

**Terahertz (THz) Algılama Uygulamaları için Oda
Sıcaklığında Çalışan Deşarj Lambalarının Karakterizasyonu**

Program Kodu: 1001

Proje No: 113F321

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Hakan ALTAN

Danışman:

Prof. Dr. Natan Kopeika

Bursiyer(ler):

Namıg Alasgarzade

Efe Küçükkeskin

Vedat Ali Özkan

Yıldız Menteşe

Kamil Çınar

Burcu Karagöz

Mart 2016
ANKARA

ÖNSÖZ

TUBİTAK tarafından desteklenen 113F321 nolu, “Terahertz (THz) Algılama Uygulamaları için Oda Sıcaklığında Çalışan Deşarj Lambalarının Karakterizasyonu” başlıklı araştırma projesinden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır. Çalışmalar oda sıcaklığında çalışan, kompakt, parıltılı deşarj lambaların mm dalga boyu/THz frekans aralığındaki ışınları nasıl ve ne kadar hassasiyetle tespit edebildikleri üzerine odaklanmıştır. Özellikle plazma-uzak kızıl ötesi ışın etkileşimin anot-katot mesafesi, deşarj voltaj ve akım değerleri ve ışın kutuplaşması gibi temel unsurların araştırılması üzerine odaklanılmıştır. Ek olarak proje kapsamında yapılan çalışmalarda, deşarj lambalarında görülen bazı rezonant etkilerin THz algılamadaki rolünü belirleyebilmek için ticari olarak satılan farklı lambaları hem zamana dayalı THz ölçüm sistemlerimiz ile hem de proje kapsamında geliştirdiğimiz sürekli ışımaya yapan yüksek frekans THz ölçüm sistemleri ile karakterize ettik. Bu amaçlara ulaşmak için sistem içinde mm dalga boyları ve terahertz ışınlarını üretmek, iletmek ve belirlemek için kullanılan birimlerin her biri optimize edilmiştir. Aynı zamanda etkileşim sonucu deşarj lambalarında oluşan sinyalleri yüksek hassasiyetle ölçebilmek için özel devreler geliştirilmiştir. Böylelikle bu lambaların en uygun parametrelerini belirleyerek uzak kızıl ötesi ışınları ile geliştirilmesi istenilen görüntüleme sistemleri için, ucuz, hızlı ve eş benzeri olmayan bir sensör yapısını kazandırarak katkı sağlayabileceğiz.

Projedeki çalışmalar bursiyerler Namıg Alasgarzade, Efe Küçükkeskin, Vedat Ali Özkan, Kamil Çınar, Yıldız Menteşe ve Burcu Karagöz, başta olmak üzere Prof. Dr. Natan Kopeika'nın (Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ben Gurion Üniversitesi, İsrail) önemli katkıları ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi Terahertz Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Proje ekibi, TUBİTAK'a katkılarından dolayı teşekkür eder.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
TABLolar LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
ÖZET	1
ABSTRACT	4
1. GİRİŞ	7
2. LİTERATÜR ÖZETİ VE PROJENİN AMACI	8
2.1. MM DALGA BOYU VE THz BELİRLEME YÖNTEMLERİ VE SENSÖR YAPILARI	13
2.2. THz FREKANSLARI İLE PLAZMA ETKİLEŞİMLERİ	16
2.3. PROJENİN AMACI	20
3. DEŞARJ LAMBALARIN ZAMANA DAYALI THz ÖLÇÜM SİSTEMLERİ İLE KAREKTERİZE EDİLMESİ.....	21
3.1. ZAMANA DAYALI THz SİSTEMİN GDD LAMBALARI İÇİN DÜZENLENMESİ	23
3.2. ZAMANA DAYALI VE SÜREKLİ THz İŞİN KAYNAKLARI İLE REZONANT ETKİLERİN ARAŞTIRILMASI	26
4. YÜKSEK GÜÇ, YÜKSEK FREKANS THz ÜRETİCİNİN GELİŞTİRİLMESİ	28
4.1. 80-125 GHz ÜRETİCİ KURULUMU VE TESTLERİ	29
4.2. 260-380 GHz ÜRETİCİ KURULUMU VE TESTLERİ	32
5. MM DALGA BOYU/THz ALGILAMA ÖZELLİKLERİ VE BU DALGA BOYLARI İLE ETKİLEŞİMLERİ.....	33
5.1. DEŞARJ LAMBALARIN (GDD) MM DALGA BOYLARI/THz FREKANSLARINA OLAN DUYARLILIKLARI	36
5.2. SÜREKLİ THz İŞİN KAYNAKLARI İLE REZONANT ETKİLERİN ARAŞTIRILMASI.....	40
5.3. DEŞARJ LAMBALAR İÇİNDEN GEÇEN ATMALI THz ELEKTRİK ALANIN SİMÜLE EDİLMESİ.....	42
6. SONUÇ	44
6.1. ELDE EDİLEN BAŞARILAR VE İLERİYE DÖNÜK PROJELENDİRME	45
7. KAYNAKLAR.....	46

TABLULAR LİSTESİ

3.1. Piyasada kullanılan farklı mm dalga boyu/THz alıcı yapıları ve özellikler.....	21
5.1. Yurtdışından temin edilen farklı GDD lambaların fiziksel özellikleri	43

ŞEKİLLER LİSTESİ

2.1	Uygulanan voltaj/akım değerlerine göre oluşan plazmanın özellikleri.....	10
2.2	Anot ve Katot arası oluşan plazmanın dağılımı.....	11
2.3	Zamana Dayalı Terahertz Ölçüm Sistemi, Plazma Vakum Odacığı ve Üretilen Plazma.....	16
2.4	Plazma ortamından geçişi hesaplamak için kullanılan yapı.....	18
2.5	0.01 ile 1THz arası 10^9cm^{-3} - 10^{11}cm^{-3} arası elektron yoğunlukları için Drude modeline göre THz geçişleri.....	18
2.6	0.01 ile 1THz arası 10^{11}cm^{-3} - 10^{13}cm^{-3} arası elektron yoğunlukları için Drude modeline göre THz geçişleri.....	19
2.7	0.01-0.3THz arası DC “glow discharge” plazma THz geçişi.....	19
3.1	Ankara-Konya Sokak'taki bir elektrik malzemesi satılan dükkandan alınan GDD yapıları.....	22
3.2a	Yurt-dışından temin edilen farklı GDD'lerin anot-katot yapıları ve geometrik parametreleri.....	22
3.2b	%Yurt-dışından temin edilen farklı GDD'lerin anot-katot yapıları ve geometrik parametreleri.....	23
3.3	GDD açıkken fotoğrafı ve zamana dayalı THz ölçüm sistemi.....	24
3.4	THz-Plazma etkileşim ölçümleri için kullanılan zaman dayalı ölçüm sistemin şeması.....	24
3.5	Zamana Dayalı Ölçüm Sinyal profilleri ve Güç Spektrumları.....	25
3.6	Farklı Voltajlar için GDD Geçirgenlik-Frekans Grafiği.....	26
3.7	Yurtdışından alınan farklı GDD yapılarından geçen THz pulsların geçiş eğrileri..	27
3.8	N523 için, farklı modülasyonlarda alınan THz geçişleri.....	27

3.9	Yurtdışından alınan farklı GDD yapılarından geçen THz pulsların geçiş eğrileri.....	28
4.1	THz-Plazma etkileşim ölçümleri için kullanılan sürekli ışımaya yapan mm dalga boyu/THz sistemin şeması.....	29
4.2	Geliştirilen 80-125 GHz'te çalışan frekans kaynağının şeması.....	30
4.3	YIG kaynağı ve 80-125GHz üretici sistemi ve GDD yapısı.....	31
4.4	Akım-voltaj grafiği GDD'nin abnormal konumda çalıştığını gösteriyor.....	31
4.5	Kurulan THz Üretici şeması ve laboratuvar ortamında kurulan sistemin görüntüsü.....	32
5.1	100GHz'teki ışının kutuplaşması ile GDD elektrik alanı arasındaki açı değiştirilerek ölçümler alındı.....	33
5.2	Optik Ölçüm Sistem Fotoğrafı.....	34
5.3	GDD yapısı dönen kızağın ortasında tutan yapı.....	34
5.4	4 GDD yapısına göre aynı modülasyonda (300Hz) algılanan THz sinyal değerleri.....	35
5.5	GDD THz ışın eksenine paralel konumlandırıldığında açığa bağlı algıladığı güç lineer olarak değişmekte.....	36
5.6	GDD lambaların mm dalga boylarına duyarlılığını ölçmek için kullanılan sürekli ışık sistemin şeması.....	37
5.7	Ölçülen ticari GDD lambaları.....	38
5.8	Burada perpendicular (dik) konumunda 6 seçili GDD lamba ile değişen modülasyon frekansına göre mm dalga boylarındaki ışın gücüne karşılık ölçülen sinyal değerleri.....	38
5.9	Burada on-axis (aynı doğrultuda) konumunda 6 seçili GDD lamba ile değişen modülasyon frekansına göre mm dalga boylarındaki ışın gücüne karşılık ölçülen sinyal değerleri.....	38
5.10	En iyi iki GDD lambası için elde edilen en iyi ölçüm değerlerin karşılaştırılması...	39
5.11	Geliştirilen yükselteç devresinin farklı kısımları.....	40
5.12	Modülasyon sinyali (sarı) ve tipik olarak GDD (N527) ve yükselteç üzerinden ölçülen sinyal.....	40

5.13	Sürekli ışık sistemini şeması (264-385GHz).....	41
5.14	264-285GHz arası üretilen ışıkların N527 GDD lambası içerisinden geçişi.....	41
5.15	264-285GHz arası üretilen ışıkların N523 GDD lambası içerisinden zamana bağlı olarak geçişi.....	42
5.16	264-285GHz arası üretilen ışıkların N523 GDD lambası içerisinden farklı gerilimlerde geçişi.....	42
5.17	CST Microwave Studio kullanılarak simüle edilen GDD yapısının şekli.....	43
5.18	264-285GHz arası üretilen ışıkların N527 GDD lambası içerisinden normalize edilmemiş geçişi.....	43
5.19	264-285GHz arası üretilen ışıkların N527 GDD lambası içerisinden normalize edilmiş geçişi.....	43

ÖZET

İlk olarak 1970'lerde araştırılmaya başlanan bir konu olan deşarj lambaları kullanarak THz/milimetre dalga boyu algılama yöntemi günümüzde THz tekniklerine olan ilgi ile tekrar gündeme gelmiştir ve yakın zamanda kendi yaptığımız çalışmalar ile uluslararası alanda yoğun ilgi görmektedir. Yüksek basınçta bir gaz içinde oluşan deşarj sonucu ışımaya yapan bu lambalar, oluşan plazma sayesinde ışımaya yaparken THz dalga boylarına hassasiyet göstermektedir. Bu çalışmalar ilk olarak Prof. Dr. Natan Kopeika (Ben Gurion Üniversitesi, Nagev, İsrail) tarafından gerçekleştirilmiştir. Kendi grubumuzda yaptığımız çalışmalar da bunu desteklemektedir, dahası kurduğumuz zamana dayalı THz ölçüm sistemleri ile yapısı ile ilintili özel THz frekanslarında bu yapıların rezonant etki gösterdiğini tespit eden ilk araştırma grubuyuz. MM dalga boyu/THz algılama için kullanılan bu tip lambaların ucuz olmaları, gerek oda sıcaklığında çalışırken THz dalga boylarını yüksek hassasiyetle tespit edebilmeleri, gerekse de plazmadan geçerken bazı THz frekansların kontrol edilerek filtreleyebilmesi bu tip yapıların farklı sivil ve savunma uygulamalarında kullanabileceklerini göstermektedir.

Proje kapsamında yaptığımız çalışmalarda, deşarj lambalarında görülen bu rezonant etkilerin THz algılamadaki rolünü belirleyebilmek için ticari olarak satılan farklı lambaları hem zamana dayalı THz ölçüm sistemlerimiz ile hem de proje kapsamında geliştirdiğimiz sürekli ışımaya yapan yüksek frekans THz ölçüm sistemleri ile karakterize ettik. İki türlü ışık kaynağı geliştirildi: 80-125GHz arası ışımaya yapan, bu frekans tayfında 1GHz'lik dilimlerde 20mW ortalama güç üreten mm-dalga boyu ışın kaynağı ve 260-380GHz arası ışımaya yapan, bu frekans tayfında 1GHz'lik dilimlerde 1mW ortalama güç üreten THz ışın kaynağı. Bu ışın kaynaklarının temelinde Schottky-diyot temeline dayalı çarpan yapıları süren frekans ayarlanabilir bir YIG osilatör mikrodalga kaynağı kullanılmıştır. MM dalga boyu kaynağı için 9-14GHz arası frekansı ayarlanabilen YIG osilatör kaynağını x9 toplam çarpan Schottky diyot temelli RF bileşenler kullanıldı. THz frekanslarına ulaşmak için aynı kaynağa x3 çarpan bir Schottky temeline dayalı pasif çarpan bir diyot yapısı kullanıldı. İki sistem için frekansları hava boşluğuna taşımak için ayrı horn antenler kullanıldı. MM dalga boyu ışın kaynağı için konik bir horn anten yapısı kullanılırken, THz ışın kaynağı için piarmit horn anten yapısı kullanıldı. Dağılan ışın kaynağının Gaussiyen ışın dağılımı görünüşünü plano-konveks mercekler kullanarak topladık ve deşarj lamba yapısına odakladık. Deneylerin bir sürümünde deşarj lamba yapısını detektör olarak kullandık, diğer bir sürümünde ise içinden geçen frekansların şiddetlerini bir Golay Cell detektör yardımıyla ölçtük.

THz üretici ve deşarj lamba kullanan alıcı sistemleri geliştirdik, sonra zamana dayalı THz ölçüm sistemlerin deşarj lambalarını daha iyi karakterize edebilmeleri için optimize ettik ve THz dalga boylarının deşarj ortamındaki plazma ile etkileşimini anlamak için benzetim çalışmaları geliştirdik. Bu çalışmalar sonucu rezonant etkilerin THz algılamadaki rolünü belirleyerek bu tip yapıların THz uygulamalarında nasıl ve nerede kullanabileceklerini daha iyi anladık. Deşarj lambaları ışın algılama için kullanıldığında literatürde "Glow Discharge Detector (GDD)" olarak adlandırılmaktadır. GDD lambaları ile bu ölçümlerde şu sonuçları elde ettik:

- GDD lambaları detektör olarak hem mm dalga boyları hem de THz frekansları için ışının kutuplaşma yönüne hassas (anot-katot arası elektrik alan yönü ışın elektrik alanına paralel ya da anti paralel olduğu durumlarda algıladığı sinyal maksimum, dikay olduğu durumlarda algıladığı sinyal minimum)
- GDD lambaları hem optik eksene paralel hem de optik eksene dik konumda mm dalga boyu/THz ışınlarını algılayabiliyor
- GDD lamba detektör hassasiyeti iki frekans aralığı için neredeyse Golay Cell cihazına eşit ($nW/Hz^{-1/2}$)
- GDD lambaları detektör olarak kullanıldığında ışın kaynağına genlik modülasyon uygulamak gerekiyor ("Amplitude Modulation (AM)"); 90kHz modülasyon frekansı için algıladığı sinyal en büyük olarak ölçüldü. Ekipmanların limitasyonları nedeniyle daha yüksek modülasyon frekansları araştırılmadı, bu frekansın MHz civarı olduğunu tahmin ediyoruz
- Optimize edilen zamana dayalı THz ölçüm sistemleri ve kurulan sürekli THz ışın kaynağı sistemleri ile yaptığımız ölçümlerde anot-katot arası mesafenin belli frekansların yapıdan geçişini etkilediğini gözlemledik.
- Genel olarak ticari olarak satın alınabilen deşarj lambaların anot-katot arası mesafesinin yaklaşık olarak 1mm olması ile etkileştiği rezonant frekans tayfın 250-350GHz arası frekanslara denk düşmesi şu sonucu destekliyor: ışın ile plazmanın etkileşimini arttırmak için anot-katot arası mesafesi dalga boyu ile orantılı olmalı.
- CST Microwave Studio programını kullanarak yaptığımız ilk benzetim çalışmalarında anot-katot arası mesafeye bağlı olarak plazmanın dielektrik fonksiyonu deşarj sırasında belli frekans aralıkları için minimum geçiş gösterdi. Bu çalışmaların üzerinde yoğunlaşarak anot-katot geometrisini optimize etmeyi hedefliyoruz.

Yukarıda alınan sonuçların bir kısmı uluslararası konferansta tam makale bildiri olarak yayınlandı, diğer bir kısmı ise uluslararası (SCI-E) hakemli bir dergide yayınlandı. Projede

yapılan çalışmalar bir yüksek lisans öğrencisinin tez çalışmalarını destekledi diğeri lisans, doktora düzeydeki öğrencilerin de araştırmalarını destekledi.

Dünyada son zamanlarda yoğun ilgi ile araştırılan bariyer arkası görüntüleme sektörü için ucuz, oda sıcaklığında yüksek hassasiyetle alışan THz detektör teknolojilerin geliştirilmesi eşi benzeri olmayan bir katkı sağlayacağına inanmaktayız. Ülkemizde terör olayları ve benzeri negatif unsurlar karşısında savunma ağırlıklı tespit ve imha teknolojileri kapsamında bu tip detektörlerin önemli bir katkı sağlayacağı ortak grşndeeyiz.

Anahtar Kelimeler: Deşarj lambaları, plazma, terahertz dalga boyları, milimetre dalga boyları, foton-plazma etkileşmeleri

ABSTRACT

First started in the 1970s, which was to use glow discharge lamps to detect THz and millimeter waves has become relevant again in the international arena due to the high interest in developing THz technologies and our recent work in this area. By forming the discharge in a gas kept at high pressure between two leads the lamp generates light, meanwhile the plasma formed drives the device to be sensitive to detection of THz and/or millimeter waves. These investigations were first carried out by Prof. Dr. Natan Kopeika (Ben Gurion University, Nagev, Israel) and his team. Our investigations not only support this, but we were also the first research group to see resonant effects due to the structure of the glow discharge lamp in the THz frequency range. Their low cost coupled with the ability to detect THz waves with high sensitivity at room temperature, or the resonant effects which may point to their potential use as controllable filters shows that these devices can be used in a variety of civilian and defense applications.

In this project we investigated using both THz time-domain spectroscopy systems and continuous wave THz systems the role of resonant effects in the detection of THz waves by glow discharge lamps was investigated. Two type of sources were developed: A source emitting in the 80-125GHz spectral region with at least 20mW output power per each 1GHz band and a source emitting in the 260-280GHz spectral range with at least 1mW output power per each 1GHz band in the emission. These sources are based on Schottky-diode based multipliers driven by a frequency tunable YIG oscillator. In the mm-wave source the 9-14GHz tunable YIG oscillator was multiplied (x9) using Schottky diode based RF multipliers. The same source was multiplied by x3 passive multiplier to reach THz frequencies. In both systems horn antennas were used to carry the emission into free space. A conical horn was used for the mm-wave source and a pyramid horn was used for the THz source. The emitted beam had a Gaussian beam profile which was collimated and focused on to the discharge lamp using plano convex lenses. In one embodiment of the experiments the discharge lamp was used as a detector and in one other the transmitted waves through the lamps structure was measured using a Golay Cell.

In summary, THz emitter and detector systems based on discharge lamps were constructed and then time-domain THz systems were optimized to characterize these lamps. Furthermore to better understand the THz-wave plasma interaction simulations were performed. These investigations allowed us to better understand how the lamp detects THz waves and also helped us understand where and how to better use such devices. In the

literature discharge lamps when used for light detection are typically called Glow Discharge Detectors (GDD). Using GDD lamps these results were obtained:

- The GDD lamps when used for detection of THz and mm-waves were found to be sensitive to the direction of the impinging E-Field polarization. (When the anode-cathode electric field was parallel or antiparallel the detected signal was maximized, when perpendicular the detected signal was minimized).
- GDD lamps were able to detect mm-wave/THz radiation for when the structure was parallel and perpendicular to the optical axis.
- The GDD lamp sensitivity in direct detection was almost equal to a Golay Cell ($\text{nW/Hz}^{-1/2}$)
- When using GDD lamps as detectors one needs to modulate the source (“Amplitude Modulation (AM)”); the signal response was maximized for a modulation frequency of 90 kHz. Due to the limitations in the detection electronics the response is thought to maximize at higher modulation (MHz)
- Using optimized THz time-domain spectroscopy systems and CW THz systems we showed that the anode-cathode separation plays a role in the transmission of certain mm-wave/THz frequencies.
- Since the anode-cathode separation of commercially available discharge lamps are on the order of 1mm, the resonant frequency measured upon transmission fell into the 250-350GHz frequency range which suggests that to increase the interaction of the plasma with the far infrared light one needs to tune the separation on the order of the incoming wavelength
- Using the commercially available software CST Microwave Studio our first simulation attempts have shown that the transmission of the field decreases for certain frequencies dependent on the anode-cathode separation as well as the dielectric properties of the plasma. We hope to improve these simulations thereby allowing us to better design the anode-cathode geometry to optimize detectivity

The results as outlined above have resulted in the publication of one international conference proceeding and one international journal article (SCI-E). The research undertaken in this project directly contributed to the Masters’ thesis of one student and the studies of other doctoral, masters’ and undergraduate students.

We believe that cost effective, room temperature THz detectors will have a great impact on the development of behind the barrier (see-through) imaging systems in the world. The

development of these technologies will be most beneficial to in Turkey, who has a vested interest in developing detection and threat elimination systems with the ever continuing threat of terror related incidents in our country.

Keywords: glow discharge lamps, plasma, terahertz waves, millimeter waves, photon-plasma interactions

1. GİRİŞ

Terahertz (THz) dalga boylarına dayanan teknolojiler ve uygulamalar günümüzde yoğun ilgi ile izlenmektedir. Tarihsel olarak kaynakların ve detektörlerin geliştirilmesi zor diye adlandırılan elektromanyetik spektrumun bu bölgesinde özellikle sivil ve askeri savunma uygulamalarında kullanıcılara getirdikleri avantajlar sayesinde laboratuvarlarda geliştirilen teknolojiler hızla ilerlemektedir. Bu sistemlerin kullanımlarının önemini en iyi gösteren ticari örneklerden biri THz görüntüleme sistemleri ve bunların havaalanı güvenlik kontrol noktalarında uygulamalarıdır. Özellikle ABD'de yaygın bir şekilde kullanılan bu sistemler sayesinde hava yolculuğu daha güvenilir olmuştur. Bu sistemlerin dezavantajları sayılabilecek unsurlar arasında belki en önemli etkenlerden biri kaynak ve detektörlerin halen çok yüksek maliyetler ile üretilmeleridir. THz foton enerjileri meV mertebesinde olduğundan ve arka plan gürültü oranının (siyah cisim tayfı) yüksek olması nedeniyle, üretici ve algılamada kullanılan yapılar kompleks üretim teknikleri, ve ileri malzeme teknolojilerini gerektirmektedir ve dahası genelde kriyojenik (en az sıvı nitrojen ısılarına kadar) ortamlarda çalıştırılmaları sistem maliyetlerini daha da arttırmaktadır. Yaklaşık 50 sene önce araştırılmaya başlayan bir konu olan deşarj lambaları kullanarak THz/milimetre dalga boyu algılama yöntemi günümüzde THz uygulamalarına olan ilgi ile tekrar gündeme gelmiştir. Yüksek basınçta bir gaz içinde oluşan deşarj sonucu ışımaya yapan bu lambalar, oluşan plazma sayesinde ışımaya yaparken THz dalga boylarına hassasiyet göstermektedir. Ucuz olmaları, gerek oda sıcaklığında çalışırken THz dalga boylarını yüksek hassasiyetle tespit edebilmeleri, gerekse de plazmadan geçerken bazı THz frekansların kontrol edilerek filtrelenebilmesi bu tip yapıların farklı sivil ve savunma uygulamalarında kullanabileceklerini göstermektedir.

Bu proje çalışmasında, ilk olarak deşarj lambaların THz algılamadaki rolünü belirleyebilmek için farklı lambaları hem zamana dayalı THz ölçüm sistemlerimiz ile hem de geliştirdiğimiz sürekli ışımaya yapan yüksek frekans ölçüm sistemleri ile karakterize ettik. Tüm çalışmalar literatürdeki benzer çalışmalarda kullanılan deşarj lamba tipleri üzerinden yapılmıştır [Alasgarzade vd. 2015, Takan vd. 2016]. Bu lambalar yurtdışından temin edildikten sonra ilk olarak mevcut zamana dayalı THz spektrometre sistemlerini geliştirerek, THz dalga boylarını plazma açık ve kapalı iken nasıl geçirdikleri araştırılmıştır. Sonrasında ise kurduğumuz mm dalga boyu/THz kaynağını düşük frekanslarda (80-125GHz ve 260-380GHz) görüp görmediği araştırılmıştır. THz frekanslarında çalışan sistem ile rezonant etkiler de ayrıca araştırılmıştır.

THz dalga boylarını neden tespit edebildiği sorusunu cevaplayabilmek için ilk olarak mevcut literatür incelenerek THz ile plazmanın nasıl etkileşebileceği araştırılmıştır. Yapılan bu analizler sonucu anot-katot arası oluşan plazma elektrik alanı ile THz elektrik alanı arasındaki açığa bağlı olarak ölçüm hassasiyetinin değişebileceğini deneysel ölçümler ile doğruladık. Sonrasında geliştirdiğimiz mm dalga boyu/THz ışın kaynakları ile bu lambaların uzak kızıl ötesi ışınlarını algılayabileceğini gösterdik. Bu çalışmalar, 80-125 ve 260-380GHz arası çalışan Schottky-diyot temeline dayalı THz üretici ve deşarj lamba kullanan alıcı sistemlerin geliştirilmesine, zamana dayalı THz ölçüm sistemimizin deşarj lambalarını daha iyi karakterize edebilmesi için optimize edilmesine odaklandı. Aynı zamanda THz dalga boylarının deşarj ortamındaki plazma ile etkileşimini anlamak için hem teorik hem de benzetim çalışmaları geliştirildi. Proje kapsamında araştırma grubu çalışanları deşarj lambaların THz dalgaları ile nasıl etkileştiğini anlayabilmek için farklı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Projede hedeflenen tüm iş paketleri başarıyla tamalanmıştır. Proje kapsamında geliştirilen teknikler sayesinde birçok öğrenciye destek olunmuştur. Bu çalışmaların detayları bu raporda anlatılmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ ve PROJENİN AMACI

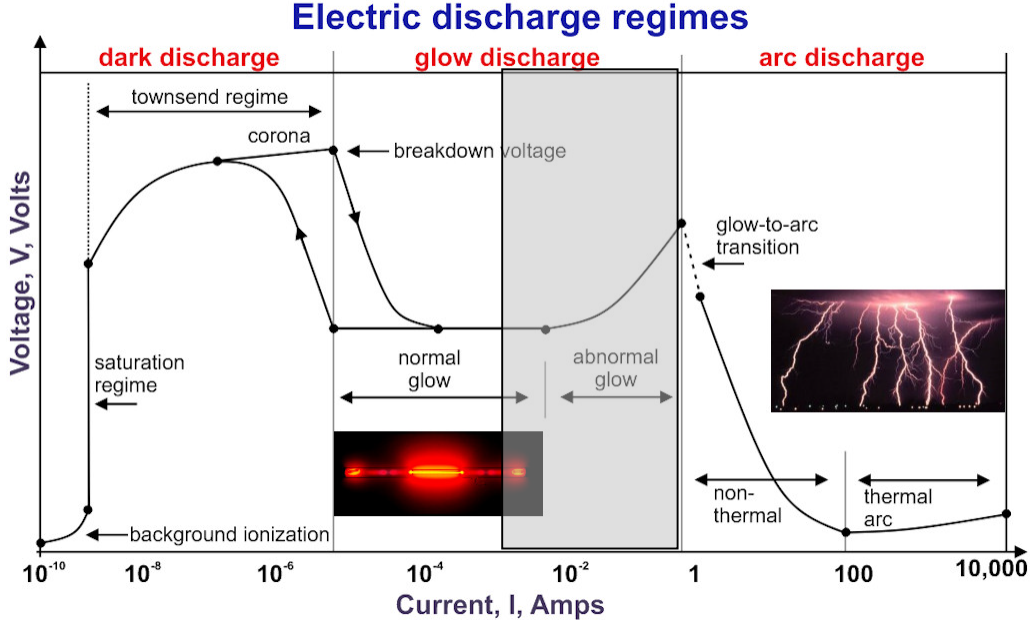
Elektromanyetik spektrumun Terahertz (THz, uzak kızılötesi) alanı, düşük enerji ile uyarlanan birçok uygulamada ve çeşitli materyallerin incelenmesinde son derece elverişlidir. Uzak mesafeden tarama, spektroskopi ve komünikasyondaki potansiyel uygulamalara rağmen, milimetre ve milimetre-altı dalga ($0,1-10 \text{ THz} = 3\text{mm}-30\mu\text{m} = 0.4\text{meV}-40\text{meV}$) boylarının üretilmesi ve belirlenmesi diğer dalga boylarına oranla az geliştirilmiş bir alandır. THz alanında çalışmalar yapan bilim insanları, çok hızlı darbe üreten lazerler ve hızla gelişen RF teknolojileri sayesinde birçok değişik uygulamaya yönelik araştırma konuları üzerinde çalışmaktadırlar. Bu çeşitli uygulamalar arasında en iyi sonuç alınan yöntemler atmalı THz spektroskop sistemlerinin [Auston vd. 1984, Auston vd. 1988, Zhang vd. 1992, Brener vd. 1996] ve görüntüleme sistemlerin geliştirilmesi ve bunların yalıtkan ve yarı-iletken malzemelerdeki uygulamaları olmuştur [Hu vd. 1995, Wu vd. 1996, Nahata vd. 2002, Mittleman vd. 1996]. Atmalı THz spektroskop sistemlerinde üretilen pikosaniye uzunluklardaki THz darbeleri sayesinde bilim insanları hem maddelerin gerçek ve sanal dielektrik katsayılarını anında ölçebilir hem de madde içi dinamik gelişen olayları daha iyi anlayabilmektedirler. THz fotonların enerjileri bir kaç meV olduğundan, sadece yarı-iletken değil canlı ve cansız dokularda ve kimyevi/biyolojik maddelerde de dinamik ölçümler gerçekleştirilebilir.

İlk olarak 1970'lerde araştırılmaya başlayan bir konu olan deşarj lambaları kullanarak THz/milimetre dalga boyu algılama yöntemi günümüzde THz tekniklerine olan ilgi ile tekrar

gündeme gelmiştir ve yakın zamanda kendi yaptığımız çalışmalar ile uluslararası alanda yoğun ilgi görmektedir. Yüksek basınçta bir gaz içinde oluşan deşarj sonucu ışımaya yapan bu düşük maliyetteki lambalar (~1TL/adet), oluşan plazma sayesinde ışımaya yaparken THz dalga boylarına hassasiyet göstermektedir. Bugüne kadar yaptığımız ölçümlerde bu lambaların THz algılamada kullanabileceklerini doğrulamakla beraber [Çınar vd. 2013], kurduğumuz zamana dayalı THz ölçüm sistemleri ile anot-katot yapısı ile ilintili bazı THz frekanslarında rezonans etkilerin oluştuğunu gösterebildik [Çınar vd. 2013a]. Bu proje çalışmasında, deşarj lambalarında görülen bu rezonans etkilerin THz algılamadaki rolünü belirleyebilmek için farklı lambaları hem zamana dayalı THz ölçüm sistemlerimiz ile hem de geliştireceğimiz sürekli ışımaya yapan yüksek frekans ölçüm sistemleri ile karakterize ettik.

THz görüntüleme uygulamalarına duyulan yoğun ilgi nedeniyle mühendisler hem terahertz (300GHz-10THz) hem de milimetre (30-300GHz) dalga boylarında çalışan hassas algılayıcılar ve güçlü üreticiler geliştirmeye çalışıyorlar. Terahertz fotonların düşük enerjisi ve güneşten gelen arka plan gürültü oranı nedeniyle homodin veya heterodin ölçüm tekniklerine dayalı yeni yöntemler geliştiriliyor. Bu tip sistemlerde gürültü oranları arka plan gürültü oranlarına nazaran çok daha düşük olmakla beraber sistem maliyetleri halen çok yüksek olduğu için ticari olarak bu tip sistemleri geliştirmek üreticiler ve bu alanda çalışan araştırmacılar için halen çekici gelmiyor [Brown (2003)]. Hem hassas hem de ucuz sistemler geliştirebilmek için mühendisler ve araştırmacılar geçmişte mikrodalga/RF yöntemlerinde kullanılan tekniklere yöneliyor. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri mikrodalga DRO (Dielectric Resonator Oscillator) kaynakları ile sürülen Schottky diyot temeline dayalı algılayıcı ve üretici yapıların görüntüleme sistemlerinde kullanımlarıdır [Siegel (2002)]. Bu aygıtlar ile oda sıcaklığında çalışan hassas ölçüm sistemleri geliştirildi yalnız toplam sistem maliyetleri halen yüksek olduğundan ve ortam ısı gibi etkilere duyarlı olduğundan farklı yöntemler halen yoğun bir ilgi ile araştırılmaktadır. Bu yöntemler arasında maliyet açısından en düşük, ama algılama hassasiyeti açısından Schottky temeline dayalı diyot yapılar gibi tepki veren bir aygıt, deşarj lambaları olmuştur.

Genelde elektrikçilerde bulunan kontrol kalemleri gibi yüksek gerilim altında tepki veren aygıtlarda kullanılan bu tip lambaların (Glow Discharge Detector = GDD) noktasal THz detektör olarak kullanabilecekleri önceden gösterilmiştir [Rozban vd. (2008)]. Bu lambalar içinde oluşan plazmalara parıltılı deşarj "glow discharge" denilmektedir. Bu plazmaları oluşturmak için katot ve anot arasında ya voltaj ya da akım uygulanır. Uygulanan voltaj ve akım'a göre plazma farklı davranır, bir bakıma direnci çizgisel olarak değişmez. Genel olarak aşağıdaki şekilde DC deşarj plazmaları için bu gösterilmektedir:

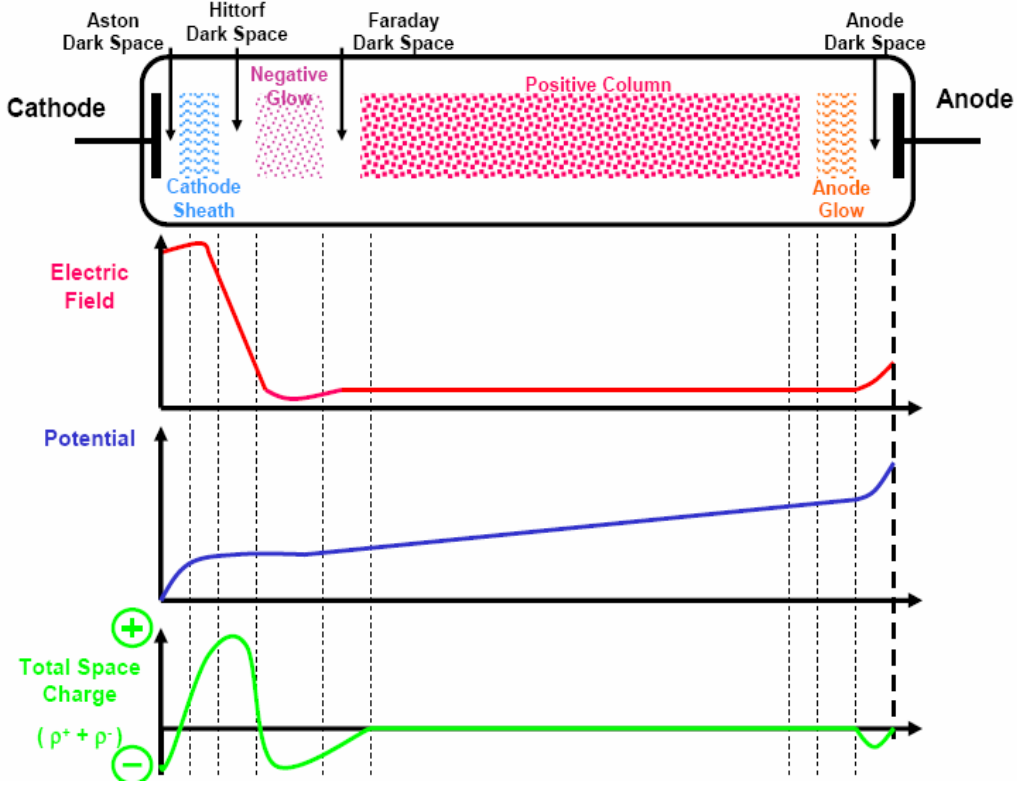


Şekil 2.1. Uygulanan voltaj/akım değerlerine göre oluşan plazmanın özellikleri. GDD lambaları kullanarak mm dalga boyu/THz algılaması en iyi “abnormal glow” ortamında gerçekleştiği anlaşılıyor. Burada plazma ortamı ark oluşması öncesi en yüksek iyon elektron yoğunluğuna sahip ve böylelikle bu elektromanyetik frekans aralığındaki ölçüm hassasiyeti maksimum oluyor.

Bu tip aygıtlar THz görüntüleme uygulamaları açısından son derece ilgi çekicidir, çünkü hem oda sıcaklığında çalışabilmektedir hem de kompakt oldukları için dizi halinde bir alana entegre edilerek FPA (Focal Plane Array) tipi yapılar oluşturulabilir. THz algılama yöntemi aygıt içerisindeki anot-katot arası deşarj sonrası oluşan plazmaya bağlıdır. GDD yapısında oluşan plazma aynı zamanda görünür bölgede (visible spectrum) ışımaya yapabilmektedir, bu nedenle deşarj lambası diye de adlandırılmaktadır.

Plazmaları karakterize etmek için farklı teknikler kullanılmaktadır, örneğin Langmuir probe [Hopwood vd. (1993)], optical emission spectroscopy [Griem (1964)], microwave probe [Heald ve Wharton (1965)], ve Thomson scattering [Gurevich ve Podmoshenkii (1963), Kruschelnick vd. (1997)]. Son zamanlarda THz tekniklerinde plazma çalışmalarında plazmanın nitelikleri öğrenmek amacıyla kullanıldığı görülmektedir [Kolner vd. (2008), Ebbinghaus vd. (2006), Jamison vd. (2003), Kolner vd. (2005), Hangyo vd. (2007)]. Drude elektron iletkenlik teorisine baktığımızda bir maddenin dielektrik fonksiyonu hem plazma frekansı hem de elektron arası çarpışma zamanlarına bağlı olarak değiştiğini görüyoruz. Bu zamanların THz alanına yakınlığı sayesinde bu değişimlerin atmalı THz sistemi ile gözlemlenmesi mümkün olmaktadır. DC kaynak kullanılarak üretilen plazmaların elektron yoğunluğu 10^6 - 10^8 cm⁻³ arası değişirken, RF yöntemler ile üretilen plazmaların yoğunlukları 10^8 - 10^{14} cm⁻³ arası değişmektedir. Bu geniş elektron yoğunluğu için plazma frekansı 107-1011Hz arası yer almasına rağmen, DC yöntemler ile üretilen plazmaların düşük elektron yoğunluğu nedeniyle

Drude teorisine göre THz darbelerin plazma içindeki geçişlerinin etkilenmemesini beklerken, tam tersine GDD gibi yapılarda oluşan bu düşük yoğunluktaki plazmalar ile etkilendiğini görüyoruz. DC “Glow Discharge” Plazma Yapısı:



Şekil 2.2. Yukarıda Anot ve Katot arası oluşan plazmanın dağılımı gösterilmektedir. Burada önemli olan iki bölge vardır: 1. Negative Glow-Burası plazmadan gelen görünür ışığın en yoğun olduğu bölgedir ve elektron ısı yüksek olmasına rağmen elektron yoğunluğu düşüktür. 2. Positive Column-Bu bölge nötr plazmanın olduğu bölgedir ve elektron yoğunluğu (ve iyon yoğunluğu) en yüksek alandır. Görünür ışık yayılımı bakımından zayıftır ve bu bölge gözümüze karanlık görünür.

Yukarıda gösterilen DC “Glow Discharge” plazmalar genelde soğuk plazmalar olarak bilinir, çünkü elektron ısıları çok düşüktür. Ek olarak bu tip plazmalarda sadece elektrik alanı uygulandığından elektron yoğunlukları önceden bahsedildiği gibi oldukça düşüktür. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar bu etkileşimin nedenini THz alanının plazma içindeki elektronlar arası çarpışma ve iyonizasyon hızlarının artmasına neden olması ve böylelikle plazma ortamına enerjisini vererek plazmadan geçen akımda farklılık yaratmasına bağlamıştır [Kopeika ve Farhat (1975)]. Bu etkileşimi daha iyi anlamak için plazma ortamındaki kuvvetleri anlatan Langevin denklemleri ile etkileşim daha iyi anlaşılabilir:

$$m \frac{dv}{dt} + \nu m v = qE \quad (1)$$

burada m akım taşıyan yüklerin kütlesi, v ortalama hareket hızları, ν , elektron-nötür atom çarpışma frekansı ve q yüklerini göstermektedir. Genelde akım elektronlar tarafından oluşmaktadır. Uygulanan THz/RF elektrik alanından elde edilen Δv değişken hız ile:

$$m \frac{d\Delta v}{dt} + \nu m \Delta v = qE \quad (2)$$

Uygulanan THz elektrik alanı,

$$\mathbf{E}_x = E_o \exp(j\omega t) \hat{x} \quad (3)$$

sonucu yüklerin hızları için şu çözüme ulaşılır:

$$\Delta v_x = \frac{q}{m} \frac{E_o}{(\nu + j\omega)} [\exp(j\omega t) - \exp(-\nu t)] \hat{x}$$

$$\Delta v_x = \frac{q}{m} \left(\frac{\nu - j\omega}{\nu^2 + \omega^2} \right) \left[1 - \exp(-\nu t - j\omega t) \right] \mathbf{E}_x \quad (4)$$

Ortalama elektron yoğunluğu (n) ile akımdaki ortalama net artış şöyle verilmektedir:

$$\Delta \mathbf{J}_x = nq \Delta v_x$$

$$\Delta \mathbf{J}_x = \frac{nq^2}{m} \left(\frac{\nu - j\omega}{\nu^2 + \omega^2} \right) \left[1 - \exp(-\nu t - j\omega t) \right] \mathbf{E}_x \quad (5)$$

Parıltılı ışıma yapan durağan plazma ortamları iki gruba ayrılmaktadır: “normal glow” ve “abnormal glow”. Anormal glow’da uygulanan akım veya voltaj ile plazma içinden geçen voltaj veya akım arasında doğrusal bir ilişki vardır. Yapılan ölçümlerde, GDD yapısı özellikle bu konumda (anormal glow) iken THz dalga boylarını algıladığı gözlemlenmiştir. Bu konumda iken uygulanan THz ışının plazma içerisindeki akımı değiştirdiği gözlemlenmiştir [Kopeika ve Farhat (1975), Kopeika (1984)]. Akım değişimin nedeni THz ışınların doğrudan elektronları ısıtması, yani elektron ısısının artması ve yavaş hareket eden elektronları anotta iterek akımda farklılık yaratmasına bağlanmıştır. Yukarıda denklemini (5) bu iyonizasyon sonucu yük yoğunluğundaki değişim ile gösterilebilir [Kopeika ve Farhat (1975)]:

$$\Delta J \simeq \frac{e^2 \eta_0 M \nabla n P_D}{3km^2(\omega^2 + \nu^2)} \cdot \quad (6)$$

burada, e , electron yükü; η_0 , boş uzay direnci; M , gaz molekül kütlesi; n , elektron yoğunluğu; PD , detektördeki THz ışın gücü; k , Boltzmann sabiti; m , elektron kütlesi; ω , açısal frekans; ve ν , elektron-nötür atom çarpışma frekansı. Ek olarak plazmadaki akımın değişimi THz ışınların plazma içerisindeki iyonizasyon potansiyelini doğrudan düşürerek iyonizasyon miktarını arttırmasına da bağlanabilir. Bu etkinin hem anot hem de katot bölgelerinde efektif olması beklenilmektedir [Kopeika ve Farhat (1975)]:

$$\Delta V_s = \frac{eE_0^2 d^2}{2V_i \mu_e m} \frac{\nu}{\nu^2 + \omega^2} \quad (7)$$

burada, E_0 , THz alan genişliği; d , anot ve katot bölgelerin “glow discharge” konumunda mesafeleri; V_i , gazın iyonizasyon potansiyeli ve μ_e , elektron mobilitesidir. Ek olarak, son zamanlarda yapılan ölçümler GDD ve THz elektrik alanı arasındaki etkileşimin THz kutuplaşması ile GDD elektrik alanı arasındaki açıya bağlı olarak değiştiğini gösterdi. Bu ölçümlerde paralel konumda iken (aralarındaki açı sıfır derece), akımdaki değişkenlik maksimum olup birbirine dik iken (aralarındaki açı 90 derece) değişkenliğin minimum değere düştüğü gözlemlendi [Abramovich vd. (2009)].

Yukarıdaki yapılan analizlerden ilk olarak şu sonuç ortaya çıkmaktadır: Parıltılı deşarj plazma yapısı elektron yoğunluğuna denk gelen plazma frekansının THz frekansının çok altında olmasına rağmen THz dalga boyları ile etkileşebildiğidir. İkincisi, plazma içi elektrik alanı ile aynı doğrultuda olan THz elektrik alanı için etkileşim daha fazla olmalıdır.

2.1. MM dalga boyu ve THz belirleme yöntemleri ve sensör yapıları

Mm dalga boyu/THz ışın gücü seviyesi arka plan gürültü alanına yaklaştığı an iki tip CW ışın algılayabilen detektör yöntemi tasarlanabilir:

- Doğrudan belirleme (Video Rx)
- Heterodin belirleme (Rektifiye eden Rx)

Direkt ölçüm alıcılar ile arka plan termal etkiyi detektörün frekansa duyarlılığı, görüş sahasının genişliği, belirleme öncesi optik filtreler ve belirleme öncesi kip-duyarlı antenler ile kısıtlayabiliriz. Heterodin ölçümde ise termale etkiyi IF algılayarak limitleriz.

Geniş bant ölçümleri için direkt (video) ölçüm yapabilen detektörlerin kullanımı daha uygundur (bunlar genelde soğutulmuş ve optik fitleler sayesinde arka plan gürültü oranı zayıflatılmış olarak çalışmaktadırlar).

Direkt ölçüm ve yükseltme aşamalarının getireceği gürültü oranına karşın heterodin tekniğinin en önemli avantajı, bu sistemde beklenen sinyal seviyesi gibi, çok düşük seviyedeki ve dar frekans aralığında çıkan sinyallerin uzun ölçüm zamanları olmaksızın sağlıklı bir biçimde ölçümleridir.

Minimum sinyal seviyesine erişebilmek için ya da minimum ısısal farkı yakalayabilmek için detektördeki ölçüm zamanı sistem gürültü ısısının karesi ile orantılıdır. Bu nedenle tüm sinyal dışı gürültü kaynaklarını minimize etmemiz gerekmektedir.

150GHz üstü frekanslarda detektör öncesi sinyalin yükseltilmesi (detektör sonrası sinyaller daha rahatlıkla yükseltilebilir) halen kolaylıkla yapılamadığından, heterodin ölçüm yeteneği ile bu yüksek frekans çok daha düşük bir frekansa getirebiliriz. Frekans karışımı etkisi ile 1-30GHz arası aralıktaki düşük frekanslara çevrilmesi (IF) tercih edilmektedir (Yalnız 100GHz civarı detektör öncesi yükselteçlerin kullanımları halen güvenilir değildir).

Mikser kısmı genelde çizgisel olmayan bir element ile gerçekleştirilir. Bunlar Schottky diyotu, hızlı bolometre ya da "tunnel junction" diyotu gibi olabilir. Ve sonuçta bu element akım ya da gerilim şalteri gibi hareket eder ve Fourier bileşenleri çıkan IF sinyali için optimize edilmiştir.

Schottky diyot temeline dayanan heterodin sistemlerinin en büyük avantajı çok geniş bir güç aralığında ("dynamic range") ölçüm yapabilmeleridir. Pikowatt ile milliwatt arası sinyal güçleri bu tip detektörlerle ölçülebilir. Bu tip geniş bir ölçüm aralığının olması özellikle tespit/görüntüleme sistemleri için (soğurma ve saçılma bu tip uygulamalar için sistem performansını fazlasıyla etkileyen nedenler olduğu için) önemli bir unsurdur. Heterodin ölçüm tekniğinin bir başka avantajları ise çok dar bantları filtreleyebilmesi, RF sinyalinden gelen gen ve faz bilgilerin IF' de kalması ve geniş bir ölçüm aralığı arasında sinyal güçlerini doğrusal algılayabilmesidir.

Alıcıları belirlemek için belirlemedeki gürültü oranı, çalışma ortamı ısı, büyüklüğü ve maliyeti gibi önemli unsurları ele almak gerekmektedir. Bunlar aşağıdaki tablo'da gösterilmiştir (Tablo 1).

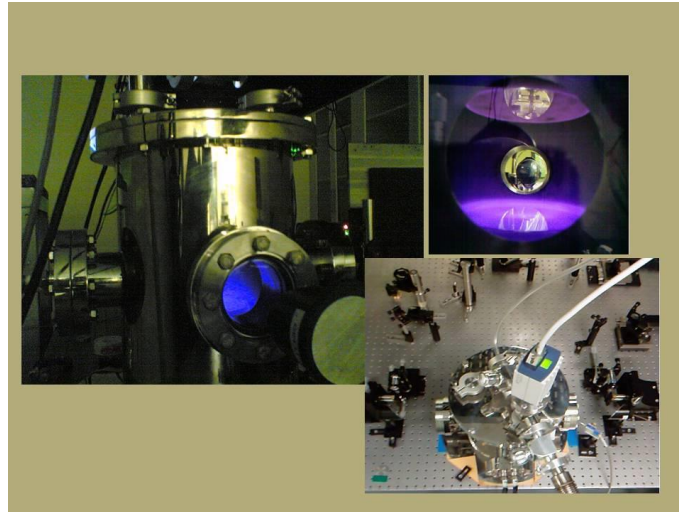
Tür	Detaylar	Örnek Giriş Frekans	Gürültü oranı (NEP)	Hacim	Fiyatı
Nb Microbridge Bolometre (T = 4K)	Direkt Ölçüm	100 GHz - 1 THz arası	$4 \cdot 10^{-13} W / Hz^{0.5}$	Silindirik yapı: 30cm – 50cm yükseklik, 30 – 60 cm çapı	20000 USD–50000 USD arası değişebilir
Nb Microbridge Bolometre (T = 300K)	Direkt Ölçüm	100 GHz	$1 \cdot 10^{-11} W / Hz^{0.5}$	Silindirik yapı: 30cm – 50cm yükseklik, 30 – 60 cm çapı	20000 USD–50000 USD arası değişebilir
Transition Edge Süper iletken bolometre (T = 0.3K)	Direkt Ölçüm	200 GHz – 300 GHz arası	$< 1 \cdot 10^{-16} W / Hz^{0.5}$	Silindirik yapı: 30cm – 50cm yükseklik, 30 – 60 cm çapı	20000 USD–50000 USD arası değişebilir
Schottky Diyot	Direkt Ölçüm	600 GHz – 1 THz arası	$3 \cdot 10^{-9} W / Hz^{0.5}$	Kompakt, horn çıkışı ile beraber 0,1 m ³ alandan daha az bir alana sığabilecek büyüklükte	5K USD - 20 K USD arası çıkış frekansına ve frekansın çalışma zamanına karşı sabitliğine göre fiyatı değişebilir.
Schottky Diyot	Heterodin	500 GHz	$4 \cdot 10^{-15} W / Hz^{0.5}$	Kompakt, horn çıkışı ile beraber 0,1 m ³ alandan daha az bir alana sığabilecek büyüklükte	5K USD - 20 K USD arası çıkış frekansına ve frekansın çalışma zamanına karşı sabitliğine göre fiyatı değişebilir.
Golay Cell	Direkt Ölçüm	100 GHz – 1THz arası	$1 \cdot 10^{-10} W / Hz^{0.5}$	Kompakt, 0,1 m ³ alandan daha az bir alana sığabilecek büyüklükte	10 K – 15K USD arası değişebilir.

Tablo 2.1. Piyasada kullanılan farklı mm dalga boyu/THz alıcı yapıları ve özellikleri

Yukarıda görüldüğü gibi bu alıcılar arasında düşük sinyal seviyelerini hassas okuyabilen detektörler oda sıcaklığında değil helyum ile soğutulmuş olarak çalışmaktadır. Bu tip sistemlerde ek olarak bolometre önündeki optik ve filtrelerinde soğutulması gerekmektedir. Oda sıcaklığında çalışan ve sinyal hassasiyeti bolometreye yakın olan tek cihaz heterodin ölçüm için tasarlanmış Schottky diyot çirpıcılar olarak karşımıza çıkıyor. GDD lambaları Schottky diyot yapıların direkt algılamadaki hassas ölçüm performansını çok daha ucuz maliyete sunabiliyor.

2.2. THz frekansları ile plazma etkileşimleri

Son yıllarda laboratuvarımızda geliştirdiğimiz THz ölçüm teknikleri sayesinde plazmaya hiç değmeden parametrelerini (elektron yoğunluğu gibi) karakterize etmeye çalışıyoruz. DC yöntemler ile üretilen plazmaların düşük elektron yoğunluğu nedeniyle Drude teorisine göre THz atmalarının plazma içindeki geçişlerinin etkilenmeyeceği düşünülmektedir. İlk olarak laboratuvarımızda kurduğumuz sistemler ile vakum odacığı içinde anot-katot arası 4-5cm mesafelerde ürettiğimiz DC deşarj plazmalarda THz geçişlerin etkilenmediğini gözlemledik, yani bir şekilde plazma frekansın çok üstünde olduğumuz için THz dalga boylarının hiç etkilenmeden geçtiğini doğrulamış olduk.



Şekil 2.3. Zamana Dayalı Terahertz Ölçüm Sistemi, Plazma Vakum Odacığı ve Üretilen Plazma. Bu çalışmada 800nm dalga boyu çıkışlı, Ti: Yakut kılitleli lazer kullanarak 0.01-1.5THz bant genişliğine sahip atmalı THz spektroskop sistemi kullanıldı.

Yukarıda gösterilen DC “Glow Discharge” plazmalar genelde soğuk plazmalar olarak bilinir, çünkü elektron ısıları çok düşüktür. Ek olarak bu tip plazmalarda sadece elektrik alanı uygulandığından elektron yoğunlukları önceden bahsedildiği gibi oldukça düşüktür. Örnek

olarak manyetik alanın uygulandığı ve elektronların hapsedildiği plazmalarda elektron ısı daha yüksektir ve literatürde bu plazmaların sıcak plazmalar olarak adlandırıldığını görüyoruz. Literatüre bakıldığında bu tip soğuk plazmaların Drude teorisine göre incelendiğini görüyoruz. Drude teorisine göre bağımsız elektronların olduğu bir ortamda sanal dielektrik fonksiyonu:

$$\frac{\tilde{\epsilon}}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\gamma_p} \quad (8)$$

Burada frekansa bağlı dielektrik fonksiyonunun, dalga boyu frekansı (ω), plazma frekansı (ω_p), yüksek frekansta dielektrik katsayısı (ϵ_0) ve saçılma frekansına (γ_p) bağlı olduğunu görmekteyiz. Buradan plazmanın kompleks kırılma indisi:

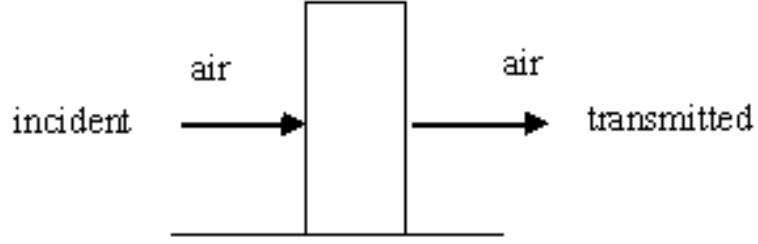
$$n = \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}(\omega)}{\epsilon_0}} = \eta + i\kappa \quad (9)$$

Real ve sanal kısımlarını çıkartabilmekteyiz:

$$\eta = \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_p^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_p^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_p^2} \frac{\gamma_p}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

$$\kappa = \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_p^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_p^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_p^2} \frac{\gamma_p}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (10)$$

Yukarıda belirttiğimiz gibi THz atmalar sayesinde maddenin (plazmanın) kırılma indisini deneysel olarak ölçebileceğimiz için bu modele göre deneysel sonuçlarımızı incelediğimiz an plazmanın plazma frekansını ve saçılım frekansları hakkında bir değer çıkarta bilebiliriz. Yalnız önceden de bahsedildiği gibi bu modele bakıldığında THz frekanslarında DC “glow discharge” plazmaları için plazma içerisinden atma geçişlerinden hiç bir değişiklik gözlemlememiz gerekiyor. Bu modele göre beklenen sonuç aşağıda gösterilmektedir. Fresnel geçiş ve yansıma katsayılarından yola çıkarak plazmayı aşağıdaki gibi modelleyebiliriz:

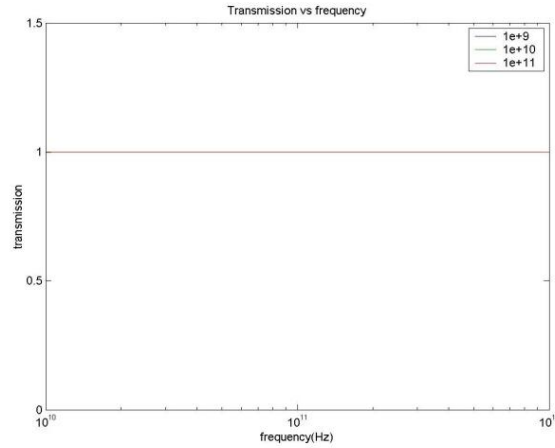


Şekil 2.4. Plazma ortamından geçişi hesaplamak için kullanılan yapı

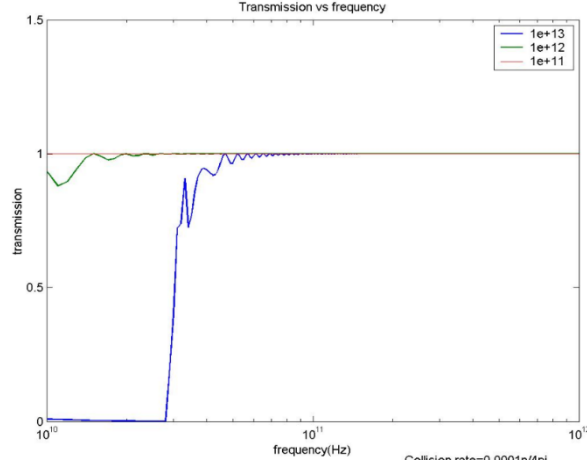
Dikdörtgen plazma kolonunu göstermektedir. THz atımları önce havadan sonra plazma içerisinde geçtikten sonra yine hava tabakasına geçerler. Bu durumda plazmaya dik THz geçiş katsayısı:

$$T = \frac{16n^2}{(n+1)^4 + (n-1)^4 - (n^2-1)^2 2 \cos 2\phi} \quad (11)$$

Burada, n , plazmanın kompleks kırılma indisi, ve ϕ , plazma içinden geçerken kalınlığına bağlı olarak oluşan faz farkı. Bu modele göre frekansa bağlı THz geçişleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir:

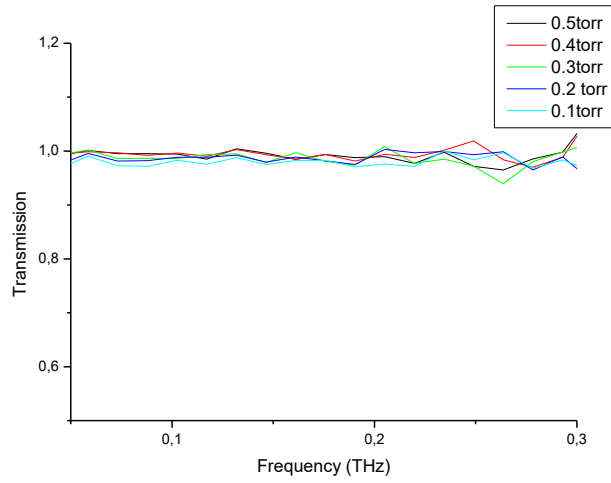


Şekil 2.5. 0.01 ile 1THz arası 10^9cm^{-3} - 10^{11}cm^{-3} arası elektron yoğunlukları için Drude modeline göre THz geçişleri. Burada saçılma frekansı plazma frekansının %1 olarak alınmıştır (Genelde soğuk plazmalarda elektronlar arası çarpışmaların düşük olduğundan bu saçılma frekansın çok düşük olduğu düşünülmektedir).



Şekil 2.6. 0.01 ile 1THz arası 10^{11}cm^{-3} - 10^{13}cm^{-3} arası elektron yoğunlukları için Drude modeline göre THz geçişleri. Burada saçılma frekansı plazma frekansının %1 olarak alınmıştır (Genelde soğuk plazmalarda elektronlar arası çarpışmaların düşük olduğundan bu saçılma frekansın çok düşük olduğu düşünülmektedir).

Drude modeline göre DC “gas discharge” plazma için THz geçişinin etkilenemeyeceğini görmekteyiz (Şekil 2.5). Yaptığımız deneylerde bunun doğru olduğunu gözlemledik. Yaptığımız örnek bir ölçüm aşağıda verilmiştir:



Şekil 2.7. 0.01-0.3THz arası DC “glow discharge” plazma THz geçişi. Ölçümler farklı basınçlar altında, atmosfer ortamında alınmıştır. Burada basınç arttıkça “positive column” içerisindeki elektron yoğunluğunun artması beklenmektedir (Şekil 2.2).

Sonuç olarak, bu gaz içerisindeki düşük elektron-iyon yoğunluğundan dolayı THz ışın elektrik alanı plazma ile etkileşmemektedir. Ancak geçerken THz elektrik alanın kendisi elektronları sallandırarak etkileşebileceği yönünde bazı bulgular tespit ettik, GDD tipi lambalarda bunun daha çok önem kazandığını düşünmekteyiz. Aşağıda anlatılan ve proje kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve alınan sonuçlar bunu desteklemektedir.

2.3. Projenin Amacı

Proje çalışması, deşarj lambaların THz dalga boyu aralığında görülen rezonans frekans noktalarında algılama özelliklerinin incelenmesini amaçlamaktadır. Yapılması planlanan çalışmalar, deşarj lamba içerisinde oluşan plazmanın THz dalga boyları ile etkileşimini daha iyi anlamamızı sağlamakla beraber bu tip aygıtların THz uygulamaları açısından son derece önemli olan oda sıcaklığında çalışan, ucuz ve kompakt görüntüleme sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir katkı sağlaması beklenilmektedir. Proje çalışmasında, bu tip aygıtların THz algılamadaki optimum parametrelerinin belirlenmesi, plazmanın THz dalga boyları üzerindeki etkisini daha iyi anlamamızı sağlayacaktır. Güncel proje çıktıları üç ana gruba ayrılabilir:

Deşarj Lambaların Zamana Dayalı THz Ölçüm Sistemleri ile Karakterize edilmesi: Deşarj Lambaları (GDL/GDD = Glow Discharge Lamp/Detector) ODTÜ'de mevcut kurulu zamana dayalı-THz ölçüm sistemlerinde, deşarj içerisinde plazma elektrik alanı ile THz atımların kutuplaşma yönü arasındaki açı 0-180 derece arası değiştirilerek karakterize edildi. Ek olarak anormal parlama bölgesinde GDD yapısına verilen gerilim değiştirilerek THz dalga boyu aralığındaki rezonans bölgenin özellikleri incelendi. Bu çalışmalar projede başarıyla gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlara göre GDD lambaları detektör olarak hem mm dalga boyları hem de THz frekansları için ışının kutuplaşma yönüne hassas algılayabilmektedir (anot-katot arası elektrik alan yönü ışın elektrik alanına paralel ya da anti paralel olduğu durumlarda algıladığı sinyal maksimum, dikey olduğu durumlarda algıladığı sinyal minimum).

Anot-Katot arası Mesafenin Görülen Rezonans Üzerindeki Etkisi: Anot-katot arası mesafenin farklı mm dalga boyu/THz frekansları ile etkileştiği düşünülmektedir. Anot-katot arası mesafelerde deşarjlar temin edilerek laboratuvarımızda önceden geliştirdiğimiz zamana dayalı THz ölçüm sistemleri ve proje kapsamında geliştirdiğimiz sürekli ışın kaynakları ile karakterize edildi. Özellikle uzun THz dalga boylarında görülen rezonans etkisi ile anot-katot arası mesafe arasındaki ilişkinin temeli ve THz atımların plazma içinden geçen akım üzerindeki etkisi araştırıldı. THz atım içinde pik elektrik alan gücü, GDD içerisinde anot-katot arası belirlenen mesafeler için modellendi. Ve aygıt üzerinde uygulanan farklı gerilimler için bu etkinin nasıl değiştiği araştırıldı. Bu çalışmalar projede başarıyla gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen zamana dayalı THz ölçüm sistemleri ve kurulan sürekli THz ışın kaynağı sistemleri ile yaptığımız ölçümlerde anot-katot arası mesafenin belli frekansların yapıdan geçişini etkilediğini gözlemledik. Genel olarak ticari olarak satın alınabilen deşarj lambaların anot-katot arası mesafesinin yaklaşık olarak 1mm olması ile etkileştiği rezonant frekans tayfın 250-350GHz arası frekanslara denk düşmesi şu sonucu destekliyor: ışın ile plazmanın etkileşimini arttırmak

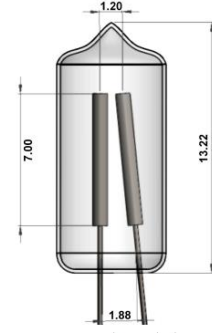
için anot-katot arası mesafesi dalga boyu ile orantılı olmalı. CST Microwave Studio programını kullanarak yaptığımız ilk benzetim çalışmalarında anot-katot arası mesafeye bağlı olarak plazmanın dielektrik fonksiyonu deşarj sırasında belli frekans aralıkları için minimum geçiş gösterdi. Bu çalışmaların üzerinde yoğunlaşarak anot-katot geometrisini optimize etmeyi hedefliyoruz.

Yüksek Güç, Yüksek Frekans THz Üreticinin Geliştirilmesi: <20GHz frekans ayarlanabilir mikrodalga rezonatör/YIG osilatör kaynağını uygun dalga kılavuzu ara birimleri sayesinde Schottky-diyot yapıları kullanarak milimetre-altı ve THz dalga boyları frekanslarına rektifiye ederek (80-125GHz ve 260-380GHz), yüksek frekansta çalışan, bu frekans aralığında 1GHz hassasiyetle ayarlanabilen ve 1mW'dan fazla güç üreten bir kaynak geliştirildi. Zamana dayalı ölçüm sistemleri ile karakterize edilen deşarj lambaları, geliştirilen bu kaynak ile test edildi. Ölçümlerde lambaların frekansa göre hassasiyetleri araştırıldı. Özellikle rezonans bölgesindeki hassasiyet diğer frekans aralıkları ile karşılaştırılarak bu tip aygıtların görüntüleme uygulamaları için potansiyeli değerlendirildi. Bu çalışmalar başarıyla gerçekleştirildi. GDD lamba detektör hassasiyeti iki frekans aralığı için neredeyse Golay Cell cihazına eşit ($nW/Hz^{-1/2}$) olduğunu tespit ettik. Aynı zamanda GDD lambaları detektör olarak kullanıldığında, 90kHz modülasyon frekansı için algıladığı sinyal en büyük olarak ölçüldü. Ekipmanların limitasyonları nedeniyle daha yüksek modülasyon frekansları araştırılmadı, bu frekansın MHz civarı olduğunu tahmin ediyoruz

Yukarıda sıralanan bu çalışmaların detayları bu raporda anlatılmaktadır.

3. DEŞARJ LAMBALARIN ZAMANA DAYALI THz ÖLÇÜM SİSTEMLERİ İLE KAREKTERİZE EDİLMESİ

Yukarıdaki yapılan analizlerden ilk olarak şu sonuç ortaya çıkmaktadır: Parıltılı deşarj plazma yapısı elektron yoğunluğuna denk gelen plazma frekansının THz frekansının çok altında olmasına rağmen THz dalga boyları ile etkileşebildiğidir. Drude modeli statik bir sistemin uzak kızıl ötesi dalga boylarına tepkisini açıklayabilirken, plazma frekansı düşük olan bir plazma ortamın bu dalga boyları ile etkileşimini anlatamamaktadır, çünkü plazmanın ısınması ve iyonizasyon artışı gibi unsurları ele almamaktadır. GDD'lerin THz dalga boylarını algılanabildiğini ilk olarak gösteren çalışma, proje danışmamız, Prof. Dr. Natan Kopeika tarafından yapıldı [Kopeika ve Ferhat (1975)]. Bu etkileri daha iyi anlayabilmek için laboratuvarlarımızda mevcut sistemlerimiz ile deneyler geliştirdik. Ankara'da Konya Sokak'ta bulunan elektrik malzemesi satan dükkânlardan GDD yapıları satın alındı:

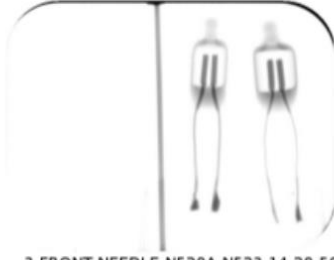
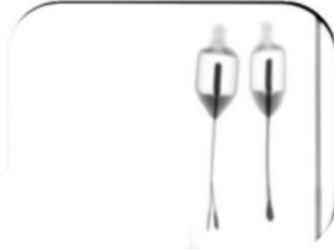
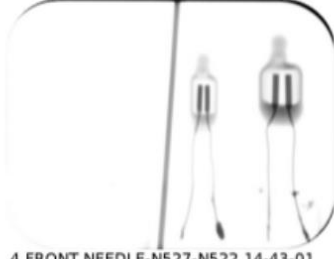



Şekil 3.1. Ankara-Konya Sokak'taki bir elektrik malzemesi satılan dükkandan alınan GDD yapıları

Buna ek olarak Prof. Dr. Natan Kopeika ve ekibi son 4-5 yıldır yaptıkları çalışmalarda GDD'leri ABD'de yerleşik bir firmadan satın alarak çalışmalarında kullanıyorlar-International Light Technologies, MA [Abramovich vd. (2009)]. Bu firmadan doğrudan farklı GDD lambaları temin edildi. İlk olarak alınan GDD lambaların geometrik özellikleri incelendi. Ankara Dış Hekimliği fakültesindeki araştırmacıların yardımıyla x-ışın sistemleri ile anot-katot geometrileri karakterize edildi. Aşağıda elde ettiğimiz bu ilk sonuçlar gösterilmektedir.

Width of the Reference Needle		0,80 mm±0,01mm	
Width of Electrode (in mm)		D _e	
Width of Aperture (in mm)		D _a	
1 FRONT NEEDLE-N507-N517 14-06-59			
N507	D _e	0,60	N517
	D _a	0,81	
1 SIDE N517-N507-NEEDLE 14-08-09			
N517	D _e	0,68	N519
	D _a	0,79	
2 FRONT NEEDLE-N519-ORANGE DUMMY 14-25-11			
N519	D _e	0,74	Org. Dum.
	D _a	0,52	
2 SIDE ORANGE DUMMY-N519-NEEDLE 14-28-22			
Org. Dum.	D _e	1,00	N519
	D _a	1,27	

Şekil 3.2a. Yurt-dışından temin edilen farklı GDD'lerin anot-katot yapıları ve geometrik parametreleri

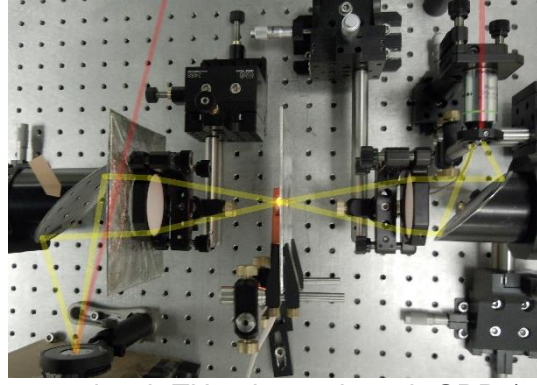
					
N520A	D_e	0,88	N523	D_e	0,86
	D_a	0,67		D_a	0,64
					
N527	D_e	0,75	N522	D_e	0,91
	D_a	0,58		D_a	1,13

Şekil 3.2b. Yurt-dışından temin edilen farklı GDD'lerin anot-katot yapıları ve geometrik parametreleri

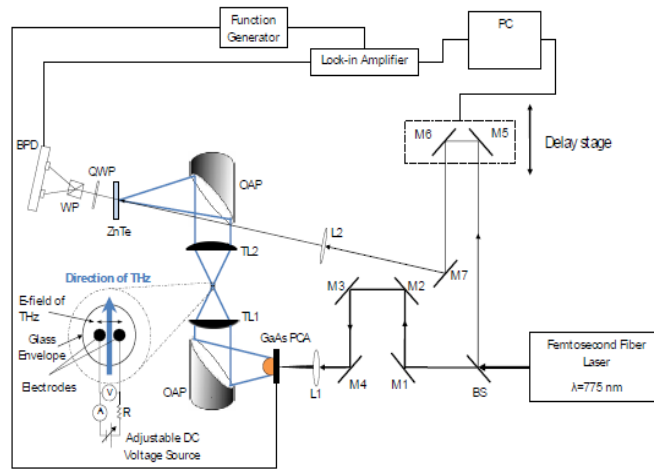
80-125 ve 260-380GHz ölçümlerinde bu yapılardan elde edilen anot-katot geometrik parametreleri ile THz algılama frekansı arasındaki bağ araştırıldı. Alınan GDD lambaların varsa rezonant etkilerini ve mm-dalga boyları/THz frekanslarına olan duyarlılığını ölçmek ve karakterize etmek için mevcut pulslu THz sistemlerimizi ve geliştirdiğimiz sürekli ışıyan THz kaynaklarımızı kullandık.

3.1. ZAMANA DAYALI THZ SİSTEMİN GDD LAMBALARI İÇİN DÜZENLENMESİ

Temin edilen deşarj lambaları (GDD'ler) Şekil 3.3 ve 3.4'te gösterilen ölçüm sistemi ile farklı voltaj aralıklarında (abnormal glow) karakterize edildi. Bu sistemde THz pulsları bir darbeli (ultrafast) lazer kaynağı ile elde edilmektedir. Bu sistemin detayları yayınladığımız çalışmada anlatılmaktadır [Çınar vd. (2013)]. Elde edilen 0,1-1THz genişliğindeki THz pulsları özel mercekler sayesinde GDD yapısının üzerine odaklandı. Yapı içinden geçen THz pulsları GDD'lerin hem açık hem de kapalı konumlarında toplandı. Zamana dayalı sistemde frekans çözünürlüğümüz 25GHz mertebesinde.

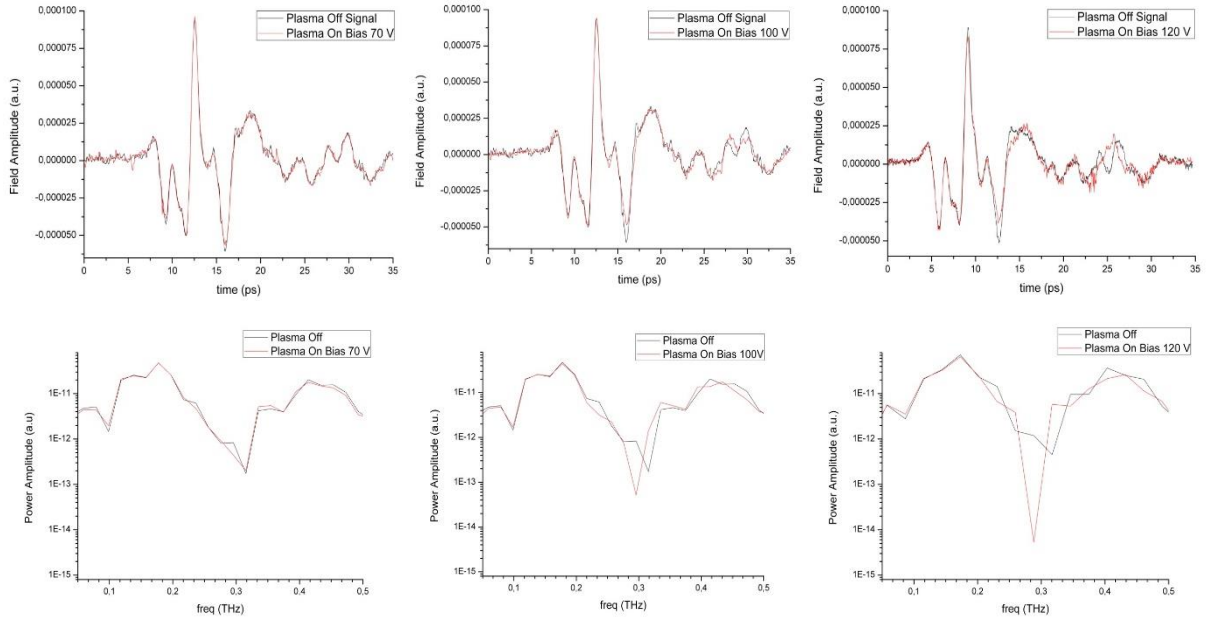


Şekil 3.3. GDD açıkken fotoğrafı (sol) ve zamana dayalı THz ölçüm sistemi, GDD (açık), Femtosaniye lazer (kırmızı renkte), THz (sarı renkte) (sağ).



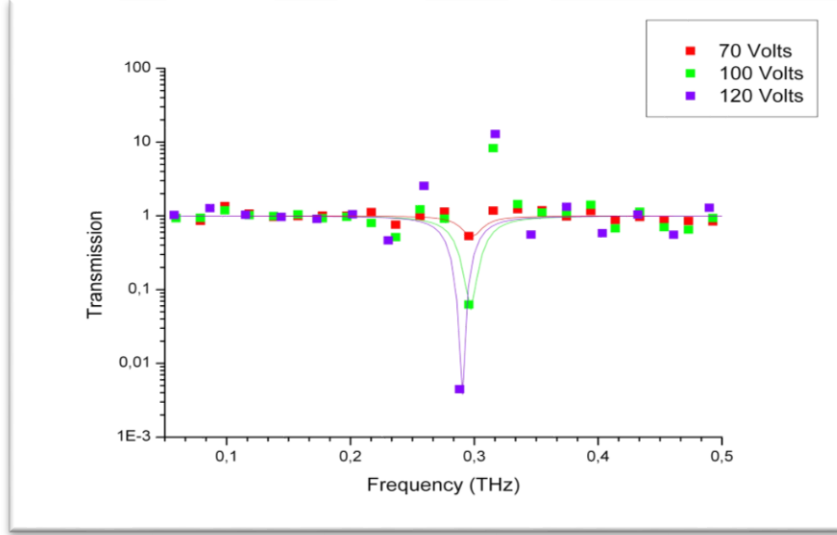
Şekil 3.4. THz-Plazma etkileşim ölçümleri için kullanılan zaman dayalı ölçüm sistemin şeması. Sistemde THz ışını daha iyi odaklayabilmek için özel mercekler kullanılmaktadır. Sağdaki sistem hem GDD tarafından THz algılamasında hem de GDD içinden geçen THz ışınlarının Golay Cell yardımıyla tespit edilmesine olanak sağlamaktadır.

GDD kapalı ve açıkken Konya sokaktan alınan GDD ile alınan spektrumlar Şekil 3.5'deki grafiklerde gösterilmiştir. Sinyal profilindeki, uygulanan gerilimlere göre ufak değişimler; frekansa göre güç dağılımı grafiğinde daha açıkça görülmektedir.



Şekil 3.5. Zamana Dayalı Ölçüm Sinyal profilleri ve Güç Spektrumları. Teflon ve TPX lenslerle (TL1 ve TL2) odaklanan THz ışınının odak noktasına konan GDD (Şekil 3.1) farklı gerilimlerde çalıştırılmıştır (70V-sol, 100V-orta, 120V-sağ).

Yapılan deneyde 0,05 - 0,5 THz aralığında sadece dar bir frekans aralığında GDD geçirgenliğinde, voltaj artışı ile bir düşüş gözlenmektedir. Bununla beraber frekansta da düşük frekanslara doğru bir kayma olduğu söylenebilir. Kısaca söylemek gerekirse genel plazma ve elektromagnetik (EM) dalga etkileşimlerinde belli bir frekans aralığı değil belli bir frekans ve altındaki dalgaların hemen hemen tamamının plazma tarafında ya emilmesi ya da yansıtılması beklenirken burada sadece kısa bir frekans aralığında (0.28-0.31 THz) düşüş ve frekans aralığının GDD voltajına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir (Şekil 3.6). Belli frekans aralığındaki geçirgenlik düşüşünde görülen değişim, anten yapısı – EM dalga etkileşimleri ile açıklanabileceğine işaret etmektedir.

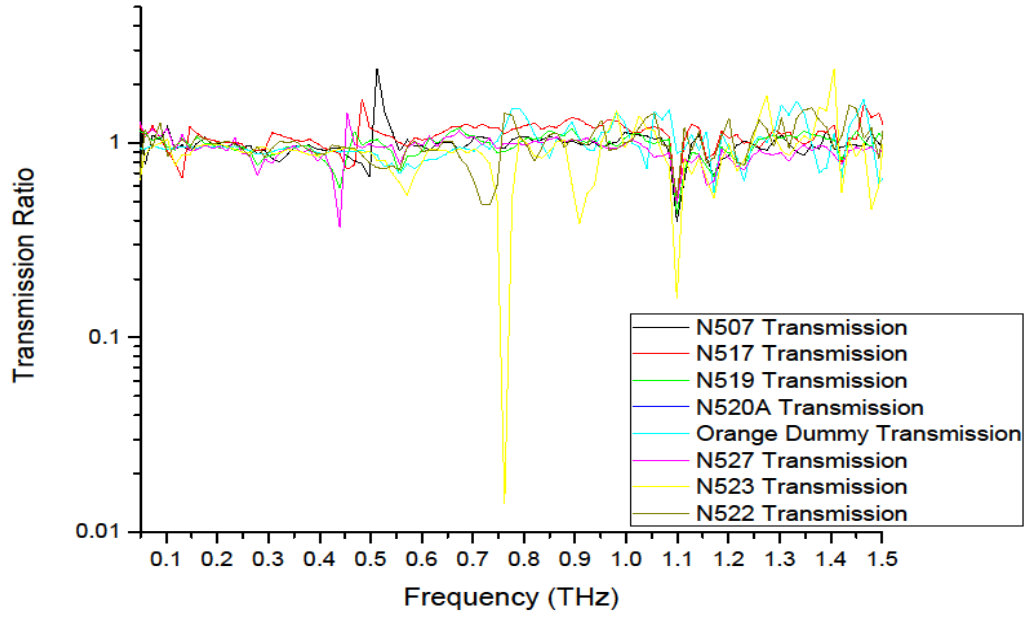


Şekil 3.6. Farklı Voltajlar için GDD Geçirgenlik-Frekans Grafiği. Görüldüğü gibi 0.3 THz civarı görülen rezonans etkisi voltaj artıktıkça hem sağa kayıyor hemde THz geçişinde 20dB gibi bir sönümlenmeye neden oluyor.

Şekil 3.6'den görüldüğü gibi, 5. ve 6. denklemlerin açıklayamadığı etkileşmelerin olduğunu deneysel olarak görüyoruz. Yaptığımız son çalışmalarda aldığımız farklı GDD'ler için yine rezonansları benzer frekanslarda gördük (0.26-0.33THz). Bu rezonans bölgesine neden olan etken muhtemelen yapının bu frekansları saçabilmesi. Yalnız neden u saçılan frekanslarda düşüşler belirgin oluyor ve neden düşük frekanslara kayma gözlemliyoruz henüz açık değil. Yakın zamanda yayınladığımız bu çalışmada çok basit ve ucuza mal edilebilir ticari neon gazı doldurulmuş deşarj (GDD) lambaları kullanılarak "**Ayarlanabilir Hibrid-Plazma THz Filtrelerinin**" yapılabileceğine işaret ettik [Çınar vd. 2013].

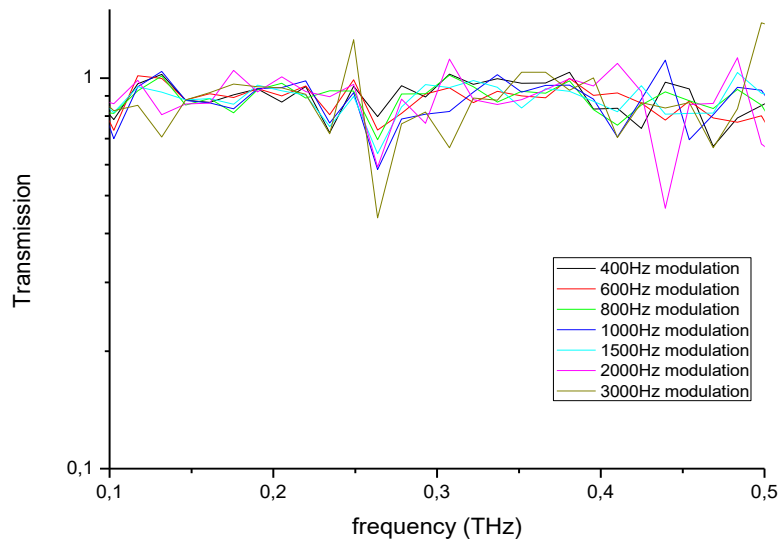
3.2. GDD LAMBALARI – ZAMANA DAYALI THz ÖLÇÜMLERİ

Önceki çalışmamızda [Çınar vd. (2013)] sonuç olarak THz ışınlarını elektrot yapısı üstüne gönderdiğimizde belli bir frekans ve altındaki dalgaların hemen hemen tamamının plazma tarafında ya emilmesi ya da yansıtılması beklenirken burada sadece kısa bir frekans aralığında THz geçişin düştüğü gözlemlendi. O çalışmada kullanılan GDD Ankara'daki bir elektronikçiden alınmıştı. Proje kapsamında yurtdışından alınan GDD yapıları, "abnormal glow" deşarj konumunda THz ölçümleri tekrar gerçekleştirildi.

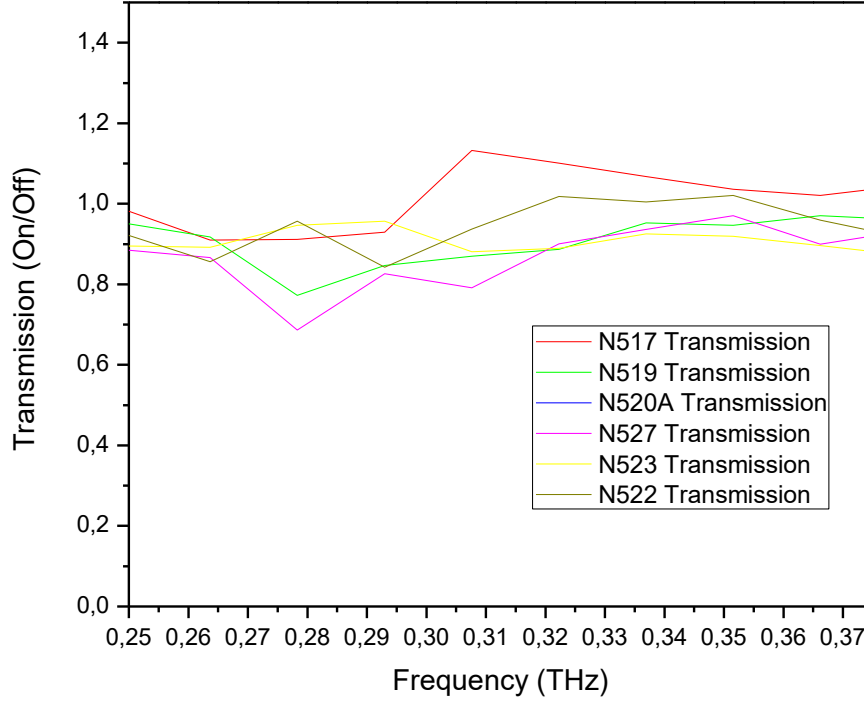


Şekil 3.7. Yurtdışından alınan farklı GDD yapılarından geçen THz pulsların geçiş eğrileri. Yapısı itibarı ile bu ölçümlerde THz geçişin 0.3-0.4THz civarı rezonans etkiler göstermesini bekleedik. Ancak THz kutuplaşması ile plazma elektrik alanı aynı yönde olmadığı için etkilerin görülmediğini düşünüyoruz.

Yukarıdaki güç geçiş eğrileri GDD'ler plazma açıkken (GDD Bias: 110 VDC) alınan THz ölçüm değerlerinin plazma kapalı konumdayken alınan ölçüm değerlerinin FFT edilmiş güç değerleri oranıdır. Anlamli frekans aralığı 0,05 THz ile 1,5 THz arasında olup; bu aralık dışında değerler anlamsızlaşmaktadır. Aşağıdaki ölçümler bu sefer THz elektrik alanının plazma elektrik alanına paralel olduğu durumda alınmıştır.



Şekil 3.8. THz elektrik alanın paralel olduğu konumda beklenen 0.3THz civarı rezonans etkiler görüldü ancak önceden yayınlanan etkilere nazaran daha zayıftı. Yukarıdaki grafikde N523 için, farklı modülasyonlarda alınan THz geçişleri gösterilmektedir.



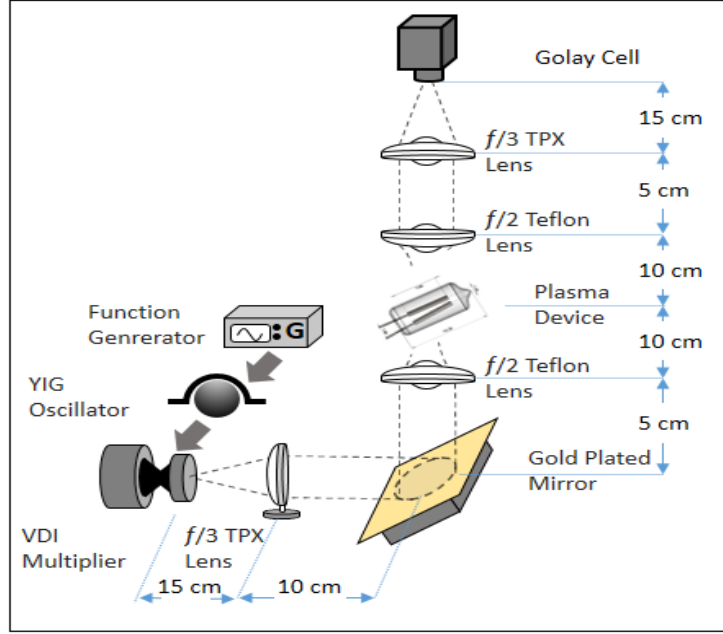
Şekil 3.9. Yurtdışından alınan farklı GDD yapılarından geçen THz pulsların geçiş eğrileri. Yapısı itibarı ile bu ölçümlerde THz geçişin 0.2-0.4THz civarı rezonans etkiler göstermesini bekledik. Bazı etkiler görülse de düşük frekans çözünürlüğü nedeniyle benzer yapılardaki GDD'lerde sonuçlar tekrarlanamadı.

Yukarıdaki güç geçiş eğrileri GDD'ler plazma açıkken (GDD Gerilim: 110-130 VDC) alınan THz ölçüm değerlerinin plazma kapalı konumdayken alınan ölçüm değerlerinin FFT edilmiş güç değerleri oranıdır. Anlamlı frekans aralığı 0,05 THz ile 1,5 THz arasında olup; bu aralık dışında değerler anlamsızlaşmaktadır. Düşük frekans çözünürlüğü nedeniyle proje kapsamında geliştirilen sürekli ışılan, frekans ayarlanabilir THz kaynağı ile ölçümler tekrarlandı.

4. YÜKSEK GÜÇ, YÜKSEK FREKANS THZ ÜRETİCİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Aynı ölçümleri geliştirdiğimiz sürekli ışılan, frekans ayarlanabilir THz kaynağı ile gerçekleştirmek için gösterilmektedir. Bu sistem ile alınacak ölçümler bir sonraki dönem raporunda gösterilecektir. Bu sürekli ışılan, frekans ayarlanabilir sistemin pulslu THz

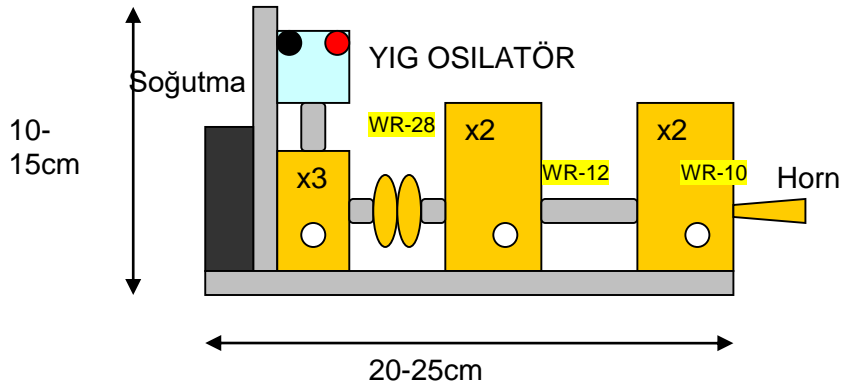
sistemlerimiz ile yapılan ölçümlere göre iki üstünlüğü var: 1. Çıkış gücü frekans başına 1mW gibi, zamana dayalı sistemde bu güç 1nW gibi, 2. Frekans tayf genişliği 1GHz'ten az.



Şekil 4.1. THz-Plazma etkileşim ölçümleri için kullanılan sürekli ışımaya yapan mm dalga boyu/THz sistemin şeması. mm dalga boyu/THz ışını daha iyi odaklayabilmek için özel mercekler kullanılmaktadır. Bu sistem hem GDD tarafından THz algılamasında hem de GDD içinden geçen THz ışınlarının Golay Cell yardımıyla tespit edilmesine olanak sağlamaktadır.

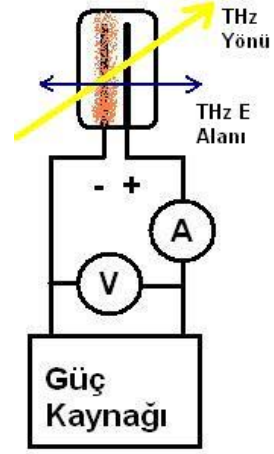
4.1. 80-125 GHz ÜRETİCİ KURULUMU VE TESTLERİ

GDD'leri, yüksek güç üreten mm dalga boyu kaynağı ile detektör olarak tepkisini araştırmak için Schottky-diyot temeline dayalı ışın kaynağı kuruldu. YIG çıkışı <30mW olacağından ilk çarpıcı sonrası (x3) bir yükseltici aşaması (LNA) ile ışın gücü artırıldı. Yaklaşık olarak 80-125GHz arası ayarlanabilen bu kaynak bu frekans aralığında modüle olmadan önce WR-10 konik horn çıkışı 20mW güç üretmektedir. Bu gücü module ettikten sonra (%50 kayıp) özel Teflon mercekler ile kolime edip TPX mercekleri kullanarak (50mm çap, F#2) GDD yapısı üzerine ışını odakladık. Bu sistem şeması ve kurduğumuz kaynak aşağıda gösterilmektedir:



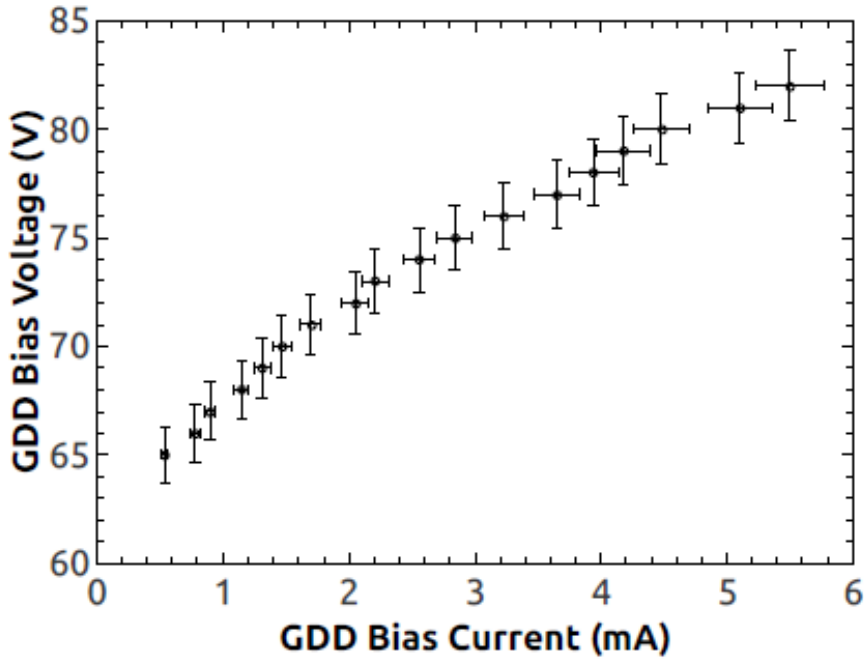
Şekil 4.2. Geliştirilen 80-125 GHz'te çalışan frekans kaynağının şeması. Yaklaşık 9-14GHz'te çalışan bir mikrodalga kaynağını (YIG osilatör) Schottky temeline dyaalı çarpan diyot yapıları (x9) ve frekans uyumlu dalga boyu kılavuzları (WR) ve yükselteçler kullanarak (Low Noise Amplifier-LNA) 80-125 GHz arası çıkış frekansı elde ettik.

Sonra 80-125GHz çıkışını temin edilen bir konik horn anten ile GDD için kurulan optik sisteme aktardık. Bu frekans aralığında yapılan testlerde çıkış tayfı yaklaşık 90MHz genişlikte hesaplanmıştır ve çıkış gücü 18 ile 22mW arası değişmektedir. Sistemin bu düşük frekans konumunda, çıkan yüksek güç sebebiyle GDD yapısını yukardaki şekilde (Şekil 4.1) gösterildiği gibi özel bir Teflon merceğin odağına yerleştirerek detektör olarak algılama özelliklerini inceledik. Yapılan bu ilk çalışmalarda çıkış frekansı yaklaşık 100GHz'e ayarlandı, çünkü burada sistem en yüksek mm dalga boyu ışın gücünü verdi. GDD lamba yapısını 130V gerilim ve değişken akım veren güç kaynağı ile sürerek, modüle edilen 80-125 GHz'teki ışının odağına yerleştirdik ve kilitlemeli yükselteç ("lock-in amplifier") üzerinden plazma içerisinde oluşan akımı uygulanan voltaja göre ölçtük ve GDD'nin "abnormal glow discharge" bölgesinde çalıştığından emin olduk. Plazma akımındaki değişkenliğini (ΔJ) ölçebilmek için akım yükselteçleri kullanılmalıdır. 20-25mW THz ışınları ile GDD yapıları aydınlatıldığında plazma akımındaki değişkenlik nA mertebesinde olduğu için gözlemlenebilmesi için akım/voltaj yükselteçler kullanılmalı ya da aşağıdaki gibi THz elektrik alanını modüle ederek kilitlemeli yükselteç üzerinden ölçümler gerçekleştirilmelidir (lock-in amplifier).



Şekil 4.3. YIG kaynağı ve 80-125GHz üretici sistemi (sol) ve GDD yapısı (sağ). 80-125GHz'teki ışının kutuplaşması ile GDD elektrik alanı paralel konumunda gösteriliyor (sağ).

Aşağıda bu çalışmalarda kullanılan ışın kaynağına benzer bir ışın kaynağı ile önceden yapmış olduğumuz GDD yapısının IV karakteristik grafiği ve lock-in üzerinden modülasyon frekansına göre tepkimesi gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Akım-voltaj grafiği GDD'nin abnormal konumda çalıştığını göstermektedir.

Yukarıdan anlaşılacağı gibi çok ucuza alınan bir deşarj lamba sayesinde oda sıcaklığında çalışan detektör elde edebiliyoruz. Burada uygulanan güçler mW mertebesinde olsada hassas ölçüm teknikleri kullanarak bu tip ucuz (1 TL) yapıların NEP (Noise Equivalent Power) değerlerin $10^{-9}W/\sqrt{\text{Hz}}$ gibi rakamlarda olduğu gösterilmiştir (aynı NEP değerine sahip

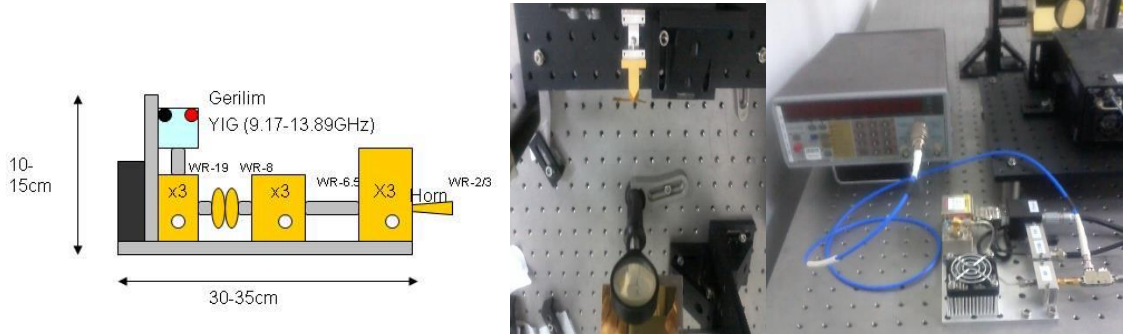
cihazlar, örneğin Golay Cell cihazı, piyasada 10000 USD üzerinde bir fiyat ile satışa sunuluyor. Sonra, GDD lambanın mm dalga boyu elektrik alanı yönüne olan hassasiyetin

4.2. 260-380GHZ THZ KAYNAĞI KURULUMU VE TESTLERİ:

Yukarıda anlatılan 80-125 GHz kaynağına ek bir pasif çarpıcı yapısı ekleyerek THz frekanslarına rezonant etkileri araştırmak için ışın kaynağını geliştirdik. 260-380GHz arasında minimum 1mW çıkış sağlayabilen bir THz üreticisi için başlangıçta 80-125GHz sistemindeki kullanılan <20GHz frekans ayarlanabilen YIG osilatör (9-14GHz) ve sonrasında x9 çarpan Schottky diyot yapıları, yükselteç (LNA) ve son olarak x3'lük pasif Schottky diyot temeline dayalı çarpıcı kullanarak 260GHz üzerine çıkabilmekteyiz:

$$\text{Yüksek Frekans Üretici: } f_{\text{out}} = f_{\text{YIG}} \times 3 \times 3 \times 3 = 260-380\text{GHz}$$

Son çarpım aşaması sonrası WR-2/3 tipi dalga kılavuzu ile piramit tipi bir horn anten ile THz ışınları GDD yapısına odaklanmak üzere lens takımlarına iletildi. Kaynağın genel şeması Şekil 4.5'te gösterilmektedir.

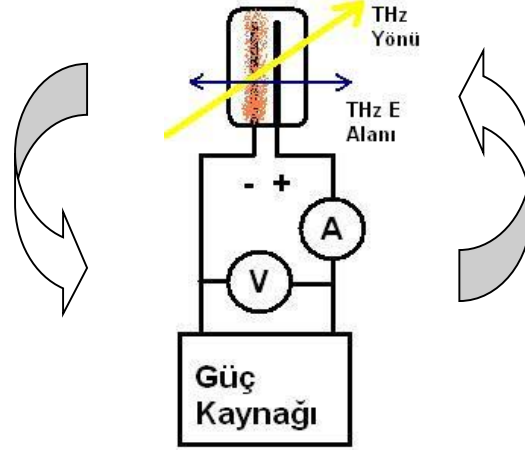


Şekil 4.5. Kurulan THz Üretici şeması ve laboratuvar ortamında kurulan sistemin görüntüsü. Orta resim piramit horn çıkışı, sağdaki resim mikrodalga frekans sayar ve YIG kaynağı.

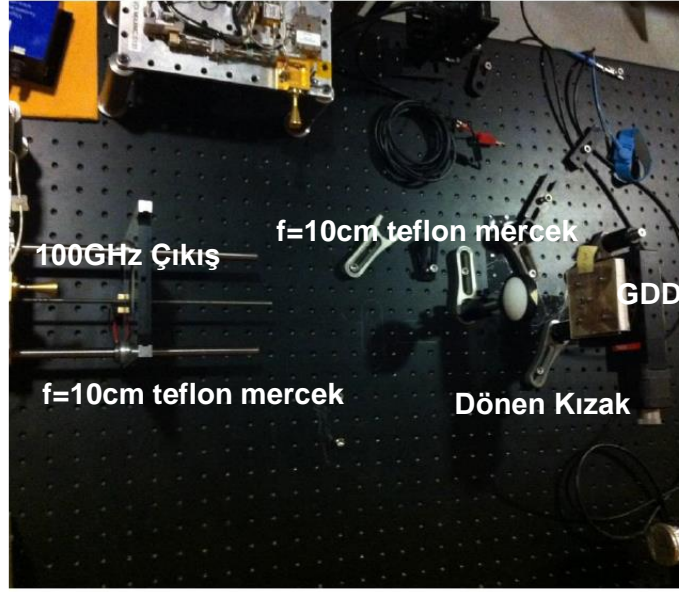
Yapılan güç ve frekans ölçümlerinde 260-380GHz arası çıkış tayf genişliği 1000MHz'ten az olup (YIG osilatörün çıkış tayfını DC-26.6GHz RF spektrum analizör ile 30MHz olarak karakterize ettik ve sistemde net 27 çarpan kullanıldığı için bu tayfın 800MHz civarı olduğu tahmin edilmektedir) gücü kalibre edilmiş bir Golay Cell ölçüm cihazı ile yaklaşık olarak 0.8 ile 1.2mW arası değiştiğini gözlemledik.

5. MM DALGA BOYU/THz ALGILAMA ÖZELLİKLERİ VE BU DALGA BOYLARI İLE ETKİLEŞİMLERİ

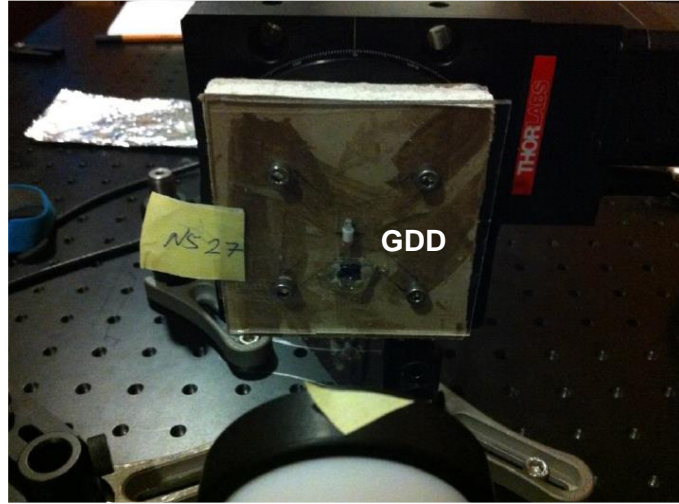
100 GHz frekans konumunda (mm dalga boyları), çıkan yüksek güç sebebiyle GDD yapısını yukardaki şekilde (Şekil 4.1) gösterildiği gibi özel bir Teflon merceğin odağına yerleştirerek detektör olarak algılama özelliklerini inceledik. Yapılan bu ilk çalışmalarda çıkış frekansı yaklaşık 100GHz'e ayarlandı, çünkü burada sistem en yüksek mm dalga boyu ışın gücünü verdi. GDD lamba yapısını 130V gerilim ve değişken akım veren güç kaynağı ile sürerek, modüle edilen 80-125 GHz'teki ışının odağına yerleştirdik ve kilitlemeli yükselteç ("lock-in amplifier") üzerinden plazma içerisinde oluşan akımı uygulanan voltaja göre ölçtük ve GDD'nin "abnormal glow discharge" bölgesinde çalıştığından emin olduk. Plazma akımındaki değişkenliğini (ΔJ) ölçebilmek için akım yükselteçleri kullanılmalıdır. 20-25mW THz ışınları ile GDD yapıları aydınlatıldığında plazma akımındaki değişkenlik nA mertebesinde olduğu için gözlemlenebilmesi için akım/voltaj yükselteçler kullanılmalı ya da THz elektrik alanını modüle ederek kilitlemeli yükselteç üzerinden ölçümler gerçekleştirilmeli (lock-in amplifier).



Şekil 5.1. 100GHz'teki ışının kutuplaşması ile GDD elektrik alanı arasındaki açı değiştirilerek ölçümler alındı. Burada GDD yapısı özel bir tutucu içine yerleştirilerek 0-360 derece arası döndürüldü. Aşağıda 300Hz modülasyon sonucu lock-in üzerinden ölçülen sinyal değerleri gösterilmektedir.

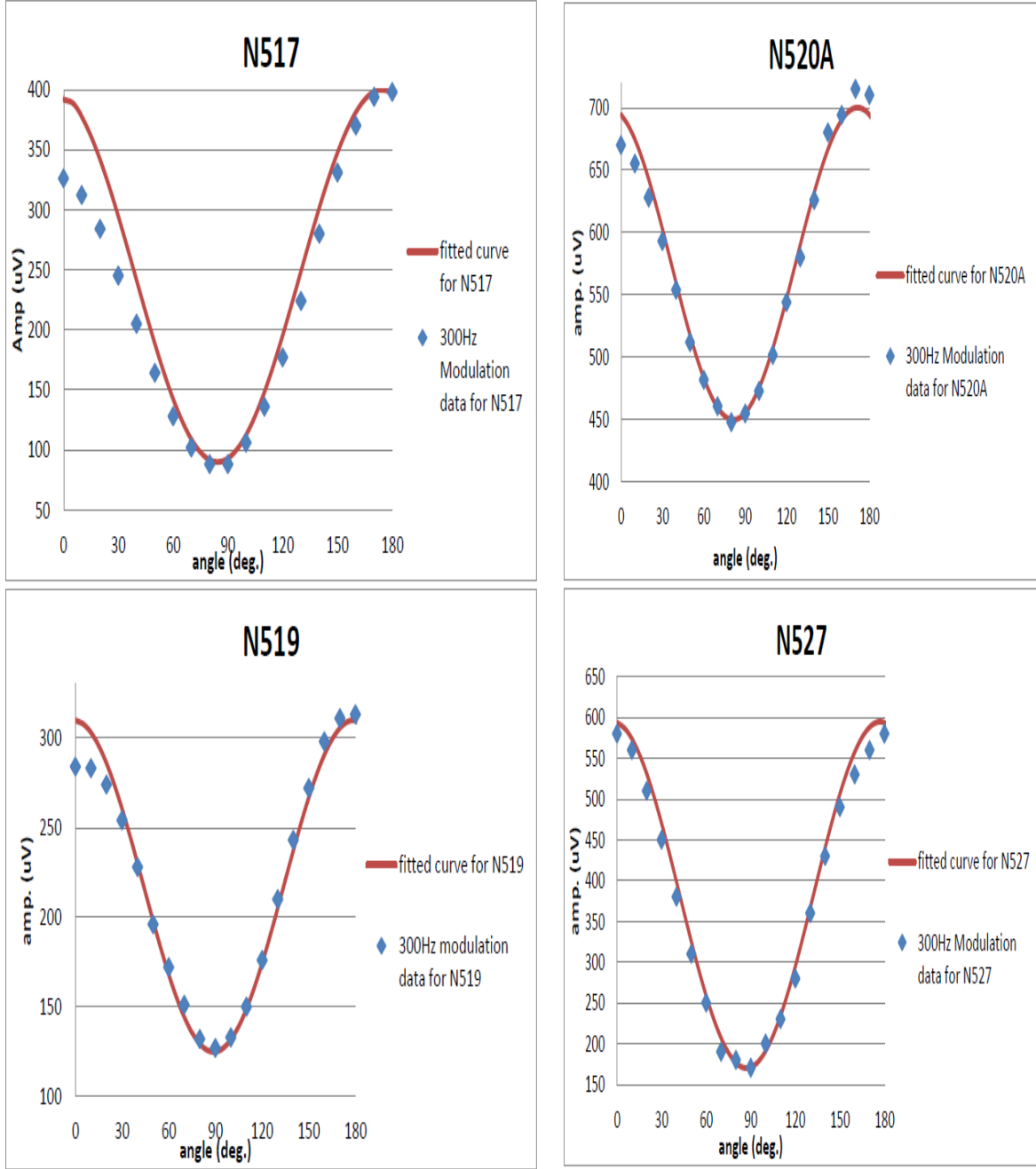


Şekil 5.2. Optik Ölçüm Sistem Fotoğrafı



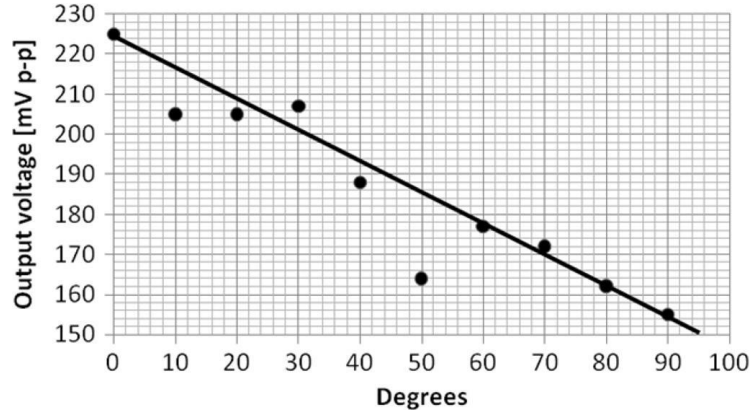
Şekil 5.3. GDD yapısı dönen kızağın ortasında tutan yapı

Yeni alınan GDD'ler ile Malus yasasına göre THz polarizasyonu ile GDD içerisindeki elektrik alan arasındaki açığa göre ölçülen sinyal değerlerin değiştiğini gözlemledik:



Şekil 5.4. 4 GDD yapısına göre aynı modülasyonda (300Hz) algılanan THz sinyal değerleri. Algılanan 100GHz sinyal değerleri 0-360 derece arası 10 derecelik aralıklarla toplandı.

Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü gibi veriler $I=I_0\cos^2(\theta)+\text{sabit}$ denkleminde rahatlıkla fit edilebiliyor. Önceden diğer grup tarafından yapılan çalışmalarda GDD THz ışınının optik eksenine paralel konumlandırılarak açısal ölçümler gerçekleştirildi [Abramovich vd. (2009)]. Burada açığa bağlı olarak lineer bir değişim gözlemlendiler. Bizim deneylerde GDD THz ışın optik eksenine dik konumlandırıldığı için Malus yasasına göre değişen veriler ile bu veriler arasındaki farkın GDD üzerindeki cam tomurcuğunun oluşturduğu saçılma etkilerinden kaynaklandığını düşünüyoruz.



Şekil 5.5. Diğer grup tarafından yapılan deneylerde GDD THz ışın eksenine paralel konumlandırıldığında açıya bağlı algıladığı güç lineer olarak değişmekte olduğu gösterilmiştir [Abramovich vd. (2009)].

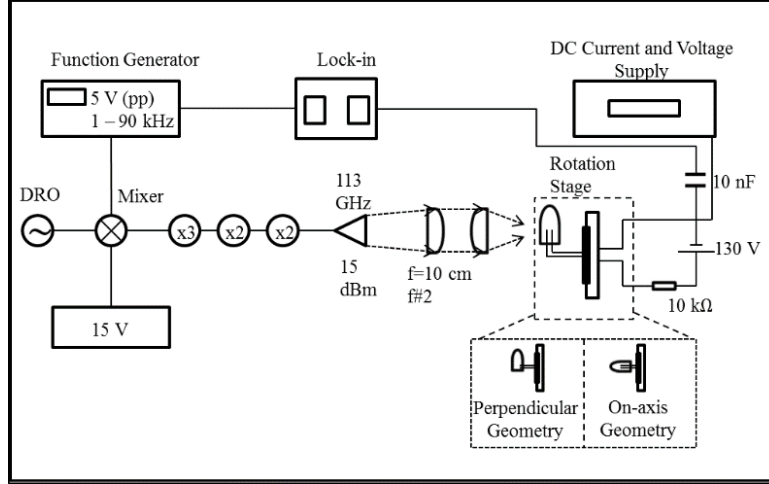
5.1. Deşarj Lambaların (GDD) mm Dalga Boyları/THz frekanslarına Olan Duyarlılıkları

Deşarj lambaların (GDD) THz dalgaları ile nasıl etkileştiğini anlayabilmek için belli bir frekansta sürekli milimetre dalga deneyleri kapsamında önceden geliştirilen mm dalga boyu-THz kaynağı ile GDD'lerin bu frekanslar ile nasıl etkileştiği araştırılmıştır. Buna paralel olarak geniş bant aralıklı atımlı THz dalga deneyleri tekrarlanmıştır. Deneysel çalışmalara destek olması amacıyla numerik simülasyonlar ile eş zamanlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlar şöyle özetlenebilir:

- GDD lambaları yüksek THz modülasyonuna daha iyi tepki göstermiştir (~90kHz).
- GDD lambalarını daha yüksek modülasyonlarda (MHz mertebesi) algılama duyarlılığını anlamak için özel yükselteç devreleri test edilmiştir.
- Geliştirilen THz kaynağı ile 264-385GHz frekanslarında rezonant etkiler görülmüştür.
- Lisansı bulunan CST Microwave Studio yazılımı ile GDD yapısından geçen THz ışınları benzetilerek rezonant etkilerin neden kaynaklandığı araştırılmıştır

İlk olarak proje kapsamında ticari olarak alınan parıltılı deşarj lambaların (International Light Technologies, Peabody MA, ABD) (GDD'lerin) mm dalga boylarına duyarlılıklarını deneysel olarak farklı modülasyon frekanslarında inceleyen çalışmalar gerçekleştirildi. Bu çalışmalar sonucunda test edilen 6 farklı GDD lambasından iki GDD lambanın mm dalga boyların tespitinde çok daha hassas olduğunu gördük. Sonrasında daha yüksek modülasyon frekanslarına çıkabilmek için özel akım yükselteç devreler geliştirdik böylelikle GDD'lerin mm dalga boylarında olan duyarlılığını kilitlemeli yükselteç (lock-in amplifier) kullanmadan

(maksimum tepki süresi 100kHz) osiloskop üzerinden ölçtük (maksimum tepki süresi 100MHz). Alınan sonuçlara göre devrede kullanılan elemanlar optimize olmadığından düşük frekanslarda bile kilitlemeli yükselteçten daha gürültülü ölçümler elde ettik. Burada projede danışman olarak görev alan Prof. Dr. Natan Kopeika (Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ben Gurion University of the Negev, İsrail) Ağustos 2015 ayında laboratuvarımızı ziyaret ederek yükselteç devrenin optimizasyonu için önerilerde bulundu.



Şekil 5.6. GDD lambaların mm dalga boylarına duyarlılığını ölçmek için kullanılan sürekli ışık sisteminin şeması: Ölçümler GDD lambaların ışığın kutuplaşmasına göre iki hali için alındı: lambanın tepesi ışığın doğrultusu ile aynı yönde iken (on-axis) ve lamba ışık doğrultusuna dik iken (perpendicular).

Şekil 1’de gösterilen sistem ile yurtdışından temin edilen GDD lambalarını ölçümleri gerçekleştirildi. Burada yurtdışından alınan 7 çeşit GDD lambası ve Ankara’da elektronik malzemeler satan bir dükkândan temin edilen GDD lambası karakterize edildi. Yapılan ilk ölçümler sonucu sırasıyla şu 6 GDD lambası üzerinde çalışmalara devam edilmesine karar verildi: N517, N519, N520A, N522, N523, N527.

GDD Parça No	Lamba Çapı (mm)	Elektriksel Güç (mW)	Işıma Rengi	Fosfor kaplama?
N517	3.2	135	Kırmızı	Hayır
N519	4.2	135	Kırmızı	Hayır
N520A	5.2	135	Kırmızı	Hayır
N522	6	135	Kırmızı	Hayır
N523	6	132	Yeşil	Evet
N527	4.2	132	Yeşil	Evet

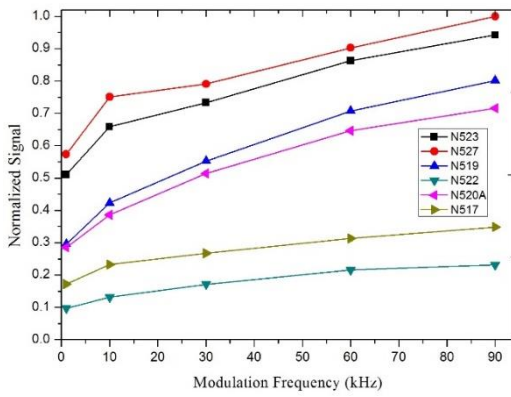
Tablo 5.1. Yurtdışından temin edilen farklı GDD lambaların fiziksel özellikleri

Bu lambaların ~20mW 113GHz merkez frekansındaki (W-band) ışın gücüne olan tepkileri aşağıda Şekil 3 ve Şekil 4'te her konum için gösterilmektedir.

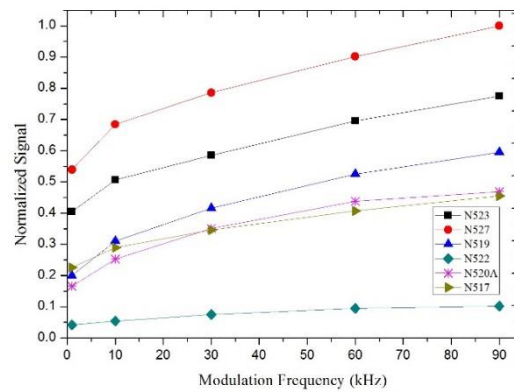


Şekil 5.7. Ölçülen ticari GDD lambaları

Aşağıda GDD'leri Şekil 5.6'da gösterildiği şekilde kilitlemeli yükselteç kullanarak okunan ve en yüksek değerlere göre okunan sinyal değerleri.

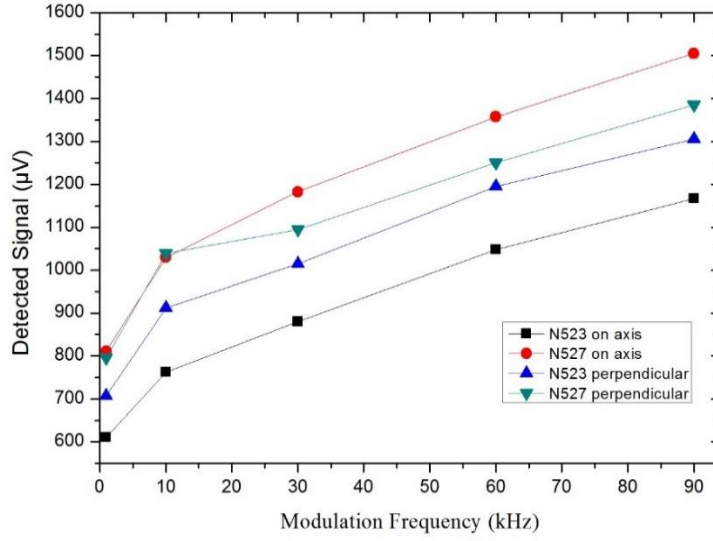


Şekil 5.8. Burada perpendicular (dik) konumunda 6 seçili GDD lamba ile değişen modülasyon frekansına göre mm dalga boylarındaki ışın gücüne karşılık ölçülen sinyal değerleri.



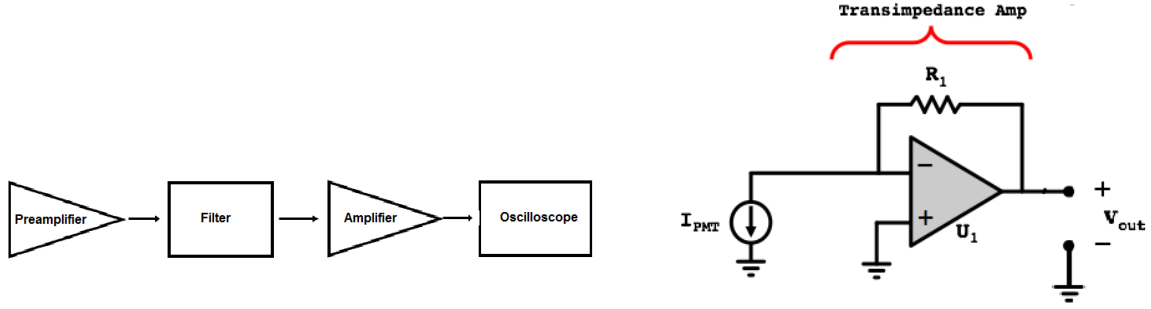
Şekil 5.9. Burada on-axis (aynı doğrultuda) konumunda 6 seçili GDD lamba ile değişen modülasyon frekansına göre mm dalga boylarındaki ışın gücüne karşılık ölçülen sinyal değerleri.

Aşağıda en iyi ilki GDD'leri yapısının hem dik hemde aynı doğrultuda elde edilen sinyal değerleri. Bu ölçümler sonucu N527 GDD yapısı en iyi tepki verdi, bu sonuç İsrail'deki araştırmacılar tarafından doğrulandı.



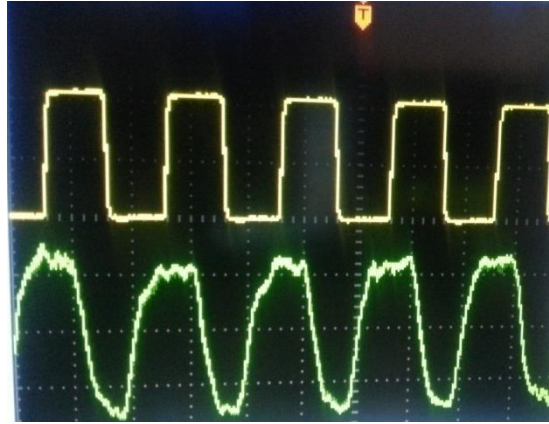
Şekil 5.10. En iyi iki GDD lambası için elde edilen en iyi ölçüm değerlerin karşılaştırılması.

Yukarıda yapılan çalışmalar sonucu rezonant etkileri araştırmak için N527 GDD lambası ilk olarak test edilmiştir. Yukarıdaki ölçümlerde kullanılan kilitlemeli yükselteç ölçüm sisteminin modülasyonuna tepkisi 100kHz ile sınırlıdır. Şekil 5.8-10 arası verilen değerlerden anlaşılacağı gibi daha yüksek modülasyonlar için daha iyi tepki verilmesi beklenilmektedir. Bu nedenle ölçümleri yükselteç sonrası osiloskop üzerinden ölçmeyi hedefledik. Bu tip yükselteç devrelerin 3 ayrı kısmı vardır: ön yükselteç, yükselteç ve filtreler. Bu devre elemanlarının GDD yapısında nanoamper hasiyetle ölçüm alınması beklenilmektedir. GDD lambası içinde mm/THz algılama metodu (bknz. son dönem raporu) hem çarpışma sonucu iyonizasyon hem de difüzyon akımlarına bağlı olduğu düşünülmektedir. Devrenin ilk kısmında akımdan voltaja çeviren bir kısım yer almaktadır. Sonrasında elde edilen voltaj değerini de yükselterek alıcı devresini tamamladık. Böylelikle GDD akımını voltaja çevirerek osiloskop üzerinde gözlemleyebildik.



Şekil 5.11. Geliştirilen yükselteç devresinin farklı kısımları. Ölçümler için LT1226CM op-amp devre elemanını kullandık, böylelikle 50 kat sinyali yükselttik ve çalışma aralığı yaklaşık DC-20MHz'idi.

Tasarlanan devreler önce NI Multisim yazılımı kullanılarak doğrulandı daha sonra laboratuvarımızda mevcut bulunan SR570 akım yükselteç cihazı ile alınan ölçümler karşılaştırıldı. Genel olarak yapılan bu ilk ölçümlerde devredeki elemanlar arasında kullanılan kabloların uzunluğu nedeniyle gürültü oranı çok fazla idi (bknz. Şekil 5.12). İleriki dönem sinyal gürültü oranını iyileştirmek için kablo bağlantılarını kısaltmayı ve farklı op-amp devre elemanlar kullanmayı hedefliyoruz.

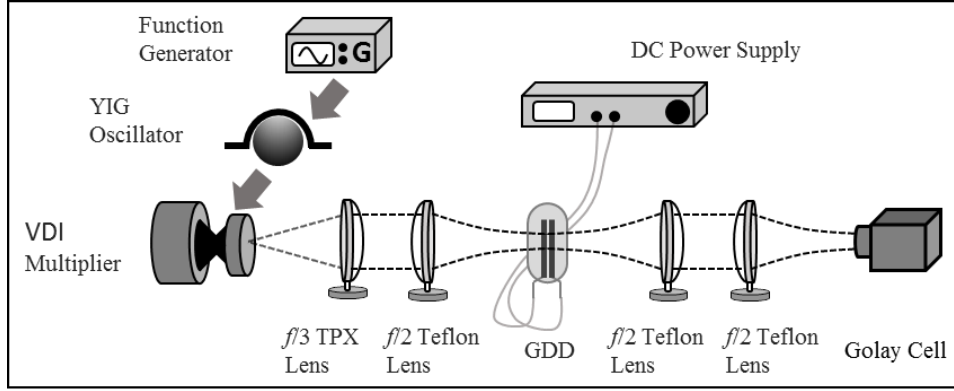


Şekil 5.12. Modülasyon sinyali (sarı) ve tipik olarak GDD (N527) ve yükselteç üzerinden ölçülen sinyal. Görüldüğü gibi geliştirilen devredeki gürültüden dolayı sinyal çok temiz değil. Bu çalışmalar sonucu bu son dönem bir bildiri ve bir makale yayınlanmıştır.

5.2. SÜREKLİ THz IŞIN KAYNAKLARI İLE REZONANT ETKİLERİN ARAŞTIRILMASI

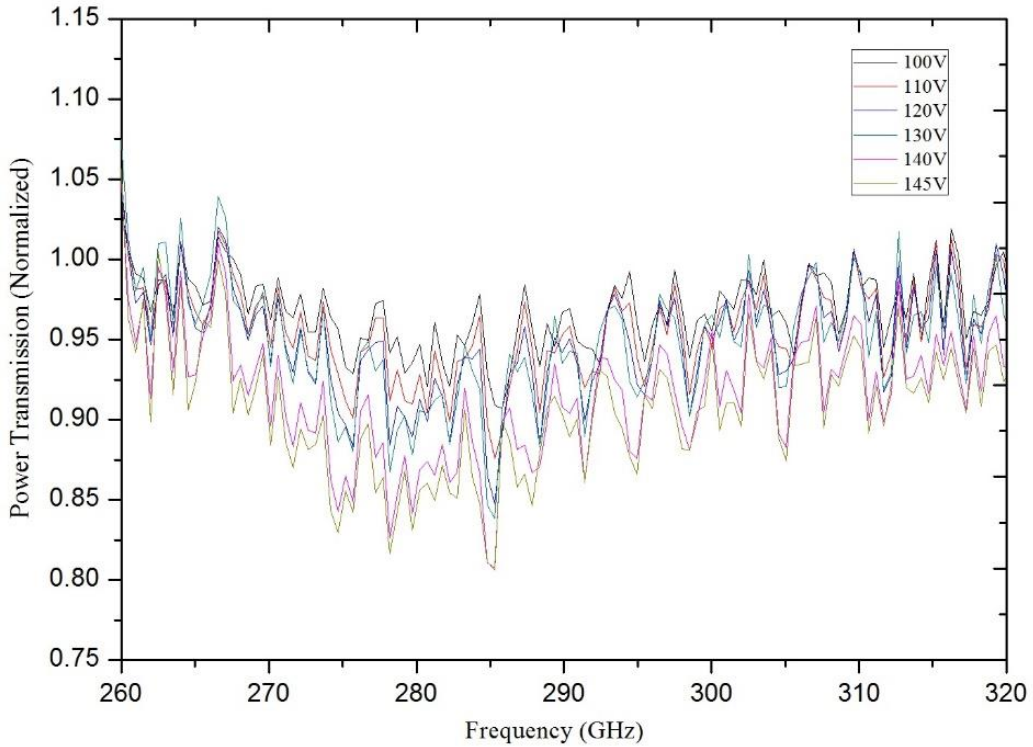
Burada kullanılan sistemde sürekli ışık kaynağı, frekans ayarlanabilir THz kaynağı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu kaynağın frekans aralığı 260-380 GHz olarak düzenlenmiş ölçümler sonucu bu aralığın aslında 264-385GHz arası olduğu teyit edilmiştir. Bu sürekli ışık kaynağı, frekans

ayarlanabilir sistemin zaman dayalı THz sistemlerimiz ile yapılan ölçümlere göre iki üstünlüğü var: 1. Çıkış gücü frekans başına 1mW gibi, zamana dayalı sistemde bu güç 1nW gibi, 2. Frekans tayf genişliği 1GHz'ten az, zamana dayalı sistemde bu 40GHz civarında idi



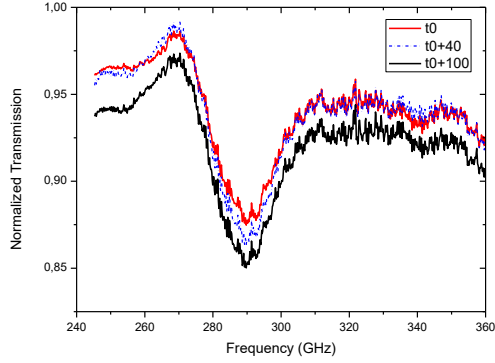
Şekil 5.13. Sürekli ışyan sistemin şeması (264-385GHz). Geçen mm dalga boyu/THz ışını ölçmek için Golay Cell kullanıldı.

100 GHz frekans kaynağına en duyarlı N527 GDD yapısını sistemin odağına yerleştirerek lambda açıkken ve kapalıyken mm dalga boyu/terahertz geçişini inceledik. Aşağıda Şekil 5.14'te görüldüğü gibi "abnormal glow region" denilen plazma akımının en yüksek olduğu durumda lambda açıkken geçen mm dalga boyu/THz ışını sönmülmüştür.

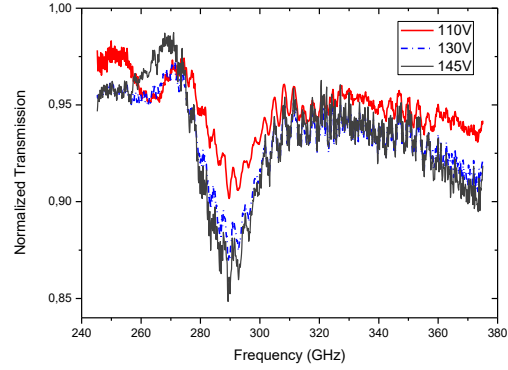


Şekil 5.14. 264-285GHz arası üretilen ışınların N527 GDD lambası içerisinde geçişi. Tüm ölçümler kapalı konumdaki ölçümlere normalize edilmiştir. Görüldüğü gibi GDD üzerindeki gerilim arttıkça geçiş sönmülmektedir.

Yapılan ölçümler GDD lambanın özellikle yüksek gerilimlerde (plazma akımının yüksek olduğu durumlarda daha iyi tepki verdiğini göstermektedir. Sönümlenmenin emilimden mi yoksa yansımadan mı kaynaklandığı açık değildir. Ek olarak en iyi tepki veren GDD lambası (N523) iki farklı ölçüm alındı: Zamana bağlı rezonant etkilerin nasıl geliştiği ve uygulanan gerilime bağlı rezonant etkilerin nasıl geliştiği. Bu ölçümler aşağıda gösterilmektedir.



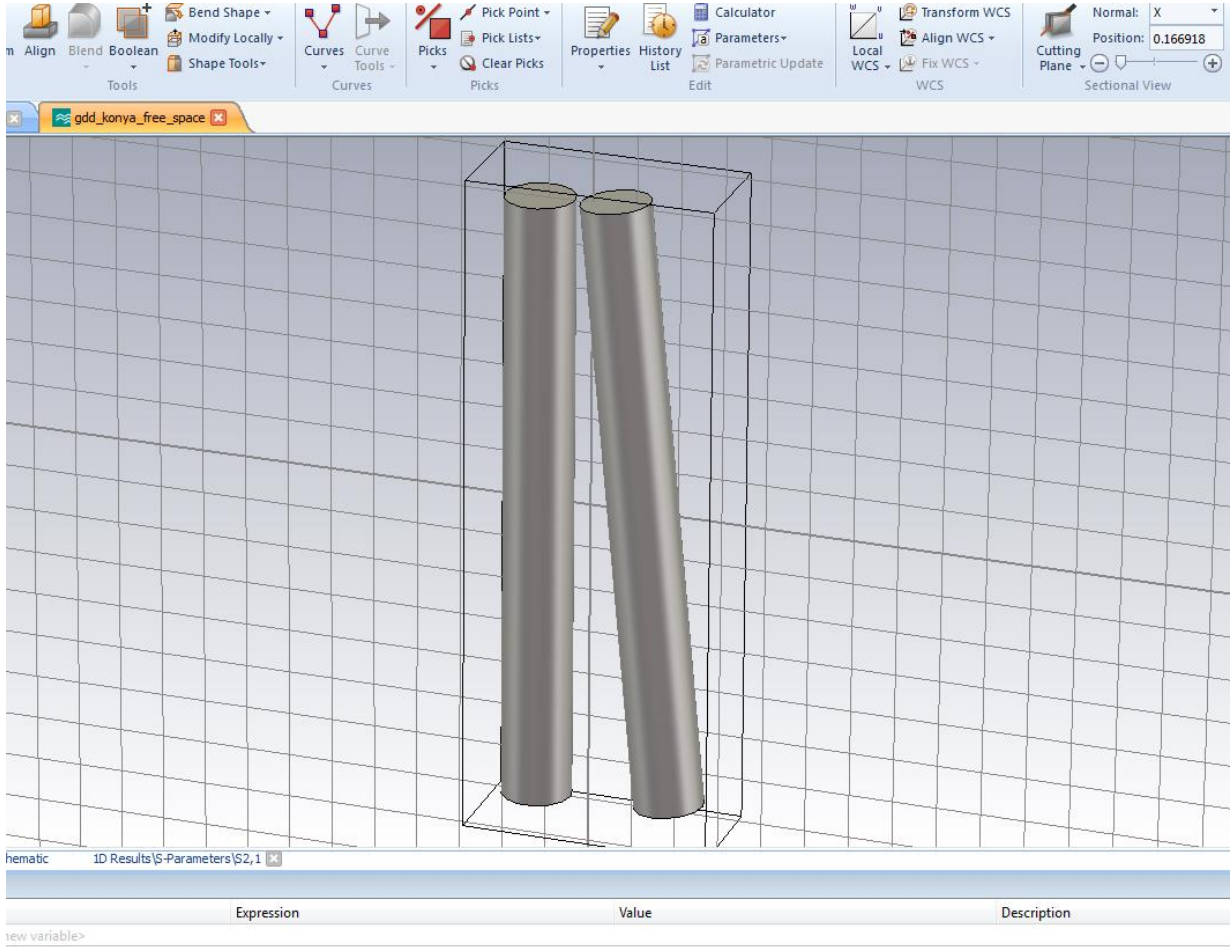
Şekil 5.15. 264-285GHz arası üretilen ışınların N523 GDD lambası içerisinde zamana bağlı olarak geçişi. Tüm ölçümler kapalı konumdaki ölçümlere normalize edilmiştir. Rezonant etkilerin 40 ve 100dk sonra artarak geliştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.16. 264-285GHz arası üretilen ışınların N523 GDD lambası içerisinde farklı gerilimlerde geçişi. Tüm ölçümler kapalı konumdaki ölçümlere normalize edilmiştir. Gerilim arttıkça akr öncesi rezonant etkilerin arttığı gözlemlenmiştir.

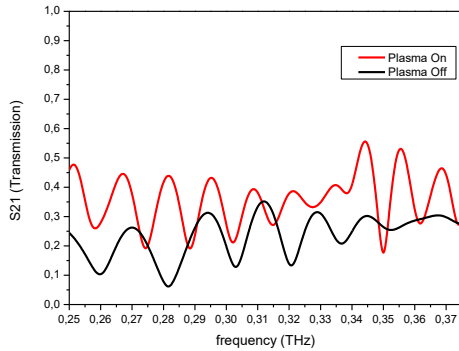
5.3. DEŞARJ LAMBALAR İÇİNDEN GEÇEN ATMALI THz ELEKTRİK ALANIN SİMÜLE EDİLMESİ

CST Microwave Studio yazılımı ile uzak kızıl ötesi dalga boyların farklı iletken veya iletken olmayan geometrideki yapılardan nasıl geçtikleri veya nasıl yansydıkları analiz edilebilmektedir. Bu yazılımın lisansını yardımcı olduğumuz diğer bir proje kapsamındaki çalışmalar kapsamında temin ettik. Yapılan simülasyonun teorik parametreleri son raporda detaylandırılacaktır. Plazma ortamını Drude modeline göre modelledik, GDD kapalı iken o bölgenin yalıtkan özelliklerini boş alana göre belirledik ($n = 1$). Simülasyon sonucu rezonant etkilere benzer dalgalanmalar gördük (Şekil 5.18). GDD kapalı konumdaki dalgalanmalar açık konumuna göre sağa ya da sola kaydığını gözlemledik.

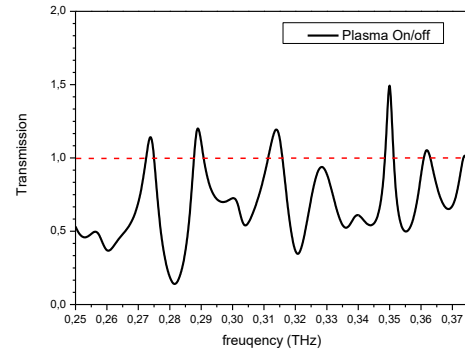


Şekil 5.17. CST Microwave Studio kullanılarak simüle edilen GDD yapısının şekli. Burada anot-katod arası mesafeyi gerçeğe en yakın şekilde benzetmek için katot eğri olarak tasarlandı

Şekil 5.18’de elde edilen eğrileri birbirine böldüğümüzde Şekil 5.19’deki grafiği elde ettik. Bu grafiği deneysel sonuçlar ile karşılaştırdığımızda bazı benzerlikler görüyoruz. Özellikle belli frekanslarda rezonant etkilere benzer düşüşler gözükmektedir.



Şekil 5.18. 264-285GHz arası üretilen ışınların N527 GDD lambası içerisinde normalize edilmemiş geçişi. Tüm ölçümler kapalı konumdaki



Şekil 5.19. 264-285GHz arası üretilen ışınların N527 GDD lambası içerisinde normalize edilmiş geçişi. Tüm ölçümler kapalı konumdaki

Özellikle benzetim çalışmaları sonucu çıkan parametreler (anot-katot geometrisi, uygulanan gerilim, plazma iletkenliği gibi) ileriki deneysel çalışmalarda kendi GDD yapımızı geliştirerek tekrarlanmaya çalışılacak. Bu çalışmalar sayesinde bu proje ve diğer planlanan çalışmalar sonucunda ucuz maliyetli ve belli frekanslara duyarlılığı ayarlanabilen THz detektörlerin gelişimine katkı sağlamayı hedefliyoruz.

6. SONUÇ

Proje kapsamında yaptığımız çalışmalarda, deşarj lambalarında görülen bu rezonant etkilerin THz algılamadaki rolünü belirleyebilmek için ticari olarak satılan farklı lambaları hem zamana dayalı THz ölçüm sistemlerimiz ile hemde proje kapsamında geliştirdiğimiz sürekli ışımaya yapan yüksek frekans THz ölçüm sistemleri ile karakterize ettik. İki türlü ışık kaynağı geliştirildi: 80-125GHz arası ışımaya yapan, bu frekans tayfında 1GHz'lik dilimlerde 20mW ortalama güç üreten mm-dalga boyu ışın kaynağı ve 260-380GHz arası ışımaya yapan, bu frekans tayfında 1GHz'lik dilimlerde 1mW ortalama güç üreten THz ışın kaynağı. Bu ışın kaynaklarının temelinde Schottky-diyot temeline dayalı çarpan yapıları süren frekans ayarlanabilir bir YIG osilatör mikrodalga kaynağı kullanılmıştır. MM dalga boyu kaynağı için 9-14GHz arası frekansı ayarlanabilen YIG osilatör kaynağını x9 toplam çarpan Schottky diyot temelli RF bileşenler kullanıldı. THz frekanslarına ulaşmak için aynı kaynağa x3 çarpan bir Schottky temeline dayalı pasif çarpan bir diyot yapısı kullanıldı. İki sistem için frekansları hava boşluğuna taşımak için ayrı horn antenler kullanıldı. MM dalga boyu ışın kaynağı için konik bir horn anten yapısı kullanılırken, THz ışın kaynağı için piarmit horn anten yapısı kullanıldı. Dağılan ışın kaynağın Gaussiyen ışın dağılımı görünüşünü plano-konveks mercekler kullanarak topladık ve deşarj lamba yapısına odakladık. Deneilerin bir sürümünde deşarj lamba yapısını detektör olarak kullandık, diğer bir sürümünde ise içinden geçen frekansların şiddetlerini bir Golay Cell detektör yardımıyla ölçtük.

THz üretici ve deşarj lamba kullanan alıcı sistemleri geliştirdik, sonra zamana dayalı THz ölçüm sistemlerin deşarj lambalarını daha iyi karakterize edebilmeleri için optimize ettik ve THz dalga boylarının deşarj ortamındaki plazma ile etkileşimini anlamak için benzetim çalışmaları geliştirerek odaklanacağız. Bu çalışmalar sonucu rezonant etkilerin THz algılamadaki rolünü belirleyerek bu tip yapıların THz uygulamalarında nasıl ve nerede kullanabileceklerini anlayacağız ve bu yapıları kullanarak prototip ürünlerin geliştirilmesine öncülük edeceğiz. Deşarj lambaları ışın algılama için kullanıldığında literatürde "Glow Discharge Detector (GDD)" olarak adlandırılmaktadır. GDD lambaları ile bu ölçümlerde şu sonuçları elde ettik:

- GDD lambaları detektör olarak hem mm dalga boyları hem de THz frekansları için ışının kutuplaşma yönüne hassas (anot-katot arası elektrik alan yönü ışın elektrik alanına paralel ya da anti paralel olduğu durumlarda algıladığı sinyal maksimum, dikay olduğu durumlarda algıladığın sinyal minimum)
- GDD lambaları hem optik eksene paralel hem de optik eksene dik konumda mm dalga boyu/THz ışınlarını algılayabiliyor
- GDD lamba detektör hassasiyeti iki frekans aralığı için neredeyse Golay Cell cihazına eşit ($nW/Hz^{-1/2}$)
- GDD lambaları detektör olarak kullanıldığında ışın kaynağına genlik modülasyon uygulamak gerekiyor ("Amplitude Modulation (AM)"); 90kHz modülasyon frekansı için algıladığı sinyal en büyük olarak ölçüldü. Ekipmanların limitasyonları nedeniyle daha yüksek modülasyon frekansları araştırılmadı, bu frekansın MHz civarı olduğunu tahmin ediyoruz
- Optimize edilen zamana dayalı THz ölçüm sistemleri ve kurulan sürekli THz ışın kaynağı sistemleri ile yaptığımız ölçümlerde anot-katot arası mesafenin belli frekansların yapıdan geçişini etkilediğini gözlemledik.
- Genel olarak ticari olarak satın alınabilen deşarj lambalarının anot-katot arası mesafesinin yaklaşık olarak 1mm olması ile etkileştiği rezonant frekans tayfın 250-350GHz arası frekanslara denk düşmesi şu sonucu destekliyor: ışın ile plazmanın etkileşimini arttırmak için anot-katot arası mesafesi dalga boyu ile orantılı olmalı.
- CST Microwave Studio programını kullanarak yaptığımız ilk benzetim çalışmalarında anot-katot arası mesafeye bağlı olarak plazmanın dielektrik fonksiyonu deşarj sırasında belli frekans aralıkları için minimum geçiş gösterdi. Bu çalışmaların üzerinde yoğunlaşarak anot-katot geometrisini optimize etmeyi hedefliyoruz.

Yukarıda alınan sonuçların bir kısmı uluslararası konferansta tam makale bildiri olarak yayınlandı, diğer bir kısmı ise uluslararası (SCI-E) hakemli bir dergide yayınlandı. Projede yapılan çalışmalar bir yüksek lisans öğrencisinin tez çalışmalarını destekledi diğer lisans, doktora düzeydeki öğrencilerin de araştırmalarını destekledi.

6.1. Elde Edilen Başarılar ve İleriye Dönük Projelendirme

Önerilen proje çalışmasının temeli kompakt, ucuz, GDD diye adlandırılan deşarj lambaların THz görüntüleme uygulamaları için geliştirilmesidir. Bu teknolojilere dayalı sistemler askeri,

bilimsel, endüstriyel ve tıbbi alanlarda giderek artan sayıda uygulama alanı bulmaktadır. Proje çalışmasında yapılması istenilen işler, örneğin rezonans etkilerin THz algılamadaki öneminin araştırma konusu, literatürde ilk defa tarafımızdan gerçekleştirildiği için proje çalışması özgündür.

Yapılan çalışmalar teknolojik ve ürün imalatı yönünden yeni Ar-Ge projelerine açık bir konudur. Bu kadar geniş uygulamaları olan bu uzak kızıl ötesi alanın ülkemizde geliştirilmesi ve desteklenmesi ileride birçok kuruluşumuzda bilim çalışmalarına hız ve önem katacaktır. Bu proje kapsamında yapılan çalışmalar sayesinde bu aygıtlarda son zamanlarda ilgi çeken plazma-THz etkileşimi konusunu aydınlatılabildik. Proje çıktısı olarak geliştirecek bu teknikler, gelecek yıllarda THz algılama sektörlerine ışık tutacaktır.

7. KAYNAKLAR

Abramovich, A., Kopeika, N. S., and Rozban D., Inexpensive THz focal plane array imaging using miniature neon indicator lamps as detectors, IEEE Sensors Journal, 9, pp. 1181-1184 (2009)

Abramovich, A., Kopeika, N. S., Rozban, D. and Farber, E., Inexpensive detector for terahertz imaging," Appl. Opt., vol. 46, no. 29, pp. 7207-7211 (2007)

Aharon (Akram), A., Rozban, D., Kopeika, N. S., and Abramovich, A., "Heterodyne detection at 300GHz using neon indicator lamp glow discharge detector," Appl. Opt. 52, 4077-4082

Alasgarzade, N., Takan T., Uzun-Kaymak, I. U., Sahin, A. B., Altan, H., "Modulation and frequency response of GDDs in the millimeter wave/THz region," Proc. SPIE 9651, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology VIII, 96510C (2015)

Auston, D. H., Cheung, K. P., Valdmanis, J. A., Kleinman, D. A., "Coherent time-domain far-infrared spectroscopy with femtosecond pulses", Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision , 1, 1278-1278 (1984)

Auston, D. H., Nuss, M. C., "Electrooptic generation and detection of femtosecond electrical transients", IEEE Journal of Quantum Electronics, 24, 184-197 (1988)

Brener, I., Dykarr, D., Frommer, A., Pfeiffer, L. N., Lopata, J., Wynn, J., West, K., and Nuss, M. C., "Terahertz emission from electric field singularities in biased semiconductors," *Opt. Lett.*, 21, 1924–1926 (1996)

Brown, E. R. (2003) *Terahertz Sensing Technology, vol 2: Emerging Scientific Applications & Novel Device Concepts* ed D L Woolard, W R Loerop and M S Shur (Singapore: World Scientific) (2013)

Çınar, K., H. Altan, A. B. Şahin, THz transmission and detection through glow discharge detectors. *Proc. SPIE 8716, Terahertz Physics, Devices, and Systems VII: Advanced Applications in Industry and Defense, 87160J* (2013b)

Çınar, K., H. M. Bozaci, ve H. Altan, Characterization of a glow discharge detector with terahertz time domain spectroscopy," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 7, pp. 2643-2647 (2013a)

Ebbinghaus, S., K Schröck, J C Schauer, E Bründermann, M Heyden, G Schwaab, M Böke, JWinter, M Tani and M Havenith, Terahertz time-domain spectroscopy as a new tool for the characterisation of dusty plasmas, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 15, pp. 72-77 (2006)

Griem, H. R., *Plasma Spectroscopy* (McGraw-Hill, New York, 1964).

Gurevich, D. B., and Podmoshenskii, I. V., *Opt. Spektrosk.*, USSR, 15, 587 (1963)

Hangyo, M., M. Tani, T. Nagashima, H. Kitahara and H. Sumikura, Spectroscopy and Imaging by Laser Excited Terahertz Waves, *Plasma and Fusion Research: Regular Articles*, 2, S1020 (2007)

Heald, M. A., and Wharton, C. B., *Plasma Diagnostics with Microwaves* (Wiley, New York, 1965).

Hopwood, J., C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair, and J. J. Cuomo, Langmuir probe measurements of a radio frequency induction plasma, *J. Vac. Sci. Technol.* 11, 152 (1993)

Hu, B. B., Nuss, M. C., "Imaging with THz waves," *Opt. Lett* 20, 1716 (1995).

Jamison, S. P., Jingling Shen, D. R. Jones, R. C. Issac, B. Ersfeld, D. Clark, and D. A. Jaroszynski, Plasma Characterization with terahertz time-domain measurements, *J. Appl. Phys.*, 93, pp. 4334-4336 (2003)

Kolner, B. H., P. M. Conklin, N. K. Fontaine, R. A. Buckles, and R. P. Scott, Time-resolved pulsed-plasma characterization using broadband terahertz pulses correlated with fluorescence imaging, *Appl. Phys. Lett.*, 87, 151501 (2005)

Kolner, B. H., R. A. Buckles, P. M. Conklin, and R. P. Scott, Plasma characterization with terahertz pulses, *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, 14, pp. 505-512 (2008)

Kopeika, N. S., , Theory of a fast, sensitive, submillimeter wave glow discharge detector, *International journal of Infrared and Millimeter Waves*, 5, 1333 (1984)

Kopeika, N. S., and Farhat, N. H., Video detection of millimeter waves with glow discharge tubes: Part I—Physical description; Part II—Experimental results, *IEEE Transactions on Electro Dev.*, ED-22, pp. 534-548 (1975)

Krushelnick, K., A. Ting, C. I. Moore, H. R. Burris, E. Esarey, P. Sprangle, and M. Baine, Plasma channel formation and guiding during high intensity short pulse laser plasma experiments, *Phys. Rev. Lett.* 78, 4047 (1997)

Mittleman, D. M., Jacobsen, R. H., Nuss, M. C., T-ray imaging, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2, pp. 679-692 (1996)

Nahata, A., Yardley, J. T., and Heinz, T. F., “Two-Dimensional Imaging of Continuous-Wave Terahertz Radiation using Electro-Optic Detection,” *Appl. Phys. Lett.* 81, 963 (2002).

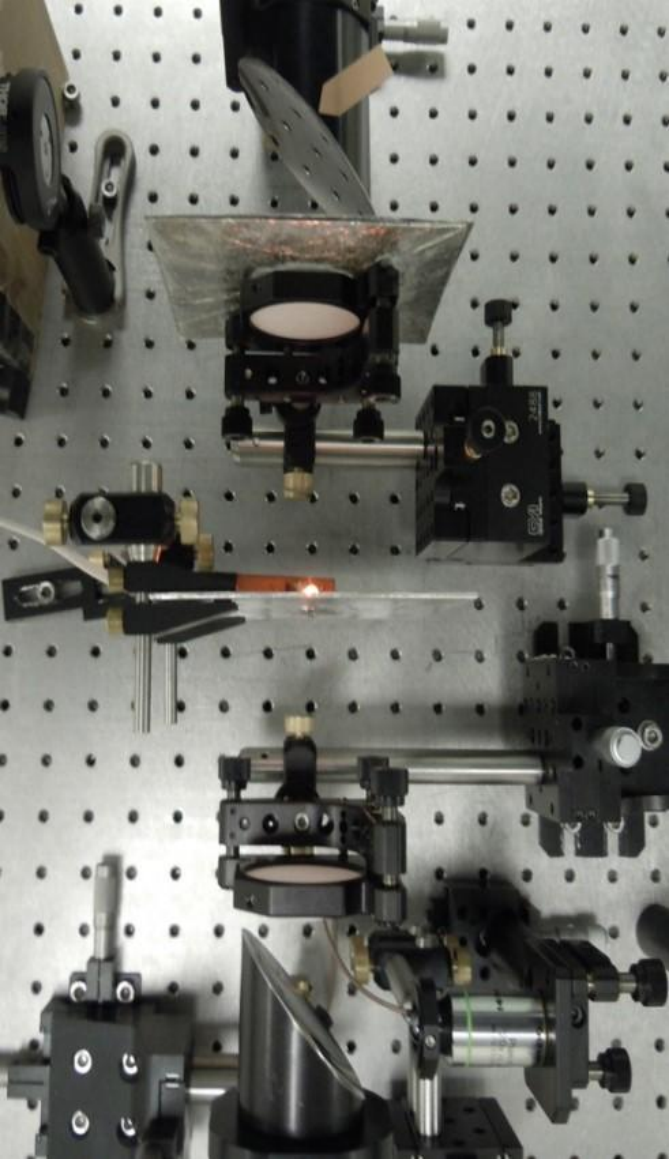
Rozban, D., N. S. Kopeika, A. Abramovich, and E. Farber, THz polarization effects on detection responsivity of glow discharge detectors (GDDs), *J. Appl. Phys.*, 103, 093306 (2008)

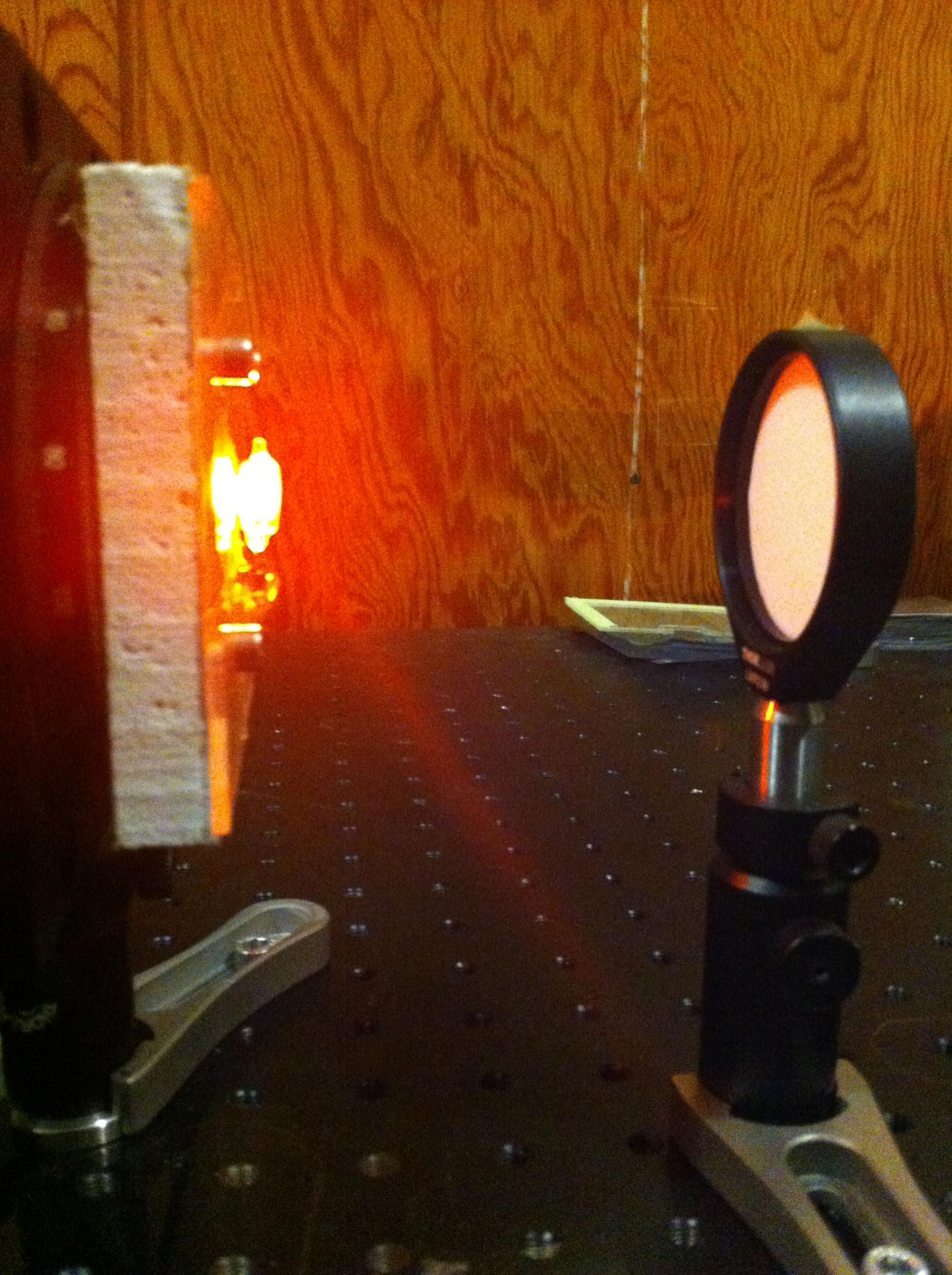
Siegel, P. H., Terahertz technology, *IEEE Microwave Theory and Techniques* 50, 910 (2002)

Takan, T., Alasgarzade, N., Uzun-Kaymak, I. U., Sahin, A. B., Altan, H., “Detection of far-infrared radiation using glow discharge detectors,” *Optical and Quantum Electronics*, 48, 292 (2016)

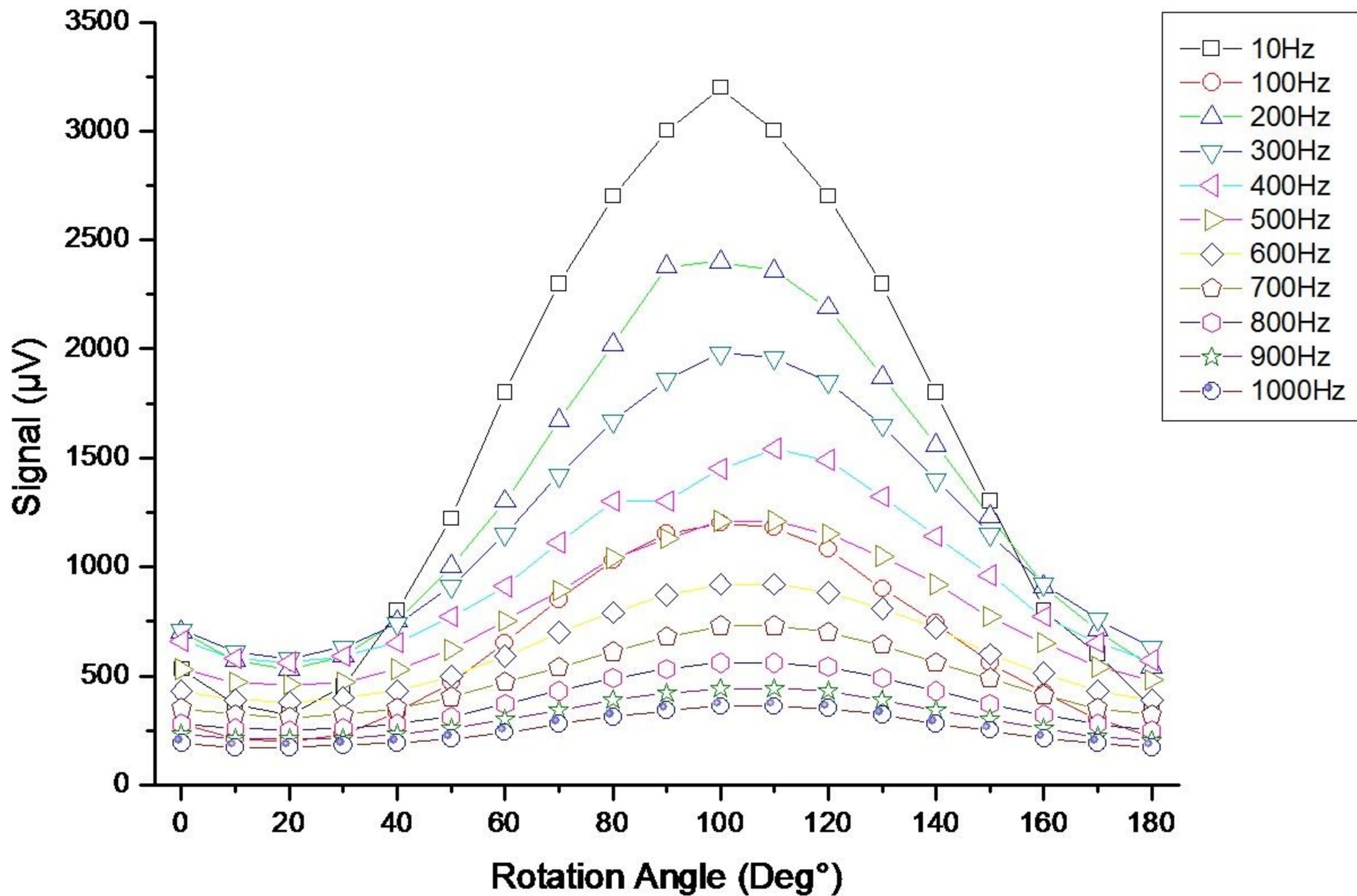
Wu, Q., Hewitt, T. D., Zhang X.-C., Two-dimensional electro-optic imaging of terahertz beams, *Applied Physics Letters*, 69, 1026 (1996)

Zhang, X.-C., Jin, Y., Hu, B. B., Li, X., Auston, D. H., "Optoelectronic study of piezoelectric field in strained-layer superlattices", *Superlattices and Microstructures*, 12, 487-490 (1992)

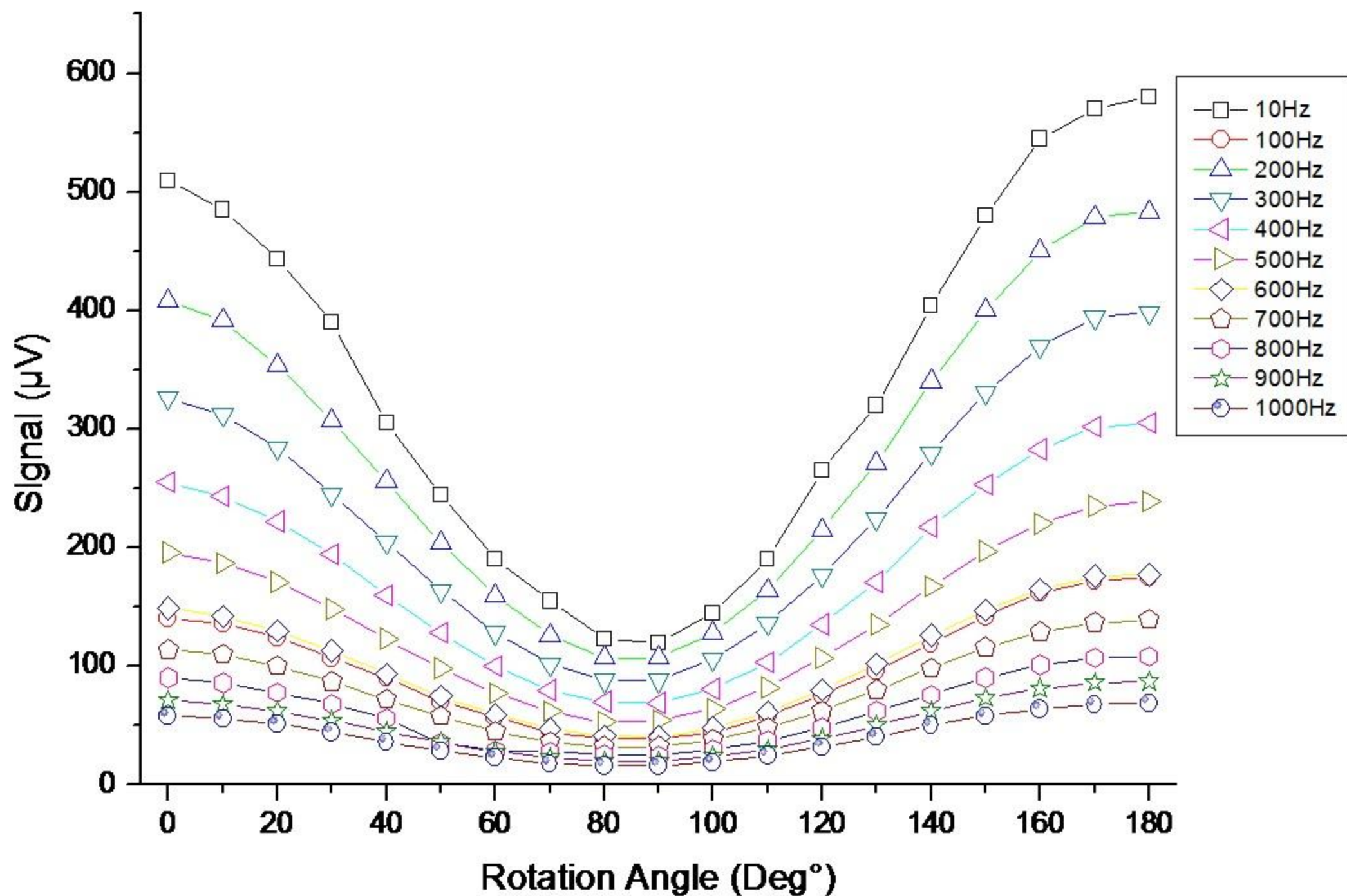




N523(*)



N517



TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. HAKAN ALTAN
Proje No:	113F321
Proje Başlığı:	Terahertz (Thz) Algılama Uygulamaları İçin Oda Sıcaklığında Çalışan Deşarj Lambaların Karakterizasyonu
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	NATAN KOPEİKA (Yurt Dışı)
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2014 - 01/03/2016
Onaylanan Bütçe:	264000.0
Harcanan Bütçe:	229268.49

TÜBİTAK

<p>Öz:</p>	<p>İlk olarak 1970'lerde araştırılmaya başlayan bir konu olan deşarj lambaları kullanarak THz/milimetre dalga boyu algılama yöntemi günümüzde THz tekniklerine olan ilgi ile tekrar gündeme gelmiştir ve yakın zamanda kendi yaptığımız çalışmalar ile uluslararası alanda yoğun ilgi görmektedir. MM dalga boyu/THz algılama için kullanılan bu tip lambaların ucuz olmaları, gerek oda sıcaklığında çalışırken THz dalga boylarını yüksek hassasiyetle tespit edebilmeleri, gerekse de plazmadan geçerken bazı THz frekansların kontrol edilerek filtreleyebilmesi bu tip yapıların farklı sivil ve savunma uygulamalarında kullanılabileceklerini göstermektedir. Proje kapsamında yaptığımız çalışmalarda, deşarj lambalarında görülen bu rezonant etkilerin THz algılamadaki rolünü belirleyebilmek için ticari olarak satılan farklı lambaları hem zamana dayalı THz ölçüm sistemlerimiz ile hem de proje kapsamında geliştirdiğimiz sürekli ışımaya yapan yüksek frekans THz ölçüm sistemleri ile karakterize ettik. İki türlü ışık kaynağı geliştirildi: 80-125GHz arası ışımaya yapan, bu frekans tayfında 1GHz'lik dilimlerde 20mW ortalama güç üreten mm-dalga boyu ışın kaynağı ve 260-380GHz arası ışımaya yapan, bu frekans tayfında 1GHz'lik dilimlerde 1mW ortalama güç üreten THz ışın kaynağı. İki sistem için frekansları hava boşluğuna taşımak için ayrı horn antenler kullanıldı. MM dalga boyu ışın kaynağı için konik bir horn anten yapısı kullanılırken, THz ışın kaynağı için piarmit horn anten yapısı kullanıldı. Dağılan ışın kaynağın Gaussiyen ışın dağılımı görünüşünü plano-konveks mercekler kullanarak topladık ve deşarj lamba yapısına odakladık. Deneylerin bir sürümünde deşarj lamba yapısını detektör olarak kullandık, diğer bir sürümünde ise içinden geçen frekansların şiddetlerini bir Golay Cell detektör yardımıyla ölçtük. Deşarj lambaları ışın algılama için kullanıldığında literatürde 'Glow Discharge Detector (GDD)' olarak adlandırılmaktadır. GDD lambaları ile bu ölçümlerde şu sonuçları elde ettik:</p> <p>?GDD lambaları detektör olarak hem mm dalga boyları hem de THz frekansları için ışının kutuplaşma yönüne hassas (anot-katod arası elektrik alan yönü ışın elektrik alanına paralel ya da anti paralel olduğu durumlarda algıladığı sinyal maksimum, dikay olduğu durumlarda algıladığın sinyal minimum)</p> <p>?GDD lambaları hem optik eksene paralel hem de optik eksene dik konumda mm dalga boyu/THz ışınlarını algılayabiliyor</p> <p>?GDD lamba detektör hassasiyeti iki frekans aralığı için neredeyse Golay Cell cihazına eşit (nW/Hz-1/2)</p> <p>?GDD lambaları detektör olarak kullanıldığında ışın kaynağına genlik modülasyon uygulamak gerekiyor (?Amplitude Modulation (AM)?); 90kHz modülasyon frekansı için algıladığı sinyal en büyük olarak ölçüldü. Ekipmanların limitasyonları nedeniyle daha yüksek modülasyon frekansları araştırılmadı, bu frekansın MHz civarı olduğunu tahmin ediyoruz</p> <p>?Optimize edilen zamana dayalı THz ölçüm sistemleri ve kurulan sürekli THz ışın kaynağı sistemleri ile yaptığımız ölçümlerde anot-katod arası mesafenin belli frekansların yapıdan geçişini etkilediğini gözlemledik.</p> <p>?Genel olarak ticari olarak satın alınabilen deşarj lambaların anot-katod arası mesafesinin yaklaşık olarak 1mm olması ile etkileştiği rezonant frekans tayfın 250-350GHz arası frekanslara denk düşmesi şu sonucu destekliyor: ışın ile plazmanın etkileşimini arttırmak için anot-katod arası mesafesi dalga boyu ile orantılı olmalı.</p> <p>?CST Microwave Studio programını kullanarak yaptığımız ilk benzetim çalışmalarında anot-katod arası mesafeye bağlı olarak plazmanın dielektrik fonksiyonu deşarj sırasında belli frekans aralıkları için minimum geçiş gösterdi. Bu çalışmaların üzerinde yoğunlaşarak anot-katod geometrisini optimize etmeyi hedefliyoruz.</p> <p>Ucuz, oda sıcaklığında yüksek hassasiyetle çalışan THz detektör teknolojilerin geliştirilmesi eşi benzeri olmayan bir katkı sağlayacağına inanmaktayız.</p>
<p>Anahtar Kelimeler:</p>	<p>Deşarj lambaları, plazma, terahertz, milimetre dalga boyları, foton-plazma etkileşimleri</p>
<p>Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:</p>	<p>Hayır</p>
<p>Projeden Yapılan Yayınlar:</p>	<p>1- Detection of Far-Infrared Radiation using Glow Discharge Detectors (GDDs) (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 2- Detection of far-infrared radiation using glow discharge detectors (Makale - Diğer Hakemli Makale), 3- Investigating of Glow Discharge Detectors (GDDs) as a mm-wave/THz Radiation Detection Tool (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 4- Modulation and frequency response of GDDs in the millimeter wave/THz region (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p>