



**THZ FOTOİLETKEN ANTENLERİN  
YÖNLÜLÜĞÜNÜN ARTTIRILMASI**

**2023  
DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Yunus Emre KARASU**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İhsan ULUER**

**THZ FOTOİLETKEN ANTENLERİN YÖNLÜLÜĞÜNÜN ARTTIRILMASI**

**Yunus Emre KARASU**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İhsan ULUER**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ağustos 2023**

Yunus Emre KARASU tarafından hazırlanan “THZ FOTOİLETKEN ANTENLERİN YÖNLÜLÜĞÜNÜN ARTTIRILMASI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İhsan ULUER .....  
Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 08/08/2023

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. İhsan ULUER (OTÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. M. Tahir GÜNEŞER (KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK (KBÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Şerafettin EREL (AYBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Cihat ŞEKER (KBÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Yunus Emre KARASU

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **THZ FOTOİLETKEN ANTENLERİN YÖNLÜLÜĞÜNÜN ARTTIRILMASI**

**Yunus Emre KARASU**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. İhsan ULUER**

**Ağustos 2023, 119 sayfa**

Bu çalışmada Terahertz (THz) fotoiletken anten (FİA) çıkış gücünü ve yönlülüğünü etkileyen anten geometrisi, alt katman malzemesi ve yüzey kalınlığı gibi parametrelerin etkisi incelendi. Elektrot malzemesi olarak geleneksel FİA’da kullanılan altın malzemesine ilave olarak kalay ve platin kullanıldı. Kalay ve platin elementleri elektrot malzemesi olarak kullanıldığında altından daha yüksek yönlülüğe ulaşıldığı gösterildi. Platin elementi elektrot olarak kullanıldığında en yüksek yönlülüğe ulaşıldığı gösterildi. Papyon, dipol, vivaldi ve log spiral FİA’lar geleneksel şekliyle Computer Simulation Technology (CST) Microwave (MW) Studio programında tasarlanıp analizleri yapıldı. Bu antenlerin yeni tasarımları ve analizleri yapıldı. FİA elektrotları arası boşluk bölgesine nanopartikül (NP) gömülmesinin yüzeye eklenmesinden daha verimli sonuç verdiği gösterildi. FİA elektrotları arası boşluk bölgesine çeşitli geometrik şekillerdeki altın NP’ler gömüldüğünde THz FİA’ların ışıma yönlülüğünün etkilediğini gösterildi. 0.1 ila 2 THz frekans aralığında papyon, dipol ve vivaldi anten olmak üzere üç farklı FİA hem geleneksel bir şekilde

hem de elektrotlar arası anten boşluk bölgesine silindir, üçgen, kare ve altıgen geometrik şeklindeki altın NP'ler eklenerek yeni FİA tasarımı yapıp simüle edildi. Analiz sonucunda papyon FİA'ya kare şeklindeki NP eklenince anten yönlülüğü 4.71 dBi'den 4.92 dBi'ye çıkmıştır. Dipol FİA'ya üçgen şeklindeki NP eklenince anten yönlülüğü 4.33 dBi'den 4.45 dBi'ye çıkmıştır. Vivaldi FİA'ya kare şeklindeki NP eklenince anten yönlülüğü 7.18 dBi'den 7.52 dBi'ye çıkmıştır. Geleneksel FİA'ların yönlülüğü yeni tasarımlar yapılarak arttırıldı. FİA'nın boşluk bölgesine gömülen NP'nin geometrik şeklinin FİA çeşidine göre farklı etkiler oluşturduğu gösterildi.

**Anahtar Sözcükler :** Terahertz, Fotoiletken Antenler, Nanopartiküller.

**Bilim Kodu** : 90533

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

# **INCREASING THE DIRECTIVITY OF THZ PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS**

**Yunus Emre KARASU**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Electrical and Electronic**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. İhsan ULUER**

**August 2023, 119 pages**

In this study, the effect of parameters such as antenna geometry, substrate material and surface thickness affecting the THz photoconductive antenna (PCA) output power and directivity were investigated. In addition to the gold material used in the conventional PCA, tin and platinum were used as the electrode material. When tin and platinum are used as electrode materials, it has been shown that higher directivity is achieved than gold. It has been shown that the highest directivity is achieved when the platinum element is used as the electrode. Bowtie, dipole, vivaldi and log spiral PCAs were designed and analyzed in the conventional CST Microwave Studio program. New designs and analyzes of these antennas were made. It has been shown that nanoparticle embedding in the gap region between the PCA electrodes is more efficient than adding it to the surface. It was demonstrated how THz PCAs affect the radiating directivity when gold nanoparticles of various geometric shapes are embedded in the gap region between the PCA electrodes. Three different PCAs, bowtie, dipole and vivaldi antenna

in the frequency range of 0.1 to 2 THz, were designed and simulated both in a conventional way and by adding cylindrical, triangular, square, and hexagonal geometric gold nanoparticles to the antenna gap region. As a result of the analysis, the antenna directivity increased from 4.71 dBi to 4.92 dBi when a square nanoparticle was added to the bowtie PCA. When a triangular nanoparticle was added to the dipole PCA, the antenna directivity increased from 4.33 dBi to 4.45 dBi. When a square nanoparticle was added to the Vivaldi PCA, the antenna directivity increased from 7.18 dBi to 7.52 dBi. The versatility of traditional PCAs has been increased by making new designs. It has been shown that the geometric shape of the nanoparticle embedded in the cavity region of the PCA creates different effects according to the PCA type.

**Key Words** : Terahertz, Photoconductive Antennas, Nanoparticles.

**Science Code** : 90533



## TEŞEKKÜR

Terahertz konusunda çalıőmam için beni ynlemdiren, her alanda ilgisini ve yardımını esirgemeyen, doktora tez çalıőmam sürecinde engin bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren sayın hocam Prof. Dr. İhsan ULUER'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Doktora çalıőmama katkı sağlayan değerli tez izleme komitesi yeleri Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK ve Doç. Dr. Muhammet Tahir GÜNEŞER hocalarıma teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerinden dolayı kıymetli ve fedakr eőime tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1. TEZİN AMACI .....	1
1.2. THZ FREKANS SPEKTRUMU .....	1
1.3. THZ RADYASYON KAYNAKLARINDAKİ ZORLUKLAR .....	2
1.4. THZ KAYNAKLARI .....	3
1.4.1. Elektronik Kaynaklar.....	3
1.4.2. Optik Kaynaklar .....	4
1.4.3. Optoelektronik Kaynaklar .....	4
1.5. THZ DALGALARININ UYGULAMALARI.....	6
1.5.1. Biyomedikal Uygulamalar.....	6
1.5.2. İlaç Uygulamaları .....	7
1.5.3. Güvenlik Uygulamaları .....	7
1.5.4. Polimer Endüstrisi Uygulamaları .....	7
1.5.5. İletişim Uygulamaları .....	8
1.6. YAYICI OLARAK THZ FİA'NIN ÇALIŞMA PRENSİBİ .....	8
BÖLÜM 2 .....	11
THZ FOTOİLETKEN ANTENLER .....	11

	<u>Sayfa</u>
2.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	11
2.2. FİA’NIN ANA BİLEŞENLERİ .....	14
2.2.1. Fotoiletken Yarı İletken Alt Katman .....	14
2.2.1.1. Düşük Sıcaklıkta Büyütülen Galyum Arsenit (LT-GaAs).....	16
2.2.2. Anten Geometrisi.....	19
2.2.3. Lazer Kaynağı.....	20
2.3. THZ FİA EŞDEĞER DEVRESİ.....	21
2.4. THZ FİA’DAN YAYILAN GÜCÜ ETKİLEYEN FAKTÖRLER .....	28
2.4.1. Ön Gerilim.....	29
2.4.2. Anten Direnci .....	30
2.4.3. Giriş Optik Gücü .....	31
2.4.4. Anten Boşluk Uzunluğu .....	32
2.4.5. Optik Emilim .....	33
2.5. THZ ANTENLERİNİN RF/MW ANTENLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI	
.....	35
2.5.1. İmalat ve Ölçüm .....	35
2.5.2. Besleme, Uyarma Kaynağı ve Ön gerilim.....	36
2.5.3. Elektrot Malzemesi.....	36
2.5.4. Alt Katman Malzemesi.....	37
2.5.5. Akım Türü .....	40
 BÖLÜM 3 .....	 42
ALT KATMANIN THZ FOTOİLETKEN ANTEN PERFORMANSINA ETKİSİ. 42	
3.1. FOTOİLETKEN MALZEMELER .....	42
3.2. ALT KATMANIN THZ ANTENLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN	
İNCELENMESİ .....	44
3.3. YÜZEY MALZEMESİNİN ETKİSİ .....	47
 BÖLÜM 4 .....	 51
ELEKTROT YAPISININ THZ FOTOİLETKEN ANTEN PERFORMANSINA	
ETKİSİ.....	51
4.1. CST KULLANARAK ELEKTROT YAPISI ÇALIŞMASI.....	51

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.1.1. CST Hakkında .....	51
4.2. Anten Yapısının Simülasyonları .....	52
4.2.1. Papyon FİA'da Elektrot Malzemesinin Yönlülüğe Etkisi.....	53
4.2.2. Dipol FİA'da Elektrot Malzemesinin Yönlülüğe Etkisi.....	57
4.2.3. Vivaldi FİA'da Elektrot Malzemesinin Yönlülüğe Etkisi.....	60
4.3. PLAZMONİK META MALZEME KULLANIMI.....	66
BÖLÜM 5 .....	70
ÖNERİLEN FOTOİLETKEN ANTEN.....	70
5.1. ÇEŞİTLİ FOTOİLETKEN ANTENLERİN TASARIMI .....	71
5.1.1. Dipol FİA Tasarımları .....	71
5.1.2. Vivaldi FİA Tasarımları .....	74
5.1.3. Log Spiral FİA Tasarımı.....	77
5.1.4. Papyon FİA Tasarımları .....	78
5.1.5. Çeşitli Papyon FİA Tasarımları .....	82
5.2. FARKLI GEOMETRİK ŞEKİLLERDEKİ NANOPARTİKÜLLERİN FİA'YA GÖMÜLMESİNİN ETKİSİ .....	84
5.2.1. Papyon FİA'ya NP Eklenmesi.....	84
5.2.2. Dipol FİA'ya NP Eklenmesi.....	88
5.2.3. Vivaldi FİA'ya NP Eklenmesi.....	92
BÖLÜM 6 .....	98
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	98
KAYNAKLAR .....	101
ÖZGEÇMİŞ .....	119

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Elektromanyetik frekans spektrumu. ....	1
Şekil 1.2. Yayıcı olarak optoelektronik sistemin temel şematik diyagramı.....	5
Şekil 1.3. FİA'dan THz üretiminin gösterimi.....	8
Şekil 1.4. Lazer darbesinin ve akım darbesinin geçici davranışı. ....	9
Şekil 1.5. Akım darbesinin ve yayılan THz elektrik alanının geçici davranışı.....	9
Şekil 2.1. FİA'nın temel yapısı.....	14
Şekil 2.2. Tavlanmamış LT-GaAs'de durum yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak nokta kusur enerji dağılımı [88]. ....	17
Şekil 2.3. Tavlanmış LT-GaAs'deki durum yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak nokta kusurlu enerji dağılımı [88]. ....	18
Şekil 2.4. Farklı FİA Yapıları a) Eş düzlemlı şerit hattı b) Hertzian Dipol c) Papyon Anten d) Plazmonik fotoiletken ızgara e) Tarak yapısı hertzian dipol f) Interdigitated FİA. ....	20
Şekil 2.5. THz FİA'nın emitör olarak eşdeğer devresi [125].....	22
Şekil 2.6. Farklı ortalama optik güç için a) $G_s(t)$ ve b) $C(t)$ 'nin zamansal davranışı [125].....	27
Şekil 2.7. Anten boşluğu boyunca voltajın zamansal davranışı [125]. ....	28
Şekil 2.8. Farklı öngerilim voltajları için ortalama giriş optik gücüne karşı ortalama yayılan THz gücü. Ölçüm sonuçları, Vön gerilim=30 V [113].....	30
Şekil 2.9. a) Ortalama yayılan THz gücü ve b) öngerilim voltajı 30 V olduğunda farklı anten dirençleri için ortalama optik güçlere karşı optik-THz tepe güç dönüştürme verimliliği [125].....	31
Şekil 2.10. 30 V ve $Z_a=65 \Omega$ öngerilim gerilimi için optik-THz güç dönüştürme verimliliği ve elektrik-THz dönüştürme verimliliği karşılaştırması [125].32	
Şekil 2.11. Farklı aralık uzunluklarına sahip antenler için a) tepe optik-THz güç dönüştürme veriminin b) ortalama optik güçler üzerindeki ortalama yayılan THz gücünün bağımlılığı [125]. ....	33
Şekil 2.12. Farklı optik absorpsiyon için ortalama optik güce tepe optik-THz güç dönüştürme verimliliğinin bağımlılığı [125]. ....	34
Şekil 2.13. Hava-alt katman arayüzünden farklı yansıma katsayıları için optik güçlere karşı tepe optik-THz dönüşüm verimliliğinin değişimi [125]. ....	34

Şekil 3.1. Grafen 2D gösterimi [2].....	43
Şekil 3.2. Işıma yapan THz antenin şematik diyagramı [135].....	44
Şekil 3.3. Hava ile çevrili dipol anten ve radyasyon modeli [177].....	45
Şekil 3.4. GaAs alt katmanı üzerindeki dipol anten ve radyasyon modeli [177].....	46
Şekil 3.5. Çeşitli fotoiletken malzemeler için toplam yayılan güç [183].....	48
Şekil 3.6. Alt katman olarak GaAs ile [173]'teki bir dipol antenin ışımaya modeli.....	48
Şekil 3.7. Alt katman olarak Grafen ile [173]'teki bir dipol antenin ışımaya modeli...	49
Şekil 3.8. Çeşitli fotoiletken malzemeler için toplam verim [183].....	49
Şekil 4.1. CST'nin kullanıcı arayüzü. ....	52
Şekil 4.2. Papyon FİA'nın şekli ve parametreleri.....	53
Şekil 4.3. Altın elektrotlu papyon FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.....	54
Şekil 4.4. Kalay elektrotlu papyon FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	55
Şekil 4.5. Platin elektrotlu papyon FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.....	55
Şekil 4.6. Farklı elektrot malzemelerine sahip papyon FİA'nın S11 değerleri.....	56
Şekil 4.7. Dipol FİA'nın şekli ve parametreleri. ....	57
Şekil 4.8. Altın elektrotlu dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	58
Şekil 4.9. Kalay elektrotlu dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.....	59
Şekil 4.10. Platin elektrotlu dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	59
Şekil 4.11. Farklı elektrot malzemelerine sahip dipol FİA'nın S11 değerleri. ....	60
Şekil 4.12. Vivaldi FİA'nın şekli ve parametreleri.....	61
Şekil 4.13. Altın elektrotlu vivaldi FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	62
Şekil 4.14. Kalay elektrotlu vivaldi FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	62
Şekil 4.15. Platin elektrotlu vivaldi FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	63
Şekil 4.16. Farklı elektrot malzemelerine sahip vivaldi FİA'nın S11 değerleri. ....	63
Şekil 4.17. Plazmonik metamalzeme TiN'nin geleneksel metallerle dielektrik işlevi üzerinde yapılan karşılaştırma [191,192]. ....	69
Şekil 5.1. a) GaAs alt katmanlı dipol FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	71
Şekil 5.2. GaAs alt katmanlı dipol FİA'nın S11 parametreleri.....	72
Şekil 5.3. a) LT-GaAs alt katmanlı dipol FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	72
Şekil 5.4. LT-GaAs alt katmanlı dipol FİA'nın S11 parametreleri.....	73
Şekil 5.5. a) LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	74
Şekil 5.6. LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA'nın S11 parametreleri. ....	74

Şekil 5.7. GaAs alt katmanlı vivaldi FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	75
Şekil 5.8. GaAs alt katmanlı vivaldi FİA'nın S11 parametreleri. ....	75
Şekil 5.9. Quartz alt katmanlı vivaldi FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	76
Şekil 5.10. Quartz alt katmanlı vivaldi FİA'nın S11 parametreleri. ....	76
Şekil 5.11. GaAs alt katmanlı log spiral FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	77
Şekil 5.12. GaAs alt katmanlı log spiral FİA'nın S11 parametreleri. ....	78
Şekil 5.13. GaAs alt katmanlı papyon FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	78
Şekil 5.14. GaAs alt katmanlı papyon FİA'nın S11 parametreleri. ....	79
Şekil 5.15. LT-GaAs alt katmanlı papyon FİA yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	79
Şekil 5.16. LT-GaAs alt katmanlı papyon FİA'nın S11 parametreleri. ....	80
Şekil 5.17. a) LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	81
Şekil 5.18. LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA'nın S11 parametreleri. ....	81
Şekil 5.19. a) 4 Taraklı FİA b) 6 taraklı FİA c) Silindir slotlu FİA d) Elektrotu slotlu FİA. ....	82
Şekil 5.20. a) Boşluk yüzeyine naopartikül ekli FİA b) Alt katmana NP gömülü FİA c) Antenlerin S11 parametreleri. ....	83
Şekil 5.21. Sade Papyon FİA'nın şekli ve parametreleri. ....	85
Şekil 5.22. NP gömülmüş papyon FİA'lar a) Silindir NP gömülmüş papyon FİA b) Üçgen NP gömülmüş papyon FİA c) Kare NP gömülmüş papyon FİA d) Altıgen NP gömülmüş papyon FİA. ....	86
Şekil 5.23. Sade Papyon FİA ve Kare NP'lerin eklendiği FİA'ların geri dönüş kayıp bilgisi (S11). ....	87
Şekil 5.24. Sade Papyon FİA'nın yönlülüğünü 3D gösterimi. ....	87
Şekil 5.25. Altın kare NP'lerin eklendiği Papyon FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi. ....	88
Şekil 5.26. Sade Dipol FİA'nın şekli ve parametreleri. ....	88
Şekil 5.27. NP gömülmüş dipol FİA'lar a) Silindir NP gömülmüş dipol FİA b) Üçgen NP gömülmüş dipol FİA c) Kare NP gömülmüş dipol FİA d) Altıgen NP gömülmüş dipol FİA. ....	90
Şekil 5.28. Sade Dipol FİA ve Üçgen NP'lerin eklendiği FİA'ların geri dönüş kayıp bilgisi (S11). ....	91
Şekil 5.29. Sade Dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D olarak gösterimi. ....	91

## Sayfa

Şekil 5.30. Üçgen şeklindeki altın NP'lerin eklendiği dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D olarak gösterimi .....	92
Şekil 5.31. Sade Vivaldi FİA'nın şekli ve parametreleri.....	92
Şekil 5.32. NP gömülmüş vivaldi FİA'lar a) Silindir NP gömülmüş vivaldi FİA b) Üçgen NP gömülmüş vivaldi FİA c) Kare NP gömülmüş vivaldi FİA d) Altıgen NP gömülmüş vivaldi FİA.....	93
Şekil 5.33. Sade Vivaldi FİA ve Kare altın NP'lerin eklendiği FİA'ların geri dönüş kayıp bilgisi (S11). .....	94
Şekil 5.34. Sade Vivaldi FİA'nın yönlülüğünün 3D olarak gösterimi. ....	94
Şekil 5.35. Kare şeklindeki altın NP'lerin eklendiği Vivaldi FİA'nın yönlülüğünün 3D olarak gösterimi. ....	95



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 1.1. THz kaynaklarının listesi. ....	6
Çizelge 2.1. Simülasyon çalışmalarının özeti .....	13
Çizelge 2.2. Lazer, Fotoiletken Malzeme ve Anten Parametreleri .....	26
Çizelge 2.3. THz ve RF/MW antenlerin karşılaştırılması [135,172]. ....	41
Çizelge 3.1. Çeşitli fotoiletken malzemelerin özellikleri [149,174,176]. ....	43
Çizelge 4.1. Sade Papyon FİA'nın parametre değerleri .....	54
Çizelge 4.2. Elektrot malzemeleri farklı papyon FİA'ların simülasyon analiz sonuçları.....	56
Çizelge 4.3. Dipol FİA'nın parametre değerleri .....	58
Çizelge 4.4. Elektrot malzemeleri farklı dipol FİA'ların simülasyon analiz sonuçları. ....	60
Çizelge 4.5. Vivaldi FİA'nın parametre değerleri .....	61
Çizelge 4.6. Elektrot malzemeleri farklı vivaldi FİA'ların simülasyon analiz sonuçları.....	64
Çizelge 4.7. FİA'da kullanılan malzemelerin karakteristik değerleri. ....	68
Çizelge 5.1. Sade Papyon FİA'nın parametre değerleri .....	85
Çizelge 5.2. Sade Dipol FİA'nın parametre değerleri .....	89
Çizelge 5.3. Sade Vivaldi FİA'nın parametre değerleri. ....	93
Çizelge 5.4. Tasarımı yapılan tüm antenlerin bilgileri ve analiz sonuçları.....	96
Çizelge 5.5. Önerilen FİA'yla literatürde yapılan çalışmaların karşılaştırılması.....	97

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

TiN	: titanyum nitrür
fs	: femtosaniye
$\mu\text{m}$	: mikrometre
$\Omega$	: ohm
ps	: pikosaniye
As	: arsenik
As <sub>Ga</sub>	: arsenik antisitleri
As <sub>i</sub>	: arsenik interstisyel
V <sub>Ga</sub>	: galyum boşluğu
T <sub>g</sub>	: büyüme sıcaklığı
As <sub>Ga</sub> <sup>0</sup>	: nötr yük durumundaki arsenik
As <sub>Ga</sub> <sup>+</sup>	: pozitif yük durumundaki arsenik
eV	: elektronvolt
meV	: mili elektronvolt
$\rho$	: öz direnç
$G_s(t)$	: zamanla değişen iletkenlik
$\tau_c$	: taşıyıcı ömrü
$h$	: Planck sabiti
$\nu_{\text{opt}}$	: lazer frekansı
$\alpha$	: optik absorpsiyon katsayısı
$I_l(r, t)$	: optik darbe yoğunluğu
$I_l$	: lazer tepe yoğunluğu
R	: güç yansımaya katsayısı
$\tau_l$	: lazer darbe süresi
$\mu_e$	: elektron hareketliliği
$e$	: elektron yükü
W	: anten aralığı genişliği

- $L$  : anten aralığı uzunluğu  
 $C(t)$  : zamanla değişen bir kapasitans  
 $R_1$  : kayıp direnci  
 $Z_a$  : anten empedansı  
 $J(t)$  : akım yoğunluğu  
 $v(t)$  : ortalama taşıyıcı hızı  
 $E_c(t)$  : anten boşluğundaki taşıyıcıların konumundaki elektrik alan  
 $V_{rad}(t)$ : yayılan eleman üzerindeki voltaj  
 $S$  : anten aktif alanı  
 $\tau_r$  : rekombinasyon ömrü  
 $\beta(t)$  : zamana bağlı voltaj kontrollü kaynağın katsayısı  
 $V_c$  : perdelemekten sorumlu ters voltaj kaynağı  
 $V_{rad}$  : ışınım elemanı (anten) boyunca voltajı  
 $P_{av}$  : ortalama optik güç  
 $\zeta$  : perdeleme faktörü  
 $V_{öngerilim}$ : ön gerilim  
 $f_{rep}$  : lazer tekrarlama oranı  
 $Au$  : altın  
 $Ag$  : gümüş  
 $\sigma$  : elektriksel iletkenlik  
 $\delta$  : karakteristik penetrasyon derinliği  
 $Si$  : silikon  
 $InP$  : indiyum fosfat  
 $GaAs$  : galyum arsenit  
 $ErAs$  : erbiyum arsenit  
 $\epsilon_r$  : alt katman dielektrik sabiti  
 $D_p$  : delikler için taşıyıcı difüzyon katsayıları  
 $D_n$  : elektronlar için taşıyıcı difüzyon katsayılarıdır  
 $\delta_{SPP}$  : yüzey plazmonu  
 $k_{SPP}$  : yüzey plazmon dalga vektörü  
 $\omega$  : açısal frekans  
 $c$  : ışık hızı

$\epsilon_m$  : metal bağıl geçirgenlik  
 $\epsilon_d$  : dielektriklerin bağıl geçirgenliği  
 $k'_{SPP}$  : yüzey plazmon dalga vektörünün gerçek kısmı  
 $k''_{SPP}$  : yüzey plazmon dalga vektörünün sanal kısmı  
 $\lambda_{SPP}$  : yüzey plazmonunun dalga boyu  
 $\lambda_o$  : boş uzayın dalga boyu  
S11 : antendeki dönüş kaybı  
nm : nanometre  
mm : milimetre  
cm : santimetre  
mW : mili watt  
°C : santigrat derece  
s : saniye  
V : volt

## **KISALTMALAR**

THZ : Terahertz

FİA : Fotoiletken Anten

NP : Nanopartikül

CST : Computer Simulation Technology (Bilgisayar Benzetim Teknolojisi)

MW : Microwave (Mikrodalga)

FDTD : Finite Difference Time Domain (Zamanda Sonlu Farklar)

RF : Radio Frequency (Radyo Frekansı)

GDO : Geri Dalga Osilatörü

KKL : Kuantum Kademeli Lazer

HDT : Hareketli Dalga Tüpleri

LT : Low Temperature (Düşük Sıcaklık)

GHZ : Gigahertz

SRH : Shockley Read Hall

MBE : Molecular Beam Epitaxy (Moleküler Demet Epitaksi)

FWHM: Full Width at Half Maximum (Yarı Maksimumda Tam Genişlik)

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio (Duran Dalga Voltaj Oranı)

SI : Semi Insulated (Yarı Yalıtkan)

3D : Three Dimensional (Üç boyutlu)

UV : Ultraviyole

## BÖLÜM 1

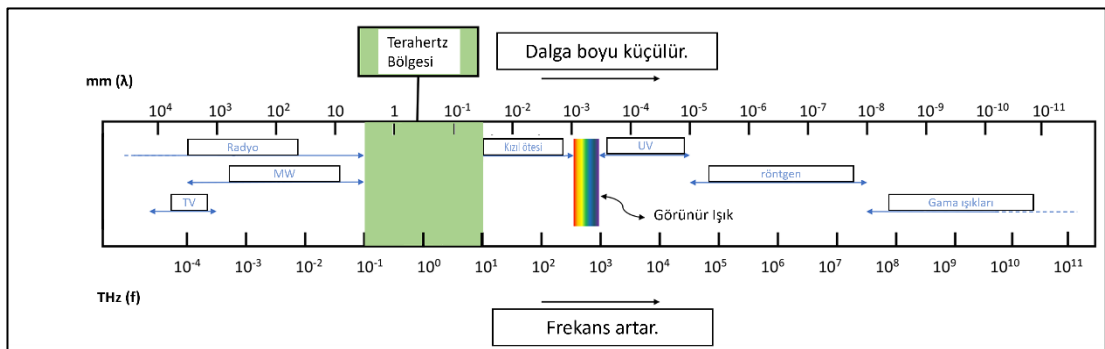
### GİRİŞ

#### 1.1. TEZİN AMACI

THz frekansında yapılan ışımalar atmosferdeki su molekülleri tarafından çok fazla emilmektedir [1]. Işıma emilimini daha aza indirip THz uygulamalarının kullanışlı hale gelmesi için THz ışıması yapan FİA'ların yönlülüğünün artırılması gerekmektedir. FİA'yı oluşturan elektrot, alt katman ve optik besleme gibi parametreler farklı ve özgün tasarımlarla tekrar tasarlanıp FİA'dan yayılan THz frekansındaki ışımının yönlülüğünün artırılması bu çalışmada amaçlanmıştır.

#### 1.2. THZ FREKANS SPEKTRUMU

THz frekans bandı, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, üst mikrodalga ve alt kızılötesi frekans bantları arasında yer alır. 100 GHz ila 10 THz aralığındadır. 3 mm-30  $\mu$ m dalga boylarına sahiptir [2,3].



Şekil 1.1. Elektromanyetik frekans spektrumu.

THz spektrumu ayrıca milimetre altı, uzak kızılötesi ve milimetreye yakın dalgalar olarak da bilinir. İki gelişmiş frekans bölgesi arasında yer almasına rağmen, THz frekans bandı yaklaşık otuz yıl öncesinde en az kullanılan ve az gelişmiş frekans

bölgelerinden biriydi. Bunun nedeni, pratik, verimli ve oda sıcaklığında çalışan THz radyasyon kaynaklarının bulunmamasına bağlanabilir. Yakın zamana kadar THz dalgaları sadece yüksek çözünürlüklü spektroskopi ve uzaktan algılama uygulamalarında kullanılmaktaydı [4]. Son yıllarda, THz frekans bandı, farklı uygulamalara uygun benzersiz özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. THz radyasyonunun en önemli özelliklerinden ve ilgili uygulamalarından bazıları şu şekilde verilmiştir:

- THz radyasyonun dalga boyu, görünür ve kızılötesi radyasyonunkinden daha uzundur. Bu nedenle, bunlar görüntüleme ve algılama uygulamaları için uygundur[5].
- Ayrıca giysi, kâğıt, tahta ve plastik gibi dielektrik malzemelerin çoğu THz radyasyonuna karşı şeffaftır [6].
- THz frekanslarının düşük foton enerjileri, THz dalgalarının iyonlaştırıcı olmayan bir yapıya sahip olmasına neden olur, örneğin 1 THz'de yayılan sinyalin foton enerjisi 4,14 meV'dir. Bu özellik, biyolojik dokuların X-ışını radyasyonunun aksine THz radyasyonu ile görüntülenmesinde faydalıdır [7].
- Birçok molekülün THz frekanslarında spektral absorpsiyon imzaları vardır. Malzemelerin bu özelliği, THz radyasyonu kullanan malzeme spektroskopisinde avantajlıdır [8].
- THz radyasyonu su molekülleri tarafından güçlü bir şekilde emilir, bu da değişen su içeriğine sahip malzemeleri ayırt etmede faydalıdır [1].

### **1.3. THZ RADYASYON KAYNAKLARINDAKİ ZORLUKLAR**

THz frekans spektrumu birçok faydaya sebep olmasına rağmen, verimli ve kompakt bir THz kaynağı geliştirmede zorluklar devam etmektedir. Mikrodalga ve kızılötesi frekans bantlarındaki teknolojiler iyi gelişmiştir ve yüksek verimlilikle çalışmaktadır, ancak bu tekniklerin THz radyasyonu için kullanılması, cihazların gücünde ve verimliliğinde önemli bir azalma olmadan mümkün değildir. Katı hal elektronığı tabanlı mikrodalga frekans kaynaklarının maksimum çalışma frekansı, taşıyıcıların geçiş süresi etkisine, kanal uzunluğuna ve aktif bölge boyutuna bağlıdır. Bu cihazları THz üretimi için ölçeklendirmek, malzemelerin elektriksel bozulmasının ötesinde

elektrik alanını artıran kanal uzunluğu azaldıkça cihazların bozulmasına yol açacaktır. Benzer şekilde, kızılötesi frekans oluşturma teknikleri, yarı iletken bant aralığı enerjisine dayanır. Bu tekniklerin ölçeğini küçültürken THz radyasyonunun üretilmesi, oda sıcaklığında uygulanabilir olmayan küçük bir bant aralığı malzemesi gerektirir [9,10].

#### **1.4. THZ KAYNAKLARI**

THz alanındaki araştırmanın ilk aşamalarında, THz kaynaklarının üretiminin çok zor olduğu düşünülmüştü [4]. Nano mühendislik teknolojilerinin gelişmesiyle, farklı türde THz radyasyon kaynaklarının üretilmesi mümkün hale geldi. Bu kaynaklar ya birbirinden bağımsız mikrodalga ve optik frekans oluşturma tekniklerine dayalıdır ya da her iki tekniğin birleşimidir [11]. Bazı THz radyasyon kaynakları ticari olarak mevcuttur. Kaynaklar üç geniş kategoriye ayrılabilir: elektronik kaynaklar, optik kaynaklar ve optoelektronik kaynaklar. Elektronik kaynaklar tamamen mikrodalga tekniklerine dayalıyken, optik kaynaklar optik teknolojilere dayanmaktadır. Optoelektronik kaynaklar mikrodalga ve optik tekniğin her ikisinin de prensiplerini kullanır.

##### **1.4.1. Elektronik Kaynaklar**

THz radyasyonu için elektronik kaynaklar, vakum elektroniği ve katı hal elektronik kaynaklarını içerir [12]. Vakum elektronik kaynaklarının çalışma prensibi, elektron ışını ile elektromanyetik alanlar arasındaki etkileşime dayanmaktadır. Bu kaynaklar, genişletilmiş etkileşimli klistronları [13], senkrotronlar [14], geri dalga osilatörlerini (GDO'lar) [15], jirotronlar [16], ve hareketli dalga tüplerini (HDT'ler) [17] içerir. Bu kaynaklar yüksek güçlü THz dalgaları yayar ve yayılan frekans 1 THz'in oldukça altındadır [18]. Bu kaynaklar, diğer THz kaynaklarına kıyasla daha düşük THz frekanslarında yüksek güç üretebilseler de genellikle nispeten hantaldırlar ve çok yüksek giriş gücüne sahip güçlü bir manyetik alan gerektirirler.

Katı hal elektronik kaynakları, diyotları ve çarpanları içerir. Diyotlar, THz radyasyonunu üretmek için negatif diferansiyel direnç ilkesini kullanırken, frekans çarpanları, frekans THz aralığına çarpmak için bir diyot zinciri kullanır. Kaynaklar



arasında frekans çarpanları [19], Gunn diyotları [20], IMPATT diyotları [21], yüksek frekanslı transistör [22] ve rezonant tünelleme diyotları [23] bulunmaktadır. Ancak bu kaynakların çıkış gücü yüksek frekanslarda azalır.

#### **1.4.2. Optik Kaynaklar**

THz optik kaynakları, lazer tabanlı ve doğrusal olmayan kristal tabanlı THz kaynakları olarak ikiye ayrılır. THz lazerler, Germanyum ve Silikon gibi yarı iletken malzemeler kullanılarak yapılmıştır. Bu lazerler, kusurların optik olarak pompalanması koşulları altında popülasyonun tersine çevrilmesine dayanmaktadır. Bu tür lazerlerin ana avantajı, geniş dalga boyları aralığında ayarlanabilir olmasıdır. THz dalgaları, yayılan frekansın gazın spektral çizgisine bağlı olduğu gaz ortamı oluşturan gaz plazması [24,25] üzerine femtosaniye (fs) lazer ışınını odaklayarak da üretilebilir. Kuantum Kademeli Lazerlerinin (KKL) kullanımı, bant içi geçişleri kullanarak THz radyasyonu üretmenin başka bir yöntemidir [26]. Ayrıca, bu lazerler darbeleri ve sürekli dalga THz radyasyonunun üretilmesi için kullanılabilir. Bu lazerlerin çalışma frekansı, kuantum kuyusunun tasarımı değiştirilerek veya aynı malzemelerden farklı dalga boylarının üretilmesini kolaylaştıran malzemelerin bant aralığı değiştirilerek ayarlanabilir [27].

Doğrusal olmayan kristaller kullanılarak THz üretimi, lazerlerin optik gücünü aşağıya dönüştürmek için büyük bir ikinci dereceden duyarlılığa sahip kristallerin kullanıldığı genel yöntemlerden biridir. Tutarlı THz dalgaları, parametrik üretim ve fark frekans üretimi (DFG) [28] gibi THz parametrik süreçleri kullanılarak da üretilebilir. Faz eşleştirmeli bir THz parametrik işlemi, geniş çapta ayarlanabilir, tutarlı ve yüksek güçlü THz dalgaları üretebilir. Doğrusal olmayan kristallerden geniş bantlı bir THz radyasyonu üretmek için, optik düzeltme en yaygın kullanılan tekniklerden biridir [29]. Optik düzeltme yönteminde, spektral olarak geniş darbelerin tüm olası fark frekansları üretilir. Fs lazer kaynağı tarafından bir uyarım gerektirir ve çıkış gücü, malzemenin optik hasar eşliğine ve faz eşleşmesinin derecesine bağlıdır.

#### **1.4.3. Optoelektronik Kaynaklar**

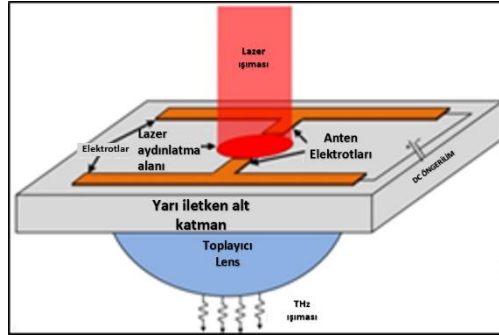
Optoelektronik kaynaklar, mikrodalga ve optik frekans üretim tekniklerinin birleştirilmesiyle yapılır. Bu kaynakların çalışma prensibi temel olarak yarı iletken

malzemelerdeki fotoiletkenlik ilkesine dayanmaktadır. Bir optoelektronik kaynak, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi fotoiletken yarı iletken malzeme üzerine basılmış anten yapısından oluşur. Fs lazerler, öngerilim voltajı yardımıyla çok hızlı değişen bir akım darbesi üreterek anten yapısı için bir uyarma kaynağı olarak kullanılır. Hızla değişen akım darbesi, anteni THz dalgalarını yayması için uyarır.

Lazer uyarımı temelinde, bu kaynaklar iki kategoriye ayrılabilir:

- Sürekli dalga (CW) THz kaynağı (dar bant): Foto karıştırıcı Anten (PMA)
- Darbeli THz kaynağı (geniş bant): FİA

Aynı sistem lazer uyarımının sayısı ve tipindeki farka rağmen PMA ve FİA için kullanılabilir. FİA sistemi, THz radyasyonu oluşturmak için tek bir fs darbeli lazer kaynağı gerektirirken, PMA sistemi, THz frekans aralığında bir farka sahip olan iki CW lazeri gerektirir.



Şekil 1.2. Yayıcı olarak optoelektronik sistemin temel şematik diyagramı.

Bazı THz kaynaklarının listesi, çıkış güçleri ve çalışma frekansları/bant genişlikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. THz kaynaklarının listesi.

THz Kaynağı	Güç	Frekans Aralığı	Referans
FİA	300 $\mu$ W	0.1-5 THz	[30]
KKL	100 mW	1-5 THz	[31]
PMA	28-3.5 $\mu$ W	0.351-6 THz	[32]
InP Gunn Diyot	45-40 $\mu$ W	400-425 GHz	[33]
GaAs Planar Schottky Diyot	40 $\mu$ W	1.5 THz	[34]
InP IMPATT Diyot	27 $\mu$ W	500 GHz	[35]
Schottky Diyot	-	2.5 THz	[36]
GaAs Diyot Karıştırıcı	-	2.5 THz	[37]
Rezonans Tünel Diyot	<0.5 $\mu$ W	1.92 THz	[38]
GaAs Schottky Diyot	<10 $\mu$ W	2.7 THz	[39]
GaN IMPATT	200 $\mu$ W	1 THz	[40]
InP HEMT	-	1 THz	[41]
Grafen bazlı FET	-	648 GHz	[42]
Klistron	60 W	342 GHz	[43]
Optik Rektifikasyon	0.37 mW	10 THz	[44]
GDO	625 mW	617-990 GHz	[45]
Grotron	19.2 kW	0.42 THz	[46]
DFG	1.66 $\mu$ W	0.21-3 THz	[47]
HDT	20 W	400 GHz	[48]

## 1.5. THZ DALGALARININ UYGULAMALARI

Pratik THz kaynaklarının geliştirilmesi, bu alanlar için yararlı olan benzersiz özelliklerinden dolayı uygulamaların farklı alanlarında ilgi çekmiştir. THz dalgalarının alana özgü uygulamalarından bazıları bu bölümde ele alınmıştır.

### 1.5.1. Biyomedikal Uygulamalar

THz dalgaları, düşük foton enerjileri nedeniyle doğada iyonlaştırıcı değildir. Bu özellik, biyolojik dokuların analizinde avantajlıdır. Ayrıca, THz dalgası, dokuların görüntülenmesinde ve spektroskopisinde kullanılabilen biyolojik dokuların içine

birkaç yüz mikrometreye kadar nüfuz edebilir [7]. Titreşimler ve dönmeler gibi düşük frekanslı biyomoleküler hareketlerin çoğu THz frekans aralığında yer aldığından, bu nedenle çeşitli moleküller, THz frekanslarındaki benzersiz spektral tepkileri kullanılarak tanınabilir ve karakterize edilebilir [49]. Sağlıklı ve kanser hücreler farklı oranlarda su içeriğine sahiptirler. Kanser hücreleri THz radyasyonunu güçlü bir şekilde emdiği için bu hücreler THz teknolojisiyle saptanabilmektedir [7]. THz görüntüleme ayrıca diş [7], sindirim sistemi [50], hastalık veya tümörü tanıma [51], kan hücreleri analizi [52] ve kemik analizinde [53] kullanılmaktadır.

### **1.5.2. İlaç Uygulamaları**

THz görüntüleme ve spektroskopi ilaç endüstrileri için kullanılmaktadır. Bazı ilaçlar, ilaçların saptanmasında ve karakterizasyonunda kullanılabilen THz frekanslarında benzersiz bir yanıt veya spektral imzaya sahiptir [54]. THz görüntüleme ve spektroskopi ayrıca ilaçların kaplama kalınlığının ölçülmesinde, kaplama sürecinin izlenmesinde [55,56], tablet yoğunluğunun ve sertliğinin ölçülmesinde [57], çözünme profilinin [58] ve ilaçların kimyasal haritalanmasında [59] kullanılmaktadır.

### **1.5.3. Güvenlik Uygulamaları**

THz radyasyonunun dalga boyları, görünür ve kızılötesi radyasyondan daha büyüktür, bu da onu güvenlik uygulamaları için kullanışlı kılar. THz dalgaları, kumaşlar ve plastikler gibi malzemelerin içinden geçebilir, bu özelliği onu tarama, gözetleme ve gizli nesnelere için güvenlik taraması gibi güvenlik uygulamaları için kullanışlı hale getirir. Ayrıca gizli nesnelerin şekil, boyut ve kullanılan malzeme gibi ayrıntılarını da sağlamaktadır [60].

### **1.5.4. Polimer Endüstrisi Uygulamaları**

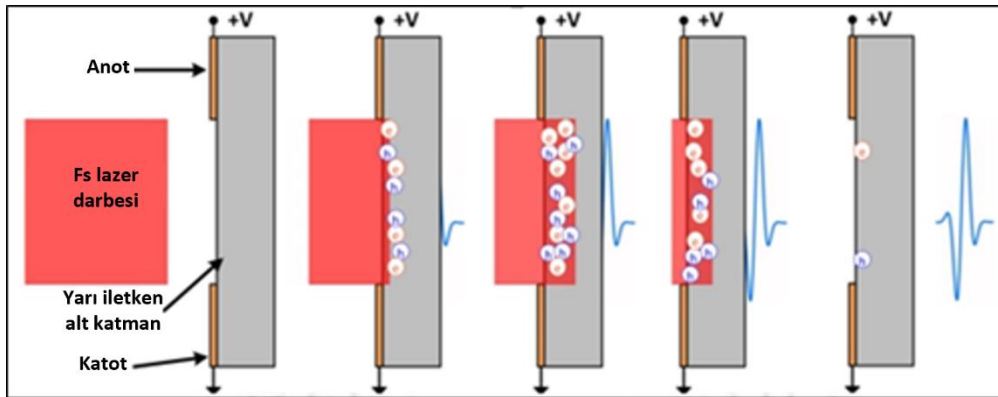
THz radyasyonu plastik malzemedeki geçebildiği için, polimerlerin ölçümü ve karakterizasyonu için kullanılmaktadır. THz spektroskopisi, polimerlerin üretimi sırasında birleştirme işlemi hakkında bilgi sağlar [61]. THz sistemleri ayrıca polimerlerin kalite kontrolünü sağlar [62]. Polimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, THz spektroskopisi kullanılarak izlenen su konsantrasyonuna büyük ölçüde bağlıdır.

### 1.5.5. İletişim Uygulamaları

Gelişen uygulamaların ihtiyaçları doğrultusunda artan kapasite ve hız talepleri günümüz iletişim sistemlerinde her geçen gün büyük bir sorun haline gelmektedir. THz iletişimi, yüksek bant genişliğini yüksek hızlı iletişim bandıyla sunarak bu zorluklara çözüm sağlayabilir. THz dalgalarının atmosferik zayıflaması, su buharlarının varlığından dolayı çok yüksektir, bu nedenle THz dalgalarını kullanarak uzun mesafeli bir iletişim zordur. Bağlantı özelliklerine bağlı olarak femtocell iletişimde, akıllı ofislerde kablosuz yerel alan ağlarında, akıllı ev sistemlerinde kablosuz kişisel alan ağlarında, kiosk indirme gibi yakın alan iletişimlerinde THz iletişim kullanılmaktadır [63,64].

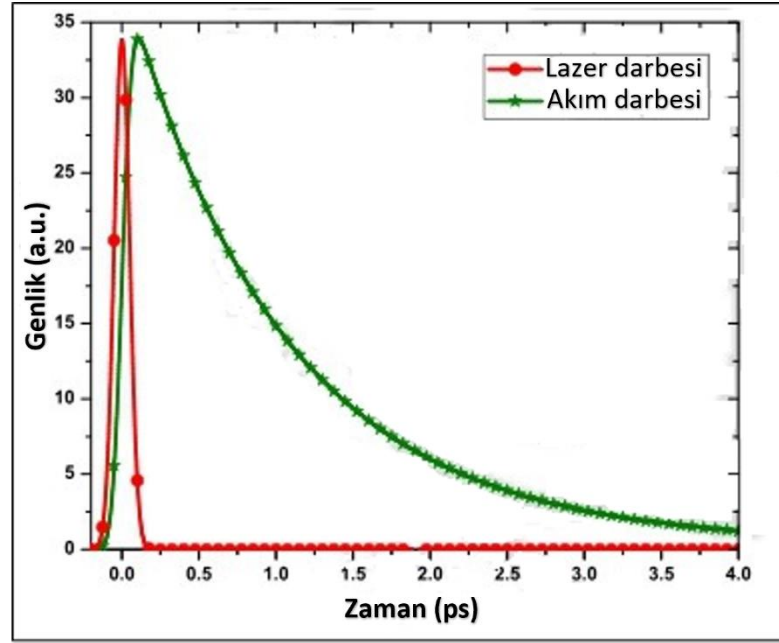
### 1.6. YAYICI OLARAK THz FİA'NIN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Bazen Auston anahtarı olarak da anılan THz FİA, 1980'lerin sonunda David Auston [65,66] ve Daniel Grischkowsky'nin [67,68] ekipleriyle birlikte düzlemsel şerit hatlardan üretilen THz dalgalarını gösterdiklerinde ortaya çıktı. Lazer ışınlarını kullanarak THz dalga üretimi uygulaması, Şekil 1.3'te gösterilmektedir. FİA, fotoiletkenlik ilkesine dayalı bir THz radyasyonu üretme ve algılama cihazıdır. FİA, fotoiletken olan yarı iletken alt katman üzerinde basılı anten yapısından oluşur.

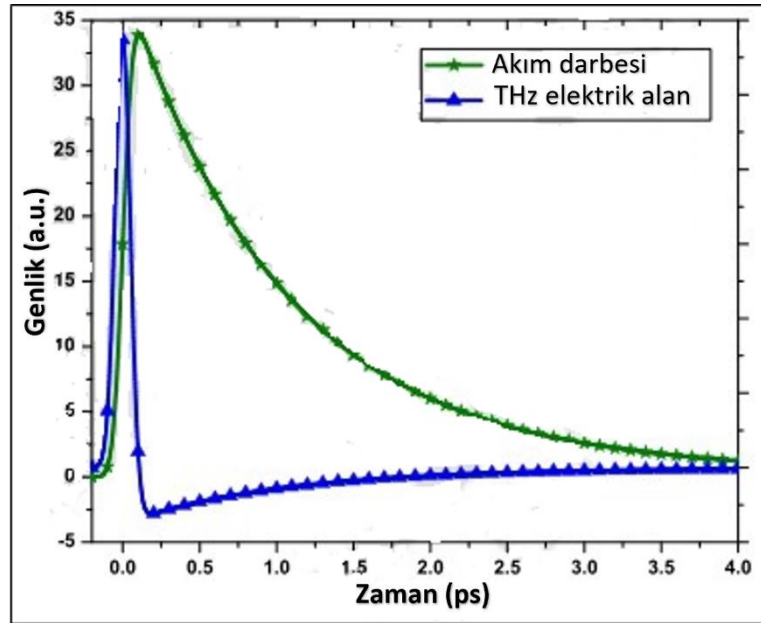


Şekil 1.3. FİA'dan THz üretiminin gösterimi.

Metal elektrotlar DC gerilim ile polarlanır ve aktif bölge veya fotoiletken boşluk diye adlandırılan boşlukla birbirinden ayrılır. Darbeli lazer ışını, yarı iletken alt katmana yayılan ve elektron-delik çiftleri oluşturacak şekilde elektrot aralığını aydınlatır.



Şekil 1.4. Lazer darbesinin ve akım darbesinin geçici davranışı.



Şekil 1.5. Akım darbesinin ve yayılan THz elektrik alanının geçici davranışı.

Üretilen fototaşıyıcılar, öngerilim voltajı nedeniyle elektrik alan tarafından ilgili elektrotlara doğru hızlandırılır. Taşıyıcı konsantrasyonlarındaki geçişler ve hareketleri; hızlanma ve yavaşlama, anten yapısını THz dalgalarını yaymaya yönlendiren geçici bir akım darbesi üretir. Lazer darbesinin, akım darbesinin ve

yayılan THz elektrik alanının zamansal davranışları, Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Yarı iletken malzemedeki taşıyıcı üretim hızı, genlik, yükselme ve bozulma süresi gibi lazer darbe özelliklerine bağlıdır. Akım darbesinin yükselme süresi, Şekil 1.5'te gösterildiği gibi lazer darbesiyle orantılıdır. Akım darbesinin sönüm süresi, yarı iletken malzemenin farklı parametrelerine, boşluktaki elektrik alana ve anten geometrisine bağlıdır.

## BÖLÜM 2

### THZ FOTOİLETKEN ANTENLER

Son yıllarda, ilk FİA'nın tanıtılmasından sonra, THz üretiminde FİA kullanımı çok yüksek seviyelere ulaşmıştır. FİA'yı THz kaynağı olarak kullanan çeşitli alanlardaki farklı uygulamalar her yerde yaygınlaşmaktadır. Bu uygulamaların birincil gereksinimi, yüksek çıkış gücüne sahip verimli bir THz kaynağıdır. FİA'nın performansını iyileştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmasına rağmen, radyasyon gücü ve verimliliği hala çok azdır. Bu, FİA'nın işleyişinde yer alan fiziğin daha iyi anlaşılmasını gerekli kılmaktadır.

Literatürde simülasyon, devre ve teorik modelleme yaklaşımlarını kullanarak FİA'nın analizini ele alan çok az çalışma bildirilmiştir. Bu bölüm, literatürde bildirilen çeşitli çalışmalar ve ardından FİA'nın ana bileşenleri hakkında kısa bir inceleme ve bunların sınırlamaları hakkında incelemeler sunmaktadır.

#### 2.1. LİTERATÜR TARAMASI

Burada sunulan literatür taraması FİA için yapılmıştır. FİA'nın fotoiletken materyalindeki taşıyıcı dinamiklerini analiz etmek için literatürde az sayıda simülasyon çalışması bildirilmiştir. Bu çalışmalar, FİA'dan gelen radyasyonun geçici davranışı hakkında kapsamlı bir bilgi sağlamaktadır.

Hughes vd. [69], farklı radyasyon frekanslarında H şeklindeki Hertzian dipol FİA'nın radyasyon modelini analiz etmek için üç boyutlu FDTD sayısal yöntemini uygulamış ve ayrıca yayılan yakın ve uzak bölge elektrik alanlarının geçici davranışını hesaplamıştır. Önerilen analiz, FİA'daki sürüklenme akımını hesaplamak amacıyla daha fazla kullanılan taşıyıcı üretim oranını tahmin etmek için süreklilik denklemini kullanır. Bu çalışma, farklı frekanslardaki radyasyon modelinin davranışını rapor etse



de hesaplamaya altta yatan yarı iletken taşıyıcı dinamiğinin dahil edilmemesi doğruluğunu azaltır.

Castro vd. [70], yarı-klasik bir Monte Carlo simülasyon çalışması sunmuştur. Ön gerilim voltajının ve lazer darbe genişliğinin FİA'nın performansı üzerindeki etkisini tahmin etmiştir. Sunulan yarı iletken taşıyıcı dinamiğine,  $\Gamma$  ve L vadilerindeki taşıyıcıların farklı saçılma mekanizmaları ve fonon saçılması dahil edilmiştir. Ayrıca, elektrotların yakınında taşıyıcıların birikmesi nedeniyle boşluktaki net elektrik alan üzerindeki perdeleme etkisini de hesaplar. Bu çalışma, taşıyıcıların geçici hızlarını içerir, ancak taşıyıcı ömrüne bağımlılık, taşıyıcı rekombinasyon mekanizması, tuzak yoğunluğu ve enerji seviyeleri çalışmaya dahil edilmemiştir.

Kirawanich vd. [71], H-şekilli ve iç içe geçmiş elektrot anten geometrilerine sahip FİA'nın FDTD tabanlı bir simülasyonunu sunmuşlardır. Simülasyon, taşıyıcıların alana bağlı hareketlilikleriyle taşıyıcı dinamiğinin sürüklenme-difüzyon modelini ve taşıyıcı rekombinasyonunu hesaba katmak için Shockley Read Hall (SRH) rekombinasyon modelini içerir. Ancak bununla birlikte, farklı saçılma mekanizmasının etkisi, tuzak yoğunluğuna bağımlılık, tuzak enerji seviyeleri, voltaj taramasının etkisi ve taşıyıcı polarizasyonu sunulan taşıyıcı dinamiklerine dahil edilmemiştir.

Moreno vd. [72], yarı iletken fiziği için Drift-Diffusion çözücü de dahil olmak üzere, üç boyutlu FDTD kullanan FİA'nın sayısal bir simülasyon çalışmasını rapor etmişlerdir. Yazarlar, simülasyon çalışmasına dopingin mekânsal dağılımı ve foto-üretilmiş taşıyıcılar ile taşıyıcıların alana bağlı hareketliliğini dahil etmişlerdir. Bununla birlikte, voltaj perdeleme etkisi, taşıyıcı polarizasyonu, tuzak yoğunlukları ve bunların enerji seviyeleri hakkında hiçbir bilgi sağlanmamıştır.

Emadi vd. [73] yarı iletken simülasyon yazılımı Silvaco TCAD ile elektromanyetik simülasyon yazılımı CST Microwave Studio'yu kullanarak hibrit bir simülasyon tekniği sunmuşlardır. Bu çalışmada, yazarlar eş düzlemliler, interdigitated ve tarak şeklindeki FİA'ların performansını karşılaştırdılar. Bu çalışma, taşıyıcı ömrünün, taşıyıcı hareketliliğinin ve anten uzunluğunun anot akımı ve radyasyon bant genişliği

üzerindeki etkisini rapor etmektedir. Bununla birlikte, sunulan simülasyon çalışmaları, tuzak yoğunluğunun ve enerji seviyelerinin taşıyıcı hareketliliği, taşıyıcı ömrü ve taşıyıcı rekombinasyon mekanizması üzerindeki etkisini içermemektedir.

Yukarıda bildirilen çalışmalar, FİA'ların farklı parametrelerinin davranışını tahmin edebilmesine rağmen; doğruluğu tatmin etmemektedir. Bu nedenle, FİA'nın davranışını ve FİA'nın farklı parametrelerine bağımlılığını analiz etmek için, daha önce ele alınmamış olan, fiziği de içeren bir çalışma gereklidir. Bu bölümde tartışılan simülasyon çalışmalarının bir özeti Çizelge 2.1'de verilmiştir.

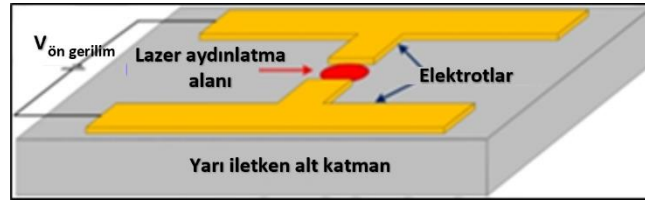
Çizelge 2.1. Simülasyon çalışmalarının özeti

Referans	Ele Alınan Sorunlar	Ele Alınmayan Sorunlar
Hughes vd. [69]	Foto-taşıyıcı yoğunlukları.	Yarı iletken taşıyıcı taşıma.
	Sürüklenme akımı.	Rekombinasyon mekanizması
	Tek taşıyıcı bazlı hesaplamalar.	Voltaj perdeleme etkisi.
	Yayılan alan hesaplaması.	Tuzak özelliklerinin etkisi.
Castro vd. [70]	Uzak alan yaklaşımı.	Rekombinasyon mekanizması.
	Sürüklenme akımı.	Taşıyıcıların geçici hareketi.
	Taşıyıcı saçılmasının etkisi.	Taşıyıcı ömrü etkisi.
	Voltaj perdeleme etkisi.	Tuzak özelliklerinin etkisi.
Kirawanich vd. [71]	Foto-üretilmiş akım yoğunluğu.	Taşıyıcının saçılma etkisi.
	Alana bağlı hareketlilik.	Voltaj perdeleme etkisi.
	SRH rekombinasyon modeli.	Tuzak özelliklerinin etkisi.

	Yayılan alan hesaplaması.	
Moreno vd. [72]	Foto-üretmiş akım yoğunluğu.	Taşıyıcının saçılma etkisi.
	Alana bağlı hareketlilik.	Voltaj perdeleme etkisi.
	Rekombinasyon mekanizması.	Tuzak özelliklerinin etkisi.
	Yayılan alan hesaplaması.	
Emadi vd. [73]	Lazer-yarı iletken etkileşimi.	Tuzak özelliklerinin etkisi.
	Yarı iletken taşıyıcı dinamiği.	Rekombinasyon mekanizması.
	Yayılan alan hesaplaması.	

## 2.2. FİA'NIN ANA BİLEŞENLERİ

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi fotoiletken alt katman, anten ve lazer kaynağı olmak üzere FİA'nın üç ana bileşeni vardır. Bu bileşenlerin ayrıntıları ve temel özellikleri aşağıda ele alınmıştır:



Şekil 2.1. FİA'nın temel yapısı.

### 2.2.1. Fotoiletken Yarı İletken Alt Katman

Fotoiletken yarı iletken alt katman, FİA'nın merkezi parçasıdır. İstenen özellikleri yerine getirebilecek doğal olarak oluşan bir malzeme olmadığından, FİA için uygun malzemeleri imal etmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Taşıyıcılar, üzerine basılan anten için uyarma kaynağı olarak işlev gören akım darbesini daha da üreten

yarı iletken alt katman üzerindeki lazer aydınlatması kullanılarak üretilir. FİA'dan THz üretimini desteklemek için, yarı iletken alt katman malzemesinin bazı kritik gereksinimleri karşılaması gerekir. Bir yarı iletken malzemenin FİA'da alt katman olarak kullanılması için gerekli olan arzu edilen özellikler aşağıdaki gibidir:

- Karanlık Direnç: FİA'daki karanlık akımı sınırlamak için yarı iletken malzemeler yüksek bir karanlık direnç değerine sahip olmalıdır.
- Taşıyıcı Ömrü: Yarı iletkenlerde taşıyıcı ömrü çok kısa ( $< 1$  ps) olmalıdır.
- Taşıyıcı Hareketliliği: Taşıyıcıların hareketliliği, hızlı değişen bir geçici darbe sağlamak için mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır.

Doğal yarı iletken malzemelerin karakteristik özellikleri FİA'lar için uygun değildir, bu nedenle implantasyon, ışınlama ve düşük sıcaklıkta büyüme gibi farklı üretim teknikleri fotoiletken malzemeleri imal etmek için kullanılmaktadır [74–76]. Üretim yöntemlerinin her birinde temel amaç, taşıyıcı ömrünü azaltmaktır. Bu, farklı kusur/tuzak bölgeleri aracılığıyla bant aralığına ek enerji seviyeleri eklenerek başarılabilir. Tuzak bölgeleri, elektronları ara enerji seviyelerinde yakalayarak alternatif bir rekombinasyon yolu sağlar. Tuzak konsantrasyonlarının artırılması, fotoiletken malzeme için temel gereklilik olan taşıyıcıların ömrünü azaltır [77]. Öte yandan, ortalama serbest yolun azalması nedeniyle taşıyıcıların saçılması daha sık hale geldiği için taşıyıcıların hareketliliğini de azaltır [78]. İstenmeyen bir şekilde artan tuzak yoğunluğunun bu sonucu, ultra kısa taşıyıcı ömrüne, büyük taşıyıcı hareketliliğine ve aynı anda çok yüksek karanlık direnci değerine sahip bir malzeme imal etmek ana zorluktur. Buna rağmen, yarı iletken malzemelerde daha fazla kusur ortaya çıkarılarak daha kısa taşıyıcı ömrüne öncelik verilir. FİA'lardan THz üretim sürecini analiz etmek için literatürde safir üzerinde silikon [79], düşük sıcaklıkta büyütülmüş Galyum Arsenit (LT-GaAs), yarı yalıtılmış (SI) GaAs, implante GaAs [80,81], InP [80,82], InGaAs [76], GaN [81], InGaAsP [83], çok katmanlı InGaAs-InAlAs [84] ve GaAsBi [85] deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

### 2.2.1.1. Düşük Sıcaklıkta Büyütülen Galyum Arsenit (LT-GaAs)

LT-GaAs, bu tezdeki çalışmaların çoğunda alt katman materyali olarak kullanılmıştır. Bu bölüm, sonraki bölümlerde sunulan çalışmalarla ilgili LT-GaAs'ın özellikleri hakkında ayrıntı sağlamaktadır.

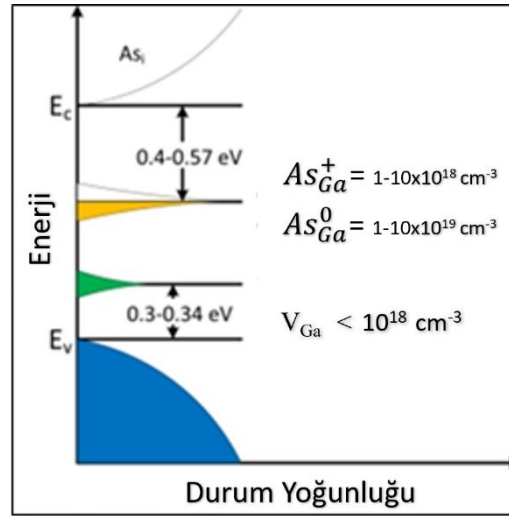
#### LT-GaAs'ın Büyütülmesi

Genel olarak Moleküler Demet Epitaksi (MBE) ile GaAs materyali 600°C [86] alt katman sıcaklığında büyütülürken, LT-GaAs film büyümesi geleneksel standarttan düşük 160-300°C büyüme sıcaklığına kadar değişir [87]. Çalışmalar LT-GaAs'ın çok stokiometrik olmayan bir malzeme olduğunu göstermiştir, buna rağmen LT-GaAs yüksek kaliteli mono kristal olarak büyütülebilir [88,89]. Büyüme süreci sırasında, aşırı Arsenik (As) konsantrasyonunun dahil edilmesi, yoğunluk değerleri  $10^{17}$ - $10^{20}$  cm<sup>-3</sup> arasında değişen nispeten yüksek yoğunluklu nokta kusurlarının oluşumuna yol açar [88]. Bu nokta kusurları, arsenik antisitleri ( $As_{Ga}$ ), arsenik interstisyel ( $As_i$ ) ve Galyum boşluğunu ( $V_{Ga}$ ) içerir [87,88,90]. Fazla As miktarı, MBE işlemi sırasında alt katman sıcaklığı tarafından kontrol edilir ve kusur yoğunluğu, 250-300°C aralığında büyüme sıcaklığı ( $T_g$ ) ile katlanarak azalır. Aşırı As konsantrasyonu, MBE işlemi sırasında %2'ye kadar çıkabilir [87–89]. MBE işlemi sırasında yüksek bir As basıncı, As ile ilgili kusur yoğunluğunun yüksek olmasına neden olur. Çalışmalar, As bakımından zengin LT-GaAs'ın nispeten düşük bir karanlık özdirencine sahip olduğunu göstermektedir [91]. THz kaynaklarında kullanılacak alt katman malzemesi için yüksek karanlık özdirenç ihtiyacı, büyüme sürecini takiben malzemenin daha fazla işlenmesine yol açtı. Melloch vd.'nin yaptığı çalışmada [92], LT-GaAs malzemesinin yüksek sıcaklıklarda (600-800°C) büyüme sonrası tavlama işlemine girmesi durumunda ara katmanların kristalliğinin önemli ölçüde arttığı bulunmuştur. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda tavlama, yapısal bozulmaları azaltır, bu nedenle, aşırı As antisiteler tarafından indüklenen kafesteki gerilimi gevşetir. Yano vd.'nin yaptığı çalışmada [93] sunulan bir malzeme imalat çalışması, tavlama işleminin,  $V_{Ga}$  ile yer değişimi yoluyla  $As_{Ga}$  kusurlarının difüzyonunu kolaylaştırdığını bulmuştur. Yüksek tavlama sıcaklığında, numunedeki daha fazla kusur termal olarak aktive olur ve

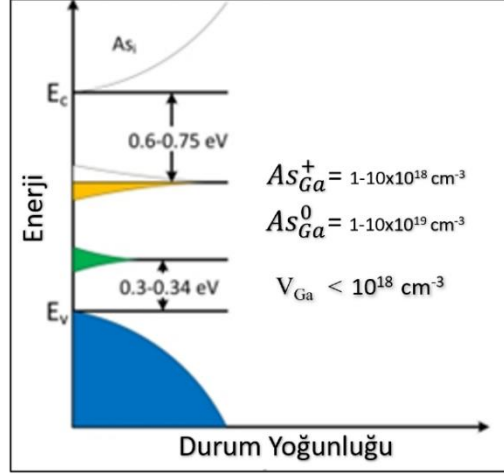
kusurların difüzyonu artar. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda tavlanan numuneler nispeten daha küçük kusur yoğunluklarına sahiptir.

### LT-GaAs'ın Bant Yapısı ve Taşıyıcı Ömrü

Specht vd.'nin makalesinde [94] sunulan çalışma, LT-GaAs'ın tavlınmamış numunelerinde  $As_{Ga}$  kusurlarının çift donör gibi davrandığını göstermektedir.  $As_{Ga}^0$  nötr yük durumunda ve  $As_{Ga}^+$  tek pozitif yük durumunda bulunabilir.  $200^{\circ}C$  büyüme sıcaklığında (Tg),  $As_{Ga}^0$  ve  $As_{Ga}^+$  konsantrasyonları sırasıyla yaklaşık olarak  $10^{20} cm^{-3}$  ve  $10^{19} cm^{-3}$  aralığındadır.  $As_{Ga}$ , Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, iletim bandı kenarının altında  $0.4-0.57eV$ 'de bulunan kısmen iyonize bir derin donör seviyesi oluşturur[97–100]. Özellikleri elektron tuzakları olarak iyi bilinen EL2 kusurlarına benzer olduğundan,  $As_{Ga}^+$  kusurlarının elektronlar için tuzak görevi gördüğü varsayılmaktadır.



Şekil 2.2. Tavlınmamış LT-GaAs'de durum yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak nokta kusur enerji dağılımı [88].



Şekil 2.3. Tavlanmış LT-GaAs'deki durum yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak nokta kusurlu enerji dağılımı [88].

$As_{Ga}^+$ , alıcılar  $V_{Ga}$  tarafından telafi edilir.  $V_{Ga}$ ,  $As_{Ga}^+$ 'ya [95] kıyasla daha düşük bir konsantrasyonla  $As_{Ga}^+$  bant aralığının alt yarısında bulunur ve değerlik bandının [96] 0.3-34 eV yukarısına yerleştirilmiş tamamen iyonize bir derin alıcı seviyesi oluşturur. Tavlama işlemi, derin donörlerin konsantrasyonlarını azaltırken bant aralığının ortasına (0.65-0.75 eV civarında) doğru bir seviye kayması üretir. Liu vd. [97] ve Von Bardeleben vd.'nin [98] yaptığı çalışmalar, kusur konsantrasyonunun tavlama sıcaklığına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu bildirmektedir. Tavlama sıcaklığının 200-600°C'den arttırılması, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi  $As_{Ga}^0$  konsantrasyonunu  $3 \times 10^{19}$ 'dan  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 'e ve  $As_{Ga}^+$  konsantrasyonunu  $3 \times 10^{18}$ 'dan  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'e düşürür.

LT-GaAs'in çok az bir taşıyıcı ömrü/gevşeme süresine sahip olması THz üretimi için olumlu bir özelliktir. McIntosh vd.'nin, [105] çalışması, taşıyıcı gevşeme süresini araştırıyor ve 200°C'de büyütülen ve 600°C'de tavlanan bir malzeme için 0,4 ps'lik bir taşıyıcı ömrü bildirmiştir. Optimize edilmiş büyüme ve tavlama sıcaklıkları için diğer bazı çalışmalarda [77,99–104], tavlınmamış numuneler için 100-400 fs ve tavlınmış numuneler için 300-500 fs arasında taşıyıcı ömürleri bildirilmiştir.

### LT-GaAs'ın Elektriksel Özellikleri

LT-GaAs'ı THz kaynakları için çok uygun bir malzeme yapan özelliklerinden biri, büyük karanlık öz direncidir. Tavlama olmadan 200°C'de büyütülen LT-GaAs, düşük

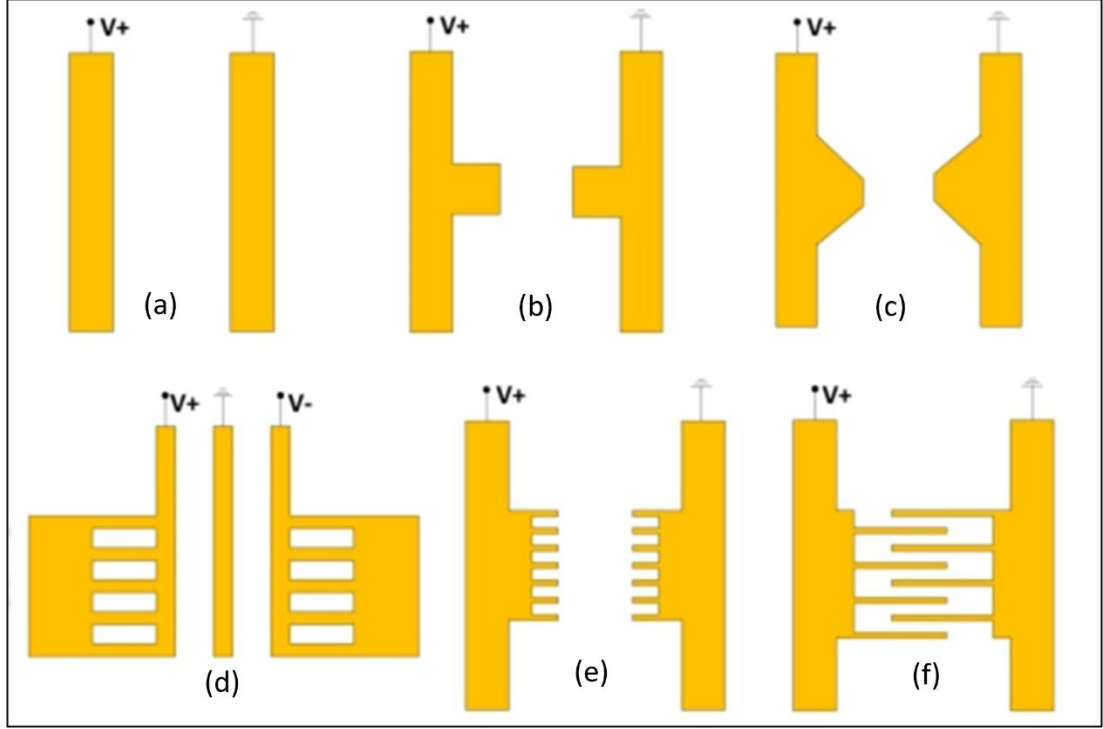
bir özdirenç sunar  $\rho \sim 10 \Omega\text{cm}$  [91,105,106]. Büyüme sıcaklığının  $200^\circ\text{C}$ 'den  $400^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılması, özdirenci  $10$ 'dan  $10^5 \Omega\text{cm}$ 'ye yükseltir [90,105,107]. Çalışmalar, LT-GaAs'ta iki tür iletim mekanizmasını ortaya çıkardı,  $300^\circ\text{C}$ 'den büyük sıcaklıklarda, taşıma, derin donör bandında yer alan en yakın komşu sekmesi yoluyla gerçekleşir. İkinci iletim, değerlik bandından yakındaki bir nötr donör durumuna uyarılan deliklerden geçer.

LT-GaAs için taşıyıcı hareketliliği ölçümleri [106], fotoiletken anahtarların zamana entegre verimliliği ve THz spektroskopisi [102,108,109] gibi çeşitli yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. Tavlanmamış bir numune için bildirilen taşıyıcı hareketliliği  $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'in altındaydı [106,110,111]. Yüksek tavlama sıcaklıklarında taşıyıcı hareketliliği artarak  $200\text{-}400 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  arasına ulaşır. LT-GaAs'deki taşıyıcı hareketliliği, büyük ölçüde büyüme sıcaklıklarına bağlıdır. Büyüme sıcaklığı  $225^\circ\text{C}$ 'ten  $350^\circ\text{C}$ 'ye değiştiğinde, taşıyıcı hareketliliği  $2000$ 'den  $4000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  'e yükselmektedir [112].

### 2.2.2. Anten Geometrisi

Yarı iletken alt katman üzerine basılan anten geometrisi, elektrik enerjisini elektromanyetik radyasyon enerjisine dönüştürmek için arayüz sağlar. Boşluk boyutu ve elektrot geometrisi, fototaşıyıcıların toplanmasını kolaylaştırır. FİA davranışının buna bağımlılığını incelemek için literatürde farklı boşluk geometrilerine sahip birkaç anten yapısı kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan anten geometrilerinden bazıları, Co-planar stripline [113], Hertzian Dipol [113,114], Papyon Anten [113,115], Plasmonic fotoiletken ızgara [116], Tarak yapısı Hertzian dipol [117] ve Şekil 2.4'te gösterildiği gibi perdeli elektrot FİA [118]. Literatürde, FİA'lar boşluk boyutlarına göre üç kategoriye ayrılmıştır: küçük açıklıklı FİA'lar ( $5 \sim 50 \mu\text{m}$ ), yarı geniş açıklıklı FİA'lar ( $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ) ve geniş açıklıklı FİA'lar ( $0,1 \sim 5 \text{ mm}$ ) [119].





Şekil 2.4. Farklı FİA Yapıları a) Eş düzlemlı şerit hattı b) Hertzian Dipol c) Papyon Anten d) Plazmonik fotoiletken ızgara e) Tarak yapısı hertzian dipol f) Interdigitated FİA.

### 2.2.3. Lazer Kaynağı

FİA'lardan üretilen THz dalgaları büyük ölçüde lazer kaynağına bağlıdır. FİA'da, geniş bant genişliği radyasyonu oluşturmak için darbeleri lazer kaynağı kullanılır. Lazer gücü, dalga boyu, darbe genişliği ve darbe tekrarlama frekansı, lazer kaynağının özelliklerini tanımlar. Malzemede elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasını sağlamak için lazer kaynağından gelen fotonun enerjisi, alt katman malzemesinin bant aralığı enerjisinden daha büyük olmalıdır. Bu, FİA'da kullanılan yarı iletken malzemenin bant aralığı dikkate alınarak lazer kaynağının dalga boyuna dikkatlice karar verilmesi gerektiği anlamına gelir. Ultra hızlı değişen akım darbesinin üretimini desteklemek ve yüksek bant genişliğine sahip radyasyon elde etmek için kaynağın darbe süresi mümkün olduğu kadar küçük, tercihen 100 fs'den az olmalıdır. Lazer kaynağının tekrarlama frekansı, yarı iletken alt katmana iletilen enerji miktarını belirler. Yüksek tekrarlama frekansı, yarı iletken alt katmana yüksek darbeleri enerji beslemesi sağlar. Literatürde bir FİA'nın performansını incelemek için birkaç fs lazer kaynağı kullanılmıştır, bunlardan bazıları; fs boya osilatör-amplifikatör [82], mod kilitli

Ti:safir lazer [113], Erbiyum katkılı fiber osilatör tabanlı mod kilitli lazer [120], erbiyum fiber lazer [76], fiber halka lazer [84].

### 2.3. THZ FİA EŞDEĞER DEVRESİ

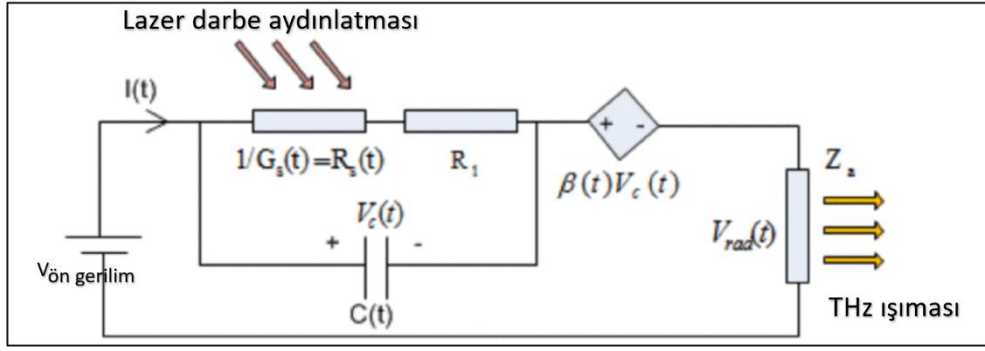
THz FİA'ların (küçük boşluklu antenler) boşluk boyutu genellikle oluşturulan THz radyasyonunun dalga boylarından daha küçüktür. Bu nedenle, geciktirme etkisi ihmal edilebileceğinden, bu cihazları THz frekans aralığında çalışan eşdeğer zamanla değişen toplu eleman devresi ile modellemek mümkündür [121,122]. Benzer eşdeğer devre teknikleri, mikroserit fotoiletken anahtarlar [121], CW sistemlerde THz antenler [123] ve tek duvarlı karbon nanotüp temelli fotoiletken anahtarlar [124] için senaryolarda kullanılan literatürde bulunabilir.

Şekil 2.5, THz anteninin zamana bağlı eşdeğer devresini göstermektedir. Kapasitans özellikleri ve perdeleme etkisi, zamanla değişen bir kapasitans ve kontrollü voltaja bağlı kaynak tanımlanarak değerlendirilir. Bu model aşağıdaki bileşenleri içerir:

- 1) Lazer darbelerinin ve fotoiletken malzemenin zamanla değişen davranışlarını hesaba katarak boşluk boyunca iletim akımını tanımlayan zamanla değişen iletkenlik,  $G_s(t) = \frac{1}{R_s(t)}$  kaynak iletkenliğinin türetilmesi için, üretilen taşıyıcı yoğunluğu,  $n(t)$  [8] ile verilen Drude modelinden hesaplanabilir:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_c} + \frac{\alpha}{hv_{\text{opt}}} I_l(r, t) \quad (2.1)$$

$\tau_c$  taşıyıcı ömrü,  $h$  Planck sabiti,  $v_{\text{opt}}$  lazer frekansı,  $\alpha$  optik absorpsiyon katsayısı ve  $I_l(r, t)$  optik darbe yoğunluğudur.



Şekil 2.5. THz FIA'nın emitör olarak eşdeğer devresi [125].

Yayıma eksenini boyunca Gauss lazer darbelerinin elektrik alan dağılımını göz önünde bulundurarak optik darbe yoğunluğunu şu şekilde yazabiliriz:

$$I_l(r, t) = I_l(1 - R) \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \exp\left(-\frac{2t^2}{\tau_l^2}\right) \quad (2.2)$$

Burada  $I_l$  lazer tepe yoğunluğudur,  $R$  güç yansımaya katsayısıdır,  $w_0$ ,  $z=0$ 'daki ışın bel yarıçapıdır (burada anten boşluğunda olduğu varsayılır) ve  $\tau_l$  lazer darbe süresidir. Böylece, Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2 kullanılarak,  $n(t)$  şudur:

$$n(t) = I_l \exp\left(-\frac{2t^2}{w_0^2}\right) (1 - R) \frac{\sqrt{2\pi}\alpha}{4h\nu_{\text{opt}}} \tau_l \exp\left(-\frac{\tau_l^2}{8\tau_c^2} - \frac{t}{\tau_c}\right) \times \left(\text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}t}{\tau_l} - \frac{\sqrt{2}\pi}{4\tau_c}\right) + 1\right) \quad (2.3)$$

Burada  $\text{erf}(x) = \int_0^x e^{-t^2} dt$ 'dir.

Daha sonra Eşitlik 2.3 kullanılarak ve  $z$  eksenini boyunca düzgün olmayan optik absorpsiyon ve anten aralığının geometrik parametreleri dikkate alınarak, kaynak iletkenliği [126] şu şekilde türetilebilir:

$$G_s(t) = \frac{W}{L} e\mu_e I_l \exp(-2) (1 - R) (1 - \exp(\alpha T_{\text{LT-GaAs}})) \times \quad (2.4)$$

$$\frac{\sqrt{2\pi}}{4hv_{\text{opt}}}\tau_l \exp\left(-\frac{\tau_l^2}{8\tau_c^2} - \frac{t}{\tau_c}\right) \times \left(\text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}t}{\tau_l} - \frac{\sqrt{2}\tau_l}{4\tau_c}\right) + 1\right)$$

Burada  $e$  elektron yüküdür,  $\mu_e$  elektron hareketliliğidir ve Şekil 2.1'de gösterildiği gibi  $W$ ,  $L$  ve  $T_{\text{LT-GaAs}}$ , uyarma bölgesindeki sırasıyla anten aralığı genişliği, uzunluğu ve derinliğidir.

- 2) Anten elektrotları yakınında elektron-delik çiftlerinin yukarıda bahsedilen fenomen birikimine dayanan zamanla değişen bir kapasitans,  $C(t)$ ;
- 3) Kapasitans,  $\beta(t)V_c(t)$  boyunca voltaj tarafından kontrol edilen zamana bağlı voltaj kontrollü bir kaynak;
- 4) Elektrot kayıp direncine karşılık gelen kayıp direnci,  $R_1$ ;
- 5) Frekanstan bağımsız dirence sahip anten empedansı,  $Z_a$  ve;
- 6) Harici uygulanan öngerilim gerilimine karşılık gelen bir ön gerilim,  $V_{\text{bias}}$ .

THz FİA'nın [11] temellerinden, anten boşluğundaki akım yoğunluğu  $J(t) = e \cdot n(t)v(t)$ 'dir, burada  $v(t)$  anten boşluğundaki ortalama taşıyıcı hızıdır. Ortalama taşıyıcı hızı  $v(t) = \mu_e E_c(t)$  ile tanımlanır, burada  $E_c(t)$  anten boşluğundaki taşıyıcıların konumundaki elektrik alanıdır [127]. Ayrıca burada  $V_i(t) = E_i(t)L$  olduğu varsayılır (burada  $i$ =ön gerilim veya c). Bu nedenle, yayılan eleman üzerindeki voltaj:

$$V_{\text{rad}}(t) = Z_a \cdot e \cdot \frac{n(t)\mu_e V_c(t)S}{L} \quad (2.5)$$

Burada  $V_c(t)$ , anten boşluğundaki voltaj ve  $S$ , anten aktif alanıdır. Anten elektrotlarının iyi iletkenler olduğu varsayılır, dolayısıyla  $R_1$  ihmal edilir. Kapasitansın zamana bağlı özelliği, anten boşluğu boyunca voltajın hesaplanması için ve devre analizi kullanılarak dikkate alınır:

$$I(t) = V_c(t)G_s(t) + C(t) \frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} V_c(t) \quad (2.6)$$

Bu nedenle, zamana bağlı boşluk voltajı şöyle olacaktır:

$$\begin{aligned} \frac{dV_c(t)}{dt} &= \frac{1}{Z_a C(t)} V_{\text{ön gerilim}} - \frac{1}{Z_a C(t)} V_c(t) - \frac{\beta(t)}{Z_a C(t)} V_c(t) \\ &- \frac{G_s(t)}{C(t)} V_c(t) - \frac{1}{C(t)} \frac{dC(t)}{dt} V_c(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7'yi sayısal olarak çözmek için, eşdeğer devre yöntemindeki yığılmış elemanların özelliklerinin, lazer aydınlatması altındaki antenin taşıyıcı taşıma davranışıyla eşleşmesi önemlidir. Perdeleme etkisi dikkate alınarak anten boşluğundaki elektrik alanı şu şekilde formüle edilebilir [88].

$$\begin{aligned} \frac{dE_c(t)}{dt} &= \frac{1}{K} \left[ \frac{1}{\tau_r} E_{\text{ön gerilim}} - \frac{1}{\tau_r} E_c(t) - \frac{e\mu_e n(t)}{\zeta \varepsilon} E_c(t) - \right. \\ &\left. \frac{e\mu_e Z_a S n(t)}{L \tau_r} E_c(t) - \frac{e\mu_e Z_a S}{L} \frac{dn(t)}{dt} E_c(t) \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Burada  $K = \left( 1 + \frac{(e\mu_e Z_a S n(t))}{L} \right)$ . Burada  $\tau_r$ , rekombinasyon ömrüdür (ps ile birkaç ns [128] aralığında),  $\zeta$ , perdeleme faktörünü gösteren alt katmanın geometrik faktörüdür ve  $10^3$  [8] mertebesinde ve  $\varepsilon$ , alt katman geçirgenliğidir.

Antenin kaynak iletkenliğini,  $G_s(t)$  bilerek,  $C(t)$  ve  $\beta(t)C(t)$ 'yi karakterize etmemiz gerekir; yani, antenin perdelenmesine katkıda bulunan unsurlar. Eşitlik 2.7 ve Eşitlik 2.8'in karşılaştırılması zamana bağlı kapasitans ile sonuçlanır, yani Eşitlik 2.9'da  $C(t)$ ,

$$C(t) = \frac{\tau_r}{Z_a} \left( 1 + \frac{e\mu_e Z_a S n(t)}{L} \right) \quad (2.9)$$

ve zamana bağlı voltaj kontrollü kaynağın katsayısı, yani (Eşitlik 2.10'da  $\beta(t)$ ).

$$\beta(t) = \frac{e\mu_e n(t) \tau_r}{\zeta \varepsilon} \quad (2.10)$$

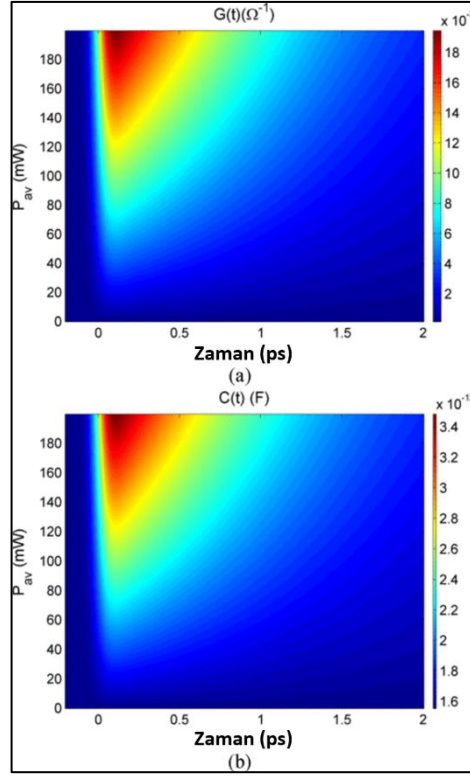
Eşitlik 2.9'dan, anten elektrotları arasındaki kapasitansın, elektrotların yakınında elektron deliklerinin birikimini gösteren zamana bağlı davranışa sahip olduğu yorumlanabilir- bu, üretilen taşıyıcıların yoğunluğuna ve rekombinasyon ömrüne bağlıdır. Taşıyıcı yoğunluğu ve rekombinasyon ömrü üzerindeki harici öngerilim gerilimine göre ters gerilim katsayısının, yani  $\beta(t)$  benzer bir bağımlılığı Eşitlik 2.10 aracılığıyla gözlemlenebilir.

Bu modelde bazı basitleştirilmiş varsayımların kullanıldığını belirtmekte fayda var. Örneğin, uyarma lazer noktasının ve boşluktaki elektrik alanının homojen olduğu varsayılır. Ayrıca, [88]'e dayanarak, taşıyıcı momentum gevşeme süresinin ve bunun sonucunda taşıyıcı hareketliliğinin küçük olduğu varsayılmaktadır. Böylece bu devre, küçük taşıyıcı mobiliteleri olan fotoiletken malzemeler için geçerlidir. Son olarak, bu modelde, hemen hemen tüm mevcut sistemlerde olduğu gibi, anten elektrotlarının THz çalışma frekansına göre elektriksel olarak uzun olduğu varsayılmaktadır, bu nedenle sadece anten boşluk boyutu ve yay açısının sistem performansı üzerinde bir etkisi olduğu varsayılmaktadır.

Yeni eşdeğer devreye dayalı olarak cihazın davranışını araştırmak için, ultra kısa lazer darbeleri tarafından sürülen ortak bir THz FİA'nın (yayıcı) parametreleri Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi seçilir. Devrenin boşluk kaynağı bileşenleri zamana bağlı özelliklere sahiptir ve lazer pompalama gücüne göre değişkendir. Bu nedenle, Çizelge 2.2'nin değerlerine dayanan  $G_s(t)$  ve  $C(t)$  dinamikleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Bu, optik gücü ve foto-taşıyıcı üretimini artırarak, zamana bağlı kaynak iletkenliği ve kapasitansının arttığını göstermektedir.

Çizelge 2.2. Lazer, Fotoiletken Malzeme ve Anten Parametreleri

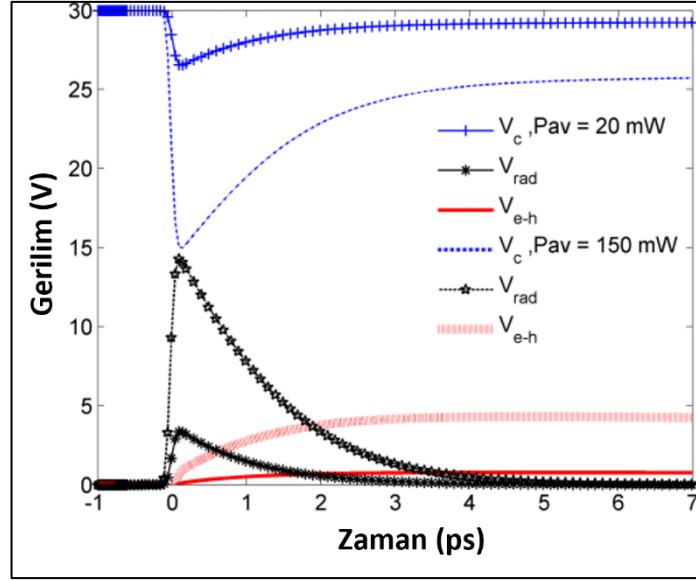
Parametre	Gösterim	Değer
LT-GaAs için elektron hareketliliği [113]	$\mu_e$	200 cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
Hava-fotoiletken malzeme arayüzünde yansıma katsayısı, $R = \frac{(1 - n_{sub})^2}{(1 + n_{sub})^2}$	R	GaAs için 0.318
Optik soğurma katsayısı	$\alpha$	6000 cm <sup>-1</sup>
Lazer frekansı/(lazer dalga boyu)	$\frac{\nu_{opt}}{\lambda_{opt}}$	375 THz/(800 nm)
Lazer tekrarlama oranı	$f_{rep}$	80 MHz
Lazer darbe süresi	$\tau_l$	100 fs
Taşıyıcı ömrü	$\tau_c$	1 ps
Taşıyıcı rekombinasyon süresi [129]	$\tau_r$	100 ps
Perdeleme faktörü [129]	$\zeta$	900
Anten boşluk uzunluğu	L	10 μm
Anten boşluk genişliği	W	10 μm
Uyarma bölgesinin derinliği	T <sub>LT-GaAs</sub>	1 μm
Ön gerilim	V <sub>ön gerilim</sub>	30 V
Anten direnci (90° papyonlu anten için [130])	Z <sub>a</sub>	65 Ω



Şekil 2.6. Farklı ortalama optik güç için a)  $G_s(t)$  ve b)  $C(t)$ 'nin zamansal davranışı [125].

Şekil 2.7'de  $V_c$ , perdelemeyen sorumlu ters voltaj kaynağı,  $V_{e-h} (=V_{\text{ön gerilim}} - V_c - V_{\text{rad}})$  ve ışınma elemanı (anten) boyunca voltajın,  $V_{\text{rad}}$  için iki farklı ortalama optik güçtür. Şekil 2.7, farklı ortalama optik güçlere ( $P_{\text{av}}$ ) göre farklı voltaj bileşenlerinin zamansal davranışını gösterir. Daha yüksek  $P_{\text{av}}$ , anten boyunca daha büyük bir voltaja yol açar. Ancak bununla birlikte, daha büyük bir taşıyıcı yoğunluğunun üretilmesi nedeniyle, anten elektrotlarının yakınında daha fazla eşleştirilmemiş taşıyıcı kalır ve kapasitans, ilk ön gerilim voltajı seviyesine kadar yüklenmez. Bu nedenle, perdeleme etkisine karşılık gelen ters ön gerilim voltajı,  $V_{e-h} = V_{\text{ön gerilim}} - V_c - V_{\text{rad}}$  artar. Burada yerel voltajlar için sunulan sonuçlar, THz dalga üretiminin makroskopik sürecini, [127]'deki yerel elektrik alanının zamansal değerlendirmesiyle eşleşen, kümelenmiş elemanlarla eşleştirmeye dayanmaktadır.





Şekil 2.7. Anten boşluğu boyunca voltajın zamansal davranışı [125].

Cihazın önemli bir parametresi bant genişliğidir. Sinyal genliğinin bir Fourier dönüşümü uygulandığında, bu cihazın hesaplanan FWHM (Yarı Maksimumda Tam Genişlik) bant genişliği 3.75 THz'dir. Bu, THz FIA'lara dayalı THz sistemlerinin bant genişliği ile iyi uyum sağlar [2,131]. Cihaz bant genişliğini etkileyen ana özellik, fotoiletken malzeme özellikleridir. Fe-implantlı InGaAs gibi katkılı alt katmanlarda, materyal bant aralığı içinde derin alıcı durumlarının eklenmesiyle, alt katmanın taşıyıcı ömrü azalır [132]. Anten üzerindeki voltajın bozulma süresi, taşıyıcı ömrü ile belirlenir. Daha kısa taşıyıcı ömrü, voltajın daha hızlı düşmesine ve ayrıca zaman içinde daha kısa THz darbe süresine yol açar. Bu nedenle, daha büyük bir bant genişliğine sahip olmak için fotoiletken malzemenin taşıyıcı ömrü küçük olmalıdır.

#### 2.4. THZ FIA'DAN YAYILAN GÜCÜ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Temelde iki olay yüksek THz gücü ve/veya yüksek optik-THz dönüştürme verimliliği elde edilmesine yol açar: biri büyük fototaşıyıcı yoğunluğu değişimi diğeri yüksek fototaşıyıcı ivmesidir

Eşitlik 2.5'e dayanarak, yayılan THz gücü

$$P_{\text{THz}}(t) = \frac{V_{\text{rad}}^2(t)}{Z_a} \quad (2.11)$$

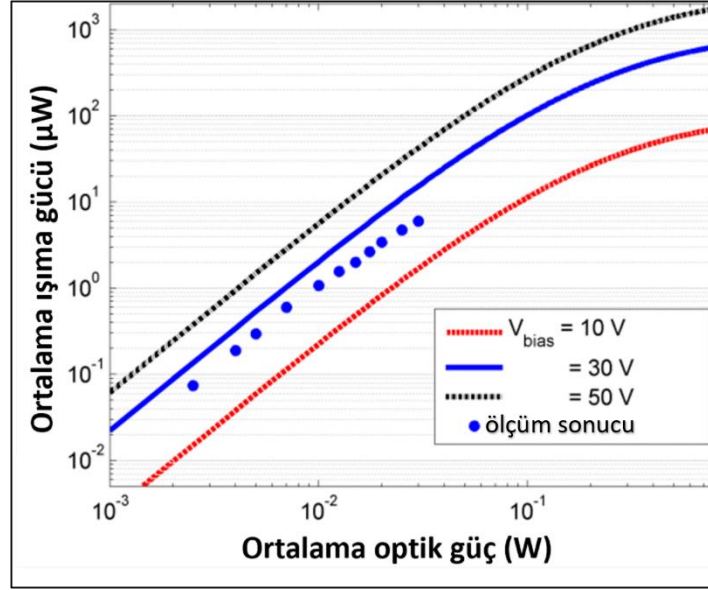
Burada verimliliğin hesaplanmasında optikten THz'e dönüştürme verimliliğini şu şekilde tanımlanır:

$$\eta_t = \frac{P_{\text{THz}}(\text{peak})}{P_{\text{opt-peak}}} \quad (2.12)$$

Burada  $P_{\text{THz}}(\text{peak})$ , en yüksek yayılan THz gücüdür ve  $P_{\text{opt-peak}}$ ,  $P_{\text{opt-peak}} = \frac{P_{\text{av}}}{\tau_1 f_{\text{rep}}}$  'den elde edilebilen tepe optik güçtür. Bütünlük için, sistem açısından başka bir verimlilik türü, yani elektrik-THz güç dönüşüm verimliliği ( $\eta_e$ ) tanımlanabileceğini belirtmekte fayda var. Bu verimlilik, THz gücünün, tepe optik güçte öngerilim voltajından iletilen güce oranı olarak tanımlanabilir.

#### 2.4.1. Ön Gerilim

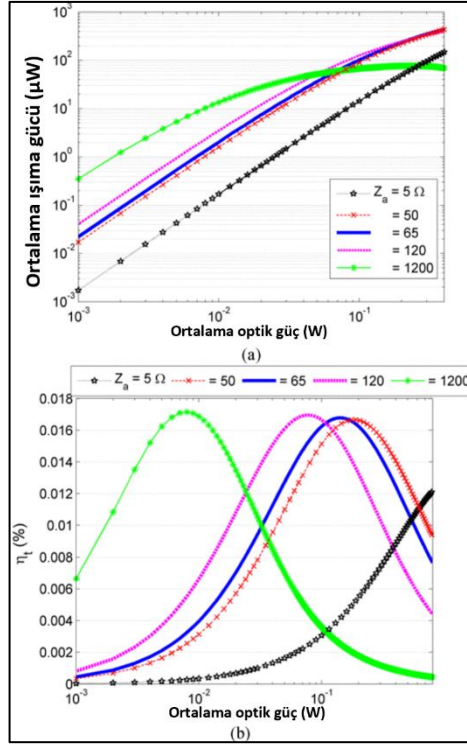
Şekil 2.8, uygulanan öngerilim voltajı ne kadar büyük olursa, yayılan THz alanının o kadar büyük olduğunu gösterir. Bununla birlikte, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, uygulanan ön gerilimin miktarı, fotoiletken malzemenin arıza gerilimine ve anten boşluk boyutuna bağlıdır (anten boşluk boyutu ne kadar büyükse, uygulanabilir ön gerilim o kadar yüksek olur). Ayrıca optik gücün artmasıyla cihazdan yayılan gücün doyuma ulaşmaya kadar arttığı şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 2.8. Farklı öngerilim voltajları için ortalama giriş optik gücüne karşı ortalama yayılan THz gücü. Ölçüm sonuçları, Vön gerilim=30 V [113].

#### 2.4.2. Anten Direnci

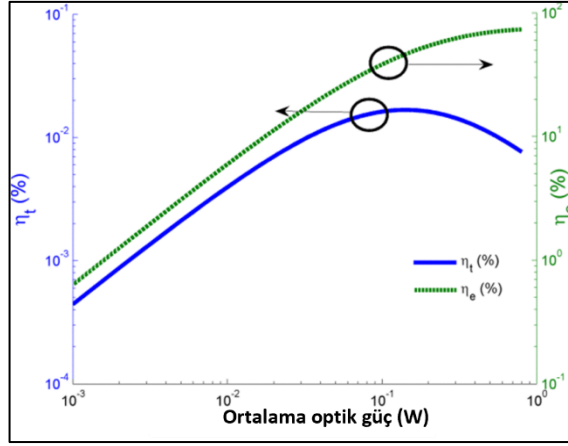
Cihazın performansı üzerinde etkili olan bir diğer parametre de anten direncidir. Şekil 2.9(a), papyon anteninin [130] yay açısına bağlı olarak değişen farklı anten dirençlerinin ortalama THz gücü üzerindeki etkisini göstermektedir. Daha düşük optik güçte, daha büyük dirençli anten, daha küçük dirençli antenden daha iyi yayılan güce sahip olmaktadır. Bununla birlikte, daha küçük dirençli antenler doğrusal bölgede kalır ve daha büyük giriş optik gücünde daha fazla THz gücü yayar. Ayrıca, bu antenleri optikten THz'e dönüşüm verimliliği açısından karşılaştırmak da mümkündür. Şekil 2.9.b'den, farklı dirençli anten için farklı optik güçlerde tepe veriminin meydana geldiği görülebilir. Örneğin  $Z_a=65 \Omega$  olan anten için optik güç 146 mW olduğunda %0.0167'lik tepe verimine ulaşılabilirken  $Z_a=120 \Omega$  olan anten 60 mW optik güçte aynı verime sahiptir. Bu,  $Z_a$  değerinin verimliliğin maksimum değerini önemli ölçüde değiştirmediğini ve sadece bu maksimumun meydana geldiği optik güç aralığını tanımladığını göstermektedir. Ayrıca bu analize dayanarak, belirli bir sistem ve sabit bir pompalama gücü için, mümkün olan en iyi verimlilik için optimize edilmiş empedanslı anteni türetmek mümkündür. Örneğin 146 mW sabit pompalama gücünde tanımlanan sistem için,  $Z_a=65 \Omega$  olduğunda %0.0167'lik optimum verim elde edilebilirken, diğer direnç değerlerine sahip antenler için verim biraz daha düşüktür.



Şekil 2.9. a) Ortalama yayılan THz gücü ve b) öngerilim voltajı 30 V olduğunda farklı anten dirençleri için ortalama optik güçlere karşı optik-THz tepe güç dönüştürme verimliliği [125].

### 2.4.3. Giriş Optik Gücü

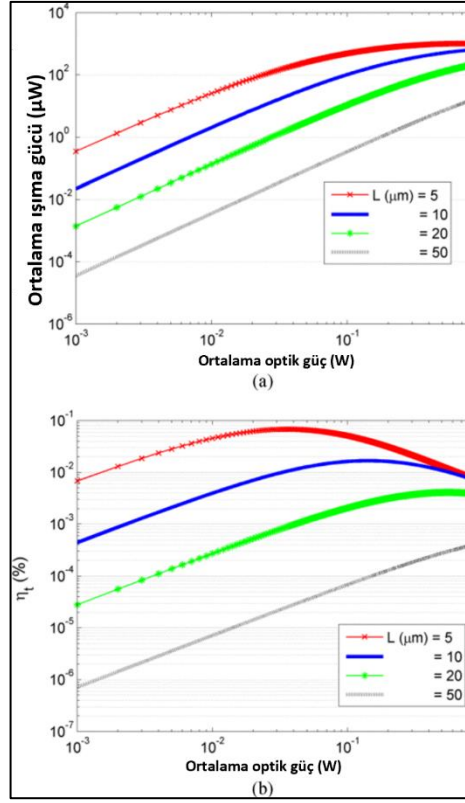
Farklı giriş optik güçleri için optik-THz güç dönüştürme verimliliğini ve elektrik-THz dönüştürme verimliliği Şekil 2.10'da karşılaştırılmaktadır. Bu iki etkinliğin büyüklükleri arasında büyük bir fark olduğu açıktır. Bu, optik-THz veriminin çok düşük verimli bir süreç olmasına rağmen, ön gerilimden gelen elektrik gücünün radyasyon direncine daha verimli bir şekilde iletilebileceği anlamına gelir. Ayrıca bu elektriksel güç, fotoakımın doygunluğuna göre doyum seviyesine ulaşır.



Şekil 2.10. 30 V ve  $Z_a=65 \Omega$  öngerilim gerilimi için optik-THz güç dönüştürme verimliliği ve elektrik-THz dönüştürme verimliliği karşılaştırması [125].

#### 2.4.4. Anten Boşluk Uzunluğu

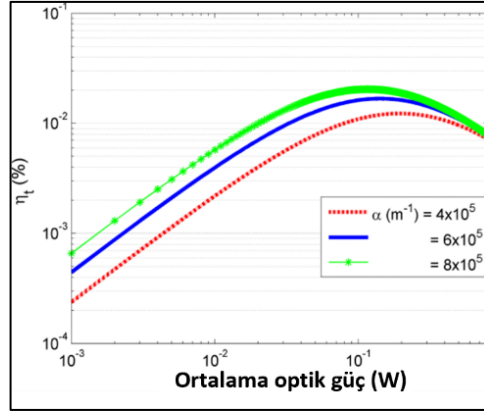
Anten çıkış gücünü ve verimini etkileyen bir diğer önemli parametre ise anten boşluk uzunluğudur. Şekil 2.11.a'da daha küçük boşluklu antenden yayılan gücün daha erken doyduğu, daha büyük boşluk boyutuna sahip olanın ise hala doğrusal bir bölgede çalıştığı ve hala daha fazla optik güce tepki gösterdiği yorumlanabilir. Ayrıca Şekil 2.11.b'de görüldüğü gibi, daha küçük boşluklu anten için maksimum verim, daha düşük optik güç seviyelerinde gerçekleşir. Bu aynı zamanda deneysel uygulamada THz fotoiletken yayıcı seçiminin mevcut optik kaynak tipine bağlı olduğunu da gösterir. Başka bir deyişle, yalnızca düşük optik güce sahip lazer kaynakları mevcut olduğunda, küçük aralıklı bir antenin kullanılması, geniş aralıklı bir antene kıyasla daha fazla yayılan güç ve optikten THz'e güç dönüştürme verimliliği ile sonuçlanır.



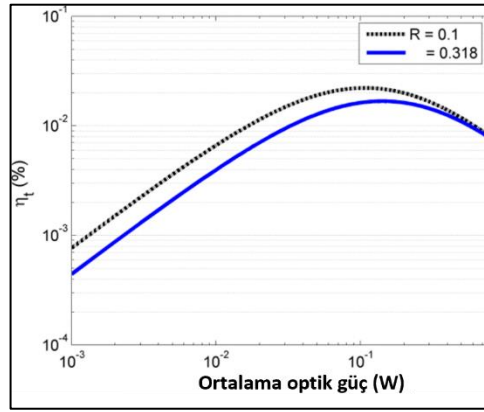
Şekil 2.11. Farklı aralık uzunluklarına sahip antenler için a) tepe optik-THz güç dönüştürme veriminin b) ortalama optik güçler üzerindeki ortalama yayılan THz gücünün bağımlılığı [125].

#### 2.4.5. Optik Emilim

THz anteninin verimliliğini artırabilecek ana yöntemlerden biri, optik bağlantı verimliliğini (lazer gücünün antene bağlanması) iyileştirmektir. Bu amaçla, iki önemli parametrenin,  $\alpha$  ve  $R$ 'nin, antenlerin toplam optik-THz güç dönüştürme verimliliği üzerindeki etkisi, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Farklı optik absorpsiyon için ortalama optik güce tepe optik-THz güç dönüştürme verimliliğinin bağımlılığı [125].



Şekil 2.13. Hava-alt katman arayüzünden farklı yansımaya katsayıları için optik güçlere karşı tepe optik-THz dönüşüm verimliliğinin değişimi [125].

Optik absorpsiyon ne kadar büyük olursa, verimliliğin o kadar yüksek olduğu ve ayrıca hava-alt katman arayüzünden yansımaya ne kadar küçük olursa, verimliliğin o kadar yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Hem  $\alpha$  hem de  $R$  esas olarak alt katman malzemesine bağlıdır. Ayrıca,  $\alpha$  lazerin optik dalga boyuna bağlıdır. Fotoiletken boşluktan yansımının azaltılması için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu tür yöntemlerin örnekleri, yansımaya önleyici kaplama [133], nano antenlerin kullanımı, örneğin anten boşluğundaki plazmonik metamateryaller ve periyodik alt dalga boyu temas elektrotlarının kullanılmasıdır [134].

## 2.5. THZ ANTENLERİNİN RF/MW ANTENLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

THz antenlerin, ölçüm tesisi, besleme yöntemi ve anten yapısı geleneksel RF/MW antenlerinden önemli ölçüde farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar bu başlık altında detaylandırılmış ve özetlenmiştir.

### 2.5.1. İmalat ve Ölçüm

RF/MW antenlerinin üretimi yaygındır. THz anteni üretmek oldukça karmaşık ve pahalıdır. THz antenin imalatı, fotoiletken alt katmanın imalatı ve hazırlanmasından ve ayrıca antenin alt katman üzerinde modellenmesinden oluşur. Anteni alt katman üzerinde modellemek için fotolitografi ve elektron demeti litografisi kullanılır. İlkinden daha pahalı olan ikinci yöntem, fotolitografi yönteminin çözünürlüğünün altına düşen mikron altı boyutlar için kullanılır [135].

Bu iki tip anten de ölçüm kurulumları ve ölçüm teknikleri açısından çok farklıdır. RF/MW antenlerde hem verici hem de alıcı antenler bir vektör ağ analizörüne bağlanır ve antenin radyasyon paterni, kazanç, verimlilik gibi çeşitli parametreleri test edilir. Empedans/VSWR, bant genişliği ve polarizasyon belirlenebilir. Alıcı ve verici antenlerinin hizalanması nispeten kolaydır. RF/MW antenleri için ölçüm tesisleri, yankısız odalar ve yankılanma odaları olarak bilinir. Anten ölçümleri, yakın alan ve uzak alan ölçümleri dahil olmak üzere birçok biçimde olabilir. Temel bir test sistemi, vericili kaynak anteni ve alıcıyla test edilen anteni gerektirir. Bu testteki ana fikir, test edilen anteni düzlem dalgalarla aydınlatmak için kaynak anteni ve uygun bant genişliğine ve polarizasyona sahip vericiyi kullanmaktır, bu daha sonra test edilen anten tarafından beslenen alıcı tarafından ölçülebilir. Bu sistemdeki bir varyasyon, test alıcısını bilinen performans özellikleriyle beslemek için değiştirilebilir bir referans anteni içerir. Bir diğeri, test altındaki anteni kaynak antene göre döndürmek için bir tür konumlandırma sistemi içerir, böylece radyasyon paternini açının bir fonksiyonu olarak ölçer.

THz ölçüm kurulumunda, optik kaynak ile emitör ve/veya dedektör anteni arasında fiziksel bir bağlantı yoktur. Parabolik aynalar gibi çeşitli optik bileşenler, THz sinyalini azaltabilen ve genişletebilen elektromanyetik dalgayı yönlendirmek için



emitör ve dedektör antenleri arasına tahsis edilmiştir. THz sinyalinin genliği ve fazı tespit edilebilir. Bununla birlikte, antenin patern ölçümü için, THz sisteminde test edilen antende rotasyon, THz anten boşluğunda aydınlatma kaybına neden olacağı için RF/MW antenlerinin aksine döndürülemez. THz antenin patern ölçümü için fiber bağlantılı dedektörler kullanan başka bir kurulum gereklidir [136,137]. Ayrıca, THz sisteminin hizalanması çok hassas bir iştir ve tespit edilen THz sinyali bundan önemli ölçüde etkilenir. Son olarak, THz sinyalleri su buharlarına karşı hassas olduğundan, THz ölçüm tezgahının kapalı bir ortamda olması ve kuru nitrojen ile temizlenmesi gerekmektedir.

### **2.5.2. Besleme, Uyarma Kaynağı ve Ön gerilim**

Eş düzlemlili dalga kılavuzu, koaksiyel kablo ve mikroşerit, geleneksel antenler için mevcut olan çeşitli besleme hatları arasındadır, ancak THz anteni için bunları hiçbirisi yoktur. Optik darbeleri THz antene önce hava yoluyla ve ikinci olarak fiber yolla iletilmektedir. Genelde optik dalgalar antene hava yoluyla bağlanır. Bununla birlikte, esnek ve hareketli yayıcıların ve dedektörlerin gerekli olduğu bazı endüstriyel uygulamalar için optik fiberler kullanılır. Son zamanlarda telekomünikasyon dalga boyu darbeleri olan 800 nm lazer darbeleri [138] ve 1550 nm için bazı fiber bağlantılı THz sistemleri sunulmuştur [139,140]. THz antenleri için besleme hattı aslında bir lazerdir; bu nedenle, antenin kaynak empedansı değişkendir ve bu, RF/MW antenlerinin yaygın olarak kullanılan 50 ohm besleme hatlarından farklıdır.

RF/MW ve THz antenleri arasındaki diğer bir fark, ön gerilim açısındandır. RF/MW antenleri herhangi bir ön gerilime ihtiyaç duymaz. Bununla birlikte, yayıcı olarak THz antenleri, THz üretiminin temel prosedürü olduğu için ön gerilim gerektirir. Bir dedektör olarak kullanıldığında, THz antenleri de ön gerilime ihtiyaç duymaz.

### **2.5.3. Elektrot Malzemesi**

Bakır ve gümüş gibi yüksek iletkenliğe sahip metaller genellikle RF/MW antenlerde kullanılmaktadır. THz antenlerinde elektrot malzemesi olarak bir AuGe alaşımı ve bir Ti/Au (Titanyum/Altın) tabakası kullanılır. Bunlar LT-GaAs alt katmanlar üzerinde uygun metalizasyon türleridir ve omik kontaklar sağlayabilir [141]. AuGe/Ni/Au gibi

AuGe alaşımları THz antenlerinde kullanılmıştır [113,142]. Bununla birlikte, Ti/Au (veya Ti/Pd/Au) katman yığını daha yaygın olarak kullanılır [143–145], burada Au'nun alt katmana yapışmasını iyileştirmek için başlangıçta ince bir Ti katmanı biriktirilir [39]. Ti/Au temasının AuGe alaşımına göre avantajı, biriktirme için tavlama gerektirmemesi ve lazer aydınlatması altında termal olarak daha kararlı olmasıdır [141]. Au'nun elektriksel iletkenliği,  $\sigma$ ,  $45.2 \times 10^6$  S/m'dir [146]. Akım akışının çoğu, yüzey derinliği veya karakteristik penetrasyon derinliği, 1 THz'de Au için,  $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$ , 74,9 nm olduğundan, iletken yüzeyine yakın çok ince bir bölgede meydana gelir. Bu durumda yüzey direnci 0,29  $\Omega$ 'dur. Pratikte THz antenleri için, genellikle 10-20 nm kalınlığında Ti, ardından  $\geq 100$  nm kalınlığında Au, fotoiletken alt katman üzerinde biriktirilir.

Grafen, son zamanlarda teorik olarak anten elektrot malzemesi olarak incelenen başka bir malzeme türüdür [147,148]. Olağanüstü mekanik, elektronik ve optik özelliklere [149] ve 1.5 TPa Young modülüne,  $200.000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  [3] taşıyıcı hareketliliğine sahip tek atom kalınlığında 2D karbon kristalidir ve emme katsayısı  $24 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  [150]. Sıcaklık ve kimyasal potansiyel gibi çeşitli parametreler grafenin yüzey iletkenliğini belirler. Grafenin kimyasal potansiyeli, farklı radyasyon özelliklerine sahip antenler elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple grafen yeniden yapılandırılabilir antenleri gerçekeştirmek için ayarlanabilen parametrelerden biridir [151].

#### 2.5.4. Alt Katman Malzemesi

Düzlemsel RF/MW antenlerinde düşük kayıplı bir dielektrik malzeme arzu edilir. Bu tip antenler için en yaygın dielektrik malzemelerden biri, fiberglas takviyeli epoksi laminant levhadan oluşan FR4'tür. Bununla birlikte, özel MW anten kategorisi, örneğin monolitik mikrodalga entegre devre, yüksek taşıyıcı hareketliliği ve homojen doğası nedeniyle ana alt katman malzemesi olarak GaAs'a ihtiyaç duyar [152,153].

THz antenler için kullanılan alt katman malzemesi, Si, InP, GaAs ve InGaAs gibi temelde bir yarı iletken olan fotoiletken bir malzemedir. LT-GaAs, istenen özellikleri,

yani hızlı akım darbeleri veya CW akım değişimi elde etmek için ultra kısa taşıyıcı ömrü, güçlü THz sinyalleri elde etmek için nispeten yüksek elektron hareketliliği, yüksek içsel direnç, yüksek ön gerilim voltajlarının uygulanmasını desteklemesi nedeniyle en popüler malzemedir [77,154]. THz dalga üretimi ve tespitinde çok önemli bir rol oynadığı için LT-GaAs'ın özellikleri önceki bölümde açıklanmıştır.

THz alanında yoğun olarak çalışılan konulardan biri de THz fotoiletken malzemedir. Verimli ve güçlü bir THz emisyonuna izin verecek hiçbir doğal malzeme mevcut değildir, bu nedenle fotoiletken malzemeye ilgi artmıştır [155]. Doğal malzemelerin içsel taşıyıcı ömrü, THz spektrumunun çok yüksek frekans aralıklarına ulaşmak için yeterince hızlı değildir. Bu nedenle, taşıyıcı ömrünü azaltmak için THz için malzeme çalışmaları çok önemlidir ve optoelektronik uygulamalar için malzeme özelliklerinin araştırılması ve geliştirilmesi halen devam etmektedir [156].

Song vd. çalışmasında [65] geliştirilen THz anteni, fotoiletken alt katman malzemesi olarak silikon kullanmıştır. Silikonun bant aralığı 300 K'de 1.12 eV'dir ve buna karşılık gelen  $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  içsel özdirenç vardır. Bununla birlikte, silikonun bant aralığı dolaylıdır, bu da minimum iletim bandının, maksimum değerlik bandına kıyasla yanlış hizalandığı anlamına gelir [157]. Bu, nispeten yavaş bir optik rekombinasyon işlemi ile sonuçlanır.

GaAs ise doğrudan bir bant aralığına sahiptir ve kafes ile fonon değişimi olmadan foton emisyonu mümkündür. GaAs'ın içsel direnci  $108 \Omega \cdot \text{cm}$ 'dir. GaAs III-V grup bileşimi olarak, bu bileşimin elektriksel ve optik davranışları ayarlamak için bantlar arasına kusurlar eklenerek karakteristik yapısını değiştirmek mümkündür. GaAs'ın özelliklerinde birçok geliştirme ve iyileştirme, THz antenlerinde ilerlemenin mümkün olmasının ana nedenlerinden biridir [158]. GaAs kristali, sıvı kapsüllenmiş Czochralski yöntemi ile yarı yalıtkan (SI) formda büyütülebilir. Bu süreçte, GaAs'ın kuvars ve karbon bileşenlerine olan tüm bağımlılıkları ortadan kaldırılır [159]. Bu, başka bir epitaksiyel katmanı büyütmenin mümkün olduğu bir alt katman oluşturur.

SI-GaAs'ların taşıyıcı ömrü yüzlerce pikosaniye aralığındadır. Bu, geniş bant ve iyi sinyal gürül oranına sahip THz antenlere sahip olma ihtiyacını karşılar. Fotoiletken

malzemenin iyileştirilmesi çeşitli doğal nokta kusurları ekleyip bant aralığına ek enerji seviyeleri dahil edilerek başarılabilir [99]. Bu nedenle, elektronları ara durumlarda yakalayarak başka bir yeniden birleştirme yolu sağlanabilir. Bu amaçla kristale noktasal kusurlar sokulmalıdır. Kusurların eklenmesi, arzu edilen malzemenin taşıyıcı ömrünü azaltabilir. Öte yandan, yakalama seviyelerinin getirdiği yeni saçılma merkezlerinin bir sonucu olarak ortalama serbest yolların azalması nedeniyle termal iletkenliği ve taşıyıcı hareketliliğini azaltır [160,161]. Bu sonuçlar olumsuzdur. Bu nedenle, ultra hızlı fotoiletken malzemelerin geliştirilmesindeki birincil zorluğun, alt pikosaniye taşıyıcı ömrü, yüksek hareketlilik ve yüksek karanlık dirençli malzemeye sahip olmak olduğu sonucuna varılabilir.

MBE'de düşük sıcaklıkta büyüme tekniği, kusurları malzemeye sokmak için geleneksel tekniklerden biridir. Bu yöntem LT-GaAs üretir. Tipik olarak, 200 ila 250°C arasındaki düşük bir büyüme sıcaklığında, GaAs, As'tan fazla biriktirilir ve bu da nispeten yüksek yoğunlukta nokta kusurlarının oluşmasına yol açar. Tipik olarak 500 ve 600°C arasındaki yüksek tavlama sıcaklığında bir As aşırı basınç altında, direnci arttırmak için tavllanır [99,156]. Aktif katman olarak 1 ila 2 µm kalınlığında bir LT-GaAs katmanı genellikle SI-GaAs üzerinde büyütülür [77].

LT-GaAs ilk olarak 1988'de kullanıldı [162] ve o zamandan beri çeşitli büyüme ve tavlama faktörlerinin LT-GaAs'ların özellikleri üzerindeki etkisi üzerine sürekli araştırmalar yapıldı [156,163–165]. Bununla birlikte, literatürde, LT-GaAs üzerinde bir THz anteni kullanıldığında, LT-GaAs levhasının üretimi ile ilgili tüm parametreler, özellikle büyümesi ve tavlama sıcaklıkları levhası ve türetilmiş taşıyıcı ömrü ile ilgili tüm parametreler tartışılmaktadır. Her MBE haznesi benzersizdir ve aynı haznede bile aynı yapının özelliklerini kopyalamak zordur. Bu üretim süreci, ortam koşullarına duyarlıdır ve tam büyüme sıcaklığının kontrol edilmesi zordur. Üretim prosedüründen etkilenen fotoiletken malzemenin bir başka parametresi, malzeme direncidir. Direnç, sıcaklığın artmasıyla azalır [102]. Uygulanan tavlama bu direncin artmasına yardımcı olur.

GaAs'ların özelliklerini değiştirmeye yönelik diğer yöntemler, iyon implantasyonu [166] ve GaAs'ta kendiliğinden oluşan ErAs adalarının kullanımı [158,167,168] gibi uygulamalarıdır. Bu tekniklerin amacı, LT-GaAs'a benzer taşıyıcı ömrüne sahip

malzeme oluşturmaktır. ErAs, yüksek dirençli ancak düşük hareketliliğe sahiptir. GaAs ise yüksek hareketliliğe sahip ancak çok düşük içsel dirençlidir. Bu nedenle, LT-GaAs hala THz antenleri için en iyi malzemedir [155].

İndiyum bazlı bileşikler, THz uygulamaları için başka bir fotoiletken malzeme kategorisi III-V bileşiklerindedir. Bu malzemeler daha dar bant aralığı enerjisine sahiptir. InGaAs'ın bant aralığı, LT-GaAs'ın 1,43 eV'sine kıyasla 0,75 eV'dir. Bu nedenle, İndiyum bazlı III-V bileşikleri daha yüksek optik dalga boylarında uygun malzemelerdir. LT-InGaAs'ın ultra kısa taşıyıcı ömrü ve yüksek direnci Gregory vd. çalışmasında rapor edilmiştir [156]. LT-InGaAs için çoğu uygulama 1.55 µm telekomünikasyon dalga boyundadır. Bu frekansta yüksek güçlü, dar çizgi genişliğine ve ayarlanabilir dalga boyuna sahip fiber yükselteçler de mevcuttur [116]. 1.55 µm ile uyumluluk Fe implante edilmiş InGaAs [120,132], ErAs: InGaAs [169], ağır iyon ışınlanmış InGaAs [76], InAlAs yakalama katmanları arasına gömülü InGaAs katmanları [139] ve düşük sıcaklıkta yetiştirilen Be katkılı InGaAs'tır [170].

1550 nm'de LT-GaAs'ın taşıyıcı ömrü, direnci ve arıza gerilimi çok düşüktür. Ancak bu malzemenin en önemli avantajı, köklü iletişim optik kaynakları ile kullanılabilmesidir. Bu özellik, THz sisteminin maliyetini azaltabileceğinden çekicidir. Çoğu THz anteni, mükemmel özelliklerinden dolayı fotoiletken malzeme olarak LT-GaAs kullanır.

SI-GaAs'lar, LT-GaAs'lara kıyasla yüksek hareketliliğe ancak daha düşük arıza voltajına sahiptir. Bu nedenle, alt katman olarak SI-GaAs kullanan herhangi bir THz anteni için DC yanlılık alanı miktarı sınırlıdır. SI-GaAs ayrıca, LT-GaAs'a kıyasla besleme olarak lazer aydınlatması olmadığında bile daha büyük karanlık akımın üretilmesiyle sonuçlanan daha düşük dirençliliğe sahiptir. Bu, THz anteninin ısınmasına ve daha hızlı bozulmaya yol açacaktır. Son olarak, SI-GaAs, ulaşılabilir spektral aralığı sınırlayan ve daha fazla gürültüye yol açan büyük bir taşıyıcı ömrüne sahiptir.

### **2.5.5. Akım Türü**

İletim bandındaki elektronların hareketinden kaynaklanan iletim akımı, RF/MW'deki akım türüdür. Ancak bununla birlikte THz antenlerde, fotoiletken malzemedeki akım üretimi; fotoiletken alt katmanın ikinci dereceden doğrusal olmayan optik özelliklerinden kaynaklanan, sürüklenme akımı ve yer değiştirme akımı olarak bilinen elektrik ön gerilim alanı altında, elektron-delik çiftlerinin üretimi olan iki olaya atfedilir. Ancak, yer değiştirme akımının etkisi sadece düşük ön gerilimli alanlarda dikkate alınır. Yüksek ön gerilimli alanlarında ( $105 \text{ V.cm}^{-1}$ 'den fazla) sürüklenme akımı baskındır [129,171].

İki anten tipi arasındaki önemli farklar Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. THz ve RF/MW antenlerin karşılaştırılması [135,172].

Parametre	THz Anten	RF/MW Anten
Uyarma kaynağı/Besleme	Lazer darbeleri	İletim hattı
Ön gerilim	Yayıcı: Kullanıyor Alıcı: Kullanmıyor	Yayıcı: Kullanmıyor Alıcı: Kullanmıyor
Alt katman malzemesi	Yüksek dirençli yarı iletken malzeme	Düşük kayıplı dielektrik malzeme
Elektrot malzemesi	AuGe ve Ti/Au	Yüksek İletken metaller
Akım Türü	Sürüklenme ve yer değiştirme akımları	İletim akımı
Üretim	Karmaşık ve pahalı	Nispeten ucuz ve kolay

## BÖLÜM 3

### ALT KATMANIN THz FOTOİLETKEN ANTEN PERFORMANSINA ETKİSİ

FİA'nın radyasyon modelleri ve yayılan gücü, alt katman kalınlığı ve boyutundan önemli ölçüde etkilenmektedir [173]. Bu nedenle, bu bölümde fotoiletken malzemelerin THz FİA performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

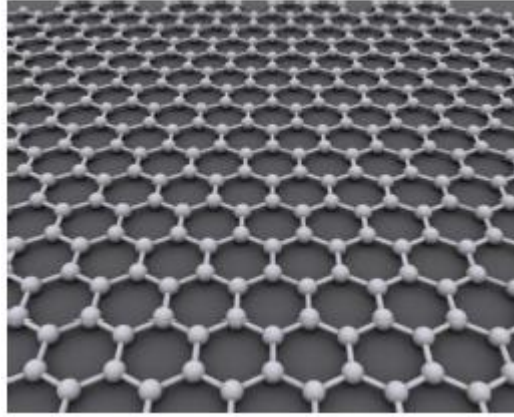
#### 3.1. FOTOİLETKEN MALZEMELER

Bu bölümde, fotoiletken malzeme parametrelerinin THz dalga üretimi ve tespitinde önemli bir rol oynadıkları için THz antenleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun ana nedeni, doğal olarak verimli ve güçlü bir THz emisyonuna izin verecek hiçbir malzemenin bulunmamasıdır. Malzemelerin içsel taşıyıcı ömrü, THz spektrumunun çok yüksek frekans aralıklarına ulaşmak için yeterince hızlı değildir. Bu nedenle, taşıyıcı ömrünü azaltmak amacıyla malzeme çalışmaları çok önemlidir. THz FİA'larda alt katman, yarı iletken olan fotoiletken bir malzemedir [2]. LT-GaAs, ultra kısa taşıyıcı ömrü, nispeten yüksek elektron hareketliliği, yüksek içsel özdirenç ve yüksek kırılma voltajı gibi arzu edilen özellikleri nedeniyle en popüler malzemedir. Çizelge 3.1, THz antenlerinde alt katman olarak kullanılan çeşitli fotoiletken malzemelerin özelliklerini göstermektedir.

Şekil 3.1'deki grafen, bir bal peteği kafesinde düzenlenmiş bir atom kalınlığında karbon atomu tabakası, son zamanlarda yüksek elektron hareketliliği nedeniyle potansiyel bir malzeme olarak büyük ilgi görmüştür [149,174,175].

Çizelge 3.1. Çeşitli fotoiletken malzemelerin özellikleri [149,174,176].

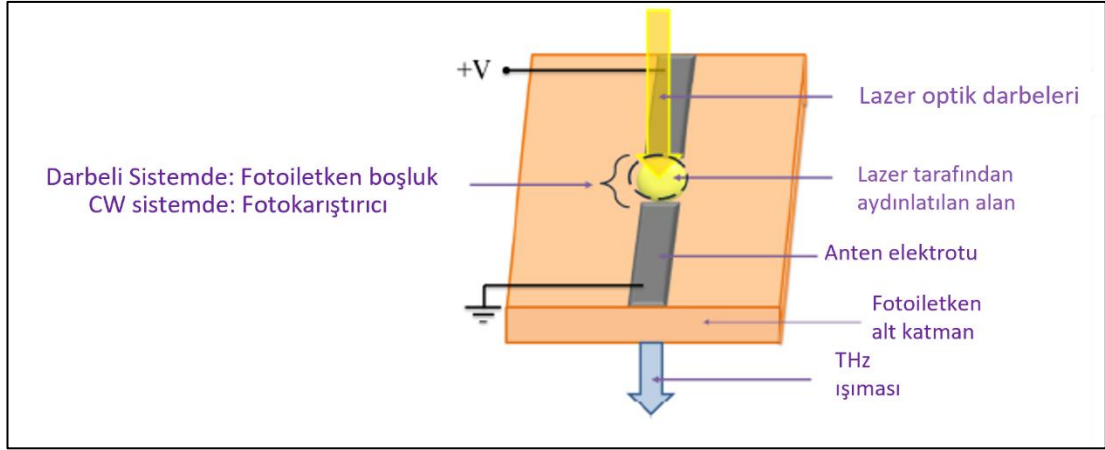
Malzeme	Taşıyıcı ömrü (ps)	Hareketlilik ( $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Direnç ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	Bozulma Gerilimi ( $\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
SI-GaAs	~300	8500	$\sim 10^7$	$4 \times 10^5$
LT-GaAs	<1	200	$> 10^7$	$5 \times 10^5$
LT-InGaAs	LT-GaAs'den daha fazla	26	760	$\sim 6 \times 10^4$
Grafen	N/A	15000	$10^{-6}$	N/A



Şekil 3.1. Grafen 2D gösterimi [2].

Şekil 3.2'de, anten boşluğunu aydınlatan, oda sıcaklığında alt katman malzemesinin bant boşluğundan daha fazla enerjiye sahip bir fs lazer darbesini göstermektedir. Elektron-delik çiftleri, yarı iletken alt katmanda üretilir ve DC ön gerilimle oluşturulan elektrik alan sebebiyle hızlandırılır. Böylece fotoakım üretilir. FİA, THz frekansında bir elektromanyetik dalga yayar. Bu nedenle, fotoiletken malzeme THz dalga üretimi ve tespitinde hayati bir rol oynamaktadır.





Şekil 3.2. Işıma yapan THz antenin şematik diyagramı [135].

### 3.2. ALT KATMANIN THZ ANTENLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Alt katmanın THz Antenlerinin performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çoğu çalışma, alt katman kalınlığı ve alt katmanın boyutlarına odaklanmıştır [173,177,178]. THz aralığında çalışan antenler için, alt katmanın kalınlığı genellikle dalga boyu ile karşılaştırılabilir ve bazen dalga boyundan bile daha yüksektir.

Li vd.'nin yaptığı çalışmada [173] alt katmanın kalınlığının FİA'ların performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada yarı iletken alt katman olarak LT-GaAs seçilmiştir. 50  $\mu\text{m}$  sabit uzunlukta bir dipol anten, CST kullanılarak simüle edilmiş ve alt katman kalınlıkları değiştirilmiştir. FİA'nın radyasyon modellerinin ve yayılan gücünün, alt katman kalınlığı ve boyutundan önemli ölçüde etkilendiği bulundu. Bu arada, Xu vd.'nin yaptığı çalışmada [176] grafen kullanılarak alt katman kalınlığının THz antenin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

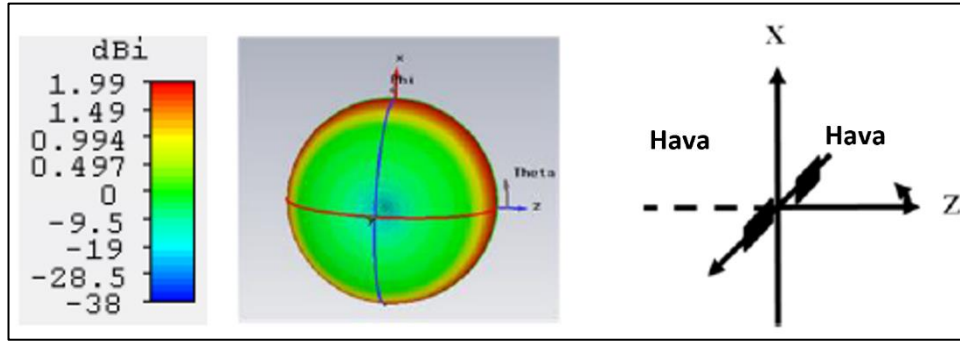
Yüksek güce sahip, yüksek frekanslı bir THz sinyali üretmek için fotoiletken malzemenin üç ana özelliği göstermesi gerekir [155]:

- 1) Antende hızlı akım darbeleri veya CW akım değişimi elde etmek için kısa elektron-delik rekombinasyon süresi
- 2) Bu sinyalleri elde etmek için yüksek taşıyıcı hareketliliği

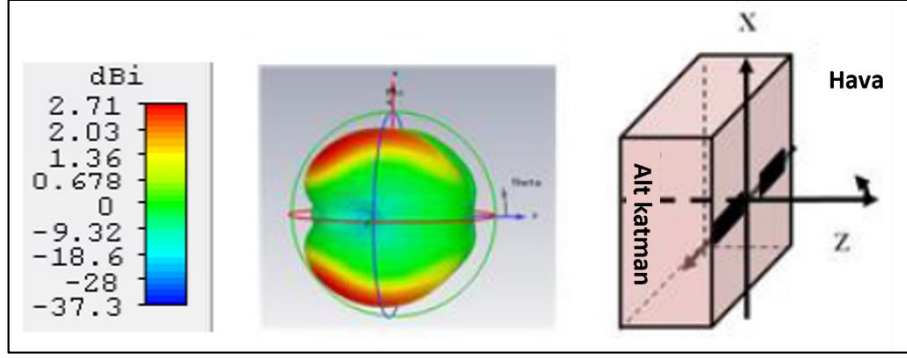
- 3) THz'i verimli şekilde üretmek ve yüksek statik öngerilim voltajını desteklemek için yüksek karanlık direnç.

Yüksek karanlık öz direnç, cihazın performansını etkileyebilecek önemli miktarda ısıya katkıda bulunmadan anten boyunca daha yüksek ön gerilim voltajlarının uygulanmasına izin verir. Martin vd.'nin yaptığı çalışmada [155], GaAs ve InGaAs kullanan fotoiletken cihazlar, malzeme tasarımı ve elektron-boşluk ömrü, taşıyıcı hareketliliği ve öz direnç gibi katı hal metrikleri açısından karşılaştırılmıştır. GaAs'ın yüksek karanlık direnci ve yüksek mobilitesi nedeniyle hala üstün performansa sahip olduğu bulunmuştur [176].

Şekil 3.3, dipol anten boş alana yerleştirildiğinde, antenin azimutta çok yönlü bir desene sahip olduğunu göstermiştir. Dipol antendeki elektrik alan, dik düzlem boyunca her yöne yayılır. Dipol anten fotoiletken bir alt katman üzerinde üretildiğinde, radyasyon modeli asimetrik hale gelir. Bu radyasyon modeli, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi alt katmana [173] doğru gelişmiştir.



Şekil 3.3. Hava ile çevrili dipol anten ve radyasyon modeli [177].



Şekil 3.4. GaAs alt katmanı üzerindeki dipol anten ve radyasyon modeli [177].

Fotoiletken alt katman yüksek geçirgenliğe sahip olduğundan (GaAs için  $\epsilon_r=12.9$ ), gücün çoğu boş alandan ziyade alt katmana doğru yayılır. Bu nedenle, daha önce bahsedilen malzeme özelliklerine ek olarak, düşük geçirgenliğe sahip bir fotoiletken alt katman arzu edilir.

Martin vd.'nin yaptığı çalışmada [155], GaAs ve InGaAs kullanan fotoiletken cihazlar, malzeme tasarımı ve elektron-boşluk ömrü, taşıyıcı hareketliliği ve öz direnç gibi katı hal metrikleri açısından karşılaştırılmıştır. GaAs'ın yüksek karanlık direnci ve yüksek hareketliliği nedeniyle hâlâ üstün performansa sahip olduğu bulunmuştur. Yarı yalıtkan GaAs alt katmanına dayalı fotoiletken dipol anten Xu vd.'nin çalışmasında [176] bir emitör olarak kullanılmıştır. Antenin yüzeyi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ile kaplanır ve daha sonra şeffaf silikon jel ile kapatılır. Anten  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ile kaplandığında THz gücünün 1 kat, arıza geriliminin ise 3 kat arttığı gösterilmiştir. Kaplamalı anten, daha yüksek elektrik alanı nedeniyle daha güçlü THz radyasyonu üretir.

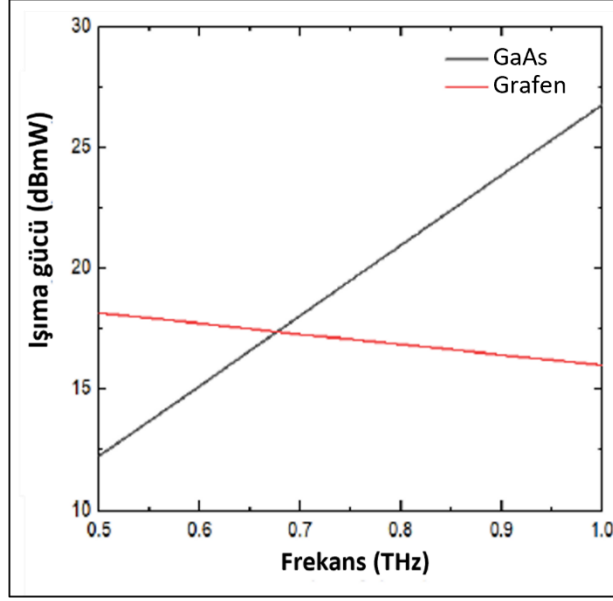
Grafen, bir bal peteği kafesinde düzenlenmiş tek atomlu kalın bir karbon atomu tabakasıdır. İlk olarak 2004 yılında grafitin pul şeklinde dökülmesiyle keşfedilmiştir. Yüksek elektron hareketliliği gibi çekici mekanik, termal ve elektriksel özellikleri nedeniyle grafen, araştırmacılar tarafından potansiyel bir araştırma konusu olarak görülmüştür. Grafenin güneş pillerinde ve ışık yayan cihazlarda, fotodetektörlerde, mikrodalga transistörlerde olası uygulamaları tanımlanmış ve şu anda kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır [149,174–176].

Grafen, özellikleri eşik voltajı uygulanarak kolayca ayarlanabildiğinden önemli bir avantaj sunar. Dragoman vd.'nin çalışmasında [179] bir SiO<sub>2</sub>/Si alt katmanı üzerine büyütülmüş bir grafen tabakası üzerine altın biriktirme ile yapılmış bir dipol anten incelenmiştir. Geçit voltajının ayarlanmasıyla radyasyon modelinden yararlanılabileceği gösterilmiştir. Radyasyon paterni, grafendeki iki direnç durumu tarafından açılır ve kapatılır.

### 3.3. YÜZEY MALZEMESİNİN ETKİSİ

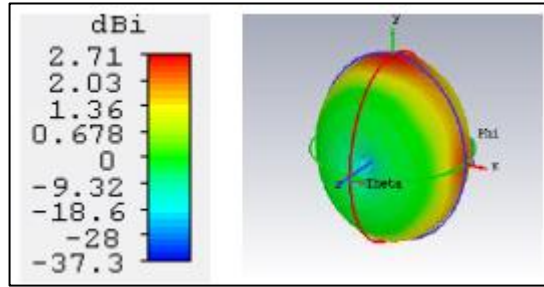
THz FİA için istenen tüm ana malzeme özellikleri göz önüne alındığında, bu çalışmada yarı iletken bir alt katman olarak grafen seçilmiştir. Grafen, düşük geçirgenliğe ( $\epsilon_r=5$ ) ve yüksek taşıyıcı hareketliliğine ( $15\,000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) sahiptir [149,174,175]. 0,5 THz – 1 THz'de çalışan dipol anten, Sonuçlar Li vd.'nin çalışmasındaki [173] gibi küçük bir boşlukla ayrılmış iki elektrot olarak CST'de modellenebilir. Her iki FİA'da kullanılan alt katman boyutu 150  $\mu\text{m}$  uzunluk x 150  $\mu\text{m}$  genişlik ve 150  $\mu\text{m}$  kalınlığa ayarlanmıştır, çünkü bunlar önceki simülasyon sonuçlarında gösterildiği gibi yayılan güç ve toplam verimlilik açısından umut verici sonuçlar veren parametrelerdir. Tüm simülasyonlar CST Microwave Studio kullanılarak yapılmıştır. Jackson vd.'nin çalışmasındaki [177] grafen tabanlı dipol antenin yayılan gücü ve verimliliği, GaAs tabanlı cihazlarıkiyle karşılaştırılır ve sonuçlar aşağıda belirtildiği gibidir.

Şekil 3.9, en yüksek mobiliteye sahip yayılan güç fotoiletken malzemenin 0,5 THz – 0,7 THz'de diğerlerine kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Grafen kullanan anten tarafından yayılan güç, aynı yapıya sahip ancak GaAs alt katmanı kullanan antenden 0,5 THz'de %33 daha fazladır. Frekans arttıkça yayılan güç azalmasına rağmen, güç artışı ilgi çekicidir. Grafenin taşıyıcı hareketliliğinin GaAs'inkinden daha yüksek olduğu için daha büyük fotoakım dolayısıyla daha fazla yayılan güç üretir. Simülasyon sonuçları, [180–182]'deki teori ile iyi bir uyum içindedir.

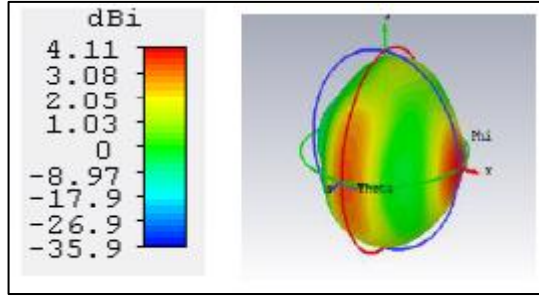


Şekil 3.5. Çeşitli fotoiletken malzemeler için toplam yayılan güç [183].

0.7 THz'den 1 THz'e kadar, simülasyon, alt katman olarak GaAs kullanan FİA'nın yayılan gücünün, alt katman olarak Grafen kullanan FİA'nın yerini aldığını gösterir. Bunun nedeni, GaAs'ın daha yüksek bir dielektrik sabitine sahip olması olabilir. Her iki FİA'nın radyasyon modelleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de gösterilmektedir. GaAs'ta daha yüksek dielektrik sabiti, alt katmana daha fazla enerji çekildiği ve [173]'teki gibi alt katman tarafına yayıldığı gözlemlenebilir.

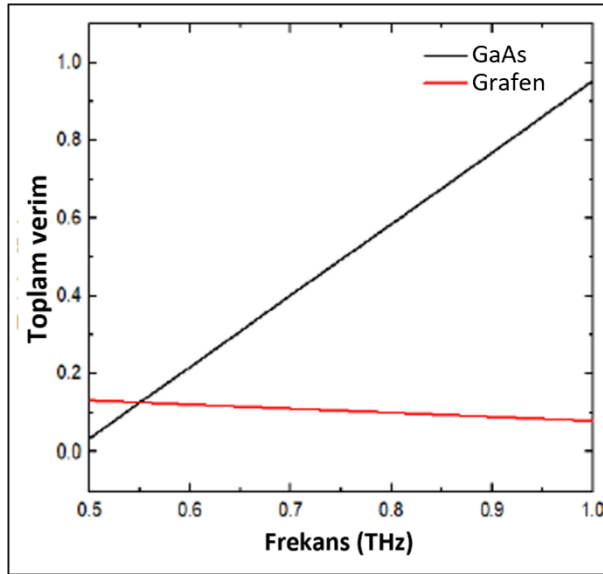


Şekil 3.6. Alt katman olarak GaAs ile [173]'teki bir dipol antenin ışınım modeli.



Şekil 3.7. Alt katman olarak Grafen ile [173]'teki bir dipol antenin ışınım modeli.

Şekil 3.12, sırasıyla alt katman malzemesi olarak GaAs ve grafen kullanan FİA'nın verimliliğini göstermektedir. 0,5 THz – 0,55 THz'de verimlerin 3 kat arttığı gösterilmiştir. Grafen kullanan bir FİA'nın verimliliği 0,55 THz'den 1 THz'e düşmeye devam ediyor. Frekanslar arttıkça verimler düşse de artış umut vericidir. [180–182]'de teorik olarak, verimliliğin fotoiletken malzeme özellikleriyle orantılı olduğu belirtilmişti; dolayısıyla simülasyon sonuçları teoriyi doğrulamaktadır.



Şekil 3.8. Çeşitli fotoiletken malzemeler için toplam verim [183].

THz'deki alt katman etkisi, mikrodalga frekansındaki alt katman etkisine kıyasla önemli rol oynar. 1 THz'de verimlilik, 150  $\mu\text{m}$  x 150  $\mu\text{m}$  x 15  $\mu\text{m}$  boyutlarındaki bir alt katman kalınlığı için 0,9543'tür. Yayılan güç, alt katmanın kalınlığı 15  $\mu\text{m}$  olan minimum boyutta olduğunda daha yüksektir. Bu nedenle, 150  $\mu\text{m}$  x 150  $\mu\text{m}$  x 15  $\mu\text{m}$  boyutları, bir altlık malzemesi üzerinde yapılacak herhangi bir başka çalışma için alt katman boyutları olarak kullanılmıştır.

Ön bulguda, grafenin THz antenleri için alt katman olarak kullanılacak umut verici malzeme olduğu gösterilmiştir. Grafen kullanan antenin tahmini ışınım gücünün, 0,5 THz – 0,7 THz'de altlık olarak GaAs kullanan THz anteninden yayılan güçten %33 daha fazla olduğu bulunmuştur. Gierz vd. tarafından meydana getirilene [184] yeni bir gelişme, grafenin ultra kısa THz darbeleri yayabileceğini göstermişti. Gerçekleştirilen bu deneyde, grafen içindeki elektronlar, kızılötesi lazer ışığı kullanılarak uyarıldı. Grafenin lazer THz radyasyonu yayabildiğini göstermek için deneysel olarak yapılmış bir çalışma olduğunu bilmek gerçekten heyecan verici. Ancak bu bulgu daha ayrıntılı olarak detaylandırılabilir.

## **BÖLÜM 4**

### **ELEKTROT YAPISININ THZ FOTOİLETKEN ANTEN PERFORMANSINA ETKİSİ**

THz gücü, fotoiletken malzeme özellikleri ve elektrot geometrisi ile belirlenebilir. Taşıyıcı sürüklenme süresini en aza indirerek etkin taşıyıcı ömrünün iyileştirilmesi, elektrot tasarımının optimize edilmesiyle sağlanabilir [143,185]. Elektrot ne kadar uzun olursa, rezonans frekansının daha da aşağı kaydığı bulunmuştur. Rezonans frekansı ne kadar düşükse, daha yüksek THz frekansında verim o kadar düşük olacaktır. Doğru elektrot malzemesi ile yüksek optik güç bağlantısı elde edilebilir. Bu, daha yüksek THz radyasyon gücüne yol açacak bir FİA'nın dönüştürme verimliliğini artıracak faktörlerden biri olacaktır.

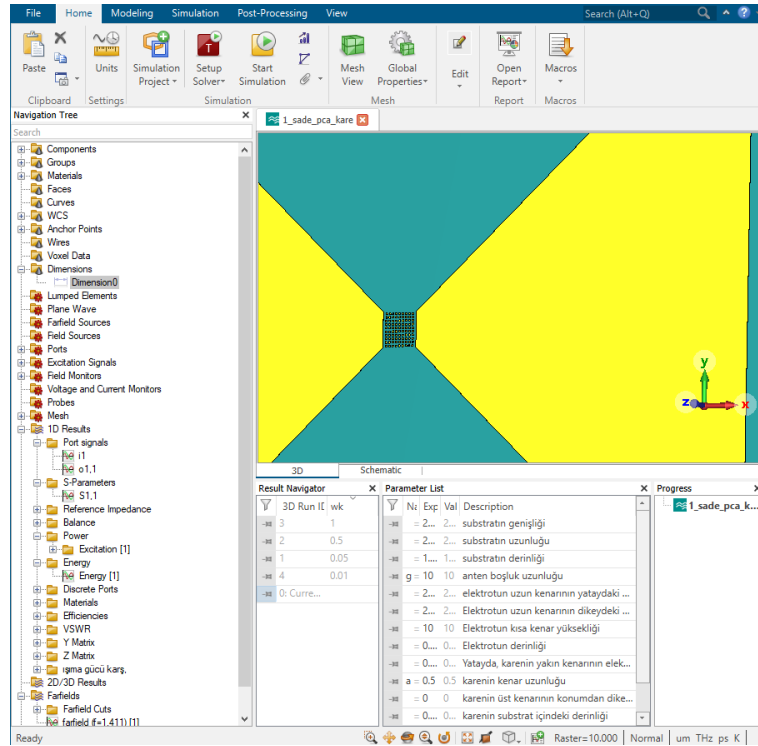
#### **4.1. CST KULLANARAK ELEKTROT YAPISI ÇALIŞMASI**

##### **4.1.1. CST Hakkında**

CST Studio Suite, elektromanyetik bileşenleri ve sistemleri tasarlamak, analiz etmek ve optimize etmek için yüksek performanslı bir 3D elektromanyetik analiz yazılım paketidir. EM spektrumundaki uygulamalar için elektromanyetik alan çözücüler, CST Studio'da tek bir kullanıcı arabiriminde bulunur. Çözücüler, hibrit simülasyonlar gerçekleştirmek için birleştirilebilir, bu da araştırmacılara birden fazla bileşenden oluşan tüm sistemleri verimli ve basit bir şekilde analiz etme esnekliği sağlar. Diğer simülasyon ürünleriyle ortak tasarım, elektromanyetik simülasyonunun tasarım akışına entegre edilmesini sağlar ve geliştirme sürecini en erken aşamalardan itibaren yönlendirir. Elektromanyetik analizin ortak konuları arasında antenlerin ve filtrelerin performansı ve verimliliği, elektromanyetik uyumluluk ve girişim insan vücudunun elektromanyetik alanlarına maruz kalması, motorlar ve jeneratörlerdeki elektromekanik etkiler ve yüksek güçte termal etkiler yer alır.



CST Studio, dünyanın önde gelen teknoloji ve mühendislik şirketlerinde kullanılmaktadır. Daha kısa geliştirme döngülerini kolaylaştırarak ve maliyetleri düşürerek piyasaya önemli avantajlar sunar. Simülasyon, sanal prototiplemenin kullanılmasını sağlar. Cihaz performansı optimize edilebilir, olası uyumluluk sorunları tasarım sürecinin erken aşamalarında belirlenebilir ve hafifletilebilir, gerekli fiziksel prototip sayısı azaltılabilir ve test başarısızlıkları ve geri çağırma riskleri en aza indirilebilir. CST'nin kullanıcı arayüzü Şekil 4.1'de gösterildiği gibidir.



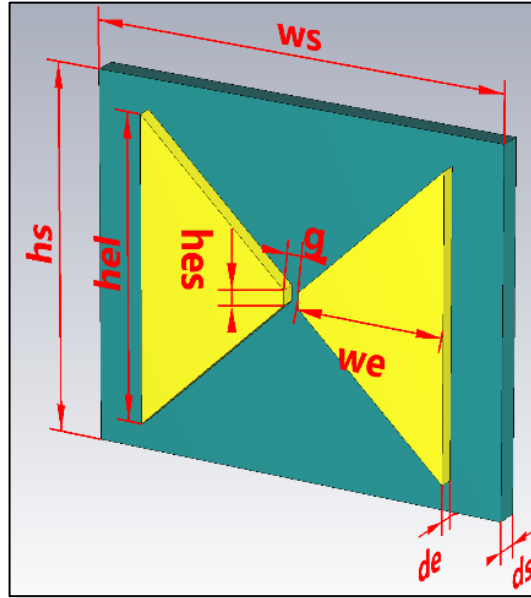
Şekil 4.1. CST'nin kullanıcı arayüzü.

## 4.2. ANTEN YAPISININ SİMÜLASYONLARI

Papyon, dipol ve vivaldi fotoiletken antenlerin elektrot malzemesi altın, kalay ve platin olarak tasarlanıp analizleri yapılmıştır. Elektrot malzemesi olarak kalay seçildiğinde altından daha yüksek yönlülük ve platin seçildiğindeyse en yüksek yönlülük elde edilmiştir.

#### 4.2.1. Papyon FİA'da Elektrot Malzemesinin Yönlülüğe Etkisi

Simülasyonu yapılacak papyon FİA'nın parametreleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. parametrelerin değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Elektrot malzemesi olarak altın, platin ve kalay kullanılmıştır. Papyon anten tasarlanırken alt katman olarak quartz, GaAs, grafen ve LT-GaAs kullanılarak CST MW Studio programında simülasyonları yapılmıştır. En iyi S11 ve yönlülük değeri LT-GaAs alt katman olarak kullanılınca elde edilmiştir. Bu sebeple alt katman malzemesi olarak bu antende LT-GaAs kullanılmıştır.

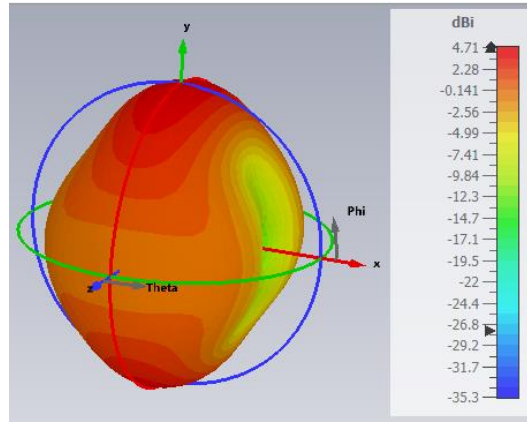


Şekil 4.2. Papyon FİA'nın şekli ve parametreleri

Çizelge 4.1. Sade Papyon FİA'nın parametre değerleri

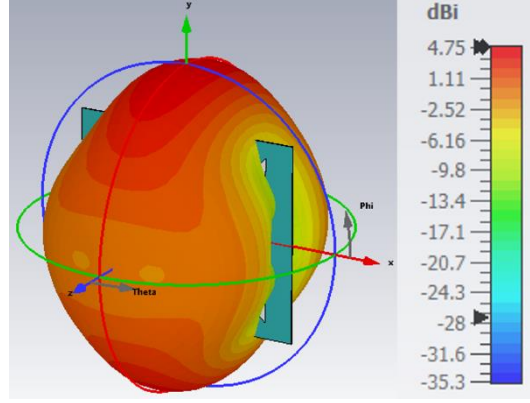
Parametre	Parametrenin Açıklanması	Değeri( $\mu\text{m}$ )
ws	Alt katmanın genişliği	280
hs	Alt katmanın yüksekliği	240
ds	Alt katmanın derinliği	1.5
hel	Elektrotun uzun kenarının yüksekliği	200
hes	Elektrotun kısa kenarının yüksekliği	10
we	Elektrotun uzun kenarı ile kısa kenarı arası genişlik	100
de	Elektrotun derinliği	0.01
g	Elektrotlar arası boşluk	10

Elektrot malzemesi olarak altın seçildiğinde papyon FİA'nın yönlülüğü 4.71 dBi değerinde olduğu Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



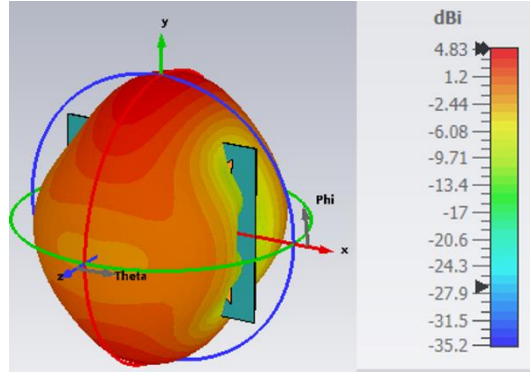
Şekil 4.3. Altın elektrotlu papyon FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Papyon FİA'nın elektrot malzemesi kalay olarak seçildiğinde antenin yönlülüğü 4.71 dBi değerinde olduğu Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



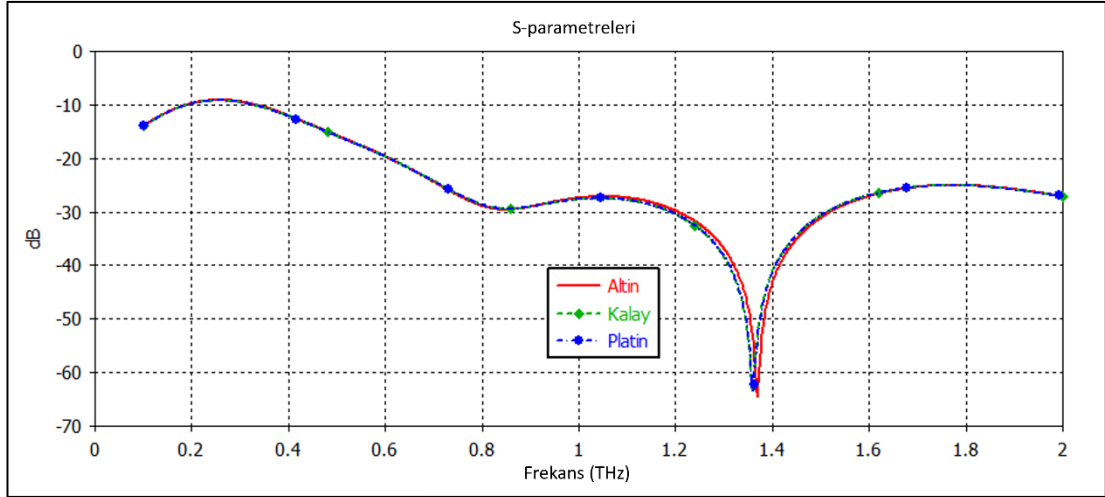
Şekil 4.4. Kalay elektrotlu papyon FIA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Papyon FIA'nın elektrot malzemesi platin olarak seçildiğinde antenin yönlülüğü 4.83 dBi değerinde olduğu Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Platin elektrotlu papyon FIA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Altın, kalay ve platin elektrotlu papyon FIA'ların geri dönüş kayıp değerleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Farklı elektrot malzemelerine sahip papyon FİA'nın S11 değerleri.

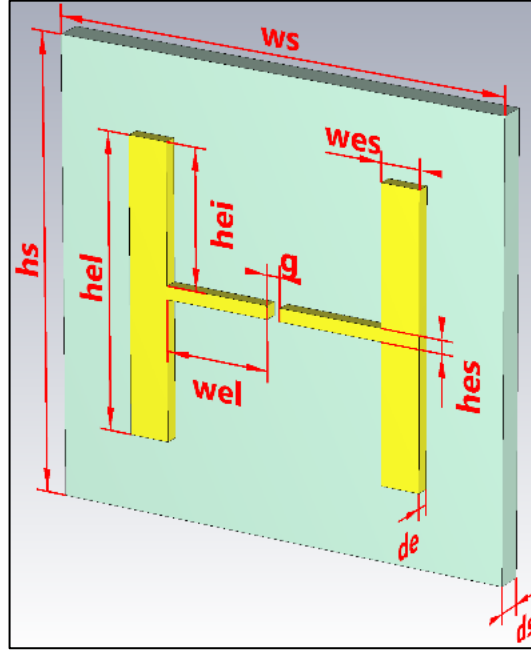
Şekil 4.6'da görüldüğü üzere 3 farklı elektrot malzemesinde de papyon FİA, 1.3 THz rezonans frekansı civarında ışına yapmıştır. Antenlerin malzeme uyumu ve geometrisinin çok iyi olduğu dönüş kaybının -60 dB seviyesinde olmasından anlaşılmaktadır. Anten tipi papyon olduğu için bant genişliği neredeyse tam bant olacak şekilde çok geniştir. Antenlerde elektrot malzemesi olarak sırayla altın, kalay ve platin kullanılıncaya kadar bizim bildiğimiz ilk defa elektrot malzemesi olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Anten elektrot malzemesi olarak kalay ve platin kullanımının geleneksel altın elektrotlu papyon FİA'ya göre daha yüksek yönlülüğü sağladığı gösterildi. Bu antenlerin S11, bant genişliği, rezonans frekansı ve yönlülük değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Elektrot malzemeleri farklı papyon FİA'ların simülasyon analiz sonuçları.

Elektrot Malzemesi	En düşük S11 (dB)	Rezonans Frekansı (THz)	Bant Genişliği (THz)	Yönlülük (dBi)
Altın	-64,5	1,36	1,66	4,71
Kalay	-63	1,35	1,68	4,75
Platin	-63,4	1,35	1,66	4,83

#### 4.2.2. Dipol FIA'da Elektrot Malzemesinin Yönlülüğe Etkisi

Simülasyonu yapılacak dipol FIA'nın parametreleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir. parametrelerin değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Elektrot malzemesi olarak altın, platin ve kalay kullanılmıştır. Papyon anten tasarlanırken alt katman olarak quartz, GaAs, grafen ve LT-GaAs kullanılarak CST MW Studio programında simülasyonları yapılmıştır. En iyi S11 ve yönlülük değeri quartz alt katman olarak kullanılınca elde edilmiştir. Bu sebeple alt katman malzemesi olarak bu antende quartz kullanılmıştır.

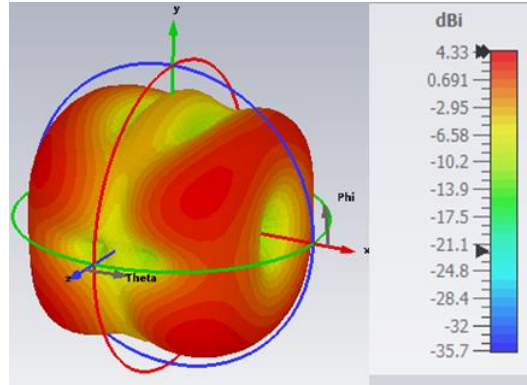


Şekil 4.7. Dipol FIA'nın şekli ve parametreleri.

Çizelge 4.3. Dipol FİA'nın parametre değerleri

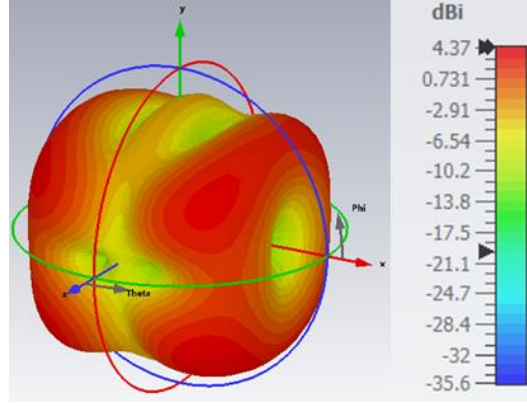
Parametre	Parametrenin Açıklanması	Değeri( $\mu\text{m}$ )
ws	Alt katmanın genişliği	350
hs	Alt katmanın yüksekliği	340
ds	Alt katmanın derinliği	1.5
hel	Elektrotun uzun kenarının yüksekliği	220
hes	Elektrotun kısa kenarının yüksekliği	10
wel	Elektrotun uzun kenarı ile kısa kenarı arası genişlik	80
wes	Uzun elektrotun genişliği	30
de	Elektrotun derinliği	0.02
g	Elektrotlar arası boşluk	10

Elektrot malzemesi olarak altın seçildiğinde dipol FİA'nın yönlülüğü 4.33 dBi değerinde olduğu Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



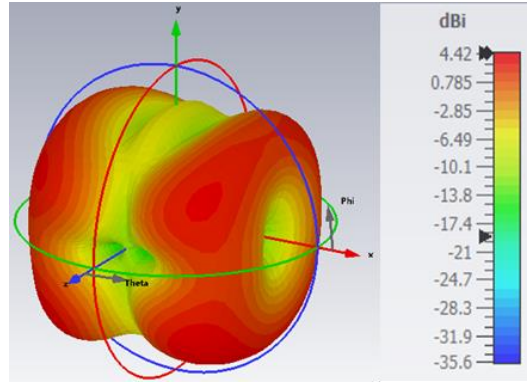
Şekil 4.8. Altın elektrotlu dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Dipol FİA'nın elektrot malzemesi kalay olarak seçildiğinde antenin yönlülüğü 4.37 dBi değerinde olduğu Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Kalay elektrotlu dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Dipol FİA'nın elektrot malzemesi platin olarak seçildiğinde antenin yönlülüğü 4.42 dBi değerinde olduğu Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

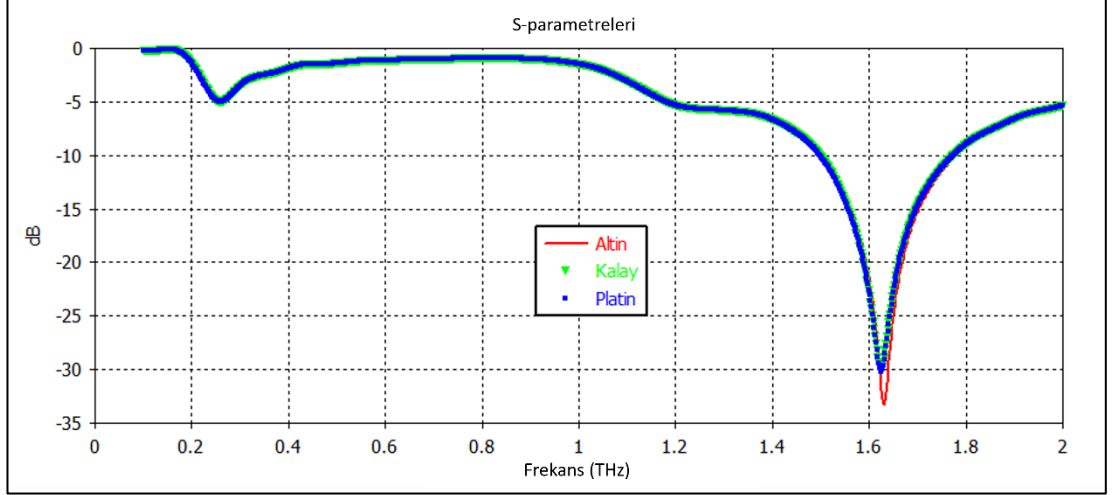


Şekil 4.10. Platin elektrotlu dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Altın, kalay ve platin elektrotlu dipol FİA'ların geri dönüş kayıp değerleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere 3 farklı elektrot malzemesinde de dipol FİA, 1.6 THz rezonans frekansı civarında ışınım yapmıştır. Antenlerin malzeme uyumu ve geometrisinin çok iyi olduğu dönüş kaybının -30 dB seviyesinde olmasından anlaşılmaktadır. Anten tipi dipol olduğu için bant genişliği papyon anten göre daha düşüktür. Antenlerde elektrot malzemesi olarak sırayla altın, kalay ve platin kullanılınca en yüksek yönlülük değerine ulaşılmıştır. Kalay ve platin kullanımı şimdiye kadar bizim bildiğimiz ilk defa elektrot malzemesi olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Anten elektrot malzemesi olarak kalay ve platin kullanımının geleneksel altın elektrotlu dipol FİA'ya göre daha yüksek yönlülüğü sağladığı



gösterildi. Bu dipol FİA'ların S11, bant genişliği, rezonans frekansı ve yönlülük değerleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.



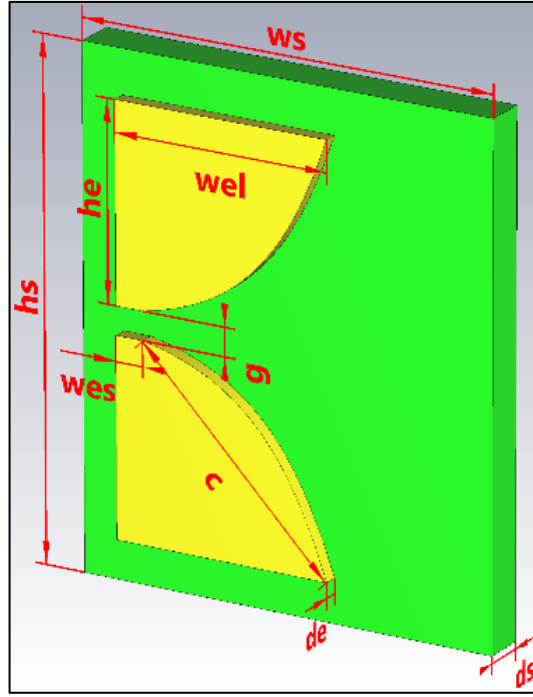
Şekil 4.11. Farklı elektrot malzemelerine sahip dipol FİA'nın S11 değerleri.

Çizelge 4.4. Elektrot malzemeleri farklı dipol FİA'ların simülasyon analiz sonuçları.

Elektrot Malzemesi	En düşük S11 (dB)	Rezonans Frekansı (THz)	Bant Genişliği (THz)	Yönlülük (dBi)
Altın	-33,27	1,63	0,28	4,33
Kalay	-29,92	1,62	0,28	4,37
Platin	-30,16	1,62	0,28	4,42

#### 4.2.3. Vivaldi FİA'da Elektrot Malzemesinin Yönlülüğe Etkisi

Simülasyonu yapılacak vivaldi FİA'nın parametreleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir. parametrelerin değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Elektrot malzemesi olarak altın, platin ve kalay kullanılmıştır. Papyon anten tasarlanırken alt katman olarak quartz, GaAs, grafen ve LT-GaAs kullanılarak CST MW Studio programında simülasyonları yapılmıştır. En iyi S11 ve yönlülük değeri GaAs alt katman olarak kullanılınca elde edilmiştir. Bu sebeple alt katman malzemesi olarak bu antende GaAs kullanılmıştır.

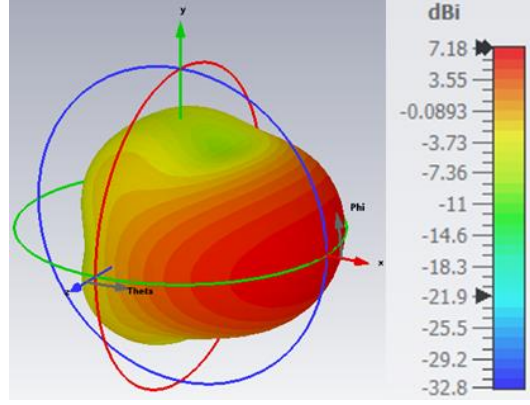


Şekil 4.12. Vivaldi FİA'nın şekli ve parametreleri.

Çizelge 4.5. Vivaldi FİA'nın parametre değerleri

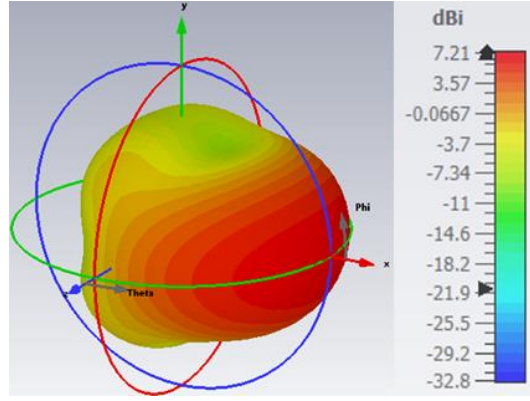
Parametre	Parametrenin Açıklanması	Değeri( $\mu\text{m}$ )
ws	Alt katmanın genişliği	150
hs	Alt katmanın yüksekliği	180
ds	Alt katmanın derinliği	1.5
he	Elektrotun yüksekliği	69,4
wel	Elektrotun uzun kenarının genişliği	77.5
wes	Elektrotun kısa kenarının genişliği	10
de	Elektrotun derinliği	0.05
g	Elektrotlar arası boşluk	10
c	Anten eğrisinin uzunluğu	96.81

Elektrot malzemesi olarak altın seçildiğinde vivaldi FİA'nın yönlülüğü 7.18 dBi değerinde olduğu Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



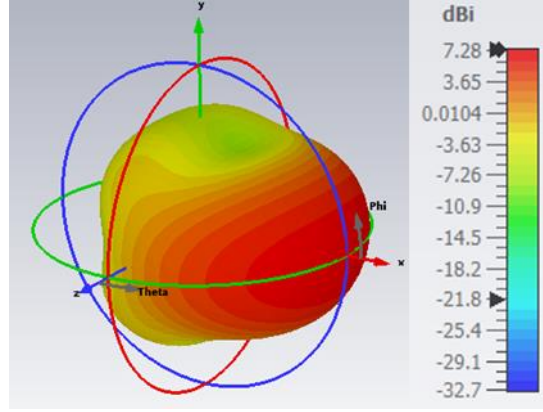
Şekil 4.13. Altın elektrotlu vivaldi FIA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Vivaldi FIA'nın elektrot malzemesi kalay olarak seçildiğinde antenin yönlülüğü 7.23 dBi değerinde olduğu Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



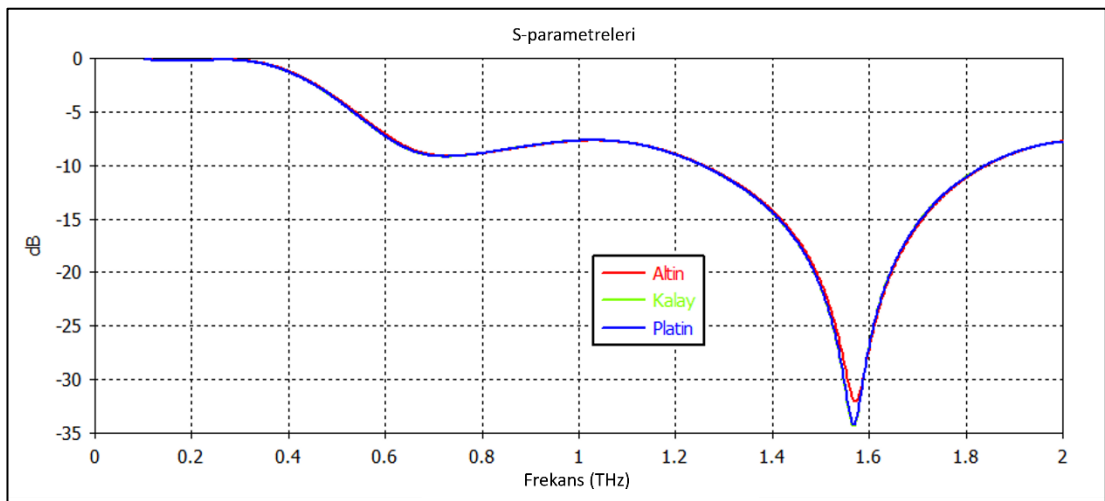
Şekil 4.14. Kalay elektrotlu vivaldi FIA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Vivaldi FIA'nın elektrot malzemesi platin olarak seçildiğinde antenin yönlülüğü 7.28 dBi değerinde olduğu Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Platin elektrotlu vivaldi FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

Altın, kalay ve platin elektrotlu vivaldi FİA'ların geri dönüş kayıp değerleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil 4.16'da görüldüğü üzere 3 farklı elektrot malzemesinde vivaldi FİA, 1.5 THz rezonans frekansı civarında ışınım yapmıştır. Antenlerin malzeme uyumu ve geometrisinin çok iyi olduğu dönüş kaybının -35 dB seviyesinde olmasından anlaşılmaktadır. Anten tipi vivaldi olduğu için yönlülük miktarı diğer antenlere göre daha fazladır. Antenlerde elektrot malzemesi olarak sırayla altın, kalay ve platin kullanılınca en yüksek yönlülük değerine ulaşılmıştır. Kalay ve platin kullanımı şimdiye kadar bizim bildiğimiz ilk defa elektrot malzemesi olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Anten elektrot malzemesi olarak kalay ve platin kullanımının geleneksel altın elektrotlu vivaldi FİA'ya göre daha yüksek yönlülüğü sağladığı gösterildi. Bu vivaldi FİA'ların S11, bant genişliği, rezonans frekansı ve yönlülük değerleri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Farklı elektrot malzemelerine sahip vivaldi FİA'nın S11 değerleri.

Çizelge 4.6. Elektrot malzemeleri farklı vivaldi FİA'ların simülasyon analiz sonuçları.

<b>Elektrot Malzemesi</b>	<b>En düşük S11 (dB)</b>	<b>Rezonans Frekansı (THz)</b>	<b>Bant Genişliği (THz)</b>	<b>Yönlülük (dBi)</b>
Altın	-32,08	1,57	0,58	7,18
Kalay	-34,36	1,56	0,58	7,21
Platin	-34,17	1,56	0,58	7,28

THz fotoiletken antenler için özel simülasyon programı tasarlanmalıdır. Ancak doğru simülasyon araçlarının kullanılması durumunda sonuçların daha doğru olması beklenir. Bunun nedeni, CST'nin elektromanyetik dünyasını tanımlayan Maxwell Denklemlerini kullanan yapılandırılabilir bir araç olmasıdır. Bu denklemler, elektrik ve manyetik alanın nasıl yayıldığını ve etkileştiğini açıklar. Bu denklemler ayrıca elektrik alanının ve manyetik alanının nesnelere nasıl etkilendiğini de açıklar. Yarı iletken ve lazer darbesi arasındaki etkileşimlerin etkileri burada dikkate alınmamış. Bu etkileşimde yer alan fizik simülasyona eklenmelidir. Boşluktaki alt katman fotonlarla aydınlatıldığında, fotonlardan gelen enerji, alt katmanda yük taşıyıcıları üretir. Taşıyıcılara gerilim uygulanırsa, üretilen elektrik alan akımı oluşturan bu taşıyıcıları harekete geçirir.

Alt katmandaki taşıyıcıların zaman içindeki bu davranışı, zaman içinde taşıyıcı konsantrasyonlarındaki değişimi hesaba katan süreklilik denklemleriyle başlar. Taşıyıcı kombinasyonundaki toplam değişiklik, sürüklenme, difüzyon, rejenerasyon/kombinasyon ve fotoüretimi gibi diğer işlemlerden kaynaklanan değişikliklere eşit olmalıdır [186]. Tüm taşıyıcı eyleminin birleşik etkileri aşağıdaki eşitlikleri sağlamalıdır:

$$\frac{\partial n}{\partial t} \Big| = \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{drift}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{diffusion}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{R-G} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{other}} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} \Big| = \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{drift}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{diffusion}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{R-G} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{other}} \quad (4.2)$$

Burada n ve p sırasıyla elektronların ve deliklerin konsantrasyonlarıdır.

Diğer işlemlere bağlı olarak taşıyıcı konsantrasyonundaki değişimi G ve rejenerasyona bağlı taşıyıcı konsantrasyonlarındaki değişimi R olarak tanımlamanın yanı sıra

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{drift}} + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{diffusion}} = \frac{1}{q} \nabla \cdot Jn \quad (4.3)$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{drift}} + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{diffusion}} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot Jp \quad (4.4)$$

$q$ , bir elektronun elektrik yükü olduğunda, elektronlardan kaynaklanan akım yoğunluğu ve deliklerden kaynaklanan akım yoğunluğudur; süreklilik denklemleri daha çok şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot Jn - Rn + Gn \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot Jn - Rn + Gn \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot Jp - Rp + Gp \quad (4.6)$$

Ek olarak, alt katman üzerindeki akımın, yük taşıyıcıların sürüklenmesi ve difüzyonundan kaynaklandığı bilinmektedir. Bu nedenle, aşağıdaki ilişkiler de sağlanmalıdır:

$$Jp = q\mu_p pE - qD_p \nabla p \quad (4.7)$$

$$Jn = q\mu_n nE + qD_n \nabla n \quad (4.8)$$

$\mu_n$  ve  $\mu_p$  sırasıyla elektronların ve deliklerin taşıyıcı hareketliliği olduğunda, E elektrik alanıdır ve  $D_n$  ve  $D_p$  sırasıyla elektronlar ve delikler için taşıyıcı difüzyon katsayılarıdır. Ayrıca kararlı hal koşullarında akım yoğunluğunun olduğu bilinmektedir [187].

$$J = J_n + J_p \quad (4.9)$$

### 4.3. PLAZMONİK META MALZEME KULLANIMI

Yüzey plazmon dalgalarının uyarılması, optik pompanın altından yapılmış nano ızgaralar aracılığıyla foton emici alt katmana iletilmesine izin verir. Yüzey plazmonu, doğru malzeme özelliklerine sahip belirli metallerin yüzeyinde uyarılabilen elektronların hareket eden bir dalga salınımıdır. Bugüne kadar, plazmonik özellikler gösterebilen soy metaller altın veya gümüştür.

[117,143,185,188]'deki makalelerde alt katman, plazmonik fotoiletken malzeme olması durumunda optik pompa yüzey plazmonuna nano ölçekli metalik ızgara aracılığıyla iletilmesini belirtmiştir. Uyarılmış yüzey plazmon dalgaları dielektrik-metal ara yüzeyinde mevcut olduğundan, en yüksek optik absorpsiyon ve fototaşırıyıcı oluşumunun metal kontaklara doğrudan yakınlıkta gerçekleştiği belirtilmektedir. Ancak bununla birlikte, bir yüzey plazmonu yüzey boyunca yayılırken, absorpsiyon nedeniyle metale enerji kaybeder. Bu nedenle, uyarılmış yüzey plazmonunun enerjisini/gücünü/yoğunluğunu çok erken kaybetmesini engellemek için daha büyük yüzey plazmon yayılımı arzu edilir.

Yüzey plazmonu  $\delta_{SPP}$ 'nin yayılma uzunluğu, modun enerji/güç/yoğunluğunun başlangıç değerinin  $1/e$ 'sine düştüğü mesafe olarak tanımlanır.  $\delta_{SPP}$ , yüzey plazmon dalga vektörünün sanal kısmından bulunur.

[12]'den, karmaşık yüzey plazmon dalga vektörü  $k_{SPP}$  şu şekilde tanımlanır:

$$k_{SPP} = k'_{SPP} + ik''_{SPP} \quad (4.10)$$

[13]  $k_{SPP}$ 'den aşağıdaki gibi tanımlanır; burada  $\omega$  açısal frekanstır,  $c$  ışık hızıdır ve  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_d$  sırasıyla metal ve dielektriklerin bağıl geçirgenliğidir.

$$k_{SPP} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}} \quad (4.11)$$

ve  $k'_{SPP}$ , yüzey plazmon dalga vektörünün gerçekte kısmı

$$k'_{SPP} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon'_m}{\varepsilon_d + \varepsilon'_m}} \quad (4.12)$$

$k''_{SPP}$ , yüzey plazmon dalga vektörünün sanal kısmı iken,  $k_0$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  olan hafif serbest uzaydır.

Böylece,

$$k''_{SPP} = k_0 \frac{\varepsilon''_m}{2(\varepsilon'_m)^2} \left( \frac{\varepsilon_d \varepsilon'_m}{\varepsilon_d + \varepsilon'_m} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.13)$$

Yüzey plazmon yayılma uzunluğu  $\delta_{SPP}$  olduğundan, modun gücünün/yoğunluğunun başlangıç değerinin 1/e'sine düştüğü mesafe

$$\delta_{SPP} = \frac{1}{2k''_{SPP}} \quad (4.14)$$

[12]'den verilen, yüzey plazmonunun dalga boyu,  $\lambda_{SPP}$  ve  $\lambda_0$ , boş uzayın dalga boyudur

$$\frac{\lambda_{SPP}}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_d + \varepsilon'_m}{\varepsilon_d \varepsilon'_m}} \quad (4.15)$$

Böylece

$$\delta_{SPP} = \lambda_0 \frac{(\varepsilon'_m)^2}{2\pi(\varepsilon''_m)} \left( \frac{\varepsilon_d + \varepsilon'_m}{\varepsilon_d \varepsilon'_m} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.16)$$

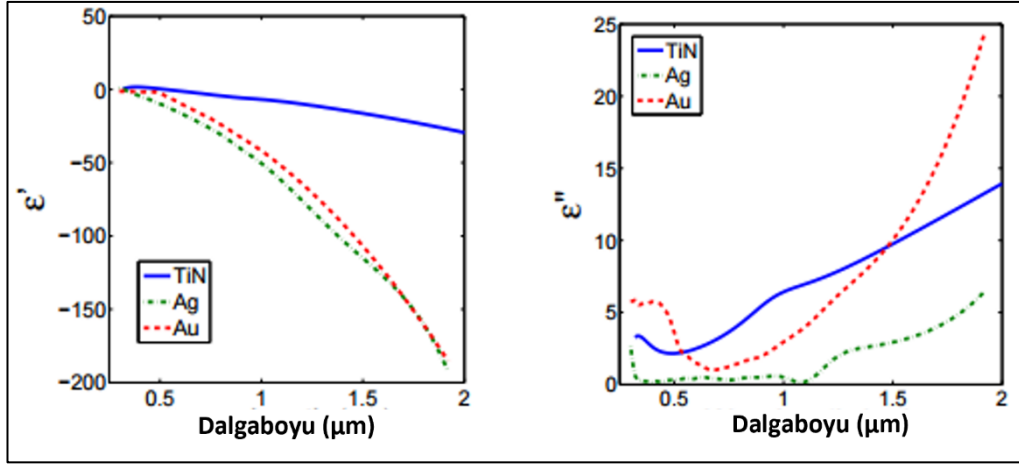


Eşitlik (4.8)'den, daha uzun yayılma uzunluğuna sahip olmak için metalin büyük gerçek parçasına ve metalin küçük sanal parçasına ihtiyaç vardır [189,190]. Böylece, plazmonik meta malzeme, metalin büyük gerçek kısmına ve küçük sanal kısma sahip olduğu için kriterlere uyar. Bu, yüzey plazmonu ile optik pompa arasındaki bağlantının nano ölçekli ızgaralar yoluyla iletilmesi için uyarılmış yüzey plazmonunun enerjisini çok erken kaybetmemesini sağlayacaktır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin dielektrik sabiti, elektriksel ve ısı iletkenliği gibi karakteristik değerleri Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. CST MW Studio simülasyon programı bu değerleri kullanarak önceki bölümlerde verilen formüllerle FDTD yöntemini birleştirip FİA'ların ışımaya paternlerini ve S11 parametrelerini çıktı olarak vermektedir.

Çizelge 4.7. FİA'da kullanılan malzemelerin karakteristik değerleri.

Adı	Elektron mobilitesi ( $\mu$ ) ( $cm^2/V.s$ )	Dielektrik sabiti ( $\epsilon$ )	Yoğunluk ( $\rho$ ) ( $kg/m^3$ )	Isıl iletkenlik ( $\lambda$ ) ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )	Elektriksel iletkenlik ( $\sigma$ ) ( $S/m$ )	Young (sertlik) Katsayısı ( $kN/mm^2$ )
GaAs	1150	12.94	5320	54	-	85
Quartz	29	3.75	2200	5	-	75
LT-GaAs	1350	12.94	5320	54	$0.11 \times 10^4$	85
Altın	-	-	19320	314	$4.56 \times 10^7$	78
Kalay	-	-	7300	66.6	$8.69 \times 10^6$	41.1
Platin	-	-	21450	70	$9.52 \times 10^6$	171

Titanyum Nitrürün (TiN) dielektrik fonksiyonu üzerinde, Şekil 4.20'de gösterildiği gibi [191,192]'deki geleneksel plazmonik malzemelerin aksine bir karşılaştırma yapılır. Bu yüksek potansiyelli plazmonik metamateryallerin gerçek kısmının daha önemli olduğunu kanıtlar.



Şekil 4.17. Plazmonik metamalzeme TiN'nin geleneksel metallerle dielektrik işlevi üzerinde yapılan karşılaştırma [191,192].

Titanyum Nitrürün (TiN) sanal kısmı, geleneksel metallerle karşılaştırılabilir. Böylece bu, plazmonik meta malzemenin Altın veya Gümüş gibi geleneksel metallerin yerini almak için mükemmel bir aday olduğunu kanıtlar.

## BÖLÜM 5

### ÖNERİLEN FOTOİLETKEN ANTEN

FİA'lerden üretilen THz ışımalarının yüksek güçlü olmasını sağlamak veya optik-THz dönüştürme verimliliğini arttırmak temelde iki esasa dayanmaktadır; birincisi fototaşıyıcı yoğunluğunun değişimi ikincisi ise fototaşıyıcıların hızındaki değişimdir[193,194]. FİA'da fototaşıyıcı yoğunluğunun artışı sınırlandırılan dolayısıyla ışımının gücünü, yönlülüğünü azaltan etki gecikme doyumu veya perdeleme etkisi diye bilinen olaydır. Perdeleme etkisini azaltmak için optik darbenin uygulandığı elektrotlar arası aralığa iletken NP'ler eklenmektedir. İletken NP'lerin eklenmesiyle yüksek hızlı optik darbenin emilimi arttırılmış ve daha kısa ömürlü fototaşıyıcı elde edilmiştir. Perdeleme etkisinin azaltılmasını sağlamak için NP'ler üç boyutlu bir şekilde elektrotlar arası bölgenin üstüne yerleştirme şeklinde değil bizzat içine gömülmelidir[195,196]. Eklenen NP'ler yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır[197]. FİA'da ışıma için kullanılacak gücün bir kısmı da alt katman malzemesinde harcanmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için anten yüzeyinde slotlar açılmaktadır. Açılan slotlar yüzey dalgası kaybını azaltarak optik-THz dönüşüm oranını ve yönlülüğü arttırmaktadır. Slot açılırken rastgele bir şekil belirlemek yerine belirli geometrik şekillerde açılması kıyaslama açısından daha verimli olmaktadır[198,199].

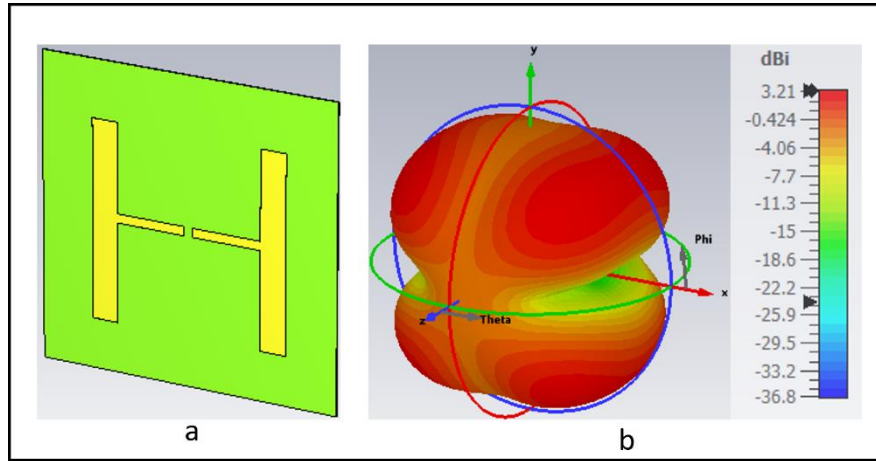
Bu bölümde öncelikle pek çok farklı şekillerde FİA tasarımı yapılmıştır daha sonra özellikle de FİA'nın yönlülüğünü arttırmak için antenin elektrotlar arası boşluğuna belirli geometrik şekillerde altın NP'ler eklenmiştir. Eklenen altın NP'lerin geometrisi silindir, üçgen, kare ve altıgen olacak şekilde seçilmiştir. Anten tipi olarak papyon, dipol, log spiral ve vivaldi antenler üzerinden çalışma yapılmıştır. Önce geleneksel FİA'ların analizi CST MW Studio simülasyon programında yapılmıştır. Daha sonra bahsi geçen geometrik şekiller eklenerek yeni FİA'ların analizi yapılmıştır.

## 5.1. ÇEŞİTLİ FOTOİLETKEN ANTENLERİN TASARIMI

Dipol, log spiral, vivaldi ve Papyon Fotoiletken tasarımları CST MW Studio programında yapılmıştır. Antenlerde alt katman olarak GaAs, LT-GaAs, Quartz ve grafen kullanılmıştır. Elektrot malzemesi olarak altın kullanılmıştır.

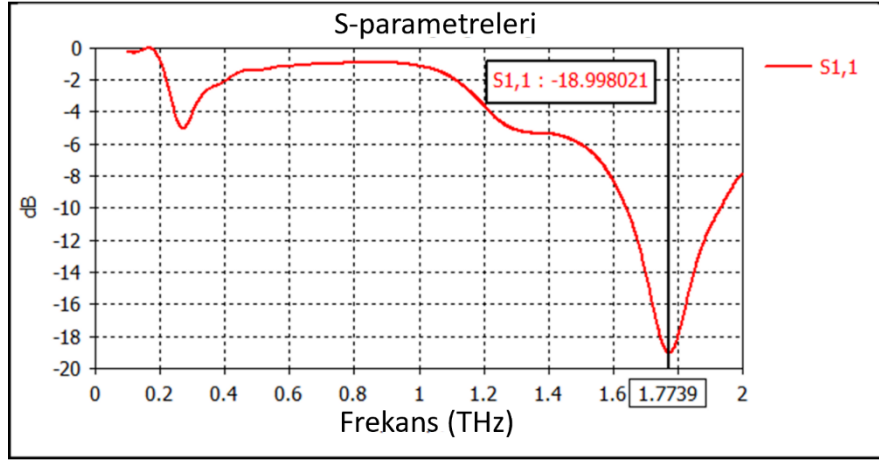
### 5.1.1. Dipol FİA Tasarımları

Şekil 5.1’de GaAs alt katmanlı dipol FİA gösterilmektedir. Bu antenin alt katman malzemesi GaAs olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları 350x240  $\mu\text{m}$ ’dir. Alt katman malzemesinin derinliği 1.5  $\mu\text{m}$ ’dir. Elektrotlar altındır. Elektrot malzemesinin derinliği 0.02  $\mu\text{m}$ ’dir. Anten en fazla 3.21 dBi değerinde yönlülüğe sahiptir. Elektrotlar arası boşluk uzunluğu 10  $\mu\text{m}$ ’dir.



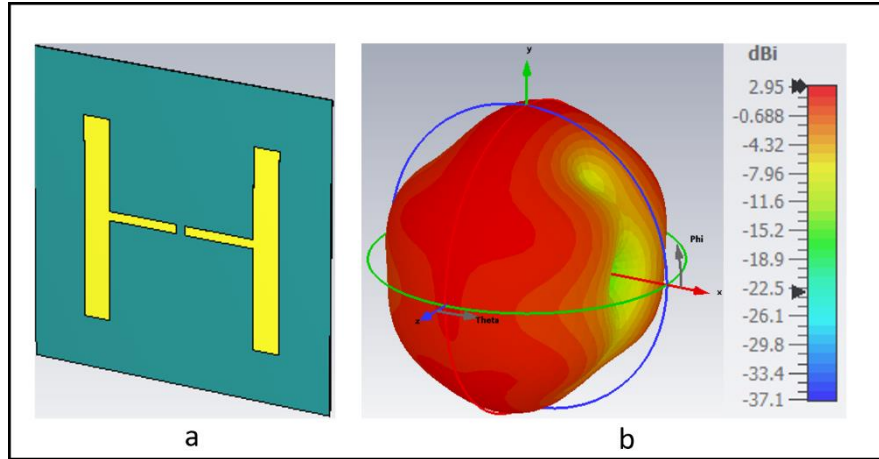
Şekil 5.1. a) GaAs alt katmanlı dipol FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.

Şekil 5.1’de gösterilen dipol FİA’nın S11 parametreleri şekil 5.2’de gösterilmiştir. Antenin rezonans frekansı 1.77 THz, bant genişliği 0.3 THz ve en düşük S11 değeri -18.99 dB’dir.



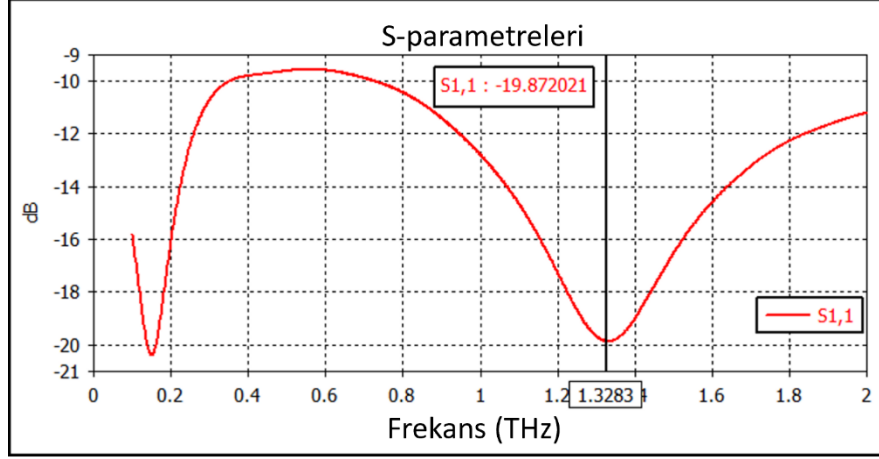
Şekil 5.2. GaAs alt katmanlı dipol FİA'nın S11 parametreleri.

Şekil 5.3'te LT-GaAs alt katmanlı dipol FİA gösterilmektedir. Bu antenin alt katman malzemesi LT-GaAs olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları  $350 \times 240 \mu\text{m}$ 'dir. Alt katman malzemesinin derinliği  $1.5 \mu\text{m}$ 'dir. Elektrotlar altındır. Elektrotlar arası boşluk uzunluğu  $10 \mu\text{m}$ 'dir. Elektrot malzemesinin derinliği  $0.02 \mu\text{m}$ 'dir. Anten en fazla 2.95 dBi değerinde yönlülüğe sahiptir.



Şekil 5.3. a) LT-GaAs alt katmanlı dipol FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.

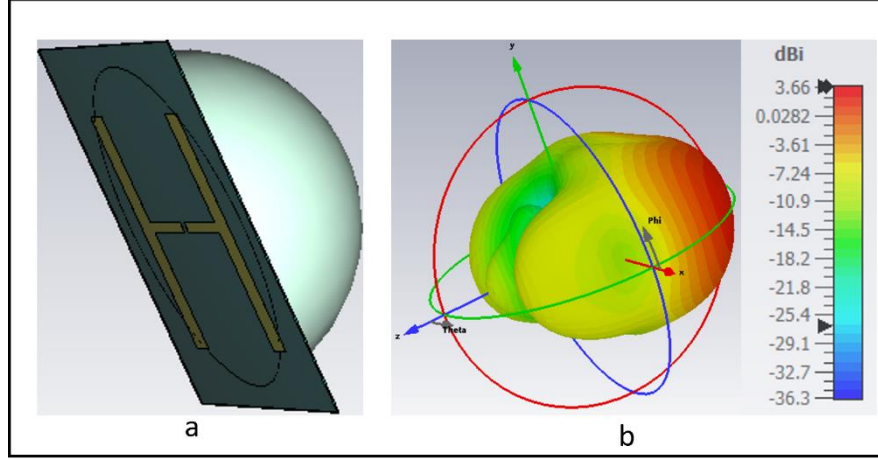
Şekil 5.3'te gösterilen LT-GaAs alt katmanlı dipol FİA'nın S11 parametreleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Antenin rezonans frekansı 1.32 THz, bant genişliği 1.25 THz ve en düşük S11 değeri -18.99 dB'dir



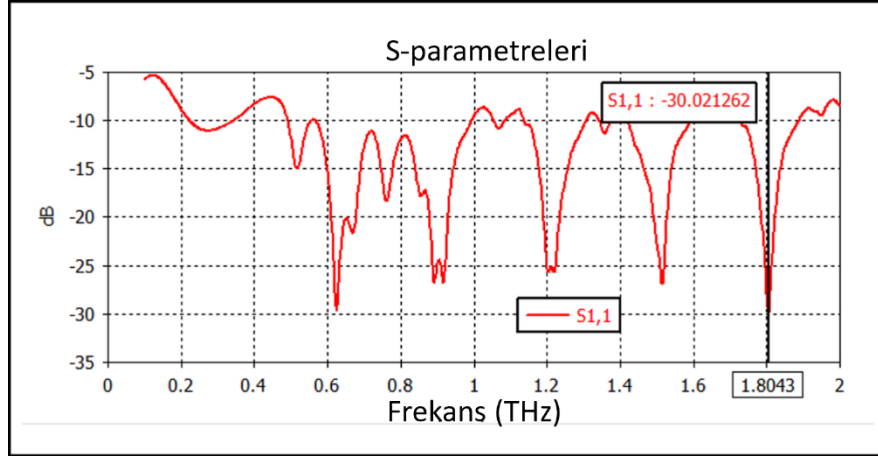
Şekil 5.4. LT-GaAs alt katmanlı dipol FİA'nın S11 parametreleri.

Şekil 5.5'te LT-GaAs alt katmanlı dipol FİA'ya yarım küre şeklinde Si lens eklenmiştir. Bu antenin alt katman malzemesi LT-GaAs olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları 350x240  $\mu\text{m}$ 'dir. Alt katman malzemesinin derinliği 1.5  $\mu\text{m}$ 'dir. Elektrotlar altındır. Elektrotlar arası boşluk uzunluğu 10  $\mu\text{m}$ 'dir. Elektrot malzemesinin derinliği 0.02  $\mu\text{m}$ 'dir. Eklenen lensin yarı çapı 150  $\mu\text{m}$ 'dir. Anten en fazla 3.66 dBi değerinde yönlülüğe sahiptir.

LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA'nın S11 parametreleri Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Antende birden fazla rezonans frekansı meydana gelmiştir. En düşük S11 değerine sahip rezonans frekansı 1.8 THz, bant genişliği 0.15 THz ve en düşük S11 değeri -29.84 dB'dir



Şekil 5.5. a) LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.



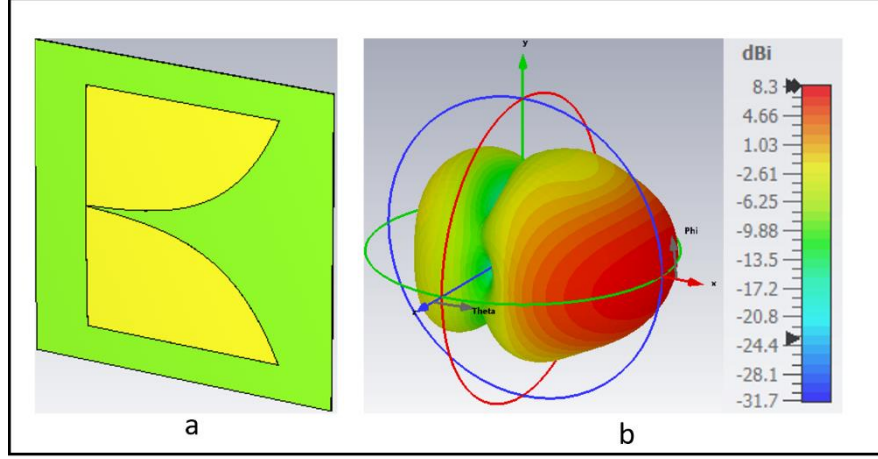
Şekil 5.6. LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA'nın S11 parametreleri.

Dipol antene yarım küre şeklindeki Si lens eklenmesiyle anten yönlülüğü 2.95 dBi'den 3.66 dBi'ye yükselmiştir. Ancak anten S11 parametresinde bir düzensizlik meydana gelmiştir. Birden fazla rezonans frekansı ortaya çıkmıştır. Antenin bant genişliği 1.25 THz'den 0.32 THz'e düşmüştür. Si lensli FİA'nın üretimi ayrıca oldukça zordur.

### 5.1.2. Vivaldi FİA Tasarımları

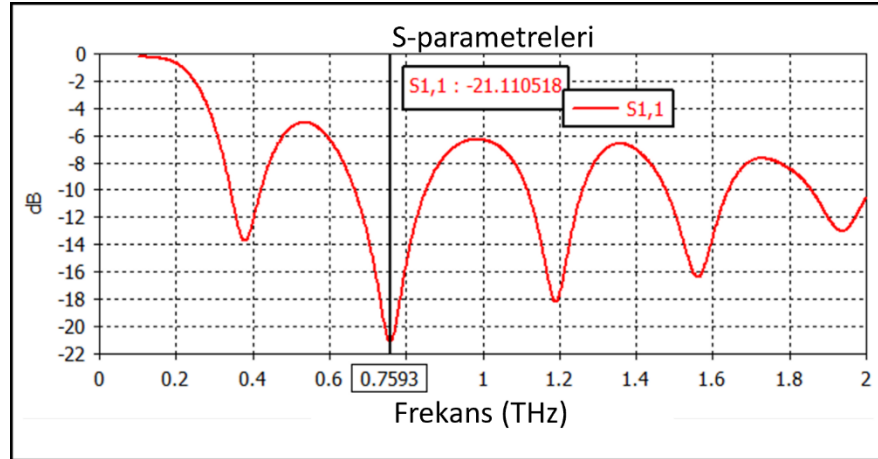
Şekil 5.7'de GaAs alt katmanlı vivaldi FİA gösterilmektedir. Bu antenin alt katman malzemesi GaAs olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları 350x340  $\mu\text{m}$ 'dir. Alt katman malzemesinin derinliği 1.3  $\mu\text{m}$ 'dir. Elektrotlar altındır. Elektrot malzemesinin

derinliği  $0.06 \mu\text{m}$ 'dir. Anten en fazla  $8.3 \text{ dBi}$  değerinde yönlülüğe sahiptir. Elektrotlar arası boşluk uzunluğu  $0.6 \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 5.7. GaAs alt katmanlı vivaldi FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.

GaAs alt katmanlı vivaldi FİA'nın S11 parametreleri şekil 5.8'de gösterilmiştir. Antende pek çok rezonans frekansı meydana gelmiştir. Antenin en verimli rezonans frekansı  $0.75 \text{ THz}$ , bant genişliği  $0.18 \text{ THz}$  ve en düşük S11 değerı  $-21.1 \text{ dB}$ 'dir.

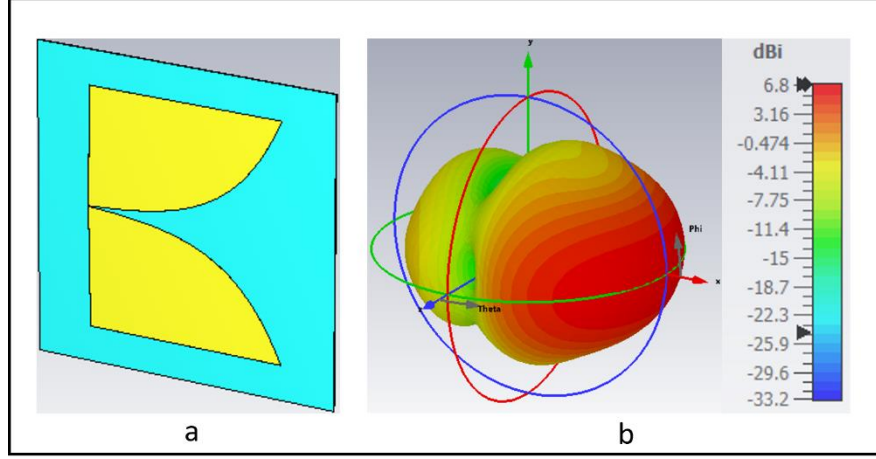


Şekil 5.8. GaAs alt katmanlı vivaldi FİA'nın S11 parametreleri.

Şekil 5.9'da Quartz alt katmanlı vivaldi FİA gösterilmektedir. Bu antenin alt katman malzemesi quartz olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları  $350 \times 340 \mu\text{m}$ 'dir. Alt katman malzemesinin derinliği  $1.3 \mu\text{m}$ 'dir. Elektrotlar altındır. Elektrot malzemesinin

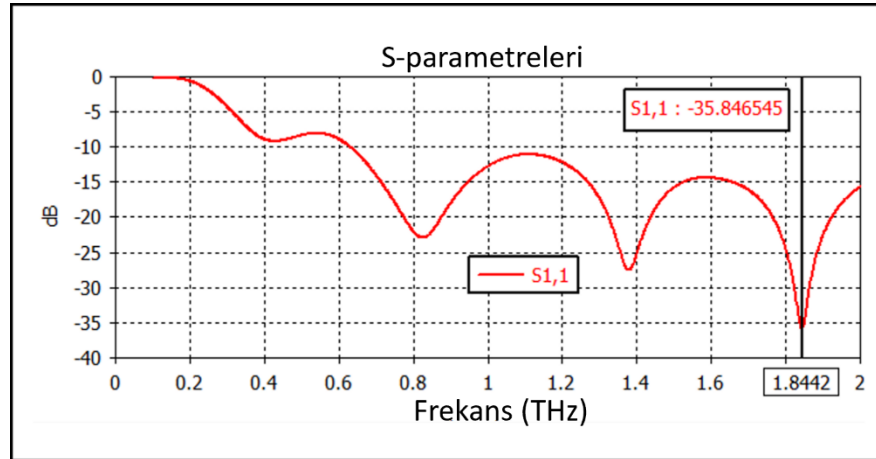


derinliği  $0.06 \mu\text{m}$ 'dir. Anten en fazla 6.8 dBi değerinde yönlülüğe sahiptir. Elektrotlar arası boşluk uzunluğu  $0.6 \mu\text{m}$ 'dir.



şekil 5.9. Quartz alt katmanlı vivaldi FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.

Quartz alt katmanlı vivaldi FİA'nın S11 parametreleri şekil 5.10'da gösterilmiştir. Antende pek çok rezonans frekansı meydana gelmiştir. Antenin en verimli rezonans frekansı 1.84 THz, bant genişliği 1.36 THz ve en düşük S11 değerı -35.8 dB'dir.



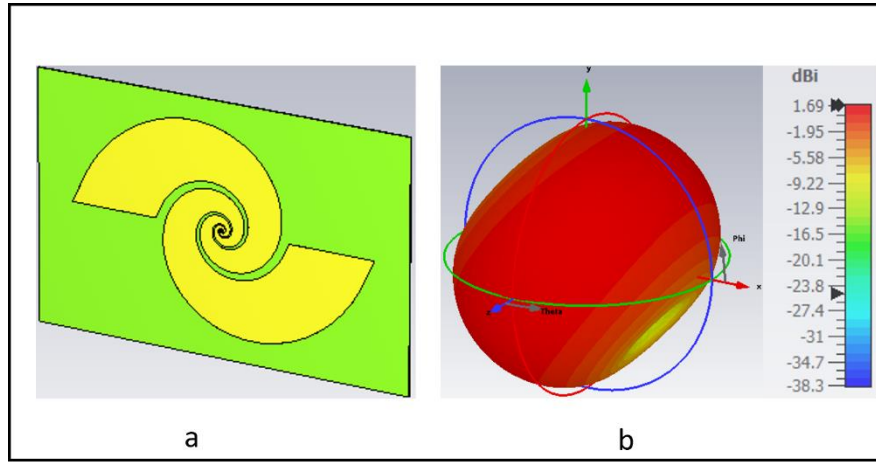
şekil 5.10. Quartz alt katmanlı vivaldi FİA'nın S11 parametreleri.

Vivaldi antenin yönlülüğü diğer anten tiplerine göre daha yüksek çıkmaktadır. Dipol antende 3.21 dBi iken vivaldi antende 8.3 dBi yönlülüğe ulaşılmıştır. Vivaldi antende alt katman malzemesi GaAs kullanıldığında rezonans frekansı 0.75 THz iken quartz

kullanıldığında rezonans frekansı artarak 1.84 THz'e yükselmiştir. Bant genişliği GaAs alt katmanda 0.18 THz iken quartz alt katmanda 1.36 THz'e yükselmiştir.

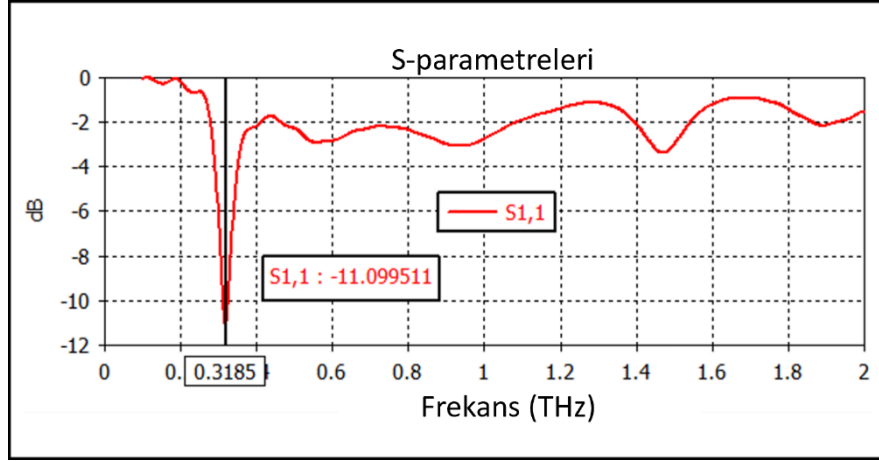
### 5.1.3. Log Spiral FIA Tasarımı

Şekil 5.11'de GaAs alt katmanlı log spiral FIA gösterilmektedir. Bu antenin alt katman malzemesi GaAs olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları 330x210  $\mu\text{m}$ 'dir. Alt katman malzemesinin derinliği 1  $\mu\text{m}$ 'dir. Elektrotlar altındır. Elektrot malzemesinin derinliği 0.05  $\mu\text{m}$ 'dir. Anten en fazla 1.69 dBi değerinde yönlülüğe sahiptir. Elektrotlar arası boşluk uzunluğu 0.91  $\mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 5.11. GaAs alt katmanlı log spiral FIA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.

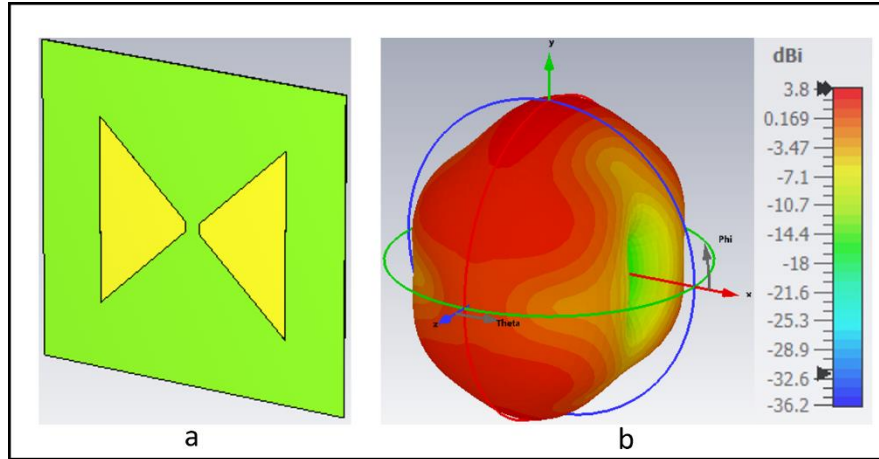
GaAs alt katmanlı log spiral FIA'nın S11 parametreleri şekil 5.12'de gösterilmiştir. Antenin -10 dB altındaki en verimli rezonans frekansı 0.31 THz, bant genişliği 0.02 THz ve en düşük S11 değeri -11.09 dB'dir.



Şekil 5.12. GaAs alt katmanlı log spiral FİA'nın S11 parametreleri.

#### 5.1.4. Papyon FİA Tasarımları

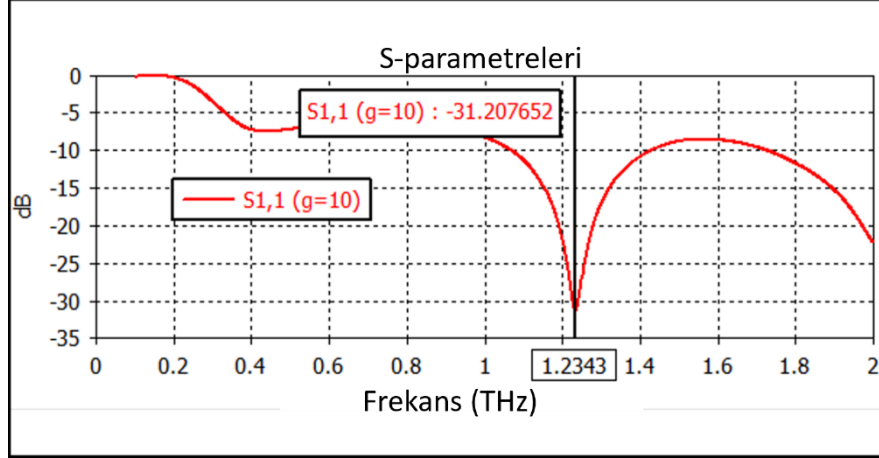
Şekil 5.13'te GaAs alt katmanlı papyon FİA gösterilmektedir. Bu antenin alt katman malzemesi GaAs olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları  $350 \times 340 \mu\text{m}$ 'dir. Alt katman malzemesinin derinliği  $1,3 \mu\text{m}$ 'dir. Elektrotlar altındır. Elektrot malzemesinin derinliği  $0,02 \mu\text{m}$ 'dir. Anten en fazla 3.8 dBi değerinde yönlülüğe sahiptir. Elektrotlar arası boşluk uzunluğu  $10 \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 5.13. GaAs alt katmanlı papyon FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.

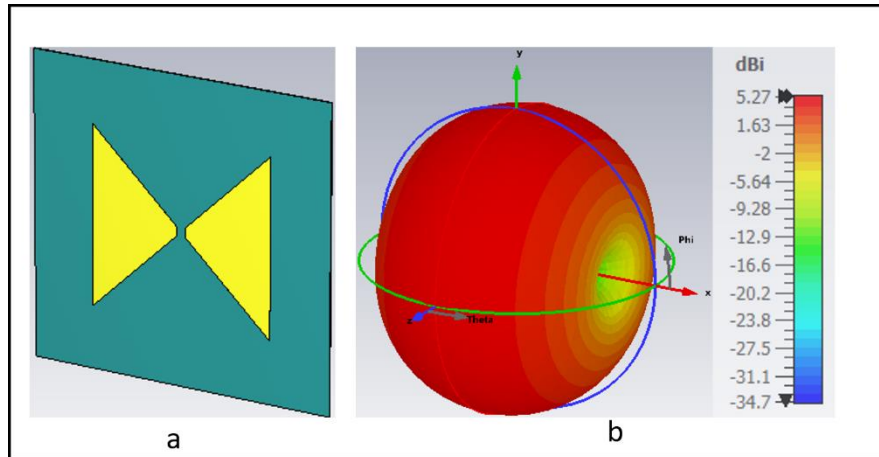
GaAs alt katmanlı papyon FİA'nın S11 parametreleri şekil 5.14'te gösterilmiştir. Antenin rezonans frekansı 1.23 THz, bant genişliği 0.34 THz ve en düşük S11 değeri -31.2 dB'dir. Anten S11 parametre şekli çok verimli optimize edilmiş anten olduğunu

göstermektedir. Birden fazla rezonans frekansı olmadan istenen frekansta bu antenle kolaylıkla çalışılmaktadır. S11 değerinin -30 dB'e düşmesiyle geri dönüş kaybının ciddi miktarda azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.14. GaAs alt katmanlı papyon FIA'nın S11 parametreleri.

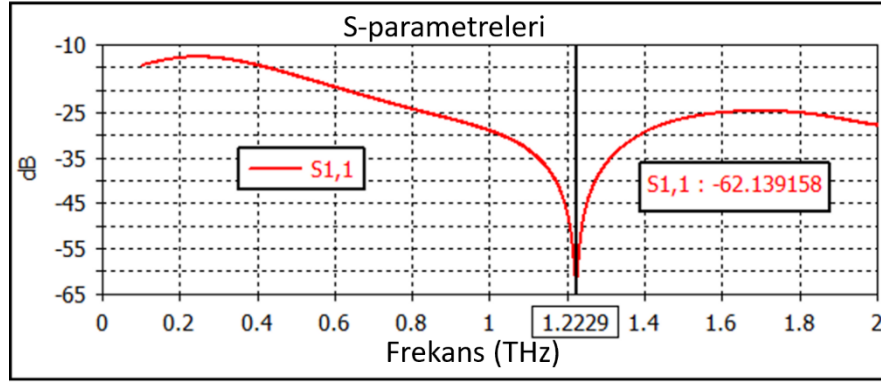
Şekil 5.15'te LT-GaAs alt katmanlı papyon FIA gösterilmektedir. Bu antenin alt katman malzemesi LT-GaAs olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları 350x340  $\mu\text{m}$ 'dir. Alt katman malzemesinin derinliği 1,3  $\mu\text{m}$ 'dir. Elektrotlar altındır. Elektrot malzemesinin derinliği 0.02  $\mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 5.15. LT-GaAs alt katmanlı papyon FIA yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.

Şekil 5.15'teki LT-GaAs alt katmanlı papyon FİA'nın elektrotlar arası boşluk uzunluğu  $10 \mu\text{m}$ 'dir. Elektrot malzemesinin derinliği  $0.02 \mu\text{m}$ 'dir. Anten en fazla 5.27 dBi değerinde yönlülüğe sahiptir.

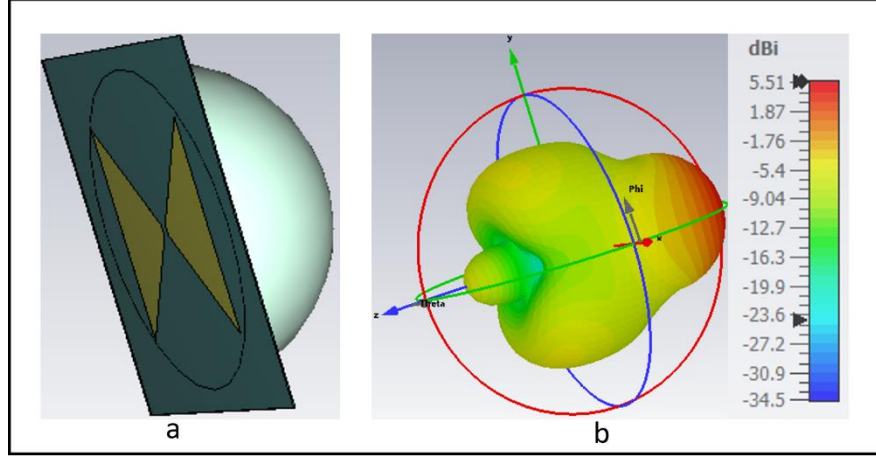
LT-GaAs alt katmanlı papyon FİA'nın S11 parametreleri şekil 5.16'da gösterilmiştir. Antenin rezonans frekansı 1.22 THz, bant genişliği tam bant 2 THz ve en düşük S11 değeri -31.2 dB'dir. Anten S11 parametre şekli çok verimli optimize edilmiş anten olduğunu göstermektedir. Birden fazla rezonans frekansı olmadan istenen frekansta bu antenle kolaylıkla çalışılmaktadır. S11 değerinin -62.1 dB'e düşmesiyle geri dönüş kaybının ciddi miktarda azaldığı anlaşılmaktadır.



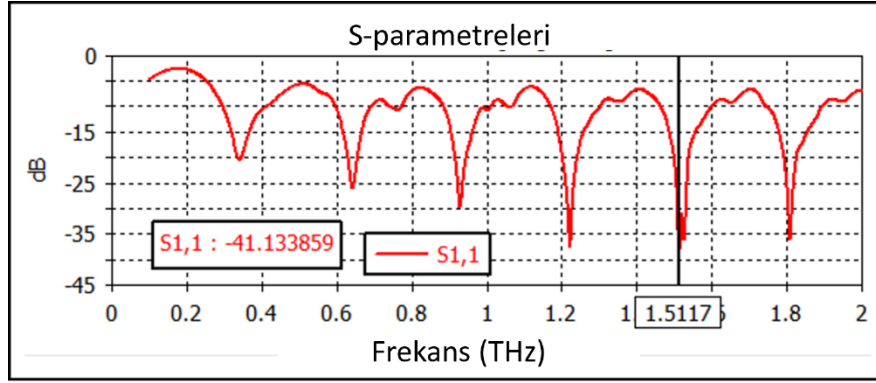
Şekil 5.16. LT-GaAs alt katmanlı papyon FİA'nın S11 parametreleri.

Şimdiye kadar yapılan tasarımlar arasında en iyi sonuç elektrot şekli papyon alt katman da LT-GaAs iken alınmıştır. Anten bant genişliğinin 2 THz'e kadar yükselmesi bu antenin çok fazla kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek veri iletişimde bu bant seviyesi iletişim alanında çok etkili bir gelişmedir. Anten yönlülüğü ise 3.8 dBi'den 5.27 dBi'ye yükselmiştir.

Şekil 5.17'de LT-GaAs alt katmanlı papyon FİA'ya yarım küre şeklinde Si lens eklenmiştir. Bu antenin alt katman malzemesi LT-GaAs olarak seçilmiştir. Alt katman boyutları  $350 \times 340 \mu\text{m}$ 'dir. Alt katman malzemesinin derinliği  $1,3 \mu\text{m}$ 'dir. Elektrotlar altındır. Elektrot malzemesinin derinliği  $0.02 \mu\text{m}$ 'dir. Eklenen lensin yarı çapı  $150 \mu\text{m}$ 'dir. Anten en fazla 5.51 dBi değerinde yönlülüğe sahiptir.



Şekil 5.17. a) LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA Yapısı b) Antenin yönlülüğünün 3D gösterimi.



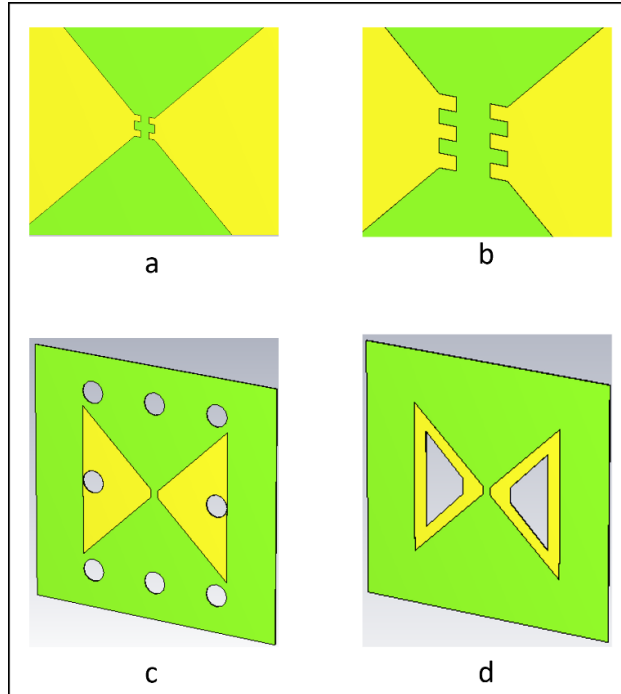
Şekil 5.18. LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA'nın S11 parametreleri.

LT-GaAs alt katmanlı Si lensli dipol FİA'nın S11 parametreleri Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Antende birden fazla rezonans frekansı meydana gelmiştir. En düşük S11 değerine sahip rezonans frekansı 1.51 THz, bant genişliği 0.13 THz ve en düşük S11 değeri -41.13 dB'dir. Papyon antene yarım küre şeklindeki Si lens eklenmesiyle anten yönlülüğü 5.27 dBi'den 5.51 dBi'ye yükselmiştir. Ancak anten S11 parametresinde bir düzensizlik meydana gelmiştir. Birden fazla rezonans frekansı ortaya çıkmıştır. Antenin bant genişliği 2 THz'den 0.13 THz'e düşmüştür. Si lensli FİA'nın üretimi ayrıca oldukça zordur. Bu sebeplerden dolayı lens olmaksızın kullanımı çoğu uygulamalarda tercih edilmektedir.

### 5.1.5. Çeşitli Papyon FİA Tasarımları

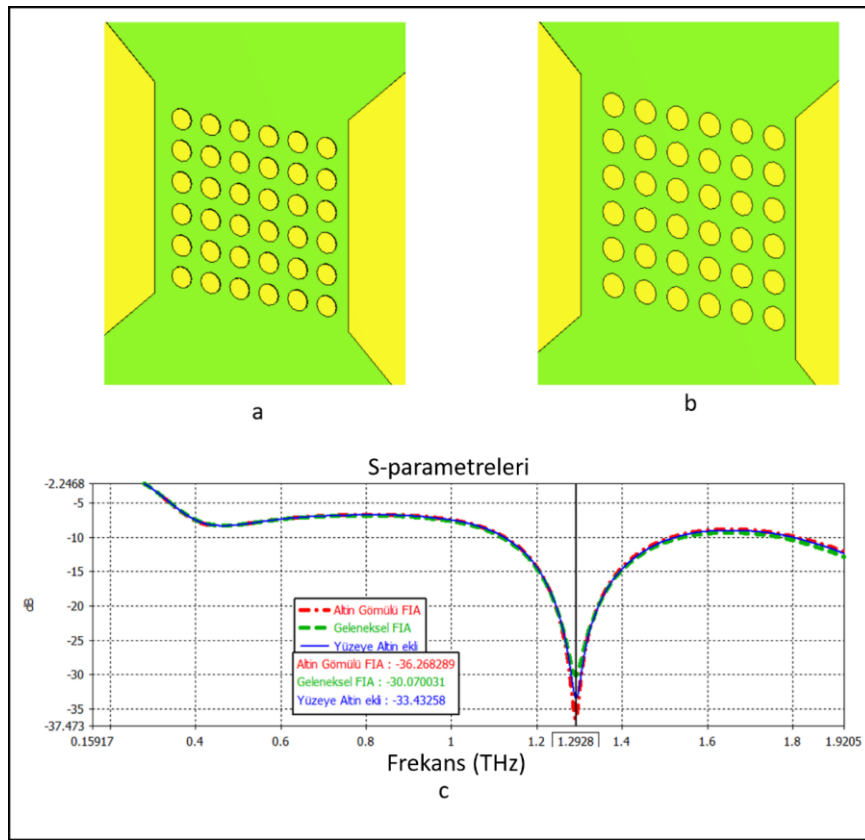
FİA'nın optik-THz dönüşüm oranını ve anten çıkış gücünü arttırmak için anten geometrisi üzerinde slot açma, tarak ekleme, boşluk bölgesinin üzerine NP ekleme ve NP'leri alt katmana gömme gibi işlemler yaparak yeni anten tasarımları sunulmaktadır.

Şekil 5.19.a.'da gösterildiği gibi fotoiletken boşluğa 4 tarak eklenmiştir. Şekil 5.19.b.'de fotoiletken boşluğa 6 tarak eklenmiştir. Tarakları eklemekteki amaç yarıiletken alt katmanda hareket eden elektrotun ulaşacağı yüzey alanını arttırmak ve daha kısa mesafede hareket ederek daha az enerji kaybına sebep olmasını sağlamaktır. Şekil 5.19.c. ve Şekil 5.19.d'de anten yapısı üzerinde fotokristal delikler açarak antenin akım yoğunluğunu ışına bölgesi olan elektrotlar arası boşlukta arttırmak hedeflenmiştir. Antenler CST MW Studio programında tasarlanıp analiz edilmiştir ancak sonuçlar literatürde gerçekleştirilmiş antenler gibi çıkmamıştır. Bunun sebebi CST programı özel olarak FİA'lar için değil genel antenler için tasarlandığı içindir.



Şekil 5.19. a) 4 Taraklı FİA b) 6 taraklı FİA c) Silindir slotlu FİA d) Elektrotu slotlu FİA

Şekil 5.20.a'da geleneksel Papyon FIA'nın elektrotları arasındaki boşluk bölgesindeki alt katman yüzeyine NP'ler eklenmiştir. Şekil 5.20.b'de ise NP'ler Papyon FIA'nın elektrotları arasındaki boşluk bölgesine gömülmüştür. Geleneksel antenin en düşük geri dönüş kaybı (S11) -30 dB iken antenin boşluk yüzeyine NP eklenince dönüş kaybı düşerek -33.4 dB olmuştur. Antenin boşluk yüzeyine NP'ler gömüldüğündeyse geri dönüş kaybı daha da düşerek -36.2 dB olmuştur. Bu sebeple anten boşluk bölgesine NP'lerin gömülmesi tavsiye edilmektedir. Anten boşluğuna eklenen NP'ler iletken malzemelerden seçilmelidirler.



Şekil 5.20. a) Boşluk yüzeyine naopartikül ekli FIA b) Alt katmana NP gömülü FIA c) Antenlerin S11 parametreleri.



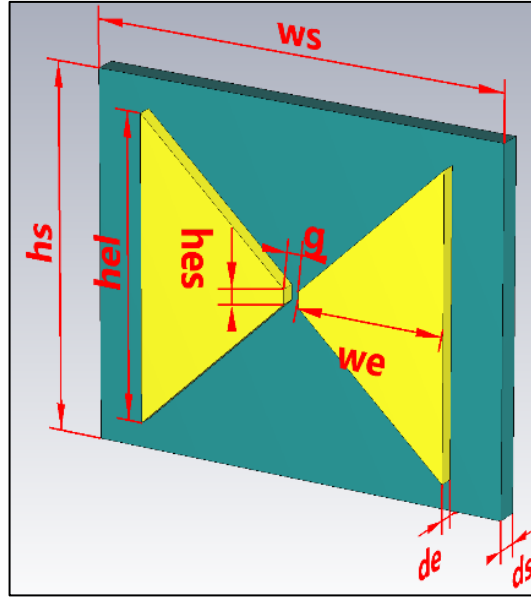
## 5.2. FARKLI GEOMETRİK ŞEKİLLERDEKİ NANOPARTİKÜLLERİN FİA'YA GÖMÜLMESİNİN ETKİSİ

FİA'lardan üretilen THz ışımalarının yüksek güçlü olmasını sağlamak veya optik-THz dönüştürme verimliliğini arttırmak temelde iki esasa dayanmaktadır; birincisi fototaşıyıcı yoğunluğunun değişimi ikincisi ise fototaşıyıcıların hızındaki değişimdir [193]. FİA'da fototaşıyıcı yoğunluğunun artışı sınırlandırılan dolayısıyla ışımının gücünü, yönlülüğünü azaltan etki gecikme doyumu veya perdeleme etkisi diye bilinen olaydır. Perdeleme etkisini azaltmak için optik darbenin uygulandığı elektrotlar arası aralığa iletken NP'ler eklenmektedir. İletken NP'lerin eklenmesiyle yüksek hızlı optik darbenin emilimi artırılmış ve daha kısa ömürlü fototaşıyıcı elde edilmiştir. Perdeleme etkisinin azaltılmasını sağlamak için NP'ler üç boyutlu bir şekilde elektrotlar arası bölgenin üstüne yerleştirme şeklinde değil bizzat içine gömülmelidir [195]. Eklenen NP'ler yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır [197].

Bu çalışmada FİA'nın yönlülüğünü arttırmak için antenin elektrotlar arası boşluğuna belirli geometrik şekillerde altın NP'ler eklenmiştir. Eklenen altın NP'lerin geometrileri silindir, üçgen, kare ve altıgen olacak şekilde seçilmiştir. Anten tipi olarak papyon, dipol, log spiral ve vivaldi antenler üzerinden çalışma yapılmıştır. Önce geleneksel antenlerin analizi CST MW Studio simülasyon programında yapılmıştır. Daha sonra bahsi geçen geometrik şekiller eklenerek yeni FİA'ların analizi yapılmıştır. Antenlere NP eklenmesiyle yönlülüğü artmıştır. Papyon ve Vivaldi antende en yüksek yönlülüğe kare şeklindeki partiküller eklenince ulaşılmıştır. Dipol antende üçgen şeklindeki altın NP'ler eklenince en yüksek yönlülüğe ulaşılmıştır.

### 5.2.1. Papyon FİA'ya NP Eklenmesi

NP eklenmemiş, Şekil 5.21'deki sade papyon FİA'nın parametreleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Elektrot malzemesi olarak altın kullanılmıştır. Papyon anten tasarlanırken Alt katman olarak Quartz, GaAs, Grafen ve LT-GaAs kullanılarak CST MW Studio programında simülasyonları yapılmış. En iyi S11 ve yönlülük değeri LT-GaAs alt katman olarak kullanılınca elde edilmiştir. Bu sebeple alt katman malzemesi olarak bu antende LT-GaAs kullanılmıştır.

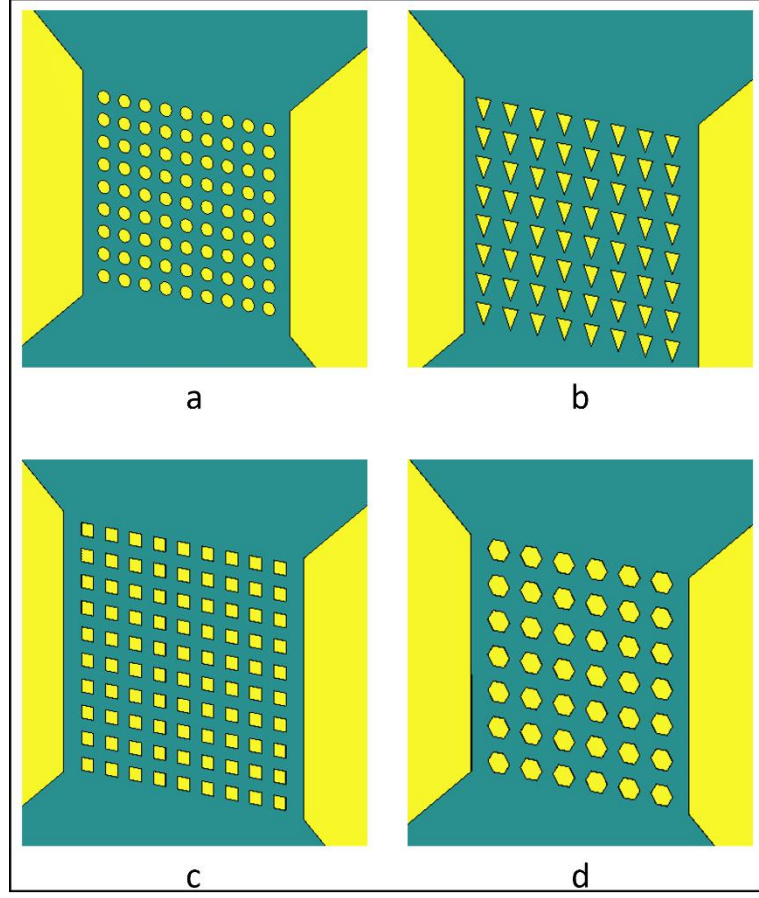


Şekil 5.21. Sade Papyon FIA'nın şekli ve parametreleri

Sade papyon FIA'nın yönlülüğünü arttırmak için elektrotlar arası bölgeye Şekil 5.22'de gösterildiği gibi a) silindir, b) üçgen, c) kare ve d) altıgen altın NP'ler eklenip CST MW Studio programında simülasyonları yapılmıştır. Kare altın NP'ler eklenen papyon FIA'da en yüksek yönlülük değeri elde edilmiştir.

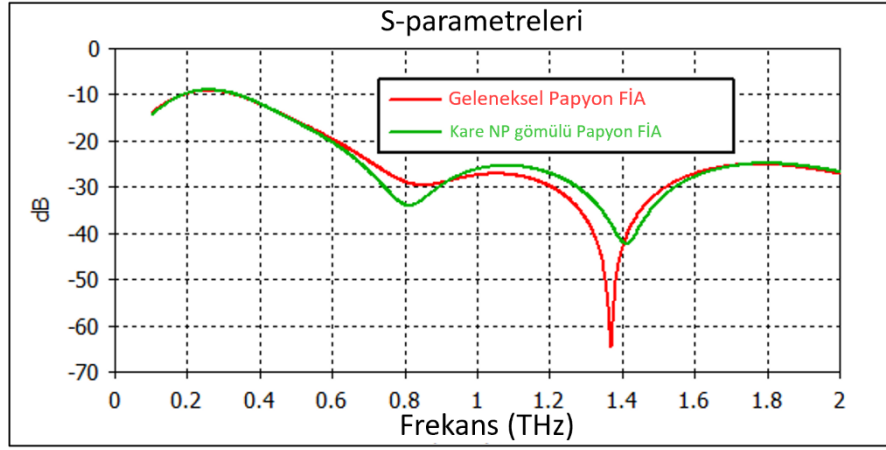
Çizelge 5.1. Sade Papyon FIA'nın parametre değerleri

Parametre	Parametrenin Açıklanması	Değeri( $\mu\text{m}$ )
ws	Alt katmanın genişliği	280
hs	Alt katmanın yüksekliği	240
ds	Alt katmanın derinliği	1.5
hel	Elektrotun uzun kenarının yüksekliği	200
hes	Elektrotun kısa kenarının yüksekliği	10
we	Elektrotun uzun kenarı ile kısa kenarı arası genişlik	100
de	Elektrotun derinliği	0.01
g	Elektrotlar arası boşluk	10



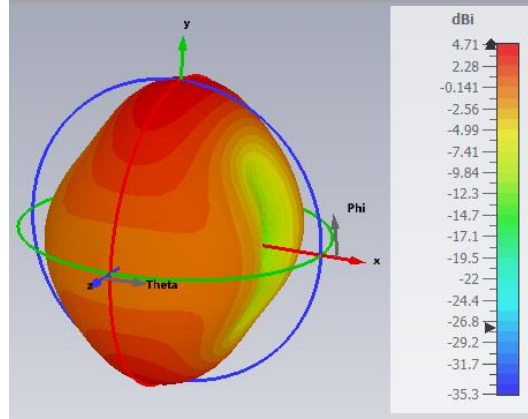
Şekil 5.22. NP gömülmüş papyon FIA'lar a) Silindir NP gömülmüş papyon FIA b) Üçgen NP gömülmüş papyon FIA c) Kare NP gömülmüş papyon FIA d) Altıgen NP gömülmüş papyon FIA.

Şekil 5.22.c'de eklenen altın karenin bir kenar uzunluğu 500 nm'dir. Kareler arası uzaklıklar eşit ve 500 nm'dir. İlgili NP'ler alt katmanın içine gömülü ve derinliği 10 nm'dir. Sade papyon anten ve kare altın şeklindeki NP'ler eklenmiş papyon FIA'nın dönüş kaybı değeri (S11) Şekil 5.23'te gösterilmiştir.

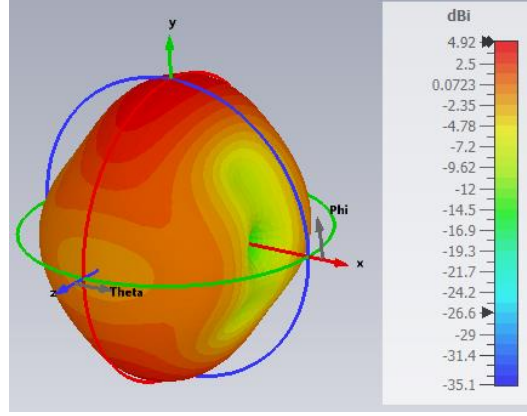


Şekil 5.23. Sade Papyon FIA ve Kare NP'lerin eklendiği FIA'ların geri dönüş kayıp bilgisi (S11).

Şekil 5.23'te görüldüğü üzere Sade Papyon FIA'ya kare NP'ler eklendiğinde; S11 değeri -64.5 dB'den -42.27 dB'e çıkmıştır, bant genişliği 1.65 THz'den 1.66 THz'e çıkmıştır ve rezonans frekansı 1.36 THz'den 1.41 THz'e çıkmıştır. Sade papyon Antenin yönlülüğü Şekil 5.24'te ve kare şeklindeki altın NP'lerin eklendiği Papyon FIA' Şekil 5.25'te görüldüğü üzere ışımının yönlülüğü 4.71 dBi'den 4.92 dBi'ye çıkmıştır.



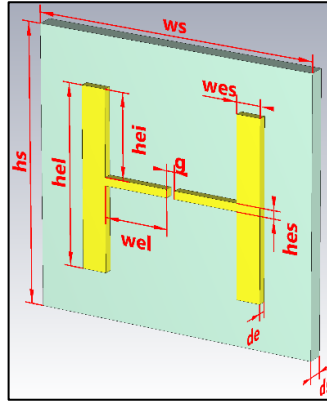
Şekil 5.24. Sade Papyon FIA'nın yönlülüğünü 3D gösterimi.



Şekil 5.25. Altın kare NP'lerin eklendiği Papyon FİA'nın yönlülüğünün 3D gösterimi.

### 5.2.2. Dipol FİA'ya NP Eklenmesi

NP eklenmemiş, Şekil 5.26'daki sade dipol FİA'nın parametreleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Elektrot malzemesi olarak altın kullanılmıştır. Dipol FİA tasarlanırken Alt katman olarak Quartz, GaAs, Grafen ve LT-GaAs kullanılarak CST MW Studio programında simülasyonları yapılmış. En iyi S11 ve yönlülük değerini, quartz alt katman olarak kullanılınca elde edilmiştir. Bu sebeple alt katman malzemesi olarak bu antende quartz kullanılmıştır.

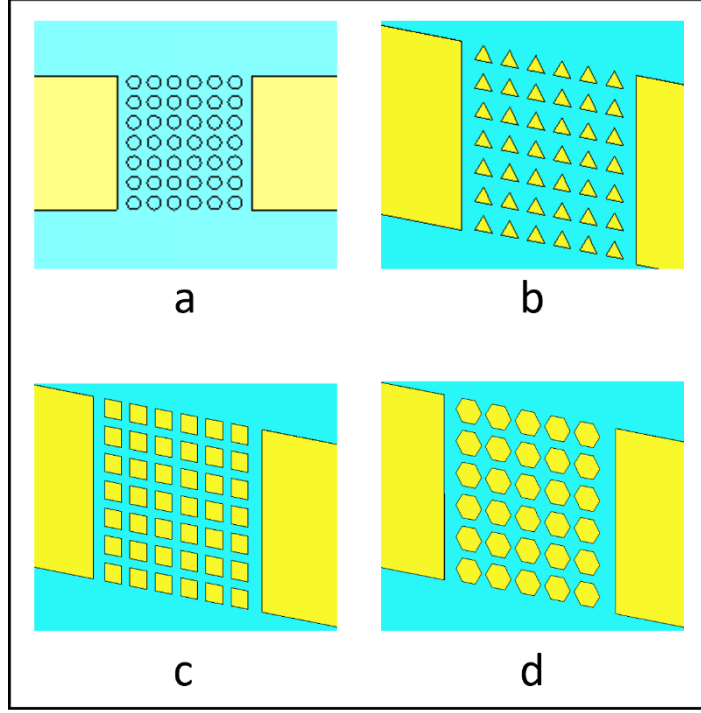


Şekil 5.26. Sade Dipol FİA'nın şekli ve parametreleri.

Çizelge 5.2. Sade Dipol FİA'nın parametre değerleri

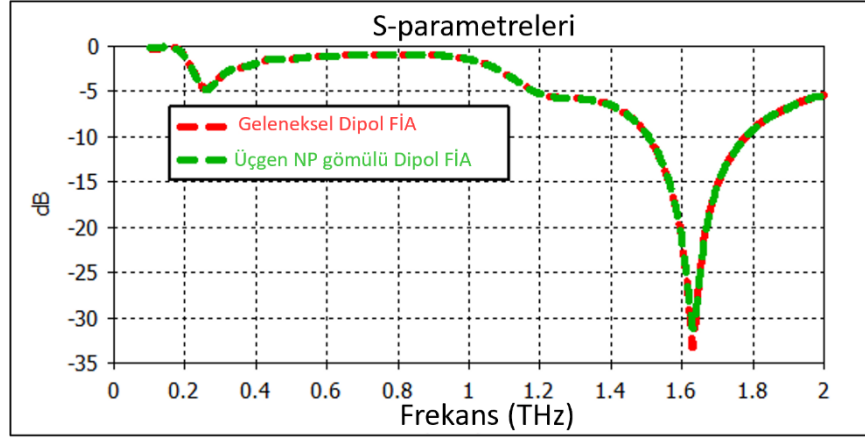
Parametre	Parametrenin Açıklanması	Değeri(μm)
ws	Alt katmanın genişliği	350
hs	Alt katmanın yüksekliği	340
ds	Alt katmanın derinliği	1.5
hel	Elektrotun uzun kenarının yüksekliği	220
hes	Elektrotun kısa kenarının yüksekliği	10
wel	Elektrotun uzun kenarı ile kısa kenarı arası genişlik	80
wes	Uzun elektrotun genişliği	30
de	Elektrotun derinliği	0.02
g	Elektrotlar arası boşluk	10

Sade dipol FİA'nın yönlülüğünü arttırmak için elektrotlar arası bölgeye Şekil 5.27'de gösterildiği gibi a) silindir, b) üçgen, c) kare ve d) altıgen altın NP'ler eklenip CST MW Studio programında simülasyonları yapılmıştır. Üçgen altın NP'ler eklenen papyon FİA'da en yüksek yönlülük değeri elde edilmiştir.



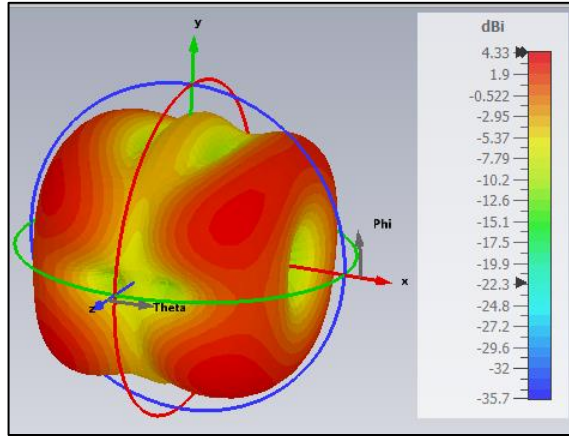
Şekil 5.27. NP gömülmüş dipol FİA'lar a) Silindir NP gömülmüş dipol FİA b) Üçgen NP gömülmüş dipol FİA c) Kare NP gömülmüş dipol FİA d) Altıgen NP gömülmüş dipol FİA.

Şekil 5.27.b'de eklenen altın eşkenar üçgenin bir kenar uzunluğu  $1 \mu\text{m}$ 'dir. Üçgenler arası taban uzaklıkları eşit ve  $500 \text{ nm}$ 'dir. İlgili NP'ler alt katmanın içine gömülü ve derinliği  $10 \text{ nm}$ 'dir. Sade dipol anten ve üçgen şeklindeki altın NP'ler eklenmiş papyon FİA'nın geri dönüş kaybı (S11) Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



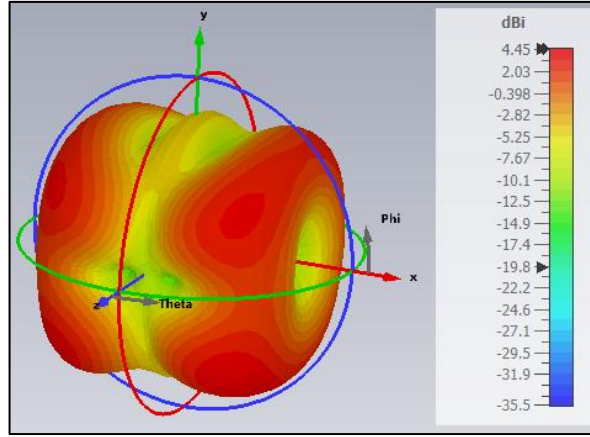
Şekil 5.28. Sade Dipol FİA ve Üçgen NP'lerin eklendiği FİA'ların geri dönüş kayıp bilgisi (S11).

Şekil 5.28'de görüldüğü üzere Sade dipol FİA'ya üçgen şeklindeki altın NP'ler eklendiğinde; S11 değeri -33.27 dB'den -31.2 dB'e çıkmıştır, bant genişliği 0.28 THz'den 0.27 THz'e inmiştir ve rezonans frekansı 1.63 THz'de sabit kalmıştır. Sade dipol antenin yönlülüğü Şekil 5.29'da ve üçgen şeklindeki altın NP'lerin eklendiği dipol FİA'nın yönlülüğü Şekil 5.30'da görüldüğü üzere ışımının yönlülüğü 4.33 dBi'den 4.45 dBi'ye çıkmıştır.



Şekil 5.29. Sade Dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D olarak gösterimi

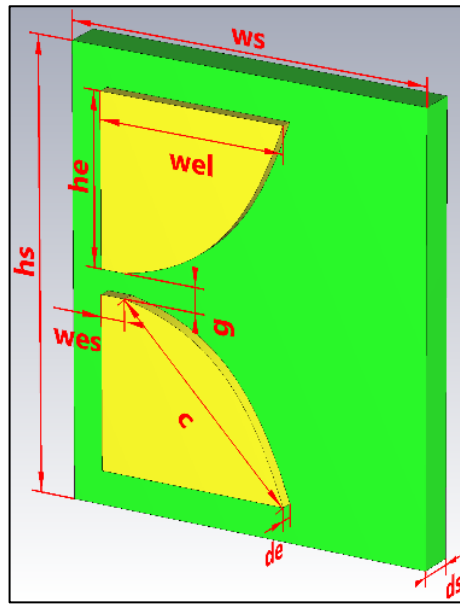




Şekil 5.30. Üçgen şeklindeki altın NP'lerin eklendiği dipol FİA'nın yönlülüğünün 3D olarak gösterimi

### 5.2.3. Vivaldi FİA'ya NP Eklenmesi

NP eklenmemiş, Şekil 5.31'deki sade vivaldi FİA'nın parametreleri Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Elektrot malzemesi olarak altın kullanılmıştır. Vivaldi anten tasarlanırken Alt katman olarak Quartz, GaAs, Grafen ve LT-GaAs kullanılarak CST MW Studio programında simülasyonları yapılmış. En iyi S11 ve yönlülük değeri GaAs alt katman olarak kullanılınca elde edilmiştir. Bu sebeple alt katman malzemesi olarak bu antende GaAs kullanılmıştır.

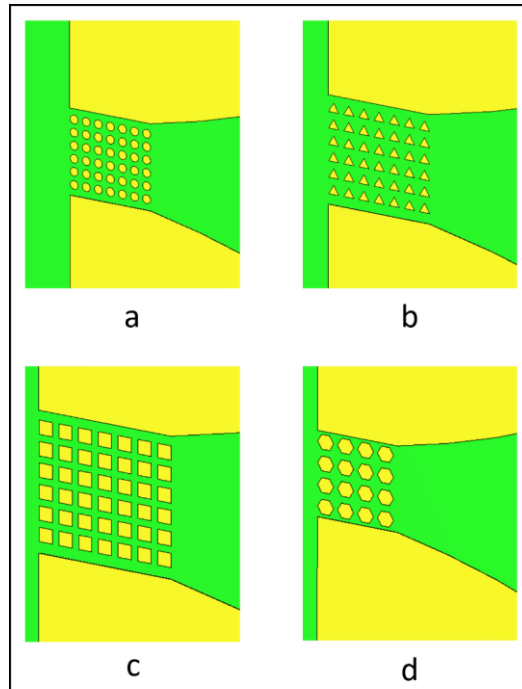


Şekil 5.31. Sade Vivaldi FİA'nın şekli ve parametreleri.

Çizelge 5.3. Sade Vivaldi FİA'nın parametre değerleri.

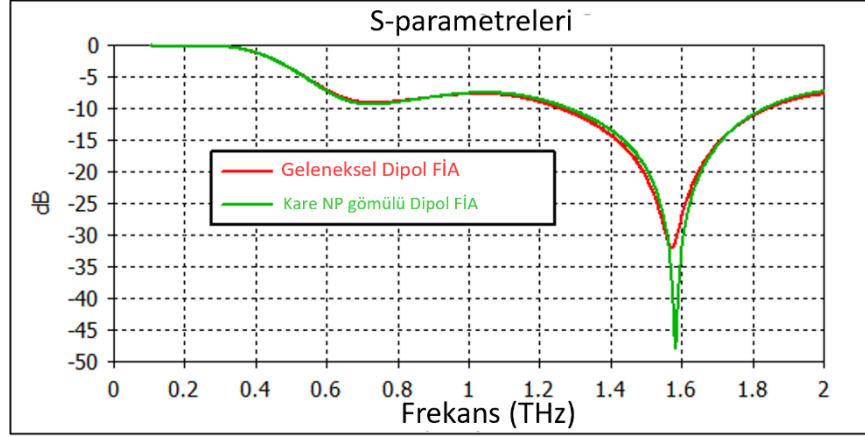
Parametre	Parametrenin Açıklanması	Değeri( $\mu\text{m}$ )
ws	Alt katmanın genişliği	150
hs	Alt katmanın yüksekliği	180
ds	Alt katmanın derinliği	1.5
he	Elektrotun yüksekliği	69,4
wel	Elektrotun uzun kenarının genişliği	77.5
wes	Elektrotun kısa kenarının genişliği	10
de	Elektrotun derinliği	0.05
g	Elektrotlar arası boşluk	10
c	Anten eğrisinin uzunluğu	96.81

Sade vivaldi FİA'nın yönlülüğünü arttırmak için elektrotlar arası bölgeye Şekil 5.32'de gösterildiği gibi a) silindir, b) üçgen, c) kare ve d) altıgen altın NP'ler eklenip CST MW Studio programında simülasyonları yapılmıştır. Kare altın NP'ler eklenen Vivaldi FİA'da en yüksek yönlülük değeri elde edilmiştir.



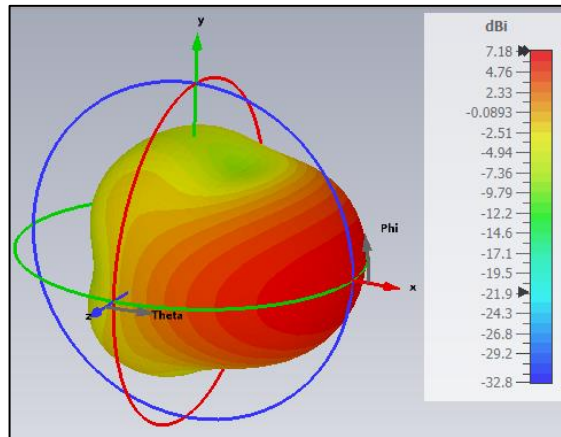
Şekil 5.32. NP gömülmüş vivaldi FİA'lar a) Silindirik NP gömülmüş vivaldi FİA b) Üçgen NP gömülmüş vivaldi FİA c) Kare NP gömülmüş vivaldi FİA d) Altıgen NP gömülmüş vivaldi FİA

Şekil 5.32.c'de eklenen altın karenin bir kenar uzunluğu 500 nm'dir. Kareler arası uzaklıklar eşit ve 500 nm'dir. İlgili NP'ler alt katmanın içine gömülü ve derinliği 50 nm'dir. Sade vivaldi anten ve kare altın şeklindeki NP'ler eklenmiş vivaldi FİA'nın geri dönüş kayıp değeri (S11) Şekil 5.33'te gösterilmiştir.

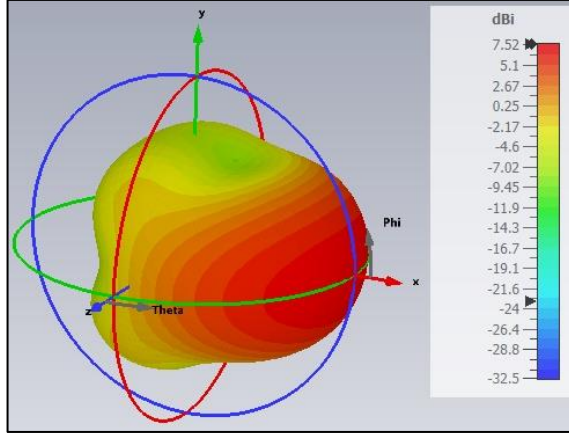


Şekil 5.33. Sade Vivaldi FİA ve Kare altın NP'lerin eklendiği FİA'ların geri dönüş kayıp bilgisi (S11).

Şekil 5.33'te görüldüğü üzere Sade dipol FİA'ya kare şeklindeki altın NP'ler eklendiğinde; S11 değeri -32.08 dB'den -48.75 dB'e inmiştir, bant genişliği 0.58 THz'den 0.55 THz'e inmiştir ve rezonans frekansı 1.57 THz'den 1.58 THz'e çıkmıştır. Sade vivaldi antenin yönlülüğü Şekil 5.34'te ve kare şeklindeki altın NP'lerin eklendiği dipol FİA'nın yönlülüğü Şekil 5.35'te görüldüğü üzere ışımının yönlülüğü 7.18 dBi'den 7.52 dBi'ye çıkmıştır.



Şekil 5.34. Sade Vivaldi FİA'nın yönlülüğünün 3D olarak gösterimi.



Şekil 5.35. Kare şeklindeki altın NP'lerin eklendiği Vivaldi FİA'nın yönlülüğünün 3D olarak gösterimi.

Analizleri yapılan tüm FİA'ların kullanılan alt katman malzemesi, elektrot malzemesi, eklenen NP malzemenin cinsi ve eklenen NP şekil bilgileri, S11, rezonans frekansı, bant genişliği ve yönlülük gibi analiz sonuçları Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Elektrot malzemesi ve eklenen NP malzemesi tüm FİA tasarımlarında altındır.

Literatürdeki FİA'lar ile bu çalışmada özgün olarak tasarlanan FİA'lar Çizelge 5.5'te karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.5'te de görüldüğü üzere literatürdeki antenlerin çoğunun çalışma frekansı THz'in mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek 1 – 1.5 THz aralığından farklıdır. Olanların ise bant genişliği oldukça düşüktür. Mühendislik uygulamalarında daha çok kullanılabilecek, bant genişliği yüksek olan ve yönlülüğü yüksek olan anten bu çalışmada önerilen FİA'dır.

Çizelge 5.4. Tasarımı yapılan tüm antenlerin bilgileri ve analiz sonuçları

FİA Türü	Kullanılan Alt katman	Eklenecek NP'nin Şekli	S11(dB)	Bant Genişliği (THz)	Rezonans Frekansı (THz)	Yönlülük (dBi)
Papyon Anten	LT-GaAs	Ekleme yok	-64,5	1.65	1.36	4.71
Papyon Anten	LT-GaAs	Silindir	-38,51	1.67	1.41	4.91
Papyon Anten	LT-GaAs	Üçgen	-36,85	1.65	1.4	4.88
Papyon Anten	LT-GaAs	Kare	-42,27	1.66	1.411	4.92
Papyon Anten	LT-GaAs	Altıgen	-45,9	1.66	1.40	4.88
Dipol	Quartz	Ekleme yok	-33,27	0.28	1.631	4.33
Dipol	Quartz	Silindir	-31,62	0.28	1.629	4.26
Dipol	Quartz	Üçgen	-31,2	0.27	1.631	4.45
Dipol	Quartz	Kare	-31,37	0.27	1.629	4.39
Dipol	Quartz	Altıgen	-33,55	0.27	1.625	4.37
Vivaldi	GaAs	Ekleme yok	-32,08	0.58	1.572	7.18
Vivaldi	GaAs	Silindir	-33,39	0.59	1.568	7.5
Vivaldi	GaAs	Üçgen	-34,2	0.58	1.570	7.46
Vivaldi	GaAs	Kare	-48,75	0.55	1.582	7.52
Vivaldi	GaAs	Altıgen	-38,02	0.55	1.576	7.41

Çizelge 5.5. Önerilen FİA'yla literatürde yapılan çalışmaların karşılaştırılması.

<b>Kaynak</b>	<b>Anten Tipi</b>	<b>Alt katman</b>	<b>Lens Durumu</b>	<b>Rezonans Frekansı (THz)</b>	<b>Bant Genişliği (THz)</b>	<b>Yönlülük (dBi)</b>
Jyothi [200]	Papyon Anten	GaAs	Lens Yok	1.1	0.2	4.24
Deva [201]	Konik Anten	GaAs	Si lens	0.8	-	18.5
Gupta vd. [202]	Papyon Anten	SI-GaAs	Si lens	0.24	-	-
Zhu vd. [203]	Papyon Anten	LT-GaAs	Lens yok	1.05	0.18	11.8
Dhiflaoui vd. [204]	Papyon Anten	Quartz	Si Lens	2.45	3	6
Önerilen FİA	Papyon Anten	GaAs	Lens yok	1.41	1.66	4.92

## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE ÖNERİLER

THz FİA, fotoiletken bir alt katman üzerinde genellikle altın olan iki metal elektrottan oluşur. THz üretimindeki alt katman etkisi, mikrodalga frekansındaki alt katman etkisine kıyasla önemli bir rol oynar. Alt katman boyutlarının ve alt katman malzemesinin THz FİA performansı üzerindeki etkisi araştırıldı. Araştırmalar CST simülasyonu kullanılarak yapıldı. LT-GaAs'ın en iyi alt katman malzemelerinden biri olduğu gösterildi.

Malzemenin taşıyıcı hareketliliği, önerilen antendeki akımı artırabilecek bir faktör olarak tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, yüksek taşıyıcı hareketliliği olan akım, az taşıyıcı hareketliliği olan önerilen modele kıyasla iki kat daha fazla akım üretmektedir. Bu yüksek fototaşıyıcı yoğunluğu, yüksek THz gücüne yol açabilen zamanla değişen geçici fotoakım ile sonuçlanır.

FİA'ya yarım küre şeklindeki Si lens eklenmesiyle anten yönlülüğü yükselmiştir. Ancak anten S11 parametresinde bir düzensizlik meydana gelmiştir. Birden fazla rezonans frekansı ortaya çıkmıştır. Antenin bant genişliği yüksek miktarda düşmüştür. Si lensli FİA'nın üretimi ayrıca oldukça zordur. Bu sebeplerden dolayı lens olmaksızın kullanımı çoğu uygulamalarda tercih edilmektedir.

THz FİA'ların yönlülüğünü artırmak için farklı şekilli NP'lerin alt katmana gömülmesi önerilmiştir. Önerilen FİA'lar tasarlanmış ve performansları analiz edilmiş ve geleneksel FİA'larla karşılaştırılmıştır. Anten elektrotları arasındaki boşluğa gömülen NP'nin geometrik şeklinin anten tipine bağlı olarak farklı etkilere neden olduğunu göstermiştir. NP'lerin anten boşluğuna gömülmesinin anten yönlülüğünü papyon FİA 'da 4,71 dBi'den 4,92 dBi'ye, dipol FİA'da 4,33 dBi'den 4,45 dBi'ye ve vivaldi FİA'da 7,18 dBi'den 7,52 dBi'ye çıkardığı gözlemlendi. Ayrıca en yüksek yönlülük dipol

antene üçgen altın NP'ler eklendiğinde elde edilirken, en yüksek yönlülük papyon ve vivaldi FİA'lara kare şeklindeki NP'ler eklendiğinde elde edilmiştir. Önceki çalışmalarda, NP'ler ya yüzeye eklenmiş ya da anten boşluğuna rastgele bir şekilde yerleştirilmişti. Ancak bu çalışmada hem NP boşluğa gömülmüş hem de belirli geometrik şekillerle anten boşluğuna yerleştirilmiştir. Bu nedenle anten yönlülüğünde daha belirgin bir artış sağlanmıştır.

FİA'lar THz radyasyon emisyonu ve THz radyasyonunun tespitinde kullanılan en popüler cihazlar arasındadır. Diğer THz emitör ve dedektörlerle karşılaştırıldığında, FİA'lar kompakttır, oda sıcaklığında çalışabilir ve hem emitör hem de dedektör olarak çalışabilirler. Ancak optikten THz'e dönüştürme verimlerinin düşük olması nedeniyle, bu cihazların uygulamaları sınırlıdır. Düşük optik-THz dönüşümünü düzeltmek için yapılabilecek iyileştirmeyi anlamak ve belirlemek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır.

Nano plazmonik yapıların kullanılması, fotoiletken THz cihazlarının kuantum verimliliğini arttırmada çok etkilidir. Bu gerçeğin nedeni, nano plazmonik yapıların uyarıcı lazer darbelerinin absorpsiyonunu artırma konusundaki benzersiz yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Ancak bu tür yapıların imalatı zor ve maliyetlidir. Bu nedenle hem optoelektronik hem de elektromanyetik simülasyonları birleştiren simülasyon aracı ile bu araştırmada önerilen tasarım, THz fotoakımının sonuçlarını tahmin etmek ve herhangi bir maliyetli ve başarısız deneyden kaçınmak için THz anten analizi için benimsenmesi gereken yaklaşımdır.

Genelde FİA'ların performansını arttırmak için kullanılan NP'ler, geleneksel fotolitografi tekniklerinin çözünürlüğünden çok daha küçük olan, onlarca ila yüzlerce nm aralığında boyutlara sahiptir. Bu nedenle, bu NP'leri imal etmek için daha yüksek çözünürlüklü nanofabrikasyon teknikleri kullanılmalıdır.

Çoğunlukla NP'leri modellemek için elektron ışını litografisi kullanılmaktadır. Bununla birlikte, elektron ışını litografisi pahalı ve düşük verimli bir süreçtir. Yüksek çözünürlüklü elektron ışını litografisi kullanarak 1 mm<sup>2</sup>'lik alanı modellemek birkaç saat almaktadır. Bu sınırlama, gelişmiş nano üretim teknikleri kullanılarak aşılabilir.



Yüksek verimle 10-100 nm arası çözünürlüğü elde etmek için ultraviyole (UV) ışığı odaklama merceği ile alt katman arasına büyük kırılma indeksli sıvı bir ortam yerleştiren daldırılmalı UV litografi iyi bir yöntemdir [205]. Bir başka yüksek verimli ve düşük maliyetli nano üretim tekniği, nano baskılamadır. Dirençte nano ölçekli mekanik deformasyonlar oluşturmak için bir damga kullanır. Bu nedenle çözünürlüğü, damga için elde edilebilecek en küçük özellik boyutuna göre belirlenir [206].

Yumuşak litografi, nano ölçekli çözünürlükle yüksek hızlı ve yüksek verimli üretim elde etmek için de kullanılabilir [207,208]. Nanoyapı modellemesi, elastomerik bir malzemedan bir kalıp kullanılarak elde edilir. Bu nedenle çözünürlük, kalıp için elde edilebilecek minimum özellik boyutuna göre belirlenmektedir. Gelişmekte olan bir başka nanofabrikasyon teknolojisi, 13,5 nm'lik beklenen çözünürlüğe sahip ekstrem UV litografidir [209]. Bu son derece hassas ve yüksek verimli nanofabrikasyon teknolojisinin, birkaç yıl içinde seri üretim için fabrikasyon tesislerinde mevcut olması beklenmektedir.

Özetle, NP'ler ve gelişmiş nano üretim teknikleriyle birleştirilmiş optik nano kavitele tarafından sunulan önemli performans artışı, yeni nesil düşük maliyetli, yüksek performanslı THZ FİA'ların ilerlemesine sebep olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Markelz, A. G., Roitberg, A., and Heilweil, E. J., "Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz", *Chemical Physics Letters*, 320 (1): 42–48 (2000).
2. Ferguson, B. and Zhang, X.-C., "Materials for terahertz science and technology", *Nature Materials*, 1 (1): 26–33 (2002).
3. Dragoman, D. and Dragoman, M., "Terahertz fields and applications", *Progress In Quantum Electronics*, 28 (1): 1–66 (2004).
4. Siegel, P. H., "Terahertz technology", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 50 (3): 910–928 (2002).
5. Chan, W. L., Deibel, J., and Mittleman, D. M., "Imaging with terahertz radiation", *Reports On Progress In Physics*, 70 (8): 1325 (2007).
6. Song, Q., Zhao, Y., Redo-Sanchez, A., Zhang, C., and Liu, X., "Fast continuous terahertz wave imaging system for security", *Optics Communications*, 282 (10): 2019–2022 (2009).
7. Pickwell, E. and Wallace, V. P., "Biomedical applications of terahertz technology", *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 39 (17): R301 (2006).
8. Jepsen, P. U., Cooke, D. G., and Koch, M., "Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications", *Laser & Photonics Reviews*, 5 (1): 124–166 (2011).
9. A G Davies, E H Linfield, and M B Johnston, "The development of terahertz sources and their applications", *Physics In Medicine & Biology*, 47 (21): 3679 (2002).
10. Mukherjee, P. and Gupta, B., "Terahertz (THz) Frequency Sources and Antennas - A Brief Review", *International Journal Of Infrared And Millimeter Waves*, 29 (12): 1091–1102 (2008).
11. Tonouchi, M., "Cutting-edge terahertz technology", *Nature Photonics*, 1 (2): 97–105 (2007).
12. Lewis, R. A., "A review of terahertz sources", *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 47 (37): 374001 (2014).
13. Toreev, A. I., Fedorov, V. K., and Patrusheva, E. V., "Millimeter-wave extended interaction klystron", *Journal Of Communications Technology And Electronics*, 54 (8): 952–958 (2009).

14. Barros, J., Evain, C., Manceron, L., Brubach, J.-B., Tordeux, M.-A., Brunelle, P., Nadolski, L., Loulergue, A., Couprie, M.-E., Bielawski, S., Szwaj, C., and Roy, P., "Coherent synchrotron radiation for broadband terahertz spectroscopy", *Review Of Scientific Instruments*, 84 (3): 033102 (2013).
15. Lewen, F., Michael, E., Gendriesch, R., Stutzki, J., and Winnewisser, G., "Terahertz Laser Sideband Spectroscopy with Backward Wave Oscillators", (1997).
16. Bratman, V. L., Kalynov, Y. K., and Manuilov, V. N., "Large-Orbit Gyrotron operation in terahertz frequency range", (2009).
17. Bhattacharjee, S., Booske, J. H., Kory, C. L., Weide, D. W. van der, Limbach, S., Gallagher, S., Stevens, A., Genack, M., Welter, J., Lopez, M., Gilgenbach, R. M., Wohlbier, J., Ives, R. L., Read, M. E., Divan, R., and Mancini, D. C., "Folded waveguide traveling wave tube sources for THz radiation", (2003).
18. Booske, J. H., Dobbs, R. J., Joye, C. D., Kory, C. L., Neil, G. R., Park, G.-S., Park, J., and Temkin, R. J., "Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources", *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 1 (1): 54–75 (2011).
19. Maestrini, A., Ward, J. S., Gill, J. J., Lee, C., Thomas, B., Lin, R. H., Chattopadhyay, G., and Mehdi, I., "A Frequency-Multiplied Source With More Than 1 mW of Power Across the 840–900-GHz Band", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 58 (7): 1925–1932 (2010).
20. Yang, L.-A., Hao, Y., Yao, Q., and Zhang, J., "Improved Negative Differential Mobility Model of GaN and AlGaN for a Terahertz Gunn Diode", *IEEE Transactions On Electron Devices*, 58 (4): 1076–1083 (2011).
21. Mukherjee, M., Mazumder, N., Roy, S. K., and Goswami, K., "GaN IMPATT diode: a photo-sensitive high power terahertz source", *Semiconductor Science And Technology*, 22 (12): 1258 (2007).
22. Knap, W., Lusakowski, J., Parenty, T., Bollaert, S., Cappy, A., Popov, V. V., and Shur, M. S., "Terahertz emission by plasma waves in 60 nm gate high electron mobility transistors", *Applied Physics Letters*, 84 (13): 2331–2333 (2004).
23. Kanaya, H., Shibayama, H., Suzuki, S., and Asada, M., "Fundamental oscillation up to 1.31 THz in thin-well resonant tunneling diodes", (2012).
24. Hamster, H., Sullivan, A., Gordon, S., White, W., and Falcone, R. W., "Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction", *Physical Review Letters*, 71 (17): 2725–2728 (1993).
25. Dai, J., Liu, J., and Zhang, X.-C., "Terahertz Wave Air Photonics: Terahertz Wave Generation and Detection With Laser-Induced Gas Plasma", *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 17 (1): 183–190 (2011).

26. Vijayraghavan, K., Jiang, Y., Jang, M., Jiang, A., Choutagunta, K., Vizbaras, A., Demmerle, F., Boehm, G., Amann, M. C., and Belkin, M. A., "Broadly tunable terahertz generation in mid-infrared quantum cascade lasers", *Nature Communications*, 4 (1): 2021 (2013).
27. Walther, C., Fischer, M., Scalari, G., Terazzi, R., Hoyler, N., and Faist, J., "Quantum cascade lasers operating from 1.2to1.6THz", *Applied Physics Letters*, 91 (13): 131122 (2007).
28. Shi, W., Ding, Y. J., and Schunemann, P. G., "Coherent terahertz waves based on difference-frequency generation in an annealed zinc–germanium phosphide crystal: improvements on tuning ranges and peak powers", *Optics Communications*, 233 (1): 183–189 (2004).
29. Tomasino, A., Parisi, A., Stivala, S., Livreri, P., Cino, A. C., Busacca, A. C., Peccianti, M., and Morandotti, R., "Wideband THz Time Domain Spectroscopy based on Optical Rectification and Electro-Optic Sampling", *Scientific Reports*, 3 (1): 3116 (2013).
30. Yardimci, N. T., Lu, H., and Jarrahi, M., "High power telecommunication-compatible photoconductive terahertz emitters based on plasmonic nano-antenna arrays", *Applied Physics Letters*, 109 (19): 191103 (2016).
31. Liang, G., Liu, T., and Wang, Q. J., "Recent Developments of Terahertz Quantum Cascade Lasers", *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 23 (4): 1–18 (2017).
32. Ito, H. and Ishibashi, T., "Photonic Terahertz-Wave Generation Using Slot-Antenna-Integrated Uni-Traveling-Carrier Photodiodes", *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 23 (4): 1–7 (2017).
33. Eisele, H., "InP Gunn devices for 400–425 GHz", *Electronics Letters*, 42 (6): 358-359(1) (2006).
34. G. Chattopadhyay, E. Schlecht, J. S. Ward, J. J. Gill, H. H. S. Javadi, F. Maiwald, and I. Mehdi, "An all-solid-state broad-band frequency multiplier chain at 1500 GHz", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 52 (52): (2004).
35. P. Tripathy, M. Mukherjee, and S. Pati, "Photosensitive InP IMPATTs in the THz Regime: Modulation of Frequency-Chirping by Optical Means", *Advanced Science Letters*, 22 (2): (2016).
36. Hesler, J. L., Xu, H., Reck, T., and Crowe, T. W., "Development and testing of a 2.5 THz Schottky mixer", (2011).
37. Siegel, P. H., Smith, R. P., Graidis, M. C., and Martin, S. C., "2.5-THz GaAs monolithic membrane-diode mixer", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 47 (5): 596–604 (1999).

38. Asada, M. and Suzuki, S., "Room-Temperature Oscillation of Resonant Tunneling Diodes close to 2 THz and Their Functions for Various Applications", *Journal Of Infrared, Millimeter, And Terahertz Waves*, 37 (12): 1185–1198 (2016).
39. Maestrini, A., Mehdi, I., Siles, J. V, Ward, J. S., Lin, R., Thomas, B., Lee, C., Gill, J., Chattopadhyay, G., Schlecht, E., Pearson, J., and Siegel, P., "Design and Characterization of a Room Temperature All-Solid-State Electronic Source Tunable From 2.48 to 2.75 THz", *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 2 (2): 177–185 (2012).
40. Biswas, A., Sinha, S., Acharyya, A., Banerjee, A., Pal, S., Satoh, H., and Inokawa, H., "1.0 THz GaN IMPATT Source: Effect of Parasitic Series Resistance", *Journal Of Infrared, Millimeter, And Terahertz Waves*, 39 (10): 954–974 (2018).
41. Mei, X., Yoshida, W., Lange, M., Lee, J., Zhou, J., Liu, P.-H., Leong, K., Zamora, A., Padilla, J., Sarkozy, S., Lai, R., and Deal, W. R., "First Demonstration of Amplification at 1 THz Using 25-nm InP High Electron Mobility Transistor Process", *IEEE Electron Device Letters*, 36 (4): 327–329 (2015).
42. Qin, H., Sun, J., He, Z., Li, X., Li, X., Liang, S., Yu, C., Feng, Z., Tu, X., Jin, B., Chen, J., and Wu, P., "Heterodyne detection at 216, 432, and 648 GHz based on bilayer graphene field-effect transistor with quasi-optical coupling", *Carbon*, 121: 235–241 (2017).
43. Wang, D., Wang, G., Wang, J., Li, S., Zeng, P., and Teng, Y., "A high-order mode extended interaction klystron at 0.34 THz", *Physics Of Plasmas*, 24 (2): 023106 (2017).
44. Kang, B. J., Baek, I. H., Lee, S.-H., Kim, W. T., Lee, S.-J., Jeong, Y. U., Kwon, O.-P., and Rotermund, F., "Highly nonlinear organic crystal OHQ-T for efficient ultra-broadband terahertz wave generation beyond 10 THz", *Optics Express*, 24 (10): 11054–11061 (2016).
45. Luqi, Z., Yanyu, W., Guo, G., Jin, X., Wanghe, W., Yuanyuan, W., Chong, D., Xuebing, J., Guoqing, Z., Yubin, G., Wenxiang, W., and Gun-Sik, P., "An ultra-broadband watt-level terahertz BWO based upon novel sine shape ridge waveguide", *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 49 (23): 235102 (2016).
46. Zhao, A. Q. and Yu, B. S., "The Nonlinear Designs and Experiments on a 0.42-THz Second Harmonic Gyrotron With Complex Cavity", *IEEE Transactions On Electron Devices*, 64 (2): 564–570 (2017).
47. Yan, D., Wang, Y., Xu, D., Liu, P., Yan, C., Shi, J., Liu, H., He, Y., Tang, L., Feng, J., Guo, J., Shi, W., Zhong, K., Tsang, Y. H., and Yao, J., "High-average-power, high-repetition-rate tunable terahertz difference frequency generation with GaSe crystal pumped by 2-μm dual-

- wavelength intracavity KTP optical parametric oscillator", *Photonics Research*, 5 (2): 82–87 (2017).
48. Billa, L. R., Shi, X., Akram, M. N., and Chen, X., "Improved Design and Microfabrication of H -Plane and E -Plane Loaded Rectangular Slow-Wave Structure for THz TWT Amplifier", *IEEE Transactions On Electron Devices*, 64 (5): 2383–2389 (2017).
  49. Yang, X., Zhao, X., Yang, K., Liu, Y., Liu, Y., Fu, W., and Luo, Y., "Biomedical Applications of Terahertz Spectroscopy and Imaging", *Trends In Biotechnology*, 34 (10): 810–824 (2016).
  50. Siegel, P. H., "Terahertz technology in biology and medicine", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 52 (10): 2438–2447 (2004).
  51. Löffler, T., Bauer, T., Siebert, K. J., Roskos, H. G., Fitzgerald, A., and Czasch, S., "Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue", *Optics Express*, 9 (12): 616–621 (2001).
  52. Reid, C. B., Reese, G., Gibson, A. P., and Wallace, V. P., "Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Human Blood", *IEEE Journal Of Biomedical And Health Informatics*, 17 (4): 774–778 (2013).
  53. Stringer, M. R., Lund, D. N., Foulds, A. P., Uddin, A., Berry, E., Miles, R. E., and Davies, A. G., "The analysis of human cortical bone by terahertz time-domain spectroscopy", *Physics In Medicine & Biology*, 50 (14): 3211 (2005).
  54. Shen, Y.-C. and Taday, P. F., "Development and Application of Terahertz Pulsed Imaging for Nondestructive Inspection of Pharmaceutical Tablet", *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 14 (2): 407–415 (2008).
  55. May, R. K., Evans, M. J., Zhong, S., Warr, I., Gladden, L. F., Shen, Y., and Zeitler, J. A., "Terahertz In-Line Sensor for Direct Coating Thickness Measurement of Individual Tablets During Film Coating in Real-Time", *Journal Of Pharmaceutical Sciences*, 100 (4): 1535–1544 (2011).
  56. Lin, H., Dong, Y., Markl, D., Williams, B. M., Zheng, Y., Shen, Y., and Zeitler, J. A., "Measurement of the Intertablet Coating Uniformity of a Pharmaceutical Pan Coating Process With Combined Terahertz and Optical Coherence Tomography In-Line Sensing", *Journal Of Pharmaceutical Sciences*, 106 (4): 1075–1084 (2017).
  57. May, R. K., Su, K., Han, L., Zhong, S., Elliott, J. A., Gladden, L. F., Evans, M., Shen, Y., and Zeitler, J. A., "Hardness and Density Distributions of Pharmaceutical Tablets Measured by Terahertz Pulsed Imaging", *Journal Of Pharmaceutical Sciences*, 102 (7): 2179–2186 (2013).
  58. Ho, L., Müller, R., Krüger, C., Gordon, K. C., Kleinebudde, P., Pepper, M., Rades, T., Shen, Y., Taday, P. F., and Axel Zeitler, J., "Investigating dissolution

- performance critical areas on coated tablets: A case study using terahertz pulsed imaging", *Journal Of Pharmaceutical Sciences*, 99 (1): 392–402 (2010).
59. Taday, P. F., Bradley, I. V, Arnone, D. D., and Pepper, M., "Using terahertz pulse spectroscopy to study the crystalline structure of a drug: A case study of the polymorphs of ranitidine hydrochloride", *Journal Of Pharmaceutical Sciences*, 92 (4): 831–838 (2003).
  60. Tribe, W. R., Newnham, D. A., Taday, P. F., and Kemp, M. C., "Hidden object detection: security applications of terahertz technology", (2004).
  61. Krumbholz, N., Hochrein, T., Vieweg, N., Hasek, T., Kretschmer, K., Bastian, M., Mikulics, M., and Koch, M., "Monitoring polymeric compounding processes inline with THz time-domain spectroscopy", *Polymer Testing*, 28 (1): 30–35 (2009).
  62. Jansen, C., Wietzke, S., Peters, O., Scheller, M., Vieweg, N., Salhi, M., Krumbholz, N., Jördens, C., Hochrein, T., and Koch, M., "Terahertz imaging: applications and perspectives", *Applied Optics*, 49 (19): E48–E57 (2010).
  63. Song, H.-J. and Nagatsuma, T., "Present and Future of Terahertz Communications", *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 1 (1): 256–263 (2011).
  64. Nagatsuma, T., Ducournau, G., and Renaud, C. C., "Advances in terahertz communications accelerated by photonics", *Nature Photonics*, 10 (6): 371–379 (2016).
  65. Auston, D. H., Cheung, K. P., and Smith, P. R., "Picosecond photoconducting Hertzian dipoles", *Applied Physics Letters*, 45 (3): 284–286 (1984).
  66. Cheung, K. P., Auston, D. H., Valdmanis, J. A., and Kleinman, D. A., "Cerenkov Radiation from Femtosecond Optical Pulses in Electro-Optic Media", *Physical Review Letters*, 53 (16): 409–410 (1984).
  67. Ketchen, M. B., Grischkowsky, D., Chen, T. C., Chi, C., Duling III, I. N., Halas, N. J., Halbout, J., Kash, J. A., and Li, G. P., "Generation of subpicosecond electrical pulses on coplanar transmission lines", *Applied Physics Letters*, 48 (12): 751–753 (1986).
  68. Fattinger, Ch. and Grischkowsky, D., "Point source terahertz optics", *Applied Physics Letters*, 53 (16): 1480–1482 (1988).
  69. Hughes, S., Tani, M., and Sakai, K., "Vector analysis of terahertz transients generated by photoconductive antennas in near- and far-field regimes", *Journal Of Applied Physics*, 93 (8): 4880–4884 (2003).
  70. Castro-Camus, E., Lloyd-Hughes, J., and Johnston, M. B., "Three-dimensional carrier-dynamics simulation of terahertz emission from photoconductive switches", *Physical Review B*, 71 (19): 195301 (2005).

71. Kirawanich, P., Yakura, S. J., and Islam, N. E., "Study of High-Power Wideband Terahertz-Pulse Generation Using Integrated High-Speed Photoconductive Semiconductor Switches", *IEEE Transactions On Plasma Science*, 37 (1): 219–228 (2009).
72. Moreno, E., Pantoja, M. F., Ruiz, F. G., Roldán, J. B., and García, S. G., "On the Numerical Modeling of Terahertz Photoconductive Antennas", *Journal Of Infrared, Millimeter, And Terahertz Waves*, 35 (5): 432–444 (2014).
73. Emadi, R., Barani, N., Safian, R., and Nezhad, A. Z., "Hybrid Computational Simulation and Study of Terahertz Pulsed Photoconductive Antennas", *Journal Of Infrared, Millimeter, And Terahertz Waves*, 37 (11): 1069–1085 (2016).
74. Tani, M., Matsuura, S., Sakai, K., and Nakashima, S., "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs", *Appl. Opt.*, 36 (30): 7853–7859 (1997).
75. Salem, B., Morris, D., Aimez, V., Beerens, J., Beauvais, J., and Houde, D., "Pulsed photoconductive antenna terahertz sources made on ion-implanted GaAs substrates", *Journal Of Physics: Condensed Matter*, 17 (46): 7327 (2005).
76. Mangeney, J. and Crozat, P., "Ion-irradiated In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As photoconductive antennas for THz generation and detection at 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength", *Comptes Rendus Physique*, 9 (2): 142–152 (2008).
77. Gupta, S., Whitaker, J. F., and Mourou, G. A., "Ultrafast carrier dynamics in III-V semiconductors grown by molecular-beam epitaxy at very low substrate temperatures", *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 28 (10): 2464–2472 (1992).
78. Krotkus, A., Marcinkevicius, S., Jasinski, J., Kaminska, M., Tan, H. H., and Jagadish, C., "Picosecond carrier lifetime in GaAs implanted with high doses of As ions: An alternative material to low-temperature GaAs for optoelectronic applications", *Applied Physics Letters*, 66 (24): 3304–3306 (1995).
79. Smith, P. R., Auston, D. H., and Nuss, M. C., "Subpicosecond photoconducting dipole antennas", *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 24 (2): 255–260 (1988).
80. Mounaix, P., Tondusson, M., Chimot, N., Mangeney, J., Blary, K., and Lampin, J. F., "High emission and detection efficiency of terahertz beam with heavy-ion-irradiated InP material excited at 0.8  $\mu\text{m}$ ", *Electronics Letters*, 42 (15): 879–880(1) (2006).
81. Imafuji, O., Singh, B. P., Hirose, Y., Fukushima, Y., and Takigawa, S., "High power subterahertz electromagnetic wave radiation from GaN photoconductive switch", *Applied Physics Letters*, 91 (7): 071112 (2007).



82. Benicewicz, P. K., Roberts, J. P., and Taylor, A. J., "Scaling of terahertz radiation from large-aperture biased photoconductors", *Journal Of The Optical Society Of America B*, 11 (12): 2533–2546 (1994).
83. Fekecs, A., Bernier, M., Morris, D., Chicoine, M., Schiettekatte, F., Charette, P., and Arès, R., "Fabrication of high resistivity cold-implanted InGaAsP photoconductors for efficient pulsed terahertz devices", *Optical Materials Express*, 1 (7): 1165–1177 (2011).
84. Roehle, H., Dietz, R. J. B., Hensel, H. J., Böttcher, J., Künzel, H., Stanze, D., Schell, M., and Sartorius, B., "Next generation 1.5  $\mu\text{m}$  terahertz antennas: mesa-structuring of InGaAs/InAlAs photoconductive layers", *Optics Express*, 18 (3): 2296–2301 (2010).
85. Bertulis, K., Krotkus, A., Aleksejenko, G., Pačebutas, V., Adomavičius, R., Molis, G., and Marcinkevičius, S., "GaBiAs: A material for optoelectronic terahertz devices", *Applied Physics Letters*, 88 (20): 201112 (2006).
86. Kaminska, M., Liliental-Weber, Z., Weber, E. R., George, T., Kortright, J. B., Smith, F. W., Tsauro, B., and Calawa, A. R., "Structural properties of As-rich GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures", *Applied Physics Letters*, 54 (19): 1881–1883 (1989).
87. Galiev, G. B., Klimov, E. A., Grekhov, M. M., Pushkarev, S. S., Lavrukhin, D. V., and Maltsev, P. P., "Structural and photoluminescence properties of low-temperature GaAs grown on GaAs(100) and GaAs(111)A substrates", *Semiconductors*, 50 (2): 195–203 (2016).
88. Loata, G. C., "Investigation of low-temperature-grown GaAs photoconductive antennae for continuous-wave and pulsed terahertz generation", Frankfurt Am Main, (2007).
89. Xie, K., Huang, Z. C., and Wie, C. R., "Deep level studies in MBE GaAs grown at low temperature", *Journal Of Electronic Materials*, 20 (8): 553–558 (1991).
90. Zhang, K. and Miller, D. L., "Electrical properties of low-temperature GaAs grown by molecular beam epitaxy and migration enhanced epitaxy", *Journal Of Electronic Materials*, 22 (12): 1433–1436 (1993).
91. Kordoš, P., Förster, A., Betko, J., Morvic, M., and Novák, J., "Semi-insulating GaAs layers grown by molecular-beam epitaxy", *Applied Physics Letters*, 67 (7): 983–985 (1995).
92. Melloch, M. R., Otsuka, N., Woodall, J. M., Warren, A. C., and Freeouf, J. L., "Formation of arsenic precipitates in GaAs buffer layers grown by molecular beam epitaxy at low substrate temperatures", *Applied Physics Letters*, 57 (15): 1531–1533 (1990).
93. Yano, R., Hirayama, Y., Miyashita, S., Uesugi, N., and Uehara, S., "Arsenic pressure dependence of carrier lifetime and annealing dynamics for low-

- temperature grown GaAs studied by pump–probe spectroscopy", *Journal Of Applied Physics*, 94 (6): 3966–3971 (2003).
94. Specht, P., Jeong, S., Sohn, H., Luysberg, M., Prasad, A., Gebauer, J., Krause-Rehberg, R., and Weber, E. R., "Defect Control in As-Rich GaAs", *Materials Science Forum*, 258–263: 951–956 (1997).
  95. Luysberg, M., Sohn, H., Prasad, A., Specht, P., Liliental-Weber, Z., Weber, E. R., Gebauer, J., and Krause-Rehberg, R., "Effects of the growth temperature and As/Ga flux ratio on the incorporation of excess As into low temperature grown GaAs", *Journal Of Applied Physics*, 83 (1): 561–566 (1998).
  96. Look, D. C., "Molecular beam epitaxial GaAs grown at low temperatures", *Thin Solid Films*, 231 (1): 61–73 (1993).
  97. Liu, X., Prasad, A., Chen, W. M., Kurpiewski, A., Stoschek, A., Liliental-Weber, Z., and Weber, E. R., "Mechanism responsible for the semi-insulating properties of low-temperature-grown GaAs", *Applied Physics Letters*, 65 (23): 3002–3004 (1994).
  98. von Bardeleben, H. J., Manasreh, M. O., Look, D. C., Evans, K. R., and Stutz, C. E., "Electron-paramagnetic-resonance study of GaAs grown by low-temperature molecular-beam epitaxy", *Physical Review B*, 45 (7): 3372–3375 (1992).
  99. Gupta, S., Frankel, M. Y., Valdmanis, J. A., Whitaker, J. F., Mourou, G. A., Smith, F. W., and Calawa, A. R., "Subpicosecond carrier lifetime in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures", *Applied Physics Letters*, 59 (25): 3276–3278 (1991).
  100. Prabhu, S. S., Ralph, S. E., Melloch, M. R., and Harmon, E. S., "Carrier dynamics of low-temperature-grown GaAs observed via THz spectroscopy", *Applied Physics Letters*, 70 (18): 2419–2421 (1997).
  101. McIntosh, K. A., Nichols, K. B., Verghese, S., and Brown, E. R., "Investigation of ultrashort photocarrier relaxation times in low-temperature-grown GaAs", *Applied Physics Letters*, 70 (3): 354–356 (1997).
  102. Němec, H., Pashkin, A., Kužel, P., Khazan, M., Schnüll, S., and Wilke, I., "Carrier dynamics in low-temperature grown GaAs studied by terahertz emission spectroscopy", *Journal Of Applied Physics*, 90 (3): 1303–1306 (2001).
  103. Harmon, E. S., Melloch, M. R., Woodall, J. M., Nolte, D. D., Otsuka, N., and Chang, C. L., "Carrier lifetime versus anneal in low temperature growth GaAs", *Applied Physics Letters*, 63 (16): 2248–2250 (1993).
  104. Benjamin, S. D., Loka, H. S., Othonos, A., and Smith, P. W. E., "Ultrafast dynamics of nonlinear absorption in low-temperature-grown GaAs", *Applied Physics Letters*, 68 (18): 2544–2546 (1996).

105. Luo, J. K., Thomas, H., Morgan, D. V., and Westwood, D., "Transport properties of GaAs layers grown by molecular beam epitaxy at low temperature and the effects of annealing", *Journal Of Applied Physics*, 79 (7): 3622–3629 (1996).
106. Look, D. C., Walters, D. C., Manasreh, M. O., Szelove, J. R., Stutz, C. E., and Evans, K. R., "Anomalous Hall-effect results in low-temperature molecular-beam-epitaxial GaAs: Hopping in a dense EL2-like band", *Physical Review B*, 42 (6): 3578–3581 (1990).
107. Kaminska, M. and Weber, E. R., "Low Temperature GaAs: Electrical and Optical Properties", *Materials Science Forum*, 83–87: 1033–1044 (1992).
108. Segschneider, G., Jacob, F., Löffler, T., Roskos, H. G., Tautz, S., Kiesel, P., and Döhler, G., "Free-carrier dynamics in low-temperature-grown GaAs at high excitation densities investigated by time-domain terahertz spectroscopy", *Physical Review B*, 65 (12): 125205 (2002).
109. Beard, M. C., Turner, G. M., and Schmuttenmaer, C. A., "Subpicosecond carrier dynamics in low-temperature grown GaAs as measured by time-resolved terahertz spectroscopy", *Journal Of Applied Physics*, 90 (12): 5915–5923 (2001).
110. Look, D. C., Walters, D. C., Robinson, G. D., Szelove, J. R., Mier, M. G., and Stutz, C. E., "Annealing dynamics of molecular-beam epitaxial GaAs grown at 200°C", *Journal Of Applied Physics*, 74 (1): 306–310 (1993).
111. Look, D. C., Robinson, G. D., Szelove, J. R., and Stutz, C. E., "Electrical properties of molecular beam epitaxial GaAs grown at 300–450°C", *Journal Of Electronic Materials*, 22 (12): 1425–1428 (1993).
112. Stellmacher, M., Schnell, J.-P., Adam, D., and Nagle, J., "Photoconductivity investigation of the electron dynamics in GaAs grown at low temperature", *Applied Physics Letters*, 74 (9): 1239–1241 (1999).
113. Tani, M., Matsuura, S., Sakai, K., and Nakashima, S., "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs", *Applied Optics*, 36 (30): 7853–7859 (1997).
114. Zhang, J., Hong, Y., Braunstein, S. L., and Shore, K. A., "Terahertz pulse generation and detection with LT-GaAs photoconductive antenna", *IET Digital Library*, 151 (2): 98–101 (2004).
115. Tonouchi, M., Tani, M., Wang, Z., Sakai, K., Hangyo, M., Wada, N., and Murakami, Y., "Enhanced THz radiation from YBCO thin film bow-tie antennas with hyper-hemispherical MgO lens", *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 7 (2): 2913–2916 (1997).
116. Berry, C. W. and Jarrahi, M., "Terahertz generation using plasmonic photoconductive gratings", *New Journal Of Physics*, 14 (10): 105029 (2012).

117. Berry, C. W., Wang, N., Hashemi, M. R., Unlu, M., and Jarrahi, M., "Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes", *Nature Communications*, 4: (2013).
118. Hattori, T., Egawa, K., Ookuma, S., and Itatani, T., "Intense Terahertz Pulses from Large-Aperture Antenna with Interdigitated Electrodes", *Japanese Journal Of Applied Physics*, 45 (4L): L422 (2006).
119. Stone, M. R., Naftaly, M., Miles, R. E., Fletcher, J. R., and Steenson, D. P., "Electrical and radiation characteristics of semilarge photoconductive terahertz emitters", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 52 (10): 2420–2429 (2004).
120. Suzuki, M. and Tonouchi, M., "Fe-implanted InGaAs photoconductive terahertz detectors triggered by 1.56 $\mu$ m femtosecond optical pulses", *Applied Physics Letters*, 86 (16): 163504 (2005).
121. Holzman, J. F., Vermeulen, F. E., and Elezzabi, A. Y., "Ultrafast photoconductive self-switching of subpicosecond electrical pulses", *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 36 (2): 130–136 (2000).
122. Auston, D., "Impulse response of photoconductors in transmission lines", *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 19 (4): 639–648 (1983).
123. Brown, E. R., Smith, F. W., and McIntosh, K. A., "Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors", *Journal Of Applied Physics*, 73 (3): 1480–1484 (1993).
124. Heshmat, B., Pahlevaninezhad, H., Beard, M. C., Papadopoulos, C., and Darcie, T. E., "Single-walled carbon nanotubes as base material for THz photoconductive switching: a theoretical study from input power to output THz emission", *Optics Express*, 19 (16): 15077–15089 (2011).
125. Khiabani, N., Huang, Y., Shen, Y.-C., and Boyes, S., "Theoretical Modeling of a Photoconductive Antenna in a Terahertz Pulsed System", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 61 (4): 1538–1546 (2013).
126. Khiabani, N., Huang, Y., Shen, Y., and Boyes, S., "Time variant source resistance in the THz photoconductive antenna", (2011).
127. Loata, G. C., Thomson, M. D., Löffler, T., and Roskos, H. G., "Radiation field screening in photoconductive antennae studied via pulsed terahertz emission spectroscopy", *Applied Physics Letters*, 91 (23): 232506 (2007).
128. Preu, S., Döhler, G. H., Malzer, S., Wang, L. J., and Gossard, A. C., "Tunable, continuous-wave Terahertz photomixer sources and applications", *Journal Of Applied Physics*, 109 (6): 061301 (2011).

129. Jepsen, P. U., Jacobsen, R. H., and Keiding, S. R., "Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas", *Journal Of The Optical Society Of America B*, 13 (11): 2424–2436 (1996).
130. D. B. Rutledge, D. P. Niekirk, and D. P. Kasilangam, "Integrated circuit antennas", *Infrared Milli.-Waves Series New York:Academic*, (1983).
131. Pačebutas, V., Bičiūnas, A., Balakauskas, S., Krotkus, A., Andriukaitis, G., Lorenc, D., Pugžlys, A., and Baltuška, A., "Terahertz time-domain-spectroscopy system based on femtosecond Yb: fiber laser and GaBiAs photoconducting components", *Applied Physics Letters*, 97 (3): 031111 (2010).
132. Wood, C. D., Hatem, O., Cunningham, J. E., Linfield, E. H., Davies, A. G., Cannard, P. J., Robertson, M. J., and Moodie, D. G., "Terahertz emission from metal-organic chemical vapor deposition grown Fe:InGaAs using 830 nm to 1.55  $\mu\text{m}$  excitation", *Applied Physics Letters*, 96 (19): 194104 (2010).
133. Suen, J. Y., Li, W., Taylor, Z. D., and Brown, E. R., "Characterization and modeling of a terahertz photoconductive switch", *Applied Physics Letters*, 96 (14): 141103 (2010).
134. Berry, C. W. and Jarrahi, M., "Ultrafast photoconductors based on plasmonic gratings", (2011).
135. Lee, Y., "Principles of Terahertz Science and Technology", 1st ed. Ed., *NY: Springer*, New York, (2008).
136. Klier, J., Wohnsiedler, S., Zouaghi, W., Peytavit, E., Lampin, J.-F., Jonuscheit, J., and Beigang, R., "Far-field THz radiation pattern from photoconductive emitters on different substrates", (2011).
137. Van Rudd, J. and Mittleman, D. M., "Influence of substrate-lens design in terahertz time-domain spectroscopy", *Journal Of The Optical Society Of America B*, 19 (2): 319–329 (2002).
138. Ellrich, F., Weinland, T., Molter, D., Jonuscheit, J., and Beigang, R., "Compact fiber-coupled terahertz spectroscopy system pumped at 800 nm wavelength", *Review Of Scientific Instruments*, 82 (5): 053102 (2011).
139. Sartorius, B., Roehle, H., Künzel, H., Böttcher, J., Schlak, M., Stanze, D., Venghaus, H., and Schell, M., "All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1.5  $\mu\text{m}$  telecom wavelengths", *Optics Express*, 16 (13): 9565–9570 (2008).
140. Han, S.-P., Ko, H., Kim, N., Ryu, H.-C., Wook Lee, C., Ahn Leem, Y., Lee, D., Yong Jeon, M., Kyu Noh, S., Sook Chun, H., and Hyun Park, K., "Optical fiber-coupled InGaAs-based terahertz time-domain spectroscopy system", *Optics Letters*, 36 (16): 3094–3096 (2011).
141. Vieweg, N., Mikulics, M., Scheller, M., Ezdi, K., Wilk, R., Hübers, H.-W., and Koch, M., "Impact of the contact metallization on the performance of

- photoconductive THz antennas", *Optics Express*, 16 (24): 19695–19705 (2008).
142. Matsuura, S., Tani, M., and Sakai, K., "Generation of coherent terahertz radiation by photomixing in dipole photoconductive antennas", *Applied Physics Letters*, 70 (5): 559–561 (1997).
  143. Gregory, I. S., Baker, C., Tribe, W. R., Bradley, I. V, Evans, M. J., Linfield, E. H., Davies, A. G., and Missous, M., "Optimization of photomixers and antennas for continuous-wave terahertz emission", *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 41 (5): 717–728 (2005).
  144. Gao, Y., Chen, M., Yin, S., Ruffin, P., Brantley, C., and Edwards, E., "Terahertz enhancement from terahertz-radiation-assisted large aperture photoconductive antenna", *Journal Of Applied Physics*, 109 (3): 033108 (2011).
  145. Verghese, S., McIntosh, K. A., Calawa, S., Dinatale, W. F., Duerr, E. K., and Molvar, K. A., "Generation and detection of coherent terahertz waves using two photomixers", *Applied Physics Letters*, 73 (26): 3824–3826 (1998).
  146. Khiabani, N., "Modelling, Design and Characterisation of Terahertz Photoconductive Antennas", (2013).
  147. Tamagnone, M., Gómez-Díaz, J. S., Mosig, J. R., and Perruisseau-Carrier, J., "Analysis and design of terahertz antennas based on plasmonic resonant graphene sheets", *Journal Of Applied Physics*, 112 (11): 114915 (2012).
  148. Llatser, I., Kremers, C., Cabellos-Aparicio, A., Jornet, J. M., Alarcón, E., and Chigrin, D. N., "Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation", *Photonics And Nanostructures - Fundamentals And Applications*, 10 (4): 353–358 (2012).
  149. Geim, A. K. and Novoselov, K. S., "The rise of graphene", *Nature Materials*, 6 (3): 183–191 (2007).
  150. Heshmat, B., Pahlevaninezhad, H., Darcie, T. E., and Papadopoulos, C., "Evaluation of carbon nanotubes for THz photomixing", (2010).
  151. Tamagnone, M., Gómez-Díaz, J. S., Mosig, J. R., and Perruisseau-Carrier, J., "Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack", *Applied Physics Letters*, 101 (21): 214102 (2012).
  152. Pozar, D. M., "Microwave Engineering", *Fourth Edition. Hoboken, NJ: Wiley, [2012] ©2012, .*
  153. Singh, D., Kalialakis, C., Gardner, P., and Hall, P. S., "Small H-shaped antennas for MMIC applications", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 48 (7): 1134–1141 (2000).
  154. Gupta, S., Frankel, M. Y., Valdmanis, J. A., Whitaker, J. F., Mourou, G. A., Smith, F. W., and Calawa, A. R., "Subpicosecond carrier lifetime in GaAs

- grown by molecular beam epitaxy at low temperatures", *Applied Physics Letters*, 59 (25): 3276–3278 (1991).
155. Martin, M. and Brown, E. R., "Critical comparison of GaAs and InGaAs THz photoconductors", (2012).
  156. Gregory, I. S., Baker, C., Tribe, W. R., Evans, M. J., Beere, H. E., Linfield, E. H., Davies, A. G., and Missous, M., "High resistivity annealed low-temperature GaAs with 100 fs lifetimes", *Applied Physics Letters*, 83 (20): 4199–4201 (2003).
  157. "Physics and Properties of Semiconductors—A Review", *Physics of Semiconductor Devices*, 5–75 (2006).
  158. Taylor, Z. D., Brown, E. R., Bjarnason, J. E., Hanson, M. P., and Gossard, A. C., "Resonant-optical-cavity photoconductive switch with 0.5% conversion efficiency and 1.0W peak power", *Optics Letters*, 31 (11): 1729–1731 (2006).
  159. Hrivnák, L., "Semi-insulating GaAs", *Czechoslovak Journal Of Physics B*, 34 (5): 436–444 (1984).
  160. Colinge, J. and Colinge, C. A., "Physics of Semiconductor Devices.", *Kluwer Academic Publishers*, Boston, (2002).
  161. Jackson, A. W., Ibbetson, J. P., Gossard, A. C., and Mishra, U. K., "Reduced thermal conductivity in low-temperature-grown GaAs", *Applied Physics Letters*, 74 (16): 2325–2327 (1999).
  162. Smith, F. W., Le, H. Q., Diadiuk, V., Hollis, M. A., Calawa, A. R., Gupta, S., Frankel, M., Dykaar, D. R., Mourou, G. A., and Hsiang, T. Y., "Picosecond GaAs-based photoconductive optoelectronic detectors", *Applied Physics Letters*, 54 (10): 890–892 (1989).
  163. J K Luo, H Thomas, D V Morgan, D Westwood, and R H Williams, "The electrical breakdown properties of GaAs layers grown by molecular beam epitaxy at low temperature", *Semiconductor Science And Technology*, 9 (12): 2199 (1994).
  164. Yano, R., Hirayama, Y., Miyashita, S., Sasabu, H., Uesugi, N., and Uehara, S., "Pump–probe spectroscopy of low-temperature grown GaAs for carrier lifetime estimation: arsenic pressure dependence of carrier lifetime during MBE crystal growth", *Physics Letters A*, 289 (1): 93–98 (2001).
  165. Missous, M., "Stoichiometric low temperature (SLT) GaAs and AlGaAs grown by molecular beam epitaxy", *Microelectronics Journal*, 27 (4): 393–409 (1996).
  166. Liu, T.-A., Tani, M., Nakajima, M., Hangyo, M., and Pan, C.-L., "Ultrabroadband terahertz field detection by photoconductive antennas based on multi-energy arsenic-ion-implanted GaAs and semi-insulating GaAs", *Applied Physics Letters*, 83 (7): 1322–1324 (2003).

167. Bjarnason, J. E., Chan, T. L. J., Lee, A. W. M., Brown, E. R., Driscoll, D. C., Hanson, M., Gossard, A. C., and Muller, R. E., "ErAs:GaAs photomixer with two-decade tunability and 12 $\mu$ W peak output power", *Applied Physics Letters*, 85 (18): 3983–3985 (2004).
168. Kadow, C., Jackson, A. W., Gossard, A. C., Bowers, J. E., Matsuura, S., and Blake, G. A., "Self-assembled ErAs islands in GaAs for THz applications", *Physica E: Low-Dimensional Systems And Nanostructures*, 7 (1): 97–100 (2000).
169. Sukhotin, M., Brown, E. R., Driscoll, D., Hanson, M., and Gossard, A. C., "Picosecond photocarrier-lifetime in ErAs:InGaAs at 1.55  $\mu$ m", *Applied Physics Letters*, 83 (19): 3921–3923 (2003).
170. Takazato, A., Kamakura, M., Matsui, T., Kitagawa, J., and Kadoya, Y., "Terahertz wave emission and detection using photoconductive antennas made on low-temperature-grown InGaAs with 1.56 $\mu$ m pulse excitation", *Applied Physics Letters*, 91 (1): 011102 (2007).
171. Hu, B. B., Weling, A. S., Auston, D. H., and Kuznetsov, A. Y., "DC electric field dependence of THz radiation induced by femtosecond optical excitation of bulk GaAs", (1993).
172. Huang, Y., Khiabani, N., Shen, Y., and Li, D., "Terahertz photoconductive antenna efficiency", (2011).
173. Li, D., Huang, Y., Shen, Y.-C., and Khiabani, N., "Effects of substrate on the performance of photoconductive THz antennas", (2010).
174. Palacios, T., Hsu, A., and Wang, H., "Applications of graphene devices in RF communications", *IEEE Communications Magazine*, 48 (6): 122–128 (2010).
175. Tassin, P., Koschny, T., and Soukoulis, C. M., "Graphene for Terahertz Applications", *Science*, 341 (6146): 620–621 (2013).
176. Xu, J., Shi, W., Hou, L., Jia, W., Liu, K., Xie, X., and Zhang, X. -C., "Terahertz generation from multiple transparent dielectric coated GaAs antenna", (2004).
177. Jackson, D. R. and Alexopoulos, N. G., "Microstrip dipoles on electrically thick substrates", *International Journal Of Infrared And Millimeter Waves*, 7 (1): 1–26 (1986).
178. Alexopoulos, N. G., Katehi, P. B., and Rutledge, D. B., "Substrate Optimization for Integrated Circuit Antennas", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 31 (7): 550–557 (1983).
179. Dragoman, M., Muller, A. A., Dragoman, D., Coccetti, F., and Plana, R., "Terahertz antenna based on graphene", *Journal Of Applied Physics*, 107 (10): 104313 (2010).



180. Khiabani, N., Huang, Y., and Shen, Y., "Discussions on the main parameters of THz photoconductive antennas as emitters", (2011).
181. Huang, Y., Khiabani, N., Shen, Y., and Li, D., "A further study of THz photoconductive antennas", (2012).
182. Khiabani, N., Huang, Y., Garcia-Muñoz, L. E., Shen, Y.-C., and Rivera-Lavado, A., "A Novel Sub-THz Photomixer With Nano-Trapezoidal Electrodes", *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 4 (4): 501–508 (2014).
183. Aznida Abu Bakar Sajak, "Numerical Simulations of THz Photoconductive Antenna", PhD, (2018).
184. Gierz, I., Petersen, J. C., Mitrano, M., Cacho, C., Turcu, I. C. E., Springate, E., Stöhr, A., Köhler, A., Starke, U., and Cavalleri, A., "Snapshots of non-equilibrium Dirac carrier distributions in graphene", *Nature Materials*, 12 (12): 1119–1124 (2013).
185. Tanoto, H., Teng, J. ~H., Wu, Q. ~Y., Sun, M., Chen, Z. ~N., Maier, S. ~A., Wang, B., Chum, C. ~C., Si, G. ~Y., Danner, A. ~J., and Chua, S. ~J., "Greatly enhanced continuous-wave terahertz emission by nano-electrodes in a photoconductive photomixer", *Nature Photonics*, 6 (2): 121–126 (2012).
186. Mass Addison, "R. F. Pierret, Advanced Semiconductor Fundamentals. ", Wesley Pub. Co. Ed., (1987).
187. Sajak, A. A. B., Shen, Y., Huang, Y., Khiabani, N., and Alrawashdeh, R., "An investigation on THz antennas using graphene as a substrate", (2014).
188. Yang, S.-H., Hashemi, M. R., Berry, C. W., and Jarrahi, M., "7.5% Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters With Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes", *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 4 (5): 575–581 (2014).
189. H. Raether, "Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings", 1.st. Ed., *Springer* , (1998).
190. Barnes, W. L., "Surface plasmon–polariton length scales: a route to sub-wavelength optics", *Journal Of Optics A: Pure And Applied Optics*, 8 (4): S87 (2006).
191. Naik, G. V., Kim, J., and Boltasseva, A., "Oxides and nitrides as alternative plasmonic materials in the optical range [Invited]", *Optical Materials Express*, 1 (6): 1090 (2011).
192. Naik, G. V., Schroeder, J. L., Ni, X., Kildishev, A. V., Sands, T. D., and Boltasseva, A., "Titanium nitride as a plasmonic material for visible and near-infrared wavelengths", *Optical Materials Express*, 2 (4): 478 (2012).

193. Khiabani, N., Huang, Y., Shen, Y.-C., and Boyes, Stephen J., "Theoretical Modeling of a Photoconductive Antenna in a Terahertz Pulsed System", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 61 (4): 1538–1546 (2013).
194. Ponomarev, D. S., Lavrukhin, D. V, Glinskiy, I. A., Yachmenev, A. E., Zenchenko, N. V, Khabibullin, R. A., Goncharov, Y. G., Otsuji, T., and Zaytsev, K. I., "Enhanced THz radiation through a thick plasmonic electrode grating photoconductive antenna with tight photocarrier confinement", *Optics Letters*, 48 (5): 1220–1223 (2023).
195. Chen, L. and Bagci, H., "Analysis of Screening Effects on Terahertz Photoconductive Devices Using a Fully-Coupled Multiphysics Approach", *Journal Of Lightwave Technology*, 39 (24): 7876–7884 (2021).
196. Bhattacharya, A., Ghindani, D., and Prabhu, S. S., "Enhanced terahertz emission bandwidth from photoconductive antenna by manipulating carrier dynamics of semiconducting substrate with embedded plasmonic metasurface", *Optics Express*, 27 (21): 30272 (2019).
197. Lepeshov, S., Gorodetsky, A., Krasnok, A., Toropov, N., Vartanyan, T. A., Belov, P., Alú, A., and Rafailov, E. U., "Boosting Terahertz Photoconductive Antenna Performance with Optimised Plasmonic Nanostructures", *Scientific Reports*, 8 (1): 6624 (2018).
198. Shalini, M. and Madhan, M. G., "Theoretical investigations on the influence of photonic crystal shapes on the performance of graphene-based terahertz photoconductive bowtie dipole antenna", *Photonics And Nanostructures - Fundamentals And Applications*, 51: 101046 (2022).
199. Shi, X., Wang, K., Gu, J., An, Y., Jia, R., Tian, Z., Ouyang, C., Han, J., and Zhang, W., "Photoconductive Meta-Antenna Enabling Terahertz Amplitude Spectrum Manipulation", (2020).
200. Jyothi, A., Saha, C., Ghosh, B., Kini, R., and Vaisakh, C., "Design of a gain enhanced THz bow-tie photoconductive antenna", (2016).
201. Deva, U. and Saha, C., "Gain enhancement of photoconductive THz antenna using conical GaAs horn and Si lens", (2016).
202. Rana, G., Bhattacharya, A., Gupta, A., Ghindani, D., Jain, R., Duttgupta, S. P., and Prabhu, S. S., "A Polarization-Resolved Study of Nanopatterned Photoconductive Antenna for Enhanced Terahertz Emission", *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 9 (2): 193–199 (2019).
203. Zhu, N. and Ziolkowski, R. W., "Photoconductive THz Antenna Designs With High Radiation Efficiency, High Directivity, and High Aperture Efficiency", *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 3 (6): 721–730 (2013).
204. Dhiflaoui, A., Yahyaoui, | Ali, Yousaf, J., Aguilí, T., Hakim, | Bandar, Rmili, H., and Mittra, R., "Full wave numerical analysis of wideband and high

- directive log spiral THz photoconductive antenna", *INTERNATIONAL JOURNAL OF NUMERICAL MODELLING-ELECTRONIC NETWORKS DEVICES AND FIELDS*, 33 (6): 1–15 (2020).
205. Sanders, D. P., "Advances in Patterning Materials for 193 nm Immersion Lithography", *Chemical Reviews*, 110 (1): 321–360 (2010).
206. Guo, L. J., "Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements", *Advanced Materials*, 19 (4): 495–513 (2007).
207. Xia, Y. and Whitesides, G. M., "SOFT LITHOGRAPHY", *Annual Review Of Materials Science*, 28 (1): 153–184 (1998).
208. Qin, D., Xia, Y., and Whitesides, G. M., "Soft lithography for micro- and nanoscale patterning", *Nature Protocols*, 5 (3): 491–502 (2010).
209. Wagner, C. and Harned, N., "Lithography gets extreme", *Nature Photonics*, 4 (1): 24–26 (2010).

## ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre KARASU; 2011 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 2016'da mezun oldu. 2016 yılından beri Karabük Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. 2019 yılında Karabük Üniversitesi'nde Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Halen, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı doktora eğitimini sürdürmektedir.