatör veya bir yansıtıcı) polarizasyon değişimini veya bir sistem içindeki polarizasyon durumunu ifade etmek için kullanılır. Jones matrisi, dalga polarizasyonunun başlangıçtaki ve sonraki durumlarını ilişkilendirir. Polarizatörler, yansıtıcılar, iletkenler ve diğer optik elemanlar gibi optik bileşenlerin etkileri, Jones matrisi kullanılarak analiz edilebilir. Jones matrisleri çarpılarak, bir dizi optik elemanın toplam etkisi hesaplanabilir. Bu, EM dalgaların karmaşık polarizasyon değişikliklerini modellemek için kullanışlıdır. Jones hesabı, özellikle polarizasyonun hassas bir şekilde kontrol edilmesi gereken optik uygulamalarda ve lazer sistemlerinde önemlidir. Bu yöntem, EM dalga polarizasyonunun manipülasyonu, algılanması ve analizi için birçok pratik uygulama sunar.

Polarize EM dalgalar, 1941'de R. C. Jones tarafından sunulan Jones hesabı ile belirlenebilir. EM dalga, optik elemanı geçtiğinde ortaya çıkan dalganın polarizasyonu, optik elemanın Jones matrisinin ve gelen dalganın Jones vektörünün çarpımı alınarak bulunur. Tek dalga boyulu bir ışık düzlem dalgasının pozitif z-yönünde, açısal frekans ω ve dalga vektörü $k = (0, 0, k)$ ile hareket ettiğini varsayalım, burada dalga sayısı $k = \omega/c$ olsun. Bu durumda, elektrik ve manyetik alanları her noktada k 'ya diktir; her ikisi de hareket yönüne "enine" düzlemde bulunur (Khan 2018).

Çapraz Polarizasyon Dönüşümü

Çapraz polarizasyon dönüşümü, EM dalgaların bir polarizasyon durumundan başka bir polarizasyon durumuna dönüştüğü bir optik veya EM süreçtir. Bu tür dönüşümler, özellikle optik sistemler ve iletişim teknolojilerinde kullanılır. Çapraz polarizasyon dönüşümünün temel mekanizmalarından birkaçı şunlardır:

Polarizatörler: Polarizatörler, doğrusal polarizasyonlu bir EM dalgayı sadece belirli bir polarizasyon durumuna sahip olan dalgaların geçmesine izin verir. Bu, dalganın polarizasyonunu çapraz polarizasyona dönüştürebilir.

Dairesel ve Eliptik Polarizasyon Dönüşümü: Dairesel polarizasyonlu bir dalgayı eliptik veya doğrusal polarizasyona dönüştürmek veya tam tersini yapmak için optik elementler kullanılabilir. Bu tür dönüşümler, çeşitli optik bileşenlerle (örneğin, yansıtıcılar, polarizatörler ve çeşitli optik filtreler) gerçekleştirilebilir.

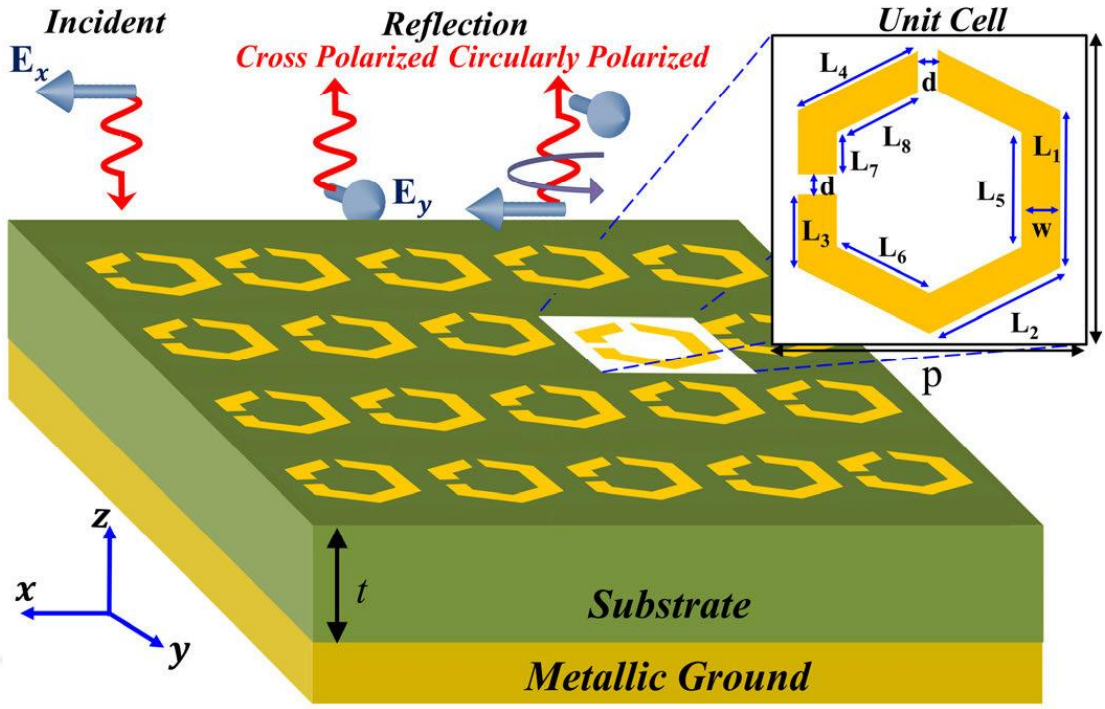
Polarizasyon Kontrolörleri: Polarizasyon kontrolörleri, gelen EM dalganın polarizasyon durumunu istenen bir duruma dönüştürmek için kullanılır. Bu, optik iletişim sistemlerinde sinyal kalitesini artırmak veya optik ölçümlerde doğru sonuçlar elde etmek için kullanışlı olabilir.

Polarizasyon Modülasyonu: İletişim sistemlerinde, polarizasyon dönüşümü çeşitli modülasyon tekniklerinde kullanılabilir. Bu, bilgiyi taşımak için EM dalgaların polarizasyon durumunu değiştirme işlemidir.

Çapraz polarizasyon dönüşümü, EM dalgaların polarizasyonunu kontrol etmek ve yönlendirmek için önemli bir araçtır ve optik sistemler, radyo iletişim, kablosuz iletişim ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi birçok uygulamada kullanılır. Bu tür dönüşümler, sinyal karmaşıklığını azaltma, sistem performansını artırma ve çeşitli optik deneylerde veya ölçümlerde hassasiyeti artırma gibi birçok avantaj sunar.

Çapraz polarizasyon dönüşümünde, lineer veya dairesel polarizasyona sahip olan EM dalga, metayüzeyden yansıma veya iletim moduna karşılık gelen dikey polarizasyona dönüştürülür. Daha spesifik olarak, çapraz polarizasyon dönüştürme mikrodalga, THz, kızılötesi ya da görünür bölgedeki metayüzeyi, x -polarize bir dalgayı y -polarize ve sağ dairesel polarize dalgayı sol dairesel polarize dalgaya dönüştürür ve bunun tersi de geçerlidir.

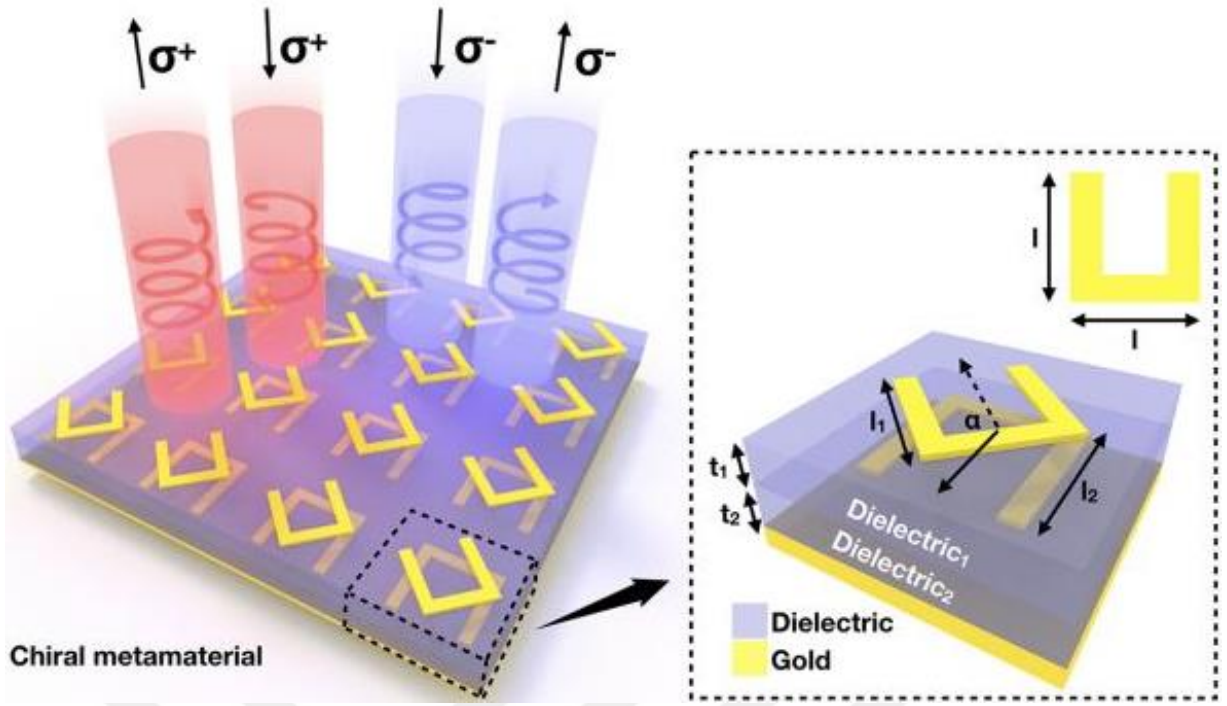
Yansıtıcı çapraz polarizasyon dönüştürücü metayüzeylerde, bazı anizotropik birim hücrelerin iki boyutlu periyodik dizisi, metalik bir zemin düzlemi tarafından desteklenen elektriksel olarak ince dielektrik alt taşın üzerine modellenir ve frekans rejiminde çapraz polarizasyon dönüşümü gerçekleştirilir. Metalle sonlandırma nedeniyle, iletim katsayısı sıfır olur ve çapraz polarize yansıma verimliliği önemli ölçüde artar. Literatürde yansıma modunda çalışan birçok çapraz polarizasyon dönüşümlü anizotropik metayüzey tasarımı rapor edilmiştir. Şekil 22’de altıgen metayüzey üzerinde dairesel polarizasyon dönüştürücü çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 22. Boşluğu bulunan altıgen metayüzey (Salman *et al.* 2020).

İletim modunda çapraz polarizasyon dönüşümü, bir anizotropik birim hücre yapısı veya bir kiral yapı ile elde edilebilir. Anizotropik metayüzey, yayılan dalga'nın bir bileşeninin fazını diğer ortogonal bileşene göre 180° geciktirir ve böylece gelen elektrik alan vektörüne dik olan elektrik alan vektörü oluşturur. Bir yarım dalga plakası, x-polarize bir dalgayı y-polarizeye ve RHCP dalgasını LHCP dalgasına dönüştürdüğünden ve bunun tersi de geçerli olduğundan dolayı transmisyon modunda çapraz polarize dönüştürücü çift kırılmalı anizotropik metayüzey, ultra ince bir yarım dalga gibi davranır.

Düzlemsel kiral yapılar, daha önce açıklandığı gibi, doğrusal polarizasyon yönünü döndürmek için kullanılabilecek optik özelliklere sahiptir. Kiral metamateryallerin (KMM) polarizasyon döndürme kapasitesi doğal olarak oluşan malzemelerden daha yüksektir, ancak gelen elektrik alanı ve indüklenen manyetik alan bileşeni arasında güçlü bir bağlantı sağlayabilen düzlemsel KMM geometrilerinin tanımlanması oldukça zordur (Tian *et al.* 2021). Çapraz kuplaj verimliliği olarak da adlandırılan bu özellik, kiral CPC metayüzeylerinin gerçekleştirilmesi için temel bir gerekliliktir. Manyetik kuplaj rezonanslarına dayalı düzlemsel KMM'lerin, elektrik kuplaj rezonanslarına kıyasla, çapraz ve eş-polarize bileşenlerdeki gücün oranı olan daha büyük CPC verimliliği gösterdiği gözlemlenmiştir (Ma *et al.* 2018).



Şekil 23. Kiral metamalzeme (Ma *et al.* 2018).

Lineer-Dairesel Polarizasyon (LTC) Dönüşümü

Lineer-Dairesel Polarizasyon (LTC) dönüşümü, EM dalgaların polarizasyon durumunu bir lineer polarizasyondan (doğrusal polarizasyon) dairesel polarizasyona dönüştürmeye veya tersine dönüştürmeye yönelik bir optik veya EM süreçtir. Bu tür dönüşümler, özellikle optik ve iletişim sistemlerinde kullanılır ve farklı polarizasyon durumlarında iletilen sinyallerin uyumlu hale getirilmesi veya ölçülmesi için önemlidir.

LTC için iki temel yöntem bulunur:

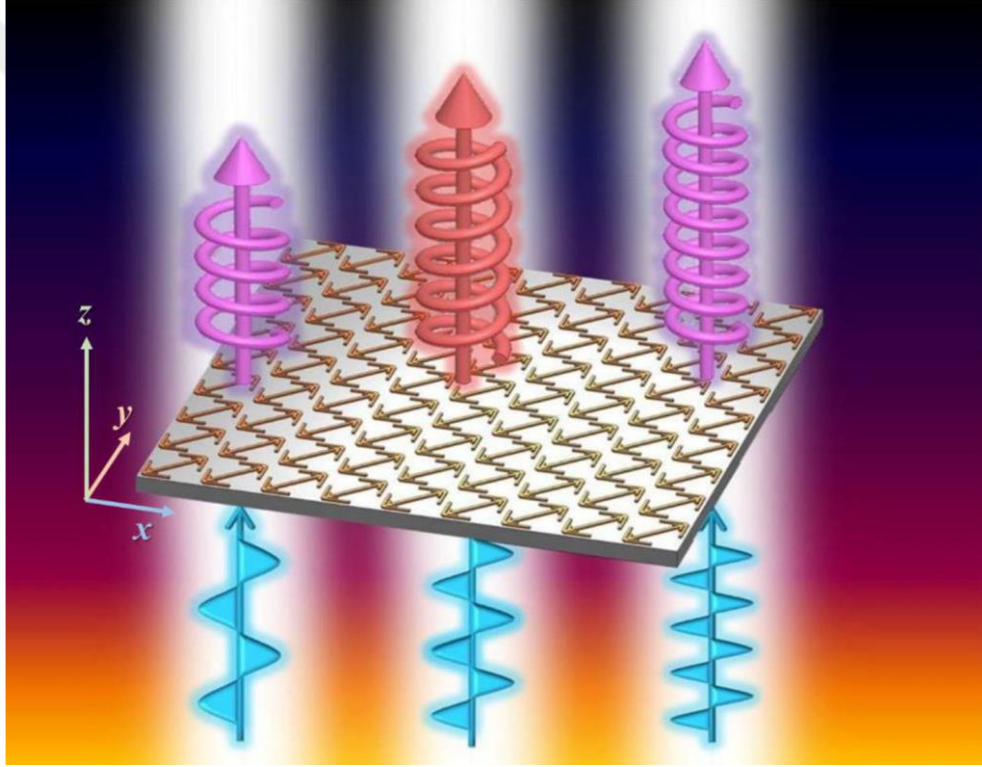
Çeyrek Dalga Plakaları (Quarter-Wave Plates): Çeyrek dalga plakaları, gelen lineer polarize ışığı dairesel polarize ışığa dönüştürmek veya tersine çevirmek için kullanılır. Bu optik bileşenler, özellikle lineer polarize ışığı sağdan sola (veya tam tersi) döndürmek için kullanışlıdır. Çeyrek dalga plakaları, belirli bir dalga boyuna ve açığa göre tasarlanır.

Yarı Dalga Plakaları (Half-Wave Plates): Yarı dalga plakaları, gelen lineer polarize ışığı eliptik polarize ışığa dönüştürmek için kullanılır. Elde edilen eliptik polarizasyonun eksenini, yarı dalga plakanın dönme açısına bağlıdır. Lineer-Dairesel Polarizasyon dönüşümü için yarı dalga plakaları genellikle iki çeyrek dalga plakasının birleştirilmesi ile gerçekleştirilir.

Bu tür polarizasyon dönüşümleri, özellikle optik iletişim sistemlerinde ve polarize ışık mikroskopisi gibi optik deneylerde kullanılır. İletişim sistemlerinde, polarizasyon dönüşümü, sinyallerin uyumluluğunu sağlama, sinyal kalitesini artırma ve bilgi iletimini optimize etme

amacıyla kullanılır. Polarize ışık mikroskopisi gibi optik deneylerde ise örneklerin polarizasyon özelliklerini incelemek ve görselleştirmek için kullanılır.

Yansıma modu ve iletim modu, lineer-dairesel polarizasyon dönüşümü için literatürde kullanılmaktadır. Yansıma modunda, gelen dalganın doğrusal ortogonal bileşenlerini eşit büyüklükte ve 90° faz farkıyla yansıtmak için anizotropik bir metayüzey kullanılır. Sonuç olarak, dalga dairesel polarize olarak yansıtılır. Ayrıca, faz farkının işaretine bağlı olarak, yansıyan dalga ya sağ eli dairesel polarize ya da sol eli dairesel polarize olabilir. Aynı prensibe dayanarak, dairesel polarize bir dalga, doğrusal polarize bir dalga olarak yansıtılabilir. Çeyrek dalga plakası lineer polarizasyonu dairesel polarizasyona ve dairesel polarizasyonu lineer polarizasyona dönüştürdüğünden, yansıtıcı anizotropik dairesel polarize metayüzey yansıma modunda çeyrek dalga plakası olarak çalışır.



Şekil 24. LP'den CP'ye dönüşüm için metayüzeyin kavramsal diyagramı (Li *et al.* 2021).

Kiral metayüzeylerin optik aktivitesi, doğrusaldan dairesel polarizasyon dönüşümü elde etmek için uyarlanabilir. Ayna simetrisinin olmaması nedeniyle kiral metamateryaller rezonansta elektrik ve manyetik alanlar arasında çapraz bağlantı oluşturur. Kiral metayüzeyler, EM dalgaların asimetric iletimine neden olur; bu da eğer metayüzeyin sol tarafından geliyorsa, dalganın iletim katsayılarının farklı olduğu anlamına gelir (Ma *et al.* 2018).

MATERYAL VE YÖNTEM

Polarizasyon Dönüşüm Oranı

Polarizasyon dönüşüm oranı, özellikle optik ve EM sistemlerde kullanılır. Örneğin, bir polarizasyon dönüştürücü, doğrusal polarize ışığı dairesel polarize veya eliptik polarize ışığa dönüştürebilir. Polarizasyon dönüşüm oranı, bu dönüşümün ne kadar etkili olduğunu ve ne kadar orijinal polarizasyonun korunduğunu ölçer. Bu oranın yüksek olması, dönüşümün verimli olduğunu ve istenilen polarizasyon durumunun elde edildiğini gösterir. Polarizasyon dönüşüm oranı, optik iletişim, polarimetri, optik cihazların tasarımı ve malzeme karakterizasyonu gibi birçok uygulamada önemlidir. PCR, LP-LP polarizasyon dönüşümünün verimlilik oranını ifade eder. LP-LP polarizasyon dönüşümü x veya y polarize olarak gelen dalganın y veya x polarize olarak yansıdığı ya da iletiildiği polarizasyon dönüşümdür (Khan and Tahir 2018). PCR parametresi eş polarizasyon katsayısı (R_{xx}) ve çapraz polarizasyon katsayısı (R_{xy}) ile hesaplanır. R_{xx} gelen dalga ile yansıyan dalganın polarizasyon yönünün aynı olduğu R_{yx} ise gelen dalga ile yansıyan dalganın polarizasyon yönünün farklı olduğu parametredir (Fu *et al.* 2019).

$$R = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$R_{xx} = \frac{E_{rx}}{E_{ix}} \quad (28)$$

$$R_{xy} = \frac{E_{rx}}{E_{iy}} \quad (29)$$

$$R_{yx} = \frac{E_{ry}}{E_{ix}} \quad (30)$$

$$R_{yy} = \frac{E_{ry}}{E_{iy}} \quad (31)$$

Deklem (27)'de eş ve çapraz polarizasyon katsayılarını tanımlamak için yansıma matrisi verilmiştir. R_{xx} ve R_{yy} ifadeleri eş polarizasyon, R_{xy} ve R_{yx} ise çapraz polarizasyon katsayılarını ifade eder (Chen *et al.* 2017). Denklemler (28), (29), (30) ve (31)'de indis i gelen dalgayı r yansıyan dalgayı, x ve y polarizasyon yönünü temsil eder. Denklem (28) x polarizeli gelen dalganın x polarizeli yansıma katsayısını, denklem (29) y polarizeli gelen dalganın x polarizeli yansıma katsayısını, denklem (30) x polarizeli gelen dalganın y polarizeli yansıma katsayısını, denklem (31) y polarizeli gelen dalganın y polarizeli yansıma katsayısını ifade eder.

$$PCR = \frac{R_{xy}^2}{R_{xy}^2 + R_{yy}^2} = \frac{R_{yx}^2}{R_{yx}^2 + R_{xx}^2} \quad (32)$$

Eş ve çapraz polarizasyon katsayıları kullanılarak polarizasyon dönüşüm oranı verimliliğini ifade eden PCR değeri denklem (32)'de verilen formülle hesaplanır (Ahmed *et al.* 2021).

Saçılma Parametreleri

Saçılma parametreleri, bir parçacığın veya dalga etkileşiminin sonucu olarak meydana gelen saçılma olayını karakterize etmek için kullanılan ölçümler ve matematiksel ifadelerdir. Bu parametreler, birçok farklı fiziksel ve bilimsel bağlamda kullanılırlar.

Saçılma Kesiti (Scattering Cross-Section): Bir parçacığın bir başka parçacık veya enerji dalgası ile etkileştiğinde saçılma olayının olasılığını tanımlar. Saçılma kesiti, bir parçacığın bir enerji kaynağına maruz kaldığında bu enerjinin saçılma yoluyla ne kadarını emeceğini belirler.

Diferansiyel Saçılma Kesiti (Differential Scattering Cross-Section): Bir saçılma olayının belirli bir açıya göre dağılımını tanımlar. Farklı açılarda saçılan ışığın yoğunluğunu hesaplamak için kullanılır.

Yayılma Fonksiyonu (Scattering Amplitude): Saçılma olayının tam matematiksel tanımıdır. Gelen dalga ile saçılan dalga arasındaki ilişkiyi ifade eder. Yayılma fonksiyonu, saçılma olayının detaylı bir analizi için kullanılır.

Gyrofonkalar (Gyration Parameters): EM dalga saçılması için kullanılırlar. Polarizasyon durumunun değişimini tanımlarlar ve özellikle manyetik malzemelerle etkileşim durumunda önemli rol oynarlar.

Lorentz-Schmidt Çapı (Lorentz-Schmidt Radius): Parçacığın saçılma olayının etkili bir alanını tanımlar. Parçacığın boyutu ve saçılma kesiti arasındaki ilişkiyi gösterir.

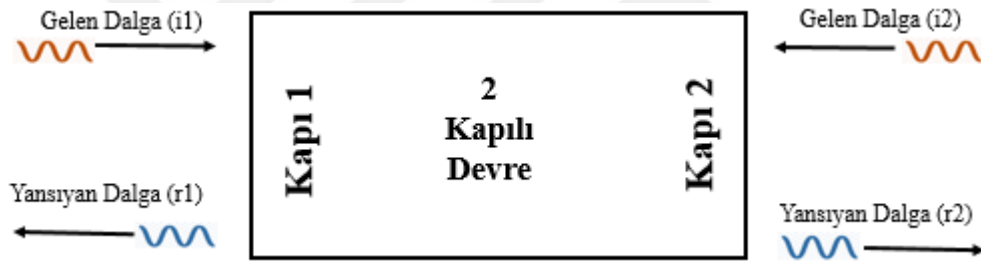
Bu parametreler, araştırmacılar tarafından özellikle optik, elektromanyetizma, nükleer fizik, kuantum mekaniği ve malzeme bilimi gibi alanlarda saçılma olaylarını incelemek için kullanılmaktadır.

EM dalgaların saçılma (scatter) işlemi, bu dalgaların bir ortamda veya bir nesne üzerinde dağılması veya değişmesi anlamına gelir. Saçılma süreci, çeşitli parametrelerle karakterize edilebilir. Yayılma açısı, saçılan dalganın ışın giriş yönüne göre olan açısını tanımlar. Bu açı, saçılma olayının yönünü belirler. Saçılma işlemi, giriş dalgaların dalga boyuna bağlıdır. Giriş dalganın dalga boyu, saçılma sürecinin sonucunu etkiler. Saçılma kesilme açısı, belirli bir dalga boyu için saçılmanın olup olmadığı veya hangi açılarda gerçekleşeceğini belirler. Bu açı, bir nesnenin boyutu ve malzemesi ile ilişkilidir. Saçılma kesilme dalga boyu,

saçılma sürecinin belirli bir açıda tamamen durduğu dalga boyunu ifade eder. Bu dalga boyu, saçılan dalgaların bu açıda birleşmeye başladığı noktayı temsil eder. Ortamın veya saçılan nesnenin kırılma indisi, saçılma sürecini etkileyen önemli bir parametredir. Kırılma indisi, dalga boyunun ortam içindeki hızını ve yönünü değiştirir. Saçılma sürecinin geometrisi, saçılmanın nasıl gerçekleştiğini tanımlar. Örneğin, saçılan nesnenin şekli, boyutları ve konumu gibi faktörler saçılma geometrisini etkiler. Ortamın dielektrik sabiti, iletkenliği ve diğer EM özellikleri, saçılma sürecini büyük ölçüde etkiler. Özellikle dalgaların ortam içinde ilerlerken etkileştiği malzeme veya ortamın özellikleri saçılma sonuçlarını belirler.

Bu parametreler, saçılma olayının karakterizasyonu ve anlaşılması için kullanılır. Saçılma, radyo dalgalarından ışığa kadar EM dalgaların çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynadığı bir fenomen olduğu için, bu parametrelerin anlaşılması ve kontrol edilmesi, birçok farklı alanda (örneğin, optik, radyo iletişim, radar, atmosfer bilimi) önemlidir.

Saçılma parametreleri (S-Parametreleri) mikrodalga devrelerin analizinde kullanılır ve devre portlarındaki gelen ve yansıyan dalgaların arasında bir bağlantı kurar (Sevgi 1999).



Şekil 25. İki kapılı devre modeli (Tutar 2021).

Şekil 25'te iki kapılı bir devrenin kapılarındaki gelen ve yansıyan dalgalar gösterilmiştir. Burada $i1$ ve $i2$ sırasıyla kapı 1 ve kapı 2'ye gelen dalgaları $r1$ ve $r2$ ise kapı 1 ve kapı 2'den yansıyan dalgaları temsil eder ve $i1$, $i2$, $r1$, $r2$ arasındaki oranlar kullanılarak saçılma matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} r1 \\ r2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$r1 = S_{11} \cdot i1 + S_{12} \cdot i2 \quad (34)$$

$$r2 = S_{21} \cdot i1 + S_{22} \cdot i2 \quad (35)$$

Denklem (34) ve denklem (35)'i açarsak

$$S_{11} = \left. \frac{r1}{i1} \right|_{i2=0} \quad (36a)$$

$$S_{21} = \left. \frac{r2}{i1} \right|_{i2=0} \quad (36b)$$

$$S_{12} = \frac{r_1}{i_2} \bigg|_{i_1 = 0} \quad (36c)$$

$$S_{22} = \frac{r_2}{i_2} \bigg|_{i_1 = 0} \quad (36d)$$

elde edilir.

Denklem (36(a))’da verilen S_{11} ifadesi kapı 1’den yansıyan dalgaları, Denklem (36(b))’de verilen S_{21} ifadesi kapı 1’den kapı 2’ye iletilen dalgaları, Denklem (36(c))’de verilen S_{12} ifadesi kapı 2’den kapı 1’e iletilen dalgaları, Denklem (36(d))’de verilen S_{22} ifadesi kapı 2’den yansıyan dalgaları temsil eder.

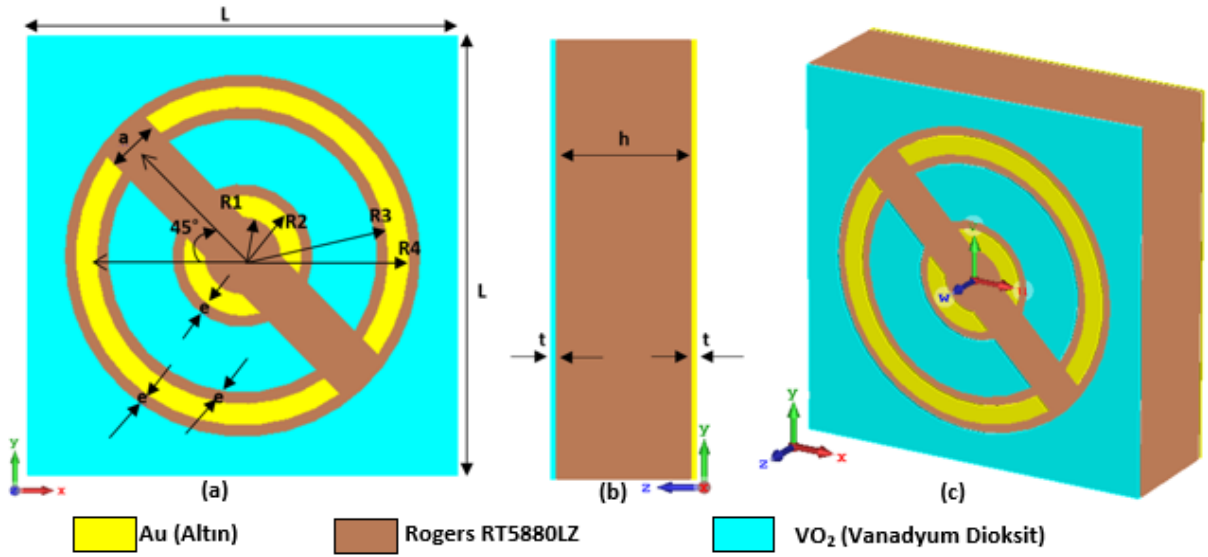
Materyal

Bu tez çalışmasında, tasarlanan metamalzemenin Bruggeman etkili modeli ile VO₂’nin dielektrik sabiti $\epsilon=9$ ve Drude modeli ile VO₂’nin dielektrik sabiti $\epsilon=12$ alınarak THz bölgesinde çalışan polarizasyon dönüştürücü bir metamalzeme yapısı modeli incelenecektir. Bu modelde, VO₂-Au bileşimi üst katman, orta katman Rogers RT5880LZ ($\epsilon_r = 2, \tan\delta = 0.0021$) ve alttaş malzeme olarak altın ($\delta = 4.561 \times 10^7 S/m$) kullanılarak THz bölgesinde tek katmanlı, yüksek verimli, uyarlanabilir ve geniş bant polarizasyon dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 26). Ayrıca, yapı parametrelerinin, polarizasyon açısının ve geliş açısının polarizasyon dönüşüm performansları üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Şekil 26’da tasarlanan polarizasyon dönüştürücünün ön, yan ve perspektif görünümü verilmiştir. Tablo 3’te ise oluşturulan modelin ölçüleri belirtilmiştir.

Tablo 3. Oluşturulan Polarizasyon Dönüştürücünün Ölçüleri

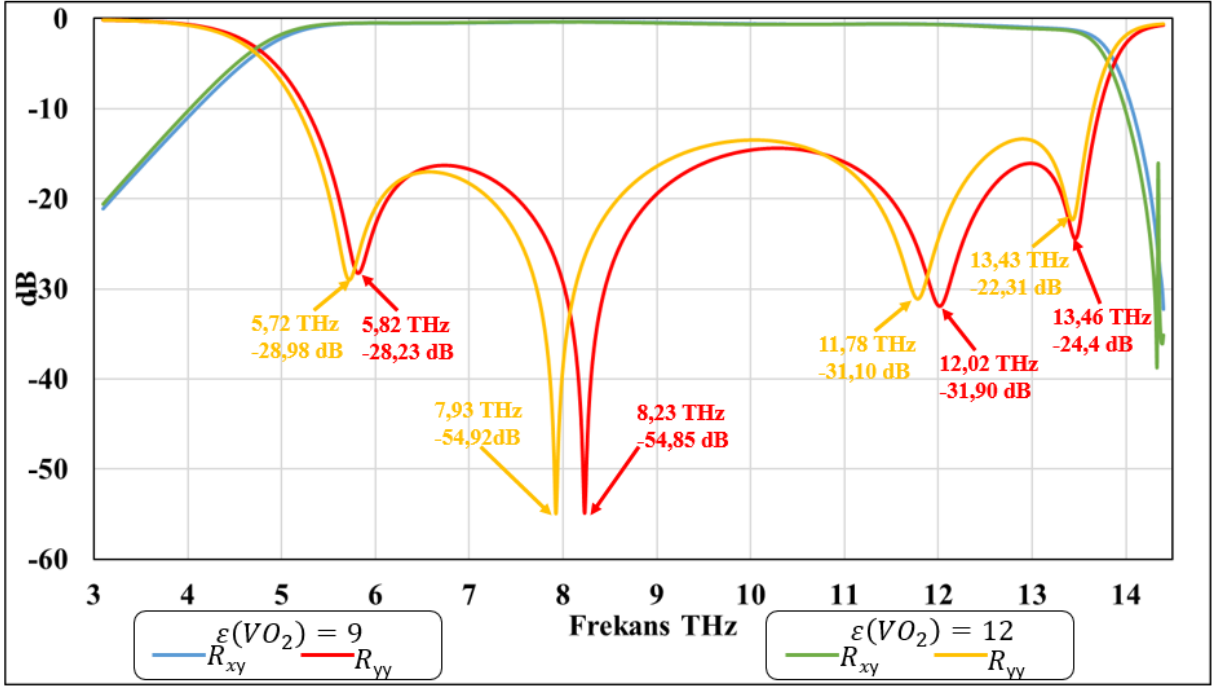
Ölçü Parametresi	R1	R2	R3	R4	h	t	L	a	e
Değer (µm)	1,4	2,2	5,4	6,2	5	0,2	16	2	0,4



Şekil 26. Oluşturulan polarizasyon dönüştürücünün: (a) Ön görünümü, (b) Yan görünümü, (c) Perspektif görünümü ve malzeme yapısı.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez kapsamında VO_2 -Au bileşimi üst katman, orta katma Rogers RT5880LZ ve alttaş malzeme olarak Au kullanılarak THz bölgesinde tek katmanlı, yüksek verimli ve geniş bant polarizasyon dönüştürücü metamalzeme tasarımı gerçekleştirilecektir. Literatür araştırmasında yaklaşık 2-7 THz aralığından polarizasyon dönüştürücülerin olduğu görülmüş olup, çalışma sonucu yaklaşık 8 THz bant aralığına sahip, uyarlanabilir, yüksek verimli bir model oluşturulmuştur. Modeli oluşturmak için CST Microwave Studio (CST 2020) programı kullanıldı. CST programında frekans tetrahedral ağ tipi tercih edildi ve birim dalga boyu başına düşen ağ sayısı otomatik seçildi. Microsoft Excel ile oluşturulan modelin tüm grafikleri çizildi.

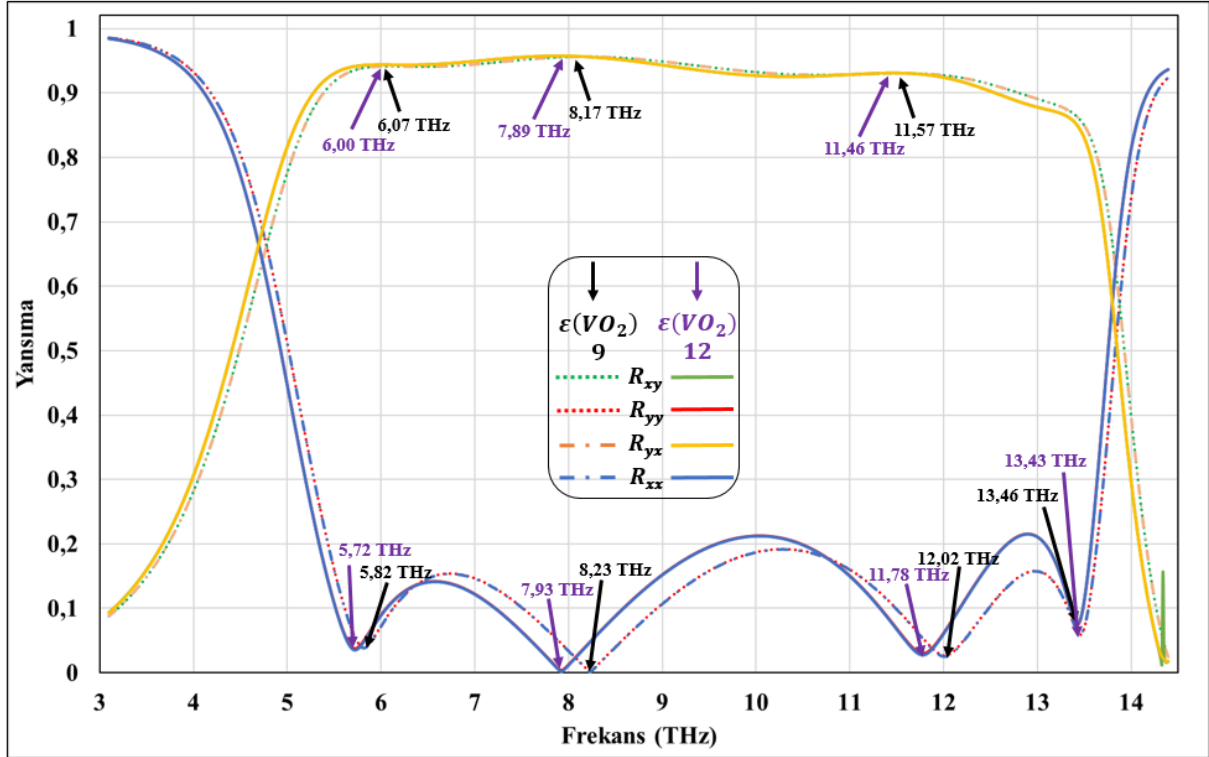


Şekil 27. Oluşturulan polarizasyon dönüştürücü modelin $\epsilon(VO_2)=9$ ve $\epsilon(VO_2)=12$ R_{yy} ve R_{xy} grafikleri.

Tasarlanan metamalzemenin Şekil 27’de verilen dB grafiği incelendiğinde VO_2 dielektrik sabiti Bruggeman etkili modeli ile $\epsilon=9$ alındığında 5,82 THz noktasında -28,23 dB, 8,23 THz noktasında -54,85 dB, 12,02 THz noktasında -31,90 dB, 13,46 THz noktasında -24,4 dB olmak üzere 4 adet rezonans noktası görülmektedir. VO_2 dielektrik sabiti Drude modeli ile $\epsilon=12$ alındığında 5,72 THz noktasında -28,98 dB, 7,93 THz noktasında -54,92 dB, 11,78 THz noktasında -31,10 dB, 13,43 THz noktasında -22,31 dB olmak üzere 4 adet rezonans noktası görülmektedir.

Tablo 4. Oluşturulan Polarizasyon Dönüştürücünün VO₂ Dielektrik Sabiti $\epsilon=9$ ve $\epsilon=12$ Rezonans Noktaları Karşılaştırması

VO ₂ Epsilon		Rezonans 1	Rezonans 2	Rezonans 3	Rezonans 4
$\epsilon=9$	Frekans (THz)	5,82	8,23	12,02	13,46
	Genlik (dB)	-28,23	-54,85	-31,90	-24,4
$\epsilon=12$	Frekans (THz)	5,72	7,93	11,78	13,43
	Genlik (dB)	-28,98	-54,92	-31,10	-22,31

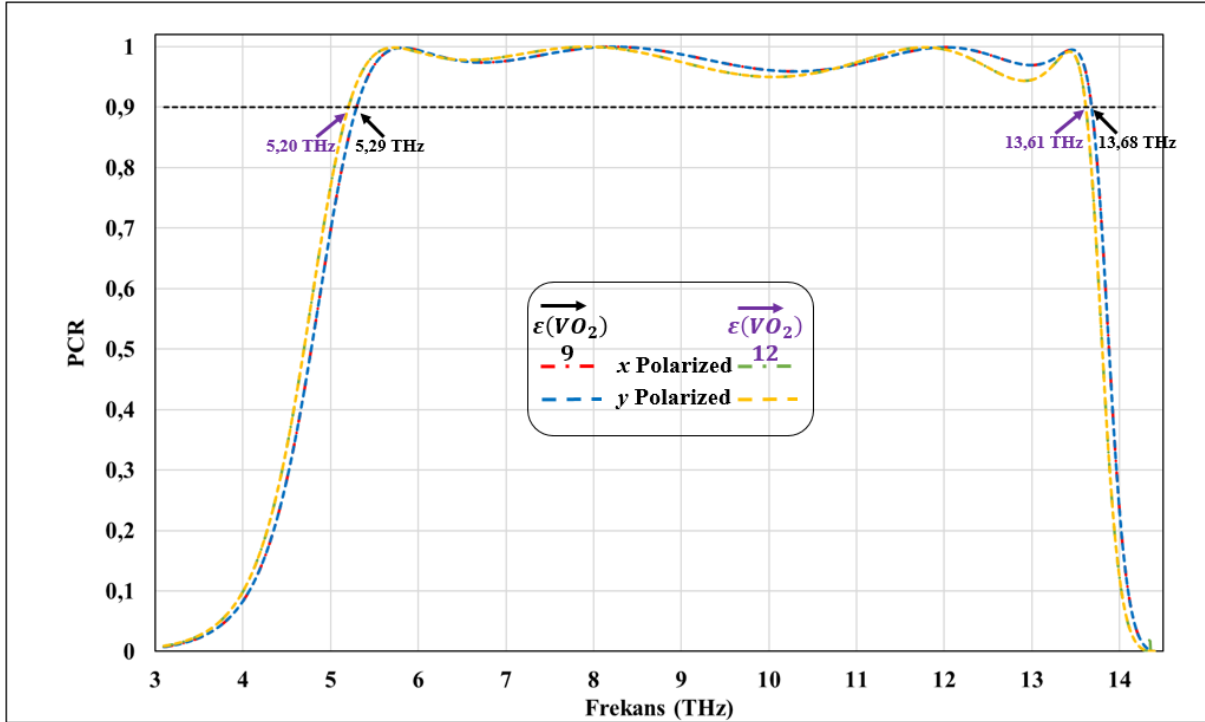


Şekil 28. Tasarlanan değiştirilebilir çok işlevli metamalzemenin yansımaya grafiği.

Şekil 28'de, önerilen metamalzeme temelli polarizasyon dönüştürücünün yansımaya katsayılarının genlikleri verilmiştir. Şekil 28'de gösterildiği gibi, çapraz polarize yansıtıcı katsayıların genliği grafiği incelendiğinde VO₂ dielektrik sabiti Bruggeman etkili modeli ile $\epsilon=9$ alındığında çapraz polarite katsayıları $|R_{xy}|$ ve $|R_{yx}|$ 5,29-13,68 THz aralığında 0,9'dan büyük olduğu, VO₂ dielektrik sabiti Drude modeli ile $\epsilon=12$ alındığında da çapraz polarite katsayıları $|R_{xy}|$ ve $|R_{yx}|$ 5,20-13,61 THz aralığında 0,9'dan büyük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda çapraz polarizasyon yansıtıcı eğrilerinin VO₂ dielektrik sabiti Bruggeman etkili modeli ile $\epsilon=9$ alındığında 6,07, 8,17 ve 11,57 THz'de üç tepe değerine ve VO₂ dielektrik sabiti Drude modeli ile $\epsilon=12$ alındığında da 6,00, 7,89 ve 11,46 THz'de üç tepe değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, eş-yansıtıcı katsayılar $|R_{yy}|$ ve $|R_{xx}|$ rezonans tepe noktalarında neredeyse sıfıra eşittir. Başka bir ifadeyle, x polarize gelen dalganın x yönlü yansıyan bileşenleri neredeyse sıfır genlikte iken y polarize genliği neredeyse 1 genliktedir. Bu durum y polarize gelen dalga için de benzerdir.

Tablo 5. Modelde Polarizasyon Dönüştürücünün VO₂ Dielektrik Sabitine Göre Yansıması

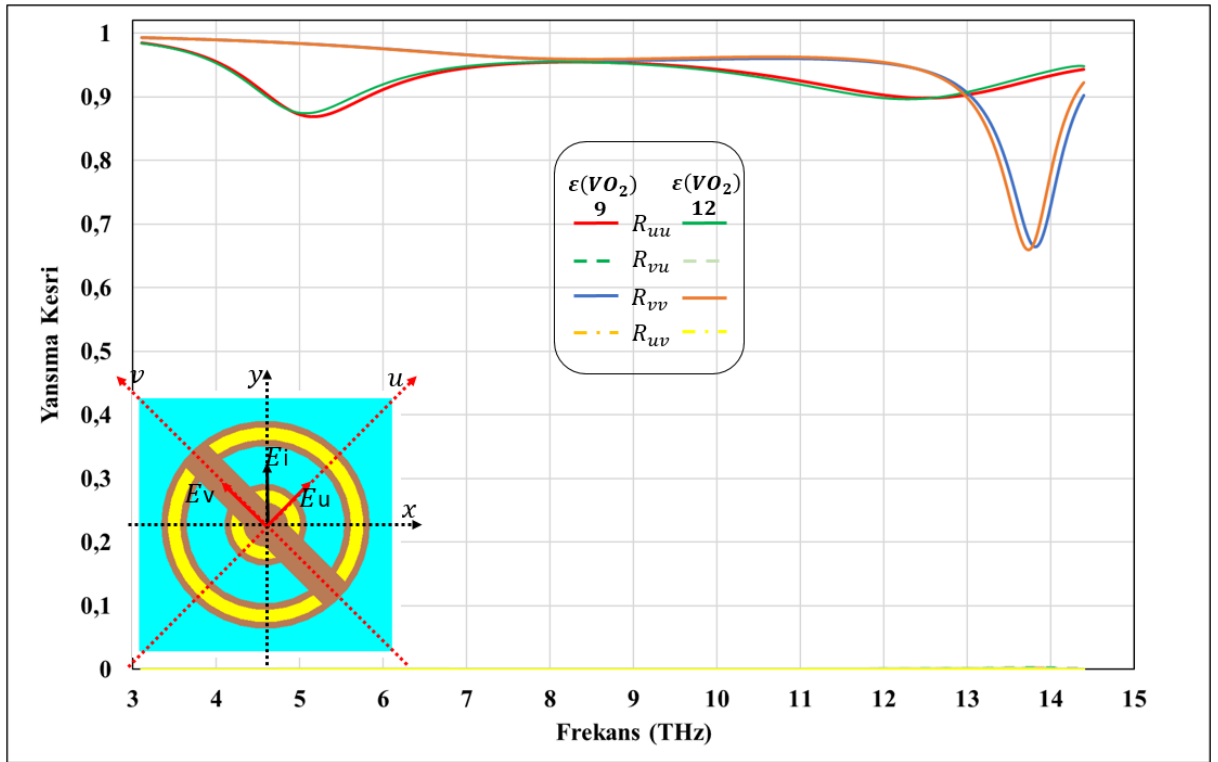
	Bruggeman Etkili Modeli	Drude Modeli
VO ₂ Dielektrik Sabiti	$\epsilon=9$	$\epsilon=12$
Polarite Katsayı THz (>0,9 (dB))	5,29-13,68	5,20-13,61
Tepe 1 (THz)	6,07	6,00
Tepe 2 (THz)	8,17	7,89
Tepe 3 (THz)	11,57	11,46

**Şekil 29.** Tasarlanan değiştirilebilir çok işlevli metamalzemenin polarizasyon dönüştürme oranı değerinin frekansa göre değişimi (normal açı).

Dönüşüm verimliliğini daha iyi açıklamak için, PCR (Polarizasyon Dönüşüm Oranı) kuramsal temeller kısmında tanımlanmıştır. Şekil 29'da Bruggeman etkili modeli ile $\epsilon(VO_2)$ 9 alındığında normal geliş açısı için (5,29-13,68 THz) PCR değerinin %90 üzeri verimliliğe sahip olduğu, PCR değeri 5,82 THz, 8,23 THz, 12,02 THz ve 13,46 THz rezonans frekans değerlerinde yaklaşık 1 değerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Drude modeli ile $\epsilon(VO_2)$ 12 alındığında ise normal geliş açısı için (5,20-13,61 THz) PCR değerinin %90 üzeri verimliliğe sahip olduğu, PCR değeri 5,72 THz, 7,93 THz, 11,78 THz ve 13,43 THz rezonans frekans değerlerinde yaklaşık 1 değerine ulaştığı görülmüştür. Rezonans frekanslarında neredeyse tamamen x (y) polarize bir olayın y (x) bileşenlerine dönüştürülebileceği sonucuna varılmaktadır.

Tablo 6. Oluşturulan Polarizasyon Dönüştürücünün VO₂ Dielektrik Sabitine Göre Polarizasyon Dönüştürme Oranı

VO ₂ Dielektrik Sabiti	Frekans Aralığı (THz)	PCR
$\epsilon=9$	5,29-13,68	%88,40
$\epsilon=12$	5,20-13,61	%89,39



Şekil 30. Tasarlanan metamalzemenin ortogonal bileşenleri grafiği.

Önerilen polarizasyon dönüşüm cihazının çalışma prensibi hakkında bilgi edinmek için, yansıtıcı ve gelen dalga, dik bileşen olarak, yani Şekil 30 içerisinde yer alan modelde gösterilen u ve v yönleri olarak ayrıştırılabilir. u ve v eksenleri, x ve y eksenlerinden z eksenine göre 45° döndürülür. Şekil 30’da normal dalga altında y -polarize edilmiş gelen dalganın sırasıyla u -ekseni ve v -ekseni boyunca iki dik bileşene (E_u ve E_v) ayrıştırılabileceğini varsayarsak, y polarize gelen elektrik alan şu şekilde ifade edilebilir (Yu *et al.* 2022).

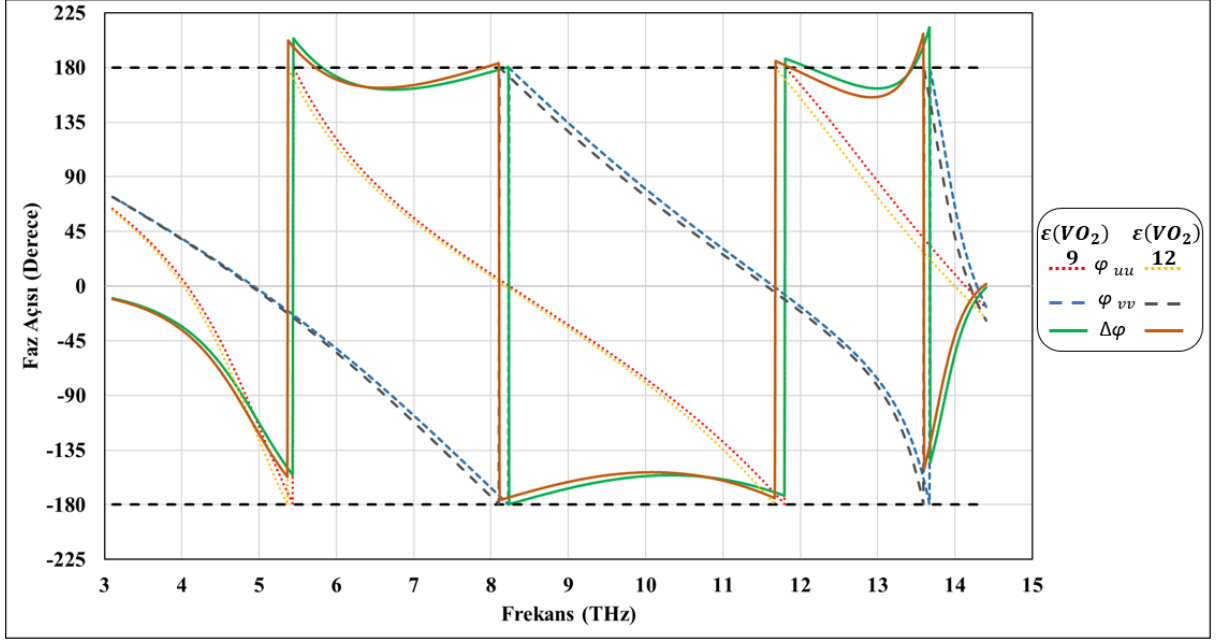
$$E_i = E_i \exp(jkz) \hat{e}_u + E_i \exp(jkz) \hat{e}_v \quad (37)$$

Yansıyan elektrik alanı

$$E_r = \{R_{uu}E_i \exp[j(-kz + \varphi_{uu})] + R_{uv}E_i \exp[j(-kz + \varphi_{uv})]\} \hat{e}_u + \{R_{vv}E_i \exp[j(-kz + \varphi_{vv})] + R_{vu}E_i \exp[j(-kz + \varphi_{vu})]\} \hat{e}_v \quad (38)$$

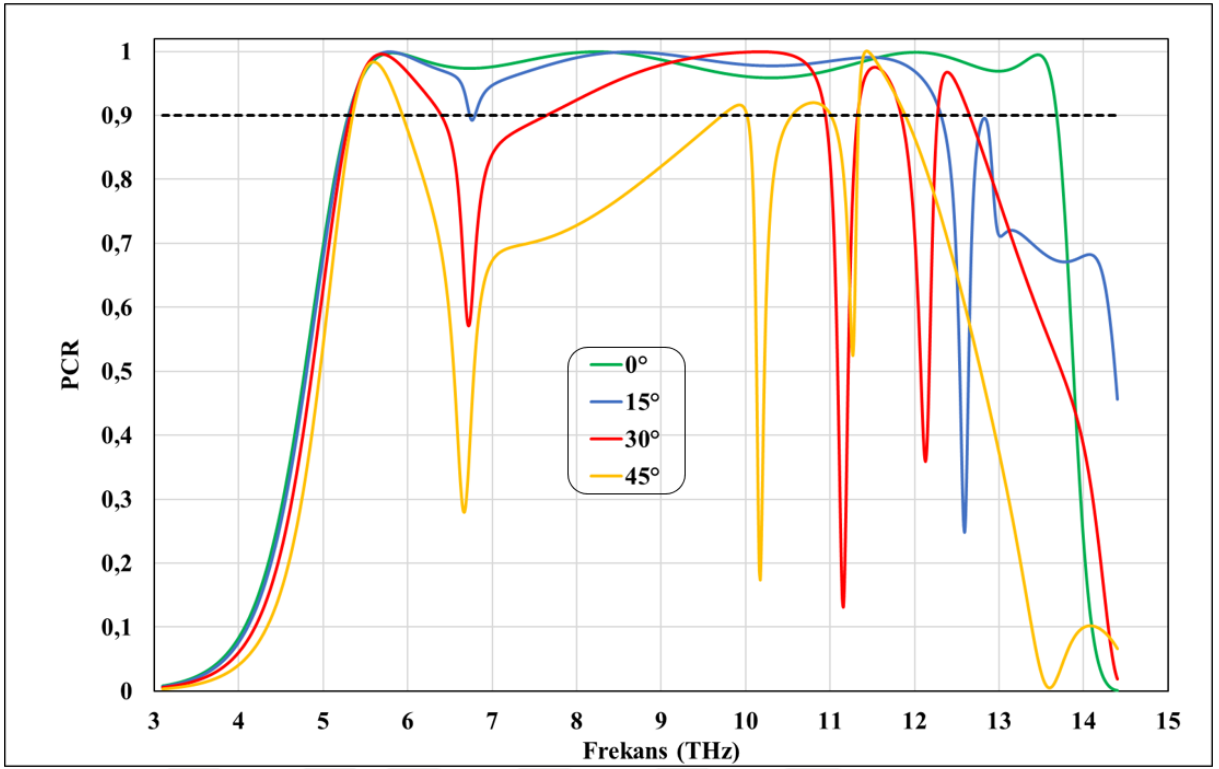
Burada R_{uu} , R_{vu} , R_{vv} ve R_{uv} sırasıyla u - u , u - v , v - v , v - u polarizasyon dönüşümü için yansıma katsayısının genliklerini belirtir. Ayrıca φ_{uu} , φ_{vu} , φ_{vv} ve φ_{uv} karşılık gelen fazlardır. $R_{uu} = R_{vv} = 1$, $R_{vu} = R_{uv} = 0$ ve $\Delta\varphi = \varphi_{uu} - \varphi_{vv} = 2n\pi \pm \pi$ ($n \in \mathbb{Z}$) olduğunda doğrusal polarize dalga elde edilebilir. Yani y polarize gelen dalga x polarize olarak yansıması için $+u$ yönlü bileşeni $+u$ yönünde, $+v$ yönlü bileşenin ise $-v$ yönünde yansıma gerekir. Şekil 31’de ortogonal bileşen R_{uv} ve R_{vu} nun yaklaşık sıfır olduğu, R_{vv} bileşeni yaklaşık tüm bant boyunca 0,9’dan büyük, R_{uu} ’da tüm bant boyunca 0,87 den büyüktür. Bu, üst rezonans yapısının u üzerinde herhangi bir polarizasyon dönüşüm etkisine sahip olmadığı anlamına gelir. u - ve v -polarize bileşen, yalnızca

aynı ortak polarize genliklerdir. Ortogonal bileşen grafiğine göre tasarlanan metamalzemenin iyi bir lineer polarizasyon dönüştürücü özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.



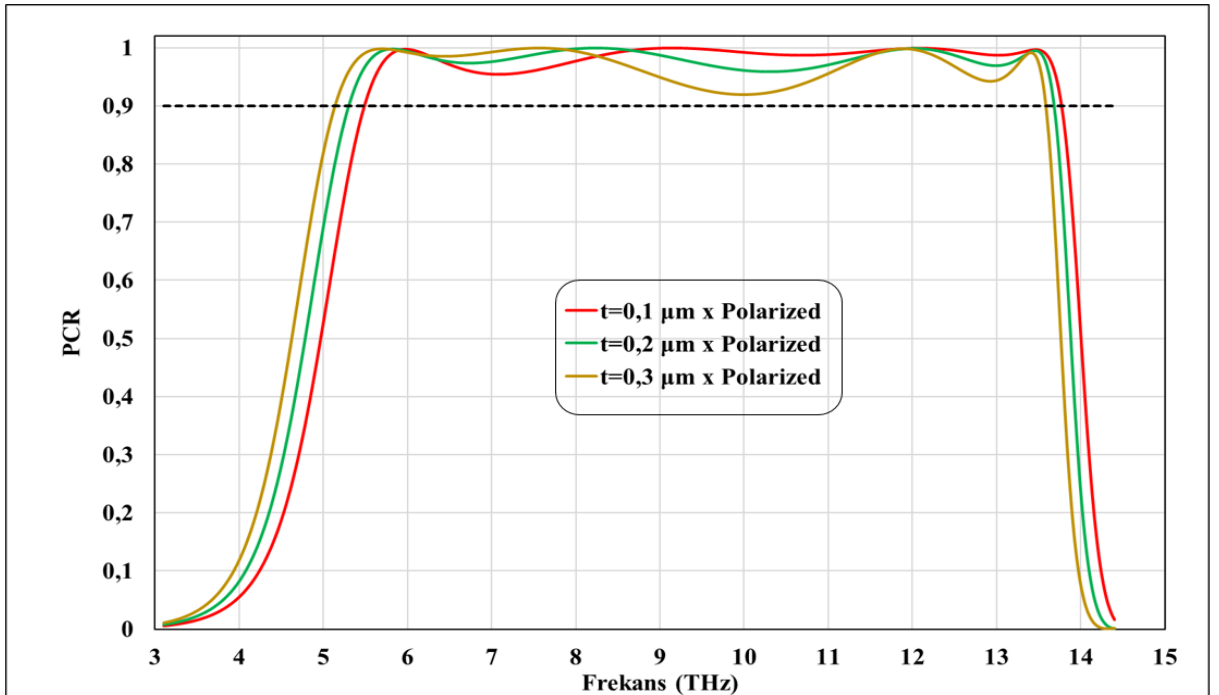
Şekil 31. Tasarlanan değiştirilebilir çok işlevli metamalzemenin faz farkı grafiği.

Şekil 31’de Bruggeman etkili modeli ile $\varepsilon(VO_2)$ 9 alındığında 5,29-13,68 THz çalışma bandında ortogonal bileşenleri faz farkının $\pm 180^\circ$ ($\pm 24^\circ$) olduğu görülmektedir. Drude Modeli ile $\varepsilon(VO_2)$ 12 alındığında 5,20-13,61 THz çalışma bandında ortogonal bileşenleri faz farkının $\pm 180^\circ$ olduğu görülmektedir. Geliştirilen modelde çalışma bant aralığında u ve v yönlerindeki faz farkı yaklaşık $\pm 180^\circ$, y yönünde gelen dalga u - v yönlerinde parçalanırsa yansımanın x yönünde olması için $+u$ gelen $+u$, $+v$ gelen $-v$ yansıdığı yani φ_{uv} yaklaşık $\pm 180^\circ$ olmuştur. Faz farkı grafiğine göre tasarlanan metamalzemenin iyi bir polarizasyon dönüştürücü özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.



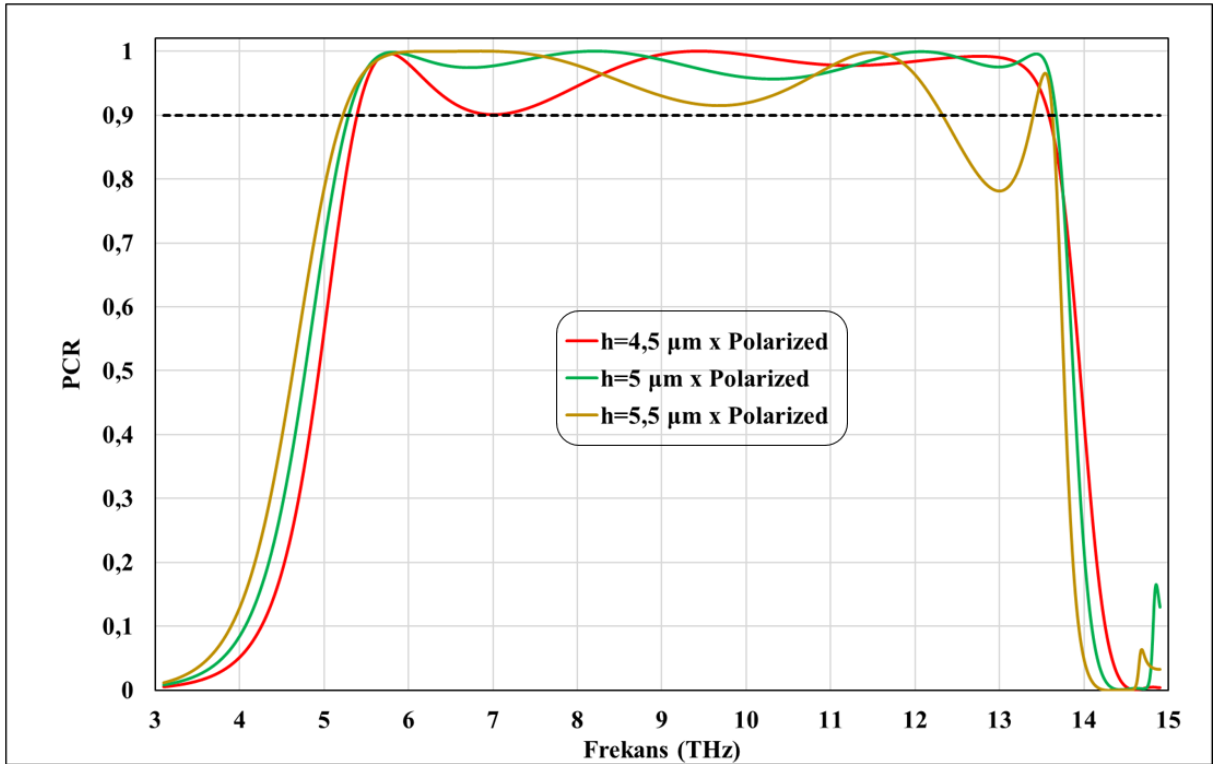
Şekil 32. Tasarlanan metamalzemenin geliş açısına göre PCR grafiği.

Şekil 32’de dalga açısının 0° ’den 45° ’ye artmasıyla PCR bant genişliğinin azaldığını hatta 15° ’den sonra PCR grafiğinin iyice bozulduğu görülmektedir. Bu nedenle tasarlanan metamalzemenin geliş açısına duyarlı olduğunu göstermektedir. Tasarlanan model normal geliş açısında en iyi performansını verdiği görülmektedir.



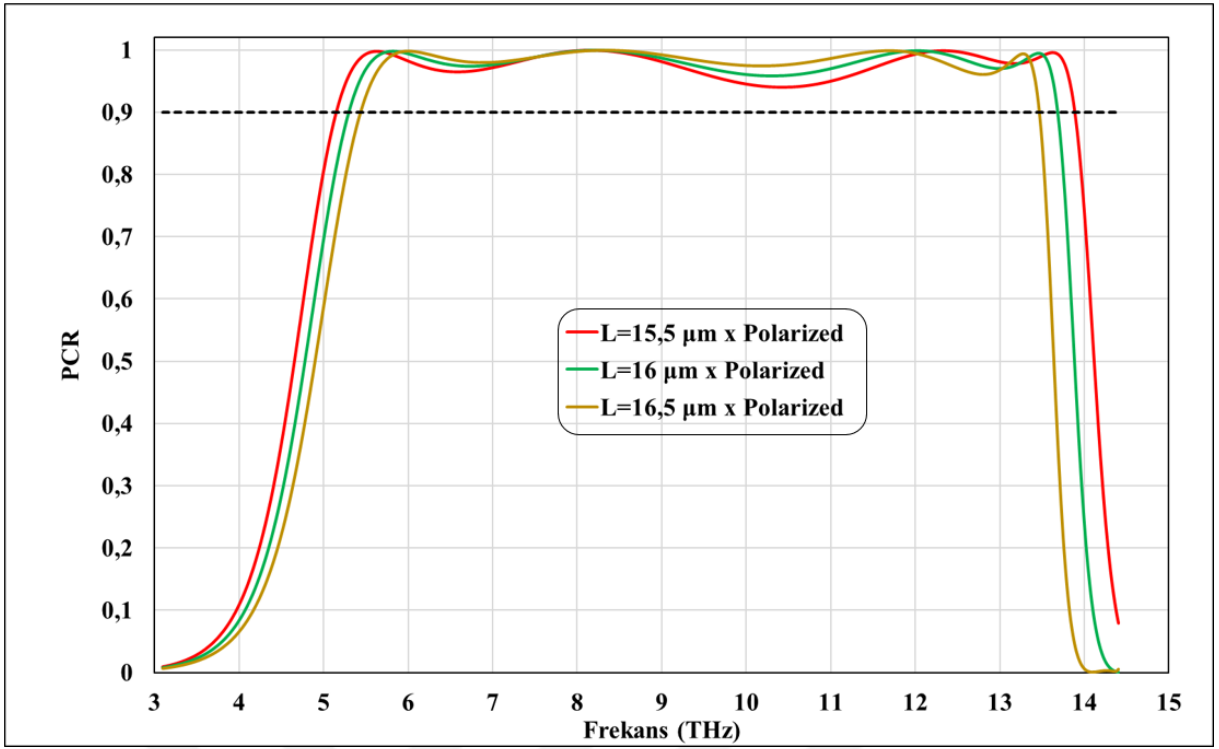
Şekil 33. Tasarlanan modelde t (kalınlık) parametresinin, bir alt ve bir üst değerlerinin PCR çizimi.

Bruggeman etkili modeli ile $\varepsilon(VO_2)$ 9 alındığında Şekil 33'te tasarlanan modelde en üst katmanda yer alan VO_2 -Au bileşeni ve üst katmanda yer alan Au yüzeyinin $t=0,2 \mu m$ olan kalınlığı ile bir alt ve bir üst kalınlık değerleri ile karşılaştırmalı grafiği çizilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere alt ve üst tabaka malzemelerin kalınlığı orantılı olarak bir kademe artırılıp azaldığı zaman kalınlık arttıkça bant genişliği bir alt kademeye kaydığı ve PCR grafiğinin bozulmaya başladığı görülmektedir. En üst katmanda yer alan VO_2 -Au bileşeni ve üst katmanda yer alan Au yüzeyini bir sonraki alt ve üst kademe kalınlıklarında ($t<0,1 \mu m$ ve $t>0,3 \mu m$) bozulma daha fazla olduğu için grafikte yer verilmemiştir. Buna göre en uygun PCR değerinin tasarlanan modelde olduğu gibi $t=0,2 \mu m$ değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 34. Tasarlanan modelde h (kalınlık) parametresinin, bir alt ve bir üst değerlerinin PCR çizimi.

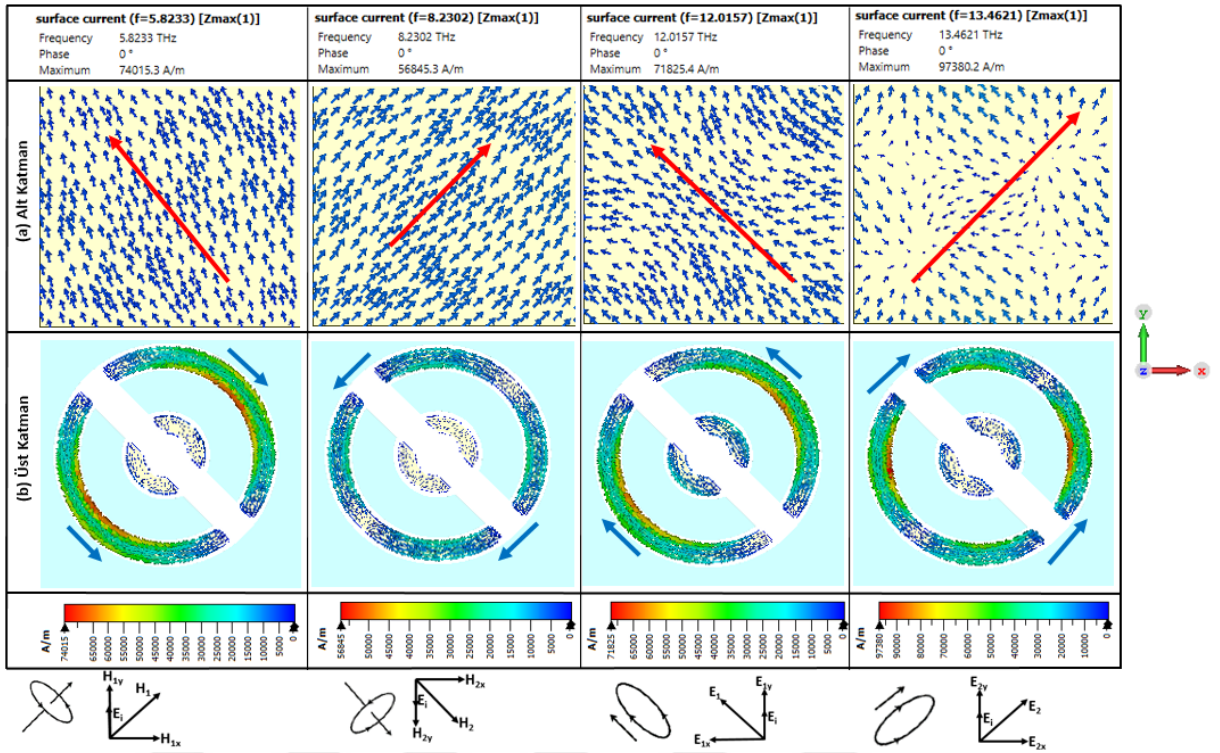
Bruggeman etkili modeli ile $\varepsilon(VO_2)$ 9 alındığında Şekil 34'te tasarlanan model orta malzemenin kalınlığı $h=5 \mu m$ kalınlığının bir alt ve bir üst kalınlık değerleri ile karşılaştırmalı grafiği çizilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere orta tabaka malzemenin kalınlığı orantılı olarak bir kademe artırılıp azaldığı zaman kalınlık arttıkça bant genişliği bir alt kademeye kaydığı ve PCR grafiğinin bozulmaya başladığı görülmektedir. En üst katmanda yer alan VO_2 -Au bileşeni ve üst katmanda yer alan Au yüzeyini bir sonraki kalınlıklarında ($h<4,5 \mu m$ ve $h>5,5 \mu m$) bozulma daha fazla olduğu için grafikte yer verilmemiştir. Ancak en uygun PCR değerinin tasarlanan modelde olduğu gibi $h=5 \mu m$ değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 35. Tasarlanan modelde L (en-boy) parametresinin, bir alt ve bir üst değerlerinin PCR grafiği.

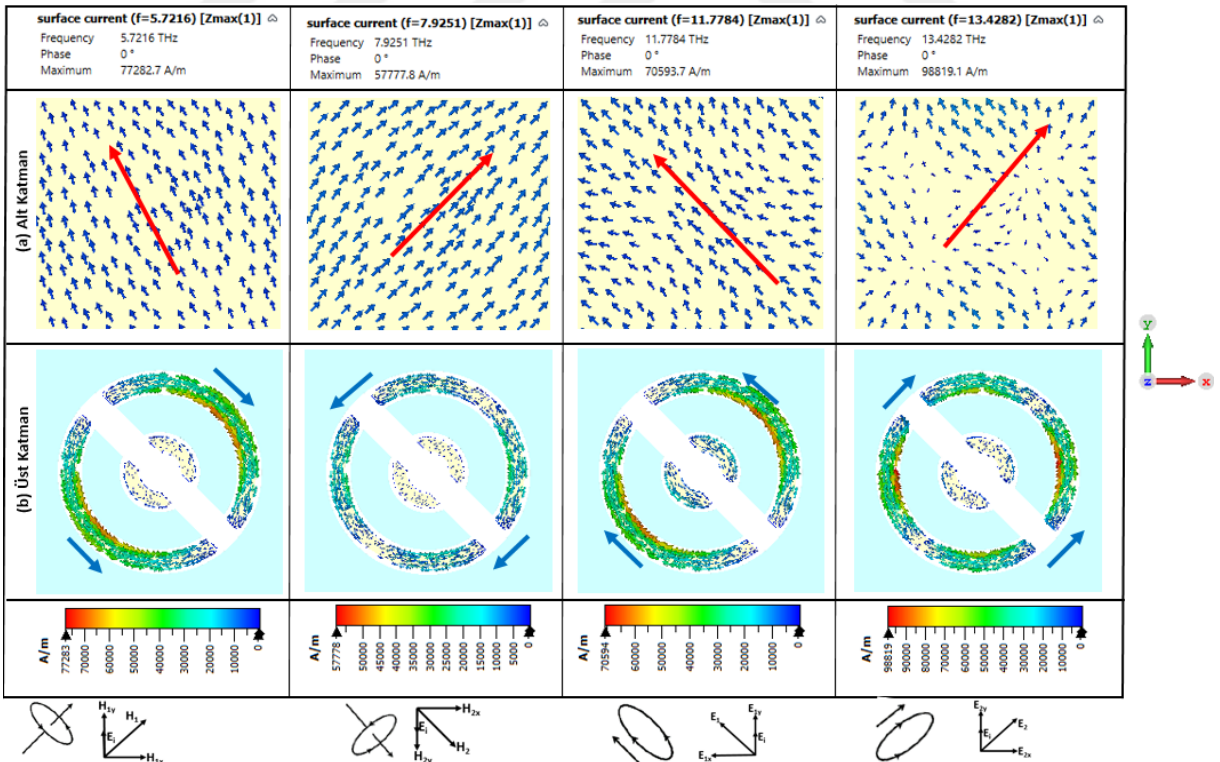
Bruggeman etkili modeli ile $\varepsilon(VO_2)$ 9 alındığında Şekil 35'te tasarlanan modelin orta katmanı olan Rogers RT5880LZ en boy oranının orantılı olarak bir alt ve bir üst kademe değerleri ile karşılaştırmalı grafiği çizilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere orta tabaka malzemenin $L=16 \mu m$ değerinden $L=15,5 \mu m$ değerine düşürüldüğünde bant genişliğinin arttığı ancak PCR grafiğinin kötüleşmeye başladığı görülmektedir. Aynı zamanda orta tabaka malzemenin $L=16 \mu m$ değerinden $L=16,5 \mu m$ değerine yükseltildiğinde bant genişliğinin daraldığı ancak PCR grafiğinin iyileşmeye başladığı görülmektedir. En üst katmanda yer alan VO_2 -Au bileşeni ve üst katmanda yer alan Au yüzeyini bir sonraki kalınlıklarında ($L < 15,5 \mu m$ ve $L > 16,5 \mu m$) değişim artmaya başladığı için grafikte yer verilmemiştir. Ancak en uygun PCR değerinin tasarlanan modelde olduğu gibi $L=16 \mu m$ değerinde olduğu görülmektedir.

Yine aynı şekilde Drude modeli ile $\varepsilon(VO_2)$ 12 alındığında da t (kalınlık), h (kalınlık) ve L (en-boy) parametresi değişiminin PCR grafiğine etkisi Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29'daki grafiklerde göz önüne alındığında Şekil 33, Şekil 34 ve Şekil 35'teki benzer değişimler görülebilir.



Şekil 36. Tasarlanan modelin $\varepsilon(VO_2) = 9$ akım yoğunluğu.

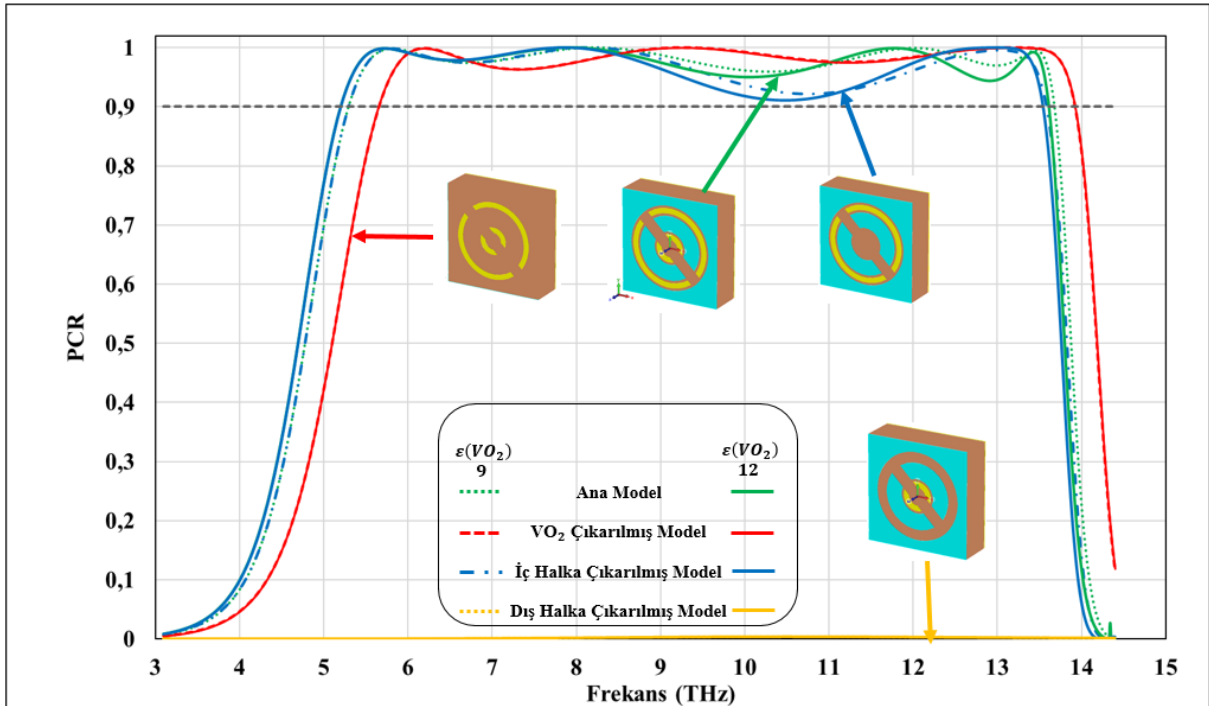
Şekil 36’da $\varepsilon(VO_2)$ 9 alınarak 5,82 THz, 8,23 THz, 12,02 THz ve 13,46 THz rezonans noktalarında akım yoğunlukları CST programı ile çizilmiştir.



Şekil 37. Tasarlanan modelin $\varepsilon(VO_2) = 12$ akım yoğunluğu.

Şekil 37’de $\varepsilon(VO_2)$ 12 alınarak 5,72 THz, 7,93 THz, 11,78 THz ve 13,43 THz rezonans noktalarında akım yoğunlukları CST programı ile çizilmiştir. Şekil 36 ve Şekil 37’de $\varepsilon(VO_2)$ 9 ve $\varepsilon(VO_2)$ 12 akım yoğunluklarının yönlerinin benzer olduğu görülmektedir. Polarizasyon

dönüşümünün fiziksel mekanizmasını daha iyi anlamak için, yüzey akımlarının simüle edilmiş dağılımları Şekil 37’de $\epsilon(VO_2)$ 12 alınarak 5,72 THz, 7,93 THz, 11,78 THz ve 13,43 THz rezonans frekansında akım yoğunlukları CST programı ile çizilmiştir. Üst ve alt katmanlar arasında 5,72 ve 7,93 ve 13,43 THz'deki anti-faz akımlarının (zıt akım yoğunluklarının) metamalzeme dönüştürücüde manyetik dipollerin ve manyetik rezonansların oluşmasını sağlamıştır. 11,78 THz de alt ve üst katmanlardaki aynı yönlü akım yoğunlukları elektriksel rezonansın oluşmasını sağlamıştır. Metamalzeme dönüştürücüdeki manyetik ve elektriksel rezonanslar geniş bir bant aralığı için polarizasyon dönüşümünün gerçekleşmesini sağlamıştır. Manyetik rezonans ve elektrik rezonans sırasıyla indüklenen manyetik alan H_1 , H_2 ve elektrik alanı E_1 , E_2 'yi oluşturur. Polarizasyon dönüşümünün etkisi açısından, H_{1y} ve H_{2y} (y yönünde indüklenen H_1 ve H_2 manyetik alanının bileşeni) gelen elektrik alanı E_i 'ye paraleldir ve bu da çapraz polarizasyonla sonuçlanır. Bununla birlikte, H_{1x} ve H_{2x} bileşenleri gelen E_i elektrik alanına dik olduğundan ortak polarizasyon mevcut olacaktır. Bunun tersine, E_x (x yönünde indüklenen elektrik alanı E bileşeni) gelen elektrik alanına E_i diktir, dolayısıyla E_x ve E_i arasında çapraz bağlantı vardır. E_x , polarizasyon dönüşümüne katkıda bulunur. İndüklenen elektrik alanı E 'nin E_y bileşeni, gelen elektrik alanı E_i 'ye paraleldir, çapraz bağlantıda oluşamaz çünkü E_y bileşeni gelen elektrik alanıyla aynı yöne sahiptir. Başka bir deyişle H_y ve E_x bileşeni, gelen elektrik alanının aynı yönde olması nedeniyle y'den x'e polarizasyon dönüşümü gerçekleşmiş olur. Aynı durum Şekil 36 için de geçerli olduğu görülmektedir.



Şekil 38. Tasarlanan modelin, modelin VO_2 'siz ve iç halkasız PCR grafiği.

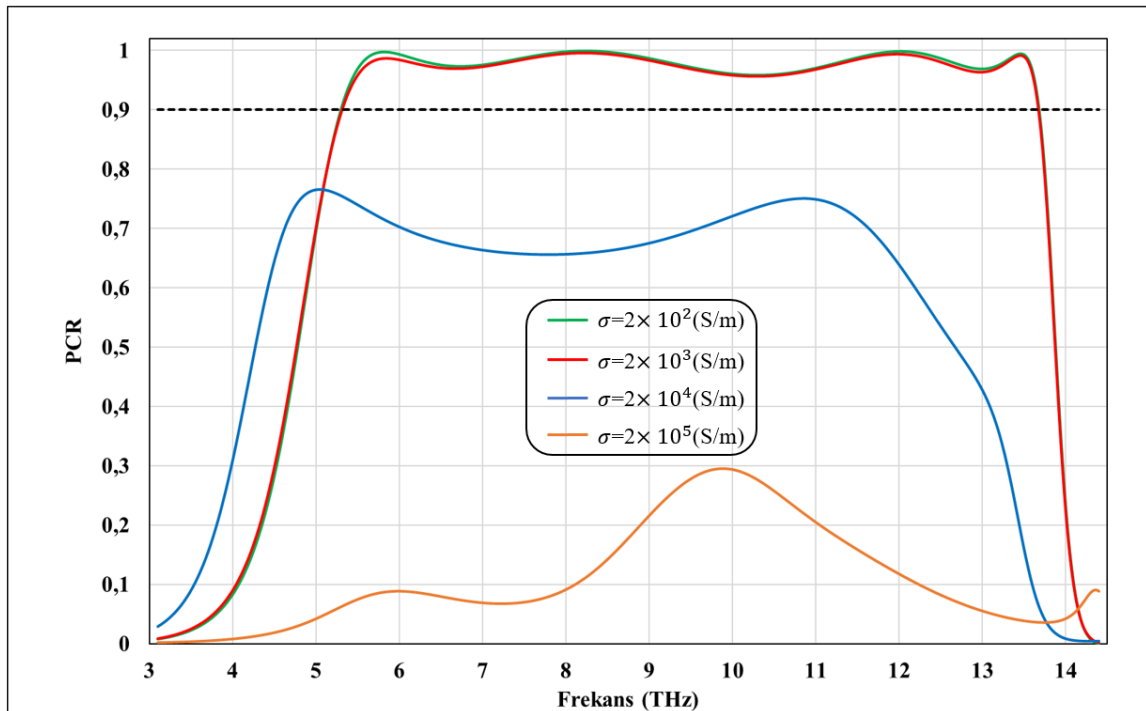
Şekil 38’de tasarlanan metamalzemenin, VO_2 çıkarılmış halinin, Au malzemeden yapılmış iç halka ve dış halka çıkarılmış hali ile PCR verileri aynı grafikte çizilmiştir.

Bruggeman etkili modeli ile $\varepsilon(VO_2)$ 9 ve Drude modeli ile $\varepsilon(VO_2)$ 12 alınarak Şekil 38'den elde edilen verilerle oluşturulan Tablo 7 ile metamalzemedeki kullanılan yapıların Göreceli Bant Genişliği (RBW) ve PCR etkileri incelenmiştir.

Tablo 7. Metamalzemedeki Parçaların Polarizasyon Dönüştürme Etkileri

Parametreler	Model Türü				
	Ana Model		İç Halka Kullanılmayan Model		VO ₂ Kullanılmayan Model
$\varepsilon(VO_2)$	9	12	9	12	-
PCR %90 Üzeri Frekans Aralığı (THz)	5,29-13,68	5,20-13,61	5,18-14,12	5,20-13,54	5,65-13,91
Bant Genişliği (THz)	8,38	8,41	8,94	8,34	8,26
RBW	%88,40	%89,39	%92,67	%88,99	%84,41
PCR >%96	5,46-13,62 THz	5,35-9,62 THz ve 10,47-12,64 THz	5,46-9,46 THz ve 11,98-13,47 THz	5,36-9,09 THz ve 11,70-13,48 THz	5,65-13,79 THz
>%96 PCR Bant Genişliği	8,16	6,44	5,49	5,51	8,14

Şekil 38'deki grafikten yola çıkılarak oluşturulan Tablo 7'de görüldüğü üzere iç halka çıkarılmış olması ile ana modele göre RBW 0,5 THz arttığı ancak PCR bant aralığının %96 üzeri dönüştürme oranı frekans aralığının azaldığı görülmüştür. VO₂ çıkarıldığı zaman ise hem RBW'nin hem de PCR bant genişliğinin azaldığı görüldüğünden VO₂'nin metamalzemeye etkisi görülmektedir.



Şekil 39. Tasarlanan modelde VO₂'nin farklı iletkenlik seviyesine göre PCR grafiği.

VO₂ sıcaklığa göre farklı iletkenlik seviyesine sahip olduğundan VO₂ 25°C sıcaklığındaki iletkenlik değeri olan $\sigma=200$ (S/m) değerinden $\sigma=2 \times 10^5$ (S/m) değerine kadar PCR grafiği çizilmiştir (Şekil 39). Bu şekilde VO₂'nin sıcaklığa göre değişen iletkenlik değerinin, tasarlanan metamalzemeye etkisi görülmektedir. VO₂ iletkenliği değişken sıcaklıkla birlikte değiştiğinden dolayı VO₂ filmi yalıtkan durumdan metalik duruma geçtiği görülmekte olup bu nedenle EM dalga faz geçişine yol açabileceği görülmektedir. Bu nedenden dolayı dinamik polarizasyon dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Literatürde THz bölgesinde VO₂ kullanılarak yapılan polarizasyon dönüştürücüler incelendiğinde Bruggeman etkili modeli ve Drude modeli kullanılarak VO₂'nin dielektrik sabiti ile yapılan kıyaslama bulunamamış olup, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar literatürde tespit edilen bazı THz bölgesinde VO₂ ile yapılan polarizasyon dönüştürücüleri ile kıyaslaması Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de görüldüğü üzere VO₂'nin dielektrik sabiti Bruggeman etkili modeli ile 8,39 THz ve Drude modeli ile 8,41 THz bant genişliğinde polarizasyon dönüşümü sağlayan ve 5,4 μ m kalınlığından daha incelikte benzer bir çalışma ile karşılaşılmamıştır.

Tablo 8. Önerilen Polarizasyon Dönüştürücünün Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması

Referans	$\epsilon(VO_2)$	Bant Aralığı (THz)	Bant Genişliği (THz)	PCR	RBW	Kalınlık (μ m)
Xiao <i>et al.</i> 2017	9	2,10-5,03	2,93	>%90	%82,19	10,4
Zheng <i>et al.</i> 2018	9	4,95-9,39	4,44	>%90	%61,92	4,42
Yang <i>et al.</i> 2018	9	2,06-4,26	2,2	>%90	%69,62	11,4
Yang <i>et al.</i> 2020	12	1,99-3,46	1,47	>%90	%53,94	34,4
Zhang <i>et al.</i> 2021	N	0,744-1,782	1,04	>%90	%82,19	30,3
Zhang <i>et al.</i> 2022	N	0,68-1,60	0,92	>%90	%80,70	47,6
Yu <i>et al.</i> 2022	9	2,22-5,42	3,2	>%90	%83,77	10,4
Yu <i>et al.</i> 2022	9	2,03-5	2,97	>%89	%84,50	10,4
Zhao <i>et al.</i> 2022	12	0,62-1,70	1,08	>%90	%93,10	40
Zhang <i>et al.</i> 2023	12	2,9-8,4	5,5	>%90	%97,35	18,9
Niu <i>et al.</i> 2023	12	2,54-4,55	2,01	>%90	%56,70	8,84
Lian <i>et al.</i> 2023	12	2,12-3,58	1,46	>%90	%51,23	30
Lian <i>et al.</i> 2023	12	0,49-1,87	1,38	>%90	%116,95	66
Bu Çalışmada	9	5,29-13,68	8,39	>%90	%88,40	5,4
	12	5,20-13,61	8,41	>%90	%89,39	

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırmada $\text{VO}_2\text{-Au}$ bileşimi üst katman, orta katman Rogers RT5880LZ ve alttaş malzeme olarak Au kullanılarak THz bölgesinde tek katmanlı, yüksek verimli ve geniş bant polarizasyon dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bruggeman etkili modeli ile $\varepsilon(\text{VO}_2)$ 9 ve Drude modeli ile $\varepsilon(\text{VO}_2)$ 12 alınarak tasarlanan metamalzemedeki karşılaştırmalar yapılmıştır. VO_2 kullanılarak tasarlanan metamalzemenin Bruggeman etkili modeli ile $\varepsilon(\text{VO}_2)$ 9 alındığında %90 ve üzeri PCR frekans aralığı 5,29-13,68 THz olup RBW %88,40 bulunmuş, 5,46-13,62 THz aralığında PCR değeri en az %96 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda Drude modeli ile $\varepsilon(\text{VO}_2)$ 12 alındığında %90 ve üzeri PCR frekans aralığı 5,20-13,61 THz olup RBW %89,39 bulunmuş, 5,35-9,62 THz ile 10,47-12,64 THz aralığında PCR değeri en az %96 olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan metamalzemedeki alt ve orta katmanın dışında üst katmanda yer alan dış halkanın önemli bir etmen olduğu, iç halkanın polarizasyon dönüştürme etkisini artırdığı, VO_2 kullanımının polarizasyon dönüştürme oranını bir miktar artırdığı görülmüştür. VO_2 'nin sıcaklığa göre iletkenlik seviyesinin değişmesinden dolayı da dinamik bir metamalzeme tasarlanmıştır. $\text{VO}_2\text{-Au}$ bileşimi üst katman, orta katman Rogers RT5880LZ ve alttaş malzeme olarak Au kullanılarak $\varepsilon(\text{VO}_2)$ 9 alındığında yaklaşık 8,39 THz, $\varepsilon(\text{VO}_2)$ 12 alındığında ise yaklaşık 8,41 THz bant genişliğinde %90 üzerinde polarizasyon dönüşüm yapan ve 5,4 μm kalınlığında uyarlanabilir, yüksek verimli bir model oluşturulmuştur.

KAYNAKÇA

- Ahmed, F., Khan, M. I., Tahir, F. A., 2021. A multifunctional polarization transforming metasurface for C-, X-, and K-band applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(11), 2186-2190.
- Akkaş, M. A., 2018. Terahertz teknolojisi uygulamaları ve terahertz dalgalarının kablosuz haberleşme için elektromanyetik modellemesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(1), 190-200.
- Asim, M. T., 2017. Modeling and Simulations of Metamaterial based Microwave Devices. (Doctoral dissertation), Institute of Engineering and Applied Sciences, Pakistan.
- Bute, M., 2018. Investigation of Near Field Effects on Retrieval of Electromagnetic Properties of Chiral Metamaterials and Coupling Effects of Nearby Metamaterials. Ph. D. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gaziantep.
- Chen, M., Chang, L., Gao, X., Chen, H., Wang, C., Xiao, X., Zhao, D., 2017. Wideband tunable cross polarization converter based on a graphene metasurface with a hollow-carved “H” array. *IEEE Photonics Journal*, 9(5), 1-11.
- Cheng, H., Chen, S., Yu, P., Liu, W., Li, Z., Li, J., Xie, B., Tian, J., 2015. Dynamically tunable broadband infrared anomalous refraction based on graphene metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 3(12), 1744-1749.
- Choi, S. B., Kyoung, J. S., Kim, H. S., Park, H. R., Park, D. J., Kim, B. J., Ahn, Y. H., Rotermund, F., Kim, H.T., Ahn, K. J., Kim, D. S., 2011. Nanopattern enabled terahertz all-optical switching on vanadium dioxide thin film. *Applied Physics Letters*, 98(7).
- Couto, M. M., Silva, M. W. B., Campos, A. L. P. S., 2021. A novel ultra-wideband reflective cross-polarization converter based on anisotropic metasurface. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35(12), 1652-1662.
- Cui, T. J., Liu, R., Smith, D. R., 2010. Introduction to Metamaterials. *Metamaterials: Theory, Design, and Applications*, 1-19.
- Dobroiu, A., Otani, C., Kawase, K., 2006. Terahertz-wave sources and imaging applications. *Measurement Science and Technology*, 17(11), R161.
- Fan, G., Sun, K., Hou, Q., Wang, Z., Liu, Y., Fan, R., 2021. Epsilon-negative media from the viewpoint of materials science. *EPJ Applied Metamaterials*, 8, 11.
- Fei, P., Vandenbosch, G. A., Guo, W., Wen, X., Xiong, D., Hu, W., Zheng, Q., Chen, X., 2020. Versatile cross-polarization conversion chiral metasurface for linear and circular polarizations. *Advanced Optical Materials*, 8(13), 2000194.
- Fu, C., Sun, Z., Han, L., Liu, C., Sun, T., Chu, P. K., 2019. High-efficiency dual-frequency reflective linear polarization converter based on metasurface for microwave bands. *Applied Sciences*, 9(9), 1910.
- Fu, G., Polity, A., Volbers, N., Meyer, B. K., 2006. Annealing effects on VO₂ thin films deposited by reactive sputtering. *Thin Solid Films*, 515(4), 2519-2522.
- Fukunaga, K., Hosako, I., Duling III, I. N., Picollo, M., 2009. Terahertz imaging systems: a non-invasive technique for the analysis of paintings. In *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology II* (Vol. 7391, pp. 119-127). SPIE.

- Gao, J., Wang, C., Qiang, T., Zhang, K., Wu, Q., 2018. Multifunctional polarization converter based on dielectric metamaterial. *Physica Status Solidi*, 215(11), 1700535.
- Gao, X., Han, X., Cao, W. P., Li, H. O., Ma, H. F., Cui, T. J., 2015. Ultrawideband and high-efficiency linear polarization converter based on double V-shaped metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(8), 3522-3530.
- Hsiao, H. H., Chu, C. H., Tsai, D. P., 2017. Fundamentals and applications of metasurfaces. *Small Methods*, 1(4), 1600064.
- Hu, Q., Chen, K., Zhang, N., Zhao, J., Jiang, T., Zhao, J., Feng, Y., 2022. Arbitrary and Dynamic Poincaré Sphere Polarization Converter with a Time-Varying Metasurface. *Advanced Optical Materials*, 10(4), 2101915.
- Huang, C. X., Zhang, J. J., Wu, L., Zhang, C., Yang, J., Yang, L. X., Ke, J. C., Bai, L., Cheng, Q., Cui, T. J., 2020. Multi-Band tunable chiral metamaterial for asymmetric transmission and absorption of linearly polarized electromagnetic waves. *Advanced Theory and Simulations*, 3(12), 2000179.
- Ishimaru, A., Jaruwatanadilok, S., Kuga, Y., 2005. Generalized surface plasmon resonance sensors using metamaterials and negative index materials. *Progress In Electromagnetics Research*, 51, 139-152.
- Kamal, B., Chen, J., Yingzeng, Y., Ren, J., Ullah, S., Khan, W. U. R., 2021. High efficiency and ultra-wideband polarization converter based on an L-shaped metasurface. *Optical Materials Express*, 11(5), 1343-1352.
- Kaschke, J., Blume, L., Wu, L., Thiel, M., Bade, K., Yang, Z., Wegener, M., 2015. A helical metamaterial for broadband circular polarization conversion. *Advanced Optical Materials*, 3(10), 1411-1417.
- Khan, M. I. and Tahir, F. A., 2018. A broadband cross-polarization conversion anisotropic metasurface based on multiple plasmon resonances. *Chinese Physics B*, 27(1), 014101.
- Khan, M. I., 2018. Design and Analysis of Metasurfaces for Polarization Conversion of Electromagnetic Waves. (Doctoral dissertation), Institute of Engineering, Islamabad.
- Khan, M. I., Hu, B., Amanat, A., Ullah, N., Khan, M. J. I., Khalid, A. R., 2020. Efficient asymmetric transmission for wide incidence angles using bi-layered chiral metasurface. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(30), 305004.
- Khan, M. I., Hu, B., Chen, Y., Ullah, N., Khan, M. J. I., Khalid, A. R., 2020. Multiband efficient asymmetric transmission with polarization conversion using chiral metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(7), 1137-1141.
- Khan, M. I., Khalid, Z., Tahir, F. A., 2019. Linear and circular-polarization conversion in X-band using anisotropic metasurface. *Scientific Reports*, 9(1), 4552.
- Kundtz, N., Smith, D. R., 2010. Extreme-angle broadband metamaterial lens. *Nature materials*, 9(2), 129-132.
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., Padilla, W. J., 2008. Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 100(20), 207402.
- Leitis, A., Tseng, M. L., John-Herpin, A., Kivshar, Y. S., Altug, H., 2021. Wafer-Scale functional metasurfaces for mid-infrared photonics and biosensing. *Advanced Materials*, 33(43), 2102232.
- Li, W., Sun, J., Su, C., Gao, P., Wang, X., Liu, X., Xia, F., Zhang, K., Dong, L., Yun, M., 2023. Dual-pattern broadband polarization converter in THz band based on graphene and VO₂ hybrid metasurface. *Results in Physics*, 107021.

- Li, Y., Cao, Q., Wang, Y., 2018. A wideband multifunctional multilayer switchable linear polarization metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(7), 1314-1318.
- Li, Z. Y., Li, S. J., Han, B. W., Huang, G. S., Guo, Z. X., Cao, X. Y., 2021. Quad-band transmissive metasurface with linear to dual-circular polarization conversion simultaneously. *Advanced Theory and Simulations*, 4(8), 2100117.
- Lian, X., Ma, M., Tian, J., Yang, R., 2023. Study on a bifunctional switchable metasurface with perfect absorption and polarization conversion based on VO₂ and graphene in THz region. *Diamond and Related Materials*, 110060.
- Lim, S., Caloz, C., Itoh, T., 2004. Metamaterial-based electronically controlled transmission-line structure as a novel leaky-wave antenna with tunable radiation angle and beamwidth. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 52(12), 2678-2690.
- Lin, B. Q., Lv, L. T., Guo, J. X., Wang, Z. L., Huang, S. Q., Wang, Y. W., 2020. Ultra-wideband linear-to-circular polarization conversion metasurface. *Chinese Physics B*, 29(10), 104205.
- Lin, B., Lv, L., Guo, J., Liu, Z., Ji, X., Wu, J., 2020. An ultra-wideband reflective linear-to-circular polarization converter based on anisotropic metasurface. *IEEE Access*, 8, 82732-82740.
- Lin, M., Huang, X., Deng, B., Zhang, J., Guan, D., Yu, D., Qin, Y., 2020. A high-efficiency reconfigurable element for dynamic metasurface antenna. *IEEE Access*, 8, 87446-87455.
- Liu, H., Wang, Z. H., Li, L., Fan, Y. X., Tao, Z. Y., 2019. Vanadium dioxide-assisted broadband tunable terahertz metamaterial absorber. *Scientific reports*, 9(1), 5751.
- Lv, T. T., Li, Y. X., Ma, H. F., Zhu, Z., Li, Z. P., Guan, C. Y., Shi, J. H., Zhang, H., Cui, T. J., 2016. Hybrid metamaterial switching for manipulating chirality based on VO₂ phase transition. *Scientific Reports*, 6(1), 23186.
- Ma, W., Cheng, F., Liu, Y., 2018. Deep-learning-enabled on-demand design of chiral metamaterials. *ACS Nano*, 12(6), 6326-6334.
- Mahmood, N., 2020. Electromagnetic Wave Manipulation and Structuring via Ultrathin Metamaterials (Issue Dec). National University of Sciences and Technology (Nust).
- Mao, C., Yang, Y., He, X., Zheng, J., Zhou, C., 2017. Broadband reflective multi-polarization converter based on single-layer double-L-shaped metasurface. *Applied Physics A*, 123(12), 767.
- Mei, Z. L., Ma, X. M., Lu, C., Zhao, Y. D., 2017. High-efficiency and wide-bandwidth linear polarization converter based on double U-shaped metasurface. *Aip Advances*, 7(12).
- Michel, A. U., Meyer, S., Essing, N., Lassaline, N., Lightner, C. R., Bisig, S., Norris, D. J., Chigrin, D. N., 2021. The potential of combining thermal scanning probes and phase-change materials for tunable metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 9(2), 2001243.
- Monticone, F., Estakhri, N. M., Alù, A., 2013. Full Control of Nanoscale Optical Transmission with a Composite Metascreen. *Physical Review Letters*, 110(20), 203903.
- Morin, F. J., 1959. Oxides Which Show a Metal-to-Insulator Transition at the Neel Temperature. *Physical review letters*, 3(1), 34.
- Nagatsuma, T., Ducournau, G., Renaud, C. C., 2016. Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nature Photonics*, 10(6), 371-379.
- Nguyen, T. K. T., Nguyen, T. M., Nguyen, H. Q., Cao, T. N., Le, D. T., Bui, X. K., Bui, S. T., Truong, C. L., Vu, D. L., Nguyen, T. Q. H., 2021. Simple design of efficient broadband

- multifunctional polarization converter for X-band applications. *Scientific Reports*, 11(1), 2032.
- Nguyen, T. Q. H., Nguyen, T. K. T., Cao, T. N., Nguyen, H., Bach, L. G., 2020. Numerical study of a broadband metamaterial absorber using a single split circle ring and lumped resistors for X-band applications. *AIP Advances*, 10(3).
- Ni, X., Ishii, S., Kildishev, A. V., Shalaev, V. M., 2013. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses. *Light: Science & Applications*, 2(4), e72–e72.
- Nguyen, T. Q. H., Nguyen, T. K. T., Nguyen, T. Q. M., Cao, T. N., Phan, H. L., Luong, N. M., Le, D. T., Bui, X. K., Truong, C. L., Vu, D. L., 2021. Simple design of a wideband and wide-angle reflective linear polarization converter based on crescent-shaped metamaterial for Ku-band applications. *Optics Communications*, 486, 126773
- Niu, J., Yao, Q., Mo, W., Li, C., Zhu, A., 2023. Switchable bi-functional metamaterial based on vanadium dioxide for broadband absorption and broadband polarization in terahertz band. *Optics Communications*, 527, 128953.
- Ozturk, G., 2022. Ultra-thin, wide-angle and bandwidth-enhanced linear and circular metasurface-based reflection-type polarization converter at X-band microwave frequency. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36(10), 1423-1435.
- Ozturk, G., Hasar, U. C., Bute, M., Ertugrul, M., 2020. Determination of constitutive parameters of strong-coupled bianisotropic metamaterials using oblique incidence scattering parameters. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(2), 918-927
- Ozyuzer, L., Koshelev, A. E., Kurter, C., Gopalsami, N., Li, Q., Tachiki, M., Kodowaki, K., Yamamoto, T., Minami, H., Yamaguchi, H., Tachiki, T., Gray, K. E., Kwok, W. K., Welp, U., 2007. Emission of coherent THz radiation from superconductors. *Science*, 318(5854), 1291-1293.
- Öztürk, G., 2023. Metamalzemeler ve Güncel Uygulama Alanları. *Elektrik Elektronik Mühendisliğinde Güncel Yaklaşımlar*, Akçay, L., Öztürk, G. Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 61-77.
- Pawar, A. Y., Sonawane, D. D., Erande, K. B., Derle, D. V., 2013. Terahertz technology and its applications. *Drug Invention Today*, 5(2), 157-163.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., Stewart, W. J., 1998. Low frequency plasmons in thin-wire structures. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(22), 4785.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., Stewart, W. J., 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11), 2075-2084.
- Pendry, J. B., Schurig, D., Smith, D. R., 2006. Controlling electromagnetic fields. *science*, 312(5781), 1780-1782.
- Pfeiffer, C., Emani, N. K., Shaltout, A. M., Boltasseva, A., Shalaev, V. M., Grbic, A., 2014. Efficient light bending with isotropic metamaterial huygens' surfaces. *Nano Letters*, 14(5), 2491–2497.
- Phan, D. T., Nguyen, T. K. T., Nguyen, N. H., Le, D. T., Bui, X. K., Vu, D. L., Truong, C. L., Nguyen, T. Q. H., 2021. Lightweight, ultra-wideband, and polarization-insensitive metamaterial absorber using a multilayer dielectric structure for C- and X-band applications. *Physica Status Solidi (B)*, 258(10), 2100175.
- Qiu, Y., Yan, D. X., Feng, Q. Y., Li, X. J., Zhang, L., Qiu, G. H., Li, J. N., 2022. Vanadium dioxide-assisted switchable multifunctional metamaterial structure. *Optics Express*, 30(15), 26544-26556.

- Salman, M. S., Khan, M. I., Tahir, F. A., Rmili, H., 2020. Multifunctional single layer metasurface based on hexagonal split ring resonator. *IEEE Access*, 8, 28054–28063.
- Sevgi, L., 1999. *Elektromagnetik Problemler ve Sayısal Yöntemler*. Birsen, 214, Türkiye.
- Smith, D. R., Vier, D. C., Kroll, N., Schultz, S., 2000. Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, 77(14), 2246-2248.
- Sun, H., Gu, C., Chen, X., Li, Z., Liu, L., Xu, B., Zhou, Z., 2017. Broadband and broad-angle polarization-independent metasurface for radar cross section reduction. *Scientific Reports*, 7(1), 40782.
- Thorlabs https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14199
- Tian, Y., Chen, Z., Ren, F.-F., Du, Q., Li, Z., 2021. High-efficiency asymmetric transmission of red-near-infrared light based on chiral metamaterial. *Frontiers in Physics*, 9(May), 1–8.
- Tutar, F., 2021. C, X, Ku ve K Mikrodalga Frekans Bantlarında Çalışan Metamalzeme Temelli Polarizasyon Dönüştürücü Uygulamaları. *Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*.
- Tutar, F., Ozturk, G., 2022. An effective metasurface-based linear and circular polarization converter for C-and X-band applications. *Optical Materials*, 128, 112355.
- Veselago, V.G., 1968. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10, 509-514.
- Wikipedia
https://sv.m.wikipedia.org/wiki/Fil:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light_With.Components_Right.Handed.svg
- Wikipedia
https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Circular_Polarization_Linear_Polarized_Light_Entering_Quarter_Wave_Plate_Components.svg
- Wikipedia
https://tr.wikipedia.org/wiki/Henri_Poincar%C3%A9#/media/Dosya:Poincar%C3%A9_sphere.svg
- Wu, C., Feng, F., Xie, Y., 2013. Design of vanadium oxide structures with controllable electrical properties for energy applications. *Chemical Society Reviews*, 42(12), 5157-5183.
- Wu, P. C., Zhu, W., Shen, Z. X., Chong, P. H. J., Ser, W., Tsai, D. P., Liu, A.-Q., 2017. Broadband wide-angle multifunctional polarization converter via liquid-metal-based metasurface. *Advanced Optical Materials*, 5(7), 1600938.
- Xiao, Z., Zou, H., Zheng, X., Ling, X., Wang, L., 2017. A tunable reflective polarization converter based on hybrid metamaterial. *Optical and Quantum Electronics*, 49, 1-11.
- Xu, G., Gao, L., Chen, Y., Ding, Y., Wang, J., Fang, Y., Wu, X., Sun, Y., 2022. Broadband polarization manipulation based on W-shaped metasurface. *Frontiers in Materials*, 9, 850020.
- Xu, J., Li, R., Wang, S., Han, T., 2018. Ultra-broadband linear polarization converter based on anisotropic metasurface. *Optics Express*, 26(20), 26235.
- Yang, C., Gao, Q., Dai, L., Zhang, Y., Zhang, H., Zhang, Y., 2020. Bifunctional tunable terahertz circular polarization converter based on Dirac semimetals and vanadium dioxide. *Optical Materials Express*, 10(9), 2289-2303.
- Yang, X., Zhang, B., Shen, J., 2018. An ultra-broadband and highly-efficient tunable terahertz

- polarization converter based on composite metamaterial. *Optical and Quantum Electronics*, 50, 1-11.
- Yu, F. Y., Shang, X. J., Fang, W., Zhang, Q. Q., Wu, Y., Zhao, W., Liu, J., Song, Q., Wang, C., Zhu, J., Shen, X. B., 2022. A terahertz tunable metamaterial reflective polarization converter based on vanadium oxide film. *Plasmonics*, 17(2), 823-829.
- Yu, F. Y., Zhu, J. B., Shen, X. B., 2022. Tunable and reflective polarization converter based on single-layer vanadium dioxide-integrated metasurface in terahertz region. *Optical Materials*, 123, 111745.
- Yu, N., Genevet, P., Aieta, F., Kats, M. A., Blanchard, R., Aoust, G., Tetienne, J-B., Gaburro, Z., Capasso, F., 2013. Flat optics: controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 19(3), 4700423-4700423.
- Zhang, G., Wu, Q., Zhong, Z., Zhang, B., 2023. Bifunctional metasurface for cross-polarization conversion and ultra-broadband absorption in terahertz range. *Optics Communications*, 531, 129181.
- Zhang, H., He, X., Zhang, D., Zhang, H., 2022. Multitasking device with switchable and tailored functions of ultra-broadband absorption and polarization conversion. *Optics Express*, 30(13), 23341-23358.
- Zhang, X., Ye, H., Zhao, Y., Zhang, H., 2021. A tunable ultra-wideband cross-polarization conversion based on the band splicing technology. *Applied Physics B*, 127, 1-11.
- Zhao, J., Cheng, Y., 2016. A high-efficiency and broadband reflective 90 linear polarization rotator based on anisotropic metamaterial. *Applied Physics B*, 122, 1-7.
- Zhao, Y., Qi, B., Niu, T., Mei, Z., Qiao, L., Zhao, Y., 2019. Ultra-wideband and wide-angle polarization rotator based on double W-shaped metasurface. *AIP Advances*, 9(8), 85013.
- Zhao, Y., Yang, R., Wang, J., Wei, X., Tian, J., Zhang, W., 2022. Dual-mode terahertz broadband polarization conversion metasurface with integrated graphene-VO₂. *Optics Communications*, 510, 127895.
- Zheng, G., Mühlenbernd, H., Kenney, M., Li, G., Zentgraf, T., Zhang, S., 2015. Metasurface holograms reaching 80% efficiency. *Nature Nanotechnology*, 10(4), 308–312.
- Zheng, Q., Guo, C., Vandenbosch, G. A., Yuan, P., Ding, J., 2019. Ultra-broadband and high-efficiency reflective polarization rotator based on fractal metasurface with multiple plasmon resonances. *Optics Communications*, 449, 73-78.
- Zheng, X., Xiao, Z., Ling, X., 2018. A tunable hybrid metamaterial reflective polarization converter based on vanadium oxide film. *Plasmonics*, 13, 287-291.
- Zhu, H., Zhang, Y., Ye, L., Li, Y., Xu, Y., Xu, R., 2020. Switchable and tunable terahertz metamaterial absorber with broadband and multi-band absorption. *Optics Express*, 28(26), 38626-38637.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Fatih Kadiroğlu
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Lisesi
Lisans:	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1.	