



**METAYÜZEY POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE
RADAR SOĞURUCU TASARIMI, ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Aykut COŞKUN

Doktora Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
Prof. Dr. Uğur Cem HASAR

2022

(Her hakkı saklıdır.)

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

**METAYÜZEY POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE RADAR SOĞURUCU
TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

(Design, Fabrication and Characterization of Metasurfaces Polarization Converter and Radar Absorber)

DOKTORA TEZİ

Aykut COŞKUN

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur Cem HASAR

Erzurum
Haziran, 2022

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

METAYÜZEY POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE RADAR SOĞURUCU
TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Prof. Dr. Mehmet ERUĞRUL danışmanlığında, Aykut COŞKUN tarafından hazırlanan bu çalışma, 03/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı Elektronik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak oybirliği / oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Tevhit KARACALI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Burak DİKİCİ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Emin Argun ORAL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Saffet Gökçen ŞEN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Hilal KOÇ POLAT <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Prof. Dr. Uğur Cem HASAR <i>Gaziantep Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../... tarih
ve sayılı kararı.

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

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü
Aslı Islak İmzalıdır



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL* danışmanlığında sunulan “Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü ve Radar Soğurucu Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu” 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	3	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Bulgular	4	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	3	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.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Aykut COŞKUN	Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
25.5.2022	25.5.2022
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

Doktora öğrenimim esnasında bilgilerini, tecrübelerini esirgemeyen hoşgörü ve özveri ile akademik çalışmalarına katkı sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet Ertuğrul'a ve Prof. Dr. Uğur Cem Hasar'a teşekkür ederim. Ayrıca doktora öğrenimim boyunca beni sabırla dinleyen fikirleri ve önerileri ile tezime katkı sağlayan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Emin Argun Oral'a ve Prof. Dr. Burak Dikici'ye minnettarım.

Lisansüstü eğitimim boyunca, manevi destek veren ve bilgi birikimini paylaşan Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi akademik personeli Öğr. Gör. Ahmet Özmen'e ve Islamabad Üniversitesi doktora öğrencisi Fahad Ahmed'e katkılarından dolayı teşekkür ederim. Malzeme üretimindeki katkısından dolayı Atatürk Üniversitesi doktora öğrencisi Fatih Tutar'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen, sevinç ve üzüntülerimi paylaşan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşim Fatmanur Coşkun'a, oğlum Muhammet Emin Coşkun'a ve kızım Hatice Kübra Coşkun'a minnettarım.

Aykut COŞKUN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

METAYÜZEY POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE RADAR SOĞURUCU TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Aykut COŞKUN

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur Cem HASAR

Amaç: Bu tezin iki ana amacı vardır: birincisi geliş açısına ve polarizasyon açısına hassas olmayan ultra-ince, geniş bant, tek katmanlı ve çok fonksiyonlu metayüzey tabanlı 3 farklı polarizasyon dönüştürücü tasarlamak ve 8-18 GHz aralığında LTC ve CPC özelliğine sahip metayüzey üretmek ve karakterizasyonunu yapmak; ikincisi, geliş ve polarizasyon açısına hassas olmayan ultra-ince, ultra-geniş bant, üç katmanlı ve çok fonksiyonlu metayüzey radar soğurucu tasarlamaktır.

Yöntem: Bu çalışmada, geniş bant genişliğine sahip, geliş açısına karşı hassas olmayan, ultra-ince ve küçük boyuta sahip üç ayrı polarizasyon dönüştürücü ve bir adet radar soğurucu metayüzey CST Microwave Studio programı kullanılarak tasarlandı. Ayrıca TE ve TM modunda geliş açısı artırılarak performanstaki değişim incelendi. Rezonans frekanslarında akım yoğunluğu ayrıntılı incelenerek sonuçları yorumlandı. Önerilen polarizasyon dönüştürücülerde yansıma katsayıları, polarizasyon dönüştürme oranları, eliptiklik değerleri, ortogonal bileşenler ve faz farkları Matlab kodları ile hesaplandı. Radar soğurucuda ise Empedansın reel ve imajiner kısımlarının frekansa göre değişimi ve soğurmanın frekansa göre değişimi incelendi. Litografi yöntemi ile X- ve Ku-bandına çalışan metayüzey üretildi.

Bulgular: Alttaş malzemesi FR-4 olan metayüzeyin, tüm X-bandında CPC band için PCR değeri en az %97 iken, yine alttaş malzemesi FR4 olan diğer bir metayüzeyin tüm X- ve Ku-bandında CPC PCR değeri en az %90'dır. Buna karşın alttaş malzemesi F4B olan başka bir metayüzeyin ise tüm K- ve Ka-bandında CPC PCR değeri en az %90 olarak bulunmuştur. X- ve Ku-bandında çalışan metayüzey litografi yöntemi ile üretilerek simülasyon ile uyumludur. Metayüzey tabanlı radar soğurucuda ise 2-110 GHz aralığında tüm bantlarda (S-, C-, X-, Ku-, K-, Ka-, V-, ve W-) normal geliş açısında en az %90 üzerinde soğuran üç katmanlı, ultra-ince, özelliklerine sahiptir. Ayrıca bu metayüzeyin soğurma verimliliği 45^0 geliş açısına kadar bağımsızdır. Bunun yanında, bu metayüzeyin soğurma verimliliği 90^0 polarizasyon açısına kadar bağımsızdır. Literatürde bu kadar geniş bantta %90 üzerinde soğuran ve $0.02\lambda_0$ alttaş kalınlığında benzer bir çalışma yoktur.

Sonuç: Eliptik şekilli metayüzey tabanlı polarizasyon dönüştürücünün %97 PCR değerine sahip olması ve 45^0 geliş açısına kadar %82 ve üstü PCR değerinde olması literatürde X-bandı uygulamaları için önemli bir aday olmasını sağlamaktadır. Ayrıca X- ve Ku-bandında çalışan polarizasyon dönüştürücünün çalışma bandının çoğunluğunda 45^0 geliş açısına kadar %74 üstü PCR değerine sahip olması literatürdeki birçok çalışmaya üstünlük sağlamaktadır. Altıgen şekilli polarizasyon dönüştürücünün geniş bantta sahip olması ve çalışma bandının çoğunluğunda 40^0 geliş açısına kadar %77 üstü PCR değerine sahip olması literatürdeki K- ve Ka-bantları uygulamaları için önemli bir aday olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, teorik olarak göreceli bant genişliği en fazla %200 iken, literatüre kazandırılan üç katmanlı metayüzey tabanlı radar soğurucuda %193 gibi henüz benzeri bulunmayan yüksek bir değere ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: metayüzey, metamalzeme, polarizasyon dönüştürücü, radar soğurucu.

Haziran 2022, 90 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

DESIGN, FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF METASURFACES POLARIZATION CONVERTER AND RADAR ABSORBER

Aykut COŞKUN

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Co-supervisor: Prof. Dr. Uğur Cem HASAR

Purpose: In this study, the thesis has two main goals: the first is to design 3 different polarization converters based on ultra-thin, broadband, single layer and multifunctional metasurfaces that are not sensitive to incidence angle and polarization angle, and to produce metasurfaces with LTC and CPC properties in the 8-18 GHz range, and characterize it; the second is to design an ultra-thin, ultra-wideband, three-layer and multifunctional metasurface radar absorber that is not sensitive to incidence angle and polarization angle.

Method: In this study, three different polarization converters and one radar absorber metasurface with wide bandwidth, insensitive to incidence angle, ultra-thin and small size were designed using CST Microwave Studio program. In addition, the change in performance was examined by increasing the incidence angle in the transverse electric field and transverse magnetic field modes. Reflection coefficients, polarization conversion ratios, ellipticity values, orthogonal components and phase differences were calculated in proposed polarization converters with Matlab codes. In the radar absorber, the variation of the real and imaginary parts of the impedance with respect to frequency and the variation of the absorption with respect to frequency were investigated. metasurface working to X- and Ku-band was produced by lithography method.

Findings: The metasurface with substrate material FR-4 has a CPC polarization conversion rate of at least 97% in the entire X-band, while another metasurface with substrate material FR4 has a CPC polarization conversion rate of at least 90% to the entire X- and Ku-band. On the other hand, for another metasurface with substrate material F4B, the CPC polarization conversion ratio was found to be at least 90% in the whole K- and Ka-band. It is compatible with simulation by being produced by metasurface lithography method operating in X- and Ku-band. On the other hand, the metasurface-based radar absorber has three-layer, ultra-thin, features that absorb at least over 90% at the normal incidence angle in all bands (S-, C-, X-, Ku-, K-, Ka-, V-, and W-) in the 2-110 GHz range. Also, the absorption efficiency of this metasurface is independent up to 45° incidence angles. Besides, the absorption efficiency of this metasurface is independent up to 90° polarization angles. There is no similar study in the literature that absorbs more than 90% in such a wide band and has a substrate thickness of $0.02\lambda_0$.

Results: The elliptical metasurface-based polarization converter has a PCR of 97% between 7.89-13.9 GHz and has a PCR of 82% and above up to 45° incidence angles. In addition, the polarization converter operating in X- and Ku-band has a PCR value of over 74% up to 45° incidence angles in most of the working band provides superiority to many studies in the literature. The hexagonal polarization converter has a wide band and a PCR value of over 77% up to 40° incidence angles in most of the working band, making it an important candidate for K- and Ka-bands applications in the literature. In addition, while the theoretical relative bandwidth is at most 200%, an unprecedentedly high value of 193% has been reached in the three-layer metasurface-based radar absorber, which has been introduced to the literature.

Keywords: metasurface, metamaterial, polarization converter, radar absorber.

June 2022, 90 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xiii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	24
Elektromanyetik Dalgaların Polarizasyonu.....	24
Lineer Polarizasyon.....	24
Dairesel Polarizasyon.....	25
Eliptik Polarizasyon	25
Polarizasyon Elips.....	26
Elektromanyetik Dalgaların Polarizasyonu için Jones Hesabı.....	27
Çapraz Polarizasyon Dönüşümü	27
Lineer-Dairesel Polarizasyon (LTC) Dönüşümü	29
Dirençli Levha Tabanlı Geniş bant Radar Soğurucular	30
MATERYAL VE YÖNTEM	32
Litografi Yöntemi.....	32
Polarizasyon Dönüştürücü Temel Parametreleri.....	34
Radar Soğurucu Temel Parametreleri	40
Saçılma Parametreleri	45
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	46
X-Bandı Uygulamaları için Eliptik-Şekli Metayüzey Tabanlı Yüksek Verimli Polarizasyon Manipülasyonu	46
X- ve Ku-Bandı Uygulamaları için Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı	51
K ve Ka Bandı Uygulamaları için Uygulaması Kolay, Ultra-İnce, Geniş-Bantlı ve Çok- Fonksiyonlu Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı	57
S, C, X, Ku, K, Ka, V ve W Bandları Uygulamaları için Radar Soğurucu Tasarımı	63
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67

KAYNAKÇA	69
ÖZGEÇMİŞ.....	74



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bant türlerinin frekans aralığı.....	22
Tablo 2. X-bandında Çalışan Metayüzeyin Boyutları	46
Tablo 3. X-bandında Çalışan Metayüzeyin Performansının Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması	50
Tablo 4. Önerilen X- ve Ku-Bandında Çalışan Metayüzeyin Boyutları.....	51
Tablo 5. Önerilen X- ve Ku-bandında Çalışan Metayüzeyin Performansının Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması	54
Tablo 6. K- ve Ka-bandında Önerilen Polarizasyon Dönüştürücünün Boyutları	58
Tablo 7. K- ve Ka-Bandında Çalışan Metayüzeyin Performansının Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması	60
Tablo 8. Önerilen Radar Soğurucunun Boyutları	63
Tablo 9. Önerilen Radar Soğurucunun Performansının Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Temel parametrelere göre (ϵ ve μ) malzemelerin sınıflandırılması	3
Şekil 2. (a) 2 boyutlu metayüzeyin 3 boyutlu görünümü (b) birim hücrenin ön yüzeyinin görünümü (c) birim hücrenin arka yüzeyinin görünümü.....	4
Şekil 3. 3 boyutlu metayüzeyin: (a) perspektif görünüşü (b,c) SEM görüntüsü	5
Şekil 4. Önerilen metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünüşü (b) eşdeğer devresi	6
Şekil 5. Genelleştirilmiş Snell kırılma yasasının şematik gösterimi	7
Şekil 6. Polarizasyon kontrolünde ve manipülasyonunda kullanılan bazı metayüzey uygulamaları	8
Şekil 7. Optik holografi modeli.....	9
Şekil 8. Optik holografi çalışma prensibi.....	10
Şekil 9. Optik holografının polarizasyon açısına göre değişimi	10
Şekil 10. (a) Meta-lensin elektrik enerji yoğunluğu (b) bir yakınsak ve bir uzaksak silindir kullanılarak tasarlanan metayüzeyin tasarımı.....	11
Şekil 11. (a) Meta-lensin SEM görüntüsü (b) ayarlanabilir optik cihazın şematiği.....	12
Şekil 12. (a,b) LP ile, farklı dönüş açılarına sahip meta-lensin dönüştürülmesinin şematik gösterimi (c) LHCP ve RHCP ile, meta-lensin dönüştürülmesinin şematik gösterimi	12
Şekil 13. Önerilen metayüzey antenin: (a) 3 boyutlu görüntüsü (b) birim hücre şekli (c) geniş modülasyonlu kapasitif reaktansın Flequet modları	13
Şekil 14. Dinamik olarak uyarlanabilir metayüzey antenin şematik olarak gösterimi.....	14
Şekil 15. (a) V-şekilli plazmonik antenler kullanılarak çeyrek dalga plakasının gerçekleştirilmesi (b) dalga boyuna göre dairesel polarizasyon değişimi ve ışın yoğunluğu değişimi	14
Şekil 16. (a) THz bölgesinde 45 ° polarize ışığı CP ışığına gizleyen çeyrek dalga plaka (b) frekansa göre faz gecikmesinin deneysel, simülasyon ve teorik olarak karşılaştırılması.....	15
Şekil 17. Optik girdap ışınının yoğunluğu ve faz profili.....	15
Şekil 18. Optik girdap ışınının yoğunluğu ve faz profili.....	16
Şekil 19. Optik girdap ışınının polarizasyona göre değişimi	17
Şekil 20. He-Ne lazer modeli	18
Şekil 21. Spin ve yörünge açısal momentum modeli	19
Şekil 22. Radar cihazının çalışma mekanizması	20
Şekil 23. (a) Radar soğurucu sistemi (b) radar soğurucu tabanlı metayüzeyin işlevi	20

Şekil 24. İletim modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün (a) 3 boyutlu görünümü (b) ön yüzey görünümü (c) orta yüzey görünümü (d) arka yüzey görünümü	21
Şekil 25. Yansıma modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün (a) 3 boyutlu görünüşü (b) önden görünüşü (c) yandan görünüşü	22
Şekil 26. Lineer polarizasyonun şematik gösterimi	24
Şekil 27. Dairesel polarizasyonun şematik gösterimi	25
Şekil 28. Eliptik polarizasyonun şematik gösterimi	26
Şekil 29. Polarizasyon Elips diyagramı.....	26
Şekil 30. Boşluğu bulunan altıgen metayüzey	28
Şekil 31. Kiral metamalzeme	29
Şekil 32. LP'den CP'ye dönüşüm için metayüzeyin kavramsal diyagramı	30
Şekil 33. Tek katmanlı direnç levha tabanlı soğurucu	31
Şekil 34. Direnç levha tabanlı soğurucunun direnç değerine göre soğurma kesrinin değişim grafığı	31
Şekil 35. Elektron ışını litografisi kullanılarak metamalzemenin üretimi.....	33
Şekil 36. (a) Eş- ve çapraz- polarize yansıma katsayıları değerleri (b) Eş- ve çapraz- polarize yansıma katsayıları faz açıları ve faz farkı c) Polarizasyon dönüştürme oranı d) E_{co}/E_{cross}	35
Şekil 37. (a) Eş- ve çapraz- polarize yansıma katsayılarının açığa göre değişimi (b) Polarizasyon dönüştürme oranının açığa göre değişimi	36
Şekil 38. Ortogonal bileşenler	37
Şekil 39. Önerilen polarizasyon dönüştürücü için sırasıyla normal ve 45° gelişte u- ve v- bileşenlerinin: (a, c) Büyüklükleri ve (b, d) faz değerleri ve faz farkı	38
Şekil 40. Önerilen metayüzeyin rezonatör kısmının akım yoğunlukları: (a,b) 5.35 GHz, (c,d) 7.6 GHz (e,f), 13.03. GHz.....	39
Şekil 41. Önerilen polarizasyon dönüştürücü için sırasıyla normal ve 45° gelişte u- ve v- bileşenlerinin: (a, c) Büyüklükleri ve (b, d) faz değerleri ve faz farkı	40
Şekil 42. Literatürde önerilen polarizasyon dönüştürücü için sırasıyla normal ve 45° gelişte u- ve v-bileşenlerinin: (a, c) Büyüklükleri ve (b, d) faz değerleri ve faz farkı	41
Şekil 43. Literatürde önerilen soğurucunun efektif giriş empedansının reel ve imajiner kısımlarının frekansa göre değişimi	42
Şekil 44. Literatürde önerilen soğurucunun normal geliş açısında hem TE hem de TM modlarında verimliliği	42
Şekil 45. Literatürde önerilen iki bileşenli absorpsiyonun verimlilik değişimi	43

Şekil 46. Elektromanyetik temel parametreleri olan ϵ_{eff} ve μ_{eff} 'in (a) reel kısmı (b) sanal kısmı	44
Şekil 47. Önerilen soğurucunun sırasıyla 4.19 GHz, 5.63 GHz ve 7.58 GHz değerlerindeki elektrik alan yoğunluğu: (a-c) ön yüzey için (d-f) X-Z düzlemi için (g-i) Y-Z düzlemi için	44
Şekil 48. Saçılma parametrelerinin gösterimi	45
Şekil 49. X bandı için önerilen meta yüzeyin: (a) 3 boyutlu görünümü, (b) Şematik görünümü ve (c) Yan görünümü	46
Şekil 50. X-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) eş polarizasyon katsayısı ve çapraz polarizasyon yansıma katsayısı değerlerinin frekansa göre değişimi (b) Φ_{yy} , Φ_{xy} ve $\Delta\Phi_1$ (c) $ E_{co} / E_{cross} $ (d) Eliptiklik	47
Şekil 51. X-bandı için önerilen metayüzeyin u- ve v-eksenlerinin gösterimi	48
Şekil 52. X-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) $ R_{uu} $ ve $ R_{vv} $ değerleri, (b) Φ_{uu} , Φ_{vv} ve $\Delta\Phi_2$ değerleri	48
Şekil 53. X-bandı için önerilen metayüzeyin polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin frekansa göre değişimi (normal açı)	49
Şekil 54. X-bandı için önerilen metayüzeyin PCR değerleri: (a,b) $\theta_{in}^{TE} \leq 45^\circ$, (c,d) $\theta_{in}^{TM} \leq 45^\circ$	50
Şekil 55. X-bandı için önerilen metayüzeyin üst ve alt katmandaki akım dağılımları: (a,d) 8.15 GHz, (b,e) 10.21 GHz, ve (c,f) 13.25 GHz.....	51
Şekil 56. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünümü, (b) Şematik görünümü ve (c) Yan görünümü.	52
Şekil 57. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) eş polarizasyon katsayısı ve çapraz polarizasyon yansıma katsayısı değerlerinin frekansa göre değişimi (b) Φ_{yy} , Φ_{xy} ve $\Delta\Phi_1$ (c) $ E_{co} / E_{cross} $ (d) Eliptiklik	53
Şekil 58. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin u- ve v-eksenlerinin gösterimi	54
Şekil 59. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) $ R_{uu} $ ve $ R_{vv} $ değerleri, (b) Φ_{uu} , Φ_{vv} ve $\Delta\Phi_2$ değerleri	55
Şekil 60. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin frekansa göre değişimi (normal açı)	55
Şekil 61. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin PCR değerleri: (a,b) $\theta_{in}^{TE} \leq 45^\circ$, (c,d) $\theta_{in}^{TM} \leq 45^\circ$	56
Şekil 62. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) Ölçüm sisteminin şeması ve (b) ölçülen ('meas.') ve simüle edilen ('sim.') karşılaştırması $ R_{xy} $ ve $ R_{yy} $	57

Şekil 63. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin üst ve alt katmandaki akım dağılımları: (a,d) 8.52 GHz, (b,e) 12.78GHz, ve (c,f) 17.44 GHz.	57
Şekil 64. K- ve Ka-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünümü, (b) Şematik görünümü ve (c) Yan görünümü	58
Şekil 65. (a) eş-polarizasyon katsayısı ve çapraz polarizasyon yansıma katsayısı değerlerinin frekansa göre değişimi (b) Φ_{yy} , Φ_{xy} ve $\Delta\Phi_1$ (c) $ E_{co} / E_{cross} $ (d) Eliptiklik.....	59
Şekil 66. K- ve Ka-bandında önerilen metayüzeyin u- ve v-eksenlerinin gösterimi	59
Şekil 67. Metayüzeyin: (a) $ R_{uu} $ ve $ R_{vv} $ değerleri, (b) Φ_{uu} , Φ_{vv} ve $\Delta\Phi_2$ değerleri	61
Şekil 68. Önerilen metayüzeyin polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin frekansa göre değişimi (normal açı).....	61
Şekil 69. Önerilen metayüzeyin PCR değerleri: (a,b) $\theta_{in}^{TE} \leq 40^\circ$, (c,d) $\theta_{in}^{TM} \leq 40^\circ$	62
Şekil 70. Meta-yüzeyin üst ve alt katmandaki akım dağılımları: (a,d) 18.96 GHz, (b,e) 28.62 GHz, ve (c,f) 40.8 GHz.	63
Şekil 71. Önerilen radar soğurucu metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünümü, (b) 1.katmanın önden görünüşü (c) 2.katmanın önden görünüşü (d) Yandan görünüşü	63
Şekil 72. Metayüzeyin: (a) yansıma kesri (b) PCR değeri	64
Şekil 73. ϵ_{eff} ve μ_{eff} : (a) reel kısmı (b) imajiner kısmı	64
Şekil 74. Önerilen metayüzeyin u- ve v-eksenlerinin gösterimi	65
Şekil 75. Önerilen metayüzeyin polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin frekansa göre değişimi (normal açı).....	65
Şekil 76. Önerilen metayüzeyin PCR değerleri: (a,b) $\theta_{in}^{TE} \leq 40^\circ$, (c,d) $\theta_{in}^{TM} \leq 40^\circ$	66

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

E	: Elektrik Alan Şiddeti
H	: Manyetik Alan Şiddeti
D	: Elektrik Akı Yoğunluğu
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
J	: Elektrik Akım Yoğunluğu
ϵ	: Dielektrik Sabiti
ϵ_r	: Bağlı Dielektrik Sabiti
ϵ''	: Dielektrik Kayıp Faktörü
μ_r	: Bağlı Manyetik Geçirgenlik
μ	: Manyetik Geçirgenlik
μ_0	: Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği
ϵ_0	: Boş Uzayın Elektrik Geçirgenliği
CPC	: Dairesel Polarizasyon Dönüştürücü
LTC	: Lineer Polarizasyondan Dairesel Polarizasyona Dönüşüm
PCR	: Polarizasyon Dönüştürme Oranı
PMR	: Polarizasyon Koruma Oranı
e	: Eliptiklik
LHCP	: Sol Elli Dairesel Polarizasyon
RHCP	: Sağ Elli Dairesel Polarizasyon
GHz	: Gigahertz
THz	: Terahertz
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
RF	: Radyo Frekansı
CST	: Computer Simulation Technology (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi)
TE	: Enine Elektrik Alan
TM	: Enine Manyetik Alan

GİRİŞ

Polarizasyon, elektrik alanının uzayda sabit bir noktada salınım şeklini temsil eden elektromanyetik (EM) dalgaların temel bir özelliğidir (Ahmed *et al.* 2021; Fei *et al.* 2020; Hu *et al.* 2022; T. K. T. Nguyen *et al.* 2021). 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 (Kamal *et al.* 2021; Z. Y. Li *et al.* 2021; B. Lin *et al.* 2020). EM dalgaların polarizasyonu, Faraday etkisi ve kristallerin optik aktivitesi gibi geleneksel teknikler kullanılarak manipüle edilebilir (Z. Y. Li *et al.* 2021; B. Lin *et al.* 2020; Mei *et al.* 2017; T. Q. H. Nguyen *et al.* 2021). Çift kırınımlı kristal, doğrusal bileşenin fazını diğer ortogonal bileşene göre geciktirerek EM dalganın polarizasyonunu manipüle eder (Kamal *et al.* 2021; B. Lin *et al.* 2020; Mei *et al.* 2017). 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 (G. 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 boylarında polarizasyon dönüşümü sağlar (J. Zhao & Cheng, 2016). Ayrıca, geleneksel teknikler yoluyla polarizasyon manipülasyonu, gelen dalganın geliş açısına bağlıdır (Couto *et al.* 2021b; Khan *et al.* 2020). Bir başka deyişle, geleneksel tekniklerin kullanımı ile polarizasyon dönüşümünde geliş açısı arttığında polarizasyon dönüştürme oranının veriminde azalma olur (J. 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 (X. Gao *et al.* 2015; Khan *et al.* 2019; Z. Y. Li *et al.* 2021; B. Lin *et al.* 2020; T. K. T. Nguyen *et al.* 2021; J. Xu *et al.* 2018). Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için bilim adamları, EM dalgaların

polarizasyonunu manipüle eden metamalzemeler ve metayüzeyler adı verilen yapay yapılar geliştirdiler.

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 etkileşimini incelemeye kullanılmaktadır. Ayrıca, EM dalgaların yayılma hızının ışık hızına eşit olduğu belirlendi. Maxwell denklemleri zaman alanında şu şekilde ifade edilir (Mahmood, 2020):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

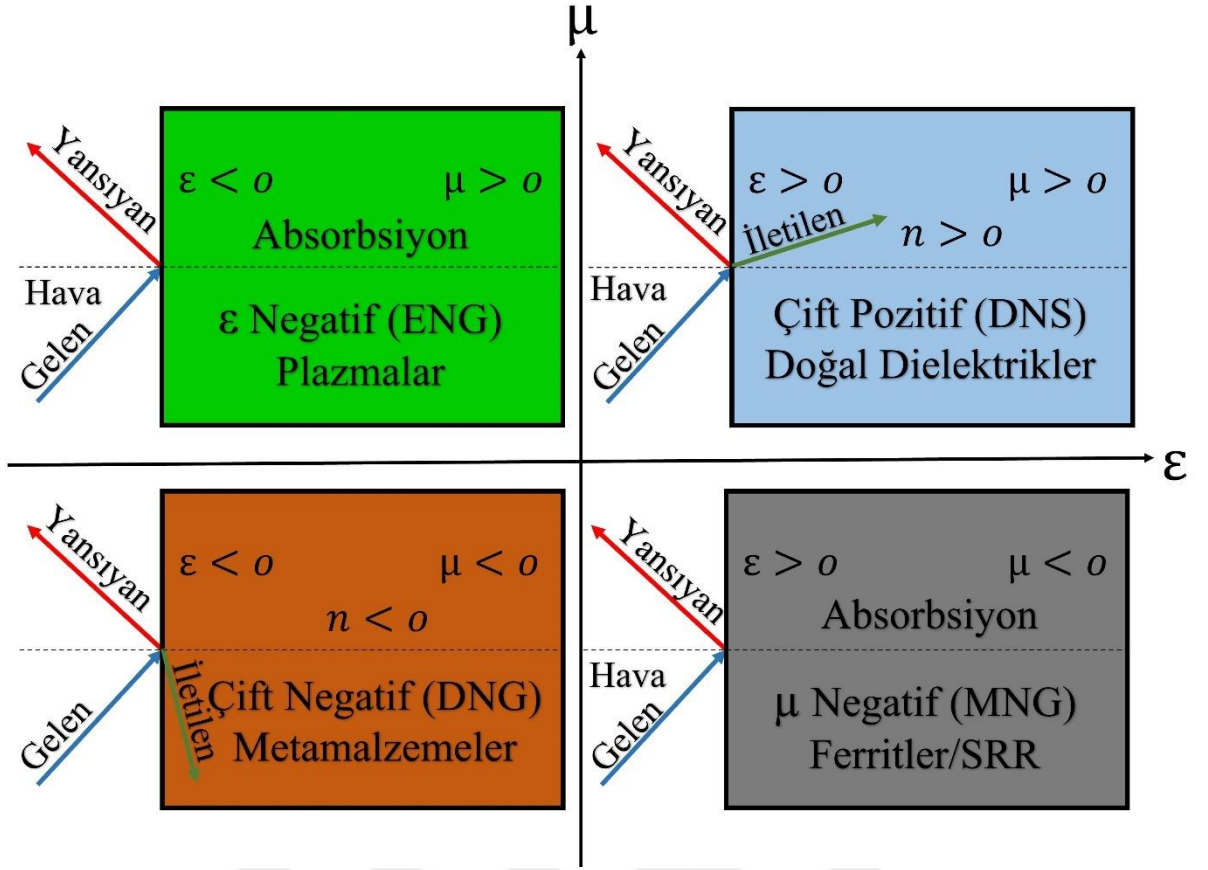
$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

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

Metamalzemeler, doğal malzemelerde bulunmayan üstün elektromanyetik özelliklere sahip yapay yapılardır (Y. Li *et al.* 2018; Mei *et al.* 2017; Phan *et al.* 2021; Salman *et al.* 2020; Veselago, 2005; J. Xu *et al.* 2018). Bu malzemeler, negatif kırılma indislidir ve negatif ϵ ve μ değerine sahiptir; bu nedenle metamalzemelere negatif kırılma indisli malzemeler de denir. Saçılma matrisinin katsayılarını saçılma (S) parametreleri oluşturmaktadır. Elektromanyetik parametreler, maddenin EM dalgalarla etkileşimini belirler. Bir malzeme $\epsilon > 0$ ve $\mu > 0$ ise çift pozitif (DPS), $\epsilon < 0$ ve $\mu > 0$ ise epsilon negatif (ENG), $\epsilon > 0$ ve $\mu < 0$ ise μ negatif (MNG) ve $\epsilon < 0$ ve $\mu < 0$ ise çift negatif (DNG) olduğu Şekil 1’de gözlemlenmektedir. 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).

$$K = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} n^2} \quad (5)$$



Şekil 1. Temel parametrelere göre (ϵ ve μ) malzemelerin sınıflandırılması

Burada $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, ışığın boş uzaydaki hızını tanımlar ve n , malzemenin kırılma indisidir. Kırılma indisi ve yapısal parametreler arasındaki ilişki aşağıdaki denklemdeki gibidir (Asim, 2017; Mahmood, 2020).

$$n = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (6)$$

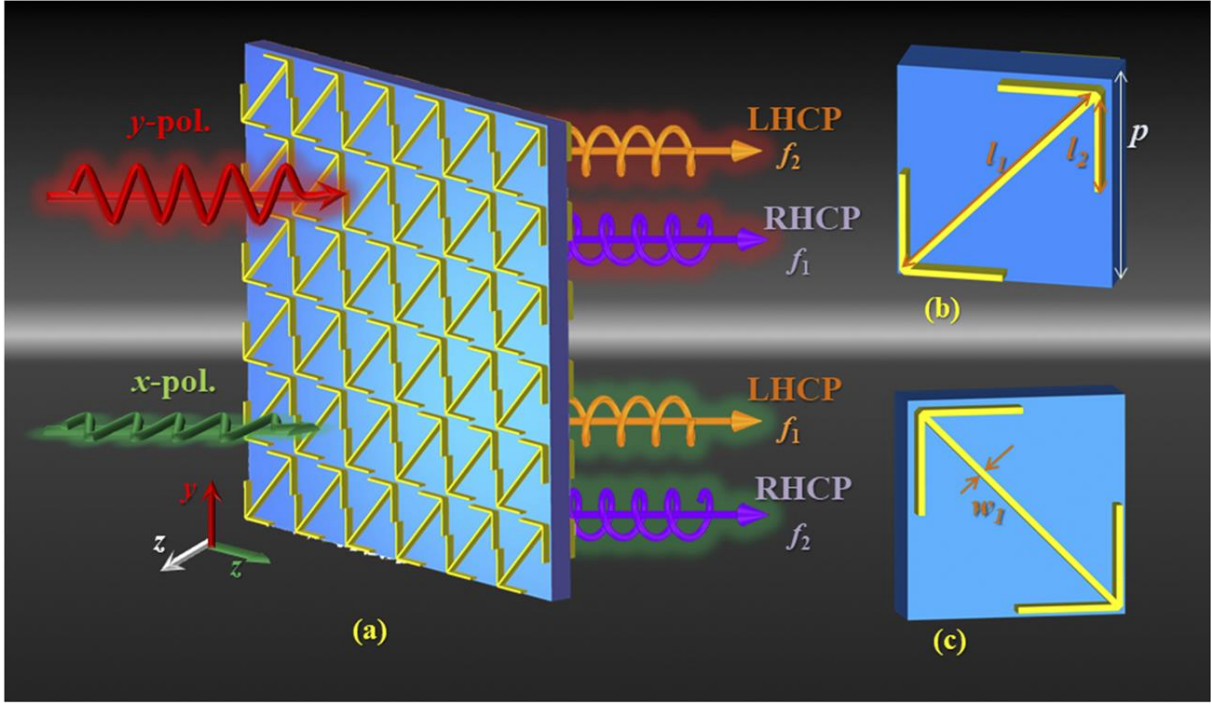
Kayıpsız bir malzeme için ϵ ve μ reel sayılar olarak kabul edilir ve malzemenin kırılma indisi reel sayıdır. Temel parametreler, dielektrik malzemeler ve EM dalgaların etkileşimi hakkında önemli bilgi verir (Asim, 2017; Mahmood, 2020):

$$D = \epsilon_0 E + P_e = \epsilon_0 (1 + \chi_e) E = \epsilon E \quad (7)$$

Burada P_e elektrik polarizasyonu temsil eder ve χ_e dielektrik malzeme için elektrik duyarlılığıdır ve $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0(1 + \chi_e)$ şeklinde ifade edilir (Mahmood, 2020).

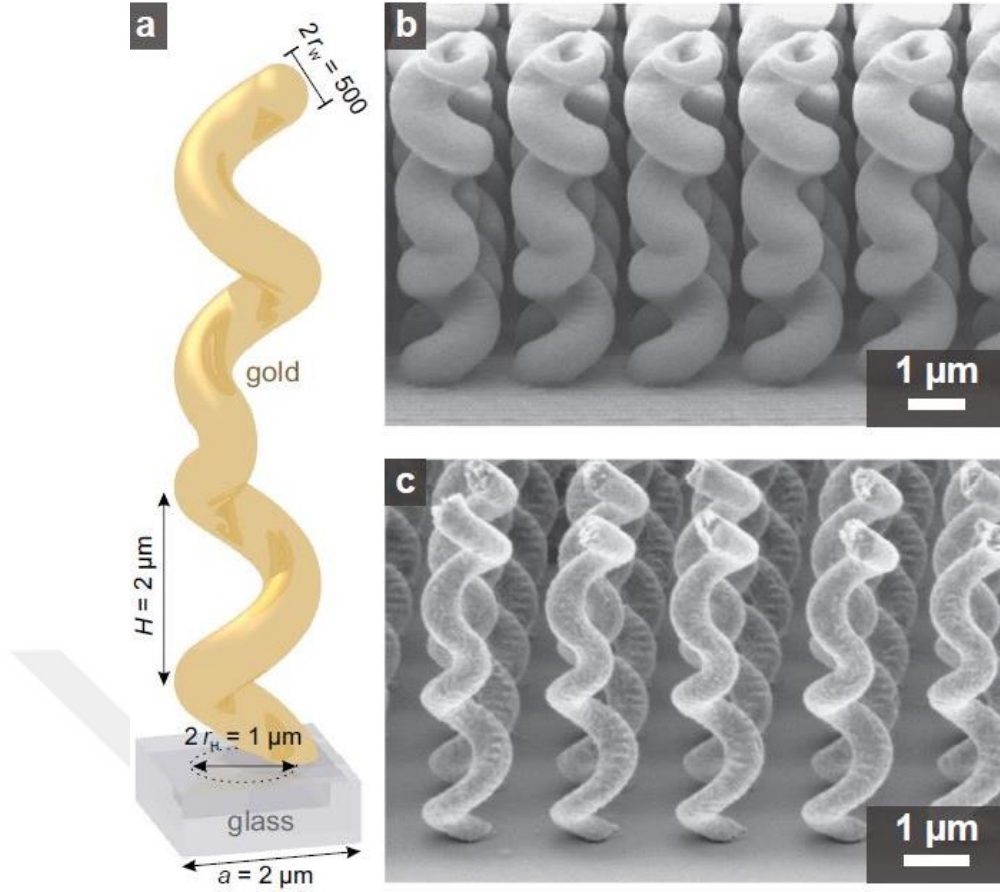
$$B = \mu_0 (H + P_m) = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu H \quad (8)$$

Yukarıdaki denklemde $\mathbf{P}_m$ 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 2. (a) 2 boyutlu metayüzeyin 3 boyutlu görünümü (b) birim hücrenin ön yüzeyinin görünümü (c) birim hücrenin arka yüzeyinin görünümü (Han *et al.* 2020)

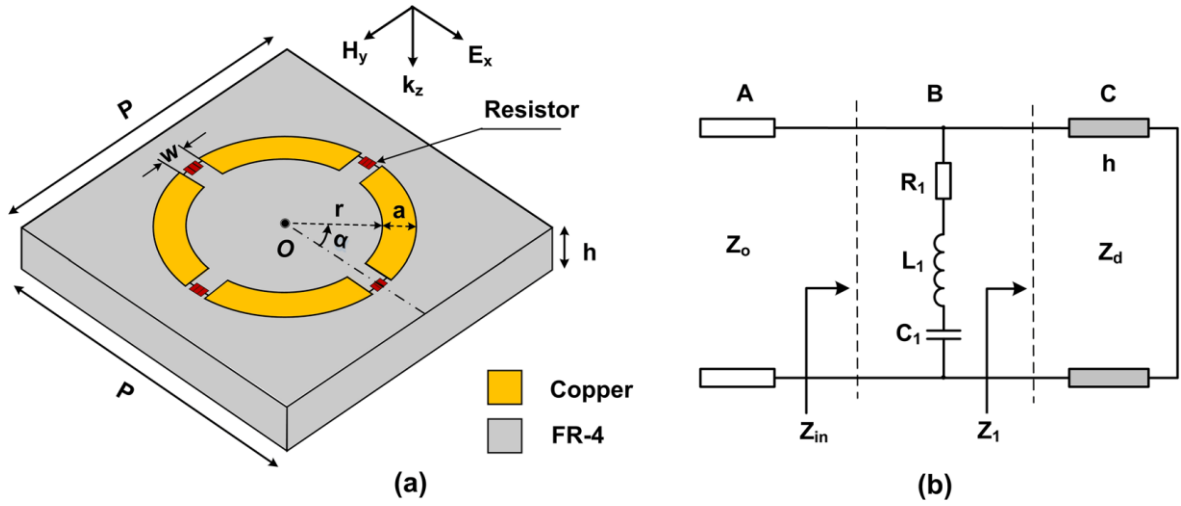
Meta-yapılar geliştikten sonra, mikrodalga frekans rejiminde negatif ε ve μ yapılar keşfedilmiş ve daha sonra bu yapıların negatif kırılma indisinden kaynaklanan olağanüstü elektromanyetik özelliklerinden yararlanmak için kullanılmıştır. Metamalzemeler, Şekil 2'deki gibi basit iki boyutlu düzlemsel veya Şekil 3'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, elektromanyetik gizleme vb. gibi olağandışı elektromanyetik 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 3. 3 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 (J. Gao *et al.* 2018; Leitis *et al.* 2021; Wu *et al.* 2017; G. 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 4'te literatürdeki metayüzeyin eş değeri devre modellemesi görülmektedir (T. Q. H. Nguyen *et al.* 2020).



Şekil 4. Önerilen metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünüşü (b) eşdeğer devresi (T. Q. H. Nguyen *et al.* 2020)

Metayüzeyler, yansıyan ve iletilen dalgaların genliğini, fazını ve polarizasyonunu kontrol edebilen birim hücre tasarımıyla üretilebilir (Kamal *et al.* 2021; Khan *et al.* 2019; Sun *et al.* 2017). 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 (Michel *et al.* 2021; Yu & Capasso, 2013). 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):

$$\phi_t = \int_A^B \mathbf{K} d\mathbf{r} + \phi(\mathbf{r}) \quad (9)$$

Burada $\mathbf{K}$ elektromanyetik dalganın dalga vektörü, $\phi(\mathbf{r}_s)$ iki ortam arasındaki sınır boyunca koordinatların bir fonksiyonu olan ani faz kaymasıdır. Şekil 5'te 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

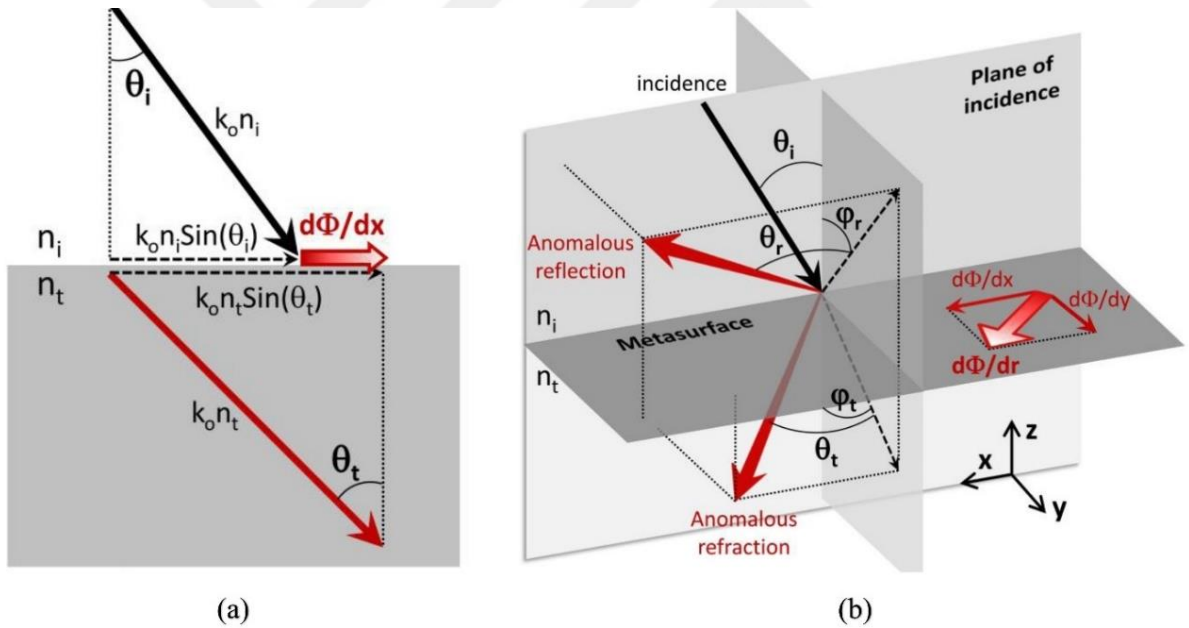
göre, bu iki yol arasındaki fazın türevi sıfırdır ve matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir (Mahmood, 2020):

$$K_0 n_i \sin(\theta_i) dx + (\phi + d\phi) - [k_0 n_t \sin(\theta_t) dx + \phi] = 0 \quad (10)$$

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 (11-12) olarak yazılabilen genelleştirilmiş Snell yasası yansıma ve kırılmasına yol açar (Mahmood, 2020);

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{d\phi}{dx} \frac{1}{K_0 n_i} \quad (11)$$

$$n_t \sin(\theta_t) - n_i \sin(\theta_i) = \frac{d\phi}{dx} \frac{1}{k_0} \quad (12)$$



Şekil 5. Genelleştirilmiş Snell kırılma yasasının şematik gösterimi (Yu & Capasso, 2013).

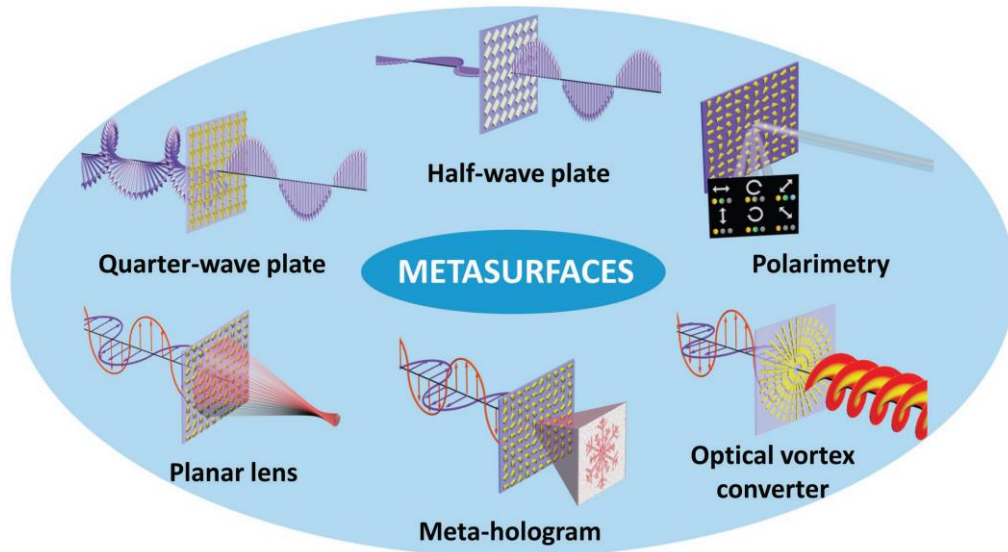
Bu denklemlere göre, sabit faz gradyanının ($d\phi/dx$) ne kadar doğru tasarlandığına bağlı olarak, kırınımlı ışığın hangi yayılma yönünde olabileceği belirlenir. Son olarak, toplam iç yansıma için kritik açı aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanır (Yu & Capasso, 2013).

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\pm \frac{n_t}{n_i} - \frac{d\phi}{dx} \frac{1}{K_0 n_i} \right) \quad (13)$$

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.

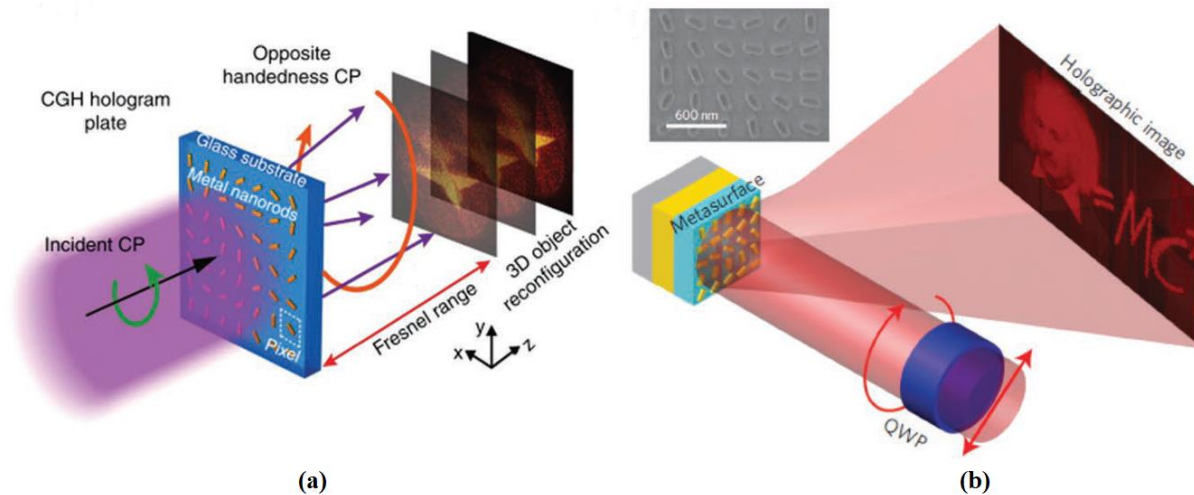
Metayüzeyler, iletim modunda Snell yasasına göre ışığın anormal kırılmasını sağlamak için de tasarlanabilir. Bu tür metayüzeylerde yansıma olmaması için, metayüzeyin giriş empedansı, havanın empedansı olan 377Ω değerine yakın olması gerekir ve bu durumda empedans eşleşmesi olur. Literatürde, mikrodalga 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, terahertz, kızılötesi ve görünür ışık frekanslarında negatif kırılma göstermiştir (Cheng *et al.* 2015).

Metayüzeyler lensler ve reflektörler, antenler, dalga plakaları, optik vorteks kirişler, 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 elektromanyetik cihazların ve aletlerin genel verimliliğinin iyileştirilmesi gerçekleştirildi. Ultra-ince kalınlık, yüksek soğurma ve düşük üretim maliyeti nedeniyle metayüzeylerin kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır.



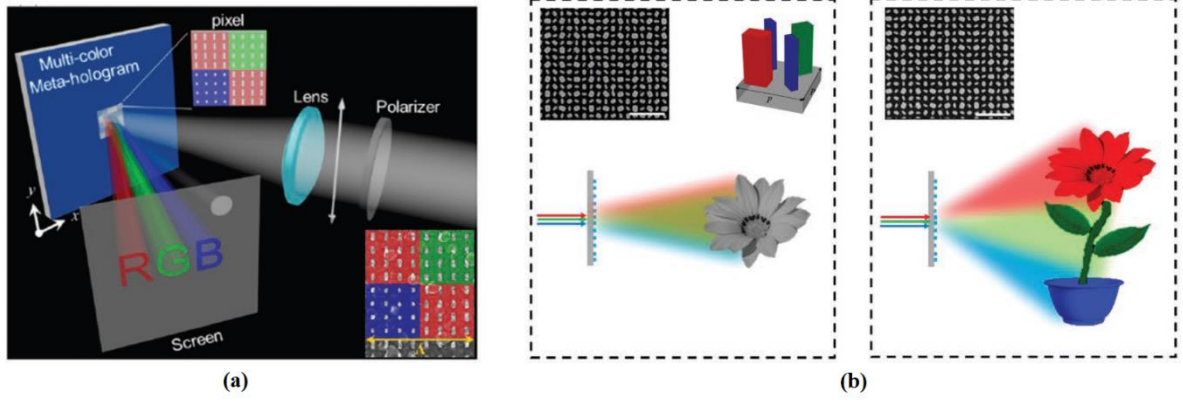
Şekil 6. Polarizasyon kontrolünde ve manipülasyonunda kullanılan bazı metayüzey uygulamaları (Hsiao *et al.* 2017)

Optik Holografi: Geleneksel olarak, holografi, ilk olarak 1948'de Dennis Gabor tarafından önerilen, istenen ışın ile referans ışın arasındaki girişim deseninin kaydedilmesine dayanan görüntüleme tekniğidir. Üç boyutlu holografik görüntülerin yeniden yapılandırılması, hologram yapısı üzerinde bir referans ışınının aydınlatılmasını sağlar. Yalnızca nesnenin genlik bilgisinin depolandığı geleneksel fotoğrafçılıkla karşılaştırıldığında, holografi dalga cephesinin hem genlik hem de faz bilgisini kaydeder. Faz modülasyonu ve haritalama tekniklerine dayanarak, hologramlar genlik, ikili ve faz hologramları olarak kategorize edilebilir. Faz hologramları, yüksek kırınım verimliliği ve basit faz kodlama teknikleri nedeniyle sıklıkla kullanılır. Geleneksel olarak, holografik görüntüler, sonlu bir mesafe boyunca yayılma etkisi yoluyla faz kontrolünü elde eden holografik plakalar kullanılarak yeniden yapılandırılmıştır. Bu nedenle, elde edilen hologram yapısı kalın bir malzeme tabakasından oluşmaktadır ve sonuçta tüm sistemin minyatürleşmesini sınırlamaktalar. Uzaysal ışık modülatörü, holografik görüntü kaydetmeye ve görüntülemeye izin vermektedir. Büyük piksel boyutuyla sonuçlanan hacimli yapılar, sınırlı görüş açısı ($\sim 4^\circ$), tek renkli görünüm ve istenmeyen yüksek dereceli kırınımları içeren geleneksel holografinin çeşitli teknolojik dezavantajları, optik performansı düşürmüş ve holografi için uzaysal ışık modülatörlerinin daha da geliştirilmesini sınırlandırmıştır. Son zamanlarda, hesaplama kaynaklarındaki önemli gelişme, bazı yeni holografik tekniklerin gerçekleştirilmesine izin verdi, ancak geleneksel holografinin kısıtlamalarını aşmayı başaramadı. Şekil 7'de optik holografi modeli ve Şekil 8'de optik holografi çalışma prensibi literatürde sunulmuştur (Hsiao *et al.* 2017).



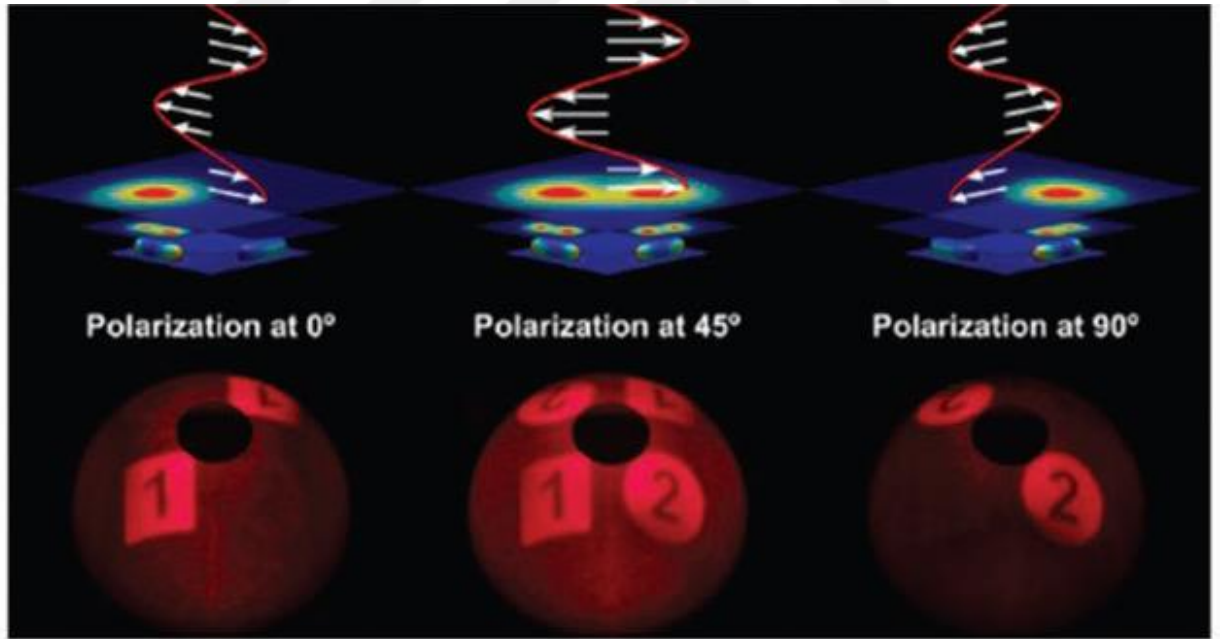
Şekil 7. Optik holografi modeli (Hsiao *et al.* 2017)

Metayüzeyler, holografik görüntüler elde etmek için EM dalgaların genel ve karmaşık dalga cephelerini tasarlama yeteneğine sahiptir. Mevcut tekniklerle karşılaştırıldığında, metayüzey holografi, gelen dalganın çift görüntüleme, düşük görüntü kalitesi ve sınırlı görüş açısı sorunlarını ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 8. Optik holografî çalışma prensibi (Hsiao *et al.* 2017)

Son yıllarda, metayüzey holografisi, kapsamlı bir şekilde incelenen ve 3D ekranlar için dinamik ve yeniden yapılandırılabilir optik manipülasyon, biyolojik görüntüleme, bilgi şifreleme, veri depolama gibi birçok uygulamada başarılı bir şekilde kullanılan gelişmiş bir holografik kayıt ortamı olarak ortaya çıkmıştır. Metayüzey hologramları, görüş açısını ($\sim 60^\circ$) iyileştirdi. Yapı bloğunun boyut, şekil ve oryantasyonunun hassas kontrolü, tam renk performansına, yüksek görüntü doğruluğuna ve hologramların gelişmiş kırınım verimliliğine yol açan yayılma özelliklerinin isteğe göre uyarlanmasına izin vermektedir (Hsiao *et al.* 2017).

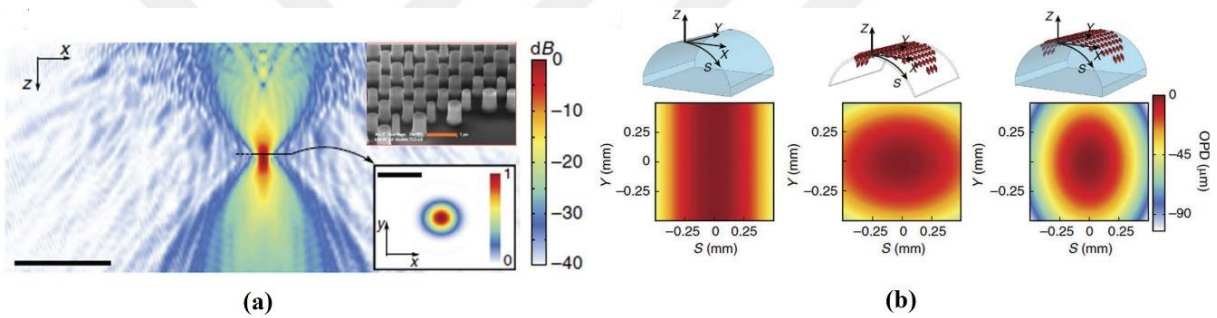


Şekil 9. Optik holografinin polarizasyon açısına göre değişimi (Hsiao *et al.* 2017)

Düzlemsel metayüzeylerin bir başka faydası, ışığı geniş hacimli yapılar boyunca birleştiren veya uzaklaştıran geleneksel lenslerin yerini almasıdır. Telekomünikasyon dalga boylarında düz lensler V-antenler kullanılarak tasarlanmıştır; ancak düşük verimlidirler. Verimliliği artırmak için, mikrodalga frekans rejiminde yansıtıcı metayüzey tabanlı merceklemeye önerilmiştir. Görünür ve terahertz frekans rejiminde düz merceklemeyi

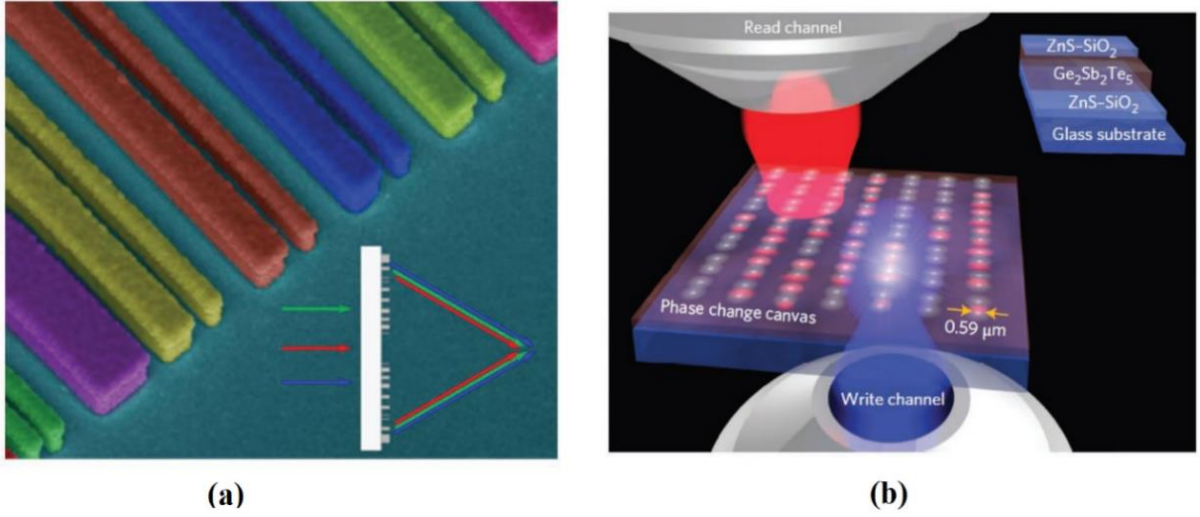
gerçekleştirmek için, ışık dalgalarının (Ni *et al.* 2013) ve THz dalgalarının (Jiang *et al.* 2013) fazını, genliğini ve polarizasyonunu kontrol eden V-şekilli açıklıklar rapor edilmiştir. Son zamanlarda, ultraviyole frekans rejiminde çalışan metal/dielektrik çok katmanlı düz lens rapor edilmiştir (Maas *et al.* 2016). Metayüzeylerin önemli uygulamalarından birisi de holografik görüntüler oluşturmaktır. Metayüzeyler EM dalganın genliğini, fazını ve polarizasyonunu manipüle etme yeteneğine sahip olduğundan hologram oluşturmak için kullanılabilirler. Örneğin, literatürde Pancharatnam-Berry faz değiştirici, boşluk-plazmon metayüzey kullanılarak verimli metayüzey hologramı deneysel olarak gösterilmiştir (Zheng *et al.* 2015). Benzer şekilde, deneysel olarak gösterilen metayüzeyi manipüle eden bir Pancharatnam-Berry fazı kullanılarak renkli hologram önerilmiştir (Choudhury *et al.* 2017).

Lensler ve Reflektörler: Geleneksel optik sistemlerde, EM dalgalar, kavisli ve hacimli olan parabolik reflektörler veya dielektrik lensler tarafından odaklanır. Minyatürleştirilmiş ve daha az hacimli lensler, odaklanan kırınım plakalar kullanılarak tasarlanabilir (Hsiao *et al.* 2017).



Şekil 10. (a) Meta-lensin elektrik enerji yoğunluğu (b) bir yakınsak ve bir uzaksak silindir kullanılarak tasarlanan metayüzeyin tasarımı (Hsiao *et al.* 2017)

Mikro ve milimetre dalga spektral rejimlerinde, düz merceklerin tasarımında EM dalgaların fazını kontrol etmek için frekans seçici yüzeyler veya yansıtıcı diziler kullanılır. Optik frekanslar için düz merceklemeye cihazları, nano yarıklar, optik maskeler ve nano delikli diziler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ayrıca, metayüzey tabanlı alt dalga boyu odaklama için süper lensler ve hiper lensler kullanılır.

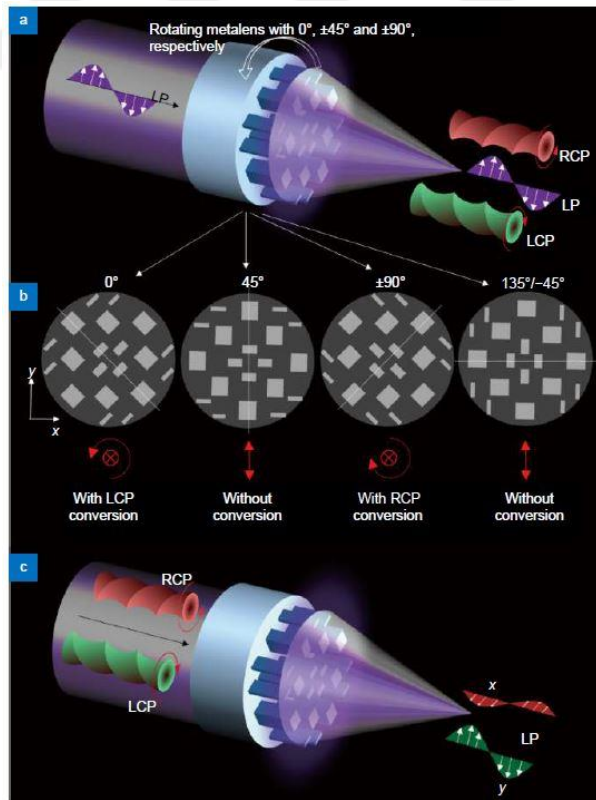


Şekil 11. (a) Meta-lensin SEM görüntüsü (b) ayarlanabilir optik cihazın şematığı (Hsiao *et al.* 2017)

Meta-lenslerin akı yoğunluğu aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_d} \sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f \quad (14)$$

Burada; λ_d dalga boyunu, x ve y ise uzaysal koordinatlarını temsil ederken f odak uzaklığıdır.

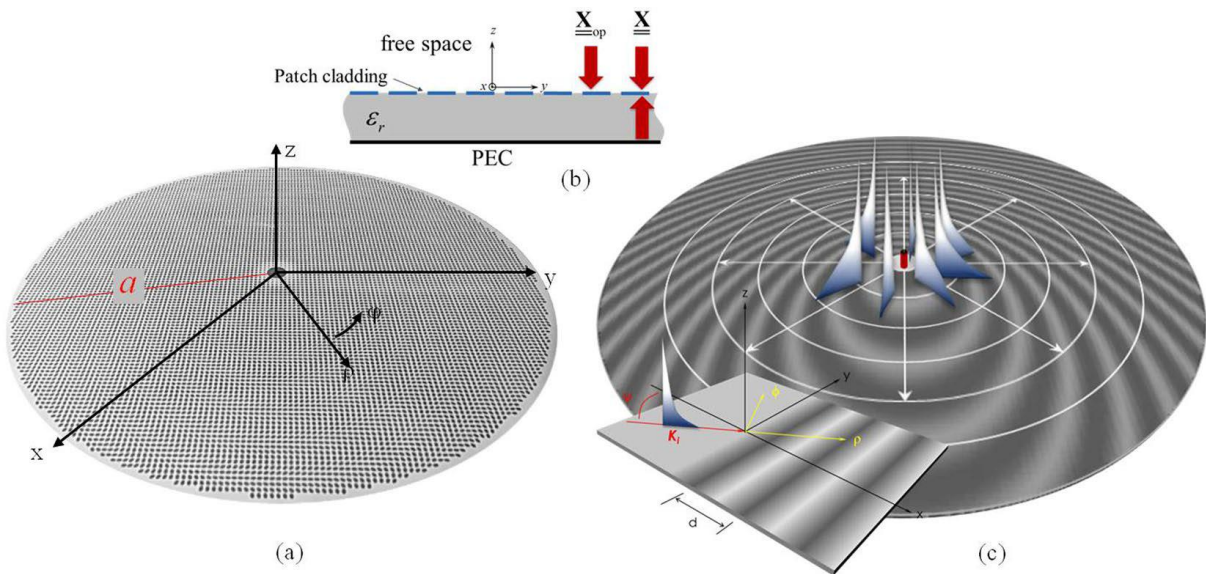


Şekil 12. (a,b) LP ile, farklı dönüş açlarına sahip meta-lensin dönüştürülmesinin şematik gösterimi (c) LHCP ve RHCP ile, meta-lensin dönüştürülmesinin şematik gösterimi (J. Li *et al.* 2022)

Metayüzey tabanlı antenler: Uyarlamalı anten sistemi tasarımıdaki temel hedef, açıklık alanlarının genlik, faz ve polarizasyon özelliklerini uyarlamaktır, çünkü yayılan ışınların polarizasyonu, şekli ve işaret yönü, açıklık alanının faz ve genlik özellikleri tarafından yönetilir. Geleneksel olarak, yüksek kazanç sergileyen milimetre dalga ve mikrodalga antenlerinin açıklık alanları, lens antenler, çanak antenler, verici diziler ve yansıtıcı diziler aracılığıyla oluşturulur. Bu geleneksel anten sistemi tasarımı teknikleri, lenslerin ve reflektörlerin hacimli olmasını gerektirir.

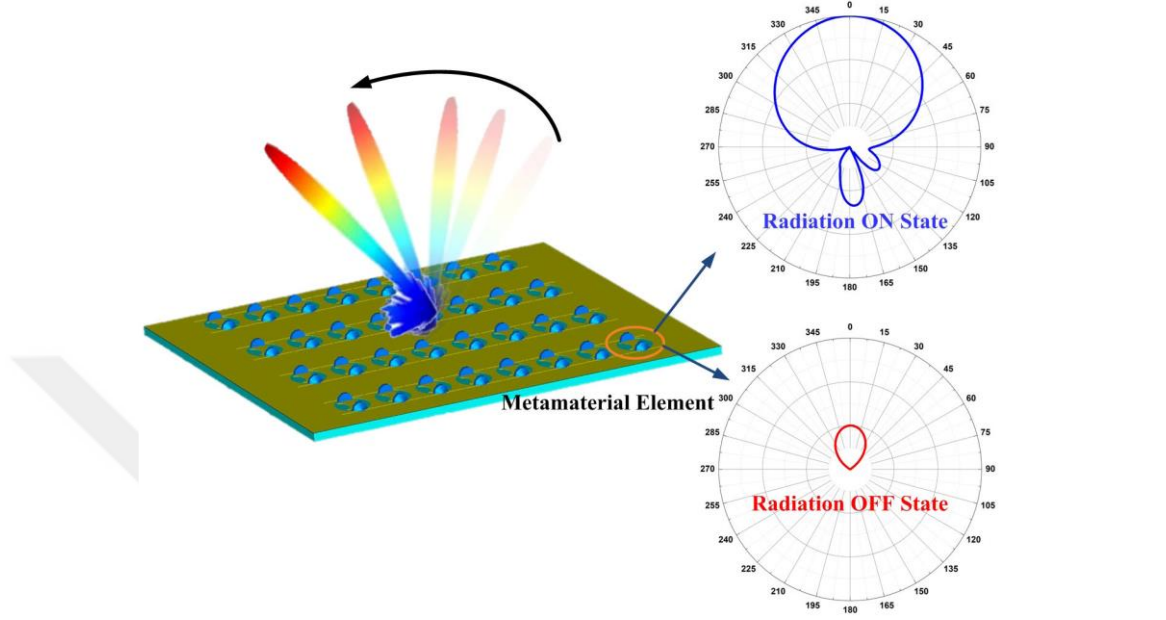
Yakın zamanda metayüzeyler hafif, düşük maliyetli ve kompakt anten sisteminin geliştirilmesini sağladı. Ani faz süreksizliklerinden yararlanan metayüzeyler, gelen EM dalgaların dalga yönlerini dönüştürme özelliğine sahiptirler. Metayüzey antenleri aracılığıyla, giriş uyarma alanı, sızdıran dalgaları destekleyerek açıklık alanlarına dönüştürülebilir. Karmaşık (genlik ve faz) açıklık alanları, homojen olmama ve anizotropi özelliklerinden yararlanılarak giriş uyarma alanlarının dönüştürülmesiyle geliştirilir. Kılavuzlu dalgaların karakteristiklerini kademeli metayüzeyler aracılığıyla manipüle etme konusundaki bu eşsiz yetenek, açıklığın alanlarının tepe değerinin ve fazının bağımsız kontrolüne izin verir. Metayüzey tabanlı dalga antenlerinin, düz lenslerin anten besleme ağıyla doğrudan entegrasyonu geleneksel emsallerine kıyasla önemli ölçüde azaltılmış kalınlığa sahip lens tabanlı antenlerin geliştirilmesine büyük önem verilmiştir.

Düşük hacimli, düşük maliyetli, çok yönlü ve büyük ölçekli üretimin tasarımı ve gerçekleştirilmesi için benzeri görülmemiş fırsatlar sunan metayüzey antenler, gözetleme ve radar sistemleri, hava platformu ve uydu iletişimine kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.



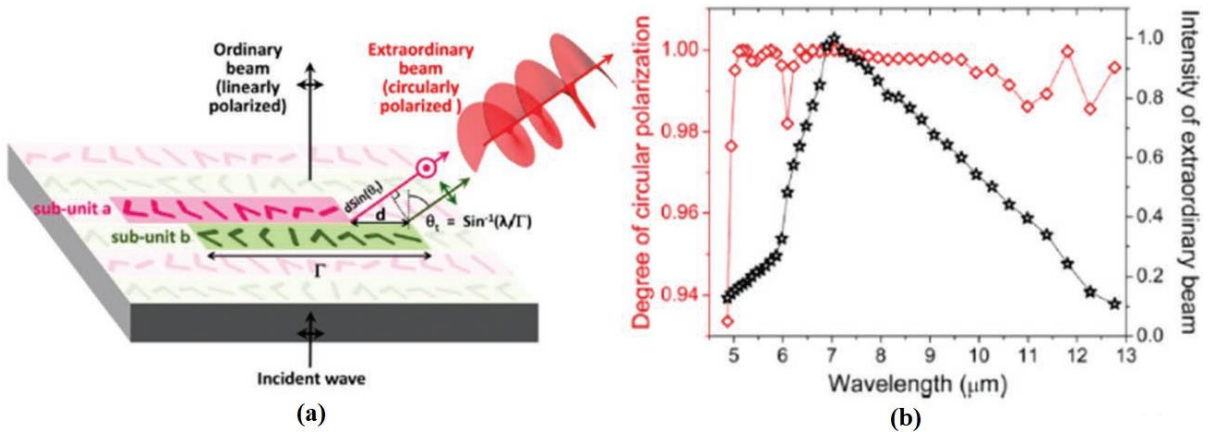
Şekil 13. Önerilen metayüzey antenin: (a) 3 boyutlu görüntüsü (b) birim hücre şekli (c) geniş modülasyonlu kapasitif reaktansın Floquet modları (Faenzi *et al.* 2019)

Son birkaç yılda, modüle edilmiş metayüzeylere dayalı sızdıran dalga antenine ilişkin yenilikçi bir fikir sunulmuştur. İstenen radyasyon tepkisini elde etmek için radyasyonlu EM dalgaların genlik, faz ve polarizasyon özellikleri modüle edilmiş metayüzey aracılığıyla kontrol edilmiştir. Metayüzey antenleri kavramı yakın zamanda ortaya konmuş olsa da hala bazı sorunlar mevcuttur. Birçok sorun arasında, bant genişliği en önemlisidir.



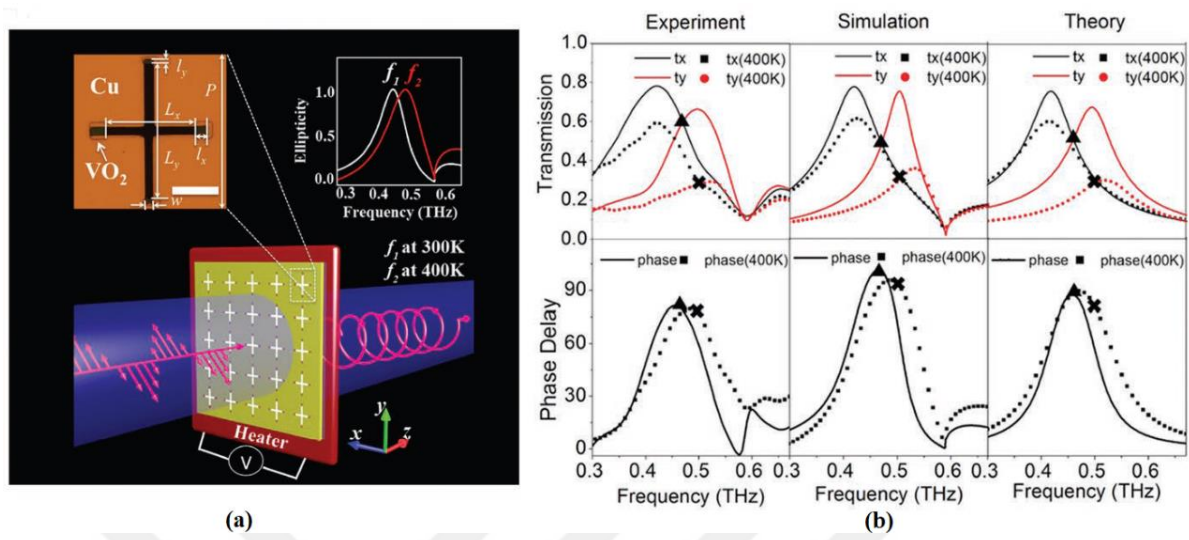
Şekil 14. Dinamik olarak uyarlanabilir metayüzey anteninin şematik olarak gösterimi (M. Lin *et al.* 2020)

Dalga Plakaları: Elektromanyetik ışığın dalga cephesini kontrol eden geleneksel metayüzeylerle karşılaştırıldığında, homojen metayüzeyler anizotropik geometri ile gelen ışığın polarizasyon durumunu kontrol eder. Bu metayüzey, Şekil 22(a)'da gösterildiği gibi, çeyrek dalga levha işlevselliğinin gerçekleştirilmesi için kullanılan plazmonik V-şekilli antenler içerir.



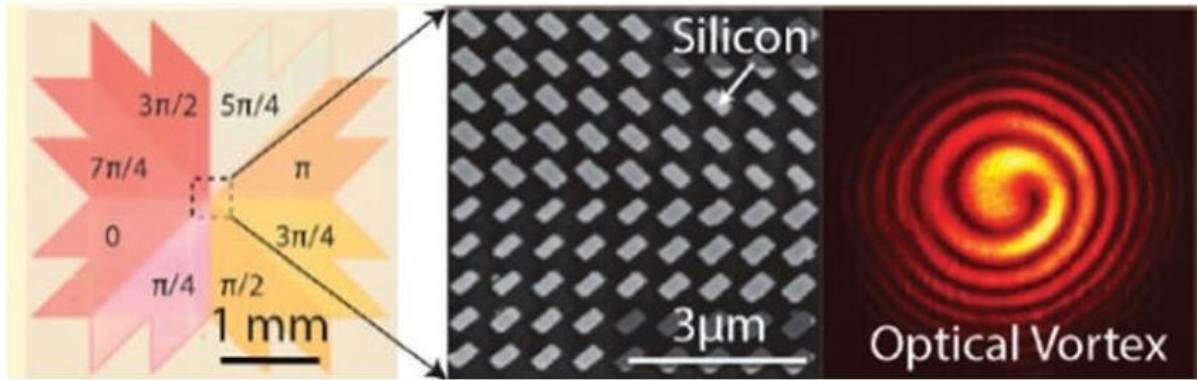
Şekil 15. (a) V-şekilli plazmonik antenler kullanılarak çeyrek dalga plakasının gerçekleştirilmesi (b) dalga boyuna göre dairesel polarizasyon değişimi ve ışın yoğunluğu değişimi (Hsiao *et al.* 2017)

Şekil 18’de THz bölgesinde 45° polarize ışığı CP ışığına gizleyen çeyrek dalga plaka ile frekansa göre faz gecikmesinin deneysel, simülasyon ve teorik olarak karşılaştırılması gözlemlenmektedir.



Şekil 16. (a) THz bölgesinde 45° polarize ışığı CP ışığına gizleyen çeyrek dalga plaka (b) frekansa göre faz gecikmesinin deneysel, simülasyon ve teorik olarak karşılaştırılması (Hsiao *et al.* 2017)

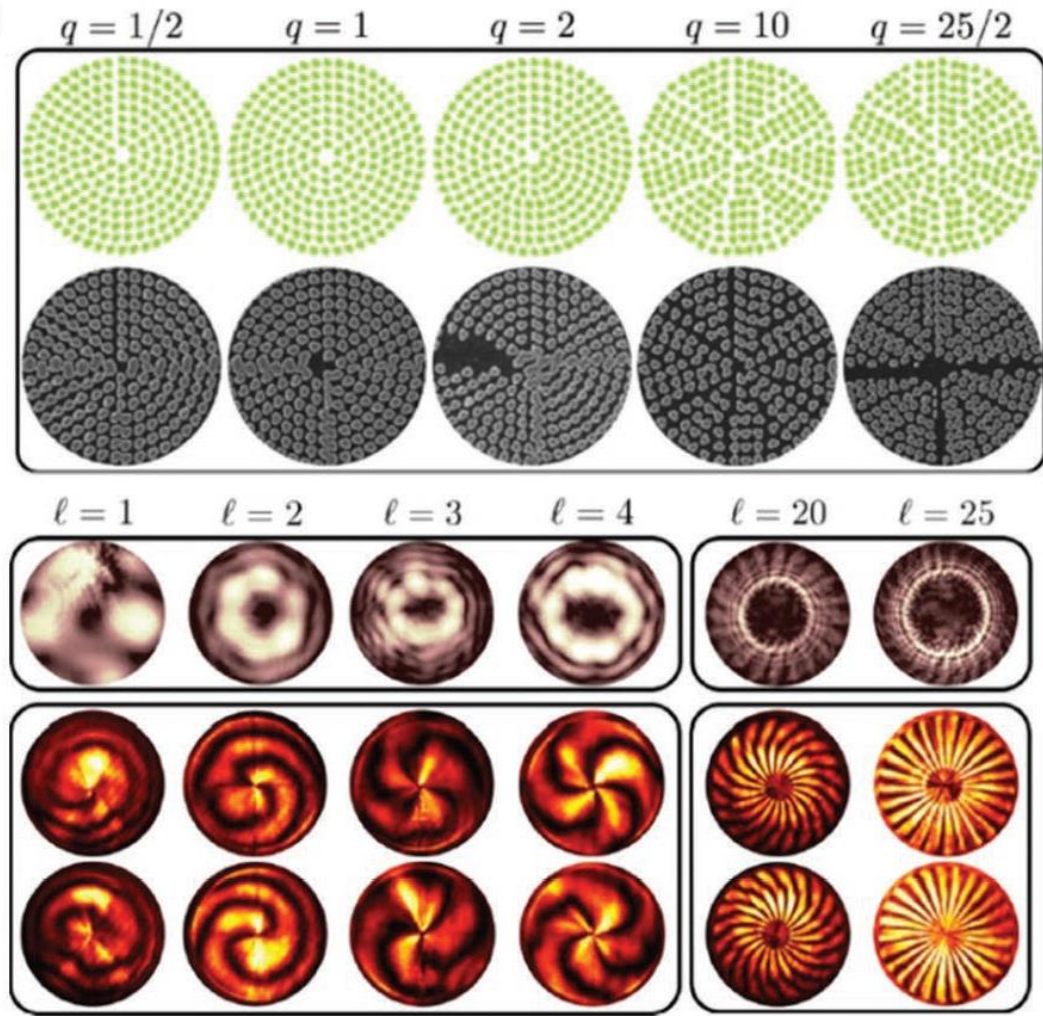
Optik Vorteks Kirişler: Son birkaç yılda, araştırma topluluğu tarafından, paralel lazer üretiminden, görüntülemenden ve yüksek kapasiteli iletişim sistemlerden yararlanmak için optik vorteksler incelendi.



Şekil 17. Optik girdap ışınının yoğunluğu ve faz profili (Hsiao *et al.* 2017)

İdeal dairesel polarize düzlem dalga durumu için ışık huzmesinin dönüş açısai momentumu $J_z = N\hbar$ ve karşılık gelen enerji $W = N\hbar\omega$ ile verilir; burada N foton sayısını ve $\hbar$ indirgenmiş Plank sabiti olarak gösterilir. Böylece açısai momentumun enerjilerine oranı $J_z/W = 1/\omega$ olarak gösterilebilir. Işık demetinin açısai momentumu ile ilgili bu sonuçları basit olmasına rağmen 1990'ların başına kadar bilinmiyordu. Açısai momentum kavramı, spin ve yörünge açısai momentumu arasında spesifik olarak paraksiyal rejimlerde karşılaştırmayı mümkün kılan bir dizi basit deneyde uygulanmakta ve böylece birçok yeni fenomenin

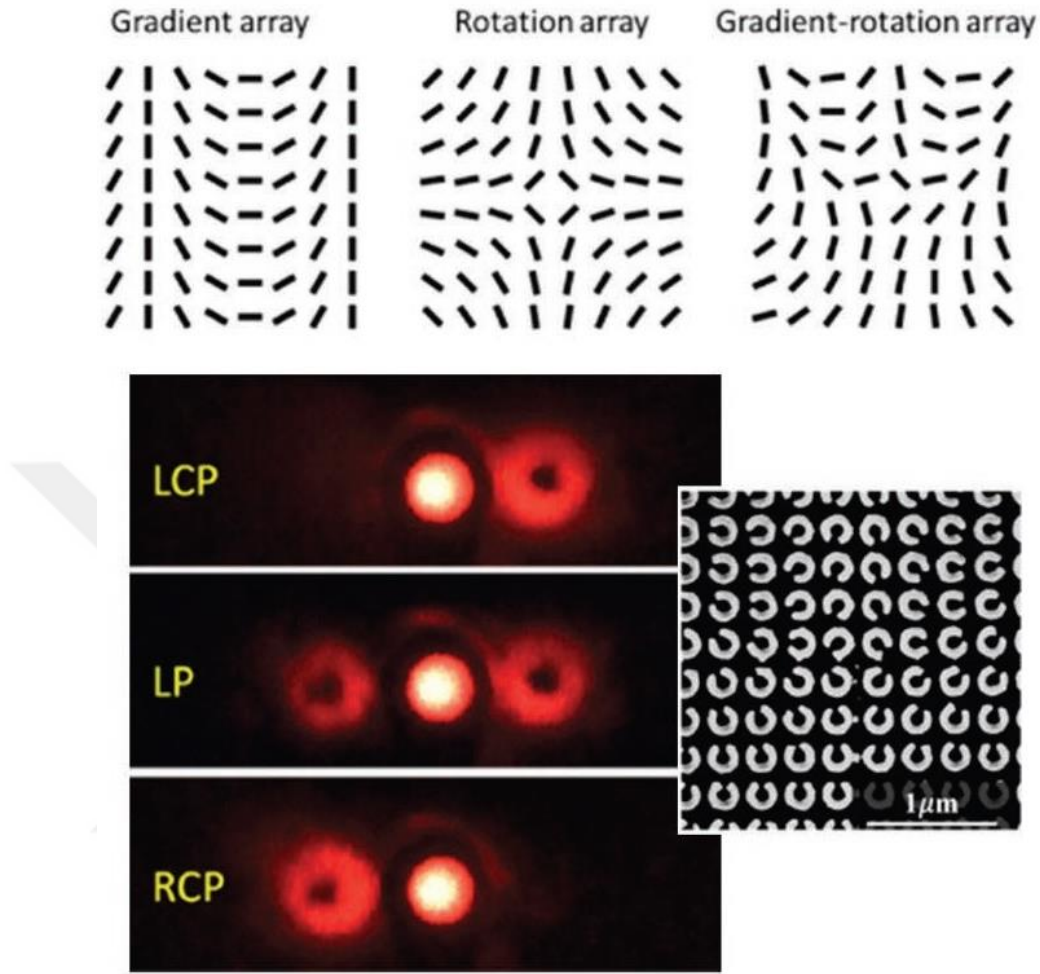
gözlemlenmesinin açıklığa kavuşturulmasına izin vermektedir. Optik vorteks demetinin Poynting vektörü, yayılma yönü boyunca spiral yörüngeye sahiptir ve yörünge açısal momentumuna neden olur. Radyo frekansları ve optik rejim için kavramın kanıtlanmasında birçok deneysel veri sunulmaktadır. Sıfır olmayan topolojik yüklü ($m \neq 0$) yörünge açısal momentumu taşıyan optik vorteks ışınları, halka şekli yoğunluğuna ve yapıdan uzağa yayılan ve yayılma eksenini etrafında dönen iç içe sarmal faz cephesine sahiptir. Optik girdaplar, biyolojik hücrelerin ve mikroskobik partiküllerin optik manipülasyonundan yüksek hızlı iletişim sistemlerine kadar geniş bir yelpazede yaygın olarak uygulanması nedeniyle büyük ilgi gördü.



Şekil 18. Optik girdap ışınının yoğunluğu ve faz profili (Hsiao *et al.* 2017)

Yörüngesel açısal momentum taşıyan optik vorteks demetleri, karmaşık genliklerinin ayrılabilir olması koşuluyla silindirik koordinatlar sisteminde incelenebilen ve ayrılmış değişkenlerin ürünü olarak yazılabilen LG modları olarak da adlandırılır. LG modu, mikroskobik bir parçacığı yakalamak ve ardından yayılma eksenini etrafında döndürmek için yörünge açısal momentumunu parçacığa aktarmak için kullanılabilir. LG kirişleri ile, Mathieu

kirişleri, Bessel kirişleri ve İnce-Gauss kirişleri de yörünge açısai momentumu taşıyan sarmal dalga cephesine sahiptir. Faz değeri, çıkıkın orijininde tanımsızdır, bu da iç içe sarmal bir şekil ile kirişin merkezinde sıfır yoğunluklu bir bölgeye yol açar.



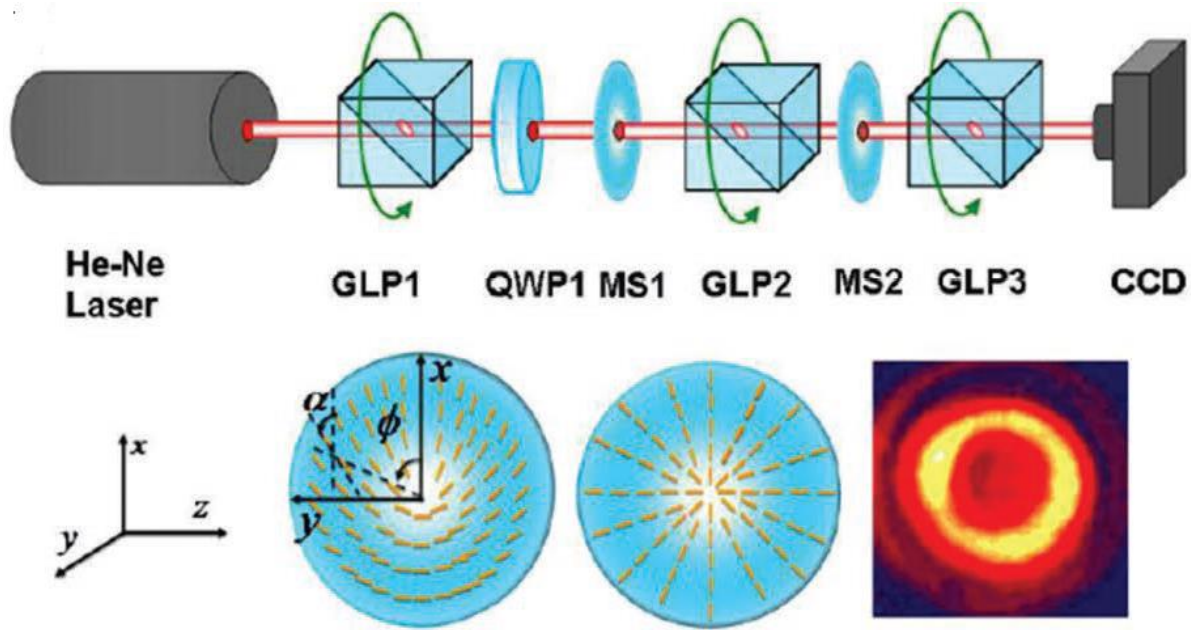
şekil 19. Optik girdap ışınının polarizasyona göre değışimi (Hsiao *et al.* 2017)

Uzaysal ışık modülatörü, spiral faz plakası, silindirik lens kullanan mod dönüştürücüler ve bilgisayar tarafından oluşturulan hologramlar olarak adlandırılan ayırt edici kırınım optik elemanlar gibi sarmal dalga cephesi daha yüksek dereceli LG ışınları üretmek için çeşitli teknikler açıklanmış ve başarıyla uygulanmıştır. Bu elemanlar, optik faz tekilliğı ile birinci dereceden nokta oluşturabilen ışın yayılım eksenii boyunca bir kenar çıkık içeren basit kırınım “çatalı ızgaralar” olarak kategorize edilebilir. Geleneksel kırınımlı optik elemanlarla karşılaştırıldığında, bunların spiral faz plakaları gibi kırılma optik eşdeğerleri, gelen EM dalgayı milimetre dalga ve mikrodalga frekanslarında yörünge açısai momentum modunda yapılandırmak için en basit çözümlerden biri olarak kabul edilir. Spiral faz plakası, $t = \lambda m \phi / 2\pi$ ile verilen malzemenin azimut bağımlı optik kalınlığı t olan bir dielektrik levha olarak tanımlanır; burada m topolojik yükü ve ϕ azimut açısını temsil eder. Bu yapının bir gelen düzlem dalgası ile aydınlatılması, iletilen radyasyon üzerine $e^{im\phi}$ değeriinin önünde sarmal faza

sahip sarmal fazlı bir ışın üretir. Spiral faz plakasının toplam kalınlığı (h), $2\pi m$ değerinin tamsayı katı olarak toplam faz kontrolünü elde edecek şekilde seçilmiştir. Spesifik bir işlemsel dalga boyu için, yükseklikteki bu değişiklik, dielektrik malzemenin etkin kırılma indisini değiştirir ve sonuçta EM dalganın azimut modu numarası olan m değerini değiştirir. Bu ilişki aşağıdaki denklemdeki gibidir.

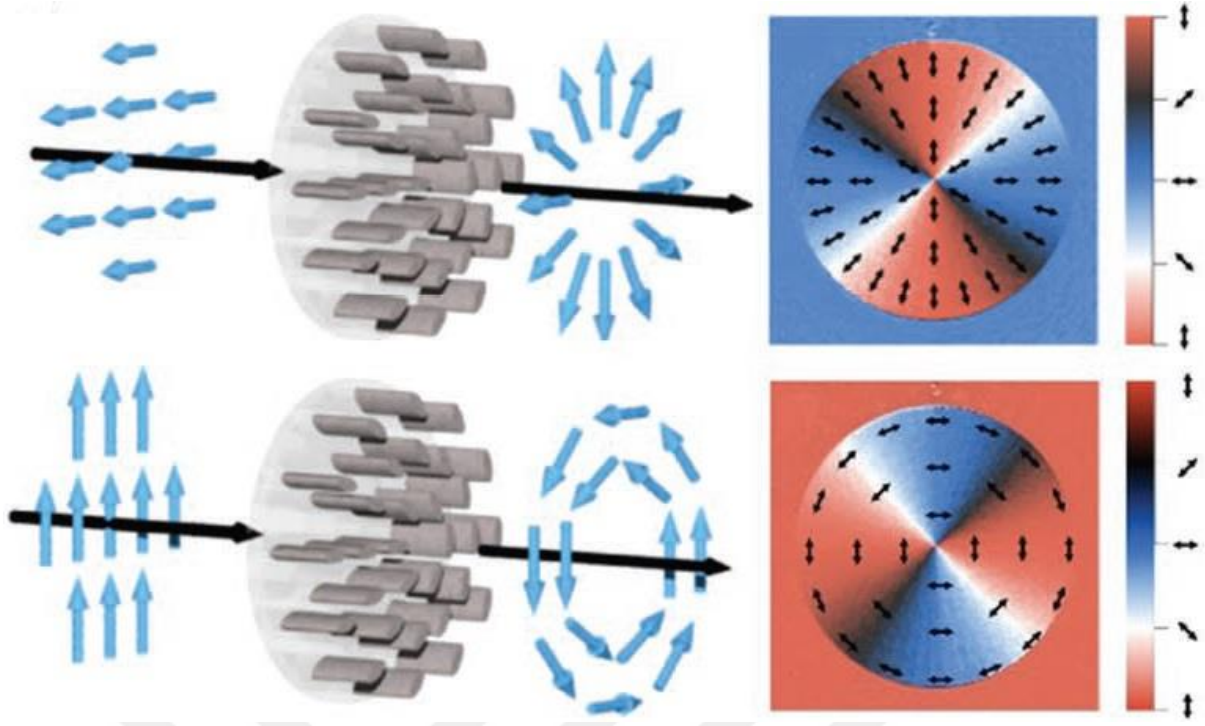
$$\Delta m = \frac{h\Delta n}{\lambda} \quad (15)$$

Burada Δm etkin kırılma indisini temsil eder. Basit işleme prosedürü ile spiral faz plakasını yapılandırmak için bir parça uygun dielektrik malzeme kullanılır.



Şekil 20. He-Ne lazer modeli (Hsiao *et al.* 2017)

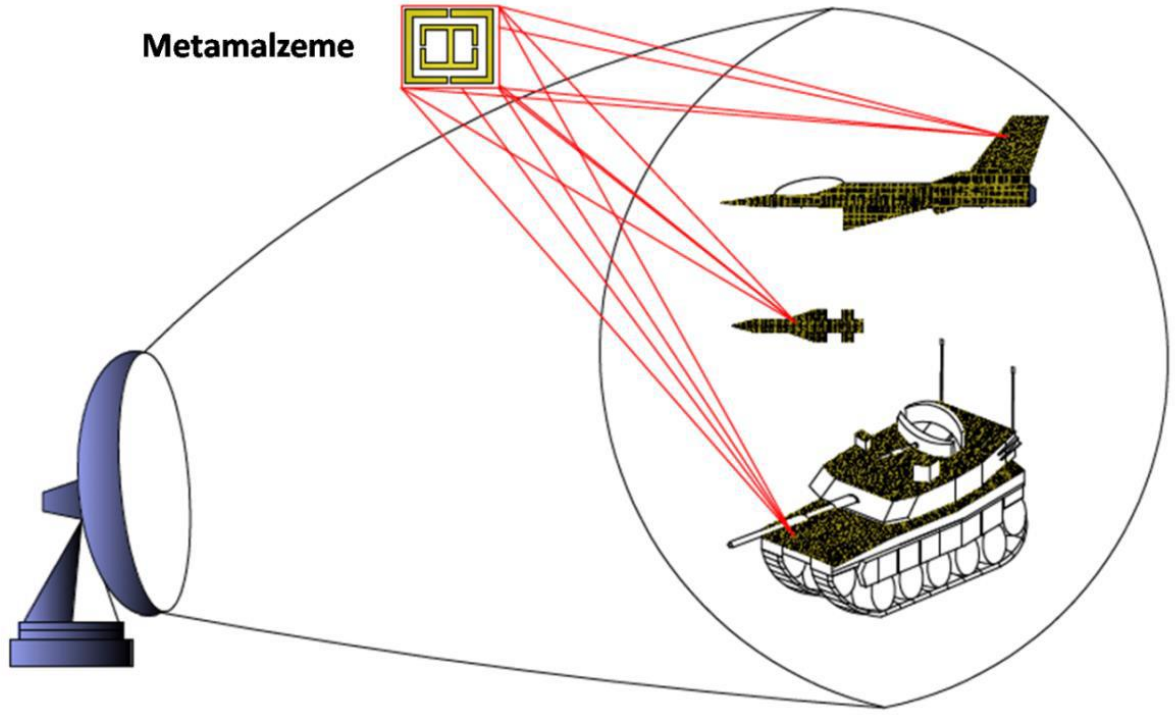
Silindirik mod dönüştürücüler, LG ışınları oluşturmak için uygun bir yaklaşım olarak ortaya çıktı. Yörüngesel açısal momentum taşıyan ışık demeti, silindirik mod dönüştürücüden geçtiğinde, çeyrek dalga plakasına benzer bir şekilde davranır. Yörüngesel açısal momentumun herhangi iki durumu, Poincare küresi üzerindeki durum temsili ile gösterilebilir. Benzer şekilde, ışık huzmelerinin optik bir sistem aracılığıyla yayılmasını tanımlamak için kullanılan iyi bilinen bir teknik olan Jones matrisleri, yörünge açısal momentumunun yayılmasını göstermek için eşdeğer bir modele sahiptir. Yörüngesel açısal momentum sergileyen polarize ışık, eklem matrisleri aracılığıyla da ele alınabilir.



Şekil 21. Spin ve yörünge açısal momentum modeli (Hsiao *et al.* 2017)

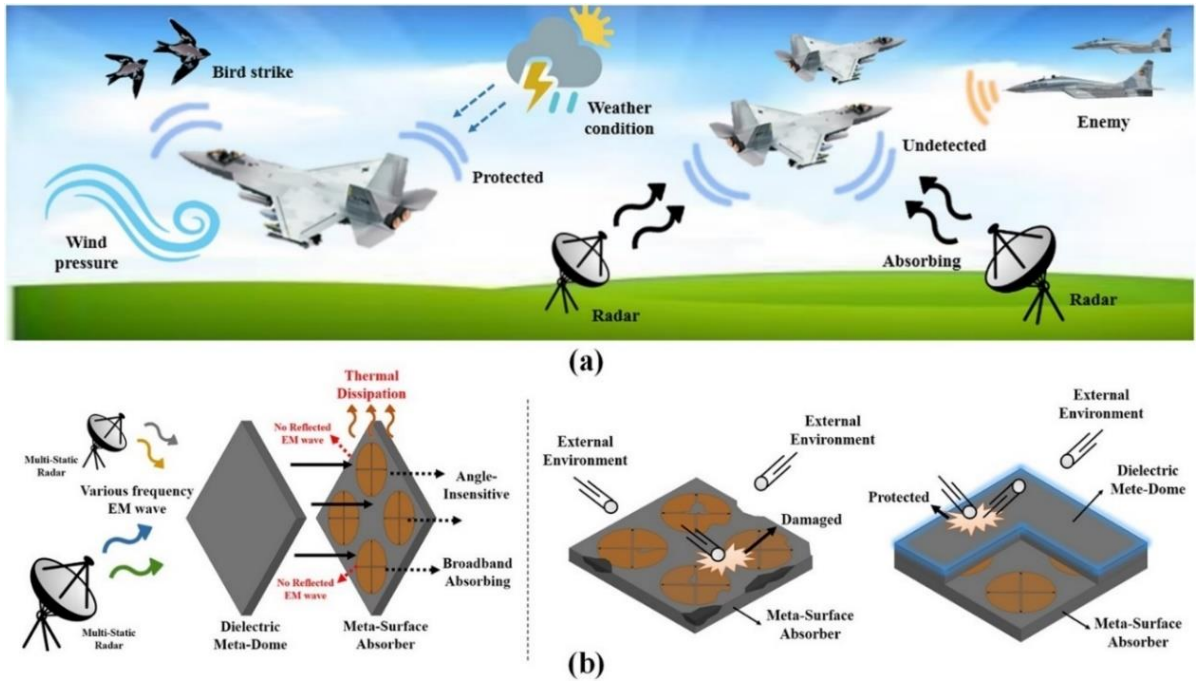
Geleneksel hacimli yapılarla karşılaştırıldığında, metayüzeyler optik vorteks ışını üretimi için minyatürleştirilmiş bir çözüm sunar.

Radar Soğurucular: Kablosuz iletişim ve radar algılamanın hızla gelişimi ile radar soğurucu malzemeler sivil ve askeri uygulamalarda büyük ilgi görmektedir. Elektromanyetik cihazların ve algılama sistemlerinin geniş çalışma frekans aralığı nedeniyle, geniş bant ve güçlü soğurma, radar soğurucu uygulamaları için giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu nedenle, geniş bantlı, yüksek verimli radar soğurucuların tasarımına ilgi artmaktadır. Radar cihazları hedefler hakkında hız, açı ve yön gibi bilgiler elde etmek için EM dalgayı ortama gönderip hedefe çarpıp geri yansıyan EM dalgayı değerlendirirler. Hedefe çarpıp geri yansıyan EM dalga radar cihazına ulaştığında yansıma kesri büyük değerde ise, hedef radar cihazı tarafından algılanmaktadır. Hedefe çarpıp geri yansıyan EM dalga radar cihazına ulaştığında yansıma kesri küçük değerde ise, hedef radar cihazı tarafından algılanmamaktadır. Bu sebepten dolayı radar soğurucuların EM dalgayı soğurup yansıma kesrini düşürmesi hedefin radar cihazı tarafından algılanamamasını sağlamaktadır. Şekil 22’de radar cihazının çalışma prensibi görülmektedir.



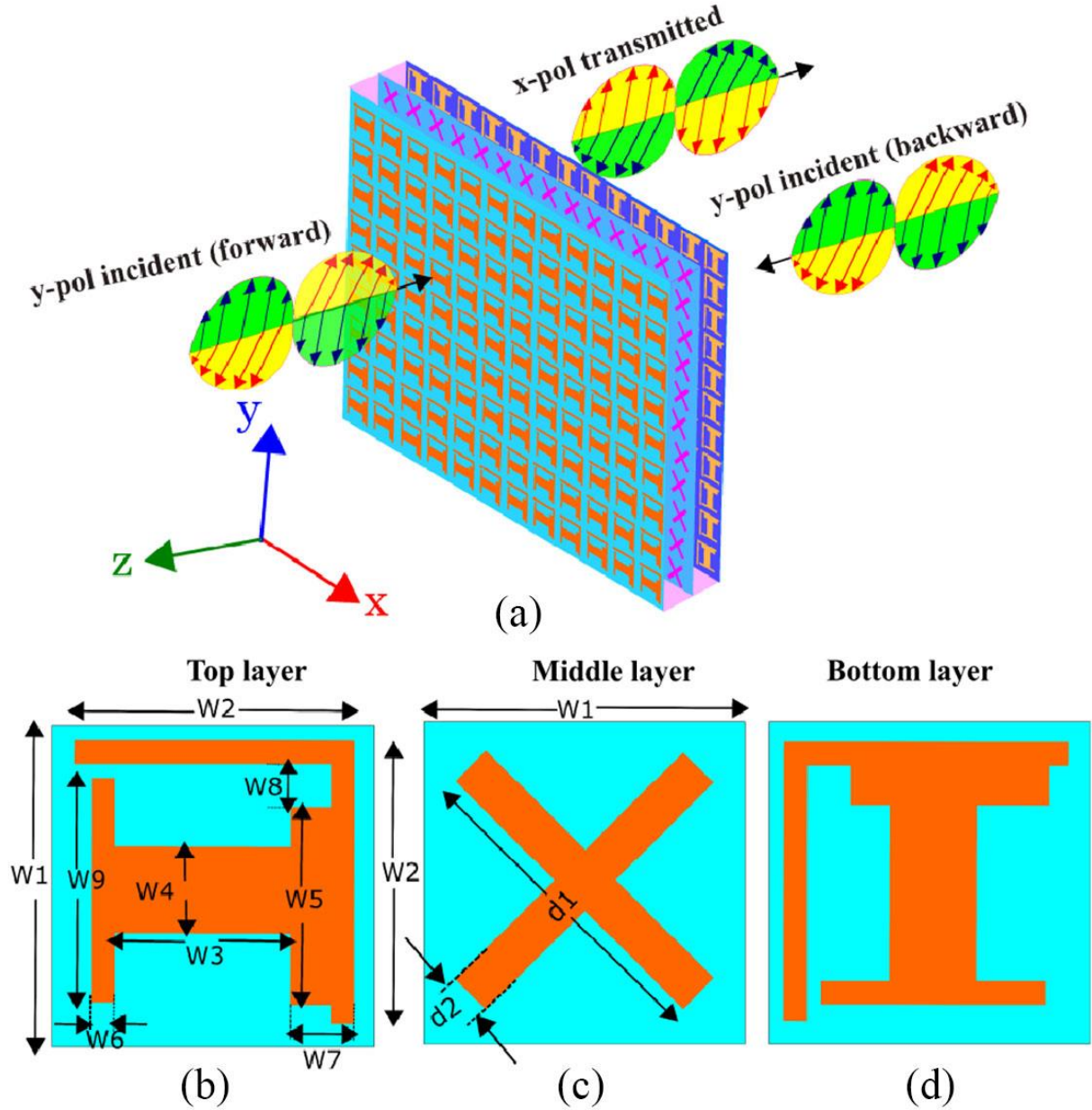
Şekil 22. Radar cihazının çalışma mekanizması (Özden *et al.* 2016)

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi radar soğurucular, rüzgâr basıncı, hava koşulları ve kuş çarpması gibi durumlardan korunmalı ve radar sinyalleriyle hedefin algılanmamasını sağlamalıdır. Geniş bant genişliği, geliş açısından bağımsızlık ve ultra-ince alttaş kalınlığı radar soğurucular için oldukça önemli parametrelerdir.



Şekil 23. (a) Radar soğurucu sistemi (b) radar soğurucu tabanlı metayüzeyin işlevi (Jeong *et al.* 2018)

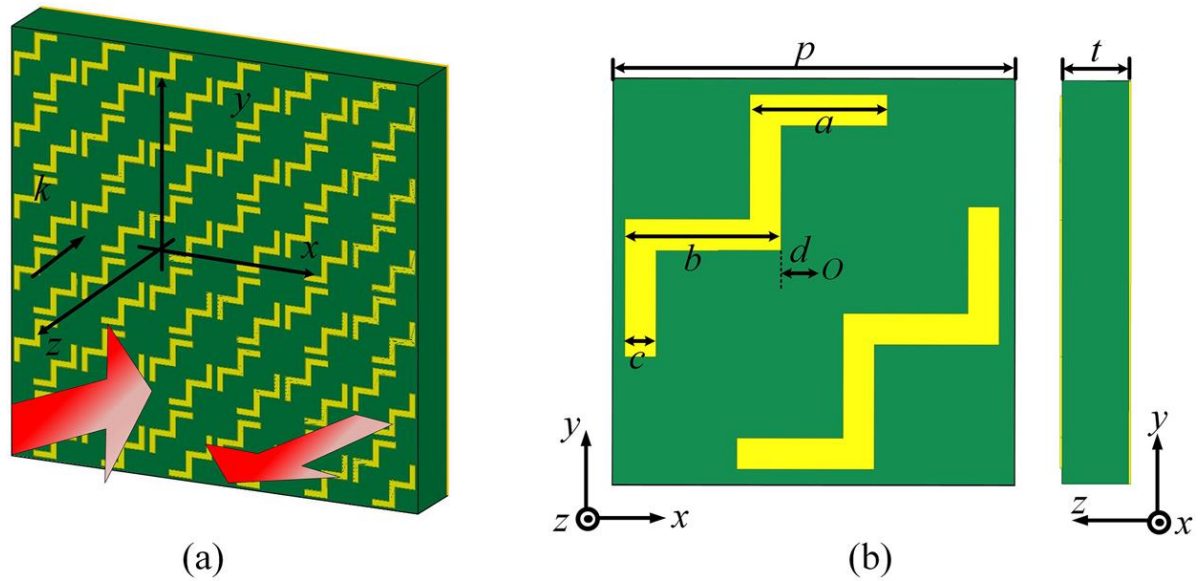
Polarizasyon Dönüştürücüler: Polarizasyon dönüşümünde geleneksel yöntemlerdeki dezavantajları ortadan kaldırmak için son yıllarda popülerlik kazanan metayüzey tabanlı polarizasyon dönüştürücüler uygulanabilmektedir. Bu dönüştürücüler, yansıma modunda veya iletim modunda, gelen EM dalganın polarizasyonunun kontrolünü sağlamaktalar (Mao *et al.* 2017).



Şekil 24. 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 (Huang *et al.* 2020; Mao *et al.* 2017; T. K. T. 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.* 2019). Bu nedenle, EM dalganın

polarizasyonunu manipüle ve kontrol etmekte yansıma modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün kullanımı iletim modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün kullanımından daha yaygındır.



Şekil 25. Yansıma modunda çalışan polarizasyon dönüştürücünün (a) 3 boyutlu görünüşü (b) önden görünüşü (c) yandan görünüşü (Y. Zhao *et al.* 2019)

Son yıllarda daireselden dairesele, doğrusaldan dairesele ve doğrusaldan doğrusala gibi yansıma modunda çalışan tek katmanlı polarizasyon dönüştürücüler popüler hale gelmiştir (Abdullah *et al.* 2021; J. Gao *et al.* 2018). Bu dönüştürücüler, V şekli (X. Gao *et al.* 2015), W şekli (G. Xu *et al.* 2022; Y. Zhao *et al.* 2019), L şekli (Kamal *et al.* 2021; Zafar *et al.* 2021), H şekli (J. Xu *et al.* 2018), U şekli (F. Li *et al.* 2019) ve bölünmüş halka rezonatörü (Mao *et al.* 2017) dahil olmak üzere çeşitli rezonatörlerle oluşturulabilir. Bu polarizasyon dönüştürücüler geniş bant ve yüksek PCR verimliliğine sahip olmalarına rağmen, geliş açısı arttıkça bant genişlikleri azaldığı için geliş açısına bağımlıdırlar. Geliş açısına bağımlı olmayan, polarizasyon dönüştürme oranı yüksek, geniş bantlı, tek katmanlı ve çok amaçlı metayüzey tasarımı oldukça zordur.

Tablo 1. Bant türlerinin frekans aralığı

Bant Türü	L	S	C	X	Ku	K	Ka	V	W
Frekans Aralığı (GHz)	1-2	2-4	4-8	8-12	12-18	18-27	27-40	40-75	75-110

Bu tez çalışmasında X-, Ku-, K- ve Ka-bantlarında çalışan polarizasyon dönüştürme oranı (PCR), dairesel polarizasyon dönüştürücü (CPC) bandında verimliliği %90 değerinin üzerinde metayüzey tabanlı, tek katmanlı, ultra-ince, geniş bantlı ve çok fonksiyonlu üç farklı anizotropik geometri tasarlandı. Bu tasarımlarda CPC bandına ek olarak lineer polarizasyondan

dairesel polarizasyona (LTC) dönüşüm bantlarında mevcuttur. CST Microwave Studio 2020 programında tasarlanan polarizasyon dönüştürücü tabanlı metayüzeylerin eş- ve çapraz-polarizasyon katsayıları değerleri ve faz açıları kullanılarak faz farkı, E_{co}/E_{cross} değeri, eliptiklik değeri hesaplandı. Ayrıca ortogonal bileşenlerin değeri ve faz açıları, geliş açısına göre PCR değeri, polarizasyon açısına göre PCR değeri hesaplandı. Daha sonra Origin Pro öğrenci sürümü ile şekiller çizildi. Rezonans frekansı değerlerindeki akım yoğunluğu ayrıntılı incelenerek polarizasyon dönüştürücülerin işlevi yorumlandı. Litografi yöntemi ile X- ve Ku-bandına (8-18 GHz) polarizasyon dönüştürme oranı %90 değerinden yüksek çalışan alttaşı FR4 olan polarizasyon dönüştürücü tabanlı metayüzey üretildi.

Ayrıca S-, C-, X-, Ku-, K-, Ka-, V- ve W-bantlarının tamamında çalışan absorpsiyon verimliliği %90 değerinin üzerinde olan metayüzey tabanlı, ultra-ince, ultra-geniş bantlı, üç katmanlı, geliş açısına ve polarizasyon açısına karşı bağımsız olan anizotropik radar soğurucu tasarlandı. CST Microwave Studio 2020 programında tasarlanan radar soğurucu tabanlı metayüzeyin empedansının reel ve imajiner kısımları, hesaplandı. Ayrıca önerilen radar soğurucunun geliş açısına göre soğurma verimliliği, polarizasyon açısına göre soğurma verimliliği hesaplandı. Daha sonra Origin Pro öğrenci sürümü ile şekiller çizildi. Rezonans frekansı değerlerindeki akım yoğunluğu ayrıntılı incelenerek radar soğurucunun işlevi yorumlandı.

KURAMSAL TEMELLER

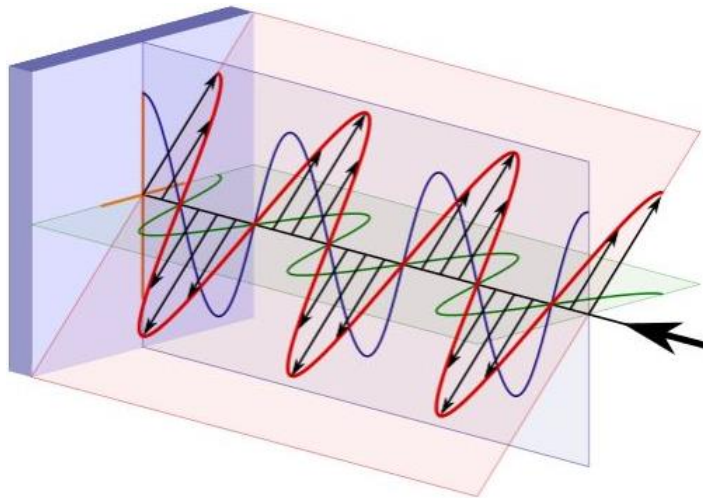
Bu bölümde EM dalgaların polarizasyon çeşitleri detaylı olarak incelenecektir. Polarizasyon dönüşümü hakkında temel bilgiler verilecektir. Direnç levha tabanlı radar soğurucular açıklanacaktır.

Elektromanyetik Dalgaların Polarizasyonu

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 dalgaının 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 Polarizasyon

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 olarak polarize bir dalga, Şekil 26'da görülmektedir.

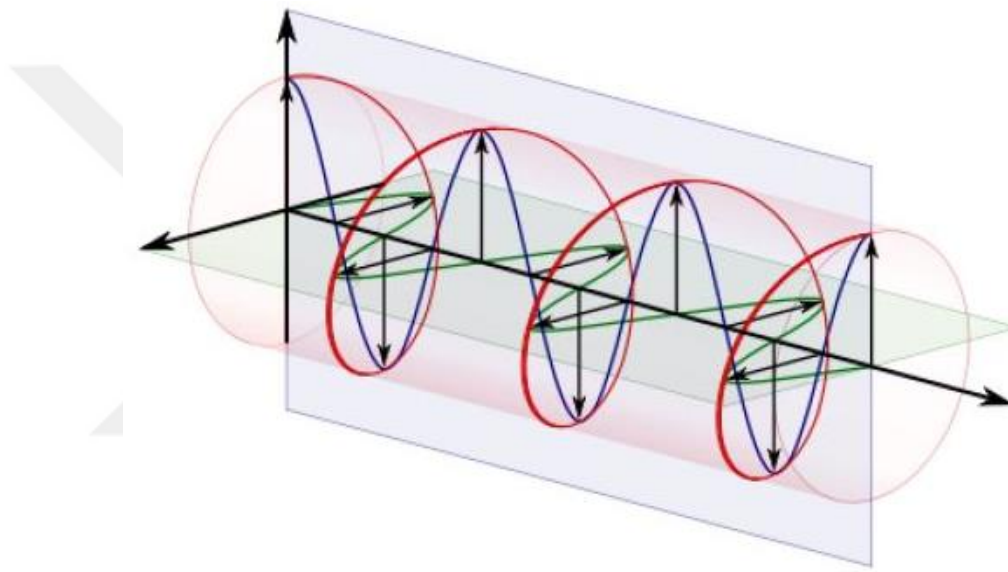


Şekil 26. Lineer polarizasyonun şematik gösterimi (Vikipedi, 2022)

Dairesel Polarizasyon

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).

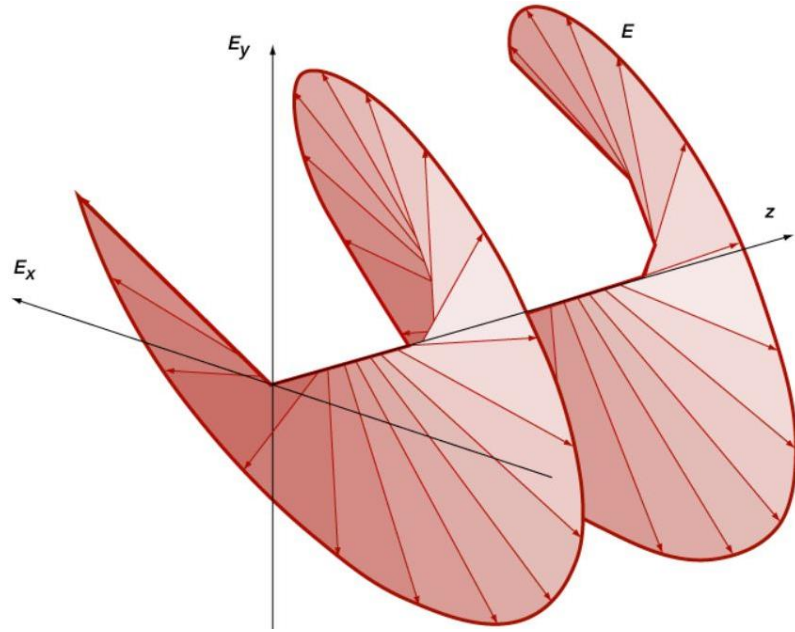
Elektrik alanının dönme şekli saat yönünde ise, dalga sağ yönlü dairesel polarize (RHCP) olur. Dönme saat yönünün tersinde ise, dalga sol yönlü dairesel polarize (LHCP) olur. Dairesel polarizasyonun şematik bir diyagramı Şekil 8'de görülmektedir (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021).



Şekil 27. Dairesel polarizasyonun şematik gösterimi (Wikipedia, 2022)

Eliptik Polarizasyon

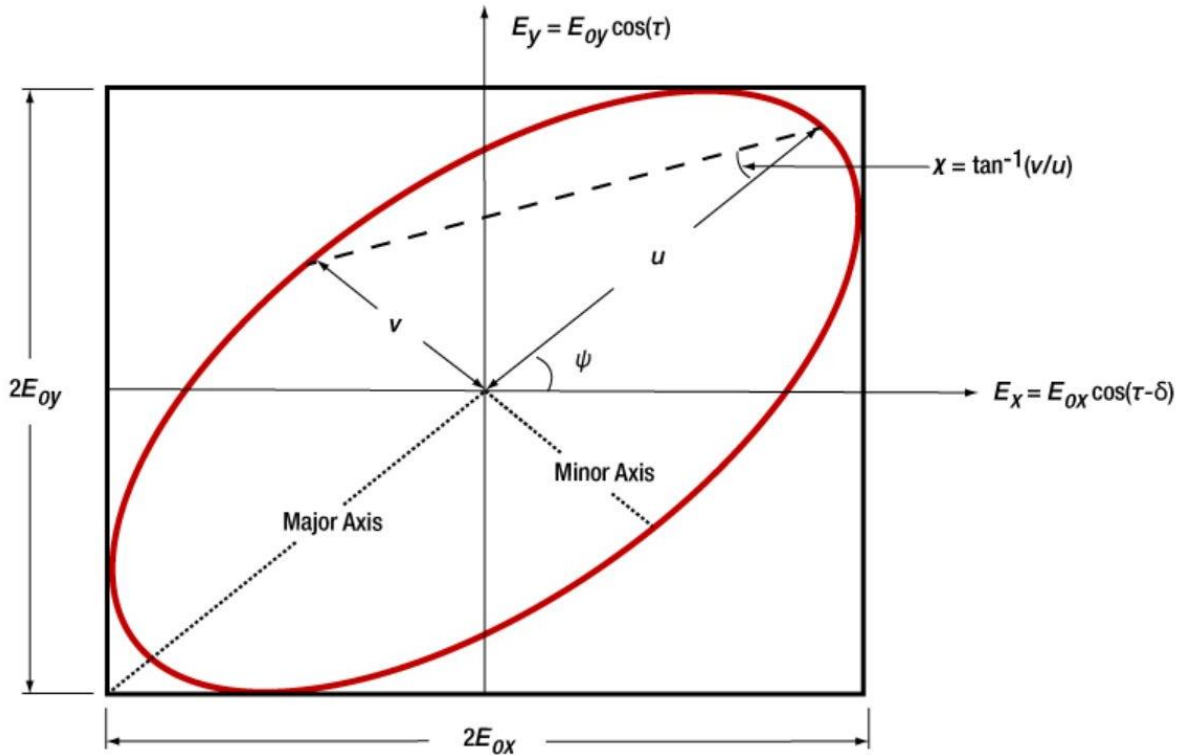
Elektrik alanının ucu uzayda sabit bir noktada zamanın bir fonksiyonu olarak elips çiziyorsa, zaman-harmonik dalgası eliptik olarak polarize olur. Dairesel polarizasyondaki aynı kurallardan faydalanarak dönme şeklinin türü belirlenir. Ayrıca, bir dalga ne doğrusal ne de dairesel olarak polarize değilse eliptik olarak polarize olur (Khan, 2018). Eliptik polarizasyonun şematik gösterimi Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 28. Eliptik polarizasyonun şematik gösterimi (Thorlabs, 2022)

Polarizasyon Elips

EM dalgaının polarizasyon durumu, polarizasyon elipsi kullanılarak da tanımlanabilir. Polarizasyon elipsinin genel bir şekli Şekil 10'da gösterilmektedir. ψ açısı ana eksen ile x eksenindeki açıdır. Eliptiklik parametresi, Şekil 10'da gösterildiği gibi elipsin dış merkezinin veya elips açısının bir alternatifidir ($\chi = \tan^{-1}(b/a)$). Dairesel ve lineer polarizasyon durumları sırasıyla χ değerinin 45° ve 0° eliptiklik değerine karşılık gelir (Khan, 2018).



Şekil 29. Polarizasyon Elips diyagramı (Thorlabs, 2022)

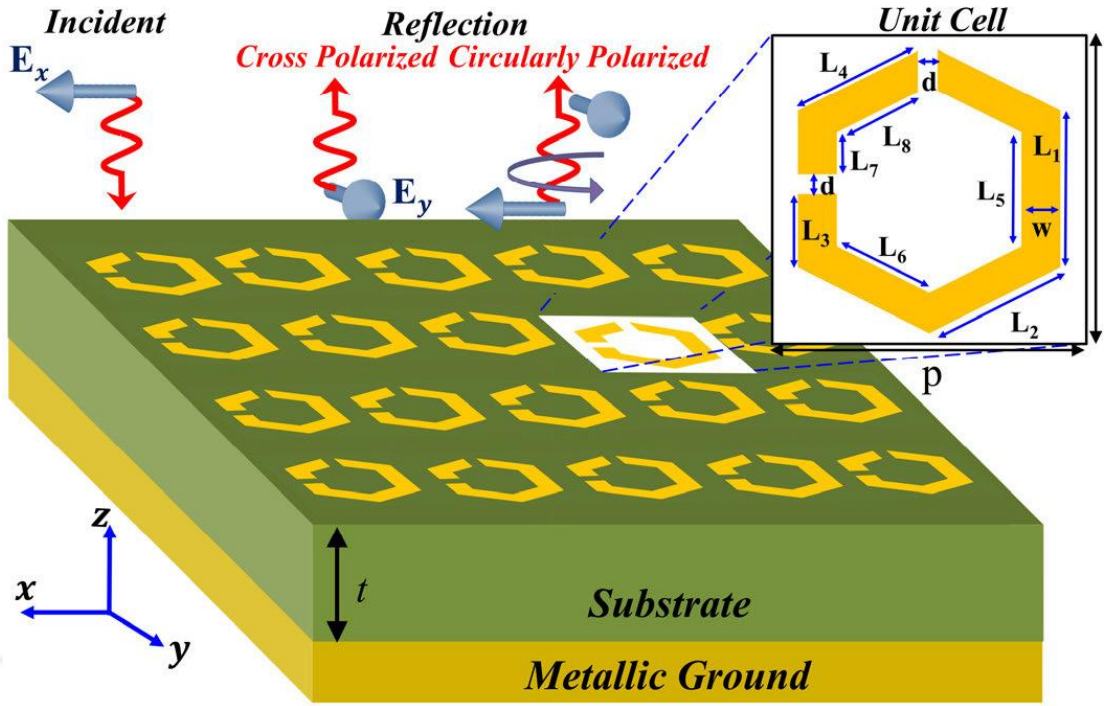
Elektromanyetik Dalgaların Polarizasyonu için Jones Hesabı

Polarize EM dalgalar, 1941'de R. C. Jones tarafından sunulan Jones hesabı ile belirlenebilir. EM dalga, optik elemanı geçtiğinde ortaya çıkan dalga polarizasyonu, optik elemanın Jones matrisinin ve gelen dalga polarizasyonu Jones vektörünün çarpımı alınarak bulunur. Tek dalga boylu 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 'ye diktir; her ikisi de hareket yönüne "enine" düzlemde bulunur (Khan, 2018).

Çapraz Polarizasyon Dönüşümü

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, terahertz, 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.

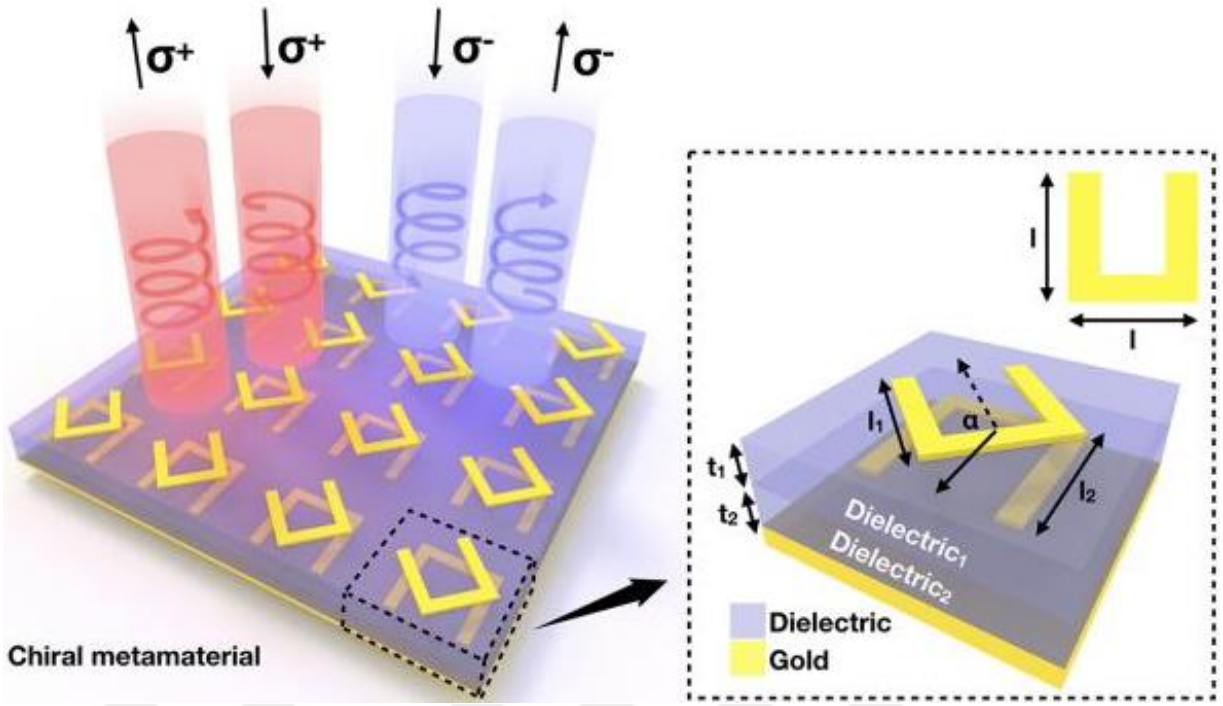
Yansıtıcı çapraz polarizasyon dönüştürücü metayüzeylerde, bazı anizotropik birim hücrelerin iki boyutlu periyodik dizisi, metalik bir zemin düzlemi tarafından desteklenen elektriksel olarak ince dielektrik alt taşın üzerine modellenir ve frekans rejiminde çapraz polarizasyon dönüşümü gerçekleştirilir. 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 30'da altıgen metayüzey üzerinde dairesel polarizasyon dönüştürücü çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 30. 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 dalgaının 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 terside geçerli olduğundan dolayı transmisyon modunda çapraz polarize dönüştürücü çift kırılmalı anizotropik metayüzey, ultra ince bir yarım dalga gibi davranır.

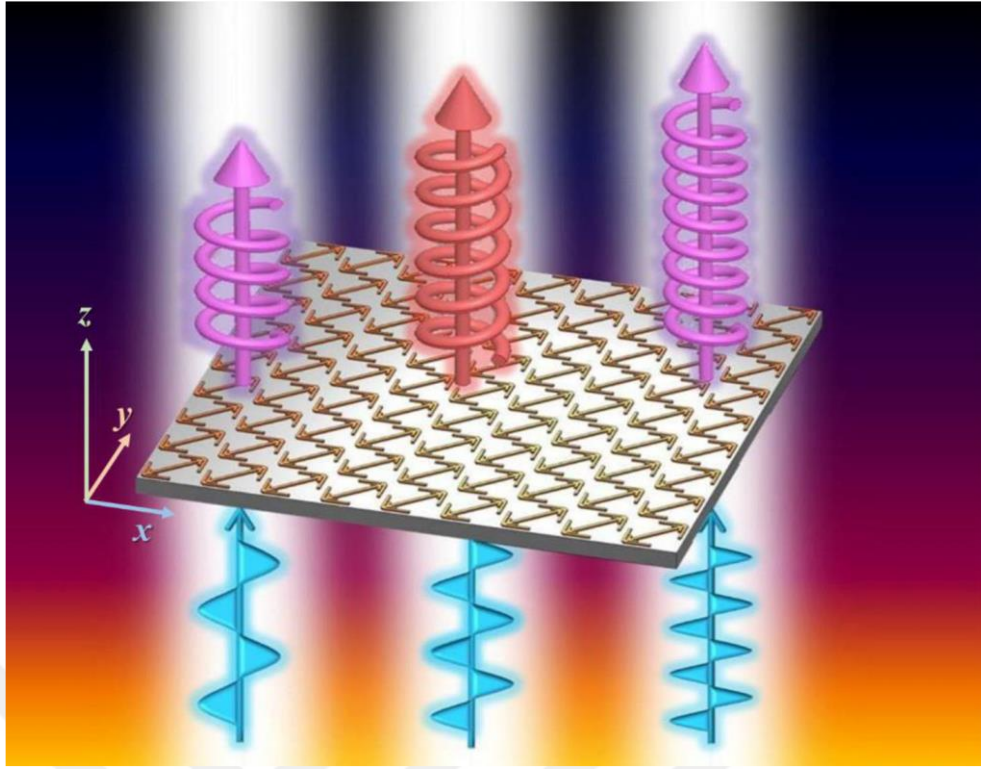
Düzlemsel kiral yapılar, daha önce açıklandığı gibi, doğrusal polarizasyon yönünü döndürmek için kullanılabilecek optik özelliklere sahiptir. Kiral metalmalzemelerin (KMM) polarizasyon döndürme kapasitesi doğal olarak oluşan malzemelerden daha yüksektir, ancak gelen elektrik alanı ve indüklenen manyetik 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 31. Kiral metamatizeme (Ma *et al.* 2018)

Lineer-Dairesel Polarizasyon (LTC) Dönüşümü

Yansıma modu ve iletim modu, lineer-dairesel polarizasyon dönüşümü için literatürde kullanılmaktadır. Yansıma modunda, gelen dalga'nın 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.

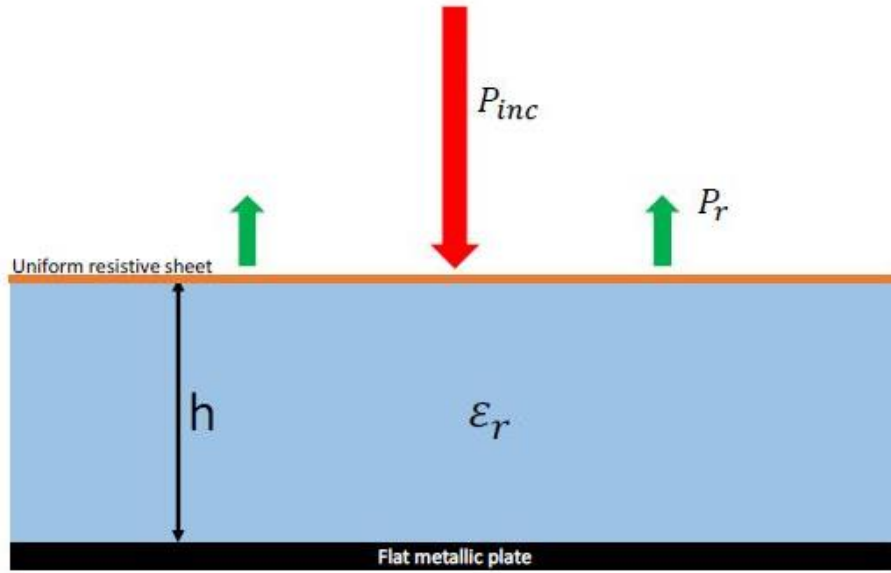


Şekil 32. LP'den CP'ye dönüşüm için metayüzeyin kavramsal diyagramı (Z. Y. Li *et al.* 2021)

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

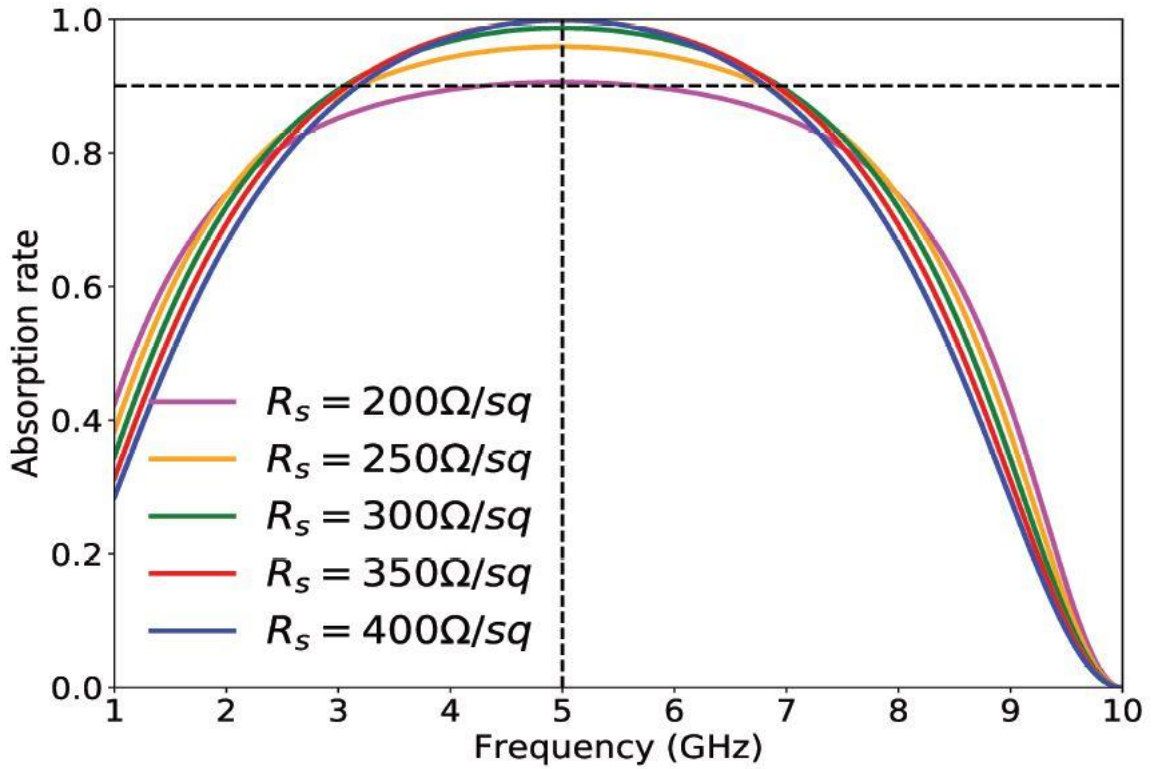
Dirençli Levha Tabanlı Geniş bant Radar Soğurucular

Metayüzey soğurucu tasarımında yansımaya kesrinin küçük olması, geniş bant aralığı, geliş açısına bağımlı olmaması ve mümkün olduğunca ince olması oldukça önemlidir. Şekil 33'te alttaş malzemesi üzerine direnç levha tabanlı radar soğurucu görülmektedir. Bu katmana Salisbury katmanı denir. Çok katmanlı direnç levhalarının kullanıldığı yapılara da Jaumann soğurucular denir (Beeharry, 2020).



Şekil 33. Tek katmanlı direnç levha tabanlı soğurucu (Beeharry, 2020)

Şekil 34’te Salisbury katmana sahip soğurucunun farklı dirençli levha değerlerinde soğurma kesri değeri görülmektedir. Levha tabanlı soğurucuların tasarımında genellikle en iyi sonucu veren direnç değerini üretmek genellikle zordur. Ancak üretimde direnç değeri tasarımdaki direnç değerine yakın olduğu takdirde genellikle üretimdeki soğurma kesri değeri tasarımdaki soğurma kesri değerine yakın olmaktadır. Üretimdeki direnç değerini belirlemek için dört nokta ölçüm metodu kullanılmaktadır.



Şekil 34. Direnç levha tabanlı soğurucunun direnç değerine göre soğurma kesrinin değişim grafiği (Beeharry, 2020)

MATERYAL VE YÖNTEM

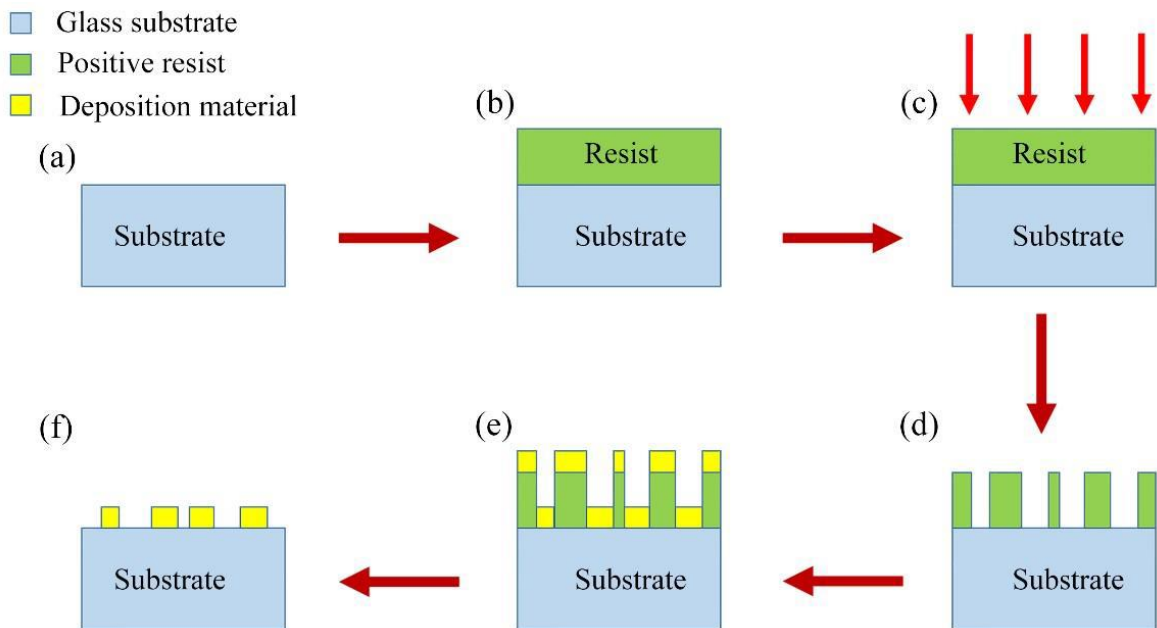
X- ve Ku-bandı metayüzey polarizasyon dönüştürücünün üretiminde litografi yöntemi kullanıldı. Litografi yöntemi ayrıntılı olarak açıklandı. Araştırma bulgularındaki bazı grafikler, polarizasyon dönüştürücü ve radar soğurucu temel parametrelerindeki formüllerden faydalanılarak elde edildi.

Litografi Yöntemi

Veselago'nun negatif kırılmaya sahip varsayımsal malzeme çalışması, sol elli malzemelerin 20. yüzyılın sonlarında bilinmesinden bu yana uzun süre fark edilmedi. Güçlü hesaplama kaynaklarının ve en son üretim teknolojilerinin mevcudiyeti, metamalzemelerin tasarımı ve üretimi için durumu değiştirdi. JB Pendry, negatif kırılma indisi olgusunu yeniden canlandıran ve teorik çalışmasıyla, örneğin metalik çubuklar, halka, spiraller, sarmallar ve yarık gibi elektriksel olarak küçük saçıcıların periyodik dizilerini ortaya koyan, yapay olarak tasarlanmış malzemeler alanında öncü bir araştırmacı olarak yetkilendirilmiştir. Birkaç yıl sonra, bölünmüş halka rezonatörleri ve ultra ince teller kullanarak epsilon negatif (negatif kırılma indisi) etkisini ilk kez deneysel olarak gösteren D. R. Smith oldu. Yapay olarak tasarlanmış yapıların elektromanyetik dalgalara karşı makroskopik tepkisi, yalnızca alt dalga boyu yapı bloklarının belirli geometrisi ve bunların uzaysal dağılımı tarafından yönetilir ve yeni elektromanyetik işlevselliklere yol açar. Genellikle, bölünmüş halka rezonatörünün elektriksel boyutu, $\lambda_0/10$ olarak ayarlanır, burada λ_0 , meta-atomun rezonans frekansı için boş alan dalga boyu olarak tanımlanır (Mahmood, 2020).

Mikrodalga rejiminde, metamalzeme yapılarını imal etmek için çeşitli aşındırma tekniklerine sahip yerleşik baskılı devre kartı (PCB) teknolojisi kullanılır. Standart bir baskılı devre kartı teknolojisi, iletken yollar kullanarak farklı bileşenleri fiziksel olarak destekleyen ve elektriksel olarak bağlayan iletken olmayan bir alt tabakadan oluşur. Tek taraflı PCB ile karşılaştırıldığında, çok katmanlı PCB'ler daha fazla sayıda bileşenin yerleştirilmesine izin verir çünkü iç taraftaki iletken yollar aksi takdirde bileşenler arasındaki ek alanı işgal eder. En basit elektrik ve elektronik ürünler hariç hepsinde kullanılır. Öte yandan, daha kısa dalga boyları için elektron demeti litografisi (EBL), metamalzemelerin gerçekleştirilmesi için en yaygın olarak uyarlanmış üretim tekniğidir. EBL, bir yüzey boyunca çok küçük yapıların doğrudan yazılması için odaklanmış bir elektron demetini tarayan maskesiz bir modelleme uygulamasıdır. Belirli bir yapıyı modellemek için EBL, malzeme biriktirme, malzeme modifikasyonu veya malzeme

kaldırma modlarında gerçekleştirilebilir. EBL'nin birincil avantajı, birkaç nanometre (10-nm çözünürlük) aralığında özel şekiller oluşturabilmesidir. Bu araştırma çalışmasında, hassas desenleme ve çok küçük yapıların gerekliliği nedeniyle, istenen yapıları (meta-yüzeyleri) gerçekleştirmek için EBL fabrikasyon tekniği tercih edilmiştir. Teknolojik gerçekleştirme için, metamalzeme üretimini şu şekilde gösteren bir üretim akış şeması (a) temizlenmiş cam alt tabaka; (b) substrat üzerinde pozitif dirençli spin kaplama; (c) elektron demeti litografisi kullanılarak maruz bırakma işlemi; (d) maskeye direnmek; (e) istenen metalin veya dielektrikin döndürülerek kaplanması; (f) Kalkış işleminden sonraki nihai yapı Şekil 28'de sunulmuştur. Genellikle cam, metamalzeme tasarımı için bir dielektrik alttaş olarak kullanılır. Yüzey temizliği, hassas ve pürüzsüz üretim için önemli bir parçadır, bu nedenle ilk adım, alt tabakayı ve diğer bileşikleri çıkarmak için aseton ve izopropil alkol ile temizlemektir. İstenen yapıya bağlı olarak, farklı tipte rezistörler kullanılabilir, ancak tipik olarak %6 polimetil metakrilat ve %94 anizol kullanılır. Direncin gerekli kalınlığı, bir döndürmeli kaplama işlemi kullanılarak biriktirilir. Döndürme kaplayıcının tüm parametreleri gerekli kalınlığa göre ayarlanır. Numune, elektron ışını litografisi işlemi için hazırlanmıştır. Elektron ışını litografisinden sonra, istenen kalınlıktaki metal veya dielektrik malzeme, döndürme kaplama ile biriktirilir ve son olarak metamalzeme yapısı hazırır. 2000 yılında, J. B. Pendry, ilk kez, yapay olarak yapılandırılmış malzemeler kullanarak mükemmel merceklemeyi uygulamaya yönelik vizyoner konsepti sundu. Bundan sonra, metamalzeme kavramı doğdu ve kapsamlı bir şekilde incelendi ve negatif kırılma indeksi, negatif geçirgenlik, yapay manyetizma, görünmezlik gizleme, biyo algılama, optik nano devre antenleri, ışın ayırıcı, elektromanyetik dalga birleştirici, mükemmel soğurucu ve hologramda başarıyla uygulandı (Mahmood, 2020).



Şekil 35. Elektron ışını litografisi kullanılarak metamalzemenin üretimi (Mahmood, 2020)

Polarizasyon Dönüştürücü Temel Parametreleri

Yansıma Katsayıları: Gelen elektrik alanı (E_i) y yönünde polarize (E_{iy}) olursa, yansıyan alanın (E_r) eş- ve çapraz polarize bileşenleri için yansıma katsayıları sırasıyla $R_{xy} = |E_{rx}| / |E_{ry}|$ ve $R_{yy} = |E_{ry}| / |E_{ry}|$ olarak ifade edilir. Benzer şekilde, gelen elektrik alan (E_i) x yönünde polarize (E_{ix}) olursa, yansıyan alanın (E_r) ko- ve çapraz polarize bileşenleri için yansıma katsayıları sırasıyla $R_{yx} = |E_{ry}| / |E_{rx}|$ ve $R_{xx} = |E_{rx}| / |E_{rx}|$ olarak ifade edilir. Meta-yüzey, elektriksel veya manyetik olarak polarize olabilen alt dalga boyu birim hücrelerinin tekrarından oluştuğu için, keyfi bir metayüzey, polarize olabilen parçacıklardan oluşan bir yüzey olarak modellenenir.

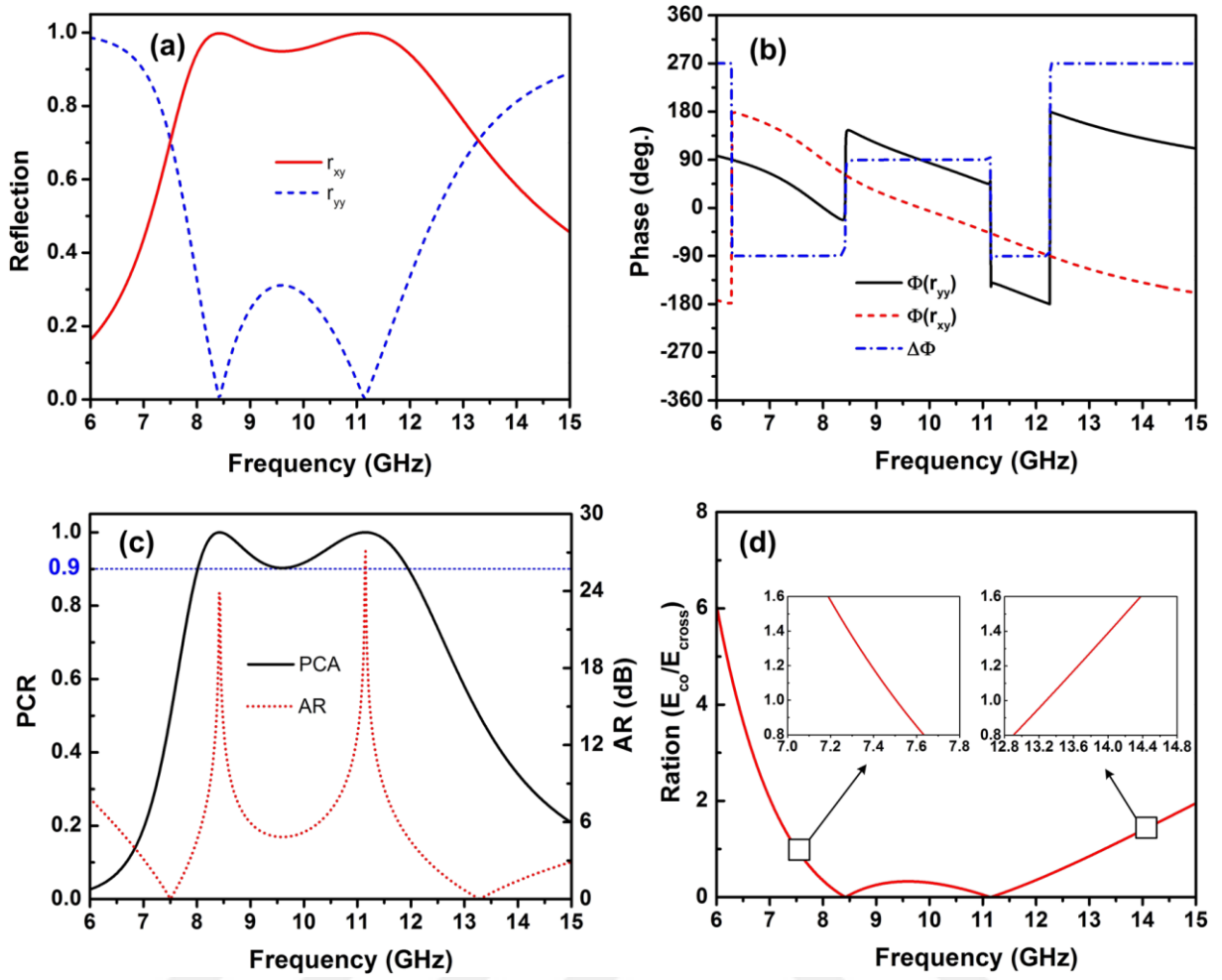
Yatay ve dikey lineer polarizasyonlar x ve y etiketleri ile gösterilirken, sağ-elli dairesel polarizasyon (RHCP) ve sol-elli dairesel polarizasyon (LHCP) sırasıyla "+" ve "-" ile gösterilir. Matematiksel biçimde, Kartezyen bazında Jones yansıma katsayısı matrisi, denklem 20'de R ile ifade edilir (Ahmed *et al.* 2021).

$$R = \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{bmatrix} \quad (16)$$

R matrisindeki terimleri kullanarak, bir doğrusal polarizasyon dönüştürücünün polarizasyon dönüştürme verimliliğini gösteren bir dönüştürücünün polarizasyon dönüştürme oranını aşağıdaki denklem ile elde etmek mümkündür (Khan *et al.* 2019).

$$PCR = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2} \quad (17)$$

Ayrıca, gelen elektrik alanının x eksenini boyunca polarizasyonu varsayılırsa, PCR, x ve y eksenleri değiştirildikten sonra denklem 21 kullanılarak hesaplanır. Şekil 36'da literatürde sunulan çalışmadaki eş ve çapraz polarize yansıma katsayıları değerleri, eş ve çapraz polarize yansıma katsayıları faz açıları ve faz farkı, polarizasyon dönüştürme oranı ve E_{co}/E_{cross} oranı görülmektedir (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021).



Şekil 36. (a) Eş- ve çapraz- polarize yansıma katsayıları değerleri (b) Eş- ve çapraz- polarize yansıma katsayıları faz açıları ve faz farkı (c) Polarizasyon dönüştürme oranı (d) E_{co}/E_{cross} (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021)

Öte yandan, dairesel polarizasyon dönüştürücülerinde, meta yüzeyin polarizasyonu sürdürme yeteneği, polarizasyon sürdürme oranı (PMR) ile belirlenir. RHCP gelen dalgalar için PMR, Denklem 4'te ifade edilir. Benzer şekilde, eğer LHCP gelen dalga ise, + ve - denklem 22'de yer değiştirir (Khan *et al.* 2019).

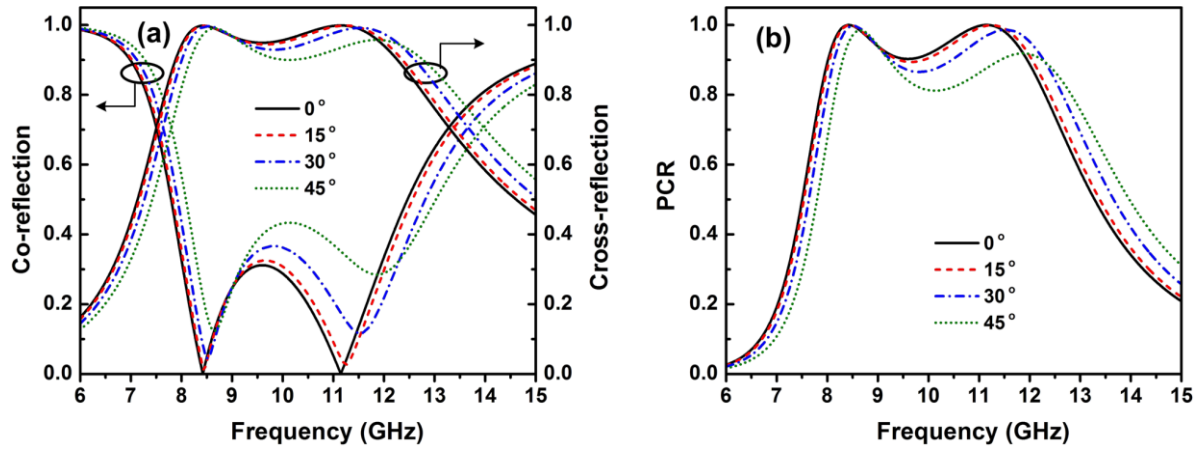
$$PMR = \frac{|R_{++}|^2}{|R_{-+}|^2 + |R_{++}|^2} \quad (18)$$

Denklem 23'te gelen y polarize dalgada normalleştirilmiş eliptiklik (e) kullanılarak hesaplanan dairesel olarak yansıyan dalga'nın tipini belirlemek için kullanılır (Khan *et al.* 2019).

$$e = \frac{2|R_{xy}||R_{yy}|\sin\Delta\Phi}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2} \quad (19)$$

Normalleştirilmiş eliptiklik + 1 olduğunda yansıyan dalga RHCP'dir ($R_{xy}=R_{yy}$ ve $\Delta\Phi = 90^\circ + 2k\pi$ (k tamsayıdır)). Normalleştirilmiş eliptiklik -1 ($R_{xy}=R_{yy}$ ve $\Delta\Phi = -90^\circ + 2k\pi$ (k tamsayıdır)) olduğunda yansıyan dalga LHCP'dir. Şekil 37'de literatürde sunulan bir

çalışmadaki (a) Eş- ve çapraz- polarize yansımaya katsayılarının açıya göre değişimi ve polarizasyon dönüştürme oranının açıya göre değişimi görülmektedir (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021).

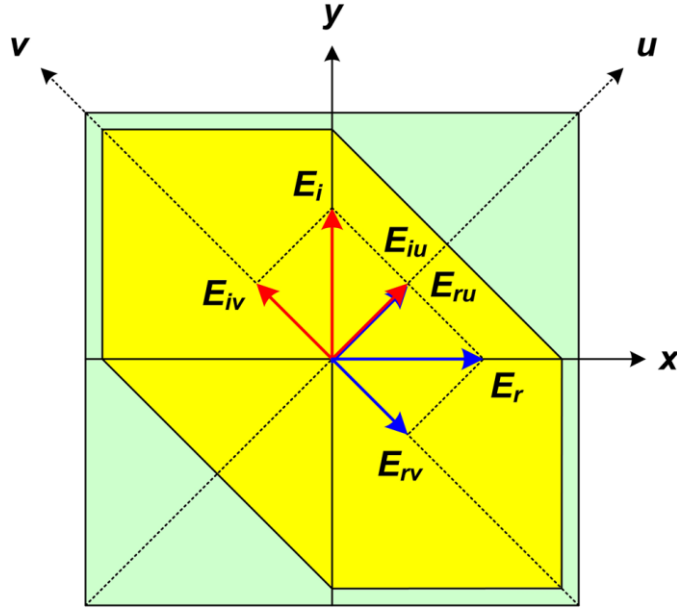


Şekil 37. (a) Eş- ve çapraz- polarize yansımaya katsayılarının açıya göre değişimi (b) Polarizasyon dönüştürme oranının açıya göre değişimi (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021)

Öz vektör ve öz-polarizasyon: Polarizasyon dönüşümü fenomenini anlamak için önerilen meta yüzeyimizin öz polarizasyonunu ve öz değerlerini araştırılmalıdır. Polarizasyon dönüşümü, aşağıdakilerden hesaplanabilen öz değerler ve öz-polarizasyonlarla daha iyi analiz edilebilir;

$$\mathbf{R}\mathbf{X} - m\mathbf{X} = 0 \quad (20)$$

Burada $\mathbf{R}$ yansımaya katsayı matrisini, $\mathbf{X}$ özvektörü, m ise özdeğeri göstermektedir. Burada çapraz polarize yansımaların ihmal edildiği varsayılır (ideal durum). $\mathbf{R}$ matrisinin özdeğerleri $e^{i0} = 1$ $e^{i\pi} = -1$ iken, $\mathbf{R}$ matrisinin özvektörleri sırasıyla $\mathbf{u} = [1 \ 1]^T$ ve $\mathbf{v} = [-1 \ 1]^T$ 'dir. Burada, üst simge 'T' matrisler üzerindeki devrik işlemi belirtir. Şekil 39'da x- veya y- eksenlerine göre $\pm 45^\circ$ yönlendirilmiş u- ve v- eksenleri boyunca doğrusal olarak polarize olmuş alanın herhangi bir dönüşüm olmaksızın geri yansıdığı varsayılmaktadır.



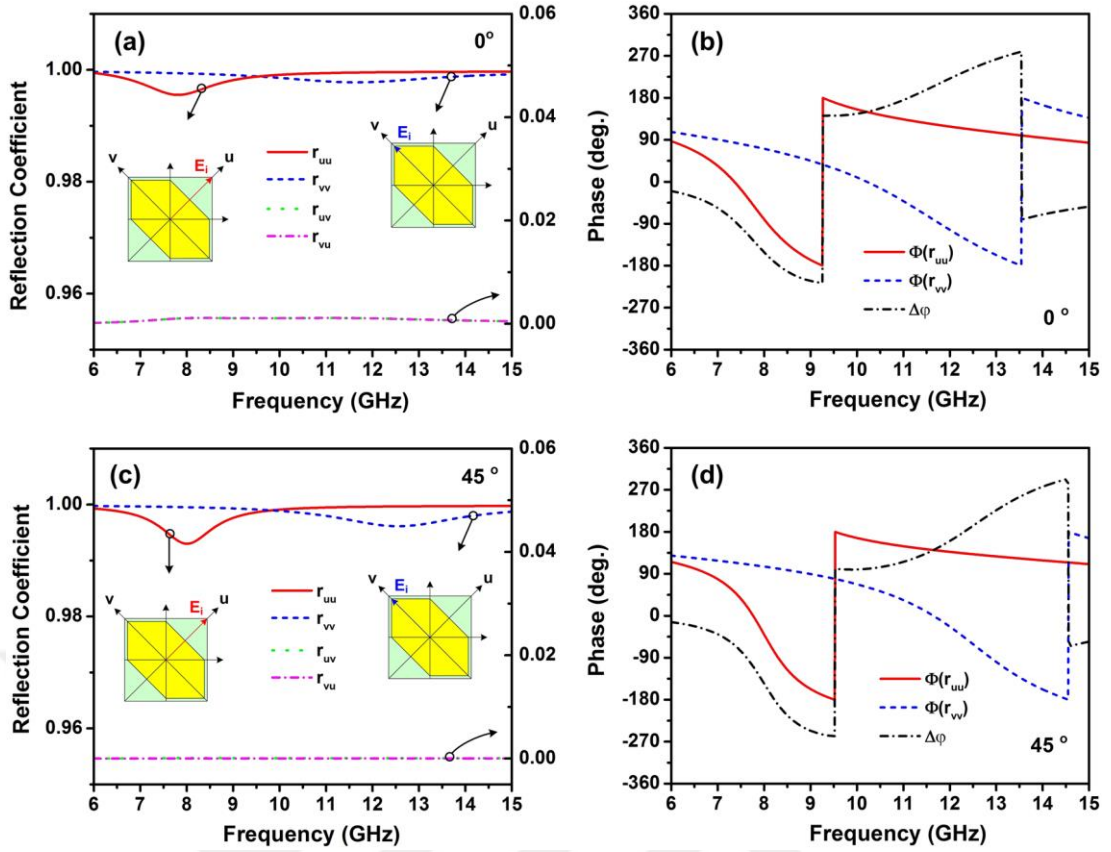
Şekil 38. Ortogonal bileşenler (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021)

Tasarlanan metayüzeyin çalışma prensibini incelemek için, elektrik alanının (E_i) u ve v yönlerindeki iki ortogonal bileşeni Şekil 38'de görülmektedir. Ardından, y ekseninde lineer polarize olmuş geliş alanı için, yansıyan alan şu şekilde yazılabilir;

$$E_i = \hat{y}E_i = \hat{u}E_{iu} + \hat{v}E_{iv} \quad (21)$$

$$E_r = \hat{u}E_{ru} + \hat{v}E_{rv} = \hat{u}r_uE_{iu} + \hat{v}r_vE_{iv} \quad (22)$$

Burada $\hat{u}$ ve $\hat{v}$ sırasıyla u- ve v- eksenlerindeki birim vektörlerdir; E_{iu} ve E_{iv} sırasıyla u- ve v-eksenlerinde gelen elektrik alanının bileşenleridir; E_{ru} ve E_{rv} sırasıyla u- ve v-eksenlerinde yansıyan elektrik alanının bileşenleridir ve r_u ve r_v sırasıyla u- ve v-eksenlerindeki karmaşık yansımaya katsayılarıdır. Şekil 39'da x- veya y-eksenlerine göre $\pm 45^\circ$ yönlendirilmiş u- ve v-eksenleri boyunca doğrusal olarak polarize olmuş alanın herhangi bir dönüşüm olmaksızın geri yansıdığı görülmektedir.



Şekil 39. Önerilen polarizasyon dönüştürücü için sırasıyla normal ve 45° gelişte u- ve v- bileşenlerinin: (a, c) Büyüklükleri ve (b, d) faz değerleri ve faz farkı (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021)

Yakın zamanda yapılan bir çalışmada E_r olarak ifade etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021);

$$E_r = \hat{u}(r_{uu}E_{iu}e^{i\Phi_{uu}} + r_{uv}E_{iv}e^{i\Phi_{uv}}) + \hat{v}((r_{vv}E_{iv}e^{i\Phi_{vv}} + r_{vu}E_{iu}e^{i\Phi_{vu}}) \quad (23)$$

Burada R_{uu} , R_{vv} , R_{uv} ve R_{vu} , u- ve v- eksenlerindeki yansıma katsayılarının eş ve çapraz polarize bileşenlerini gösterir.

Akım yoğunluğu: Her parçacık, elektriksel ve manyetik polarize edilebilirliği ($\alpha_{e,m}$) ile karakterize edilebilir. Partiküllerin elektriksel ve manyetik polarize edilebilirliği, sırasıyla elektrik dipol momentinin ve manyetik dipol momentin ilgili yerel ortalama elektrik ve manyetik alana oranına $\alpha_{e,m}$ denir. Elektrik ve manyetik dipol momentleri, ortalama elektrik ve manyetik alanlarla aşağıdaki denklem ile ilişkilendirilebilir:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{ee} & \alpha_{em} \\ \alpha_{me} & \alpha_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Burada, $\mathbf{p} = [p_x, p_y]^T$ elektrik dipol momentidir, $\mathbf{m} = [m_x, m_y]^T$ manyetik dipol momentidir ve $\mathbf{E} = [E_x, E_y]^T$ ve $\mathbf{H} = [H_x, H_y]^T$ meta-yüzeydeki ortalama teğetsel elektrik ve

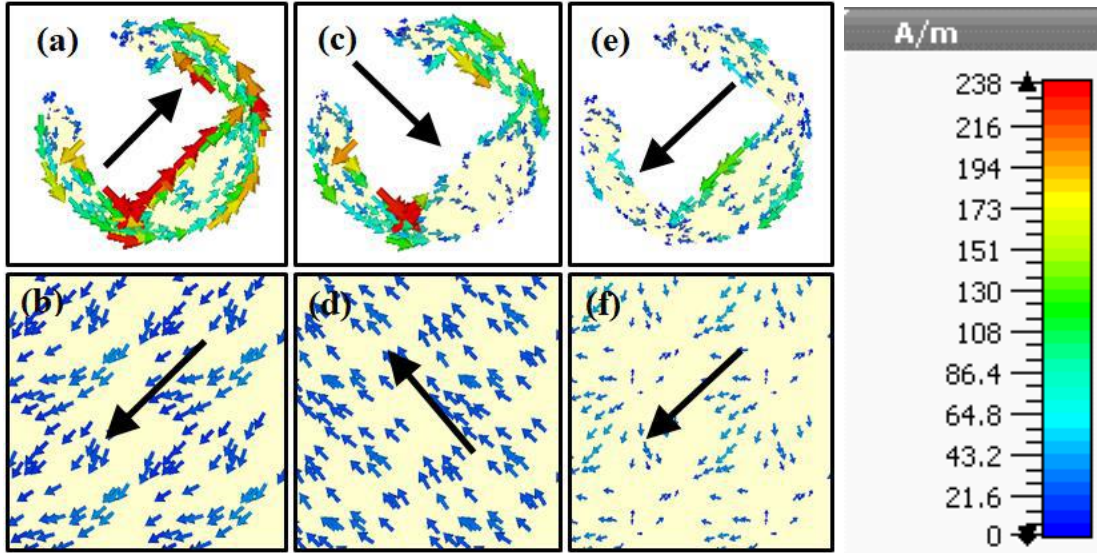
manyetik alanları temsil eder. Zamanla değişen elektrik ve manyetik polarizasyon, metayüzeyde elektrik ve manyetik yüzey akımlarına neden olur (Ahmed *et al.* 2021):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = i\omega \begin{bmatrix} \alpha_{ee} & \alpha_{em} \\ \alpha_{me} & \alpha_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Burada, $\mathbf{J} = [J_x, J_y]^T$ ve $\mathbf{M} = [M_x, M_y]^T$ sırasıyla elektrik ve manyetik yüzey akımlarıdır. Gelen elektromanyetik dalganın açısal frekansı ω ile gösterilir. Zamanın harmonik formu $e^{i\omega t}$ kabul edilir. Yüzey akımı yoğunluğu $\mathbf{J}$ ile yayılan uzak alanlar arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{E} = -i \frac{\omega \mu}{4\pi} \int \mathbf{J}(x, y) \frac{e^{-ikr}}{R} dx dy \quad (26)$$

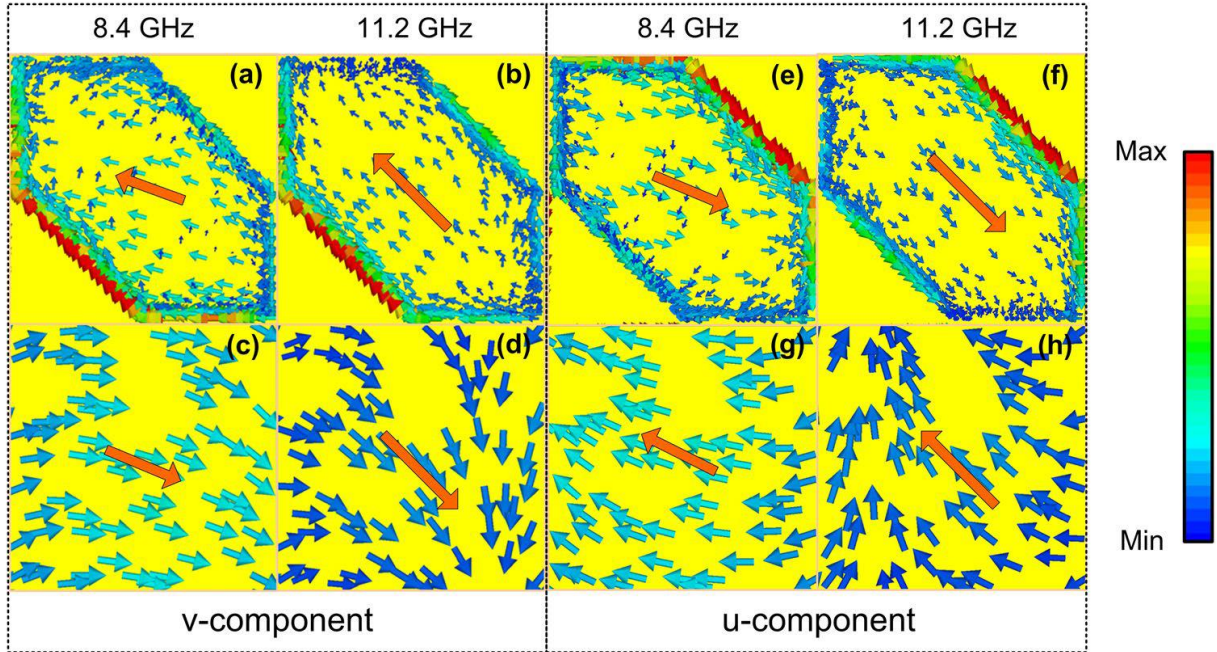
Entegrasyon, meta yüzeyin yüzeyinde gerçekleştirilecektir. R, gözlem noktasının entegrasyon noktasından uzaklığıdır. Denklem 26'da ışılan elektrik alan ve yüzey akımının yönünün aynı olduğunu göstermektedir. Bir y-polarize elektrik alanı ancak yüzey akımı y yönünde ise üretilebilir. Bu nedenle, çapraz polarizasyon dönüşümü için, x-polarize bir gelen elektrik alanı, meta-yüzey üzerinde y yönünde akım akışına neden olmalı ve y-polarize alan, x yönünde akım akışına neden olmalıdır.



Şekil 40. Önerilen metayüzeyin rezonatör kısmının akım yoğunlukları: (a,b) 5.35 GHz, (c,d) 7.6 GHz (e,f), 13.03. GHz (Ahmed *et al.* 2021).

Şekil 41'de tüm rezonans frekans değerlerinde metayüzeyin ön ve arka yüzü akım yoğunluğu zıt yönde iken, Şekil 40'ta 2 rezonans frekansta zıt ve 1 rezonans frekansta aynı yöndedir. Şekil 40'ta manyetik rezonanslar 5.35 GHz ve 7.6 GHz değerlerinde iken elektrik

rezonans ise 13.03 GHz değerindedir. Rezonans frekansında önerilen yapı, bir bileşen için (0° faz ile yansıttığından) yapay manyetik iletken (AMC) iken diğer bileşen için (180° faz ile yansıttığından) mükemmel yansıtıcı (PEC) gibi davranır (Ahmed *et al.* 2021).



Şekil 41. Önerilen polarizasyon dönüştürücü için sırasıyla normal ve 45° gelişte u- ve v-bileşenlerinin: (a, c) Büyüklükleri ve (b, d) faz değerleri ve faz farkı (T. K. T. Nguyen *et al.* 2021)

Radar Soğurucu Temel Parametreleri

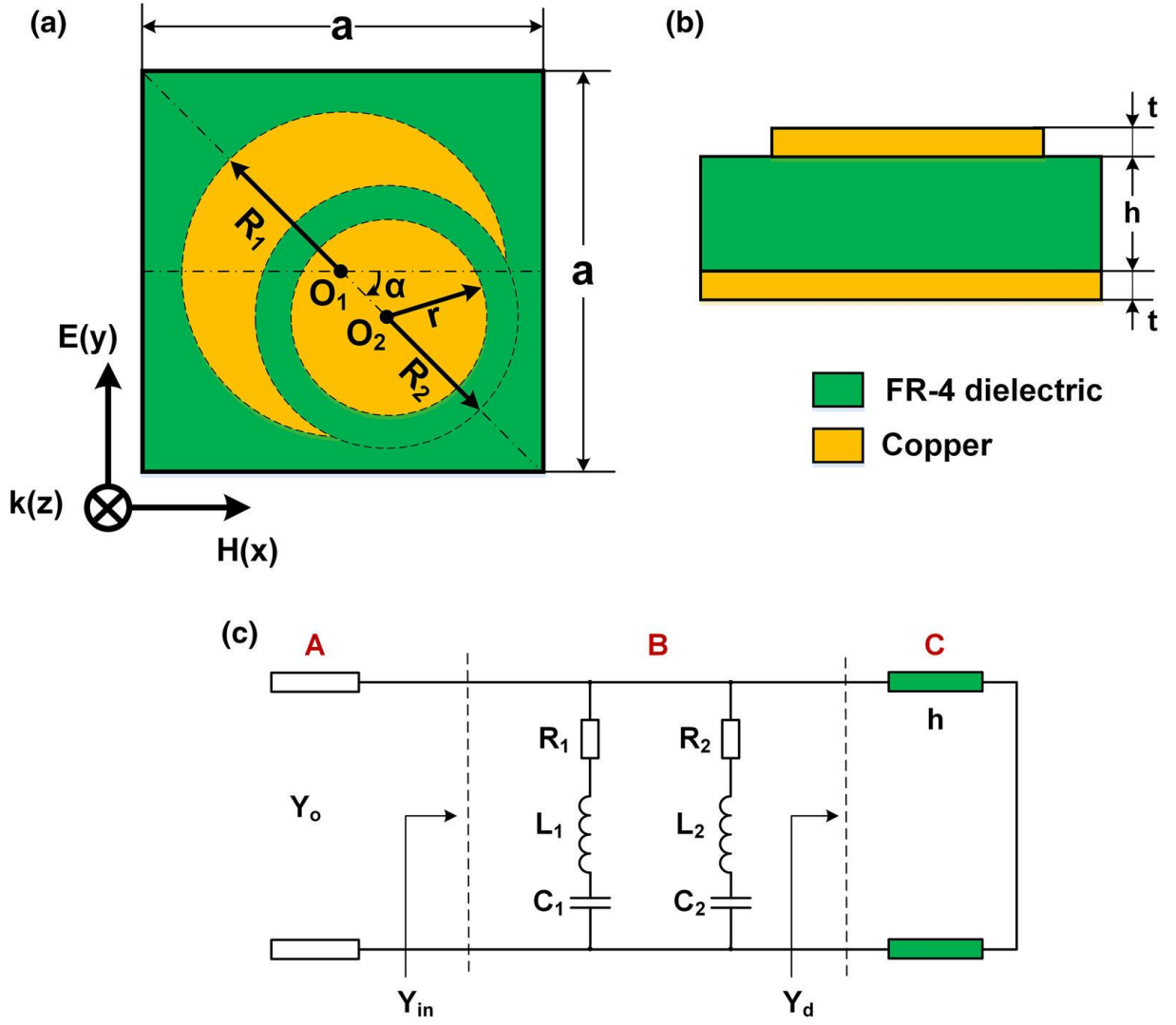
Metayüzeyin soğuruculuğunun iyi olması için metayüzey direncinin havanın empedansı ile uyumlu olması gerekmektedir. Metayüzeyin soğurma verimliliği aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Tuan *et al.* 2019):

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2 \quad (27)$$

Burada $A(\omega)$ soğurma verimliliği, $R(\omega)$ yansıma kesri ve $T(\omega)$ iletim kesrini simgeler. Uygun geometri, deri kalınlığı ve metal ile sonlandırmanın etkisi ile $T(\omega)$, metayüzey tabanlı radar soğurucularda yaklaşık 0 olmaktadır. Bu sebepten dolayı absorpsiyon verimliliği aşağıdaki denklem ile elde edilir (Tuan *et al.* 2019).

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 = \left| \frac{Z_{in}(\omega) - Z_0}{Z_{in}(\omega) + Z_0} \right|^2 \quad (28)$$

Burada Z_0 boşluğun empedansı 377Ω iken, Z_{in} ise metayüzeyin giriş empedans değerini simgeler. Şekil 42’de literatürdeki soğurucunun şekli ve eş değer devre modellemesi görülmektedir.

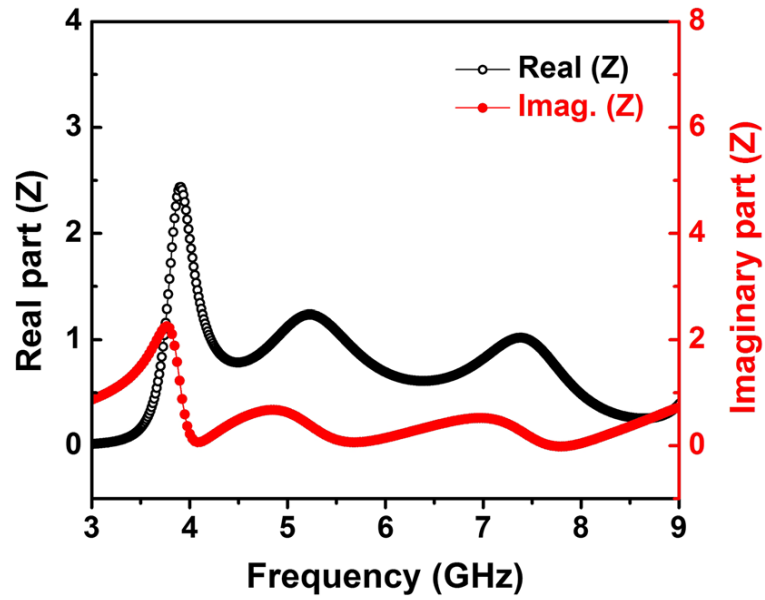


Şekil 42. Literatürde nerilen polarizasyon dönüştürücü için sırasıyla normal ve 45° gelişte u- ve v-bileşenlerinin: (a, c) Büyüklükleri ve (b, d) faz değerleri ve faz farkı (Tuan *et al.* 2019)

Absorpsiyon mekanizmasının çalışma prensibini anlamak için, Şekil 42(c)'de gösterildiği gibi iletim hattı teorisi kullanılarak metamalzemenin birim hücresinin eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur. Kısım A, Z_0 karakteristik empedansına sahip boş alanın iletim hattını temsil ederken, kısım B, 2 parça metayüzeyden oluştuğu için 2 adet RLC devresinin paralel bağlantısından oluşur. Kısım C, FR-4 alt katmanı için kısa devreli iletim hattını temsil eder.

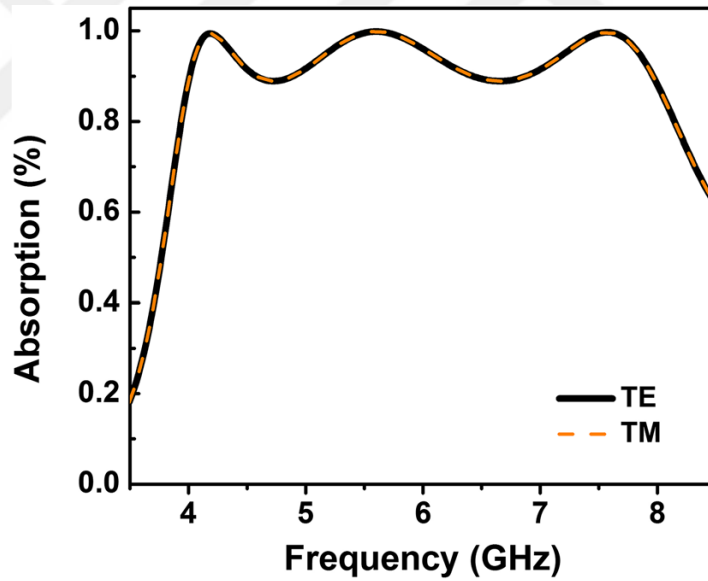
Aşağıdaki denklemden hesaplanan normalleştirilmiş empedansın reel ve imajiner kısmı sırasıyla yaklaşık olarak 1 ve 0 değerinde olduğu Şekil 43'te gözlemlenmektedir.

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (29)$$



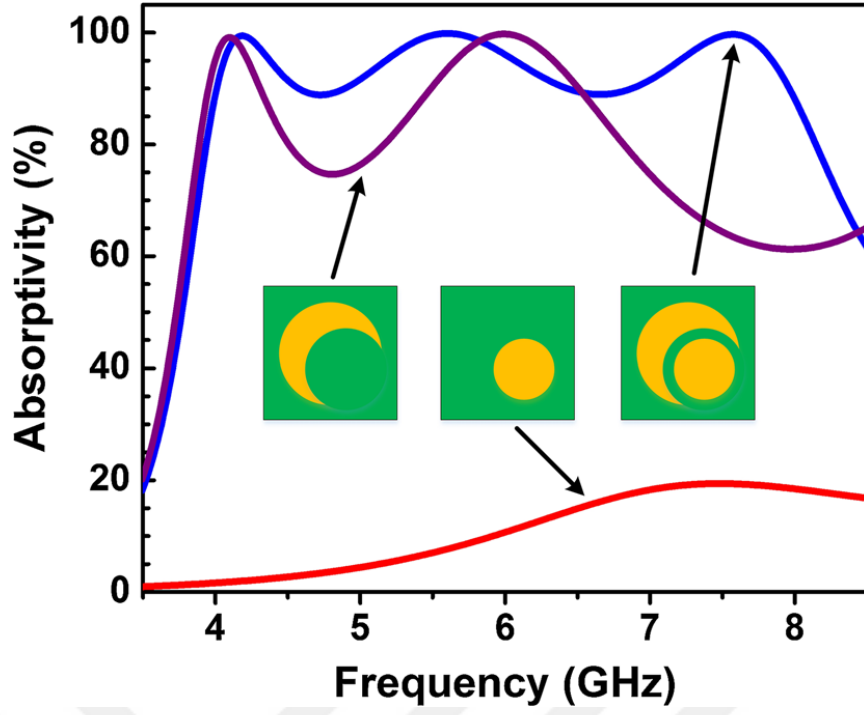
Şekil 43. Literatürde önerilen soğurucunun efektif giriş empedansının reel ve imajiner kısımlarının frekansa göre değişimi (Tuan *et al.* 2019)

Şekil 44’te literatürde önerilen soğurucunun normal geliş açısında 3.95 GHz değerinden 8.02 GHz değerine kadar %90 ve üzeri soğurma verimliliğine sahiptir.



Şekil 44. Literatürde önerilen soğurucunun normal geliş açısında hem TE hem de TM modlarında verimliliği (Tuan *et al.* 2019)

Şekil 45’te literatürde önerilen soğurucunun normal geliş açısında iki parçasının verimliliğe etkisi gözlemlenmektedir.



Şekil 45. Literatürde önerilen iki bileşenli absorpsiyonun verimlilik değişimi (Tuan *et al.* 2019)

Aşağıdaki denklemlerde radar soğurucularda elektromanyetiğin temel parametrelerini (ϵ_{eff} ve μ_{eff}) hesaplamak için S_{11} parametresinden yararlanılır (Tuan *et al.* 2019):

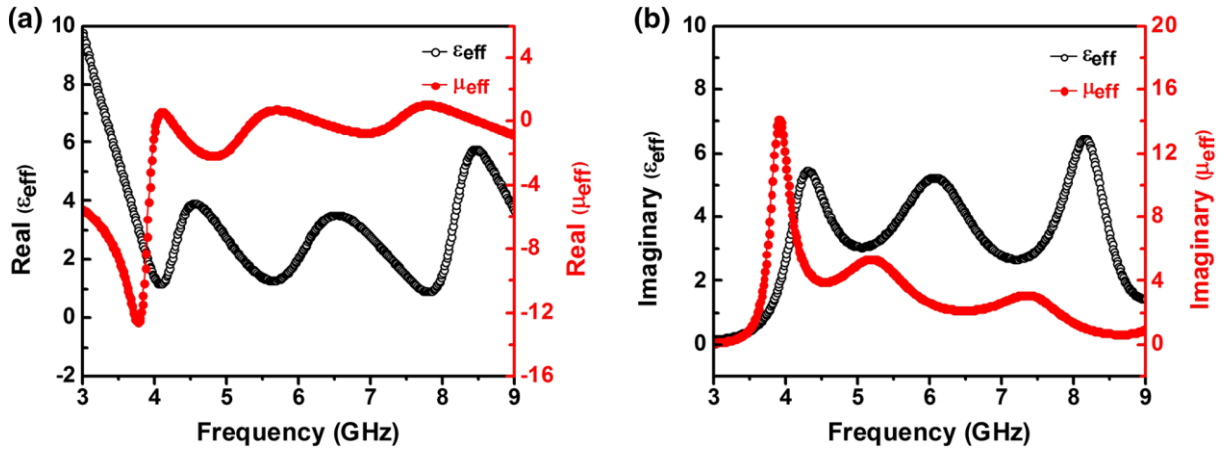
$$\chi_{es} = \frac{2j S_{11} - 1}{k_0 S_{11} + 1} \quad (30)$$

$$\chi_{ms} = \frac{2j S_{11} + 1}{k_0 S_{11} - 1} \quad (31)$$

$$\epsilon_{eff} = 1 + \frac{\chi_{es}}{d} \quad (32)$$

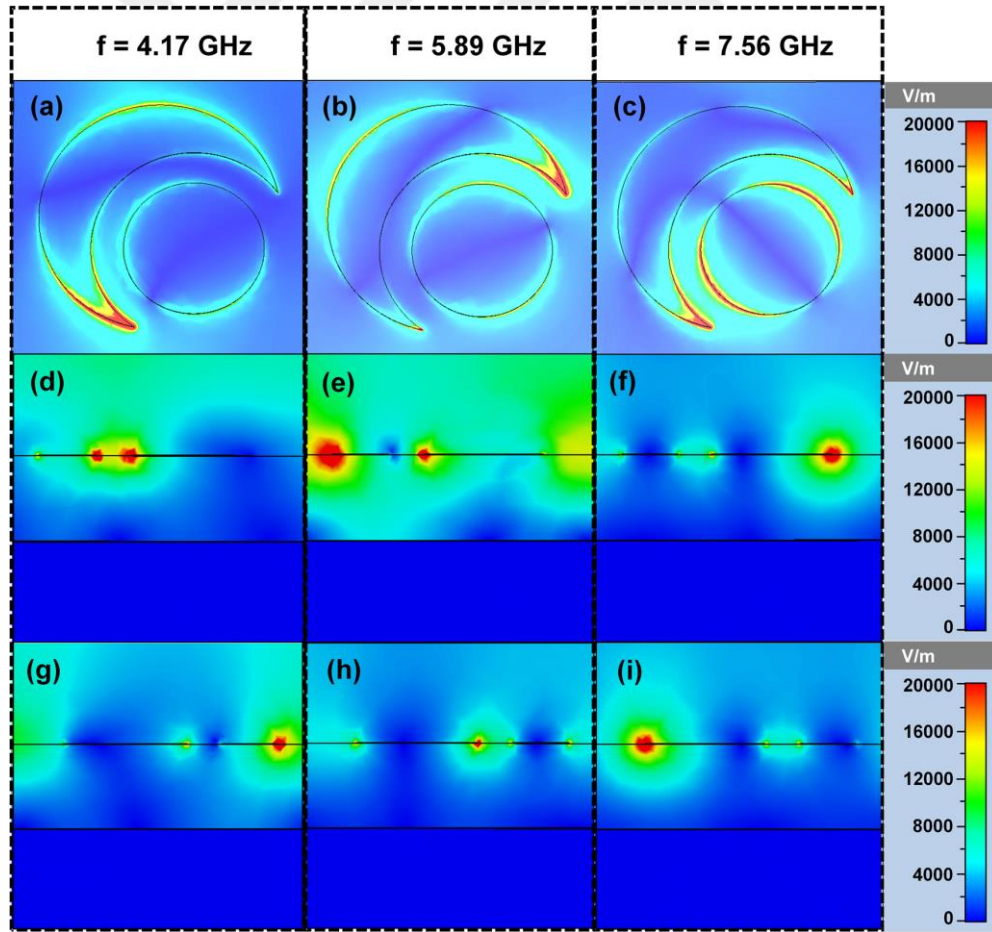
$$\mu_{eff} = 1 + \frac{\chi_{ms}}{d} \quad (33)$$

Burada k_0 boş uzaydaki dalga sayısı ve d gelen dalganın kat ettiği mesafedir. Şekil 46'da görüldüğü üzere ϵ_{eff} ve μ_{eff} parametreleri, reel ve imajiner kısımdan oluşur. μ_{eff} parametresi yorumlanarak absorpsiyonun manyetik rezonans nedeniyle meydana geldiği anlaşılır.



Şekil 46. Elektromanyetik temel parametreleri olan ϵ_{eff} ve μ_{eff} 'in (a) reel kısmı (b) sanal kısmı (Tuan *et al.* 2019)

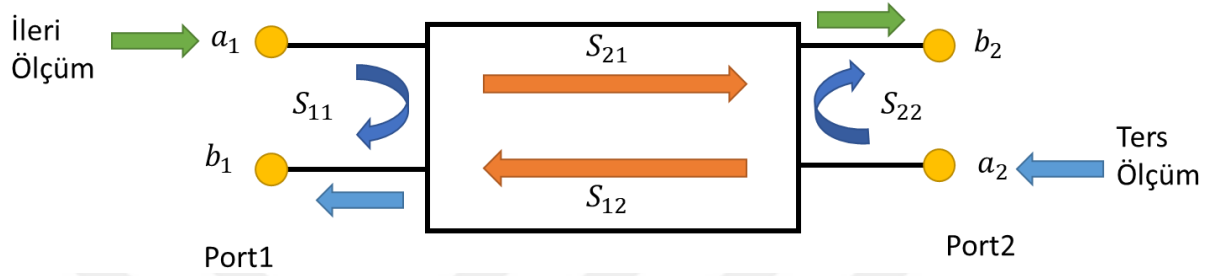
Literatürde önerilen soğurucunun absorpsiyon mekanizmasını araştırmak için, 4.19 GHz, 5.63 GHz ve 7.58 GHz'lik üç rezonans frekansındaki elektrik alan ve yüzey akımının dağılımları, Şekil 47'de gösterilmiştir ve elektrik alanının rezonans frekans değerlerinde belli bir bölümünde yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 47. Önerilen soğurucunun sırasıyla 4.19 GHz, 5.63 GHz ve 7.58 GHz değerlerindeki elektrik alan yoğunluğu: (a-c) ön yüzey için (d-f) X-Z düzlemi için (g-i) Y-Z düzlemi için (Tuan *et al.* 2019)

Saçılma Parametreleri

Saçılma (S) parametreleri saçılma matrisinin katsayılarını oluşturmaktadır. Mikrodalga ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan bu parametreler mikrodalga, haberleşme elektrik ve elektronik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. S parametreler sisteme gelen ve yansıyan dalgaları formüle etmektedir. Network analizörler ile bu parametreler ölçülmektedir. Bu parametreler kullanılarak bir devrenin duran dalga oranı, kazanç, yansıma katsayısı ve geri dönüş kaybı gibi hesaplamalar yapılabilir (Özmen, 2022).



Şekil 48. Saçılma parametrelerinin gösterimi (Özmen, 2022)

Saçılma parametreleri $S_{i,j}$ ile ifade edilir. Şekil 48’de gelen ve yansıyan dalgalar arasındaki ilişki gözlemlenmektedir. Bu parametreler aşağıdaki denklemler ile hesaplanır (Özmen, 2022).

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\text{Giriş kapısı yansıma katsayısı } S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (35)$$

$$\text{Çıkış kapısı yansıma katsayısı } S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad (36)$$

$$\text{Geri yönde kazanç } S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad (37)$$

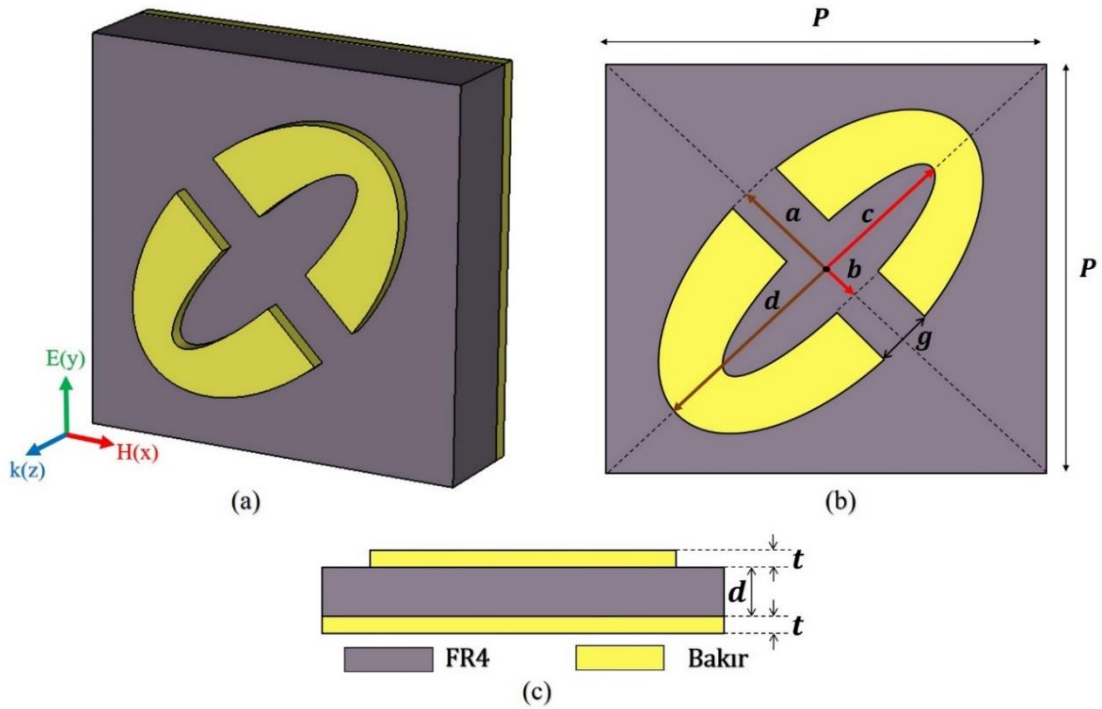
$$\text{İleri yönde kazanç } S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (38)$$

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez kapsamında polarizasyon dönüştürücü ve radar soğurucu simülasyonları için – Computer Simulation Technology (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. Matlab programı ile eliptiklik, öz değer, öz-polarizasyon, empedans reel ve imajiner değerleri, açığa göre PCR değerleri ve absorpsiyon hesaplandı. Origin Pro öğrenci versiyonu ile tüm grafikler çizildi.

X-Bandı Uygulamaları için Eliptik-Şekli Metayüzey Tabanlı Yüksek Verimli Polarizasyon Manipülasyonu

Önerilen polarizasyon dönüştürücünün boyutları Şekil 49'da görülmektedir. Polarizasyon dönüştürücünün alt ve üst katmanları, elektrik iletkenliği (σ) $5,96 \times 10^7$ S/m ve kalınlığı 35 μ m olan bakırdan oluşmaktadır. Metayüzeyin alttaş kalınlığı 2.6 mm, kayıp tanjant ($\tan\delta$) değeri 0.025 ve bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 4.3 olan **FR4** malzemesidir. Önerilen polarizasyon dönüştürücü parametrelerinin değerleri, Tablo 2'de özetlenmiştir.

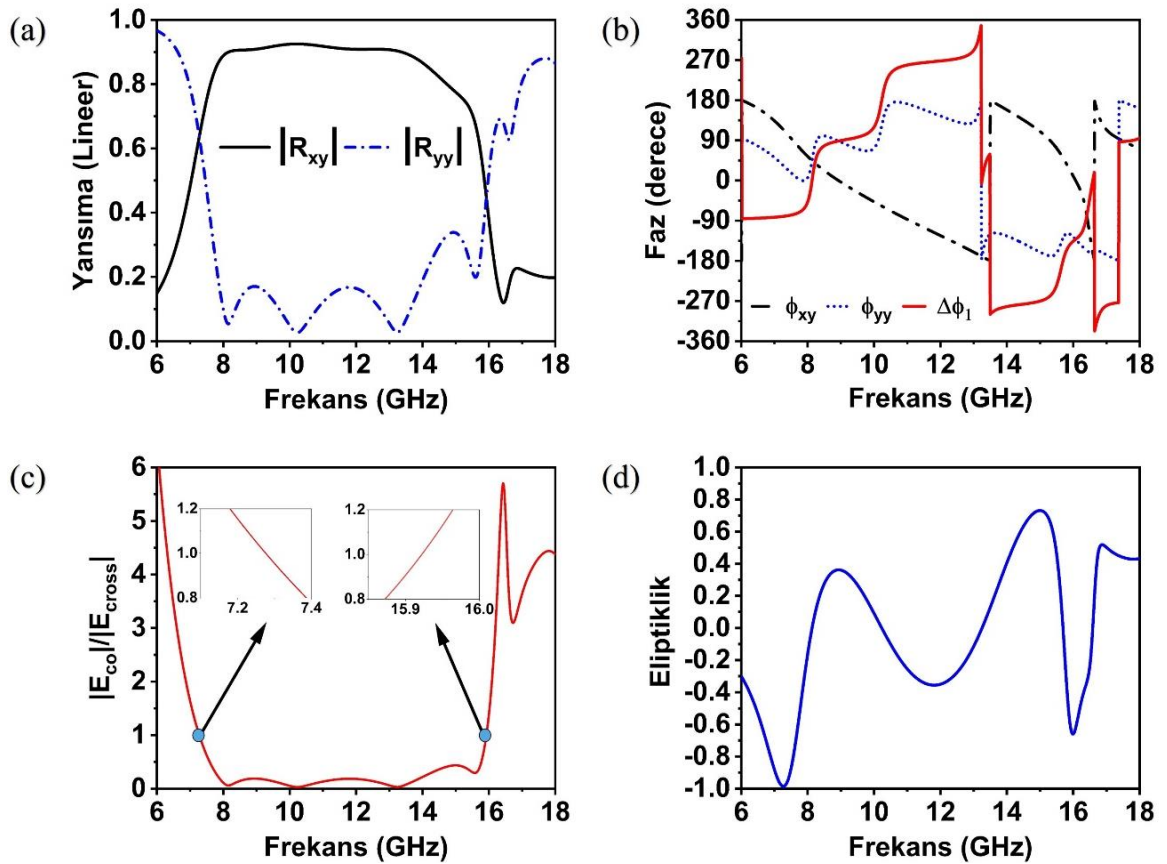


Şekil 49. X bandı için önerilen meta yüzeyin: (a) 3 boyutlu görünümü, (b) Şematik görünümü ve (c) Yan görünümü

Tablo 2. X-bandında Çalışan Metayüzeyin Boyutları

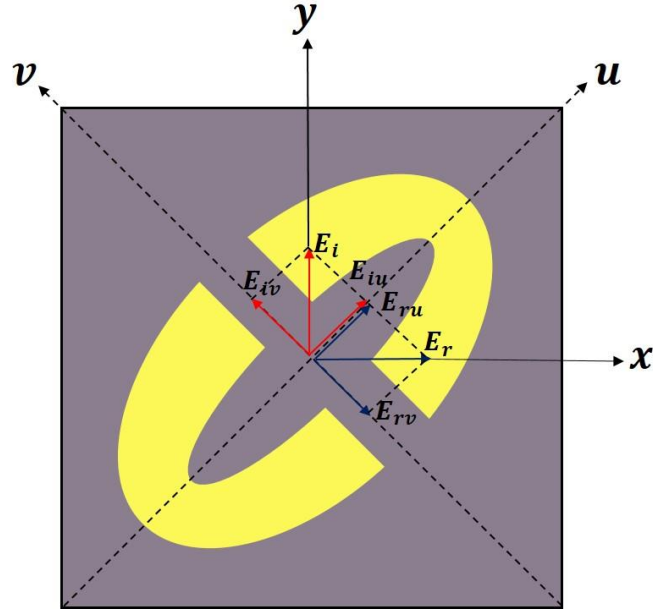
P	a	b	c	d	g
12	3.3	1.1	4.12	5.4	0,066

Şekil 50(a)'da görüldüğü üzere, 7.89 GHz ile 13.91GHz frekans aralığında ko-polarizasyon yansımaya katsayısı (R_{yy}) 0,2'den küçükken, çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı (R_{xy}) 0,9'dan yüksektir. Şekil 48(a)'da eş-polarizasyon yansımaya katsayısı ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı 7.26 GHz ve 16.94 GHz değerlerinde eşit büyüklüklerde olduğundan dolayı polarizasyon dönüştürme oranı 0.5 değerindedir. Ayrıca Şekil 50(b)'de faz farkı grafiği, $\Delta\Phi = \Phi_{yy} - \Phi_{xy}$ denklemine göre elde edilmektedir. Öte yandan, Şekil 50(c)'de görüldüğü gibi, 7.26 GHz ve 16.94 GHz'de ko-polarizasyon ve çapraz-polarizasyon yansımaya katsayılarının oranı 1 olarak görülmektedir. Şekil 50(d)'de görüldüğü gibi, normalleştirilmiş eliptiklik 7.28 GHz'de -1 olduğundan yansıyan dalga LHCP olarak belirlenir.



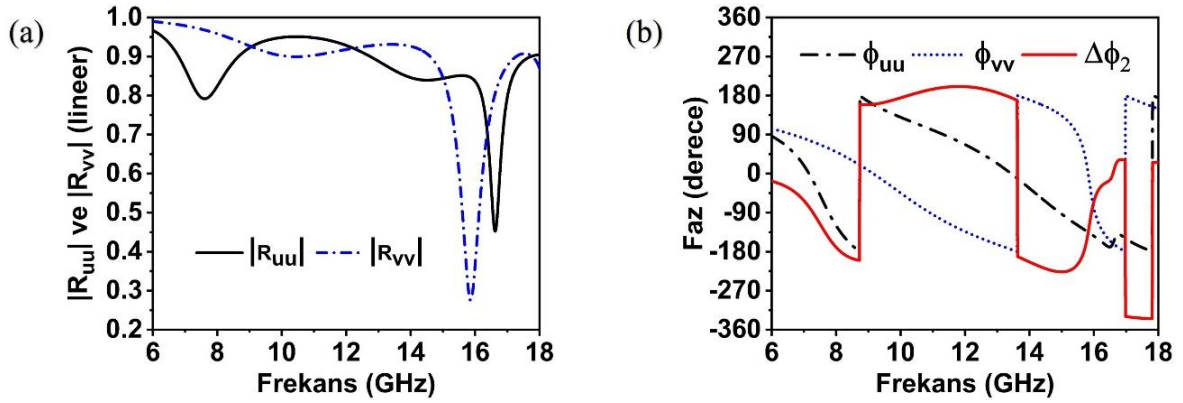
Şekil 50. X-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) eş polarizasyon katsayısı ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı değerlerinin frekansa göre değişimi (b) Φ_{yy} , Φ_{xy} ve $\Delta\Phi_1$ (c) $|E_{co}|/|E_{cross}|$ (d) Eliptiklik

Polarizasyon kavramını daha iyi yorumlamak için, önerilen metayüzeyin Şekil 47'de gösterildiği gibi ortogonal bileşenleri belirlenmelidir. Gelen elektromanyetik dalga E_i 'nin u- ve v- yönlerinde iki ortogonal bileşeni, tasarlanan meta-yüzeyin çalışma prensibini anlamak için Şekil 51 ayrıntılı incelenmelidir.



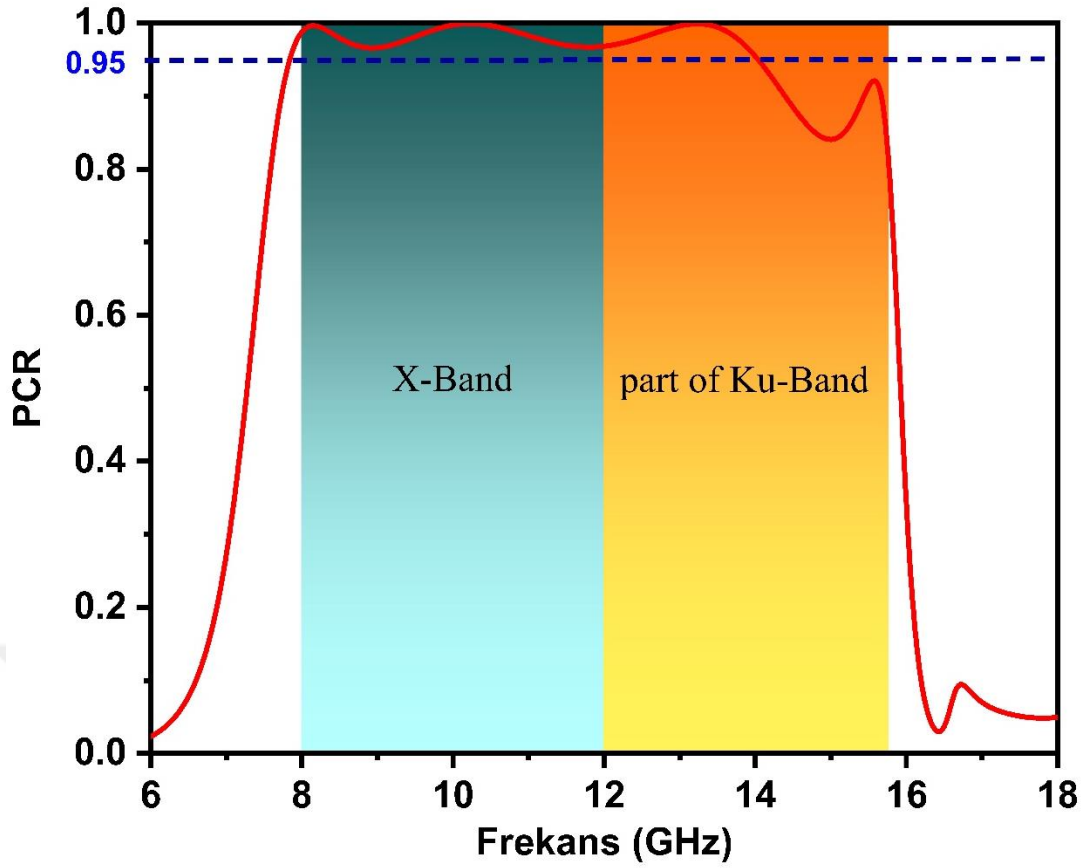
Şekil 51. X-bandı için önerilen metayüzeyin u- ve v-eksenlerinin gösterimi

Şekil 52'de, x veya y eksenine $\pm 45^\circ$ yönlendirilmiş u ve v ekseni boyunca çarpan lineer polarize alanın herhangi bir dönüşüm olmaksızın geri yansıtıldığı görülmektedir.



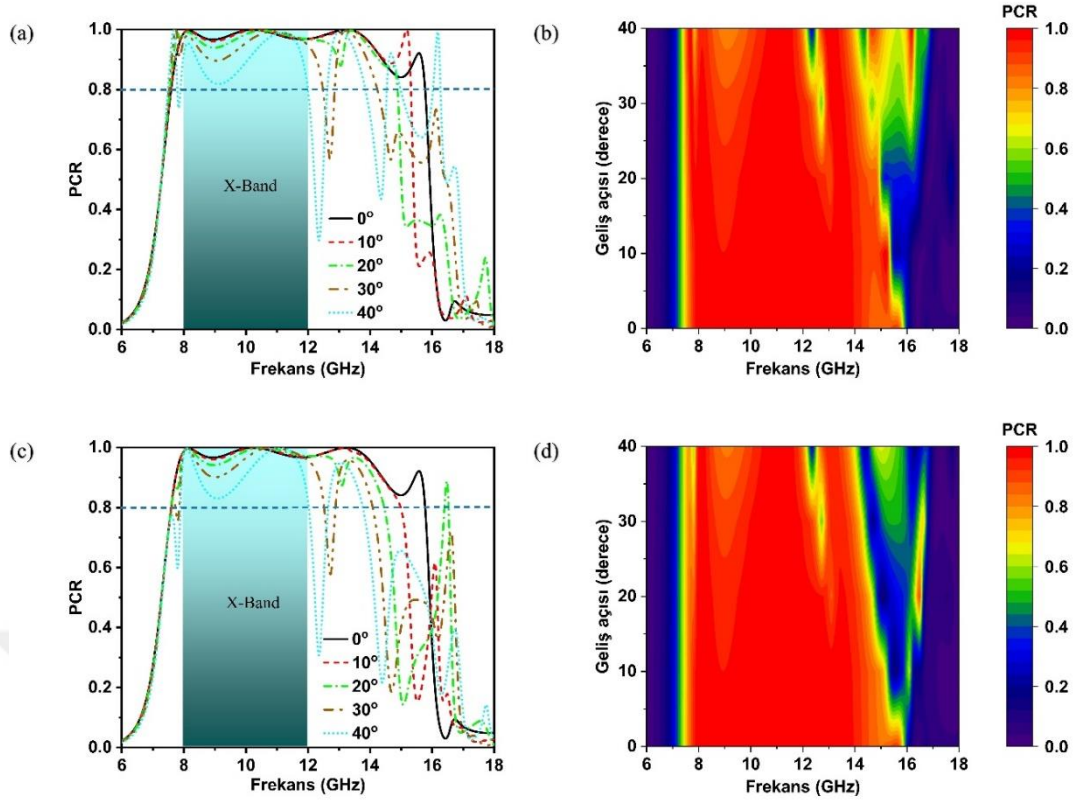
Şekil 52. X-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) $|R_{uu}|$ ve $|R_{vv}|$ değerleri, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi_2$ değerleri.

Şekil 53'te normal geliş açısı için tüm X-bandı ve Ku-bandının bir kısmında (7.89-13.91 GHz) polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin 0.97'ten büyük olduğu görülmektedir. Yani, tasarlanan polarizasyon dönüştürücü tüm X bandı boyunca dairesel polarizasyon dönüştürücü amacıyla verimli çalıştığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, Şekil 53'te PCR değeri 8.15 GHz, 10.21 GHz ve 13.25 GHz rezonans frekans değerlerinde yaklaşık 1 değerine ulaştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 53. X-bandı için önerilen metayüzeyin polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin frekansa göre değişimi (normal açısı).

Şekil 54(a,b), bu dönüştürücünün farklı geliş açıları TE modu için frekans bağımlılığını gösterir. Şekil 54(c,d), bu dönüştürücünün farklı geliş açıları TM modu için frekans bağımlılığını gösterir. Şekil 50'den, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansı, tüm X-bandı boyunca 45°'ye kadar olan geliş açısı ile polarizasyon dönüştürme oranının %82 değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Tablo 3'te X- bandı için önerilen metayüzeyin literatür ile kıyaslanması görülmektedir.

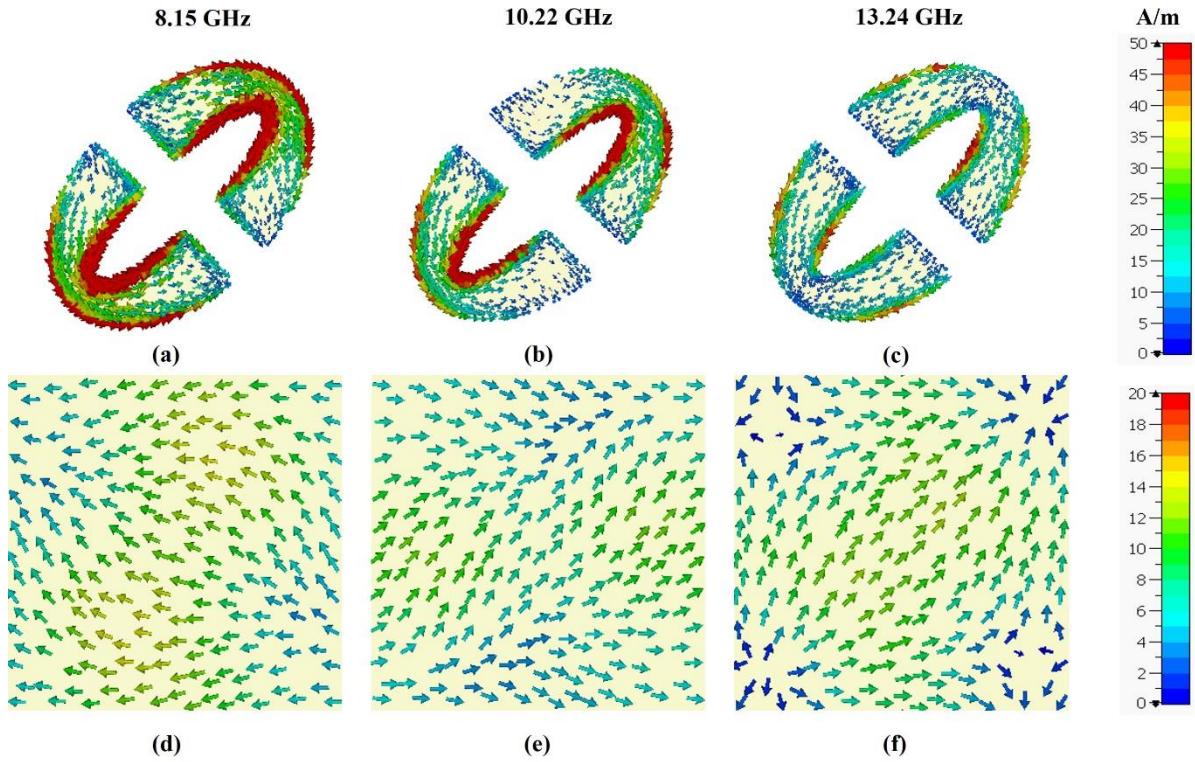


Şekil 54. X-bandı için önerilen metayüzeyin PCR değerleri: (a,b) $\theta_{in}^{TE} \leq 45^\circ$, (c,d) $\theta_{in}^{TM} \leq 45^\circ$.

Tablo 3. X-bandında Çalışan Metayüzeyin Performansının Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması

Ref.	Açı Hassasiyeti	LTC Band (GHz)	CPC Band (GHz)	PCR verimliliği (%)	RBW (%)	Alttaş Çeşidi	Katman Çeşidi	Alttaş kalınlığı
(Khan <i>et al.</i> 2021)	45°(%80)	7.5-7.7 11.5-11.9	8-11	>90	31.6	FR4	Tek Katmanlı	$0.04\lambda_0$
(Li <i>et al.</i> 2021)	N/A	N/A	5.2-16.7	>90	105	F4B	Çok Katmanlı	$0.05\lambda_0$
(Couto <i>et al.</i> 2021)	N/A	N/A	13.8-40.7	>90	98.7	Rohacell	Çok Katmanlı	$0.09\lambda_0$
(Xu <i>et al.</i> 2021)	N/A	N/A	6.67-17.1	>90	87.7	F4B	Tek Katmanlı	$0.14\lambda_0$
(Zhao <i>et al.</i> 2021)	N/A	N/A	5.7-10.3	>90	40	FR4	Tek Katmanlı	$0.06\lambda_0$
(Nguyen <i>et al.</i> 2021)	45°(%80)	N/A	12-18	>90	31.6	FR4	Tek Katmanlı	$0.06\lambda_0$
(Nguyen <i>et al.</i> 2021)	45°(%80)	7.42-7.6 13-13.56	8-12	>90	31.6	FR4	Tek Katmanlı	$0.04\lambda_0$
Önerilen metayüzey	45°(%82) (X-Band)	7.2-7.36	7.89-13.9	>97	55.2	FR4	Tek Katmanlı	$0.07\lambda_0$

Şekil 55'teki akım dağılımları incelendiğinde, zemindeki ve rezonatördeki akımların zıt yönlerde olduğu, yani önerilen dönüştürücü tasarımının her üç rezonans frekansında $f = 8.15$ GHz, 10.21 GHz ve 13.25 GHz manyetik rezonansa sahip olduğu görülmektedir.



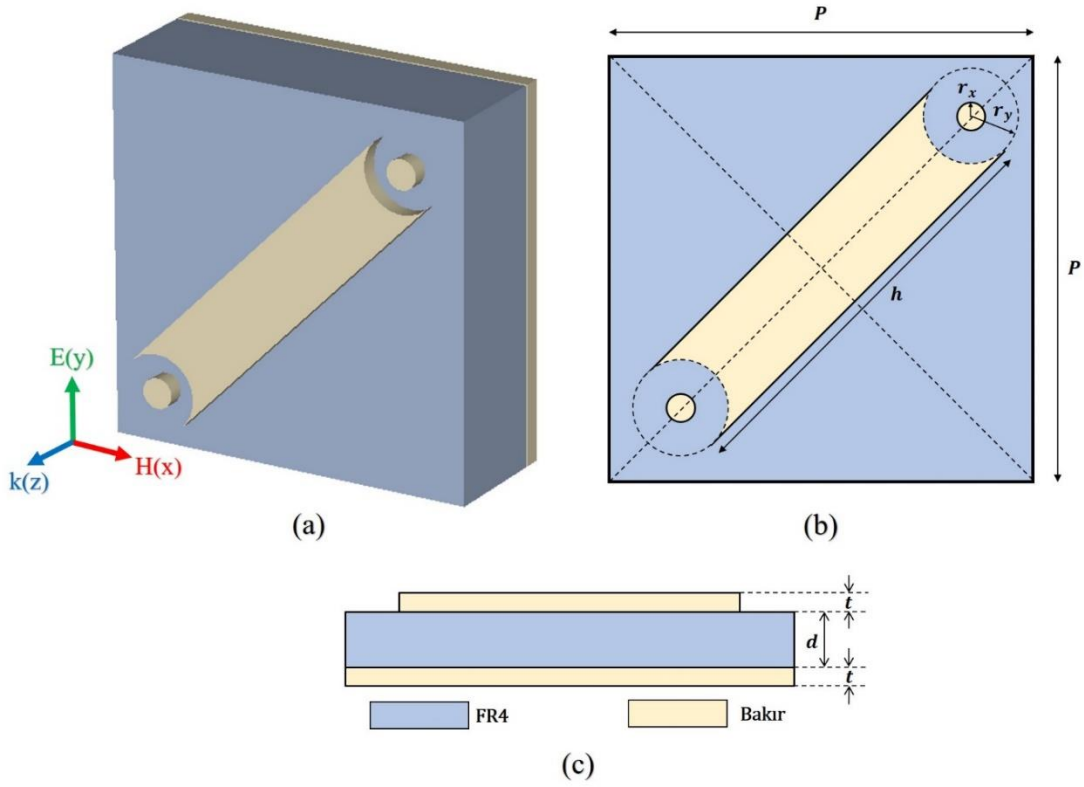
Şekil 55. X-bandı için önerilen metayüzeyin üst ve alt katmandaki akım dağılımları: (a,d) 8.15 GHz, (b,e) 10.21 GHz, ve (c,f) 13.25 GHz.

X- ve Ku-Bandı Uygulamaları için Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

Önerilen polarizasyon dönüştürücünün boyutları Şekil 56'da görülmektedir. Polarizasyon dönüştürücünün alt ve üst katmanları, elektrik iletkenliği (σ) $5,96 \times 10^7$ S/m ve kalınlığı 35 μm olan bakırdan yapılmıştır. Metayüzeyin alttaşı, kalınlığı 2.6 mm, kayıp tanjant ($\tan\delta$) değeri 0.025 ve bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 4.3 olan **FR4** malzemesidir. Önerilen polarizasyon dönüştürücü parametrelerinin değerleri, Tablo 4'te özetlenmiştir.

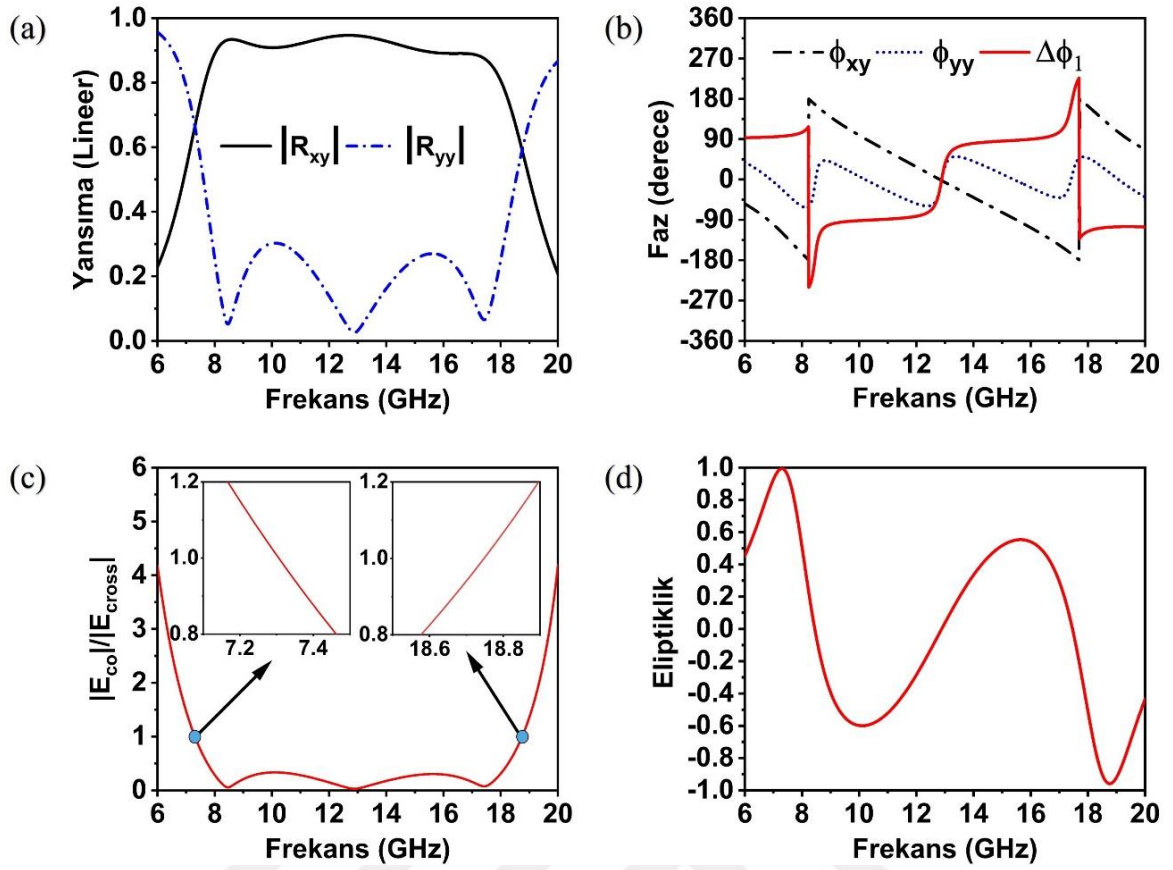
Tablo 4. Önerilen X- ve Ku-Bandında Çalışan Metayüzeyin Boyutları

P	h	d	t	r_x	r_x
8.43	8.4	2.6	0.035	0.35	0.88



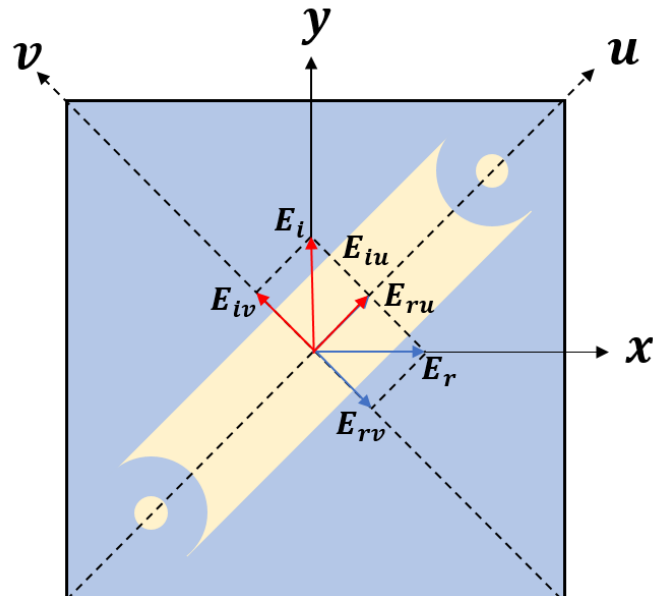
Şekil 56. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünümü, (b) Şematik görünümü ve (c) Yan görünümü.

Şekil 57(a)'da görüldüğü üzere, 7.99 GHz ile 18.03 GHz frekans aralığında eş-polarizasyon yansımaya katsayısı (R_{yy}) 0,3'ten küçükken, çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı (R_{yx}) 0,9'dan yüksektir. Şekil 57(a)'da eş-polarizasyon yansımaya katsayısı ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı 7.3 GHz ve 18.75 GHz değerlerinde eşit büyüklüklerdedir ($|R_{xx}| = |R_{yx}| \approx 0.7$). Ayrıca Şekil 57(b)'de faz farkı grafiği, $\Delta\Phi = \Phi_{yy} - \Phi_{xy}$ denkleminde göre elde edilmektedir. Öte yandan, Şekil 57(c)'de görüldüğü gibi, 7.3 GHz ve 18.75 GHz'de eş-polarizasyon ve çapraz-polarizasyon yansımaya katsayılarının oranı 1 olarak görülmektedir. Şekil 57(d)'de görüldüğü gibi, normleştirilmiş eliptiklik 7.3 GHz'de +1 olduğundan yansıyan dalganın RHCP olduğu belirlenir. Ayrıca, Şekil 57(d)'de görüldüğü gibi, normleştirilmiş eliptiklik 18.75 GHz'de -1 olduğundan yansıyan dalga LHCP olarak belirlenir.



Şekil 57. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) eş polarizasyon katsayısı ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı değerlerinin frekansa göre değişimi (b) ϕ_{yy} , ϕ_{xy} ve $\Delta\phi_1$ (c) $|E_{co}|/|E_{cross}|$ (d) Eliptiklik

Polarizasyon kavramını daha iyi yorumlamak için, önerilen meta-yüzeyin Şekil 58'de gösterildiği gibi ortogonal bileşenleri belirlenmelidir. Gelen elektromanyetik dalga E_i 'nin u- ve v- yönlerinde iki ortogonal bileşeni, tasarlanan metayüzeyin çalışma prensibini anlamak için Şekil 58'de gösterilmektedir.



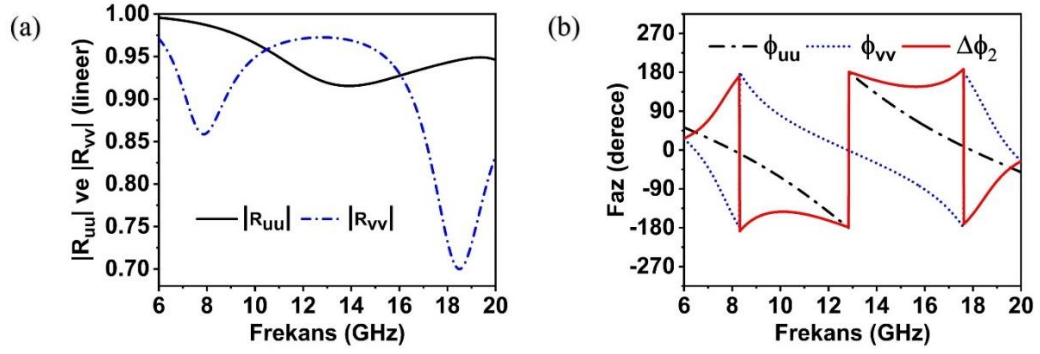
Şekil 58. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin u- ve v-eksenlerinin gösterimi

Tablo 5. Önerilen X- ve Ku-bandında Çalışan Metayüzeyin Performansının Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması

Ref.	Açı Hassasiyeti	LTC Band (GHz)	CPC Band (GHz)	RBW (%)	Alttaş Çeşidi	Katman Çeşidi	Alttaş kalınlığı
(Khan <i>et al.</i> 2019)	45°(%80)	7.5-7.7 11.5-11.9	8-11	31.6	FR4	Tek Katmanlı	0.04 λ_0
(T. K. T. Nguyen <i>et al.</i> 2021)	45°(%80)	7.42-7.6 13-13.56	8-12	31.6	FR4	Tek Katmanlı	0.04 λ_0
(Y. Li <i>et al.</i> 2018)	N/A	N/A	5.2-16.7	105	F4B	Çok Katmanlı	0.05 λ_0
(T. Q. H. Nguyen <i>et al.</i> 2021)	45°(%80)	N/A	12-18	31.6	FR4	Tek Katmanlı	0.06 λ_0
(J. Xu <i>et al.</i> 2018)	N/A	N/A	6.67-17.1	87.7	F4B	Tek Katmanlı	0.14 λ_0
(J. Zhao & Cheng, 2016)	N/A	N/A	5.7-10.3	40	FR4	Tek Katmanlı	0.06 λ_0
(Mei <i>et al.</i> 2017)	N/A	N/A	6.91-14.31	70	FR4	Tek Katmanlı	0.03 λ_0
(Couto <i>et al.</i> 2021)	N/A	N/A	13.8-40.7	98.7	Rohacell	Çok Katmanlı	0.09 λ_0
(B. Lin <i>et al.</i> 2020)	N/A	N/A	5.8-20.4	112	PTFE	Çok Katmanlı	0.14 λ_0
(B.-Q. Lin <i>et al.</i> 2020)	N/A	N/A	5.87-21.13	113	PTFE	Çok Katmanlı	0.14 λ_0
Önerilen metayüzey	45°(%74) (14.67 GHz'e kadar)	7.23-7.45 18.63-18.87	7.99-18.03	77.86	FR4	Tek Katmanlı	0.07λ_0

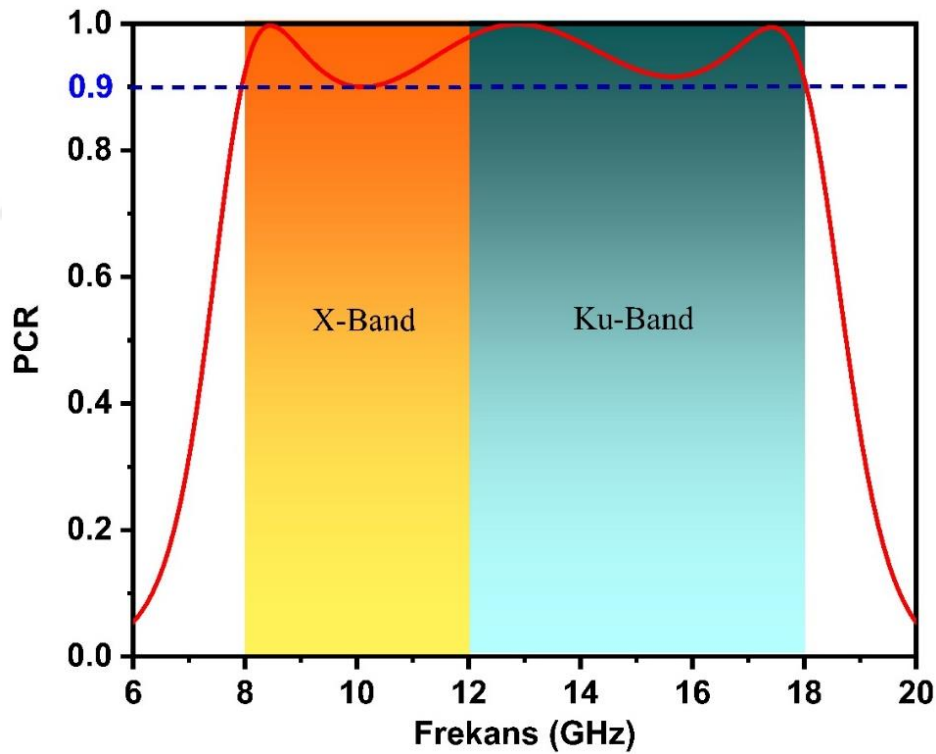
Burada λ_0 , PCR değeri 0.9 olduğunda en düşük frekansa karşılık gelen dalga boyudur.

Şekil 59'da x veya y eksenine $\pm 45^\circ$ yönlendirilmiş u ve v ekseni boyunca çarpan lineer polarize alanın herhangi bir dönüşüm olmaksızın geri yansıtıldığı görülmektedir.



Şekil 59. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) $|R_{uu}|$ ve $|R_{vv}|$ değerleri, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi_2$ değerleri

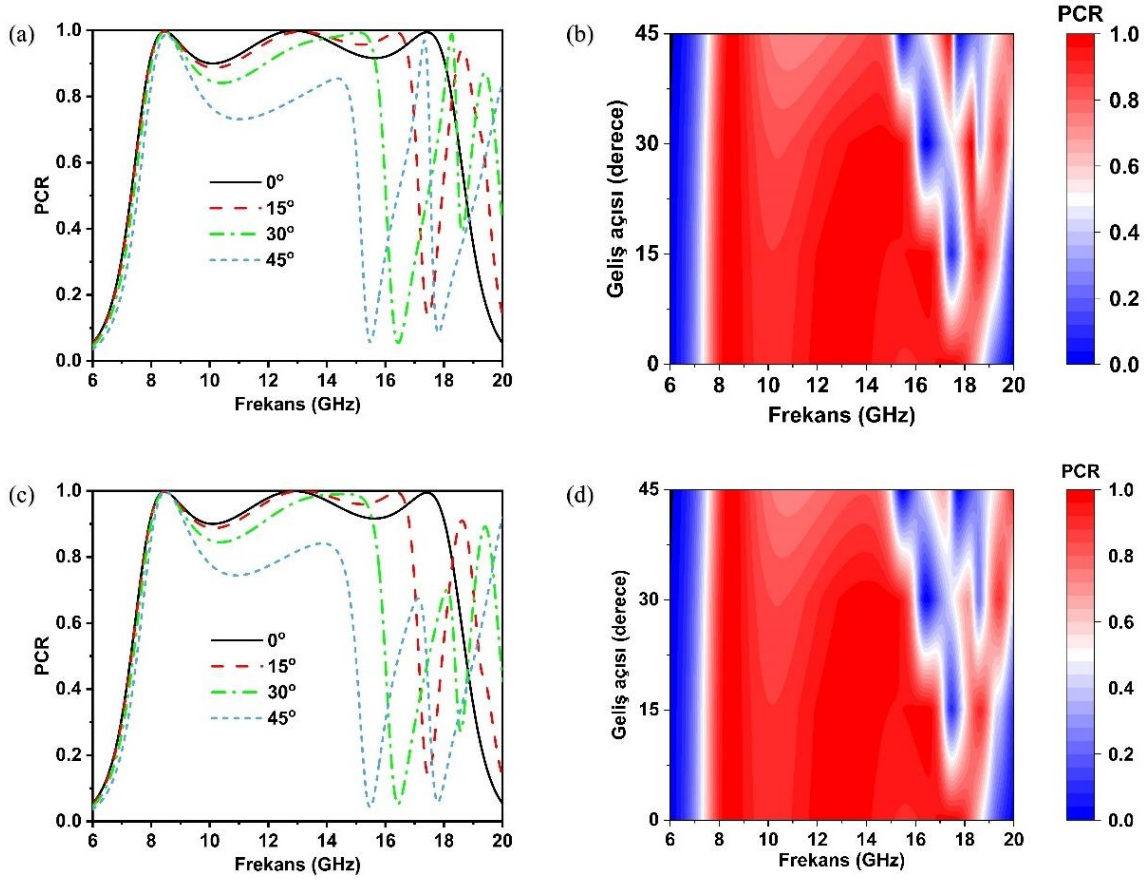
Şekil 60'ta normal geliş açısı için tüm X- ve Ku-bantlarında polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin 0.9'dan büyük olduğu görülmektedir. Yani, tasarlanan polarizasyon dönüştürücü tüm X ve Ku bantlarında doğrusal polarizasyon dönüştürücü amacıyla verimli çalıştığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, Şekil 60'ta PCR değeri 8.52 GHz, 12.78 GHz ve 17.44 GHz rezonans frekans değerlerinde yaklaşık 1 değerine ulaştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 60. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin frekansa göre değişimi (normal açı)

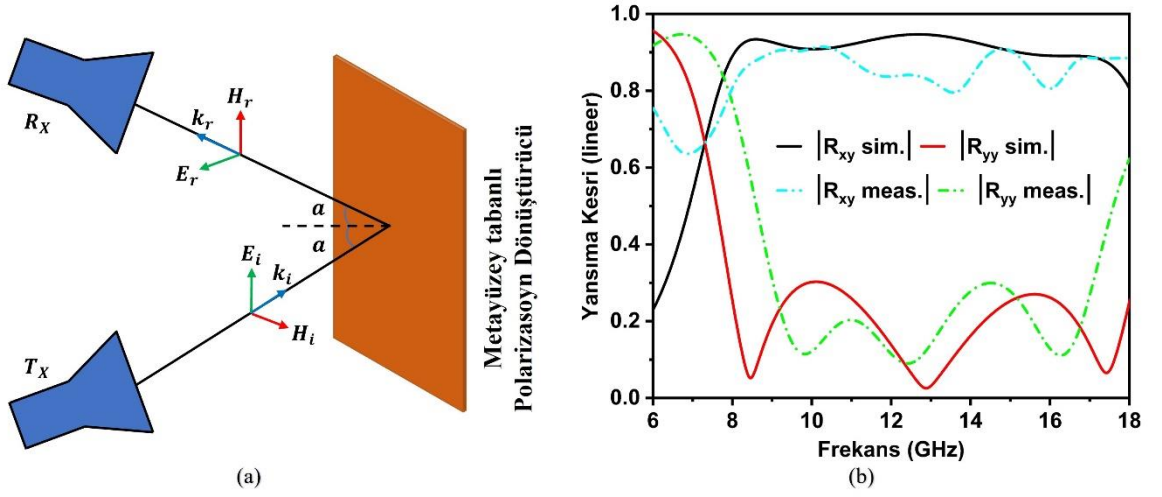
Şekil 61(a,b), bu dönüştürücünün farklı geliş açıları TE modu için frekans bağımlılığını gösterir. Şekil 61(c,d), bu dönüştürücünün farklı geliş açıları TM modu için frekans bağımlılığını gösterir. Şekil 61'den, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansının, 14.67 GHz ile 18 GHz arasındaki frekans aralığı dışında, tüm X bandında ve Ku bandının bir

kısımında 45°'ye kadar olan geliş açısı ile polarizasyon dönüştürme oranının %85 değerinin üzerinde olduğu görülmektedir.



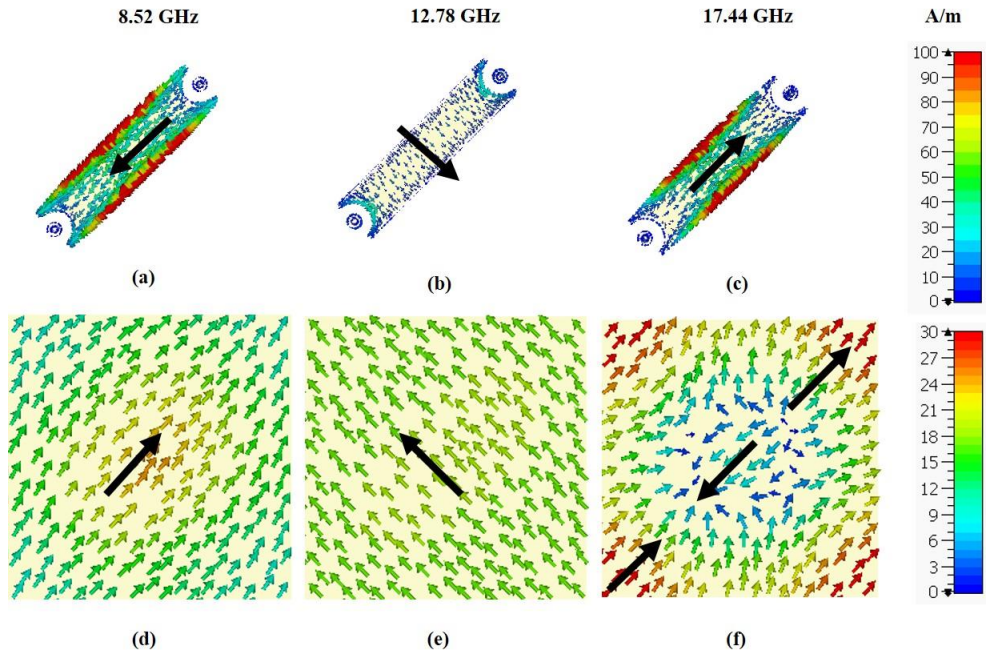
Şekil 61. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin PCR değerleri: (a,b) $\theta_{in}^{TE} \leq 45^\circ$, (c,d) $\theta_{in}^{TM} \leq 45^\circ$

Şekil 62(a)'da şematik olarak gösterilen bir ölçüm düzeni görülmektedir. Saçılma parametresi ölçümlerini gerçekleştirmek için Vektör Network Analizör cihazı (Keysight Technologies VNA N9918A modeli) kullanıldı. $204 \times 164 \text{ mm}^2$ kesitli, 1-18 GHz çalışma aralığına sahip iki doğrusal polarize antene sinyal aktarmak için kullanıldı. Önerilen metayüzey tabanlı dönüştürücü, $200 \times 300 \times 2.6 \text{ mm}^3$ (FR4 alttaşı) geniş bir yüzey üzerinde geleneksel litografi yöntemi ile üretildi. Antenler, eş ve çapraz polarize yansıma ölçümlerini gerçekleştirmek için aynı eksen ve 90° aralıklarla yönlendirildi. Şekil 62(b), ölçülen ve simüle edilmiş $|R_{xy}|$ ve $|R_{yy}|$. Şekil 8(b)'den ölçülen ve simüle edilen $|R_{xy}|$ ve $|R_{yy}|$ arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Tablo 5'te, tasarımımızın ve literatürdeki diğer tasarımların işlevsellik (açı duyarlılığı, LP'den CP'ye dönüşüm bandı ve çapraz polarizasyon dönüştürücü (CPC), bağıl bant genişliği, alt tabaka türü, katman türü ve kalınlık) yönünden karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 62. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) Ölçüm sisteminin şeması ve (b) ölçülen ('meas.') ve simüle edilen ('sim.') karşılaştırması $|R_{xy}|$ ve $|R_{yy}|$.

Şekil 63'teki akım dağılımları incelendiğinde, zemindeki ve rezonatördeki akımların zıt yönlerde olduğu, yani önerilen dönüştürücü tasarımının her üç rezonans frekansında 8.52 GHz, 12.78 GHz ve 17.44 GHz manyetik rezonansa sahip olduğu görülmektedir.

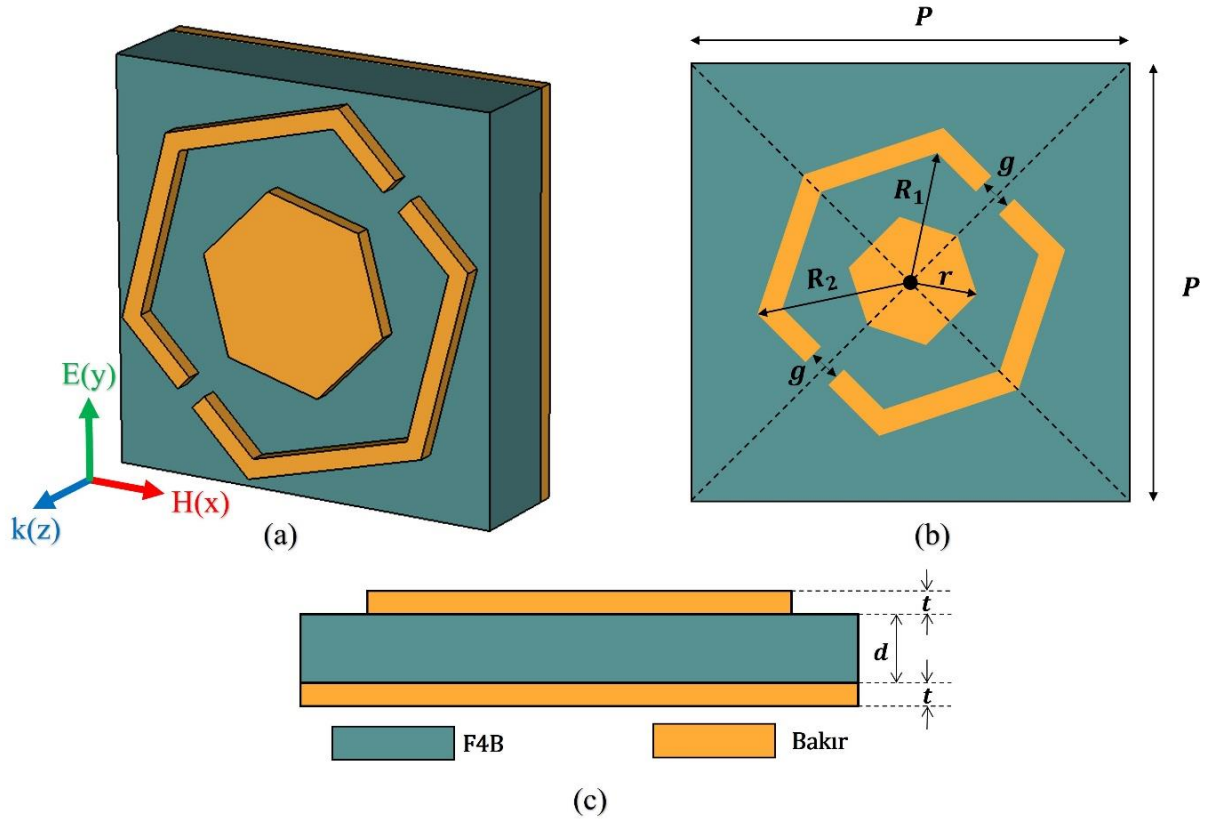


Şekil 63. X- ve Ku-bandı için önerilen metayüzeyin üst ve alt katmandaki akım dağılımları: (a,d) 8.52 GHz, (b,e) 12.78GHz, ve (c,f) 17.44 GHz.

K ve Ka Bandı Uygulamaları için Uygulaması Kolay, Ultra-İnce, Geniş-Bantlı ve Çok-Fonksiyonlu Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

Önerilen polarizasyon dönüştürücü parametrelerinin değerleri, Tablo 6'da özetlenmiştir. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün boyutları Şekil 64'te görülmektedir. Polarizasyon dönüştürücünün alt ve üst katmanları, elektrik iletkenliği (σ) $5,96 \times 10^7$ S/m ve kalınlığı 35 μm olan bakırdan yapılmıştır. Metayüzeyin alttaşı, kalınlığı 2.6 mm, kayıp tanjant ($\tan\delta$) değeri

0.001 ve bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 2.65 olan **F4B** malzemesidir. Önerilen polarizasyon dönüştürücü parametrelerinin değerleri, Tablo 6'da özetlenmiştir.

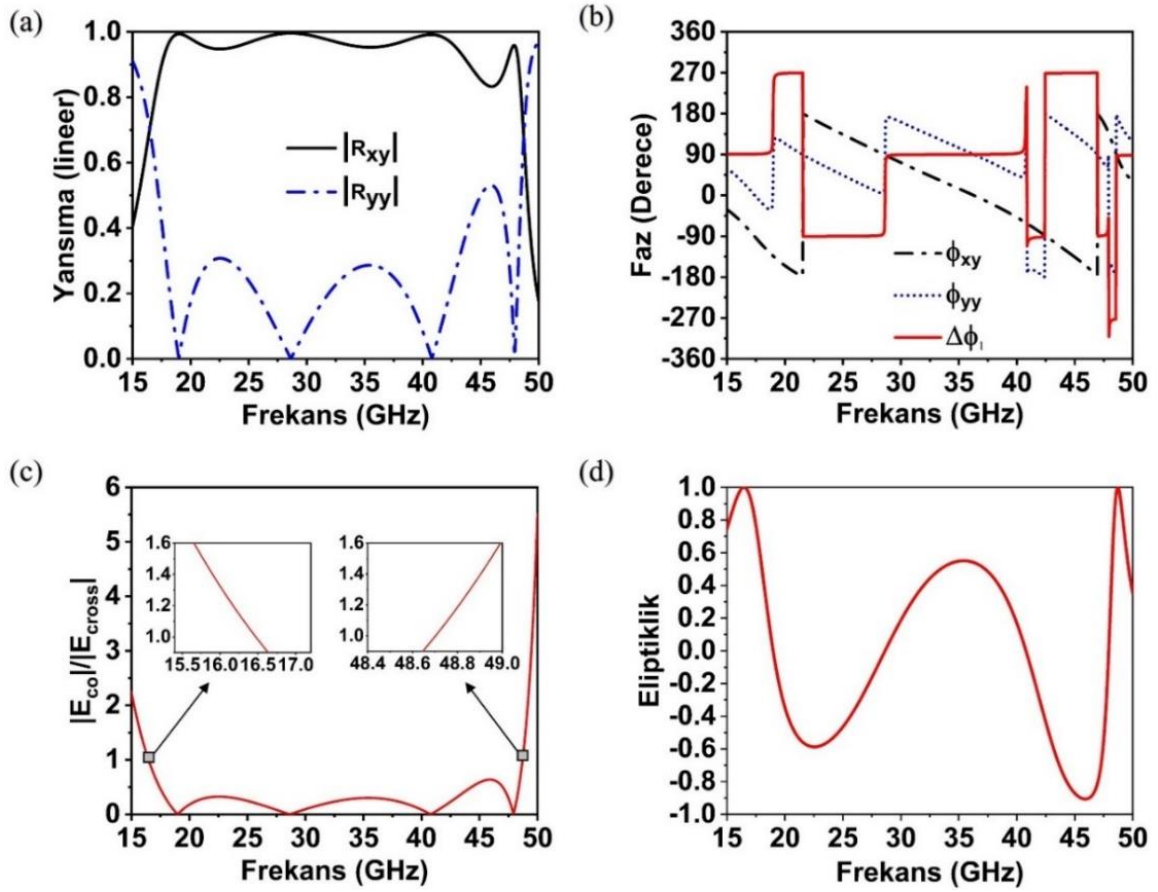


Şekil 64. K- ve Ka-bandı için önerilen metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünümü, (b) Şematik görünümü ve (c) Yan görünümü

Tablo 6. K- ve Ka-bandında Önerilen Polarizasyon Dönüştürücünün Boyutları

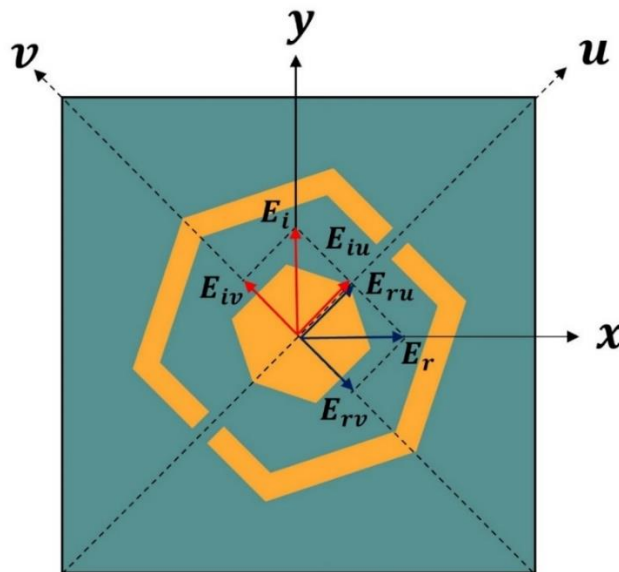
r	g	P	h	R_1	R_2
0.84	0.19	3.37	1.18	1.45	1.63

Şekil 65(a)'da görüldüğü üzere, 17.87 GHz ile 43.15 GHz frekans aralığında eş-polarizasyon yansımaya katsayısı (R_{yy}) 0,3 değerinden küçükken, çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı (R_{yx}) 0,9 değerinden yüksektir. Şekil 65(a)'da görüldüğü üzere da eş-polarizasyon yansımaya katsayısı ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı 16.48 GHz ve 48.74 GHz değerlerinde eşit büyüklüklerdedir ($|R_{xx}| = |R_{yx}| \approx 0.7$) ve PCR oranı bu frekanslarda 0.5 değerindedir. Ayrıca Şekil 65(b)'de faz farkı grafiği, $\Delta\Phi = \Phi_{yy} - \Phi_{xy}$ denklemine göre elde edilmektedir. Şekil 65(c)'de görüldüğü gibi, 16.48 GHz ve 48.74 GHz'de eş-polarizasyon ve çapraz-polarizasyon yansımaya katsayılarının oranı 1 olarak görülmektedir. Şekil 65(d)'de görüldüğü üzere, normalleştirilmiş eliptiklik 16.48 GHz'de ve 48.74 GHz'de +1 olduğundan yansıyan dalganın bu frekans değerlerinde RHCP olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 65. (a) eş-polarizasyon katsayısı ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı değerlerinin frekansa göre değişimi (b) ϕ_{yy} , ϕ_{xy} ve $\Delta\phi_1$ (c) $|E_{co}|/|E_{cross}|$ (d) Eliptiklik

Polarizasyon kavramını daha iyi yorumlamak için, önerilen meta-yüzeyin Şekil 66'da gösterildiği gibi ortogonal bileşenleri belirlenmelidir. Gelen elektromanyetik dalga E_i 'nin u- ve v- yönlerinde iki ortogonal bileşeni, Şekil 66'da gösterilmektedir.



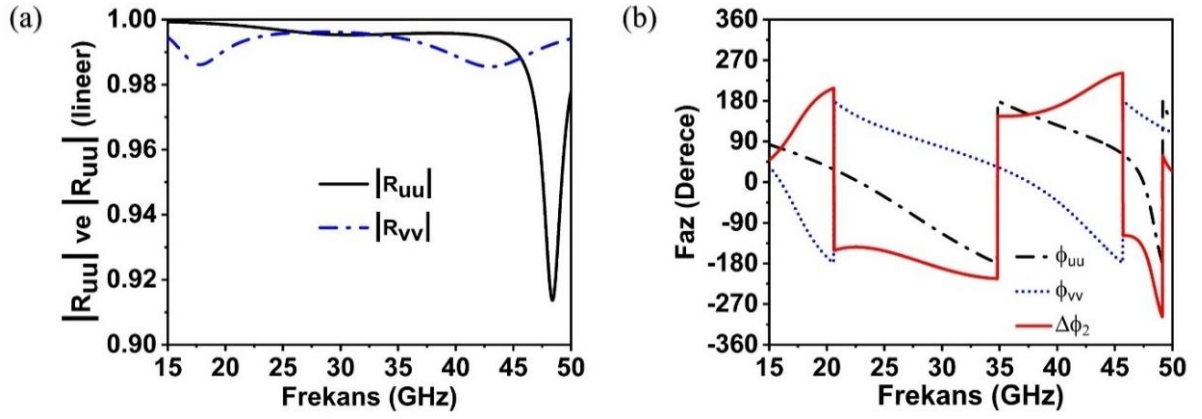
Şekil 66. K- ve Ka-bandında önerilen metayüzeyin u- ve v-eksenlerinin gösterimi

Şekil 67'de, x veya y eksenine $\pm 45^\circ$ yönlendirilmiş u ve v eksen boyunca çarpan lineer polarize alanın herhangi bir dönüşüm olmaksızın geri yansıtıldığı görülmektedir

Tablo 7. K- ve Ka-Bandında Çalışan Metayüzeyin Performansının Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması

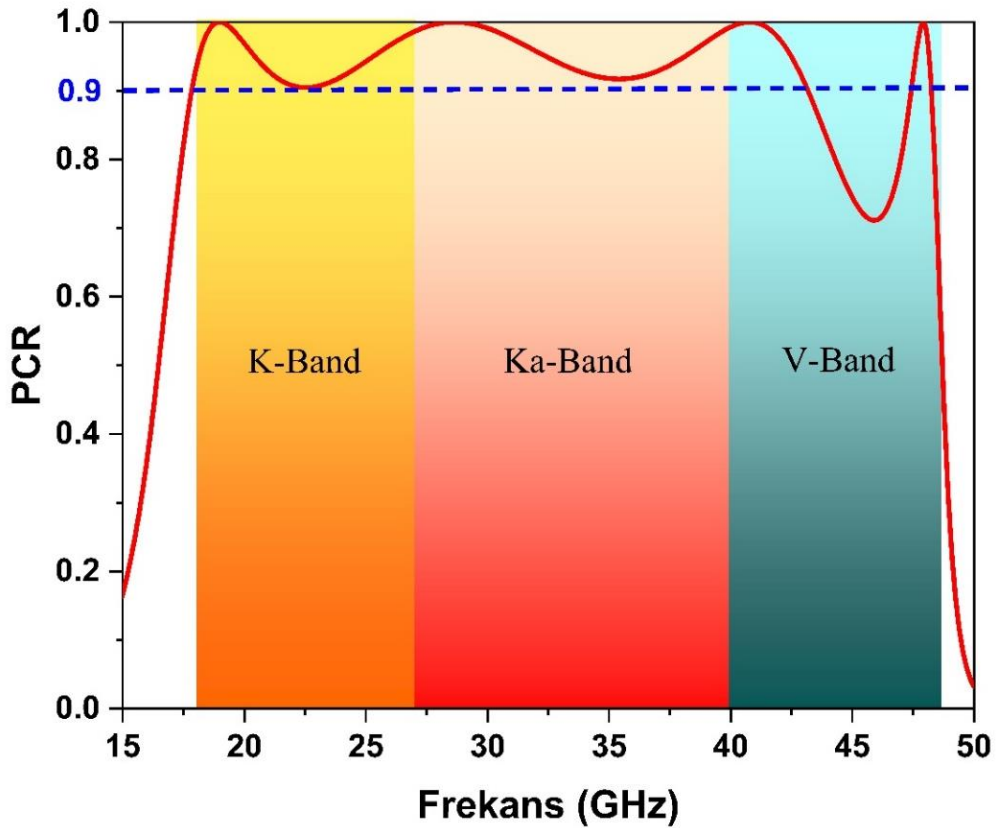
Ref.	Açı Hassasiyeti	LTC Band (GHz)	CPC Band (GHz)	RBW (%)	Alttas Çeşidi	Katman Çeşidi	Alttas kalınlığı
(Khan <i>et al.</i> 2019)	45 ⁰ (%80)	7.5-7.7 11.5-11.9	8-11	31.6	FR4	Tek Katmanlı	0.04 λ_0
(T. K. T. Nguyen <i>et al.</i> 2021)	45 ⁰ (%80)	7.42-7.6 13-13.56	8-12	31.6	FR4	Tek Katmanlı	0.04 λ_0
(Y. Li <i>et al.</i> 2018)	N/A	N/A	5.2-16.7	105	F4B	Çok Katmanlı	0.05 λ_0
(T. Q. H. Nguyen <i>et al.</i> 2021)	45 ⁰ (%80)	N/A	12-18	31.6	FR4	Tek Katmanlı	0.06 λ_0
(J. Xu <i>et al.</i> 2018a)	N/A	N/A	6.67-17.1	87.7	F4B	Tek Katmanlı	0.14 λ_0
(J. Zhao & Cheng, 2016)	N/A	N/A	5.7-10.3	40	FR4	Tek Katmanlı	0.06 λ_0
(Mei <i>et al.</i> 2017)	N/A	N/A	6.91-14.31	70	FR4	Tek Katmanlı	0.03 λ_0
(Couto <i>et al.</i> 2021)	N/A	N/A	13.8-40.7	98.7	Rohacell	Çok Katmanlı	0.09 λ_0
(B. Lin <i>et al.</i> 2020)	N/A	N/A	5.8-20.4	112	PTFE	Çok Katmanlı	0.14 λ_0
(B.-Q. Lin <i>et al.</i> 2020)	N/A	N/A	5.87-21.13	113	PTFE	Çok Katmanlı	0.14 λ_0
Önerilen metayüzey	40⁰(%77) (27.72-27.11 GHz hariç)	16.23-16.74 48.6-48.8	17.87-43.15	83	FR4	Tek Katmanlı	0.07λ_0

Burada λ_0 , PCR değeri 0.9 olduğunda en düşük frekansa karşılık gelen dalga boyudur.



Şekil 67. Metayüzeyin: (a) $|R_{uu}|$ ve $|R_{vv}|$ değerleri, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi_2$ değerleri

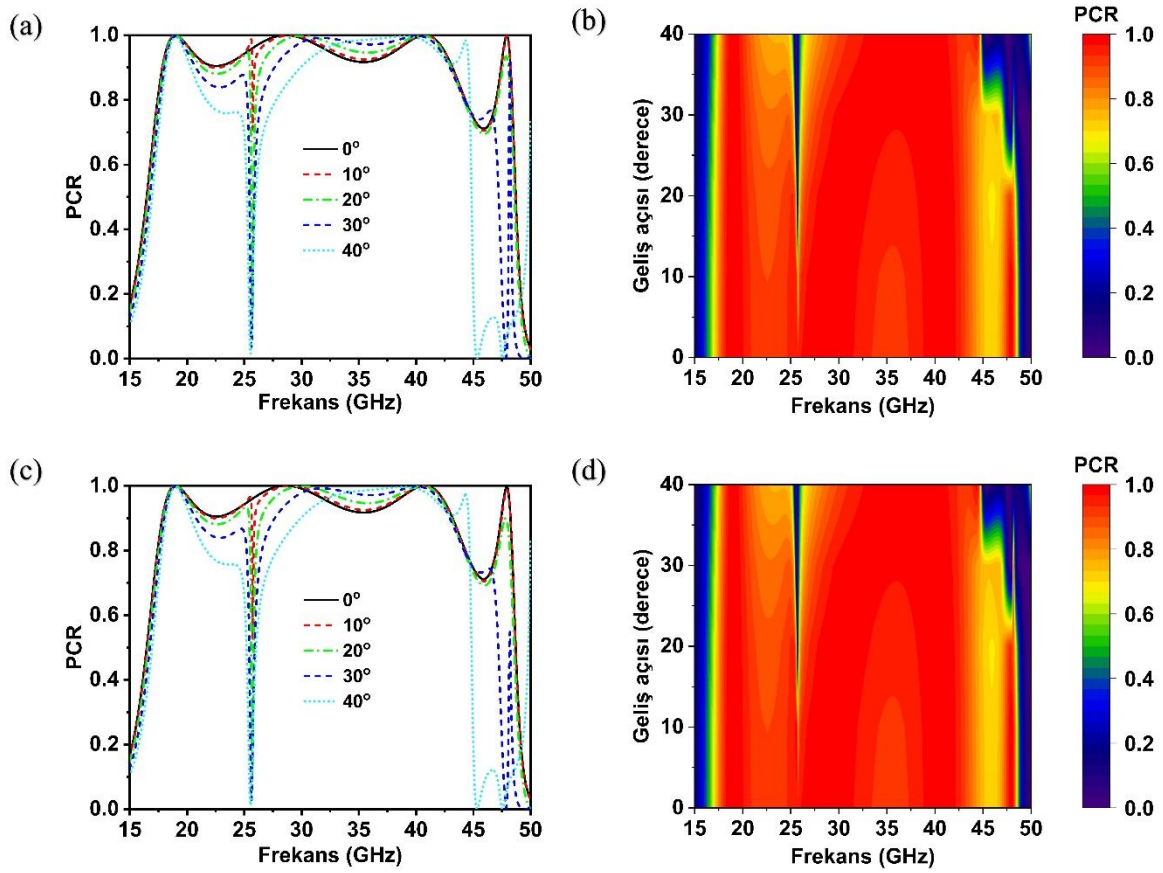
Şekil 68'de, normal geliş açısı için tüm K- ve Ka-bantlarında polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin 0.9'dan büyük olduğu görülmektedir. Yani, tasarlanan polarizasyon dönüştürücü tüm K ve Ka bantlarında doğrusal polarizasyon dönüştürücü amacıyla verimli çalıştığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, Şekil 68'de PCR değeri 8.52 GHz, 12.78 GHz ve 17.44 GHz rezonans frekans değerlerinde yaklaşık 1 değerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Tablo 7'de K- ve Ka-bandı için önerilen metayüzeyin literatür ile kıyaslanması görülmektedir.



Şekil 68. Önerilen metayüzeyin polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin frekansa göre değişimi (normal açı)

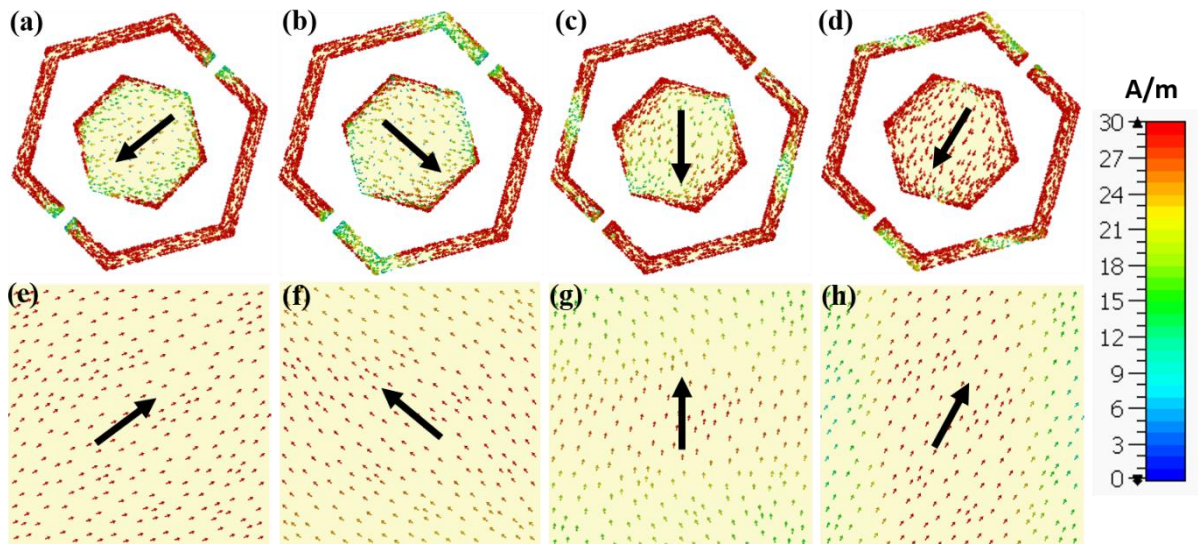
Şekil 69(a,b), bu dönüştürücünün farklı geliş açıları TE modu için frekans bağımlılığını gösterir. Şekil 69(c,d), bu dönüştürücünün farklı geliş açıları TM modu için frekans

bağımlılığını gösterir. Şekil 69'dan önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansının, K- ve Ka-bantlarının çoğunda (24.72-27.11 GHz frekans aralığı hariç) 40°'ye kadar olan geliş açısı ile polarizasyon dönüştürme oranının %75 değerinin üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 69. Önerilen metayüzeyin PCR değerleri: (a,b) $\theta_{in}^{TE} \leq 40^\circ$, (c,d) $\theta_{in}^{TM} \leq 40^\circ$

Şekil 70'teki akım dağılımları incelendiğinde, zemindeki ve rezonatördeki akımların zıt yönlere olduğu, yani önerilen dönüştürücü tasarımının her üç rezonans frekansında 18.96GHz, 28.62 GHz ve 40.8 GHz manyetik rezonansa sahip olduğu görülmektedir.



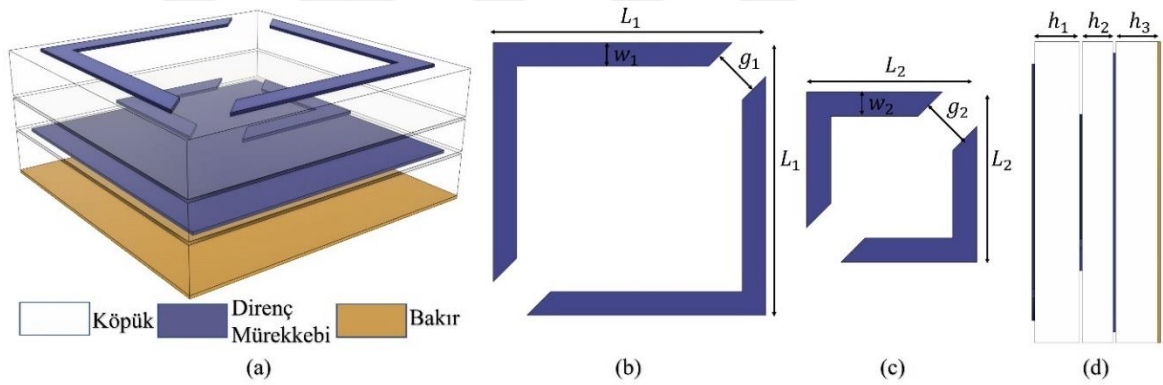
Şekil 70. Meta-yüzeyin üst ve alt katmandaki akım dağılımları: (a,d) 18.96 GHz, (b,e) 28.62 GHz, ve (c,f) 40.8 GHz.

S, C, X, Ku, K, Ka, V ve W Bantları Uygulamaları için Radar Soğurucu Tasarımı

Önerilen radar soğurucu parametrelerinin değerleri, Tablo 8'de özetlenmiştir. Önerilen radar soğurucunun boyutları Şekil 71'de görülmektedir. Radar soğurucunun 3 katmanı, 120Ω değerinde olan rezistif film ile kaplanmıştır. En son tabaka metal ile sonlandırılmış olup elektrik iletkenliği (σ) $5,96 \times 10^7$ S/m ve kalınlığı $35 \mu\text{m}$ olan bakırdan yapılmıştır. Birinci ve üçüncü katman kalınlığı 1 mm değerindedir. İkinci katman kalınlığı 1.6 mm değerindedir. Dolayısıyla, metayüzeyin alttaşı, kalınlığı 3.6 mm değerindedir. Ayrıca alttaş malzemelerin kayıp tanjant ($\tan\delta$) değeri 0.002 ve bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) 1.06 olan **foam (köpük)** malzemesidir.

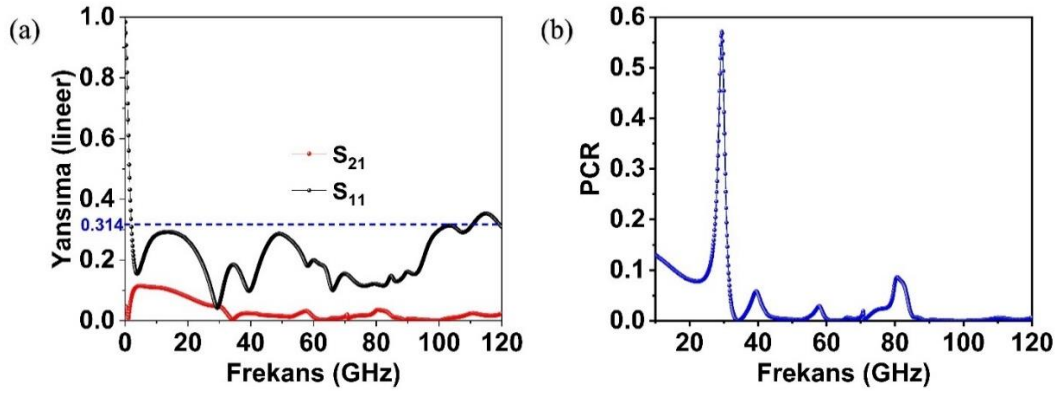
Tablo 8. Önerilen Radar Soğurucunun Boyutları

L	L_1	L_2	L_3	g_1	g_2
11	10.5	7.6	10.7	1	1



Şekil 71. Önerilen radar soğurucu metayüzeyin: (a) 3 boyutlu görünümü, (b) 1.katmanın önden görünüşü (c) 2.katmanın önden görünüşü (d) Yandan görünüşü

Şekil 72(a)'da 2-110 GHz arası $T(\omega)$ değerinin yaklaşık sıfır olduğu, $R(\omega)$ değerinin ise oldukça küçük değerde olduğundan dolayı, $A(\omega)$ %90 ve üzerindedir. Şekil 72'de görüldüğü üzere önerilen metayüzeyin 2-110 GHz arasında polarizasyon dönüştürücü değil radar soğurucu olduğu gözlemlenmektedir. Tablo 9'da önerilen radar soğurucunun performansının literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması görülmektedir.

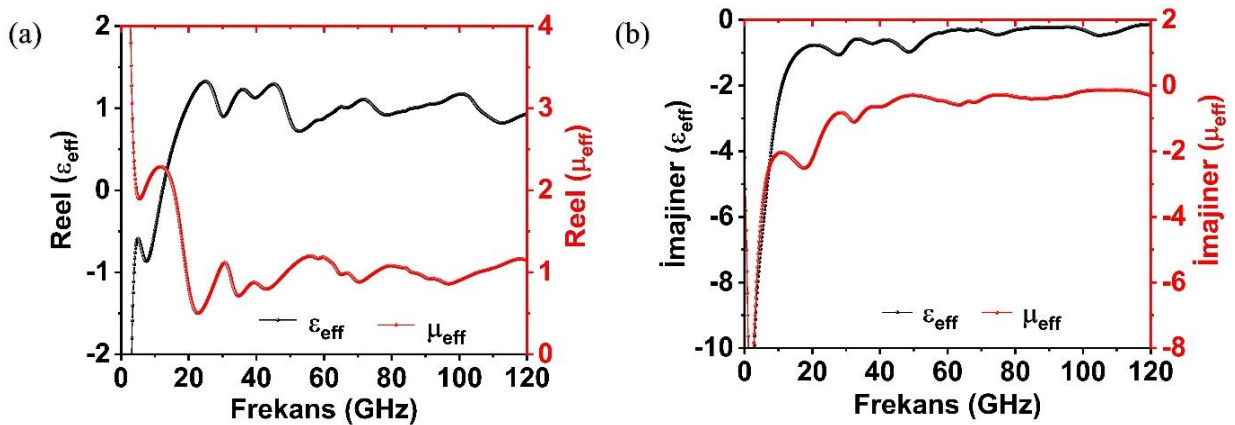


Şekil 72. Metayüzeyin: (a) yansıma kesri (b) PCR değeri

Tablo 9. Önerilen Radar Soğurucunun Performansının Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması

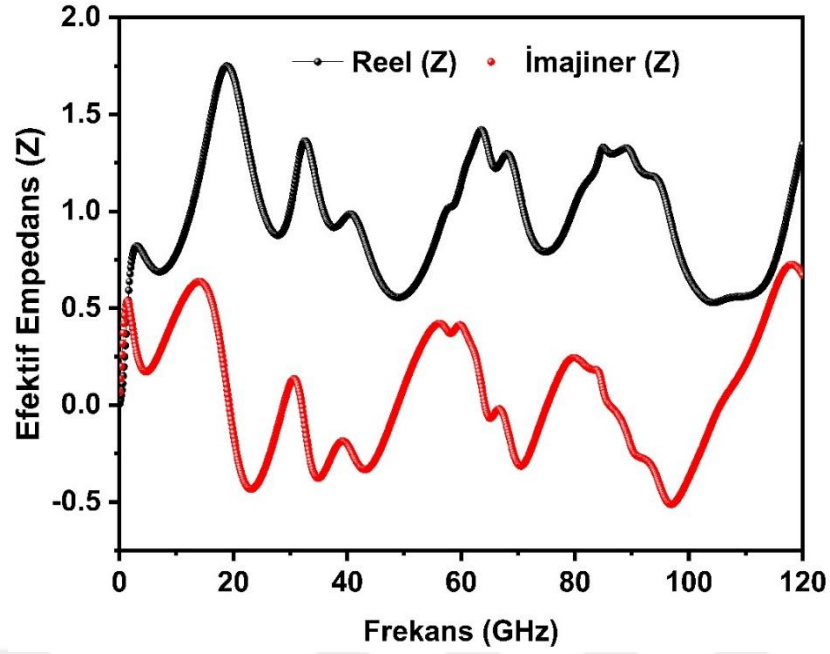
Ref.	Açı Hassasiyeti	Soğurna Bandı (GHz)	RBW (%)	Katman Çeşidi	Alttaş kalınlığı
(Ghosh et al. 2016)	N/A	4.96–18.22	114.4	Çok Katmanlı	$0.08\lambda_0$
(J. Chen et al. 2018)	N/A	2-17.07	158	Çok Katmanlı	$0.1\lambda_0$
(Tayde et al. 2018)	N/A	2.18.5	161	Çok Katmanlı	$0.08\lambda_0$
(P. Chen et al. 2021)	60° (%80)	4.73-39.04	156.7	Çok Katmanlı	$0.15\lambda_0$
(Wang et al. 2022)	N/A	4.2-40.87	162.7	Çok Katmanlı	$0.13\lambda_0$
Önerilen metayüzey	45°(%82)	1.98-110.61	193	Çok Katmanlı	$0.02\lambda_0$

Şekil 73'te ϵ_{eff} ve μ_{eff} değerlerinin reel ve imajiner kısmı görülmektedir.



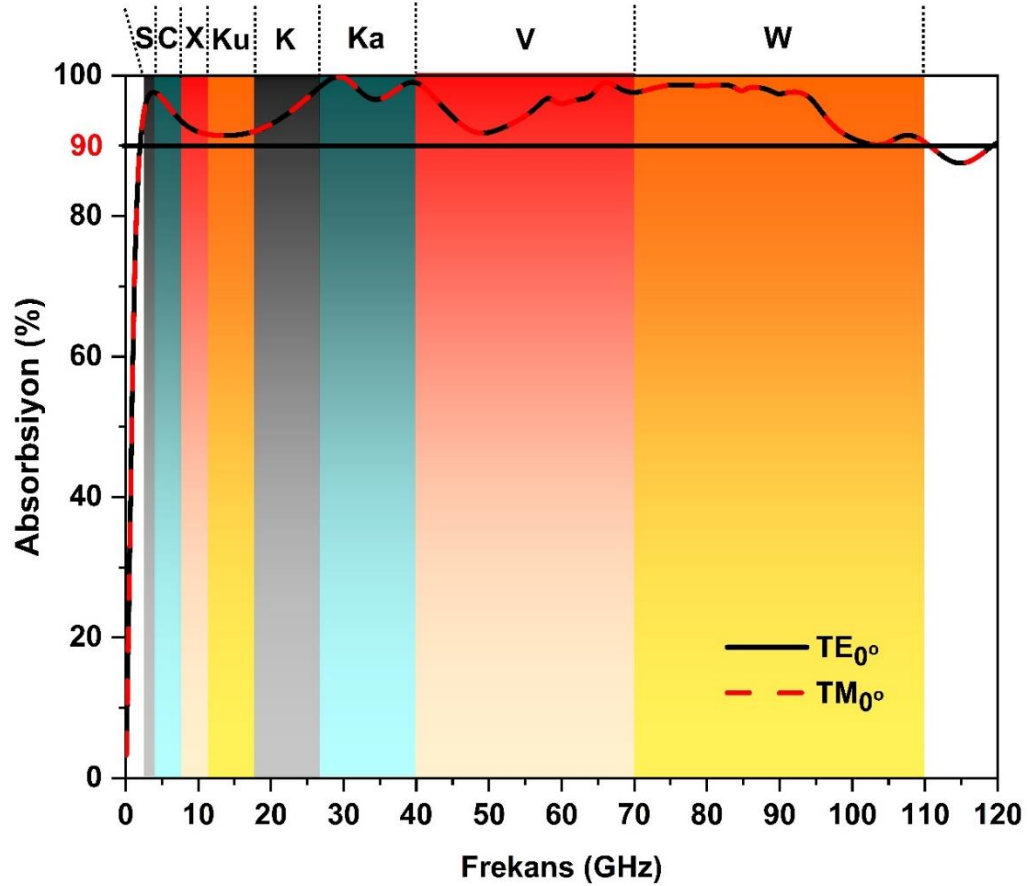
Şekil 73. ϵ_{eff} ve μ_{eff} : (a) reel kısmı (b) imajiner kısmı

Denklem 29'dan hesaplanan normleştirilmiş empedansın reel ve imajiner kısmı sırasıyla yaklaşık olarak 1 ve 0 değerinde olduğu Şekil 74'te gözlemlenmektedir.



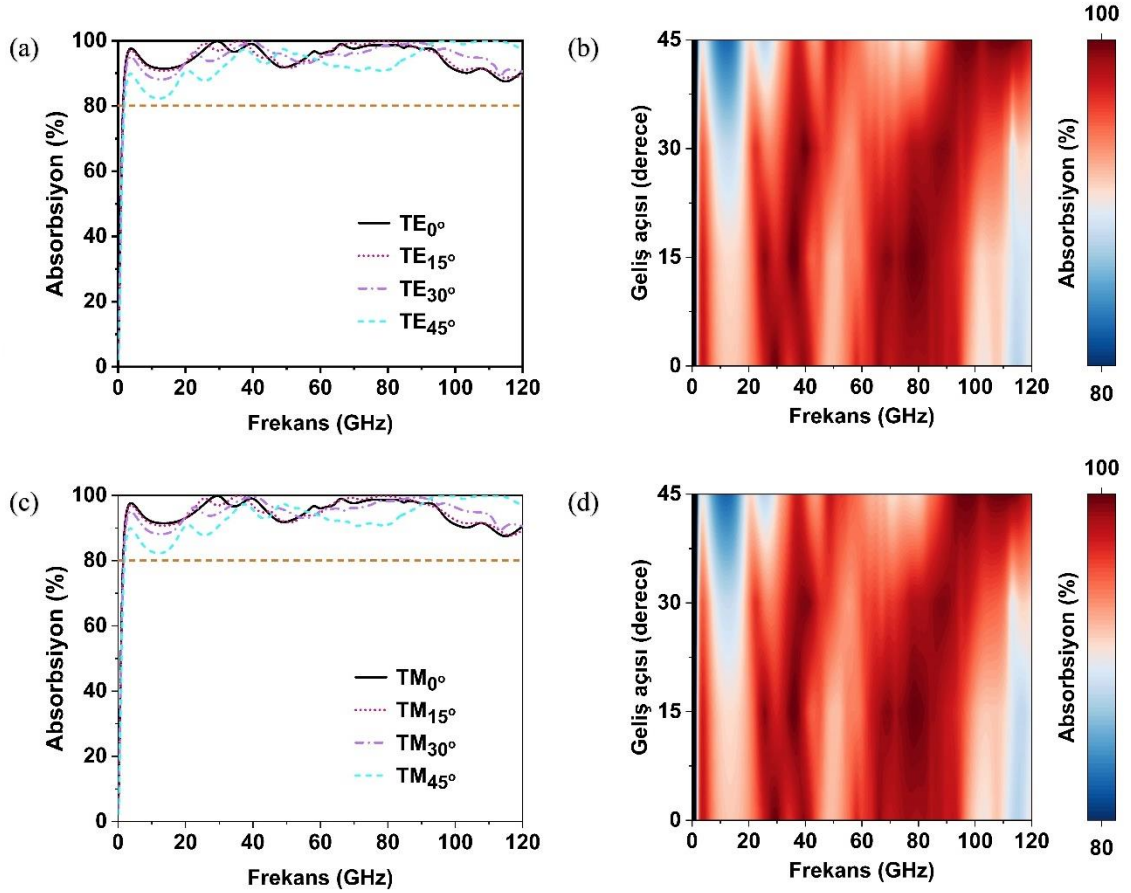
Şekil 74. Önerilen metayüzeyin u- ve v-eksenlerinin gösterimi

Boşluğun empedansı 377Ω değerine sahiptir. Şekil 75'te görüldüğü üzere önerilen metayüzey 1.98-110.61 GHz değerleri arasında empedans uyumuna sahip olduğundan bu bant aralığına oldukça yüksek soğurmaya ulaşmıştır.



Şekil 75. Önerilen metayüzeyin polarizasyon dönüştürme oranı (PCR) değerinin frekansa göre değişimi (normal açı).

Şekil 76(a,b), bu soğurucunun farklı geliş açıları TE modu için frekans bağımlılığını gösterir. Şekil 76(c,d), bu soğurucunun farklı geliş açıları TM modu için frekans bağımlılığını gösterir. Şekil 76'da önerilen radar soğurucunun performansının, 2 GHz ile 110 GHz arasındaki frekans aralığında, tüm S, C, X, Ku, K, Ka, V, W bantlarında 45°'ye kadar olan geliş açısında %80 soğurma değerinin üzerinde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 76. Önerilen metayüzeyin PCR değerleri: (a,b) $\theta_{in}^{TE} \leq 40^\circ$, (c,d) $\theta_{in}^{TM} \leq 40^\circ$

Bu çalışmada, geliş açısına duyarız, ultra ince ve yüksek verimli radar soğurucu önererek literatürde bulunan ultra geniş bant uygulamalarında mükemmel soğurucu tasarlamaktır. Önerilen metamalzeme soğurucunun etkin absorpsiyon bant genişliği (%90'ın üzerinde absorpsiyon), 2 GHz ile 110 GHz arasındadır ve tüm S-, C-, X-, Ku-, K-, Ka, W- ve V-bantlarını kapsar. Ayrıca %193 göreceli absorpsiyon bant genişliğine (RBW) sahiptir. Önerilen soğurucu, geliş açısı 45°'den az olduğunda S-bandından V-bandına TE ve TM modları için %85'ten fazla absorpsiyon değerine ulaşmaktadır. Önerilen soğurucunun toplam kalınlığı, en düşük çalışma frekansında $0.02\lambda_0$ 'a karşılık gelen 3.6 mm'dir. Ayrıca önerilen metamalzeme soğurucu daha önceki radar bant raporlarıyla karşılaştırılmış ve radar uygulamaları için umut verici bir aday olduğu gözlemlenmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ilk olarak, ultra ince, geniş bantlı ve çok işlevli bir X-band polarizasyon dönüştürücü bulunmaktadır. Hem çapraz polarizasyon dönüşümünü hem de doğrusaldan dairesel polarizasyona dönüşümüne sahip tek katmanlı dielektrik FR4 alttaşı üzerinde bakır kaplanmıştır. Önerilen metayüzey, hem doğrusal polarizasyon dönüştürücü bandına hem de lineerden dairesel polarizasyona dönüşüm bandına sahiptir. Önerilen meta yüzeyin polarizasyon dönüşüm oranının 7.83 GHz ile 14.05 GHz frekans aralığında %95'ten fazla olduğu gözlemlenmektedir. Normal geliş açısı altında %56 görelî bant genişliğine (RBW) sahiptir. Ayrıca, PCR verimlilik özellikleri, hem enine elektrik (TE) hem de enine manyetik (TM) modları için 45°'ye kadar geniş bir geliş açısı ile X bandının tamamında korunur. Ek olarak, önerilen meta yüzeyde LP'den CP'ye dönüşüm, bir frekans bandı, 7.23–7.45 GHz (C bandının bir parçası) elde edilir. Önerilen dönüştürücü, $0.07\lambda_0$ kalınlığına sahip olduğundan ultra-incedir.

Bu çalışmada ikinci olarak, tek katmanlı, ultra ince, geniş bantlı ve çok işlevli bir X- ve Ku-band polarizasyon dönüştürücü bulunmaktadır. Hem dairesel polarizasyon dönüşümüne hem de doğrusaldan dairesel polarizasyon dönüşümüne sahip tek katmanlı dielektrik FR4 alttaşı üzerinde bakır kaplanmıştır. Önerilen meta-yüzey anizotropik yapıya sahip ultra ince, geniş bantlı ve çok amaçlı bir polarizasyon dönüştürücüsü önerilmiştir. Tüm X ve Ku bantlarında dairesel bir polarizasyon dönüştürücü ve C ve K bantlarının bir kısmında doğrusaldan dairesele bir polarizasyon dönüştürücü olarak çalışır. 7.99 GHz ile 18.03 GHz arasında %90'ın üzerinde bir polarizasyon dönüşüm oranı verimliliğine sahiptir ve %77.86 görelî bant genişliği ile tüm X ve Ku bantlarını kapsar. Polarizasyon dönüşüm oranı değeri, $\theta \leq 30^\circ$ 'da hem TE hem de TM modları için daha geniş bir frekans bandında (yaklaşık 16 GHz'e kadar) %85'ten az değildir.

Bu çalışmada üçüncü olarak, uygulaması kolay, ultra ince, geniş bantlı ve çok işlevli F4B alttaşı malzemesi üzerine bakır kaplı bir adet polarizasyon dönüştürücü tasarlandı. K- ve Ka-bantlarında CPC özellikli ve Ku- ve V-bantlarının bir kısmında LTC fonksiyonlu olarak tasarlanmıştır. Önerilen metayüzey, 17.87 GHz değerinden 43.15 GHz değerine kadar %83 görelî bant genişliğine sahip CPC bandı özellikli %90 değerinin üzerinde PCR değerine sahiptir. K- ve Ka-bantlarında 40° geliş açısına kadar PCR değeri CPC bandının çoğunda %75 değerinin üzerindedir. Ayrıca, önerilen metayüzey, 16.23–16.75 GHz ve 48.6–48.8 GHz değerleri arasında LTC bandına sahiptir.

Bu çalışmada son olarak, 2-110 GHz (S, C, X, Ku, K, Ka, V, W bantlarının tamamını kapsayan) arasında %90 ve üstü soğurmaya sahip ultra-ince, ultra-geniş bant, geliş açısına ve polarizasyon açısına hassas olmayan radar soğurucu tasarlanmıştır. 45^0 kadar geniş bir geliş açısı için hem TE hem de TM modunda %80'in üzerindedir. Dahası göreceli bant genişliği teorikte en fazla %200 olurken, önerdiğimiz metayüzeyde literatürde benzer sonucu olmayan %193 gibi oldukça yüksek değere ulaşmıştır.



KAYNAKÇA

- Özmen, A., 2022. Çok-Magnetronlu Yüksek Sıcaklık Mikrodalga Fırının Tasarımı ve Optimizasyonu. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum
- Abdullah, Kamal, B., Ullah, S., Khan, B., Rahim, T., Ren, J., 2021. Ultrathin and high efficient wideband polarization converting metasurface. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31(7), 1–10. <https://doi.org/10.1002/mmce.22673>
- Ahmed, F., Khan, M., Tahir, F., 2021. A Multifunctional Polarization Transforming Metasurface for C -, X -, and K -Band Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(11), 2186–2190. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3065717>
- Asim, M. T., 2017. Modeling and Simulations of Metamaterial based Microwave Devices. PhD Thesis, Pakistan Institute of Engineering and Applied Sciences, Islamabad
- Beeharry, T., 2020. Study of the electromagnetic interactions between radar equipment under integrated and compact mature: design and validation. PhD Thesis, Université de Nanterre, Paris
- Chen, J., Shang, Y., Liao, C., 2018. Double-Layer Circuit Analog Absorbers Based on Resistor-Loaded Square-Loop Arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(4), 591–595. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2805333>
- Chen, P., Kong, X., Han, J., Wang, W., Han, K., Ma, H., Zhao, L., & Shen, X., 2021. Wide-Angle Ultra-Broadband Metamaterial Absorber with Polarization-Insensitive Characteristics. *Chinese Physics Letters*, 38(2), 027801. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/38/2/027801>
- 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. <https://doi.org/10.1002/adom.201500285>
- Choudhury, S., Guler, U., Shaltout, A., Shalaev, V. M., Kildishev, A. V., Boltasseva, A., 2017. Pancharatnam–Berry Phase Manipulating Metasurface for Visible Color Hologram Based on Low Loss Silver Thin Film. *Advanced Optical Materials*, 5(10), 1700196. <https://doi.org/10.1002/adom.201700196>
- 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. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1914742>
- Faenzi, M., Minatti, G., González-Ovejero, D., Caminita, F., Martini, E., Della Giovampaola, C., Maci, S., 2019. Metasurface Antennas: New Models, Applications and Realizations. *Scientific Reports*, 9(1), 10178. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46522-z>
- Fei, P., Vandenbosch, G. A. E., 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. <https://doi.org/10.1002/adom.202000194>
- Gao, J., Wang, C., Qiang, T., Zhang, K., Wu, Q., 2018. Multifunctional Polarization Converter Based on Dielectric Metamaterial. *Physica Status Solidi (A)*, 215(11), 1700535. <https://doi.org/10.1002/pssa.201700535>
- 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. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2434392>
- Ghosh, S., Bhattacharyya, S., Srivastava, K. V., 2016. Design, characterisation and fabrication of a broadband polarisation-insensitive multi-layer circuit analogue absorber. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 10(8), 850–855. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2015.0653>
- Han, B., Li, S., Cao, X., Han, J., Jidi, L., Li, Y., 2020. Dual-band transmissive metasurface with linear to dual-circular polarization conversion simultaneously. *AIP Advances*, 10(12), 125025. <https://doi.org/10.1063/5.0034762>
- Hsiao, H.-H., Chu, C. H., Tsai, D. P., 2017. Fundamentals and Applications of Metasurfaces. *Small Methods*, 1(4), 1600064. <https://doi.org/10.1002/smtd.201600064>
- 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. <https://doi.org/10.1002/adom.202101915>
- 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), 40–43. <https://doi.org/10.1002/adts.202000179>
- Jeong, H., Nguyen, T. T., Lim, S., 2018. Meta-Dome for Broadband Radar Absorbing Structure. *Scientific Reports*, 8(1), 17893. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36273-8>
- Jiang, X.-Y., Ye, J.-S., He, J.-W., Wang, X.-K., Hu, D., Feng, S.-F., Kan, Q., Zhang, Y., 2013. An ultrathin terahertz lens with axial long focal depth based on metasurfaces. *Optics Express*, 21(24), 30030. <https://doi.org/10.1364/OE.21.030030>
- 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. <https://doi.org/10.1364/ome.423324>
- 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. <https://doi.org/10.1002/adom.201500194>
- Khan, M. I., 2018. Design and Analysis of Metasurfaces for Polarization Conversion of Electromagnetic Waves. PhD Thesis, National University of Science and Technology, 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. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab898d>
- 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. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2991521>
- 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. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40793-2>
- 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. <https://doi.org/10.1002/adma.202102232>

- Li, F., Chen, H., Zhang, L., Zhou, Y., Xie, J., Deng, L., Harris, V. G., 2019. Compact High-Efficiency Broadband Metamaterial Polarizing Reflector at Microwave Frequencies. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67(2), 606–614. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2881967>
- Li, J., Wang, G., Yue, Z., Liu, J., Li, J., Zheng, C., Zhang, Y., Zhang, Y., Yao, J., 2022. Dynamic phase assembled terahertz metalens for reversible conversion between linear polarization and arbitrary circular polarization. *Opto-Electronic Advances*, 5(1), 210062–210062. <https://doi.org/10.29026/oea.2022.210062>
- 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. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2843816>
- 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. <https://doi.org/10.1002/adts.202100117>
- 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. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab9de5>
- 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. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988058>
- 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. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994051>
- Ma, W., Cheng, F., Liu, Y., 2018. Deep-Learning-Enabled On-Demand Design of Chiral Metamaterials. *ACS Nano*, 12(6), 6326–6334. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b03569>
- Maas, R., van de Groep, J., Polman, A., 2016. Planar metal/dielectric single-periodic multilayer ultraviolet flat lens. *Optica*, 3(6), 592. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.000592>
- Mahmood, N., 2020. Electromagnetic Wave Manipulation and Structuring via Ultrathin Metamaterials. PhD Thesis, National University Of Sciences And Technology, Islamabad
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1322-6>
- 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), 125323. <https://doi.org/10.1063/1.5003446>
- 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. <https://doi.org/10.1002/adom.202001243>
- Monticone, F., Estakhri, N. M., Alù, A., 2013. Full Control of Nanoscale Optical Transmission with a Composite Metascreen. *Physical Review Letters*, 110(20), 203903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.203903>
- 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. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81586-w>

- 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), 035326. <https://doi.org/10.1063/1.5143915>
- 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(January), 126773. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.126773>
- 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. <https://doi.org/10.1038/lsa.2013.28>
- Özden, K. Ö., Özer, A. Ö., Yücedağ, O. M. Y., Koçer, H. K., 2016. Metamalzeme Tabanlı Geniş Bant Işıma Emici Yapılar Kullanılarak Radar Kesit Alanının Azaltılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4), 1105–1112. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278466>
- 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. <https://doi.org/10.1021/nl5001746>
- 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. <https://doi.org/10.1002/pssb.202100175>
- 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. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971557>
- 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. <https://doi.org/10.1038/srep40782>
- Tayde, Y., Saikia, M., Srivastava, K. V., Ramakrishna, S. A., 2018. Polarization-Insensitive Broadband Multilayered Absorber Using Screen Printed Patterns of Resistive Ink. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(12), 2489–2493. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2879274>
- Thorlabs., 2022. The Polarization Ellipse Representation of the Polarization State. 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. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.676840>
- Tuan, T. S., Lam, V. D., & Hoa, N. T. Q., 2019. Simple Design of a Copolarization Wideband Metamaterial Absorber for C-Band Applications. *Journal of Electronic Materials*, 48(8), 5018–5027. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07301-8>
- Veselago, V. G., 2005. Split-ring resonator. 1–7.
- Vikmedi., 2022. No Title. https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Circular_Polarization_Linear_Polarized_Light_En

- Wang, T., Ding, M.-D., He, H.-H., Mao, J.-B., & Ruan, J.-F. (2022). Ultra-wideband polarization- and angle-insensitive metamaterial absorber based on multilayer resistive ink. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36(2), 272–284. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1965038>
- Wikipedia., 2022. No Title. https://sv.m.wikipedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light_With.Components_Right_Handed.svg
- 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. <https://doi.org/10.1002/adom.201600938>
- 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(March), 1–6. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.850020>
- Xu, J., Li, R., Wang, S., Han, T., 2018. Ultra-broadband linear polarization converter based on anisotropic metasurface. *Optics Express*, 26(20), 26235. <https://doi.org/10.1364/OE.26.026235>
- Yu, N., & Capasso, F., 2013. Flat optics: Controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces. 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 19(3), 2341–2342. <https://doi.org/10.1109/APS.2013.6711829>
- Zafar, M. F., Masud, U., Rashid, A., Murtaza, M., Ullah, T., 2021. Comment on ‘An ultrathin and broadband radar absorber using metamaterials’’. *Waves in Random and Complex Media*, 1–6. <https://doi.org/10.1080/17455030.2020.1869350>
- Zhao, J., & Cheng, Y., 2016. A high-efficiency and broadband reflective 90° linear polarization rotator based on anisotropic metamaterial. *Applied Physics B*, 122(10), 255. <https://doi.org/10.1007/s00340-016-6533-6>
- 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. <https://doi.org/10.1063/1.5098515>
- Zheng, G., Mühlenbernd, H., Kenney, M., Li, G., Zentgraf, T., Zhang, S., 2015. Metasurface holograms reaching 80% efficiency. *Nature Nanotechnology*, 10(4), 308–312. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.2>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Aykut COŞKUN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi (2013)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen. Bil. Ens, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2017)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen. Bil. Ens, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2022)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
<u>SCI ve SCI-E Kapsamında</u>	
1. Coşkun Aykut, Hasar Uğur Cem, Özmen Ahmet, Ertuğrul Mehmet, "Easy-To-Implement Ultra-Thin, Wide-Band and Multi-Functional Polarization Converter for K and Ka Band Applications", Advanced Theory and Simulations.	