



**GALYUM ARSENİK TABANLI FOTOİLETKEN TERAHERTZ ANTEN
ÜRETİM VE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI**

Hasan Mert BOZACI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2017

Hasan Mert BOZACI tarafından hazırlanan “GALYUM ARSENİK TABANLI FOTOİLETKEN TERAHERTZ ANTEN ÜRETİM VE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

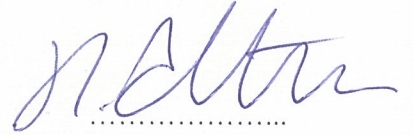
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Hakan ALTAN

Fizik Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Elif ORHAN

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 05 / 12 / 2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hasan Mert BOZACI

05 / 12 / 2017

GALYUM ARSENİK TABANLI FOTOİLETKEN TERAHERTZ ANTEN ÜRETİM VE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hasan Mert BOZACI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2017

ÖZET

Kimyasal malzemelerin tespiti, teşhisi ve ayırt edilmesinde kullanılan en ileri teknolojik sistemlerden bir tanesi de ‘Terahertz Zamana Dayalı Spektroskopi – THz-TDS’ yöntemidir. Bu sistemlerde çok geniş bantlı Terahertz dalga boyunda ışıyım ve algılama aygıtı olarak kullanılan, üretim ve uygulama açısından muadillerinden daha önde gelen cihazların başında Galyum Arsenik – GaAs – tabanlı fotoiletken antenler gelmektedir. Bu çalışmada bu antenlerin, kullanıldıkları spektroskopi sistemlerindeki kritik öneme haiz özellikleri incelenmiş ve bu özellikler göz önünde bulundurularak aygıt üretimleri yapılmıştır. Üretilen bu aygıtlar kurulan masa üstü THz-TDS sisteminde karakterize edilmiş ve ticari ürünlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma sürecinde bu antenler taşınabilir bir spektroskopi sisteminde alıcı ve verici olarak kullanılmıştır. Son olarak, üretilen bu antenlerin sistemdeki verimlerinin artırılması amacıyla optik nanoanten uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla uygulanacak nanoantenlerin bilgisayar ortamında benzetim çalışmaları yapılmış ve üretimine geçilmiştir. Optik nanoanten uygulama çalışmaları sonucunda üretilen fotoiletken antenlerde eşleniğine göre Terahertz ışıyım verimlerinde bant kaybı yaşanmadan bir buçuk katın üzerinde artış sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 20218
Anahtar Kelimeler : Terahertz, fotoiletken anten, galyum arsenik, Terahertz Zamana Dayalı Spektroskopi, optik nanoanten,
Sayfa Adedi : 49
Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

GALIIUM ARSENIC BASED PHOTOCONDUCTIVE TERAHERTZ ANTENNA
PRODUCTION AND IMPROVEMENT STUDIES

(M.Sc. Thesis)

Hasan Mert BOZACI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2017

ABSTRACT

A prominent technique for identification and characterization of chemical materials is ‘Terahertz Time-Domain Spectroscopy – THz-TDS’. GaAs based photoconductive antennae is one of the primary devices used as ultra-broadband emitter and receiver devices in these systems due to their competitive advantage in production and integration to systems. In this work, production of these antennae is carried out by examining and taking into consideration critical device parameters for such devices used in these spectroscopy systems. These manufactured devices were characterized and compared with commercial equivalents in a tabletop THz-TDS system. During this thesis work fabricated antennae were implemented as emitters and receivers for a portable spectroscopy system. Consecutively, optical nanoantennae were applied to these antennae in order to improve their efficiencies in the systems. To this end, computer simulations were carried out for these nanoantennae and optimized designs were fabricated. These nanoantennae applications resulted in more than one and a half fold increase in emission efficiency without a loss in bandwidth compared to their identical counterparts.

Science Code : 20218

Key Words : Terahertz, photoconductive antenna, gallium arsenide, Terahertz time domain spectroscopy, optical nanoantenna,

Page Number : 49

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım süresince bana destek olan ve yönlendiren Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, tez danışmanım Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e,

Tez araştırmaları sürecinde bana özgüven aşılayan ve ilgi, zaman, emek ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta Direktörümüz Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY olmak üzere Dr. Bayram BÜTÜN, Dr. M. Deniz Çalışkan, Dr. Tolga KARTALOĞLU, Yiğit Demirağ ve bütün İ.D. Bilkent Üniversitesi NANOTAM ailesine,

Teorik, pratik ve teknik olarak bugünlere gelmemdeki emekleri yadsınamayacak başta Prof. Dr. Hakan ALTAN olmak üzere bütün Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü değerli öğretim ve araştırma üyelerine,

Bütün öğrenim hayatım boyunca her zaman bana koşulsuz destek olan babam, annem ve eşime ve daha doğmadan bana yaşam enerjisi olan oğlum Toprak Sefa'ya en içten teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
 1. GİRİŞ.....	 1
 2. TERAHERTZ IŞIN KAYNAĞI VE ALGILAYICISI OLARAK FOTOİLETKEN ANTEN	 5
2.1. Fiziksel Temelleri ve Kritik Performans Parametreleri	5
2.2. Güncel Anten Örnekleri	8
 3. THZ-TDS SİSTEMİ.....	 9
3.1. Fiziksel özellikleri	10
3.2. Kritik Mühendislik Parametreleri.....	13
 4. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	 17
4.1. Fotoiletken Anten Üretim Çalışmaları	17
4.1.1. Fabrikasyon	17
4.1.2. Elektriksel testler.....	19
4.1.3. Paketleme	21
4.1.4. Ar-Ge ve iyileştirme çalışmaları	24

Sayfa

4.2. Prototip THz-TDS Sistem	39
4.2.1. Karakterizasyon	39
4.2.2. Örnek ölçümleri	41
4.2.3. Muadil sistem karşılaştırmaları	42
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	49

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Güncel fotoiletken anten karşılaştırma tablosu.....	8
Çizelge 4.1. 0.5-4 THz arası su soğurma dipleri - literatür ve ölçüm sonuçları karşılaştırma tablosu.....	24
Çizelge 4.2 Muadil THz-TDS sistemlerin karşılaştırma tablosu	44



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum ve Terahertz frekans aralığının konumu	1
Şekil 1.2. Yıllara göre Terahertz spektroskopi konularında SCI makale sayısı	2
Şekil 2.1. Fotoiletken anten çalışma prensibi	6
Şekil 3.1. THz-TDS sistemi şematik gösterimi	9
Şekil 3.2. Tipik bir THz sinyal formu grafik gösterimi.....	12
Şekil 4.1. Fotomaske tasarımı – genel görünüm	17
Şekil 4.2. Fabrikasyonu Yapılan Dipol Antenlerin Tasarımı	18
Şekil 4.3. Dipol anten geometrileri.....	18
Şekil 4.4. Test aygıtlarından alınan karanlık IV ölçümleri.....	20
Şekil 4.5. Kırılma gerilimi ölçümleri (karanlık).....	21
Şekil 4.6. Paketlemesi ve lazer hizalaması sonrası antenlerden alınan karanlık ve fotoakım grafikleri	21
Şekil 4.7. FU2 anteni ile üretilmiş THz atım ve spektrum (FFT) ölçümü	22
Şekil 4.8. Plazmonik yapı iyileştirme etkisi - kavramsal yaklaşım.....	25
Şekil 4.9. Optik nanoantenlerin THz dipol antene entegrasyonu – kavramsal yaklaşım	26
Şekil 4.10. Optik nanoanten geometrisi, yandan görünüm.....	26
Şekil 4.11. Hava/LT-GaAs arayüzünde referans (üst), 3 boyutlu yapı (orta) ve 2 boyutlu yapı (alt) için elektrik alan şiddeti zaman alanı – time domain – benzetim çalışmaları.....	28
Şekil 4.12. 3 Boyutlu yapı için dalgaboyuna göre soğurma grafiği	29
Şekil 4.13. Referans E-Alan şiddeti (üst) - optik antene ait elektrik alan şiddeti (alt)..	30
Şekil 4.14. 2 Boyutlu yapı için dalgaboyuna göre soğurma grafiği	31
Şekil 4.15. 2B Referans E-Alan şiddeti (sol) - optik antene ait elektrik alan şiddeti (sağ)	31
Şekil 4.16. 2 Boyutlu nanoyapılarda uzunluğun rezonansa etkisi.....	34

Şekil	Sayfa
Şekil 4.17. 2 Boyutlu Antenlerde 12 nm derinlikte 780 nm dalgaboyu için elektrik alan şiddeti	34
Şekil 4.18. 2 Boyutlu antenlerde yüzeyden 52 nm derinlikte elektrik alan şiddeti.....	35
Şekil 4.19. Nano-yapılı THz antenlerin karanlık akım ölçümleri	36
Şekil 4.20. Nano-Yapılı THz Antenlerin fotoakım ölçümleri	36
Şekil 4.21. Referans ve 2 Boyutlu nano-yapılı bowtie antenden üretilen THz atımı (üst) - spektrumu (FFT) (alt)	37
Şekil 4.22. Referans, 2 boyutlu ve 3 boyutlu nano-yapılı fraktal THz antenden üretilen THz atımı (üst) - spektrumu (FFT) (alt).....	38
Şekil 4.23. THz anten modülleri karanlık (sol) ve fotoakım ölçümleri (sağ).....	39
Şekil 4.24. Adımlı ve sürekli ölçüm HITEMP karşılaştırması – Farklı spektral aralıklar	40
Şekil 4.25. Önişleme öncesi Referans ve C4 örnek ölçümü THz atımı dalgaformları..	41
Şekil 4.26. Önişleme sonrası Referans ve C4 örnek ölçümü THz atımı dalgaformları	41
Şekil 4.27. Önişlemenin ve ortam neminin soğurma çizgileri – spektrum üzerindeki etkisi	42

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Fotoiletken antenlerin ve aynı yongadaki eşlenik test padlerinin optik mikroskop görüntüsü	19
Resim 4.2. Taşıyıcıya monte edilen, tel bağlaması yapılan bir yonganın çıplak ve optik mikroskop görüntüleri	21
Resim 4.3. Nanofabrikasyon yapılmış antenlerin yonga fotoğrafları ve elektron mikroskop görüntüleri.....	32
Resim 4.4. 2-Boyutlu plazmonik yapı uygulanmış bowtie anten elektron mikroskop görüntüsü.....	33
Resim 4.5. 3-Boyutlu monopol nanoanten uygulanmış bowtie anten elektron mikroskop görüntüsü.....	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
2B	Nyquist örnekleme frekansı
Å	Angström
A	Lazer ışının odaklandığı alan
Au	Altın
α	Soğurulma katsayısı
c	Işık hızı
cm	Santimetre
d	Ölçüm alınan örneğin kalınlığı
$\Delta\lambda$	Yarı güçte tam dalgaboyu genişliği
e	Elektron yükü
E_{bias}	Anten kutuplanmasından kaynaklı elektrik alan
E_{THz}	Terahertz Elektrik alanı
ϵ_0	Vakum dielektrik sabiti
fs	Femtosaniye
Ge	Germanyum
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz frekansları
J	Akım yoğunluğu fonksiyonu
kHz	Kilohertz
kg	Kilogram
ms	Milisaniye
MHz	Megahertz
mW	MiliWatt
μ	Taşıyıcı mobilitesi
μA	MikroAmper

Simgeler**Açıklamalar**

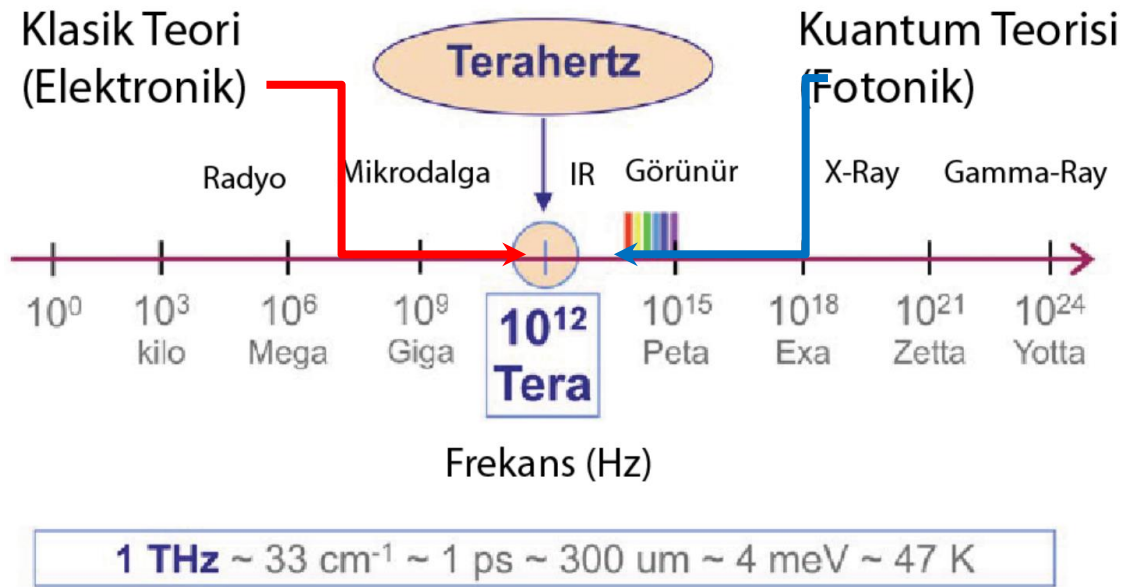
μm	Mikrometre
μs	Mikrosaniye
μW	MikroWatt
N	Taşıyıcı yoğunluğu fonksiyonu
nA	NanoAmper
Ni	Nikel
nm	Nanometre
nTHz	Terahertz Frekanslarında kırıcılık indisi
nW	nanoWatt
ps	Pikosaniye
T	İntegrasyon süresi
THz	Terahertz
v	Taşıyıcı hızı
V	Volt
z	Lazerin nüfus ettiği derinlik
π	Pi sayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ATR	Sönümlenen tam yansıma
ICT	Enformatik ve Komünikasyon Teknolojileri
GaAs	Galyum Arsenik
LT-GaAs	Düşük sıcaklıkta büyütülmüş Galyum Arsenik
NANOTAM	Nanoteknoloji Araştırma Merkezi
PCA	Fotoiletken Terahertz Anteni
PSD	Faz duyarlı algılama
THz-TDS	Terahertz Zamana Dayalı Spektroskopi

1. GİRİŞ

Terahertz (THz) radyasyonu, uzak kızılötesi ve mikrodalga frekansları arasında, 100 Gigahertz'den (GHz) 30 THz'e kadar olan frekans spektrumunu içermektedir. Şekil 1.1'de bu spektrum gösterilmiştir. THz uçuşumu olarak adlandırılan bu bölge uzun bir süredir astronomi ve analitik bilim alanlarında çalışılmaktadır. Ancak bu bölgenin 'uçurum' olarak adlandırılmasının sebebi komşu olduğu çalışma bantlarına göre teknolojik olarak ulaşılabilirliği en zor olan ve en geç gelişen bölge olması ve dolayısıyla bilimsel gelişmelere ve bunların endüstriyel uygulamalarına ancak 2000'lerden itibaren başlanabilmiş olmasıdır.



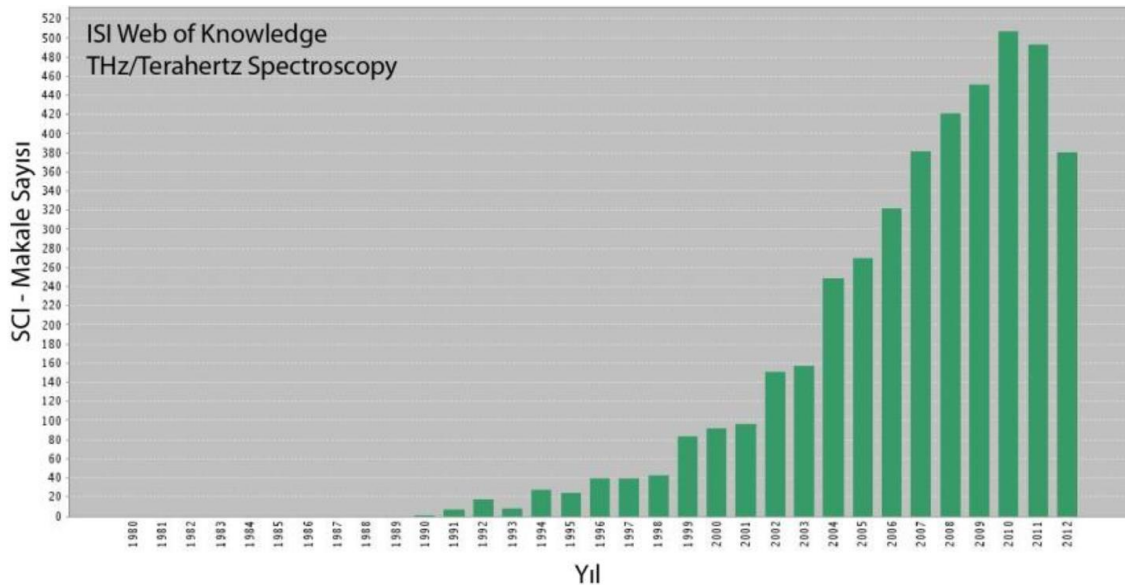
Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum ve Terahertz frekans aralığının konumu

THz spektroskopisi alanındaki çalışmalara kaynak olacak araştırmalar 1980'lerde Rochester Üniversitesi ve AT&T Bell Laboratuvarlarında başlamış ve IBM T.J. Watson Araştırma Merkezi'ndeki araştırmalarla ilerletilmiştir [1-3]. Bu çalışmalarda pikosaniye altı atım sürelerine sahip lazer ışını ile Galyum Arsenik (GaAs) ve radyasyon tahribatlı da dahil Silisyum (Si) yarı iletken tabanlı antenler anahtarlanmış ve elde edilen mikrodalga ve altı ışınım eşevreli olarak ölçülmüştür. 1990'lardan itibaren faz kilitlemeli femtosaniye lazerlerde yaşanan ilerlemelerle birlikte THz spektroskopisi çalışmaları büyük ivme kazanmıştır [4,5]. Bu süreçte yürütülen THz üreteç geliştirme çalışmalarında fotoiletken antenlerin bant genişliği ve verimine dair araştırmalar da ufuk açıcudur [6,7]. Bu çalışmalar

ve bunları temel alan araştırmalarla üreteç antenlerin verimi için geometrik yapısı ve aktif alanın fiziksel özellikleri ayrıntılarıyla ortaya çıkarılmıştır.

2000'lerden itibaren bu spektroskopi sistemleriyle başta DNA, RNA, kanser dokuları, bakteriler gibi biyo-moleküller ve dokular olmak üzere ilaç ve uyuşturucuların ve yarı iletken özellikli yapıların da THz frekanslarında optik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır [8-15].

Son yıllarda Fotonik ve nanoteknoloji alanlarındaki gelişmeleri takiben pek çok sektöre yönelik THz teknolojileri uygulama alanları gelişmektedir. Günümüzde THz teknolojileri; Enformatik ve Komünikasyon Teknolojileri(İKT); Biyoloji ve Sağlık Bilimleri; Tahribatsız Ölçümlendirme; Ulusal Güvenlik; Gıda ve Tarımsal Ürünlerin Kalite Kontrolü; Küresel Çevre İzleme ve Ultra Hızlı Bilgisayarlar gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu alanda pek çok buluşun ortaya çıkmasıyla THz çalışmaları odak noktası haline gelmiştir. Zamana Dayalı Terahertz Spektroskopi teknikleri (THz-TDS) ve THz görüntüleme teknolojileri bu alanın kilometre taşlarını oluşturmaktadır. Bu teknikler pek çok malzeme için, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha etkin analiz gücü sağlamaktadır [16-21]. Çizelge 1.1'de yıllar içerisinde bu spektroskopi tekniği kullanılarak yapılan bilimsel yayın sayıları gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Yıllara göre Terahertz spektroskopi konularında SCI makale sayısı

THz zamana dayalı spektroskopi yöntemi özellikle organik malzemelerin tespiti ve teşhisinde diğer yöntemlere göre oldukça üstündür. Bunun başlıca sebebi organik

malzemelerin ayırt edici spektroskopik imzalarına sebep olan bağ kuvvetlerinin enerjisinin bu bant aralığına denk gelmesidir. Örneğin şeker, kokain ve kodeinin ayırt edilebilmesi bu yöntemle tek bir ölçümle mümkündür [22]. Aynı zamanda bu bant aralığının nem algılamasına çok hassas olduğu da göz önünde bulundurulursa gıda/ilaç kontaminasyon ve tazelik kontrolü, tarihi eserler gibi hassas örneklerin de tahribatsız ölçümü için oldukça değerli bir yöntem olduğu fark edilecektir. Ancak yeni geliştirilen teknolojiler olması dolayısıyla hazır ticari sistemler az sayıdadır ve yüksek ekonomik ederlerle edinilebilir.

Ülkemizde şu anda laboratuvar ölçeğinde çalışmalar olmakla birlikte henüz Türk malı bir ticari THz-TDS sistemi bulunmamaktadır. Bu tez çalışması ile bu sistemlerde kullanılan Terahertz üreteç ve alıcı antenler geliştirilmiş ve prototip bir sistemde kullanılmıştır. Böylece ülkemizde, çalışmanın yapıldığı zaman itibariyle ilk kez başka sistemlerle de bütünleştirilebilir antenler üretilmiş, test ve karakterizasyonu yapılmış ve bir prototip sistemde çalıştırılmıştır.

Araştırma geliştirme çalışmalarının bir bölümünü kapsayan bu tez beş bölümden oluşmaktadır:

- Birinci bölümde, çalışmanın genel kapsamı, amacı ve önemi sunuldu.
- İkinci bölümde, Terahertz ışın kaynağı olarak fotoiletken antenlerin fiziksel temellerini detaylandırıldı.
- Üçüncü bölümde, bu antenlerin kullanıldığı bir spektroskopi sisteminin temel fiziksel ve teknolojik özellikleri açıklandı. Performansına etki eden temel kriterler belirtildi.
- Dördüncü bölümde, yürütülen fotoiletken anten üretim ve test sürecini işlendi. Kullanıldıkları sistem detaylı bir şekilde açıklandı ve muadilleri ile karşılaştırıldı.
- Beşinci ve son bölümde ise sonuç ve öneriler iletildi.

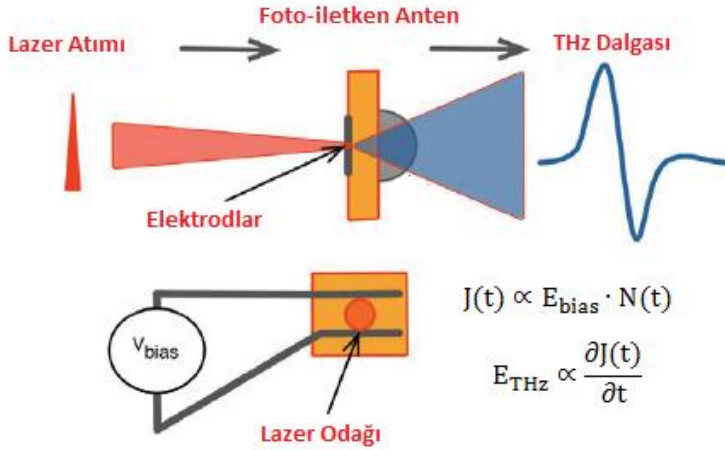
2. TERAHERTZ IŞIN KAYNAĞI VE ALGILAYICISI OLARAK FOTOİLETKEN ANTEN

THz dalgaları, belirli malzemelerin veya işlenmiş yapıların yüksek hızlı lazer atımlarının tetiklemesiyle üretilmektedir. Femtosaniye lazer kullanarak, fotoiletken anten yapılarında anlık foto taşıyıcıların oluşturulması ile THz dalga üretme en sık kullanılan tekniklerden biridir. Bu mekanizmayla THz dalga üreten ve algılayan spektroskopi sistemlerinde 5 THz 'ye kadar bant genişliği ve nW ile birkaç μ W seviyesi arasında ortalama güç elde etmek mümkündür.

2.1. Fiziksel Temelleri ve Kritik Performans Parametreleri

Üreteç anten

Temel olarak bir fotoiletken anten; doğrusal bantlı yarı iletken (III-V) bir alttaş üzerine iki metalik elektrot kaplayarak oluşturulur. GaAs veya – düşük sıcaklıkta büyütülmüş – LT-GaAs, sık kullanılan yarıiletken alttaşlara örnek olarak verilebilir. İki metal elektrota bir polarlama gerilimi uygulanır. Lazer atımının tetiklemesiyle oluşan foto-taşıyıcılar bu gerilim ile alttaşta yaratılan elektrik alan etkisiyle iki elektrot arasında hızlandırılır. Foto-taşıyıcıların hızlanması THz dalgasının oluşumunu sağlayan fiziksel mekanizmaları tetikler. THz dalgasının polarizasyon yönü, uygulanan gerilim alanına paralel ve dolayısıyla elektrotlar arasındaki boşluğa dik yöndedir. Foto-tetiklemeli serbest taşıyıcıların oluşturulabilmesi için, lazer atımının foton enerjisinin kullanılan yarıiletkenin bant aralığından daha yüksek olması gerekir. Aksi durumda elektronlar bant aralığını aşacak enerjiye sahip olamayacak ve serbest taşıyıcılar oluşmayacaktır. Lazer demeti, iki elektrot arasındaki boşluğa odaklandığında; oluşturulan serbest taşıyıcılar elektrik alanın etkisiyle bu boşluk boyunca hızlanırlar ve böylece bir akım oluşur. Kullanılan lazerin atımlı olması sebebiyle, bu akımın genliği zamanın bir fonksiyonudur ve bu akımın zamana göre türevi THz sinyali oluşturmaktadır. Şekil 2.1'de üreteç antenin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Fotoiletken anten çalışma prensibi

$$E_{THz} = \frac{A e}{4\pi\epsilon_0 c^2 z} \frac{\partial N(t)}{\partial t} \mu E_{bias} \quad (1)$$

Bu eşitlikte e elektron yükünü, c ışık hızını, ϵ_0 vakumun dielektrik sabitini, A lazer ışının vurduğu alanı, z ışının nüfuz ettiği derinliği, μ taşıyıcıların mobilitesini, E_{bias} polarlama geriliminden kaynaklanan elektrik alanı ve $N(t)$ ise zamana göre değişen foto-taşıyıcı yoğunluğunu belirtir. Taşıyıcıların mobilitesinin değışiklere göre çok yüksek olması dolayısıyla ışımaya katkının sadece taşıyıcılardan geldiğı kabul edilebilir.

Yayınlanan THz atımı 5-10 μ m civarındaki elektrotlar arası aktif alandan noktasal bir kaynaktan çıkar şekilde yayılır. Antenin ön yüzü; lazerin vurduğu yüzünün hava ortamı, arka yüzünün ise alttaşı devamı olduğı düşünöldüğünde ışının çok büyük bir bölümü (>95%) arka yüzüne doğru yayılır. Çünkü hava-alttaş arası kırıcılık indisi farkı çok yüksektir ve THz atımı büyük oranda tam yansıma yapar. Antenin arka yüzünde de aynı sorunun olmaması ve THz ışının alttaştan çıkıp sistemde yayılabilmesi için kırıcılık indisi alttaşın indisine yakın ve THz dalga boylarında soğurma özelliğı göstermeyen yarım küre mercek kullanılır. Örneğın $n_{THz} \approx 3,42$ olan GaAs için silisyumdan yapılan mercek kullanılır. Merceğın boyutları yarım kürenin merkezini antenin konumundan geriye düşecek şekilde ayarlanır ve konumlaması, kırıcılık indisi farkı çok yüksek olduğundan oldukça kritiktir. Aynı şekilde algılayıcı antende de THz atımın en az yüzey kaybı ile antene odaklanması için yarım küre mercek kullanılır.

Aşağıda THz üretici foto-iletken antenlerin performansını etkileyen temel unsurlar sıralanmıştır:

- Yarıiletken Bant Aralığı: Tetikleyici lazer atmasının foton enerjisi kullanılan yarı iletkenin kuşak aralığından daha yüksek olmalıdır, aksi takdirde THz üretimi yukarıda açıklanan sebeple mümkün olmamaktadır.
- Taşıyıcı Ömrü: Taşıyıcı ömrü daha kısa olan yarı iletkenlerde daha kısa THz sinyalleri oluşturulur böylece daha geniş bir THz tayfı elde etmek mümkün olmaktadır.
- Taşıyıcı Mobilitesi: Daha düşük polarlama geriliminde taşıyıcıların ivmelenmesi sağlanabilmesinden ötürü; yüksek taşıyıcı mobilitesi THz üretim verimini artırmaktadır.
- Anten Boşluğu/Anten Aktif Alanı: Elektrotlar arasındaki mesafe boşluk olarak adlandırılmaktadır. Dar boşluğa sahip foto-iletken antenler daha düşük polarlama geriliminde çalışabilmektedirler ancak hasar eşiği daha düşük olduğundan kolay yanabilmektedir. Aynı zamanda dar boşluklu bir anten geometrisinin sistemde optik ayar hassasiyeti de çok yüksektir ve tetikleyici lazer demetini uygun bir odak çapına düşürmek de ikinci bir dezavantajdır. Geniş boşluğa sahip fotoiletken anten yapıları daha geniş aktif alana sahip olması, hasar eşiğinin daha yüksek olması, optik ayar değişimlerinden daha az etkilenmesi ve lazer demetini odak çapına daha uygun olması gibi sebeplerden tercih edilmektedir. Ancak bu durumda kaynak olarak kullanılan lazer, daha geniş bir alana odaklanması dolayısıyla, daha yüksek güçte tercih edilmelidir ki bu çok ciddi bir ekonomik faktör olabilir.
- Polarlama Gerilimi: THz çıkış gücü elektrotlar arasında artan polarlama gerilimiyle orantılı olarak artış göstermektedir. Kullanılan malzemenin hasar eşiğine, boşluk boyutuna, lazer ışınımına ve taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak uygulanabilecek polarlama geriliminin bir limit değeri vardır.

Algılayıcı anten

THz algılama için kullanılan foto-iletken anten yapıları, üretim için kullanılan yapılarla oldukça benzerdir. İki metal elektrot yarıiletken alttaş üzerine inşa edilerek anten yapısı oluşturulur. Foto-iletken anten kullanarak THz sinyalinin algılanması için yine elektrotlar arasına yüksek hızlı ve foton enerjisi yeterli olan lazer atımı düşürülür. Bu lazer atımı serbest taşıyıcılar üretir. Bu serbest taşıyıcılar, üreteçten farklı olarak antene odaklanan THz elektrik alanı tarafından elektrotlara yönlendirilir ve elektrotlardan hassas bir akımölçerle ölçülür. Anten boşluğunda bir elektrik alan uygulanmaması/bulunmaması durumunda, lazer atımı

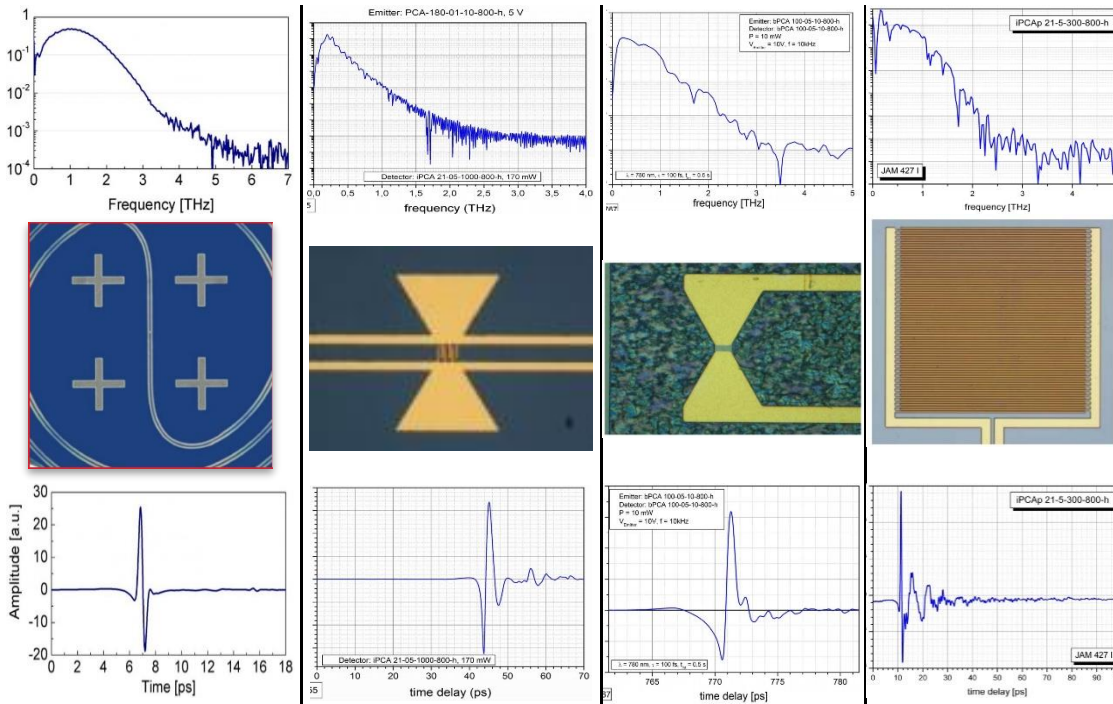
tarafından oluşturulan foto-taşıyıcılar rastgele yayılırlar ve net bir akım oluşmaz. Öte yandan anten boşluğuna bir THz atımı düştüğünde, elektron ve boşluk çiftlerini ayırır ve net bir akım oluşturur. Geçici süreli oluşan bu akım, THz elektrik alan şiddetiyle orantılıdır.

Alıcı antenin performansı ile üreteç antenin performansını etkileyen faktörler benzerdir. Sadece, eğer mümkünse yüksek taşıyıcı ömrü olan alttaş malzemesi tercih edilmelidir çünkü yaratılan taşıyıcıları elektrotlara sürükleyen THz elektrik alanı çok zayıftır ve elektrotlarda toplanmadan sönmölenmeleri tercih edilmez.

2.2. Güncel Anten Örnekleri

Fotoiletken anten yapıları temel olarak rezonanslı veya rezonanssız olarak tasarlanabilir; rezonanslı anten yapıları, anten boşluğu boyutuna ve geometrisine bağılı olarak belirli bir merkez frekansı etrafında THz dalgası yayımı yapar. Rezonanssız anten yapılarında değişken boşluk boyutları içeren geometriler kullanılmaktadır ve böylece daha geniş bir THz yayılım bandı elde edilmektedir. Çizelge 2.1'deki tabloda genel bir karşılaştırma mevcuttur. Burada ilk sıra THz spektrumlarını, ikinci sıra optik mikroskop görüntülerini, son sıra ise THz atım profillerini göstermektedir.

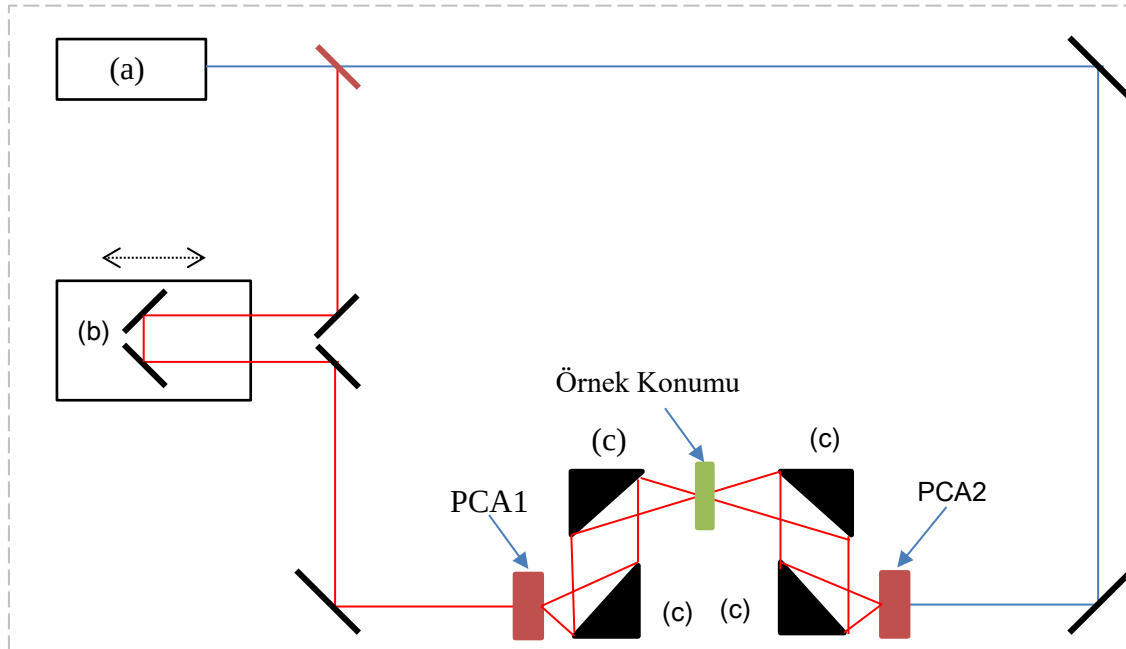
Çizelge 2.1. Güncel fotoiletken anten karşılaştırma tablosu



3. THZ-TDS SİSTEMİ

Bir önceki bölümde Terahertz ışın kaynağı ve algılayıcısı olarak anten yapılarından bahsedilmişti. Bu bölümde ise bu antenlerin kullanılması ile kurulan Terahertz Zamana Dayalı Spektroskopi – THz-TDS – sistemi detaylı incelenecek, sistem performansına etki eden kritik mühendislik parametreleri ve kurulan prototip sistem anlatılacaktır.

Şekil 3.1’de şematik olarak temel bir THz-TDS sistemi gösterilmiştir. Bir THz-TDS sistemde temel olarak; çok yüksek hızlı lazer (a), motorize uzatma kolu (b), Terahertz ışını toplama, örneğe ve algılayıcıya odaklama amacıyla parabolik metal aynalar (c) bulunur. Lazerden çıkan ışın bir ışın ayırıcı aracılığıyla ikiye bölünür ve bu ışınlar Terahertz üretici ve algılayıcı aygıtlara aynalar ile yönlendirilir. Bu iki ayrı kol aşağıdaki şekilde kırmızı ve mavi çizgiler olarak gösterilmiştir. Bu üreteç ve algılayıcı aygıtlar pek çok farklı fiziksel temele dayalı farklı aygıtlar olabilmekle birlikte sistemin temel işleyişinde bir fark yaratmayacağından ve çalışma boyunca fotoiletken antenler kullanıldığından bu anlatımda da, bir önceki bölümde fiziksel işleyişi detaylıca anlatılan fotoiletken antenler (PCA1-2) üzerinden devam edilecektir.



Şekil 3.1. THz-TDS sistemi şematik gösterimi

Yukarıdaki şekilde kırmızı çizgiler ile gösterilen ışın yolu takip edilecek olursa; ışın kaynağından çıkan her bir lazer atımı üreteç antene (PCA1) ulaştığında bir Terahertz atımı yaratır. Antenden bir noktasal kaynaktan yayılır şekilde çıkan bu ışın bir parabolik ayna ile önce doğrusal hale getirilir, bir diğer aynayla ise ölçümü alınacak örnek üzerine odaklanır. Örnekte soğurma, yansıma, dağılma ve benzeri etkilere uğradıktan sonra tekrardan genişleyerek ilerleyen THz atımı yine iki parabolik ayna ile alıcı antene (PCA2) odaklanır. Alıcı antende, şekilde mavi çizgi ile gösterilen lazer atımı ile yaratılan, serbest taşıyıcılarla etkileşime geçen Terahertz atımı alıcı elektrotları arasında bir akıma neden olur ve bu akım algılanarak kaydedilir. Şekilde (b) ile gösterilen uzatma kolu ileri ya da geri hareket ettirilerek, kırmızı ve mavi çizgiler ile gösterilen, üreteç ve algılayıcı ışın kolları arasında görelî bir mesafe/zaman farkı yaratılır ve bu şekilde Terahertz ışının tamamı kademeli olarak okunarak kaydedilir. Böylece bütün Terahertz elektrik alanının zaman uzayındaki profili çıkarılmış olur. Bu kaydın hızlı Fourier dönüşümü yapılarak frekans uzayındaki bütün spektrum hesaplanır. Örnek ölçümü ile referans ölçümü arasındaki spektral farklar hesaplanarak soğurma, kırıcılık indisi ve benzeri fiziksel parametreler hesaplanabilir. Terahertz Zamana Dayalı Spektroskopi sisteminin çalışma prensibi kısaca bu şekildedir. Bir sonraki bölümlerde lazer kaynağından itibaren ışın takip edilerek sistemin fiziksel özellikleri ve kritik mühendislik parametreleri detaylandırılarak açıklanmıştır.

3.1. Fiziksel Özellikleri

Üreteç ve algılayıcı olarak fotoiletken anten bulunan THz-TDS sistemlerde 100 femtosaniye veya altı atım uzunluğuna sahip yüksek hızlı lazer kullanılır. Bunun nedeni ikinci bölümde detaylı aktarılmıştır. Bu lazerler genelde fiber optik temelli 20-100 MHz tekrar hızına sahip lazerlerdir. Bir başka deyişle, uzayda aşağı yukarı 30 μm yer kaplayan lazer atımlarından saniyede 100 milyar adet yayınlar. Bu da birbirini takip eden atımlar arasında, 100 MHz için, 10 nanosaniye ya da 3 metreye tekabül eder. Bu atımlardan herhangi biri – (i)'nci atım – üzerinden sistem takip edilecek olursa; lazerden çıkan ışın, ışın ayırıcıda ikiye ayrıldıktan sonra aynalar ve uzatma kolunu takip ederek üreteç antene ulaşır – Bu noktaya kadar aldığı yolda geçirdiği zaman için (x) diyelim – Üreteç antende THz atımı oluşur ve antenden noktasal kaynaktan yayılır şekilde yayınlanır. Bu atımın uzunluğunun pikosaniye mertebesinde olduğunu varsayarak uzayda 300 μm yer kaplayan bir elektrik alan hayal edilebilir. Bu atım parabolik aynalar ile yönlendirilerek alıcı antene ulaştırılır – Terahertz atımın alıcı antene ulaşmasına kadar geçen süreye (y) diyelim – Bu süre odak noktasına

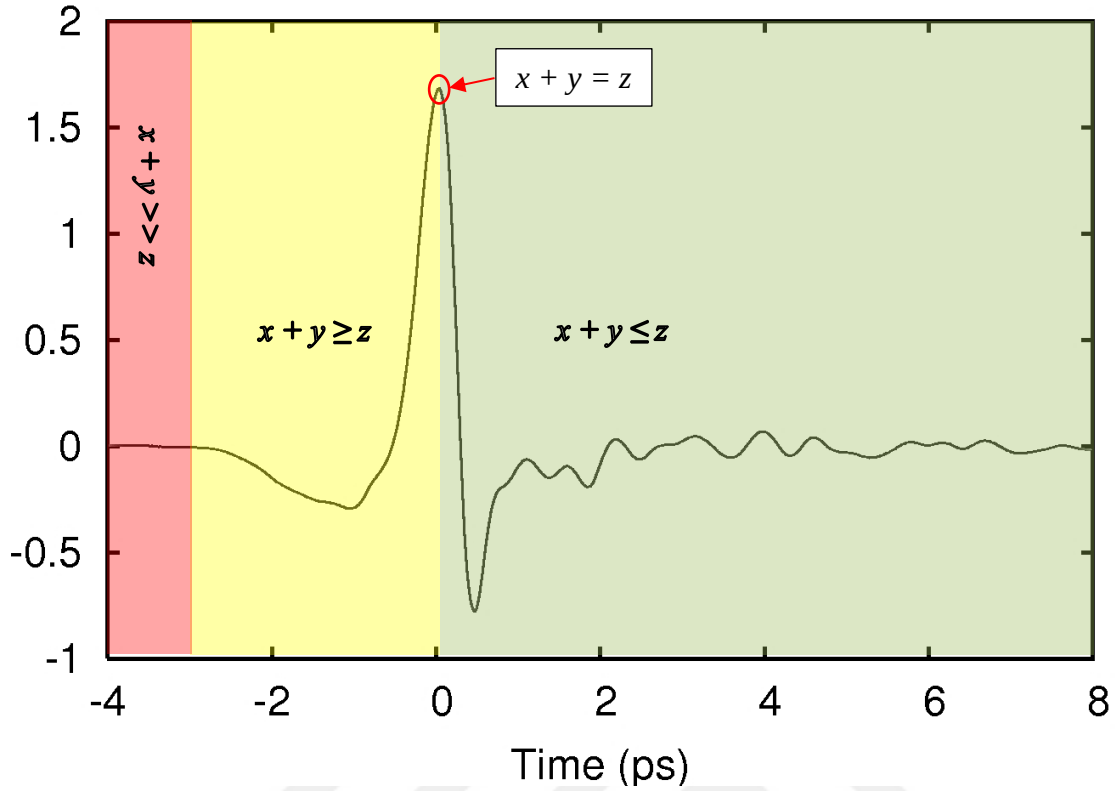
yerleştirilen ve ölçümü alınacak bir örnek olması durumunda, örnek kalınlığı (d) ve kırıcılık indisi (n_{THz}) ile ilişkili olarak $(n_{THz}.d)/c$ kadar uzayacaktır (c : ışık hızı). Işın ayırıcıdan alıcı antene yönlendirilen lazer atımının antene ulaşmasına kadar geçen süreyi de (z) olarak not edersek, sistemin ölçüm alma süreci şu şekilde fiziksel olarak açıklanabilir:

$x + y \gg z$: Bu durumda (i)'nci THz atımı alıcı antene ulaştığında, bu antene vuran bir lazer atımı yoktur. (i)'nci atım antene çarpmış, ($i+1$)'nci atım ise daha ulaşmamıştır; örneğin 8 nanosaniye sonra gelecektir. Antene ulaşan atımın etkileşime gireceği serbest taşıyıcılar (i)'nci atım tarafından yaratılmış ancak THz atım gelmeden sönmüşlerdir. Dolayısıyla THz atımı tarafından, alıcı elektrotlar arasında bir akım oluşturulamaz. Eğer bir değer okunuyorsa bu elektronik gürültü olarak; karanlık akım olarak sayılmalıdır ki sistemdeki gürültü seviyesi için önemli bir göstergedir.

$x + y \geq z$: Bu durumda (i)'nci THz atımı alıcı antene ulaştığında, antene vuran (i)'nci lazer atımından kaynaklanan serbest taşıyıcılar mevcuttur ve dolayısıyla THz atımı aktif alandaki halen mevcut olan taşıyıcıları elektrotlara yönlendirebilir. Tam olarak alıcı (i)'nci atımdan ne kadar önce geldiğine ve sistem gürültü seviyesine bağlı olarak elektrotlar arasında bir akım okunabilir. Bu süreçte okunan değerler kaydedilir.

$x + y = z$: Bu eşitliğin sağlanmasının fiziksel ifadesi, lazer atımının en şiddetli anı; elektrik alanının en kuvvetli olduğu yeri ile Terahertz elektrik alanının tepe noktasının alıcı antenin aktif alanında tam olarak çakıştığı andır. Bu an itibarıyla anten aktif alanında en yüksek sayıda serbest taşıyıcı ve bu taşıyıcıları elektrotlara yönlendirecek en yüksek Terahertz elektrik alanı mevcuttur. Dolayısıyla sistemde okunacak en yüksek elektriksel sinyal bu noktadadır.

$x + y \leq z$: Bu durum (i)'nci THz atımının; elektrik alanının tepe noktasından itibaren sönmüşmesi sürecinin (i)'nci algılama atımı tarafından tarandığı süreçtir. Neden arındırılmış ortamda ölçülecek referans THz atımı için bu süre/uzunluk atımın tamamı için birkaç pikosaniye/milimetre mertebesinde yeterli olabilir. Ancak örnek ölçümünde, örnek ile THz atım etkileşimi onlarca pikosaniyeye yayılabilir dolayısıyla THz atımın tamamen sönmüş olduğu yere kadar tarama alınmalıdır. Şekil 3.2'de yukarıdaki tanımlı bölgeler bir THz taraması grafiğinde renkli alanlar şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Tipik bir THz sinyal formu grafik gösterimi

($x + y$) ile z arasındaki uzunluk/süre farkı motorize uzatma kolu ile ayarlanır. Uzatma kolunun bulunduğu her bir konum için bu yol farkı sabittir ve yukarıdaki grafikte gösterilen THz atım profilinde bir noktaya; alıcıdan okunan bir akım değerine tekabül eder. Belirli adım aralıkları ile uzatma kolu hareket ettirilerek atım taranmış olur. Bu adım uzunluğu ise en fazla Nyquist frekansına denk gelecek uzunlukta olabilir.

Nyquist frekansı, adım uzunluğu ilişkisi

Sürekli-zaman sinyallerinin sayısal örneklemesinde Nyquist-Shannon örnekleme teoremi şöyle ifade edilir [23]:

“ Bir $x(t)$ fonksiyonunda B Hertz’den yüksek frekans yoksa bu fonksiyon $1/(2B)$ saniye aralıklı değerlerle tamamen tanımlanabilir.”

Bu teoremi THz-TDS sisteminde uygulayacak olursak, öncelikle, algılanacak Terahertz atımında bulunan en yüksek frekans tahmin ediliyor olmalıdır. Bu frekans, Terahertz üretici ve algılayıcısı olarak fotoiletken anten kullanılması durumunda 4,5 THz olarak değerlendirilirse bu atımının Nyquist örnekleme frekansı ($2B$) 9 THz olarak alınmalıdır. Bu

da ≈ 111 femtosaniye ya da 33 mikrometrelik bir yol farkına tekabül eder. Uzatma kolunda ışının gidip geldiği göz önünde bulundurulduğunda uzatma kolunun alabileceği en uzun adım $\approx 16,6$ mikrometredir. Bu değerden küçük atılacak her adım zamandaki THz atımının örneklenmesi için yeterlidir.

Algılama

Antene ulaşan THz atımı etkileşime girdiği serbest taşıyıcıların yöneliminin elektrotlara ulaşabilmesi için polarizasyonunun koşut olması gereklidir. Bu koşul üreteç anten ile algılayıcı antenin aynı polarizasyonda yerleştirilmesi ile sağlanır. Algılayıcı antene ulaşan THz atımı tipik olarak mikrowatt seviyelerindedir ve antendeki yansıma ve benzeri optik ve elektronik kayıplar da göz önüne alındığında elektrotlar arası elde edilen akım tipik olarak gürültü seviyesinin altındadır. Bu seviyedeki sinyallerin algılanması amacıyla *Faz Duyarlı Algılama (Phase Sensitive Detection – PSD)* tekniği kullanılır. Bu teknikte temel olarak, algılanacak sinyal belirli bir frekansta modüle edilir ve aynı modülasyon frekansı algılamada okunan sinyalle çarpılır. Bu algılama yöntemi bir sonraki bölümde ayrıca detaylandırılmıştır. Algılanan sinyal değeri ve ilgili uzatma kolu konumu; göreceli zaman birlikte bilgisayarda kaydedilerek sinyalin tamamı taranır ve kaydedilir. Referans sinyali ölçümünden sonra alınacak herhangi bir örnek ölçümü de kaydedilir ve bunların hızlı Fourier dönüşümü ile spektral verisi hesaplanır. Bu zaman ve frekans uzayındaki verilerin birbirleriyle şiddet ve gecikmesinin oranlanması ile Terahertz spektrumunda ilgili örneğin bütün optik özellikleri hesaplanabilir.

3.2. Kritik Mühendislik Parametreleri

Bu bölümde bir THz-TDS sistemindeki bileşenler detaylandırılmış, teknik ve mühendislik parametreleri ve bunlardaki hataların sistemin performansına etkileri incelenmiştir. Bölümdeki sıralama bir önceki bölümde olduğu gibi lazer ışın kaynağından başlayarak bileşenleri takip ederek bir bilgisayarda verinin kaydedilmesi sürecine kadar takip edilmiştir.

Yüksek hızlı lazer

Bu bileşenin çıktısı olan lazer atımının özellikleri ikinci bölümde tarif edilmiştir. Lazer ünitesinin stabilitesi iki önemli faktöre ayrılır; optik güç ve faz stabilitesi. Bunlar lazer

atımının düzenliliğini belirleyen ana faktörlerdir. Lazerin çıkış ortalama optik gücünde dışsal faktörlerden kaynaklanabilecek değişiklikler dakika/saat mertebesinde verici antenin Terahertz ışınım performansına etki eder. Bir lazerin faz stabilitesi ise tekrar frekansında / ardışık atımlar arası sürede değişiklik olmaması durumudur. THz-TDS sistemlerde faz kilitlemeli algılama yapılması dolayısıyla olası kaymalar da sistem performansına etki eder. Bu sebeplerle bir THz-TDS sisteminde referans olarak kullanılacak ölçüm gün içinde farklı aralıklarla yenilenmelidir. Yukarıda belirtilen parametrelerde değişiklikler büyük oranda sıcaklık, nem ve elektronik sebeplerden kaynaklanır ancak fiber tabanlı ve/veya gelişmiş lazer sistemlerinde dışsal etkiler çok iyi kontrol edildiğinden, optik güç ve faz stabilitesi açısından (THz-TDS sistemde kullanılacak lazerin doğru seçilmesi durumunda) gün içinde birkaç kez referansın güncellenmesi yeterli olur.

Motorize uzatma kolu

Burada kullanılacak motorun konum, hareket, stabilite ve doğrusallık hassasiyetleri son derece önemlidir. Lazer ışının üreteç antendeki 3-5 μm çaplı odak noktası çok kritiktir. Kullanılacak motorize sistemin ayarlanan konumuna gelmesi, ölçüm sürecinde belirlenen herhangi bir konumunda sabit kalabilmesi ve hareketinin doğrusallığı parametrelerinin her biri için tercih edilen sistem mikron altı hassasiyette çalışmalıdır. Ayrıca bu hareketlerin tekrar edilebilirliği de yine yüksek hassasiyette olmalıdır. Ölçüm alınırken uzatma kolunda yukarıda belirtilen hassasiyet sağlanamazsa, bu Terahertz sinyal şiddetinde değişikliklere ve atım profilinin yapay olarak bozulmasına sebep olur ve sistemde gürültü seviyesinde yükselme ve hatta THz zaman profilinde bozulma ile bütün ölçümlerin hatalı olmasına bile sebep olur. Dolayısıyla bu elemanın seçimi oldukça kritiktir.

Algılayıcı ve verici antenler

Antenlerin çalışma prensibi ve kritik mühendislik parametreleri ikinci bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir. Sistemde algılama yapılabilmesi için verici antene uygulanan gerilim fazı ve frekansı bilinen bir tetikle modüle edilmelidir. Bunun sebebi aşağıda algılama bölümünde açıklanmıştır. Bu tetikleme frekansı verici antenin kapasitif limitlerinin altında seçilmelidir. Bu eşik geçilmeye başladıkça anten yeterince hızlı çalışamaz ve veriminde düşme meydana gelir. Bu eşik her bir anten geometrisi ve aktif malzemenin – Bu tez çalışmasında LT-GaAs

– fiziksel yapısına göre değişkenlik göstereceğinden verici ve alıcı antenler çalışma frekansı için ayrıca test edilmelidir.

Parabolik aynalar & bütün optik elemanlar

Sistemde kullanılacak bütün optik elemanlar tercih edilen lazerin çıkış dalgaboyuna ve daha da önemlisi atım uzunluğuna uygun seçilmelidir. Yüksek hızlı lazerlerde atım tepe gücü tipik olarak kW, hatta bazı sistemlerde MW seviyelerinde olduğundan ayrıca atım süresinin uzamaması da kritik olduğundan tercih edilen optikler buna uygun olmalıdır. Buna ek olarak, Terahertz ışının yönlendirilmesinde kullanılan parabolik aynaların yüzey işleme hassasiyeti THz atımın profilinin bozulmaması için çalışılan dalgaboyuna uygun seçilmelidir.

Terahertz Sinyali Algılama & Sayısallaştırma

Sinyali algılama sürecinin anlatımı için uzatma kolunun $x+y=z$ konumunda sabit tutulduğunu varsayalım. Bu konumda sinyalin en yüksek seviyede olması beklenir ve uzatma kolu, lazer, optik elemanlar gibi sistemsel ve nem sıcaklık gibi dışsal bütün etkiler sabitken bu değer teorik olarak sabittir. Bir başka deyişle, uzatma kolu her bir konumunda durağanken beklenen ölçüm sabit, doğrusal bir akımdır. Bu akım elektrotlar arasında serbest taşıyıcıların THz atımı tarafından elektrotlara yönlendirilmesiyle oluşur. Ancak bu oluşan akım tipik olarak nW mertebelerinde olduğundan algılayıcı anten ve elektronik devreler ve bağlantılardan gelen gürültü seviyelerinin altındadır. Bu gibi sinyalleri okumak için transimpedans tipi yükseltgeçler kullanılır. Elektrotlardan alınan gürültü dahil akım sinyali transimpedans yükseltgeç ile gerilime çevrilir. Sonrasında gürültünün filtrelenmesinde donanımsal ya da yazılımsal olarak *faz duyarlı algılama* – PSD – yöntemi kullanılır.

Bu yöntem matematiksel olarak sinüzoidal fonksiyonların birbirine dikliği teoreminden faydalanır. Referans ve algılanacak sinyal olarak sırasıyla f_1 ve f_2 alırsak, bunları matematiksel olarak $f_1 = A \sin \omega_1 t$ ve $f_2 = B \sin(\omega_2 t + \varphi)$ olarak ifade edebiliriz. Burada A ve B genliklerini, ω_1 ve ω_2 frekanslarını, φ ise sinyalin fazını tanımlar. Referansın fazı sıfır alınmıştır. Eğer referans ve sinyali birbiriyle çarpacak olursak:

$$f_1 \times f_2 = AB \sin \omega_1 t \sin(\omega_2 t + \varphi) \quad (2)$$

$$f_1 \times f_2 = -\frac{AB}{2} \times \{\cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi] - \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \varphi]\}$$

Bulunur. Eğer 0-T arası zamanda integrali alınacak olursa:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T f_1 \times f_2 dt &= \frac{1}{T} \int_0^T -\frac{AB}{2} \times \{\cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi] - \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \varphi]\} dt \\ \frac{1}{T} \int_0^T f_1 \times f_2 dt &= -\frac{AB}{2T} \int_0^T \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi] dt + \frac{AB}{2T} \int_0^T \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \varphi] dt \end{aligned}$$

Eğer T süresi referans ve sinyal periyotlarından yeterince uzunsa $T \rightarrow \infty$ alınabilir. Bu durumda yukarıdaki iki integralin de ayrı ayrı sıfır sonucunu vermemesi için gerekli koşul iki frekansın birbirine eşit olması ve fazın da sıfır olması durumudur, bu durumda:

$$T \rightarrow \infty, \omega_1 = \omega_2, \varphi = 0;$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T f_1 \times f_2 dt = \frac{AB}{2}$$

Referans için kullanılan sinyal üreteç antenin tetiklenmesinde kullanılan modülasyon sinyalidir. A genliği, tetik frekansı ω_1 ve yukarıdaki işlemlerde sıfır kabul edilen faz değeri de bilindiğinden $T \gg 1/\omega_1$ koşulunda okunan doğrusal gerilim değerinden B değeri kolayca bulunur.

Bu algılama yönteminin sağlıklı sonuç vermesi için, seçilen tetik frekansının beklenen gürültülerin frekanslarından yeterince yüksek ancak antenin kapasitif sınırının da altında olması önemlidir. Örneğin 10 kHz tetik frekansı için 50, 60 Hz ve bunun yüksek harmoniklerinden yeterince uzaklaşmış olur ve $T \gg 100\mu s$ integrasyon süresi, örneğin 10ms de hızlı ve gürültüsüz bir ölçüm almak için yeterlidir.

Yukarıda anlatılan algılama yöntemi ile okunan gerilim değeri, ilgili uzatma kolu konumu ile birlikte bilgisayarda kaydedilir ve yol bir adım daha değiştirilerek aynı süreç tekrar edilir. Böylece konuma bağlı sinyal değerleri bütün yol için adımlanarak kaydedilir. Konum değerlerinden görelî zaman farkı hesap edilir ve böylece zamanda THz atımı tamamıyla taranmış olur.

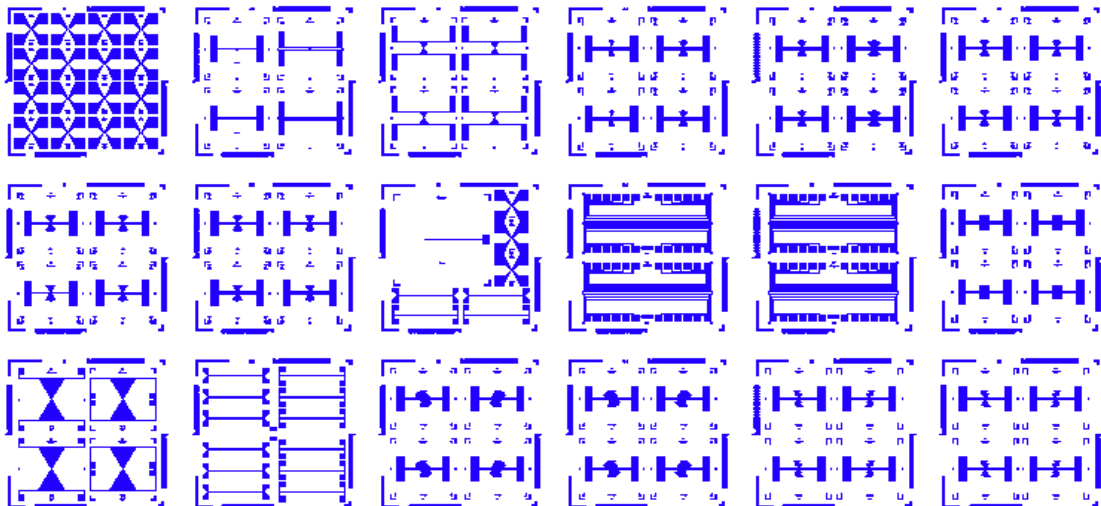
4. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Tez çalışmaları sürecinde İ.D. Bilkent Üniversitesi NANOTAM bünyesinde THz fotoiletken anten üretimi ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca Merkez bünyesinde yürütülen bir proje kapsamında üretilen antenlerin ve elektroniklerin kullanıldığı taşınabilir bir prototip THz-TDS sistemi imal edilmiştir. Bu prototip sisteminde bir veri tabanı ve kütüphanesi oluşturulmuştur. Böylece bu genişletilebilir kütüphanede kayıtlı örneklerin tespiti ve teşhisini yapabilir bir prototip meydana getirilmiştir. Alt bölümlerde yapılan çalışmalar detaylandırılmıştır.

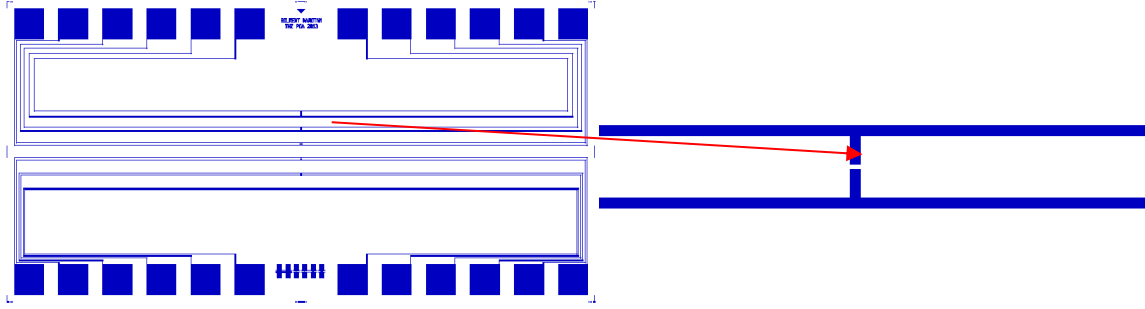
4.1. Fotoiletken Anten Üretim Çalışmaları

4.1.1. Fabrikasyon

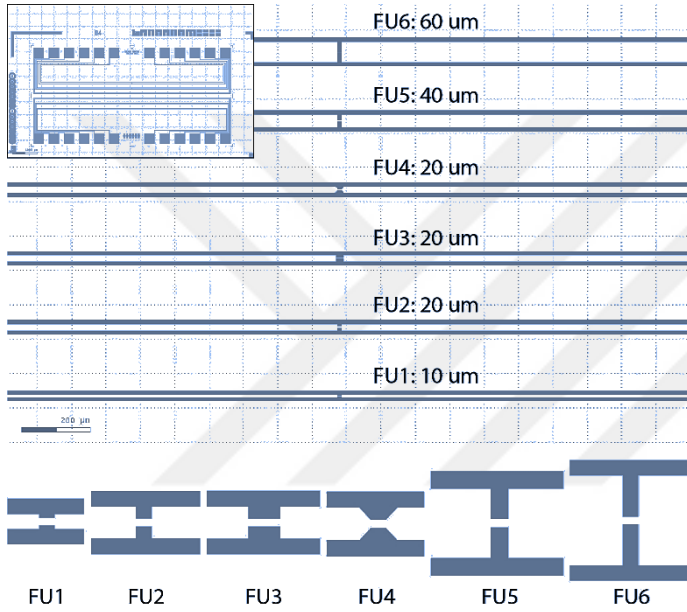
Anten fabrikasyonunun en temel hali tek adımlı olan aktif katman üzerine metal bir kontak koyularak yapılan bir prosestir. Antenlerin beklendiği gibi çalışabilmesi tasarımın fabrikasyona aynen yansıtılabilmesine bağlıdır ve çok yüksek çözünürlükte bir litografi prosesi bu aygıtlar açısından çok önemlidir. Bu nedenle fotolitografi prosesi, kullanılacak alttaşlara ve fotomaskeye göre optimize edilmiştir. Bu amaçla fotoresist kalınlığı, pozlama süresi ve develop prosesi için optimum süreler belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Şekil 4.1’de kullanılan fotomaskenin tasarımı gösterilmiştir. Şekil 4.2 ve 4.3’de ise üretim için seçilen tasarımlar gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Fotomaske tasarımı – genel görünüm



Şekil 4.2. Fabrikasyonu Yapılan Dipol Antenlerin Tasarımı



Şekil 4.3. Dipol anten geometrileri

Dört farklı firmadan farklı fiziksel özelliklerde temin edilen GaAs waferları şu şekildedir:

- 1) PWA firmasının 1 ps taşıyıcı ömürlü LT-GaAs waferı
- 2) PWA firmasının 15 ps taşıyıcı ömürlü LT-GaAs waferı
- 3) Fraunhofer IPM enstitüsü tarafından büyütülmüş LT GaAs waferı (taşıyıcı ömrü belirtilmemiş)
- 4) IQE firması tarafından büyütülmüş LT GaAs waferı (taşıyıcı ömrü belirtilmemiş)

Temin edilen waferlardan 2 inç ya da 3 inç çaplı waferlar, Dicer cihazında maskenin gerektirdiği uygun ebatlarda kesilerek maske boyutuna uygun örnekler haline getirilmiştir. Bu kesim sırasında epitaksiyel katmanların büyütüldüğü yüzey fotoresist ile korunmuş, kesim işleminden sonra örnekler çıkartılmış ve fabrikasyona hazır hale gelebilmesi için

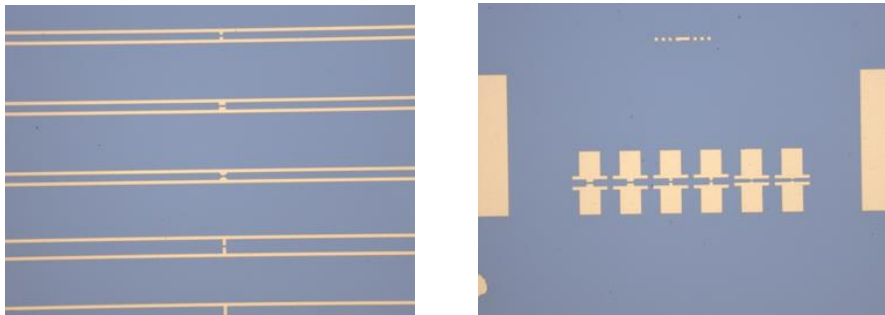
aseton, izopropil alkol ve deiyonize (DI) su ile temizlenmiştir. Bu temizlik işleminden sonra örnekler, fotoresist kaplanarak metalizasyon adımına geçilmiştir.

THz anten için metal olarak sırasıyla (Ni), (Au), (Ge), (Ni) ve (Au) metallerinden oluşan yapı kullanılmıştır. Fotoresist kaplanan örnek yüzeyine fotolitografi işlemi uygulanır. Burada amaç metal kaplanacak yerleri açarak kaplamak ve sonra lift-off tekniği uygulamaktır. Fotolitografi işleminde Microchemicals firmasının AZ 5214 fotorezist polimeri kullanılmaktadır. Fotorezist, bir çevirici (spinner) yardımı ile yüzeye homojen olarak kaplanmıştır. Maske hizalama cihazı (Karl Suss MA6) kullanılarak, fotomaskede uygun THz anten örnek üzerine işlenmiştir. Daha sonra e-beam termal buharlaştırma yöntemiyle örnek üzerine Ni, Au, Ge, Ni ve son olarak Au metali buharlaştırılmıştır. Bu metallerin kalınlıkları ve kaplama hızları sırasıyla şu şekildedir: Ni: 5 nm ve 1 Å/s, Au: 100 nm ve 2 Å/s, Ge: 50 nm ve 0,5 Å/s, Ni: 30 nm ve 1 Å/s ve son olarak Au: 200 nm ve 2 Å/s. Geliştirilmiş olan fotolitografi prosesinin ardından örnekler e-beam buharlaştırma sistemi ile Ni/Au/Ge/Ni/Au metalleri 50 Å /1000 Å /500 Å /300 Å /2000 Å kalınlıklarda kaplanarak aseton içerisinde lift-off edilmiştir.

Bu farklı waferlar üzerine yapılan fabrikasyonlar sonrasında, elde edilen dipol antenler için sistem entegrasyonu öncesi elektriksel testlerine geçilmiştir.

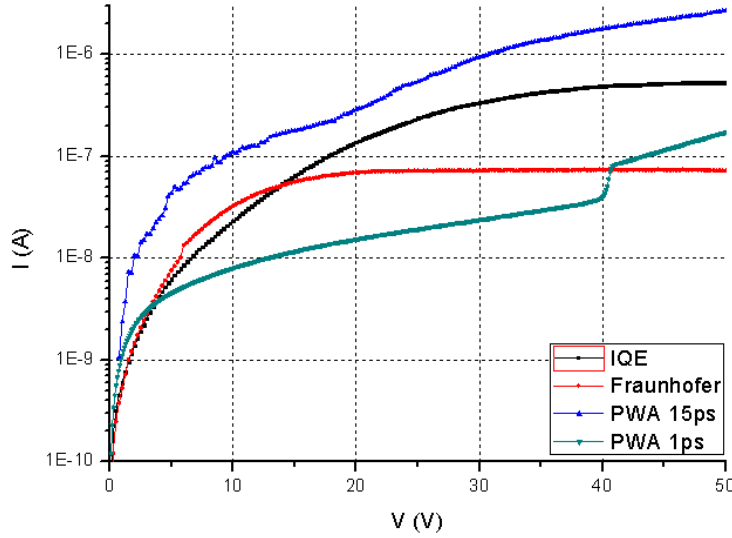
4.1.2. Elektriksel testler

Bu testler için antenlerin aktif alanlarının eşleniği olarak, aynı yonga üzerinde konumlu üretilen test padleri kullanılmıştır. Bu test padlerinin ve üretilen antenlerin optik mikroskop görüntüsü Resim 4.1’de verilmiştir.



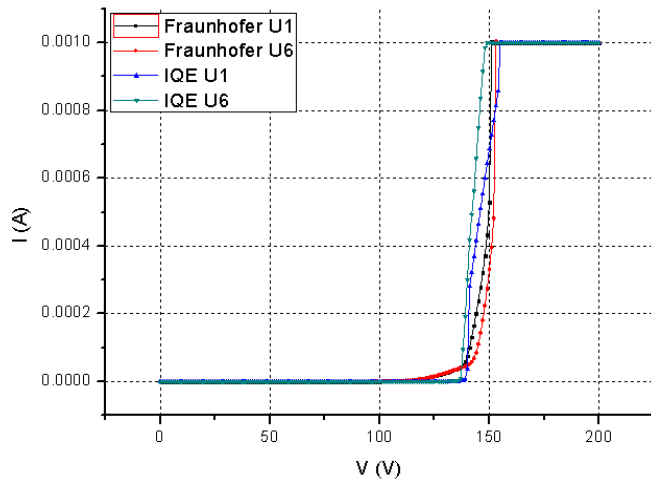
Resim 4.1. Fotoiletken antenlerin ve aynı yongadaki eşlenik test padlerinin optik mikroskop görüntüsü

Şekil 4.4'deki grafikten de görüleceği gibi karanlık akımlar tipik olarak kullanılan 30 V kutuplama geriliminde 10 nA ile 1 μ A arasında değişmektedir. Karanlık akım taşıyıcı ömrü ile orantılı olduğundan taşıyıcı ömrü arttıkça karanlık akımın da arttığı görülmektedir. Taşıyıcı ömrünün kısa olması iki açıdan önemlidir. Kısa taşıyıcı ömürleri daha geniş bir THz spektrumu elde etmek için önemli olduğu gibi gürültü seviyesinin düşmesi ve geniş dinamik aralık için de önemlidir.



Şekil 4.4. Test aygıtlarından alınan karanlık IV ölçümleri

Aynı aygıtlarda kırılma gerilimi tespiti için daha yüksek gerilimlerde de ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümlerde kırılmanın geri dönülemez türde olduğu ve kırılma gerçekleştiğinde aygıtların bozulduğu gözlenmiştir. Kırılma gerilimleri Fraunhofer waferi ve IQE waferi ile yapılan en dar aralıklı (grafikte U1 olarak adlandırılmış) ve en geniş aralıklı (grafiklerde U6 olarak adlandırılmış) aygıtlar ile yapılmıştır. Şekil 4.5'deki grafikten de görüleceği üzere kırılma gerilimi tipik kullanım gerilimi olan 30V'un oldukça üstünde; 140 V seviyelerinde görülmektedir.

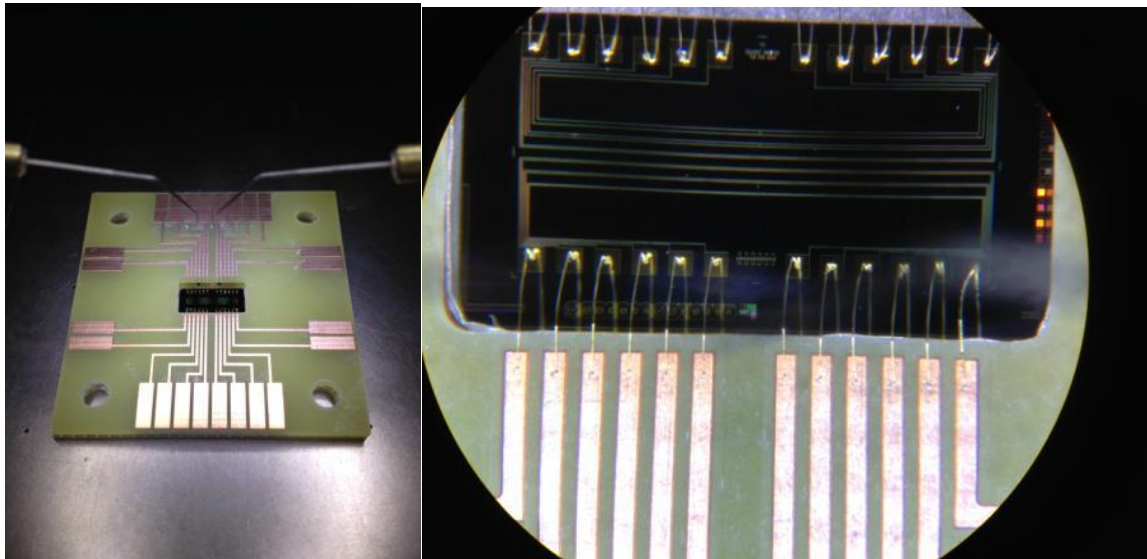


Şekil 4.5. Kırılma gerilimi ölçümleri (karanlık)

Üretilen fotoiletken antenlerin aydınlık akımlarının ölçülebilmesi ve sistem içi fonksiyonel testlerinin yapılabilmesi için anten yongalarının paketlenerek sisteme bağlanması gereklidir.

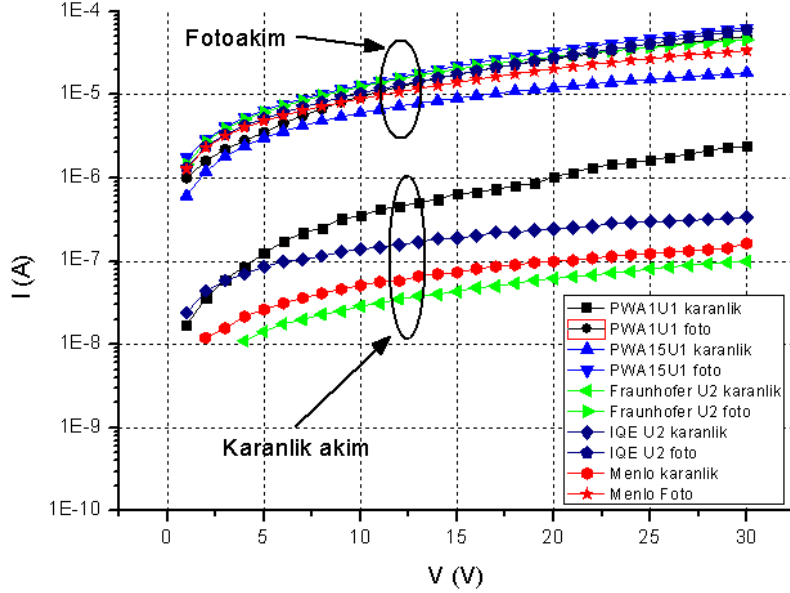
4.1.3. Paketleme

Çipler tasarımda belirlenen yerlerden dicer sistemi ile kesilmiş ve antenleri sisteme takmak üzere tasarlanan taşıyıcılara monte edilerek hassas tel bağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların sonucu Resim 4.2’de verilmiştir.



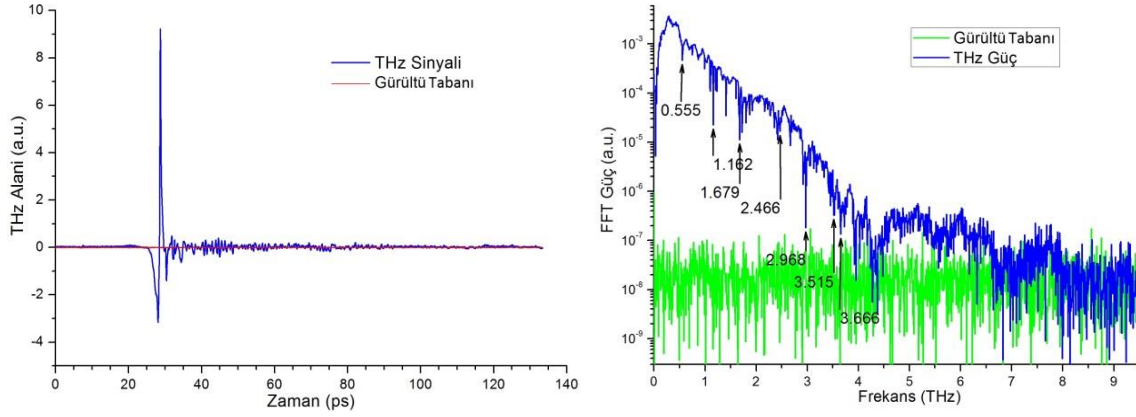
Resim 4.2. Taşıyıcıya monte edilen, tel bağlaması yapılan bir yonganın çıplak ve optik mikroskop görüntüleri

Öncelikle üretilen antenler sisteme takılarak lazer demeti antenlere hizalanmıştır. Bu hizalamanın ardından lazer demeti kapalı ve açık iken karanlık ve fotoakım ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4.6. Paketlemesi ve lazer hizalaması sonrası antenlerden alınan karanlık ve fotoakım grafikleri

Şekil 4.6'daki grafikten de görüleceği gibi antenlerin fotoakımları arasında belirgin bir fark yoktur. Ancak karanlık akımlar wafer tipine göre büyük değişiklik göstermektedir. Fraunhofer waferi ile yapılan antenlerin Menlo firmasından temin edilmiş olan ticari antenlere göre daha düşük karanlık akım verdiği görülmektedir. Bu antenden elde edilen fotoakım yine ticari üründen yüksektir. Bu anten kullanılarak daha geniş bantta çalışabilen bir sistem yapılabileceği öngörüsü ile THz verim karşılaştırmalarında bu iki antenle devam edilmiştir. Bu amaçla THz üretici olarak NANOTAM anteni ve alıcı olarak Menlo Systems GmbH firmasından temin edilmiş TERA8 anteni kullanılmış ve ilk ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlerin sonuçları Şekil 4.7'deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 4.7. FU2 anteni ile üretilmiş THz atım ve spektrum (FFT) ölçümü

FU2 anteni ile hava ortamında ölçümler alınmıştır. Sistemin ölçüm sınırını anlamak amaçlı sistemin gürültü tabanı da ölçülmüştür. Havada bulunan nemin etkileri yukarıda verilen spektrum ölçümünde gözükmemektedir. Literatürde raporlanan ve ölçüm sonuçlarında bulunan su soğurma çizgileri bir sonraki sayfada bulunan Çizelge 4.1'deki tabloda karşılaştırmalı verilmiştir [24]. Yapılan bu ölçümlerde frekans çözünürlüğü 133 ps'lik veri için $\pm 7,5$ GHz'dir.

Çizelge 4.1. 0,5-4 THz arası su soğurma dipleri – literatür ve ölçüm sonuçları karşılaştırma tablosu

Su Pikleri / HITEMP (THz)	Ölçüm sonuçları	Su Pikleri / HITEMP (THz)	Ölçüm sonuçları	Su Pikleri / HITEMP (THz)	Ölçüm sonuçları
0,557	0,555 & 0,562	2,196	2,196 & 2,203	3,127	3,125
0,752	0,749 & 0,757	2,222	2,226	3,135	
0,988	0,989	2,264	2,271	3,166	3,155
1,097	1,094 & 1,102	2,318		3,168	
1,113	1,117	2,344	2,353	3,182	3,178
1,153		2,366		3,210	3,208
1,163	1,162	2,392	2,398	3,230	3,230
1,208	1,207	2,428	2,421	3,329	3,268
1,229	1,229	2,447		3,331	3,328
1,322		2,463	2,466	3,495	3,456 & 3,485
1,411	1,409 & 1,416	2,567		3,509	3,515
1,602	1,604	2,631	2,631	3,537	3,530
1,661	1,656 & 1,671	2,640		3,600	3,605
1,670		2,665	2,661	3,613	
1,717	1,679 & 1,716 & 1,728	2,686	2,691	3,655	3,657
1,762	1,761	2,774	2,766	3,683	3,687
1,795	1,799	2,880	2,856	3,691	
1,797		2,884		3,722	3,725
1,868	1,874	2,885		3,737	
1,918	1,926	2,962	2,930 & 2,968	3,798	3,777 & 3,780
1,919		2,969		3,807	
2,016	2,039	2,971		3,855	3,852 & 3,860
2,041		2,999			
2,074	2,076	3,013	3,005		
2,164	2,166	3,044	3,050		

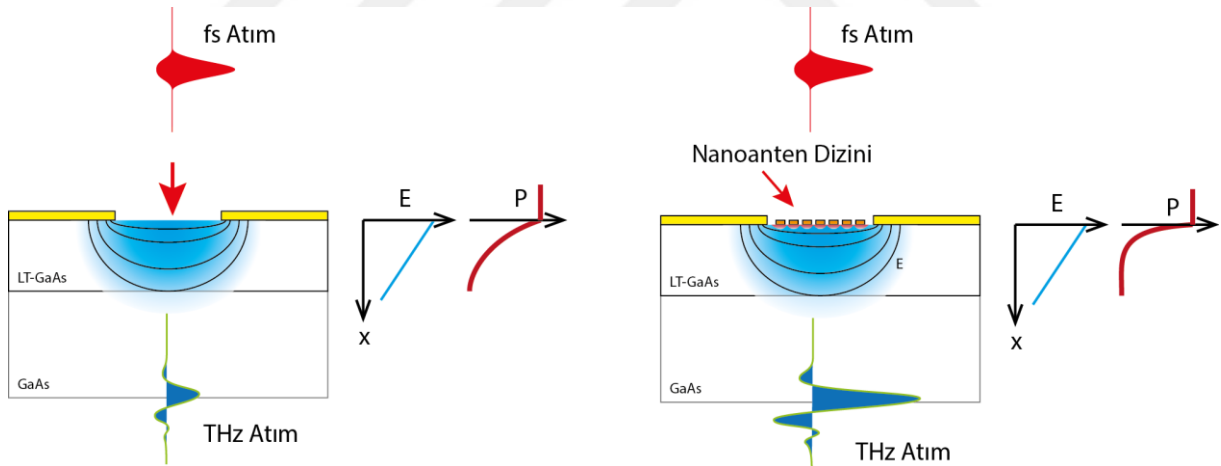
4.1.4. Ar-Ge ve iyileştirme çalışmaları

Terahertz fotoiletken antenlerde oluşan sinyal şiddeti, akım yoğunluğunun değişim hızı ile doğru orantılıdır. Akım yoğunluğu ise; taşıyıcı hızına, taşıyıcı yoğunluğuna, taşıyıcıların yoğunluğunun değişim hızı ve taşıyıcıların ivmelenmesine bağlıdır. Bu ilişkiler şu eşitlikle ifade edilebilir:

$$E_{THz} \propto \frac{\partial J}{\partial t} \propto ev \frac{\partial n}{\partial t} + en \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

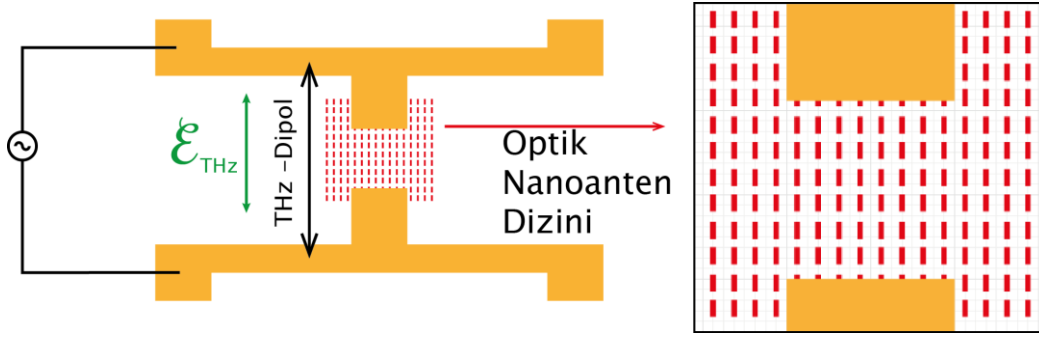
Dolayısıyla, sinyal şiddetini arttırmak için taşıyıcıların çok hızlı bir şekilde üretilmesi ve deşiklerle birleşmesinin sağlanması; buna ek olarak da oluşan taşıyıcıların anten geriliminin oluşturduğu elektrik alanda ivmelenmelerinin arttırılması gerekmektedir. Eş. 4.1’de ikinci terime bakıldığında taşıyıcı yoğunluğu ile taşıyıcı ivmelenmesinin çarpım halinde olduğu görülmektedir. Bu sebeple, yüksek taşıyıcı yoğunluğunun yüksek elektrik alanda bulunması sinyal şiddetini yükseltmek açısından avantaj sağlayacaktır.

Bu tür bir tasarım, lazer ışığının dalga boyu olan 780 nm’de plazmonik yapılarla mümkündür [25,26]. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi anten geriliminin oluşturduğu elektrik alan şiddeti yüzeye yakın noktalarda daha yüksektir. Plazmonik yapılar yok iken (solda) lazer ışınının şiddeti ise yine epitaksiyel katmanda derinlere kadar inmektedir. Plazmonik yapıların varlığında ise, lazer ışınının taşıyıcı yoğunluğu ile doğru orantılı şiddeti yüzeye yakın elektrik alanın yüksek olduğu bölgede lokalize olmaktadır. Bu sebeple THz sinyal şiddetinin üretilen bu yapılarla yükseltileceği düşünülmüştür. Şekil 4.8’de bu durum şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Plazmonik yapı iyileştirme etkisi – kavramsal yaklaşım

GaAs için 780 nm’de soğurulma katsayısı $\alpha \cong 1,4 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, dolayısıyla ışık şiddetinin $1/e$ ’ye düştüğü derinlik $P(x) = P_0 \exp(-\alpha x)$ formülünden yaklaşık 700 nm olarak bulunmaktadır. Maksimum elektrik alanın yüzeye yakın bölgede (hatta yüzeyde) olduğu göz önüne alınırsa, soğurulmanın elektrik alanın yüksek olduğu yerde gerçekleşmesini sağlamanın, yukarıdaki kavramla açıklandığı gibi, THz ışınım şiddetini artıracak sonucu elde edilmektedir. Bu amaçla Şekil 4.9’daki antenin aktif alanına uygulanacak optik nanoanten yapısı planlanmıştır.

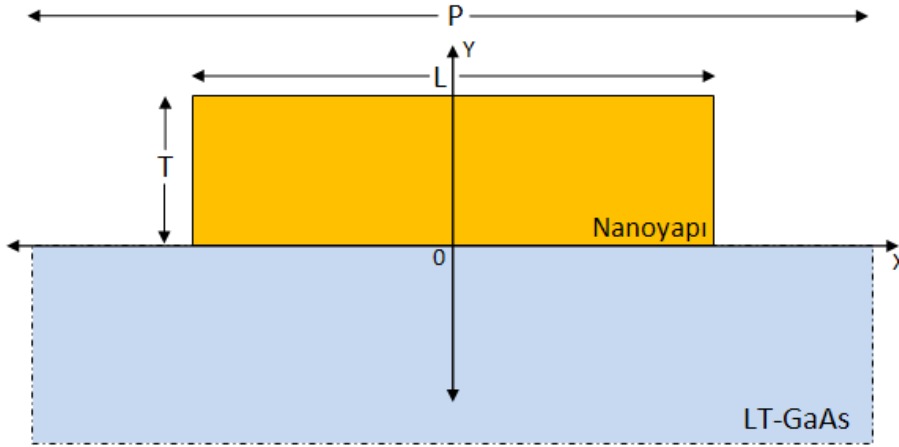


Şekil 4.9. Optik nanoantenlerin THz dipol antene entegrasyonu – kavramsal yaklaşım

FDTD benzetim çalışmaları

Uygulanacak nanoantenlerin geometrisinin, yukarıda tarif edilen amaçları sağlayacak şekilde, optimize edilmesi amacıyla FDTD benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu benzetim çalışmalarında – x – doğrultusunda polarize 780nm lazer ışını için L & T boyutları, P periyodu ve nanoyapının Ag ve Au üretimi durumları üzerine odaklanılmıştır. Buna göre;

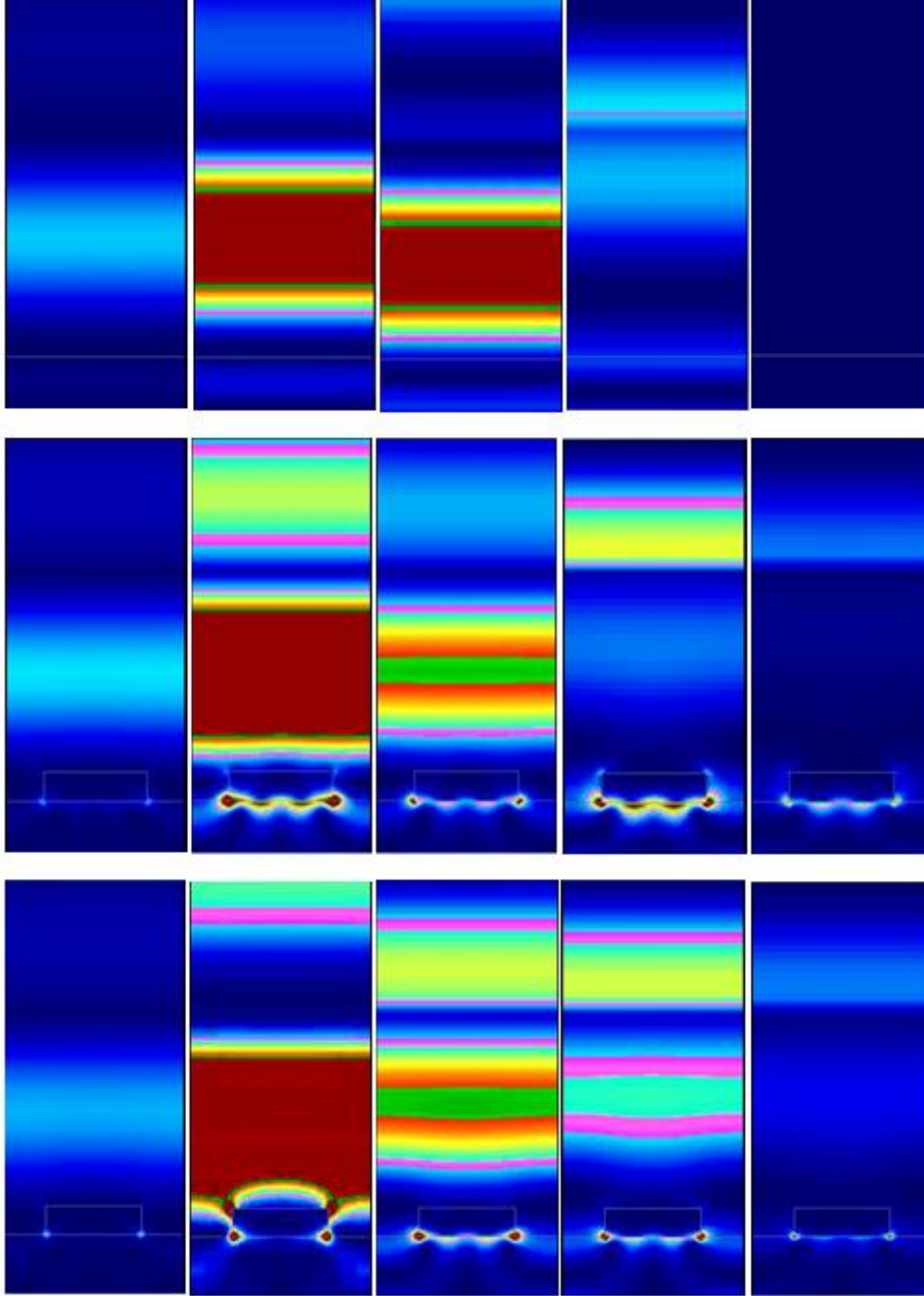
- *Uzunluk: L* / Nanoyapının x-doğrultusundaki uzunluğu. Metal nanoyapının Alttaş (substrat; LT-GaAs) yüzey plazmon rezonans frekansını belirleyen kritik değişkendir. Simülasyon sonuçlarına göre optimum üretim değerine karar verilir.
- *Kalınlık: T* (= 50 nm her iki yapı için) / Nanoyapının y-doğrultusundaki uzunluğu/yüksekliği. Yüzey rezonans frekans değerini belirleyen bir diğer değişkendir. Fabrikasyon yetisi ön kabüllü sınırlar içinde benzetim sonuçlarına göre optimum değeri her iki nanoyapı için de 50 nm olarak karar verilmiştir.
- *Periyot: P* / Bütün anten aktif alanını kaplayacak şekilde üretilecek toplam nanoyapının kendini x-doğrultusunda tekrar eden en küçük boyutu; benzetim sırasında farklı genişlikler denenerek optimum benzetim sonuçlarına göre kesin boyuta karar verilir.



Şekil 4.10. Optik nanoanten geometrisi, yandan görünüm

2 Boyutlu ve 3 Boyutlu iki tür yapı seçilmiştir. 2 Boyutlu yapıda, plazmonik yapılar z-doğrultusunda herhangi bir değişim göstermemektedir. 3 Boyutlu yapılar ise, x- ve y-doğrultularında periyodik monopol antenler şeklinde düşünülebilir. Antenlerin uzun boyutu lazer ışığının elektrik alan doğrultusundadır.

100 fs / 780 nm ($\Delta\lambda=10$ nm) kaynak kullanılarak yapılan 2-Boyutlu ve 3-Boyutlu benzetimlerde, elektrik alanın zamanla değişimi aşağıdaki şekilde verilmiştir. Kullanılan dalga kaynağının atım genişliği sistemde kullanılan lazer ile aynı seçilmiştir. Referans ölçümünde, yüzeye yakın bölgeler diğer bölgelere kıyasla herhangi bir değişiklik barındırmamaktadır. Oysa optik antenin konulduğu durumlarda, benzetim süresi boyunca, elektrik alan yüzeye lokalize olmuş durumdadır. Bu benzetim çalışmalarının zaman uzayındaki gösterimi ve bu lokalize olma durumu Şekil 4.11’de görünmektedir.



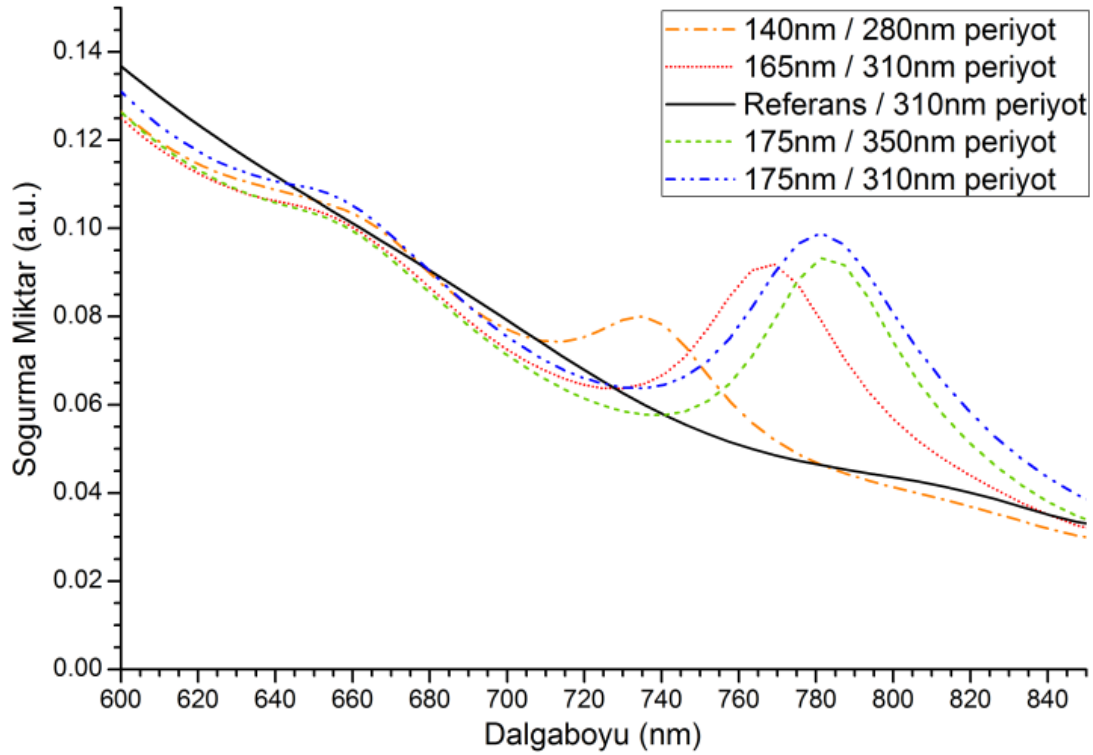
Şekil 4.11. Hava/LT-GaAs arayüzünde referans (üst), 3 boyutlu yapı (orta) ve 2 boyutlu yapı (alt) için elektrik alan şiddeti zaman alanı – time domain – benzetim çalışmaları

Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda fabrikasyon için aşağıdaki değerlerde karar kılınmıştır:

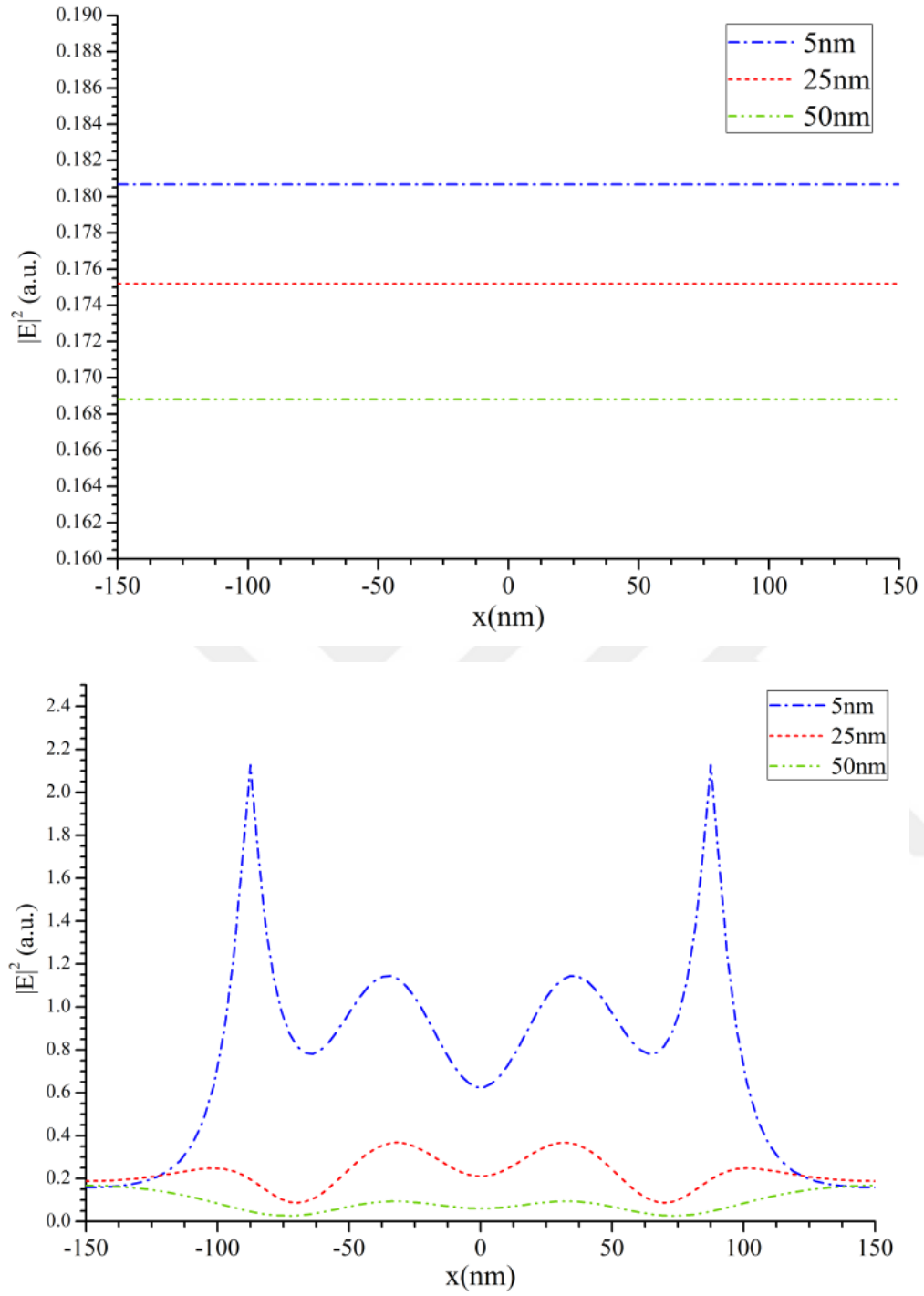
3-Boyutlu yapıda, en yüksek artırım miktarını verdiği için gümüş monopol antenler kullanılmıştır. Kullanılan monopoller 175 x 50 x 50 nm boyutlarındadır ve yapılar x/y-doğrultusunda 310/100 nm periyoduna sahiptir.

2-Boyutlu yapılar için altın çubuklar kullanılmıştır, kullanılan parametreler ise 165 nm genişlik, 50 nm kalınlık ve 310 nm periyot değerleridir.

3-Boyutlu yapı için soğurmanın çeşitli yapı parametreleri ile değişimi Şekil 4.12 ve 4.13'deki grafiklerde gösterilmiştir. 780 nm'de en yüksek soğrulmanın görüldüğü değer fabrikasyon için seçilmiş değerdir. Yine aşağıdaki ortada ve alttaki grafiklerde, yüzeyden 5, 25 ve 50 nm derinliklerde elektrik alan şiddetinin x-doğrultusundaki değişimleri verilmiştir. Özellikle yüzeye en yakın noktalarda ortalama olarak 6 kata yakın bir artırım söz konusudur. Bu sayede THz sinyalinin büyük ölçüde artırılacağı öngörülmektedir.

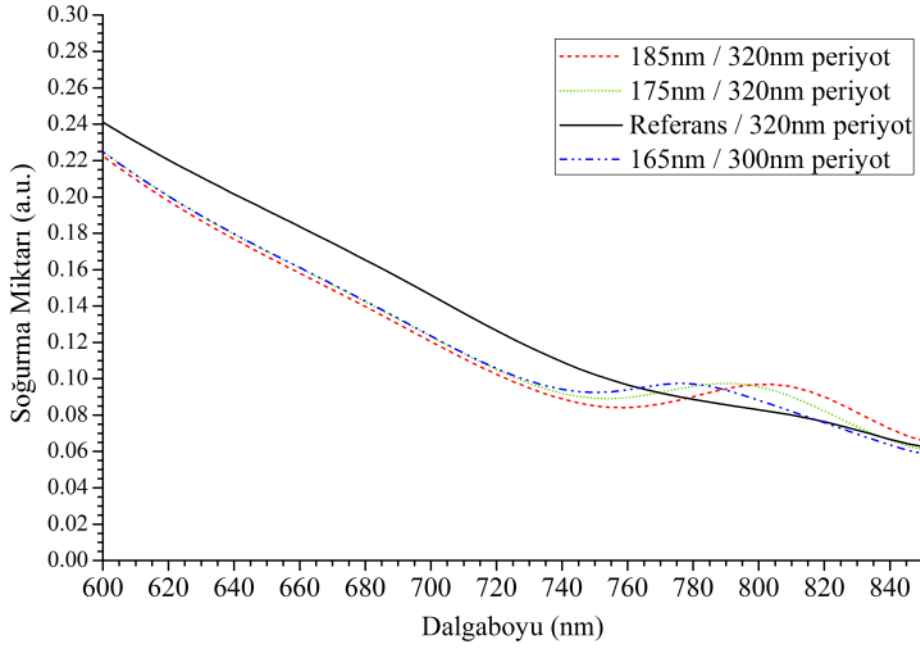


Şekil 4.12. 3 Boyutlu yapı için dalgaboyuna göre soğurma grafiği

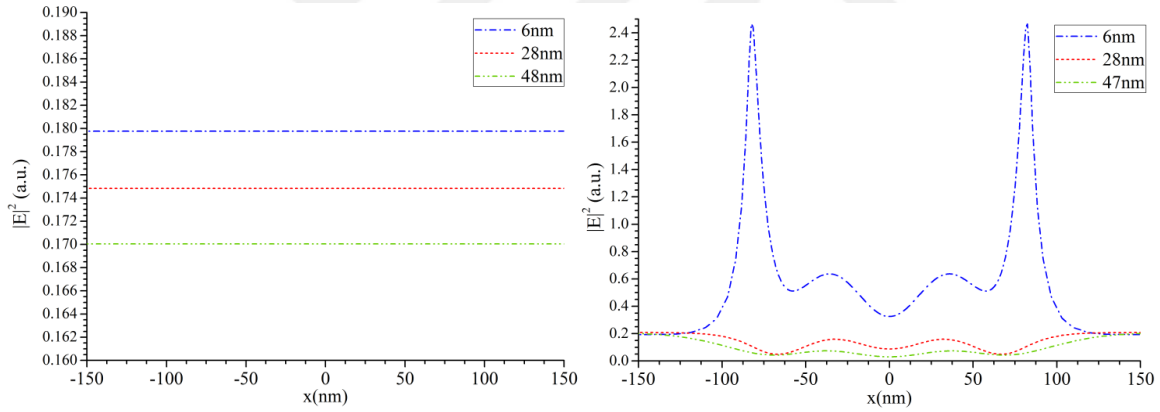


Şekil 4.13. referans E-Alan şiddeti (üst) – optik antene ait elektrik alan şiddeti (alt)

Şekil 4.14 ve 4.15’de ise aynı grafikler 2-Boyutlu yapı için verilmiştir. İlk yapı kadar olmasa da benzer artırım oranları bu yapı için de geçerlidir.



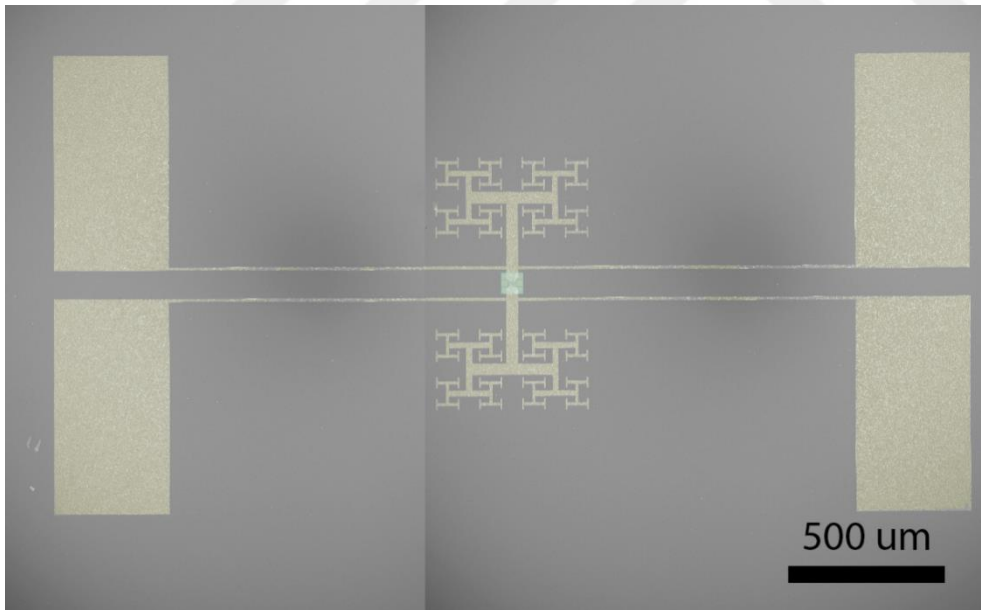
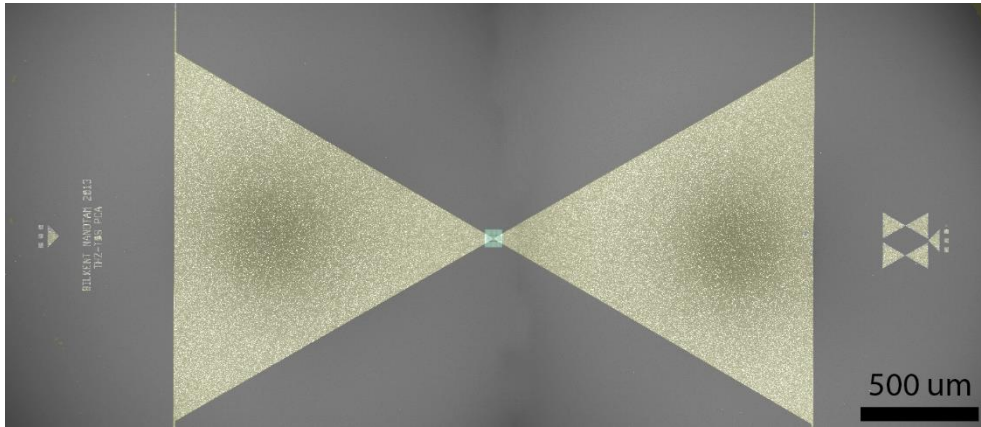
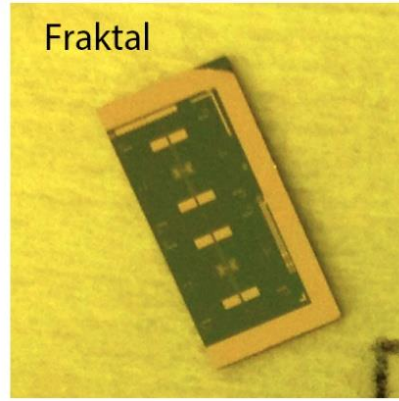
Şekil 4.14. 2 Boyutlu yapı için dalgaboyuna göre soğurma grafiği



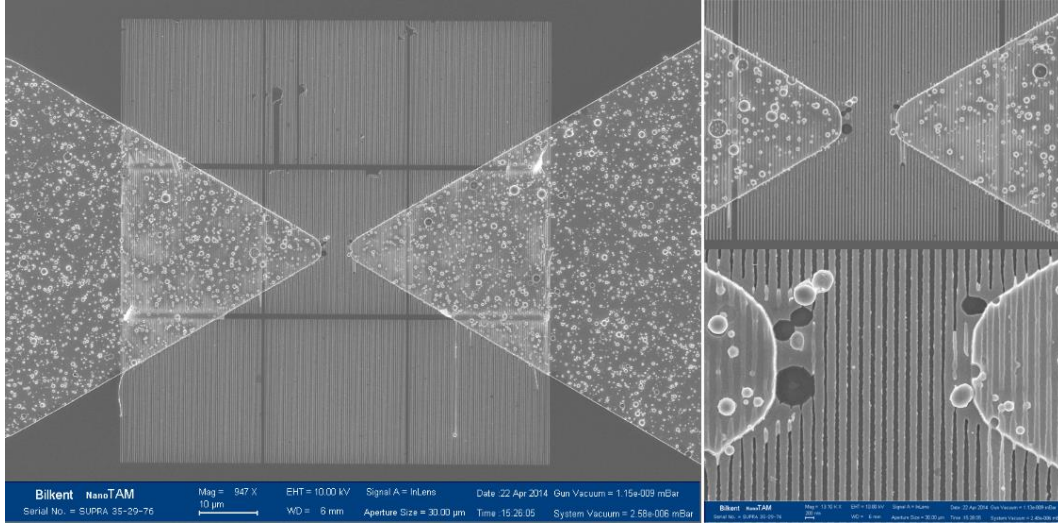
Şekil 4.15. 2B Referans E-Alan şiddeti (sol) – optik antene ait elektrik alan şiddeti (sağ)

Optik nanoanten fabrikasyon ve test ölçümleri

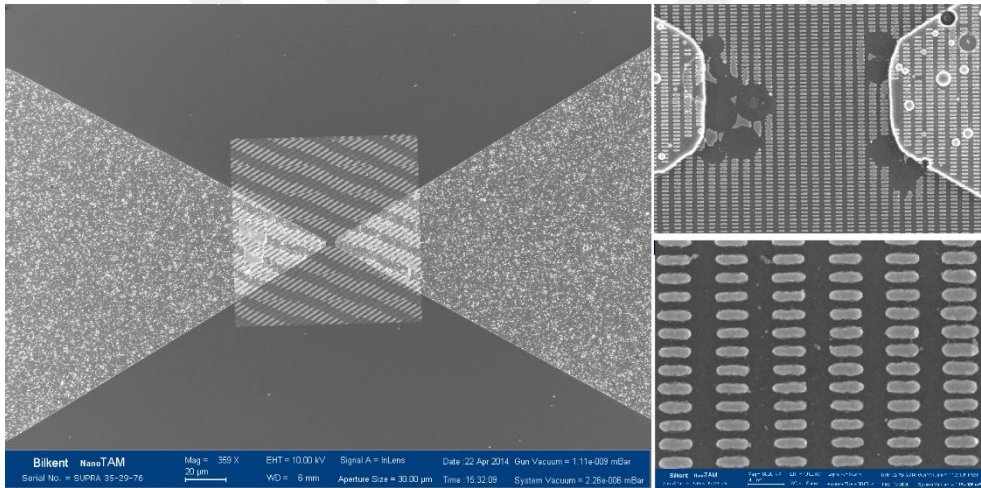
Daha önceden LT-GaAs üzerine mikrofabrikasyon ile yerleştirilmiş olan fotoiletken antenlerin bulunduğu örneklerden fraktal ve bowtie anten yapılarına sahip örnekler seçilmiştir. Her bir örneğin üzerindeki bir çift antenden birine nanofabrikasyon yapılırken ikincisi referans anten olarak bırakılmış ve ölçümlerde bundan alınan referans ölçümleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Resim 4.3’de yongaların ve üretilen antenlerin fotoğrafları ve optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Resim 4.4 ve 4.5’de de nano yapıların elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Resim 4.3. Nanofabrikasyon yapılmış antenlerin yonga fotoğrafları ve elektron mikroskop görüntüleri

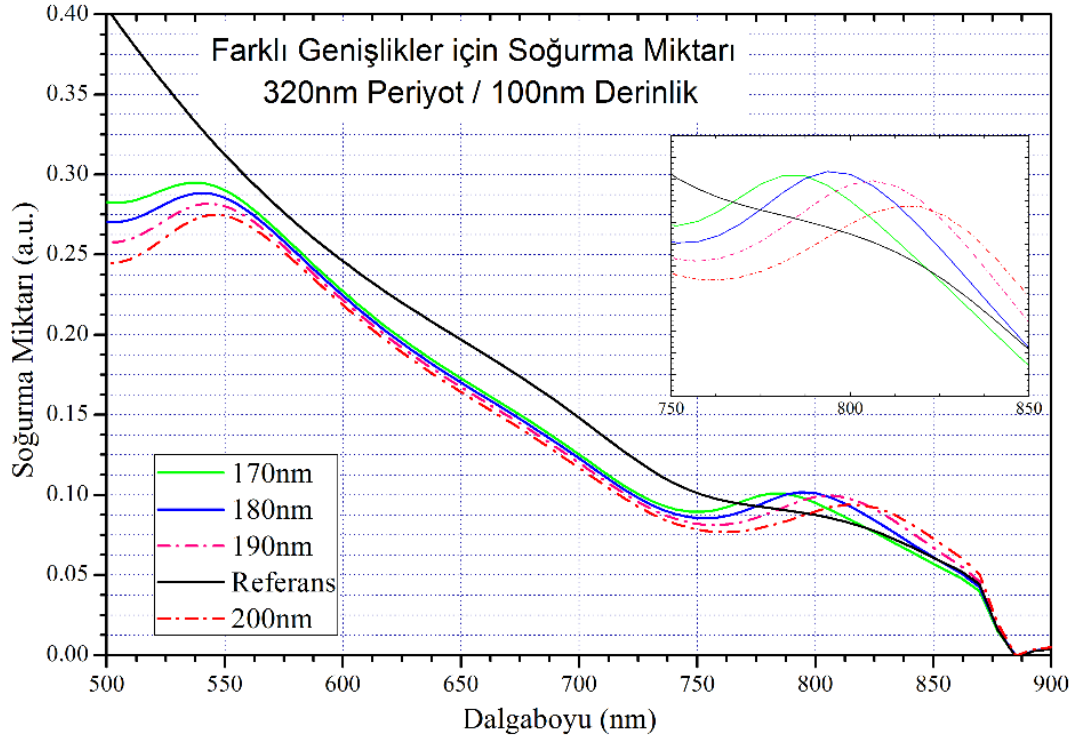


Resim 4.4. 2-Boyutlu plazmonik yapı uygulanmış bowtie anten elektron mikroskop görüntüsü

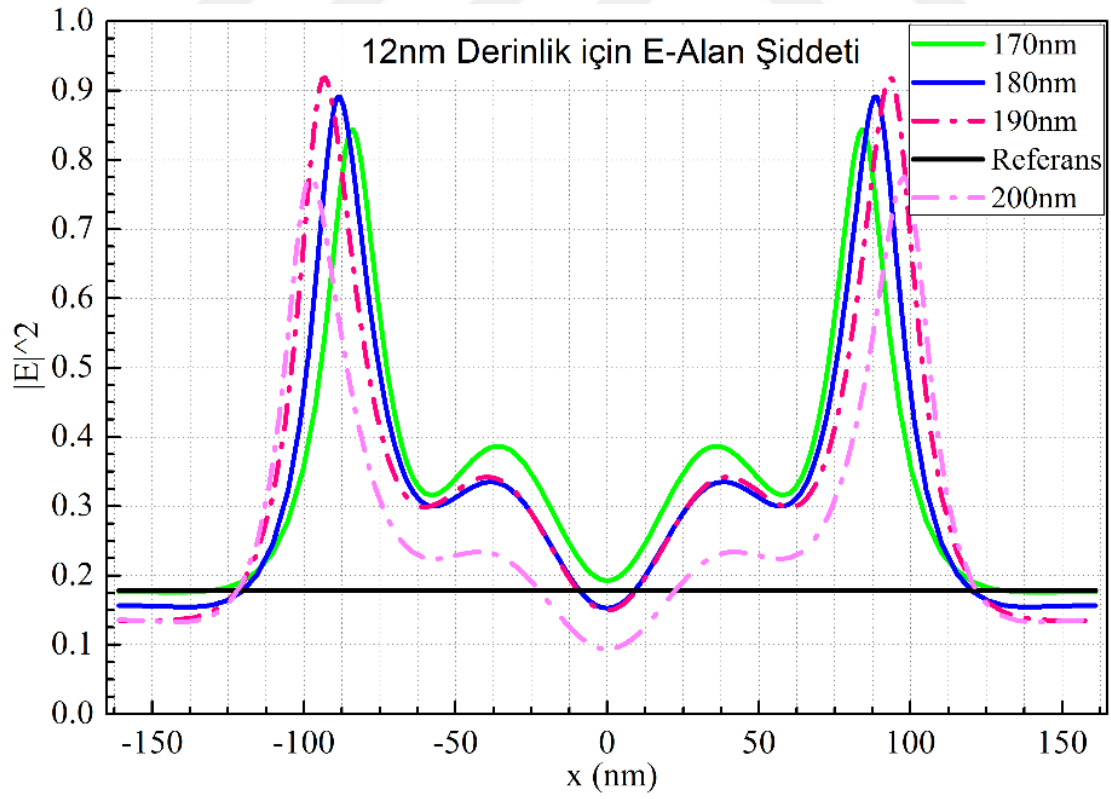


Resim 4.5. 3-Boyutlu monopol nanoanten uygulanmış bowtie anten elektron mikroskop görüntüsü

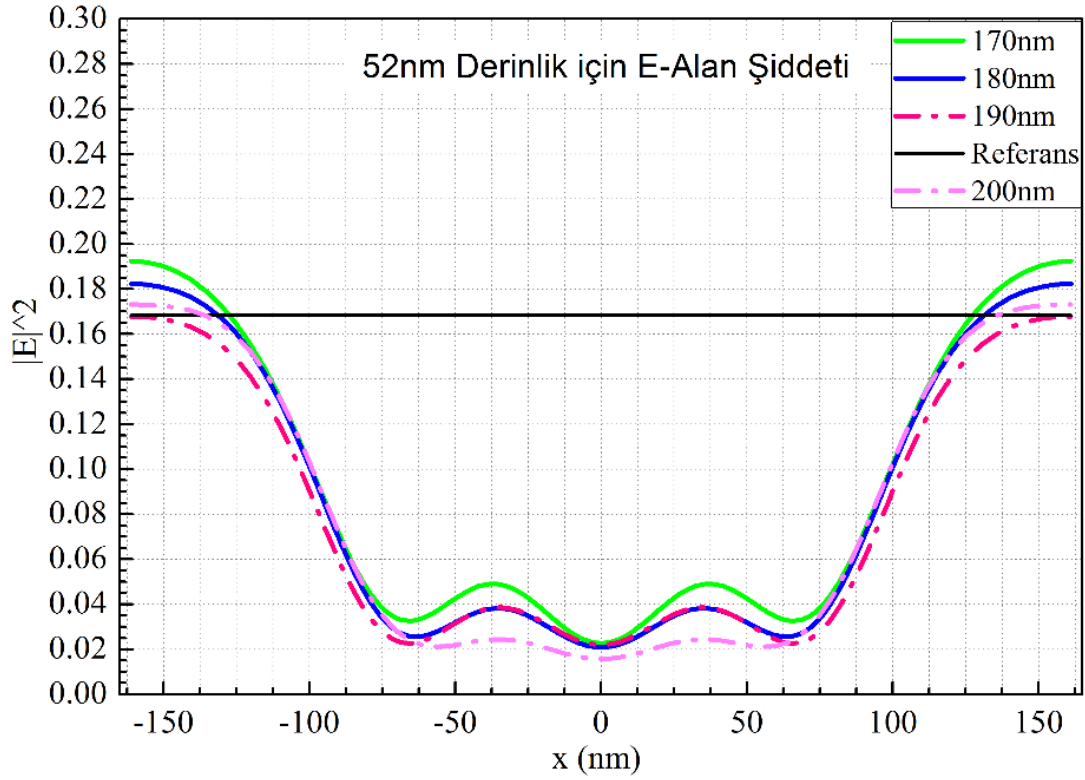
Üretimden kaynaklanan farkların antendeki etkisini görebilmek için, fabrikasyon sonrası ölçülen boyutlar kullanılarak 2Boyutlu tip yapılar için Au metali kullanılarak tekrar benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonuçları Şekil 4.16,17 ve 18’de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre fabrikasyondaki farklılık elektrik alan şiddetinde büyük bir azalmaya sebep olmamıştır. Au ile LT-GaAs arasındaki yüzeyden 12 nm ve 52 nm derinliklerde, plazmonik yapı olmadan hesaplanan alan şiddeti referans alınarak çizilen alan şiddetlerine bakıldığında beklenildiği gibi yüzeyde yaklaşık 4,5 kat artırılmış alan şiddeti görülmüştür. Sonuç olarak 780 nm lazerden antene düşürülen ışın, elektrik alanın daha yüksek olduğu, yüzeye yakın noktalarda taşıyıcı oluşturacaktır.



Şekil 4.16. 2 Boyutlu nanoyapılarda uzunluğun rezonansa etkisi

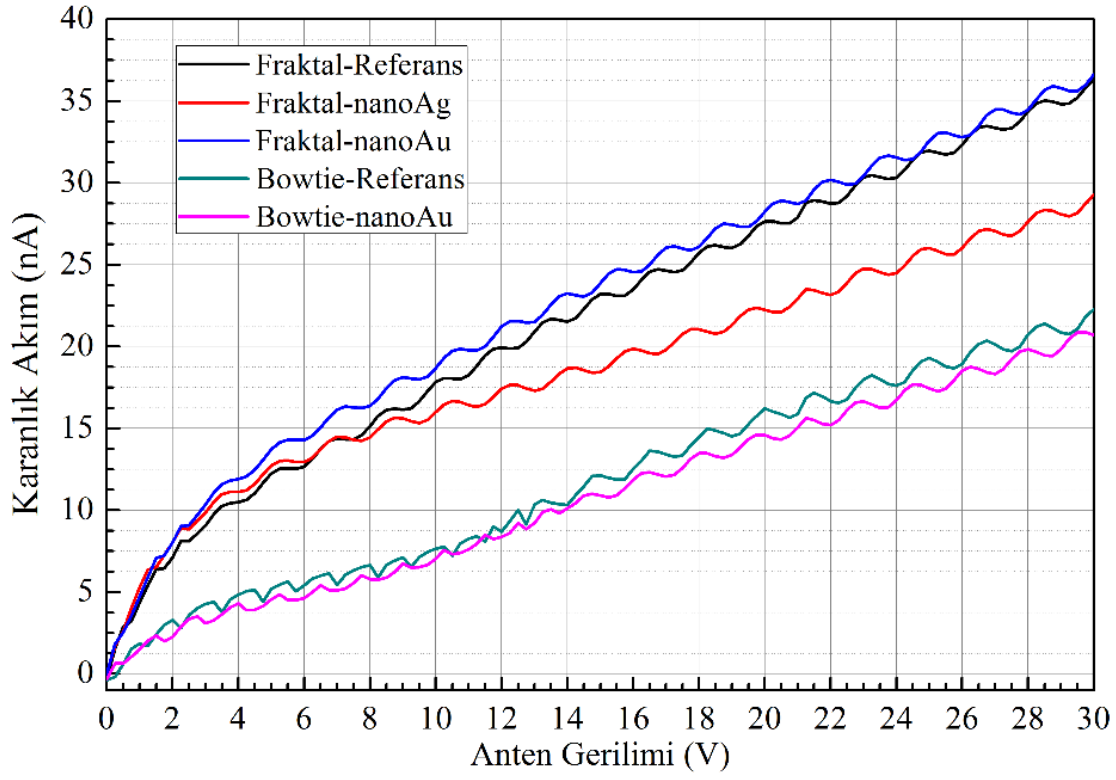


Şekil 4.17. 2 Boyutlu Antenlerde 12 nm derinlikte 780 nm dalgaboyu için elektrik alan şiddeti

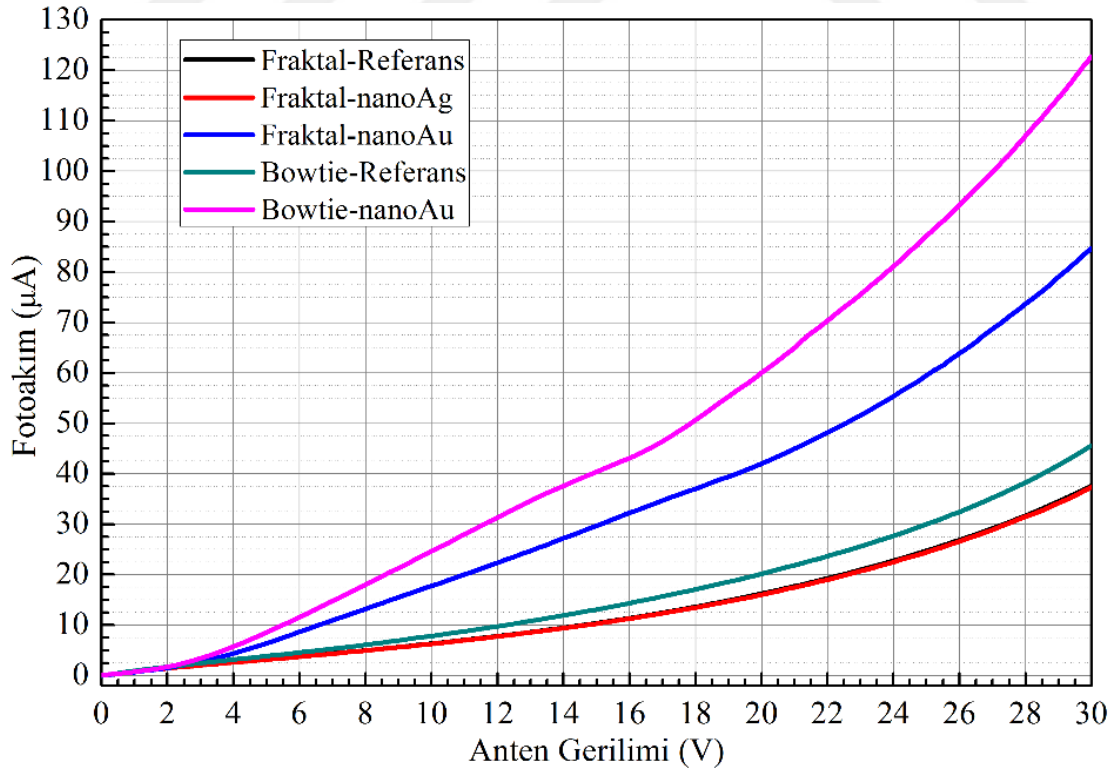


Şekil 4.18. 2 Boyutlu antenlerde yüzeyden 52 nm derinlikte elektrik alan şiddeti

Elde edilen nano-yapılara sahip antenler PCB tutuculara monte edilip, elektriksel bağlantıları da alındıktan sonra THz sisteminde ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.19 ve 4.20'deki grafiklerde referans ve nano-yapılı antenlerin sırasıyla karanlık ve fotoakımları verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere diğer anten değerleriyle kıyasla hem karanlık akım hem de fotoakım değerleri olarak iyi sonuçlar elde edilmiştir.

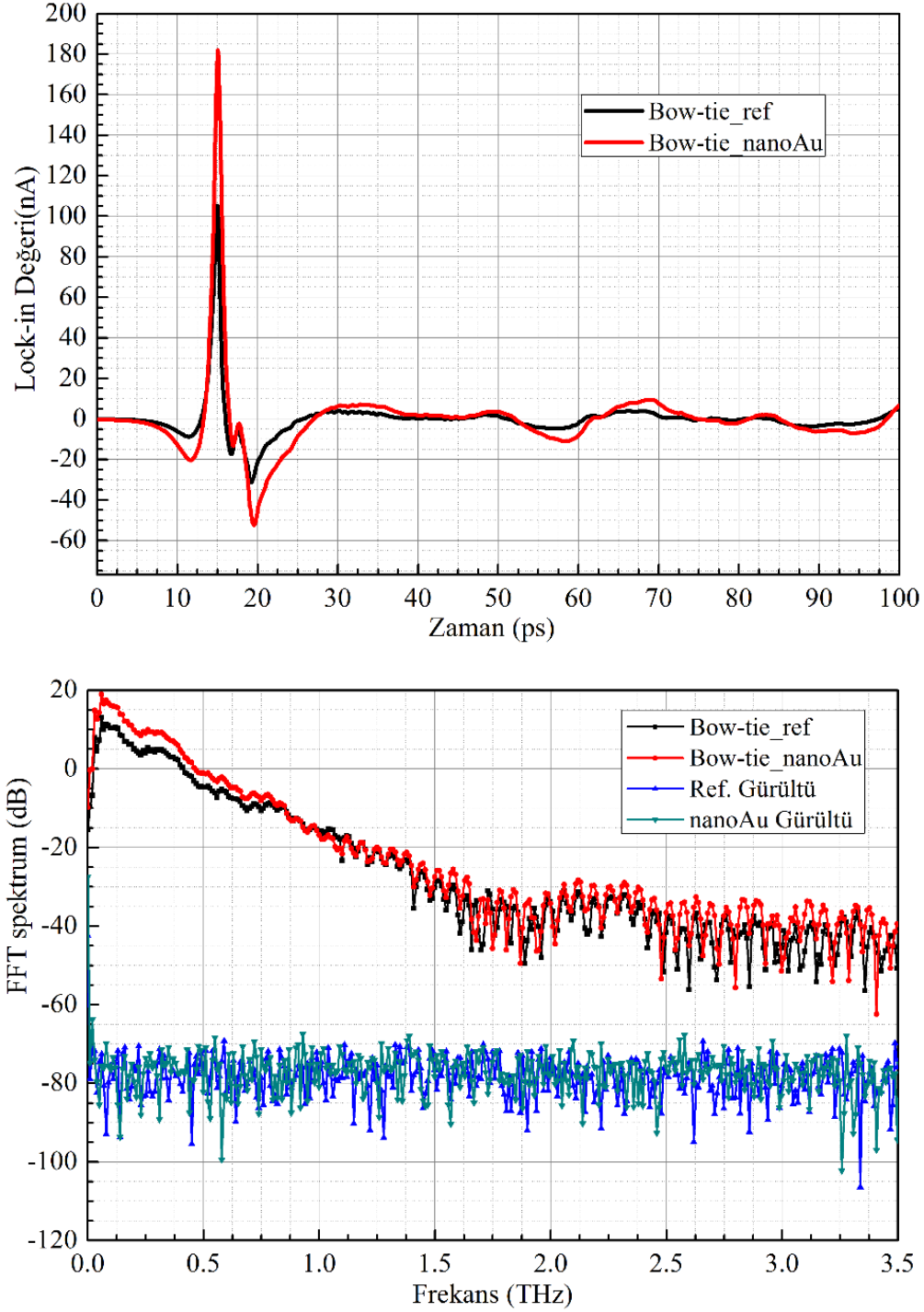


Şekil 4.19. Nano-yapılı THz antenlerin karanlık akım ölçümleri

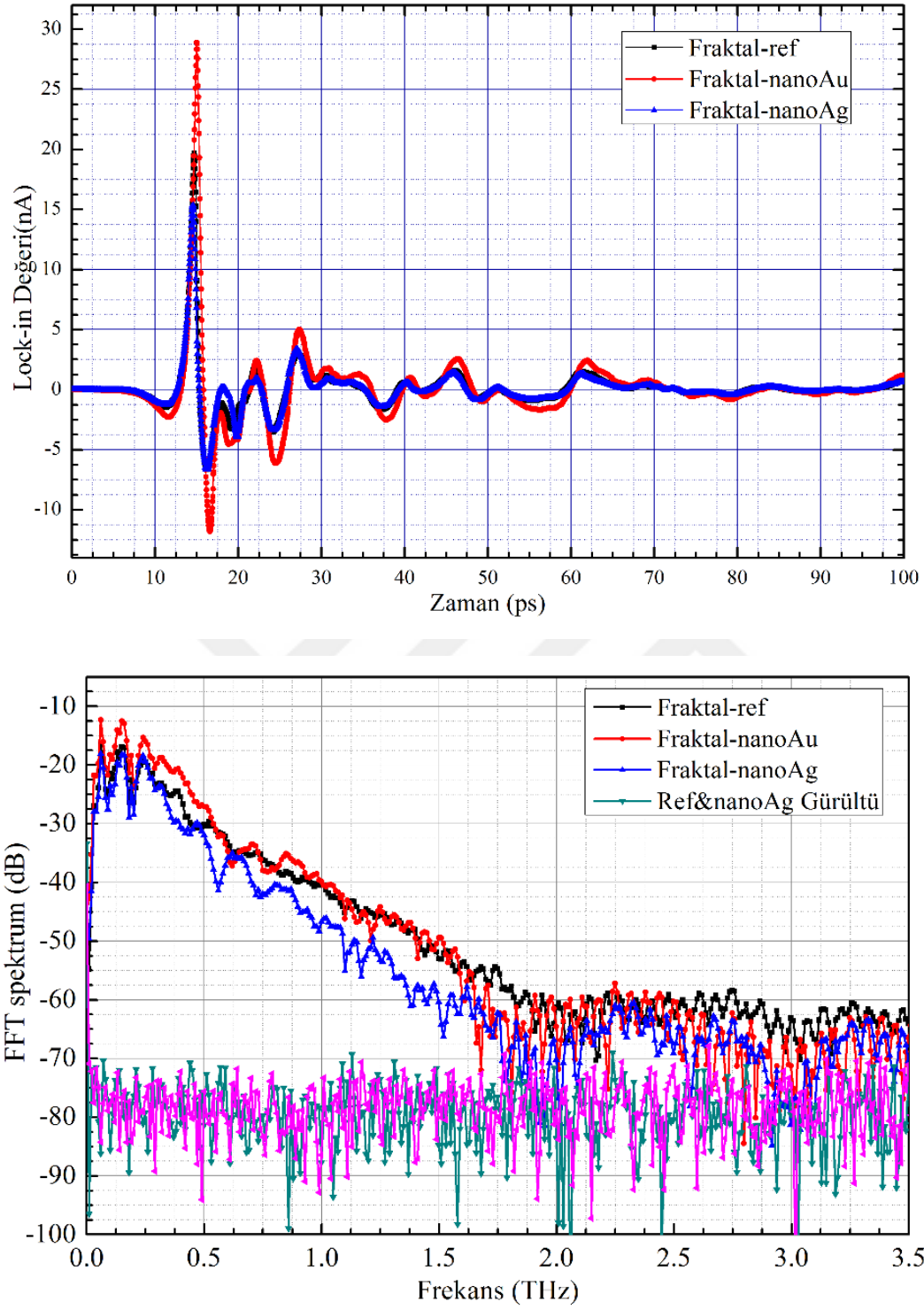


Şekil 4.20. Nano-Yapılı THz Antenlerin fotoakım ölçümleri

Terahertz sisteminde yapılan ölçümlerde bowtie antende 2 Boyutlu tip yapı ve hemen yanındaki referans yapısı kıyaslandığında THz sinyal şiddetinde 1,76 kat artış gözlenmiştir. Üreteç bowtie algılayıcı anten dipol olduğu için spektrum genişliğinde bir iyileşme gözlenmemiştir. Şekil 4.21 ve 4.22’de bu ölçümlerin sonuçları grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Referans ve 2 Boyutlu nano-yapılı bowtie antenden üretilen THz atımı (üst) - spektrumu (FFT) (alt)



Şekil 4.22. Referans, 2 boyutlu ve 3 boyutlu nano-yapılı fraktal THz antenden üretilen THz atımı (üst) - spektrumu (FFT) (alt)

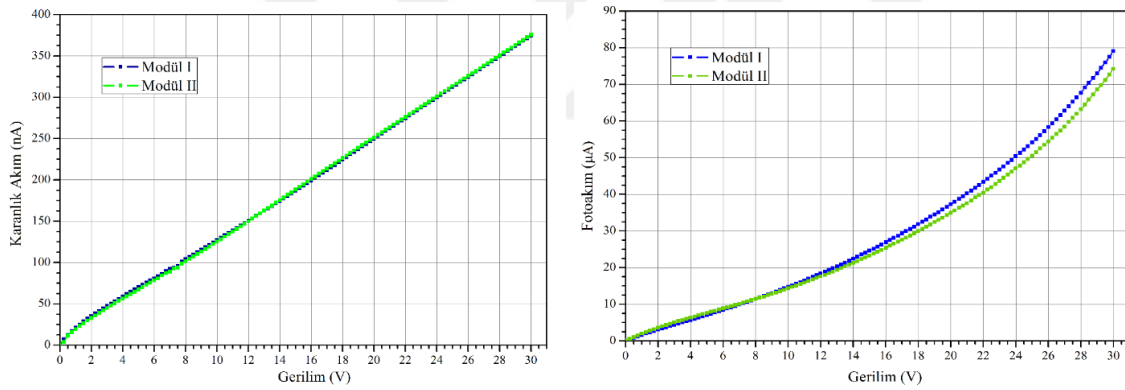
Nanoanten çalışmaları ile dinamik ölçüm aralığının ya da sinyal/gürültü oranının nano-anten tasarımı ile artırıldığı gösterilmiştir. Sinyal seviyesinin lazer gücü ya da anten gerilim

potansiyelinin artırılmadığı durumlarda bu yöntemle en azından 2 kata kadar artırılabilceği görülmüştür.

4.2. Prototip THz-TDS Sistem

4.2.1. Karakterizasyon

Geliştirilen Taşınabilir THz-TDS Sistemi'nde kullanılacak üreteç ve algılayıcı THz antenler, FU2 dipol antenler olarak kararlaştırılmıştır. Montajı tamamlanan Foto-iletken anten takımlarının 0 – 30 V gerilim altında karanlık ve fotoakım ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler; anten takımları sıra ile masaüstünde kurulu sistemde üretici anten olarak hizalandıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Karanlık akım ölçümü anten üzerine lazer ışını düşürülmeden gerilim altında yapılan ölçümdür. Fotoakım ölçümünde ise bu ölçüm antenin üzerine lazer ışığı düşürülerek yapılmaktadır.

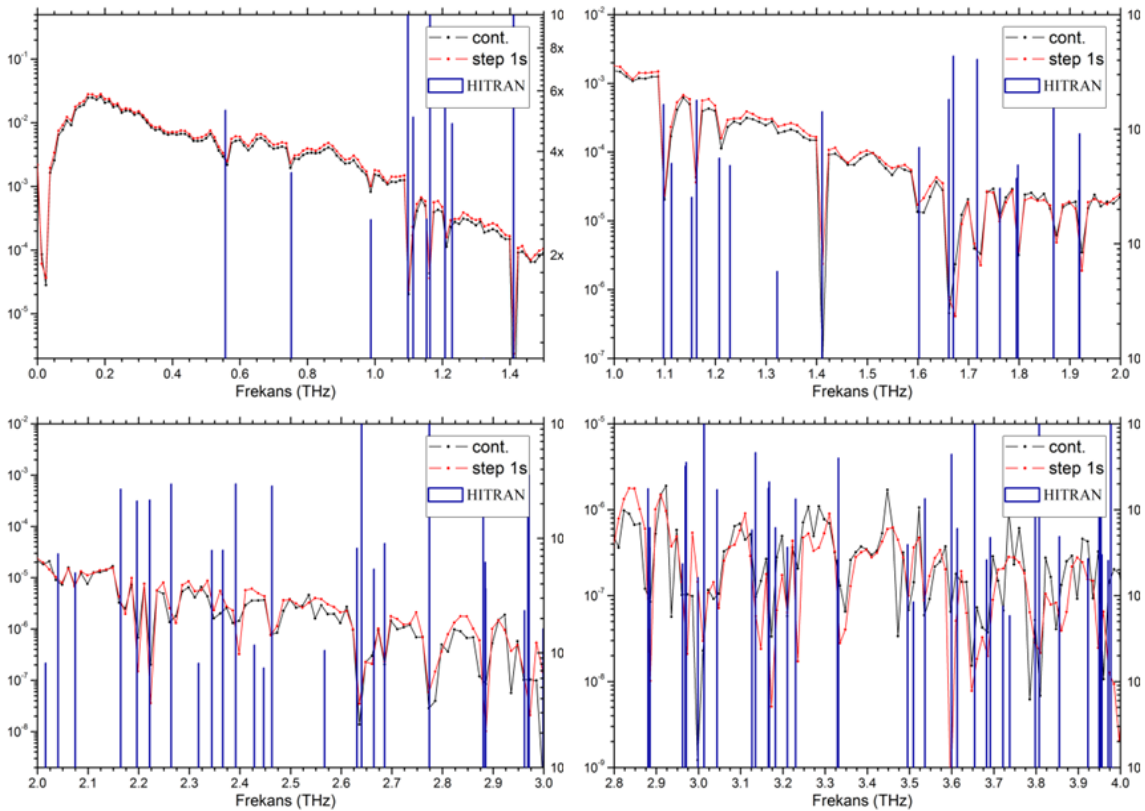


Şekil 4.23. THz anten modülleri karanlık (sol) ve fotoakım ölçümleri (sağ)

Şekil 4.23'deki grafiklerde görüldüğü üzere karanlık akımlarında bir anormallik veya eşdeğersizlik gözlenmemiştir. Ardından anten modüllerinin 10mW optik güçte lazer atımı altında masa üstü sistemde fotoakım ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler sonucunda, montajı yapılmış anten takımlarında, herhangi bir elektriksel sorun yaşanmadığı gözlenmiştir. Bu takımlardan alınan ölçümler önceki üretim antenlerin değerleri ile paralellik göstermektedir. Sisteme bu modüllerin entegrasyonunu takiben, prototipten Terahertz atım ölçümleri alınmaya ve sistemin bütüncül testlerine başlanmıştır.

Bilindiği üzere spektroskopik ölçüm cihazlarının en kritik parametrelerinden biri de “Dinamik Aralık” tır. Bu da sistemde ölçümü alınacak örneğin fiziksel özellikleri ve cihazın örnek ölçüm yöntemi ile değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, özellikle THz-TDS spektroskopi sistemleri gibi çok düşük kaynak güçleri ile çalışan sistemlerde ölçülecek örneğin soğurma seviyesi, yansıtıcılığı, yüzeyi, hazırlanması, kalınlığı ve benzeri birçok fiziksel özelliği bu değeri direkt olarak etkiler dolayısıyla bu sistemlerin karakterizasyonunda aşağıda belirtilen yöntem tercih edilir.

Kurulan taşınabilir prototip sistemde adımlı ve sürekli olarak THz atımı ölçümleri yapılabilmektedir. THz spektral ölçümlerinde hassasiyet ve bant genişliğinin belirlenmesinde başlıca referans alınan ölçüm endüstriyel standart olarak ortam/hava nem ölçümüdür. Bu amaçla alınan ölçümlerin sonuçları Şekil 4.24’deki grafiklerde, farklı THz bant aralıkları için, detaylı olarak gösterilmiştir.

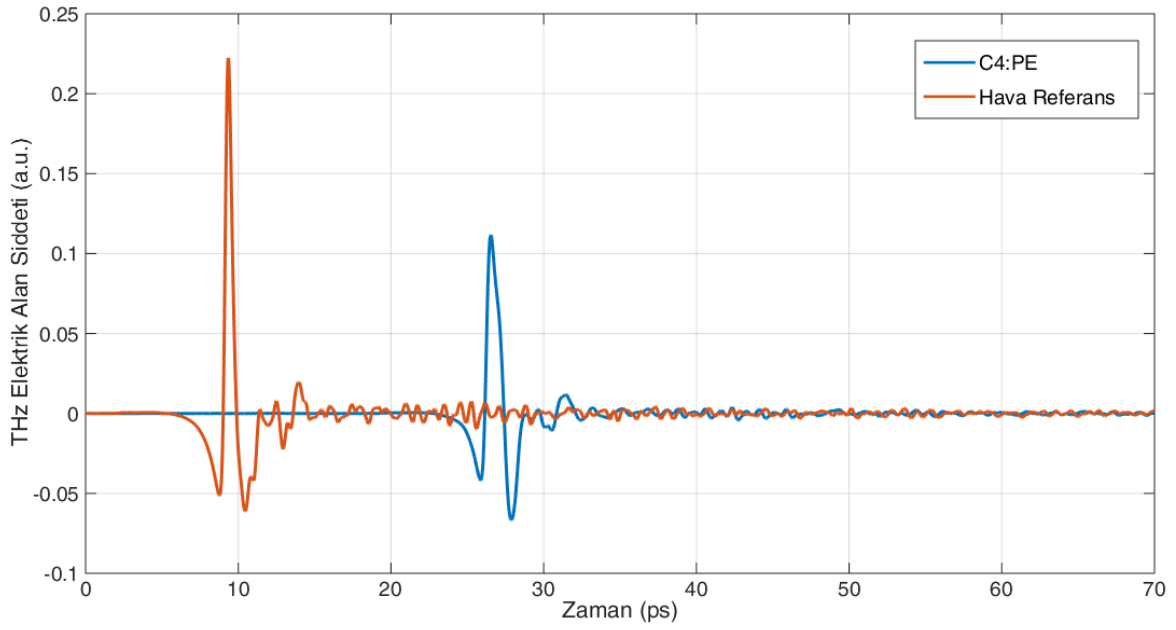


Şekil 4.24. Adımlı ve sürekli ölçüm HITEMP [24]karşılaştırması – Farklı spektral aralıklar

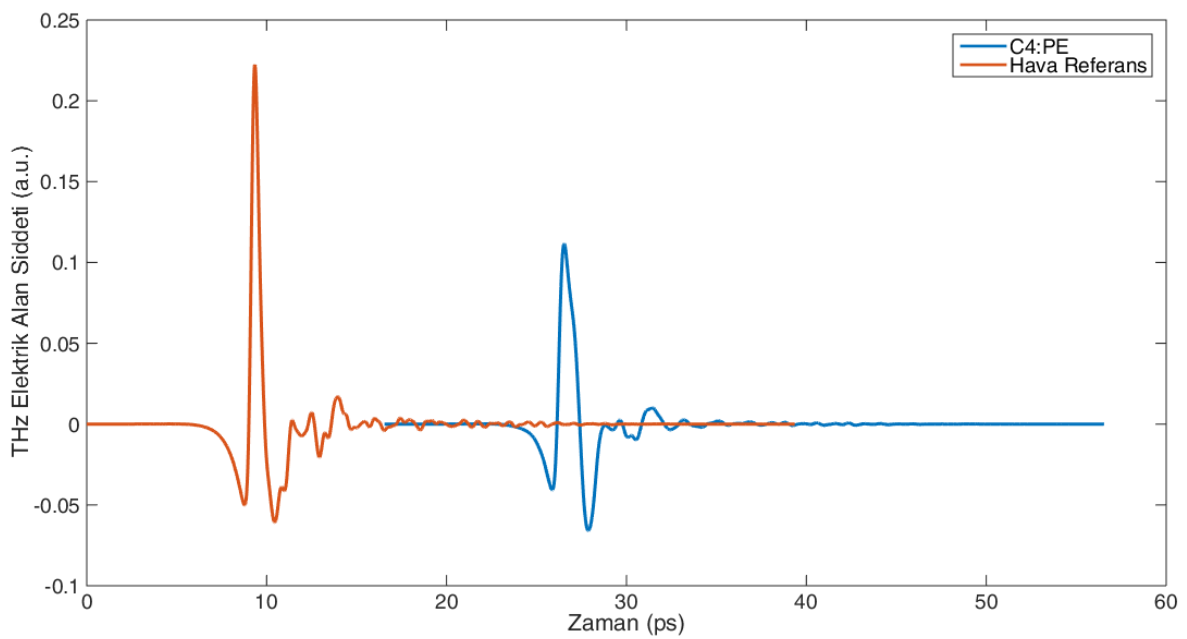
Yukarıdaki grafiklerden de anlaşılacağı üzere sistemin Referans THz çalışma aralığı 0,1 – 4 THz arasında güvenilir derecededir.

4.2.2. Örnek ölçümleri

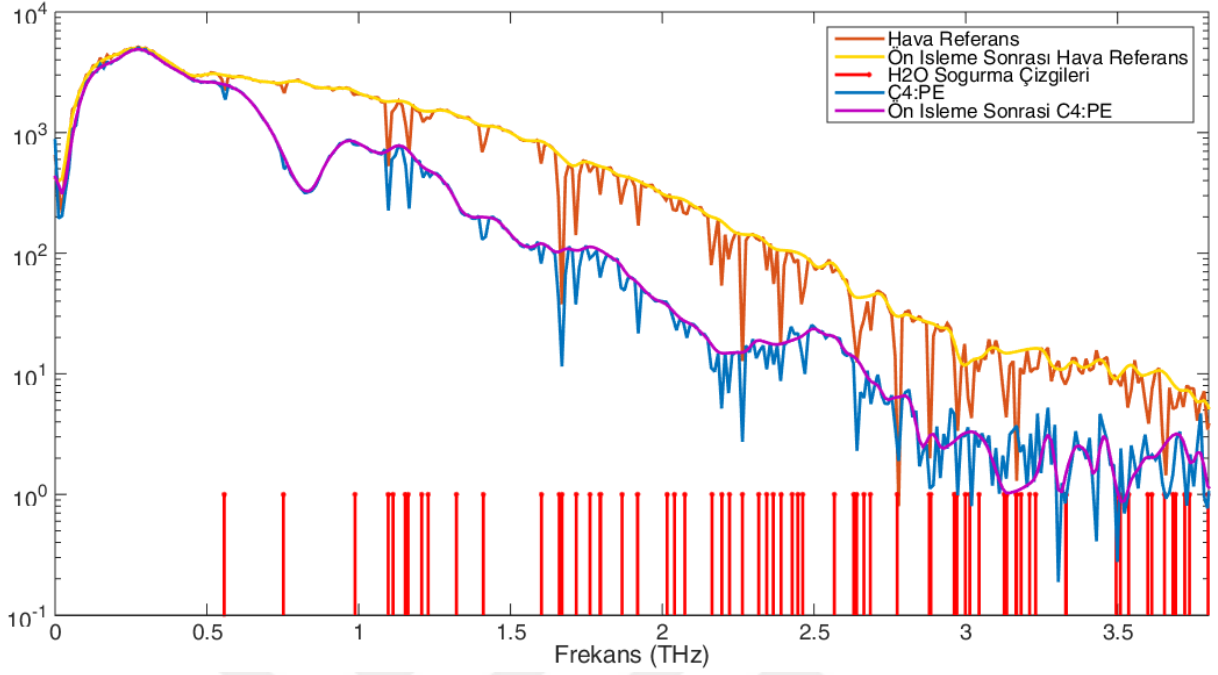
Tasarlanan sistemin tespit ve teşhis yapabilmesi ve bu amaçla kendi içinde güvenilir bir ölçüm kütüphanesi oluşturulabilmesi amacıyla yazılımsal ve donanımsal olarak sinyal önışlemeleri yapılmaktadır. Bu işlemlerin sinyal üzerindeki etkisi Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27'deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Önışleme öncesi Referans ve C4 örnek ölçümü THz atımı dalga formları



Şekil 4.26. Önışleme sonrası Referans ve C4 örnek ölçümü THz atımı dalga formları



Şekil 4.27. Önışlemenin ve ortam neminin soğurma çizgileri ve spektrum üzerindeki etkisi

4.2.3 Muadil sistem karşılaştırmaları

Bu çalışmanın da dahil olduğu proje ile Türkiye’de ilk defa taşınabilir ve yine ilk defa teşhis yeteneğine sahip zamana dayalı THz spektroskopi ölçüm ve analiz sistemi geliştirilmiştir. Bu tez araştırmaları sürecindeki çalışmalar sonucunda sistemde THz üretici ve alıcı anten çipleri tasarlanmış, üretilmiş ve sisteme entegre edilerek kullanılmıştır. Yine aynı şekilde, sistemde kullanılan analiz yeteneği, bilinmeyen bir malzemenin THz spektral ölçümünün alınmasından, malzeme kütüphanesinde bulunan bir malzemenin tespit ve teşhisine kadar bütün sinyal işleme algoritmaları ve yöntemleri milli imkânlar ile geliştirilmiştir. Sistemin tanı yeteneği yeni malzemeler ile geliştirilebilir bir şekilde tasarlanmıştır.

Prototipin ve dünyadaki benzer ürünlerin bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Diğer sistemler ile karşılaştırıldığında:

- Dinamik aralık performansı ve bant genişliği benzer düzeydir.
- Yansıma ve geçirgenlik ölçüm seçenekleri diğer sistemlerdeki gibi mevcuttur.
- Diğer sistemlerin aksine kuru hava ya da azot ortamı gerektirmeden de ölçüm alıp analiz yapmaktadır.

- Sistem boyutları ve ağırlığı diğer sistemlerden düşüktür.
- Veri tabanının genişletilme seçeneği prototipin analiz yazılımına entegre olarak bulunduğundan yapılabilecek bir ek çalışma ile veri tabanı zenginleştirilebilir.
- Ölçüm hızı açısından, hızlı ölçüm opsiyonu mevcut değildir.



Çizelge 4.2 Muadil THz-TDS sistemlerin karşılaştırma tablosu

Arş. Mrk. / Şirket	İ.D. Bilkent Üniv. NANOTAM	Hübner/Fraunhofer IPM	Z-Omega	BATOP	TeraView	Advantest
Model	THzTDS Sistemi	T-Cognition	Z3	TDS1008	TeraPulse-4000	TAS7400
Sistemin Görüntüsü						
Çalışma Prensipleri	THz Zamana Dayalı Spektroskopi – Fiber Lazer - 780 nm - PCA	THz Zamana Dayalı Spektroskopi – Fiber Lazer - 1560 nm - PCA	THz Zamana Dayalı Spektroskopi PCA/EO	THz Zamana Dayalı Spektroskopi – (780-1060-1560nm)-PCA	THz Zamana Dayalı Spektroskopi – Fiber Lazer	THz Zamana Dayalı Spektroskopi – Fiber Lazer
Çalışma Frekans Aralığı	0,1-4 THz	Belirtilmemiş ancak >4 THz	0,1-3,5 THz	0,05-4 THz	0,06-4 THz (7 THz)	0,1-4 THz (7 THz)
Ortalama Güç	>200 nW	-	-	-	-	-
Dinamik aralık	>75 dB	75 dB'den fazla olduğu tahmin ediliyor.	>70 dB	>75 dB	> 4 OD @ 0.9 THz	>60 dB
Ölçüm Modu	Geçirgenlik / Yansım (Entegre)	Geçirgenlik / Yansım (Entegre) ve Görüntüleme	Geçirgenlik / Yansım (ATR, Görüntüleme modülleri mevcut)	Geçirgenlik / Yansım (Örnek Tutucu Modül Değişimi)	Geçirgenlik / Yansım / ATR (Örnek Tutucu, Ayna, Modül Değişimi) Görüntüleme	Geçirgenlik / Yansım / ATR / Polarization (Örnek Tutucu, Ayna, Modül Değişimi)
Ölçüm Ortamı	Hava / ortam atmosferi	Kuru Hava ya da Azot bağlantısı istiyor	Kuru hava ya da Azot bağlantısı	Azot bağlantısı	Azot bağlantısı	Kuru Hava Modülü
Ölçüm Hızı	10-200 sn	motorize örnek departmanı var.	-	-	Rapid Scan ile 30 Hz'e kadar	200 ms / tarama
Ağırlık	< 30 kg	87 kg	46 kg	85 kg (60-100 kg)	45 kg	<70 kg
Boyut	92 x 37 x 27 cm	60 x 72 x 73 cm	97 x 66 x 33 cm	90 x 60 x 25 cm	70 x 65 x 47 cm	43 x 54 x 33 cm 50 x 49 x 41 cm
Kaynak		https://www.hubner-photonics.com/products/terahertz-technology/terahertz-spectrometers/t-cognition/	http://www.teo.com.cn/files/path/files/Z-3.pdf	http://www.batop.de/products/teraheertz/THz-spectrometer/data-sheet/data_sheet_TDS10XX_system.pdf	http://www.teraview.com/products/TeraPulse%204000/index.html	https://www.advantest.com/products/terahertz-spectroscopic-imaging-systems/terahertz-spectroscopic-system-tas7400

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Terahertz dalga boylarında çok geniş bantlı ışıyım yapacak ve algılayabilecek LT-GaAs tabanlı fotoiletken antenlerin üretimi yapılmıştır. Ayrıca bu antenlerin performansının iyileştirilmesi amacıyla geliştirme faaliyetleri yürütülmüştür. Böylece bu teknikle çalışan antenlerin kullanıldığı THz Zamana Dayalı spektroskopi sistemi geliştirilmesinde kullanılmak üzere şimdiye kadar yurtdışında ticari olarak üretilen antenlerle muadil ürünlerin geliştirilmesi yapılmış ve bu ürünlere dair bütün know-how'a sahip olunmuştur. Çalışmaların yapılmasında kullanılan alttaşların de ülkede üretilmesi ile tamamiyla yerli fotoiletken anten üretimi mümkün olacaktır.

Yürütölen geliştirme faaliyetlerinde ise PCA'ların aktif alanlarına, odaklanan lazerin yüzeyde yoğunlaştırılması ve böylece anten verimliliğinin artırılması amacıyla optik nanoanten dizinleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu uygulama ile iki kata yakın verim artışı sağlandığı gösterilmiştir.

Tez çalışmalarının ikinci bölümünde ise üretilen antenlerin kullanıldığı taşınabilir prototip bir THz-TDS sistemi tanıtılmıştır. Bu sistem ile zamana dayalı THz ölçümleri alınmış ve muadilleri ile karşılaştırılmıştır. Ortaya çıkan prototip ürün ülkemizde ilk kez gerçekleştirilmiş olup bu süreçte böyle bir sisteme dair ortam koşullarından teknolojik sınırlarına kadar bütün çerçevesiyle yapılabilirliği ortaya konmuştur.



KAYNAKLAR

1. Mourou, G. A., Stancampiano, C. V., Antonetti, A. and Orszag, A. (1981). Picosecond microwave pulses generated with a subpicosecond laser driven semiconductor switch. *Applied Physics Letters*, 39, 295–296.
2. Auston, D. H., Cheung, K. P., and Smith, P. R. (1984). Picosecond photoconducting Hertzian dipoles. *Applied Physics Letters*, 45-3, 284–286.
3. Fattinger, Ch. and Grischkowsky, D. (1988). Point source terahertz optics. *Applied Physics Letters*, 53, 1480–1482.
4. Han, P. Y. and Zhang, X.-C. (2001). Free-space coherent broadband terahertz time-domain spectroscopy. *Measurement Sciences Technology*, 12, 1747–1756.
5. Siegel, P. H. (2004). Terahertz technology in biology and medicine. *IEEE Trans. Microwave Theory Technology*, 52, 2438–2446.
6. Tani, M., Matsuura, S., Sakai, K., and Nakashima, S. (1997). Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs. *Applied Optics*, 36, 7853-7859.
7. Jepsen, P. U., Jacobsen, R. H., and Keiding, S. R. (1996). Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas *Journal of Optical Society of America B.*, 13, 2424-2436
8. Woodward, R. M. et al. (2002). Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue. *Physics in Medicine & Biology*, 47, 3853–3863.
9. Fischer, B. M. et al. (2005). Terahertz time-domain spectroscopy and imaging of artificial RNA. *Optics Express*, 13, 5205–5215.
10. Walther, M., Fischer, B. M. and Jepsen, P. U., (2003). Noncovalent intermolecular forces in polycrystalline and amorphous saccharides in the far infrared. *Chemical Physics*, 288, 261–268.
11. Chen, J.-Y., Knab, J. R., Cerne, J. and Markelz, A. G. (2005). Large oxidation dependence observed in terahertz dielectric response for cytochrome c. *Physical Review E.*, 72, 040901.
12. Whitmire, S. E. et al. (2003). Protein flexibility and conformational state: A comparison of collective vibrational modes of wild-type and D96N Bacteriorhodopsin. *Biophysics Journal*, 85, 1269–1277.
13. Taday, P. F., Bradley, I. V., Arnone, D. D. and Pepper, M. (2003). Using terahertz pulse spectroscopy to study the cryastalline structure of a drug: A case study of the polymorphs of ranitidine hydrochloride. *Journal Pharmaceutical Sciences*, 92, 831–838.

14. Mittleman, D. M., Cunningham, J., Nuss, M. C. and Geva, M. (1997). Noncontact semiconductor wafer characterization with the Hall effect. *Applied Physics Letters*, 71, 16–18.
15. Nashima, S., Morikawa, O., Takata, K. and Hangyo, M. (2001). Temperature dependence of optical and electronic properties of moderately doped silicon at terahertz frequencies. *Journal of Applied Physics*, 90, 837–842.
16. Petkie, D. T., Kemp, I. V., Benton, C., Boyer, C., Owens, L., Deibel, A. J., Stoik, C. D. and Bohn, M. J. (2009). Nondestructive terahertz imaging for aerospace applications," *Proc. SPIE 7485, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology II*, 74850D.
17. Chen, H.-T., Kersting, R. and Cho, G. (2003). Terahertz imaging with nanometer resolution. *Applied Physics Letters*, 83, 3009–3011.
18. Kim, S. M., Hatami, F. and Harris, J. S. (2006). Biomedical terahertz imaging with a quantum cascade laser. *Applied Physics Letters*, 88, 153903.
19. Yasuda, T., Yasui, T., Araki, T. and Abraham, E. (2006). Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects. *Optics Communications*, 267-1, 128-136.
20. Jansen, C., Wietzke, S., Peters, O., Scheller, M., Vieweg, N., Salhi, M., Krumbholz, N., Jördens, C., Hochrein, T., and Koch, M. (2010). Terahertz imaging: applications and perspectives, *Applied Optics*, 49, E48-E57.
21. Cinar, K., Bozaci, H. M., Altan H. (2013). Characterization of a glow discharge detector with terahertz time domain spectroscopy. *IEEE Sensors Journal*, 13-7, 2643-2647.
22. Kawase, K., Ogawa, Y., Watanabe, Y. and Inoue, H., (2003). Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints. *Optics Express*, 11, 2549–2554.
23. Shannon, C. E. (1949). Communication in the presence of noise. *Proceedings of Institute of Radio Engineers*, 37 (1), 10–21.
24. Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barber, R. J., Dothe, H., Gamache, R. R., Goldman, A., Perevalov, V., Tashkun, S. A., Tennyson, J. (2010). HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database *Journal of Quantum Spectroscopy & Radiation Transfer*, 111, 2139-2150.
25. Park, S-G., Jin, K. H., Yi, M., Ye, J. C., Ahn, J., and Jeong K-H. (2012). Enhancement of Terahertz Pulse Emission by Optical Nanoantenna *ACS Nano*, 6 (3), 2026-2031.
26. Turan, D., Garcia, S. C. C., Castro-Camus, E., Jarrahi, M. (2017). *Terahertz power enhancement by improving metal adhesion layer of plasmonic photoconductive sources* Conference on Lasers and Electro-Optics, SM1J.2.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BOZACI, Hasan Mert
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.11.1984, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (535) 724 07 88
 e-posta : mertbozaci@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / İleri Teknolojiler	Devam ediyor
Lisans	O.D.T.Ü / Fizik	2010
Lise	Tevfik Fikret Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	LOMM Makine Müh. LTD	Kurucu Ortak
2013-2015	Bilkent Üniversitesi - NANOTAM	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce
 Fransızca

Yayınlar

- Cinar, K., Bozaci, H. M., Altan H., (2013). Characterization of a glow discharge detector with terahertz time domain spectroscopy. *IEEE Sensors Journal*. 13-7, pp. 2643-2647
- Bozaci, H. M., Bütün, B., Özçelik, S., Özbay, E. (2015) Plazmonik monopol nanoanten yardımı ile THz sinyal şiddeti artırımı. *21. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı* P138



GAZİ GELECEKTİR..