

**Terahertz Dalgaları Duyarlı Soğutmasız  
Vanadyum Oksit Bolometre Dizisi**

**Program Kodu: 1002**

**Proje No: 115F549**

Proje Yürütücüsü:  
**Prof. Dr. Lütfi ÖZYÜZER**

MART 2017

İZMİR

## Önsöz

Bu proje sayesinde İYTE altyapısı ile bolometre malzemesi olarak kullanılacak algılayıcı malzemenin ve bolometre yapımı için gerekli basamakların optimizasyonu yapılmıştır.

Doktora öğrencisi olan ve tez çalışmalarını bu proje ile devam ettiren Araştırma Görevlisi Hakan Alaboz'a, Yasemin Demirhan'a ve doktora öğrencisi Batuhan Mulla'ya proje kapsamında yürütülmesi gereken deneysel ve nümerik çalışmaları yapmış olduklarından dolayı teşekkür ederiz.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) 115F549 no'lu bu projeye maddi olarak yapmış olduğu katkılardan dolayı teşekkür ederiz.

## İçindekiler

Önsöz.....	i
İçindekiler.....	ii
Şekil Listesi.....	iii
Tablo Listesi.....	vi
Proje Özeti.....	vii
Abstract.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Terahertz bölgesi ve uygulama alanları.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	6
2.1 Vanadyum oksit fazları ve kullanım alanları.....	6
2.2 Bolometre malzemesi olarak çoklu oksit fazı içeren vanadyum ince filmleri.....	8
2.3 Vanadyum oksit tabanlı bolometreler.....	11
3. MOTİVASYON.....	16
4. DENEYSEL.....	18
4.1 Altaş Seçimi ve Silikonun Termal Oksitlenmesi.....	18
4.1.1 Teorik.....	18
4.1.2 Deneysel.....	20
4.2 VO <sub>x</sub> :Au İnce Filmlerinin Manyetik Saçtırma Yöntemi ile Üretimi.....	22
4.2.1 Teorik.....	22
4.2.2 Deneysel.....	23
4.3 Elektriksel Karakterizasyon.....	26
4.4 XRD Yapısal Karakterizasyon.....	29
4.5 SEM analizi.....	32
4.6 CST Microwave Studio Anten Simülasyonları.....	34
4.6.1 Teorik.....	34
4.6.2 Simülasyon.....	35
4.7 Litografi Basamakları.....	42
4.8 THz Görüntüleme Sistemi.....	54
4.8.1 Teorik.....	54
4.8.2 Deneysel.....	65
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	70
Kaynaklar.....	72

## Şekil Listesi

Şekil 1 Kahve yaprağının THz görüntüleme sistemi kullanılarak elde edilmiş görüntüsü.....	2
Şekil 2 Bolometrenin Temel Çalışma Prensipleri.....	3
Şekil 3 İki şekilde de köprü altına bir boşluk açılarak dedektörün performansı artırılmıştır. İki şekilde de ölçek 10 $\mu\text{m}$ dir (Cibella vd., 2011) a) Niobiyumdan yapılmış bir sıcak elektron bolometresi b) Schottky bariyer diyodu .....	4
Şekil 4 Bazı vanadyum oksit fazlarının kristal yapıları (Rampelberg vd., 2015).....	6
Şekil 5 $\text{VO}_2$ nin yapısal değişimi ve direnç değişimi (Budai vd., 2014) .....	7
Şekil 6 Yüksek TCR değerine sahip fakat faz geçişi gösteren $\text{VO}_x$ film (Wang vd., 2013).....	9
Şekil 7 a)Kuru ve b)ıslak termal oksitleme sistemlerinin şematik gösterimi.....	19
Şekil 8 Oluşan silikon oksit katmanı ve onun için harcanan silikon arasındaki ilişki ...	19
Şekil 9 HRFZSi pul ların 0.3 ile 1.5 THz arası geçirgenlik ölçümü .....	20
Şekil 10 Islak Oksitleme için kurduğumuz oksitleme düzeneği .....	22
Şekil 11 DC Manyetik saçtırma sisteminin şematik görünümü .....	23
Şekil 12 DC Manyetik Saçtırma Sisteminde oluşturulan plazma .....	24
Şekil 13 Ölçümü yaptığımız Janis mikro uç istasyonu .....	26
Şekil 14 Kaplama sırasındaki oksijen basınçlarının değişimi ile $\text{VO}_x$ filmlerinin özdirenç-sıcaklık davranışı arasındaki ilişki (H. Alaboz vd., 2017) .....	27
Şekil 15 %10 oksijen basıncına sahip altın katkılı yapılmış $\text{VO}_x:\text{Au}$ filmlerin özdirenç sıcaklık ilişkisi (H. Alaboz vd., 2017) .....	27
Şekil 16 %10 oksijen basıncına sahip $\text{VO}_x$ filmlerin ısı işleminden sonra elde ettiğimiz özdirenç sıcaklık ilişkisi (H. Alaboz vd., 2017) .....	28
Şekil 17 İşlem görmemiş $\text{VO}_x$ ince film (H. Alaboz vd., 2017).....	29
Şekil 18 Isıl işlem görmüş $\text{VO}_x$ ince film (H. Alaboz vd., 2017).....	30
Şekil 19 İşlem görmemiş $\text{VO}_x:\text{Au}$ ince film (H. Alaboz vd., 2017).....	30
Şekil 20 Isıl işlem görmüş $\text{VO}_x:\text{Au}$ ince filmi (H. Alaboz vd., 2017) .....	31
Şekil 21 $\text{VO}_x$ filmlerin a)ısıll işleme tabi tutulmadan b)ısıll işleme tabi tutulduktan sonra c) Yanal alan görüntüsü d) $\text{VO}_2$ ağırlıklı filmlerin yüzey görüntüsü (H. Alaboz vd., 2017).....	33
Şekil 22 Kendini tamamlayan (self-complementary) log periyodik anten (Stutzmann ve Thiele, 1998) .....	34
Şekil 23 Papyon anten tasarımı .....	36
Şekil 24 CST MS ile tasarlanan papyon antenin yapının tüm katmanlarının gerçeğe uygun şekilde tasarımı .....	37
Şekil 25 Papyon tasarımında sadece l parametresinin değişimiyle rezonans frekansının değişimi ( $w=5$ , $k=15$ , $d=40 \mu\text{m}$ ) .....	37
Şekil 27 Papyon tasarımında sadece d parametresinin değişimiyle rezonans frekansının değişimi ( $l=96$ , $w=5$ , $k=15 \mu\text{m}$ ) .....	38
Şekil 26 Papyon tasarımında sadece w parametresinin değişimiyle rezonans frekansının değişimi ( $d=40$ , $k=15$ , $l=96 \mu\text{m}$ ).....	38

Şekil 28 Papyon anten tasarımında sadece k parametresinin değişimiyle rezonans frekansının değişimi ( $l=96$ , $w=5$ , $d=40 \mu\text{m}$ ) .....	39
Şekil 29 0.67 THz de rezonans veren papyon tasarımı ( $k=15$ , $w=5$ , $l=126$ ve $d=40 \mu\text{m}$ ) .....	40
Şekil 30 CST MS ile tasarlanan log periyodik antenin simülasyondaki tasarımının görüntüsü.....	41
Şekil 31 Tasarladığımız log periyodik antenin yansıma katsayısı ve rezonans frekansı .....	41
Şekil 32 Bakır plakadan gölge maske yapımı .....	42
Şekil 33. El yapımı gölge maske ile litografi ve aşındırma sonrası elde edilen yapının optik mikroskop görüntüsü.....	43
Şekil 34. El yapımı gölge maske ile litografi ve aşındırma sonrası elde edilen yapının Dektak profilometre ile analizi.....	43
Şekil 35 Autocad yazılımı ile tasarladığımız UV litografi maskesi .....	44
Şekil 36 Yapılmış olan UV maskenin 3C, 4C, 5C hücrelerinin tamamının ve 4B hücresinin bir kısmının optik mikroskop görüntüsü .....	44
Şekil 37 Litografi Basamakları .....	45
Şekil 38 İlk litografi basamağından sonraki köprü yapıları ve hizalama işaretlerinin SEM görüntüsü .....	46
Şekil 39 İkinci Basamakta yapının optik mikroskop görüntüsü .....	47
Şekil 40 Negatif AZ® nLOF 2020 resistin litografi sonrasında oluşan undercut yapısı (Microchemicals, 2013).....	48
Şekil 41 Negatif bir resistle yapılan lift-off işlemi .....	48
Şekil 42 Pozitif AZ® MiR 701 resistin litografi sonrasında oluşan yapısı (Microchemicals, 2013).....	49
Şekil 43 Pozitif resist ve toluene yardımıyla yapılmış lift-off aşamaları .....	50
Şekil 44 2000 RPM de yapılan kaplama ile elde edilen resist kalınlığı .....	51
Şekil 45 3000 RPM de yapılan kaplama ile elde edilen resist kalınlığı .....	52
Şekil 46 4000 RPM de yapılan kaplama ile elde edilen resist kalınlığı .....	52
Şekil 47 Termal buharlaştırma sonrası yapının optik mikroskop görüntüsü. Bar $500 \mu\text{m}$ yi göstermektedir. ....	53
Şekil 48 a) YIG ayarlı Osilatör kullanılarak, b)Ayarlanabilir Sentezleyici kullanılarak Terahertz Görüntüleme Sistemi şematik görünümü c) Terahertz Görüntüleme Sistemi Resmi .....	54
Şekil 49 Osilatör uygulaması için bir YIG küre üzerinde iletken döngü .....	55
Şekil 50.(a) Harici $H_0$ manyetik alan etkisi altındaki YIG küre etrafındaki çiftleme döngüsü çizimi (b) çıktı olarak salınım yapan sinyalin üretilebileceği paralel LC devresi'nin basit çizimi.....	56
Şekil 51. YIG osilatörünün resmi .....	57
Şekil 52 Çıkış frekansına karşılık YIG kontrol voltajı grafiği .....	57
Şekil 53 YIG osilatör'ün ölçtüğümüz zamanla frekans grafiği .....	58
Şekil 54 VDI 0.5-20 GHz Frekans Sayacı .....	59
Şekil 55 Dolaylı (PLL) frekans sentezleyici .....	60

Şekil 56 VDI sentezleyici ürün resmi ve özellikleri .....	62
Şekil 57 a) 0.518 THz b) farklı değerlerde VDI sentezleyici ile üretilen THz dalgaları frekans zaman grafiği .....	62
Şekil 58 VDI WR1.5 AMC .....	63
Şekil 59 WR1.5 AMC'nin frekansa karşılık çıkış gücü grafiği .....	64
Şekil 60 WR1.5 AMC için Diyagonal boyuz antenin şematik görünümü .....	64
Şekil 61 Diyagonal boynuz anten ile birlikte VDI WR1.5 AMC'nin resmi .....	65
Şekil 62 a)YIG Osilatör ile b) Sentezleyici ile Golay hücresinin algıladığı sinyalin zamana bağlı ölçümü .....	66
Şekil 63 Tek ekseninde taranan malzemelerin resimleri, a) bakır metal b) boş karton ..	66
Şekil 64 Bakır çubuğun THz dalgası ile taranma sonucu .....	67
Şekil 65 a) boş paketleme kartonunun b) içerisinde metal olan paketleme kartonunun THz ile taranma sonuçları .....	68
Şekil 66 Gürültünün azaltılıp içerisinde metal olan paketleme kartonunun THz ile taranma sonuçları .....	68
Şekil 67 Önceki verinin (Şekil 66) 2 adımda çizdirilen tarama görüntüsü .....	69

## Tablo Listesi

Tablo 1. VOx in rakiplerine göre üstün ve dezavantajlarının karşılaştırılması.....	16
Tablo 2. Islak ve kuru oksitleme işlemlerinde oksit büyüme hızları.....	21
Tablo 3. Bütün filmler için ortak olan kaplama koşulları.....	24
Tablo 4. Oksijen basıncı ve altın katkılamasının TCR üzerine etkisi.....	25
Tablo 5. Papyon anten tasarımında kullanılan parametreler.....	39
Tablo 6 Kontaklar için termal buharlaştırma parametreleri.....	51
Tablo 7 AZ1505 için farklı dönme hızlarında elde edilen farklı kalınlıklar.....	51
Tablo 8 YIG osilatörünün özellikleri.....	57
Tablo 9 VDI WR1.5AMC bazı standart parametreleri.....	63
Tablo 10 WR1.5 AMC için Diyagonal boyuz antenin özellikleri.....	65

## Proje Özeti

Terahertz bölgesindeki araştırmalar ve bunun sonucu olan teknolojik gelişmeler son dönemde hızla artmıştır ve günümüzde terahertz bölgesinin uygulama alanları güvenlikten medikal görüntülemeye, patlayıcı tespitinden, örneklere zarar vermeden yapılabilen testlere ve geniş bant kablosuz iletişime kadar birçok alana yayılmıştır. Terahertz ışması birçok plastikten, kumaşlardan geçer, metallerden yansır ve bilinen birçok patlayıcı malzemesinin tespitinde kullanılır. Bu avantajları ve uygulama alanlarının büyüklüğüne rağmen, ucuz, kompakt ve soğutmasız THz dedektör yapmanın zorluğu sektörün yavaş ilerlemesine neden olmaktadır. İstenilen bu özellikler sağlansa bile yapılan dedektörlerin performansı istenilen uygulama için yeterli olmayabilir. şu anda yaygın olarak THz alanında kullanılan dedektörler, piroelektrik, Schottky bariyer diyotları, alan etkili transistörler, kolay hücreleri olarak sayılabilir. Düşük duyarlılık, bir dizi haline getirme zorluğu ve düşük hızda çalışmaları bu dedektörlerin dezavantajlarıdır. Kızılötesi bölgede şu anda yaygın olarak kullanılan dedektörler, amorf silikon ve  $VO_x$  tabanlı olanlardır.  $VO_x$  dedektörler amorf silikondan yapılan dedektörlere göre daha düşük Johnson gürültüsüne sahip olmaları, soğutma gereksinimleri olmaması, düşük maliyetli olmaları ve kolay olarak bir dizi haline getirilebilmeleri nedeniyle daha çok tercih edilirler. Kızılötesi bölgede bu dedektör MEMS tabanlı yapılabilmektedir. Kızılötesi alanındaki bu başarısı nedeniyle  $VO_x$ , terahertz bölgesi içinde gelecek vaat etmektedir. Fakat THz bölgesinde bu tip dedektörlerin yapılması için, büyük dalgaboyu nedeniyle MEMS tabanlı yapılamayıp yeni tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu proje kapsamında DC manyetik saçtırma sistemi ile hazırlanan  $VO_x: Au$  ince filmler yüksek direnç sıcaklık katsayısı (TCR) değerlerine sahip olmaları için optimize edilmiş, THz bölgesinde çalışacak anten tasarımı yapılmış ve sonrada bolometre yapımında kullanılmıştır. TCR değerini iyileştirmek büyük oranda gaz oranları gibi kaplama parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler en yüksek TCR değeri ve Au katkılama ile en düşük direnç elde edilince kadar değiştirilmiştir. Özgün olarak, yüksek özdirenç silikon yongalar üzerine büyütölen ve altın katkılanan bu filmler, bolometrenin THz bölgesinde verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla kullanılabilir. Aygıtın üzerine yapılan anten tasarımı, grubumuzun elinde bulunan 0.5 ile 0.75 THz arası kaynağa tepki vermesi için profesyonel bir yazılım olan CST Microwave Studio ile yapılmıştır. Tasarımı yapılan anten ve bolometre dizisi için UV Maske yapılmış ve litografi için kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** THz, Soğutmasız bolometre, Vanadyum oksit



## Abstract

Terahertz (THz) studies and hence technological improvements have increased and application area of THz region is used in many areas such as security, medical imaging, detection of explosives, non destructive tests and wireless communication. THz radiation pass through many plastic materials, clothing but it reflects from metals and it is used in detection of many well known explosive materials. Other than explosives, drugs can be easily found due to their special characteristics in THz region. In spite of mentioned advantages and wide range of application area, constructing a detector which is low cost, compact and uncooled is difficult and this causes industry to improve slowly. Even if all the desired properties are satisfied, the detector's performance might not be enough for the desired application. Now, detectors which are widely used in THz region are pyroelectric, Schottky barrier diodes, field effect transistors and they have disadvantages such as low sensitivity, hard to make an array and low speed. The detectors that are widely used in this region are amorphous silicon and  $VO_x$  based ones. These detectors can be made on microelectro mechanical system (MEMS) based in infrared region.  $VO_x$  will be a premium technology for THz region due to its success at infrared region. They have low cost, low Johnson noise and making an array is possible. These detectors in THz region can't be made on MEMS based because of its high wavelength. In this project,  $VO_x: Au$  thin films is produced that have desired specifications and antenna is designed that operates at THz region for THz bolometer.  $VO_x: Au$  thin films which will be prepared by DC magnetron sputtering, used in bolometer production after they are optimized to have temperature coefficient resistance (TCR). TCR is dependent on mostly sputtering conditions such as gas pressure. These parameters changed until the best TCR values and low resistance values is achieved and Au doping decreased the high resistance values to acceptable levels. Originally, these thin films which sputtered on high resistivity silicon wafers and doped with Au, provide the bolometer to operate in THz region efficiently. The antenna design on the device made by professional software, CST microwave studio respond our THz source that have frequency between 0.5 and 0.75 THz.

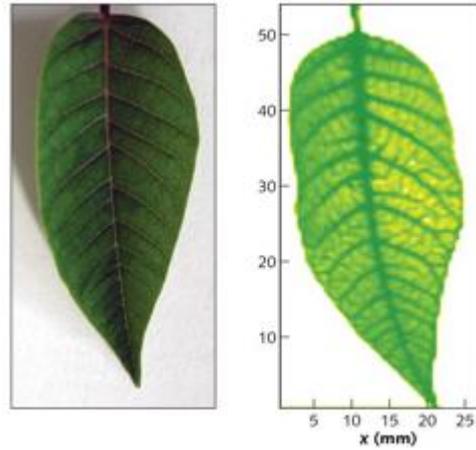
**Keywords:** THz, Uncooled bolometer, Vanadium oxid

# 1.GİRİŞ

## 1.1Terahertz bölgesi ve uygulama alanları

Terahertz bölgesi elektromanyetik spektrumda 0.1-10 THz olarak tanımlanmıştır (Tonouchi 2007). Bu bölgeye elektronik veya fotonik olmak üzere iki bakış açısıyla yeni kaynaklar ve dedektörler kazandırılmaya çalışılmaktadır. Spektrumun bu bölgesi medikal görüntülemeye (Woodward vd., 2002; Woodward vd., 2003), kablosuz iletişime (Koenig vd., 2013; Federici ve Moeller 2010) güvenlik için görüntülemeye yarayan sistemlerden (Baker vd., 2007; Liu vd., 2006), askeri amaçlı saha gözetlemeye (Appleby ve Anderton 2007) ve mayın tespitine (Luukanen vd., 2006) kadar birçok alanda uygulaması olan bir bölümdür. Son 20 yılda yapılan ileri malzeme araştırmaları, daha güçlü THz kaynakları ortaya çıkarmış ve bu ileri fizik araştırmaları, ticari araştırmalarla geliştirilerek THz bölgesinin önemini artırmıştır. Bu bölgedeki dönüm noktaları, time domain spektroskopisi (TDS), THz görüntüleme ve lineer olmayan etkiler kullanılarak elde edilen güçlü THz sinyalleridir (Siegel 2002). Bu gelişmelerin sonucunda, hem sinyal kaynaklarına hem de bu sinyali algılayacak hızlı ve hassas dedektör sistemlerine olan ilgi son 10 yılda büyük ölçüde artmıştır. Spektrumun bu alanına yoğunlaşan çalışmalar, temelde iki önemli başarıyı hedeflemiştir. Bunlardan ilki bu bölgede güçlü sinyal elde edilmesi diğeri ise hassas ve hızlı dedektörler üretilmesidir. Grubumuz bu bölgede güçlü sinyal elde edilmesi ile ilgili çalışmalar yapmaktadır ve sonuçları uluslararası dergilerde yayımlanmıştır (Ozyuzer vd., 2007, 2009; Turkoglu vd., 2012, 2013; Demirhan vd., 2015). Bu alandaki tecrübemizin üzerine SANTEZ 'de yürüten bir diğer projede yine THz bölgesinde dedektör kısmıyla ilgili altyapı oluşturulmuş ve gerekli karakterizasyon sistemleri kurulmuştur. Dedektörler birçok şekilde sınıflandırılabilir ama burada soğutmalı ve soğutması olarak iki genel sınıftan bahsedilecektir. Soğutmalı dedektörlerden gerek yüksek sıcaklık süperiletken (YSS) malzemelerle yapılan bolometreler olsun, gerekse düşük sıcaklık süperiletken (DSS) malzemelerle yapılan bolometreler olsun oda sıcaklığının çok altında çalışırlar ve pahalı soğutma sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Örneğin DSS olan Nb tabanlı bolometreler iyi performans (düşük NEP değerleri gibi) sergilemelerine rağmen, süperiletkenlik geçiş sıcaklığı 4-9 K arasındadır ve bu sıcaklıklarda çalışırlar (Gol'tsman vd., 2005). YSS yapılan bolometreler de soğutma sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Bu değerlere ulaşmak için gereken soğutma sistemleri hem pratik değildir hem de pahalıdır. Soğutmasız dedektörlerde ise piroelektrik, golay hücresi, amorf silikon ve vanadyum oksit ( $VO_x$ ) tabanlı bolometreler bulunur. Bunların dışında son zamanlarda nano malzeme ve nano teknoloji sayesinde

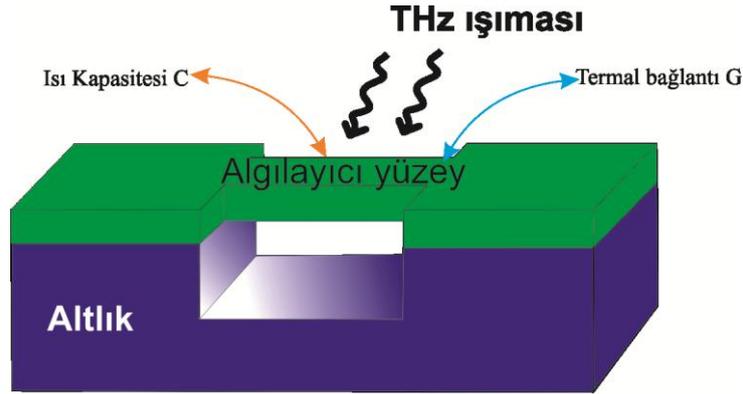
kuantum noktaları (quantum dots) (Shibata vd., 2012), kuantum nano telleri (quantum nano wires) (Vitiello vd., 2012), kuantum kuyusu yapıları (Zhou vd., 2012), karbon nanotüp (Rinzan vd., 2012) ve grafen tabanlı (Vicarelli vd., 2012) THz dedektörleri gibi dedektörler yapılmıştır. Bu dedektörlerin bir kısmını dizi haline getirmek mümkün olmadığından görüntüleme sürelerinde istenilen değerler elde edilemez. Bu dezavantajları barındırmayan bolometrelerin ise tepki aralıkları istenilenin çok altındadır (Kreisler ve Gaugue 2000). Yani THz bölgesinin altında kalan bölgede (1 THz 'in çok altında) iyi performans değerlerine ulaşırlar (Sizov vd., 2011). Gölge hücreleri geniş bir spektrumda çalışmalarına rağmen modülasyon frekansları birkaç hertzden fazla değildir. Piroelektrik dedektörler oda sıcaklığında çalışsa da onlarında modülasyon frekansları 10 kHz 'i geçmez. Aynı zamanda bu tip dedektörlerde en kısa tepki süresi ve en düşük NEP (gürültü eşdeğer güç) değeri terahertz altı bölgede gözlemlenmiştir. Schottky diyot dedektörlerden ise aynı yonga üzerine bir dizi yapma imkanı yoktur (Rogalski ve Sizov 2011). Bu da görüntüleme süresini kısaltmayı zorlaştırır.



Şekil 1 Kahve yaprağının THz görüntüleme sistemi kullanılarak elde edilmiş görüntüsü

THz görüntüleme Şekil 1 den görüldüğü gibi yapraktaki su miktarını belirleyebilir böylece yaprağın iç yapısını daha net gözlemlemeye olanak sağlar. Görüntüleme süresi, gizli nesnelere tespitinin hızlı bir şekilde yapılması gereken havaalanı güvenlik sistemleri için önemlidir. Dolayısıyla görüntü kalitesi kadar tarama hızının artırılması ve kullanılan dedektörün gereksinimlerinin bu tarz uygulama alanları için pratik hale getirilmesi gerekir. Bahsedilen tüm bu dedektör çeşitleri arasında soğutma gerektirmeyen, dizi haline getirilebilecek, THz bölgesinde çalışacak ve performansı kabul edilebilir düzeyde olan dedektörlere ihtiyaç vardır. İşte bu yüzden kızılötesi bölgede yaygın bir şekilde kullanılan vanadyum oksit tabanlı bolometreleri THz bölgesinde çalışacak şekilde tasarlamak önemlidir.

Temel olarak bolometreler etrafı ile etkileşimi sonucu oluşan sıcaklık değişimi direnç değişimine yol açar ve voltaj veya akım gibi değerlere dönüştürülebilirler. Bolometreler termal dedektörlerdir ve temelde ışımayı algılayıcı bir kısma bağlı sinyal çıktısını okuyan elektronik devreden (ROIC) oluşurlar. Algılayıcı yüzey tarafından emilen sinyal, bu kısmın ısısını artırır ve böylece aygıtın direncinde bir değişim meydana gelir (Şekil 2). Bu değişim sinyal çıktısını okuyan devreye aktarılır ve işlenir. Sinyalin daha iyi odaklanması için bazı optik elemanlar da bu kombinasyona eklenebilir. Belirli bir süre sonunda algılayıcı kısmın ısısı, alttaş yardımıyla tekrar eski haline gelir. Aygıtın bir sinyali algıladıktan sonra, yeni bir sinyali tekrar algılayabilecek duruma gelmesi için gereken süre termal tepki süresi  $\tau$  olarak tanımlanır. İşte algılayıcı kısmın etrafıyla olan termal iletimi G olarak tanımlanır. Diğer önemli bir parametre C olarak tanımlanan algılayıcı kısmın ısı kapasitesidir. Bu dedektörlere sabit akım veya voltaj uygulanır, THz sinyal sonrası direnç değişimi bu şekilde ölçülür. Algılayıcı kısım metal, yarıiletken veya süperiletken malzemeden olabilir. Bu malzemelerin avantaj ve dezavantajlarından ileride bahsedilmiştir.



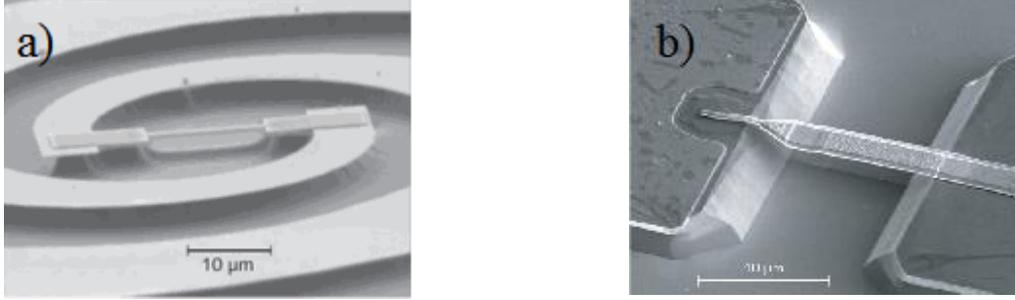
Şekil 2 Bolometrenin Temel Çalışma Prensibi

Termal tepki süresi bolometreler için önemli bir terimdir ve denklem 1'dekilere bağlıdır.

$$\tau = \frac{C}{G} \quad (1)$$

Bu değer mümkün olduğu kadar düşük olması aygıtın performansı açısından önemlidir. Denklemden görülebileceği gibi aygıtın tepki süresini düşürmek için iki farklı yol izlenebilir. Bu yollardan ilki, dedektörün ısı kapasitesinin düşürülmesidir. Bunun için aygıtın algılayıcı yüzey alanının küçültülmesi ve bu kısmı oluşturan ince filmin kalınlığının düşürülmesi gerekir. Bir diğer yöntem ise G değerinin artırılmasıdır. Bu, aygıtın algılayıcı kısmı altına bir boşluk açılması ile sağlanabilir. Literatürde de algılayıcı kısım altına bir boşluk açılarak asılı köprü

yapısı oluşturulmuştur ve aygıtların performanslarının arttığı gösterilmiştir (Cibella vd., 2011). Şekil 3'de bu yaklaşımla tasarlanmış sıcak elektron bolometresi ve Schottky bariyer diyodu görülebilir.



Şekil 3 İki şekilde de köprü altına bir boşluk açılarak dedektörün performansı artırılmıştır. İki şekilde de ölçek 10 μm dir (Cibella vd., 2011) a) Niobiyumdan yapılmış bir sıcak elektron bolometresi b) Schottky bariyer diyodu

Dedektörler için diğer bir önemli terim gürültü eşdeğer güçtür (NEP) ve dedektörün hassasiyetinin temel bir ölçüsüdür. Bu terim de G değerine denklem 2'deki gibi bağlıdır.

$$NEP = \sqrt{(4k_b \gamma T^2 G)} \quad (2)$$

Burada  $k_b$  Boltzmann sabiti, T sıcaklık ve termal yalıtım bağlantılarından kaynaklanan indirgenme faktörüdür. Hassasiyeti yüksek olan bir dedektör yapmak için NEP değeri mümkün olduğu kadar düşürülmelidir. Fakat G değeri artırıldığında termal tepki süresi kısaltılırken, denklem 2'den de görülebileceği gibi NEP değeri artırılmış olur. Bu da tepki süresini düşürürken hassasiyetten ödün verileceği anlamına gelir. Dolayısıyla bu parametreler birbirlerinden bağımsız düşünülemezler. Farklı dedektörlerin gürültü eşdeğer güç değerleri literatürde verilmiştir. Örneğin vanadyumdan yapılmış soğutmasız bolometreler için kızılötesi bölgede elde edilen bu değer  $10^{-10} \text{ W/Hz}^{1/2}$  mertebesindedir (Rogalski, 2012).

NEP birimi W olup genellikle 1 Hz bant aralığı için verilir. Bu durumda birimi  $\text{W/Hz}^{1/2}$  olur. Bir diğer performans ölçüsü duyarlılıktır ve bu değer denklem 3a'daki gibi NEP değerinin tersiyle orantılıdır.

$$D=1/NEP \quad (3a)$$

Normalize duyarlılık veya D-yıldız ise denklem 3b deki gibi tanımlanır.

$$D^* = \frac{\sqrt{\Delta f A}}{NEP} \quad (3b)$$

Burada A dedektörün algılama alanı ve  $\Delta f$  sistem bant aralığıdır. Birimi ise  $(\text{cm.Hz})^{1/2}/W$  dır. Bu değer aynı zamanda dedektörün voltaj duyarlılığına denklem 4'teki gibi bağlanır. Çünkü  $NEP=V_n/R_v$  dir.

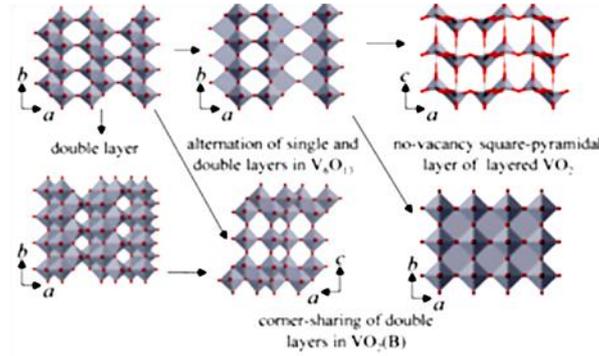
$$D^* = \frac{\sqrt{\Delta f A}}{V_n} R_v \quad (4)$$

Burada  $R_v$  dedektörün voltaj duyarlılığı,  $V_n$  ise toplam voltaj gürültüsünü gösterir. Dedektörler arasında performans karşılaştırması yapılmak istenildiğinde gürültü eşdeğer güç (NEP), tepki süresi ve **normalize** duyarlılık gibi değerlere bakılır. Tepki süresi ve **normalize** duyarlılık dedektörler için diğer belirleyici değerlerdir. Bu değerlerin her biri birbirinden bağımsız olarak geliştirilemez. Değerlerden birinde elde edilen pozitif bir etki diğerine olumsuz olarak yansır. Buna bir örnek olarak **normalize** duyarlılık ve tepki süresi arasındaki ilişki gösterilebilir (Ratches, 2006).

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

### 2.1 Vanadyum oksit fazları ve kullanım alanları

Vanadyum oksit fazları sahip oldukları benzersiz özelliklerden ötürü birçok çalışmada ve uygulamada kullanılmışlardır (Morin 1959; Ko ve Ramanathan 2009; Podraza vd., 2012). Birçok vanadyum oksit fazı kendisine özgü sıcaklıklarda, sıcaklık ve ışık ile tetiklenebilen yalıtkan fazından metal fazına (YMG) geçiş yapar. Vanadyum oksitlerin  $V_2O_3$ ,  $V_3O_5$ ,  $VO_2$  ve  $V_6O_{11}$  gibi bilinen fazlarının yanında daha az bilinen  $V_5O_9$  ve  $V_8O_{15}$  gibi oksit fazları da kendilerine özgü sıcaklıklarda YMG gösterirler. Vanadyum fazları  $V_nO_{2n+1}$  ve Magneli fazları (Magnéli vd.,1948) olarak da bilinen  $V_nO_{2n-1}$  olarak iki grupta kategorize edilebilir. Bu fazlar farklı kristal yapılarında bulunabilirler ve örnek olarak aşağıdaki şekilde bazı vanadyum oksitlerinin kristal yapıları gösterilmiştir.

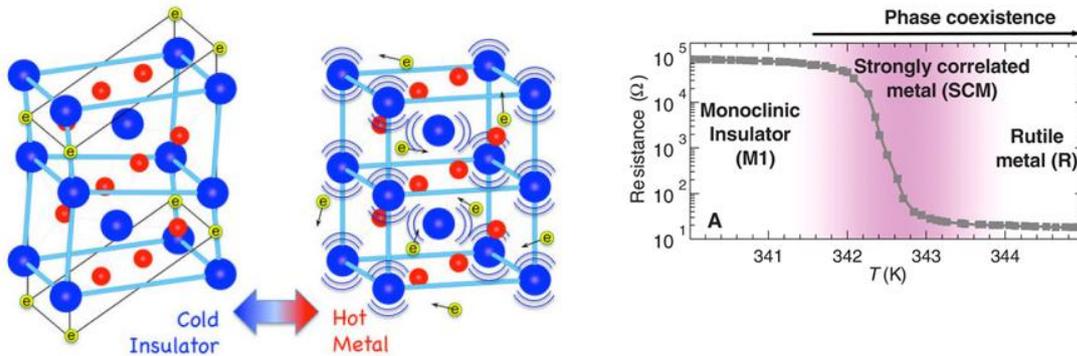


Şekil 4 Bazı vanadyum oksit fazlarının kristal yapıları (Rampelberg vd., 2015)

Daha önce bahsedilen bu YMG nedeniyle vanadyum oksitler birçok uygulama için ideal bir malzeme haline gelmiştir. Sadece YMG değil bunun dışında sahip olduğu özellikleri sayesinde, endüstriyel uygulama kontrolünden askeri gözetlemeye kadar birçok alandaki uygulamada kullanılmaya uygundur. Vanadyum oksitlerinin tek fazlı olarak elde edilmesi oldukça zordur ve genellikle küçük bir yüzde başka bir vanadyum oksit fazını da içerir. Bu projede bahsedilen ve bundan sonra  $VO_x$  olarak kullanılacak vanadyum oksitleri ise genel anlamda birçok farklı vanadyum oksit fazını farklı oranlarda içeren yapılar olarak tanımlanır.

$VO_x$  araştırmacılar tarafından hafıza malzemeleri (Radu vd., 2011), fotovoltaik (Hancox vd., 2011), optik anahtarlama (Choi vd., 2011), filtre (Sanphuang vd., 2016), mikro batarya (Root

2011) gibi farklı alanlarda kullanılsa da asıl uygulama alanı kızılötesi bölgesi için ideal bolometre malzemesi olarak kullanılmasıdır. Baryum stronsiyum titanatın kısıtlamaları, kızılötesi dedektör araştırmacılarını başka bir malzeme bulmaya itmiştir ve doksanların ortalarında Honeywell tarafından üretilip patentlenmiştir (Wood 1995). Günümüzde amorf silikonla birlikte en çok kullanılan kızılötesi dedektör malzemesidir (Rogalski 2009). Metal filmler (Moreno vd., 2007; Shie vd., 1996), YBCO (Jagtap vd., 2012), NbN (Il'in vd., 2009) ve Si-Ge alaşımları gibi daha birçok malzeme dedektörlerde termal algılayıcı kısım olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte  $VO_x$  birçok metal filmde en az beş kat daha iyi direnç sıcaklık katsayısına sahiptir (TCR), aynı TCR değerindeki amorf silikondan daha düşük empedansı vardır, düşük  $1/f$  gürültüsüne sahiptir ve CMOS teknolojisine uyumludur. Bunun yanında üretiminin diğer birçok malzemeye göre daha az maliyetli olması da dedektör teknolojilerinde tercih edilen bir malzeme olmasına yol açmıştır. Vanadyum oksitlerinden en çok bilinen  $VO_2$  68 °C de 4 kat bir öz direnç değişimi göstererek faz değişimi geçirir. Bu açıdan bakıldığında  $VO_2$  nin dedektör malzemesi olarak kullanılabilceği düşünülmüştür fakat bu geçişi gösteren  $VO_2$  filmlerinin üretiminin zor olduğu ve yüksek sıcaklık gerektirdiği daha da önemlisi bu filmlerin direnç değerlerinin dedektör yapımı için çok yüksek olması nedeniyle tercih edilmemişlerdir. Her ne kadar bu geçiş sıcaklığını oda sıcaklığına çekmeye çalışan araştırmalar yapılsa da geçişin ısınma ve soğuma aşamaları arasındaki histerisis değerleri de dedektör kapasitesini kısıtlayan bir özelliktir. Bir örnek olarak oda sıcaklığındaki direnç değeri  $10^4 \Omega\text{cm}$  olan bir filmin soğutmasız bolometreler için direnç değeri kabul edilebilir sınırın çok üzerindedir. Geçiş mekanizmasının tam olarak anlaşılınmış olmasına rağmen geçiş sıcaklığının yerini değiştirmeye yönelik çalışmalar yakın zamanda yayımlanmıştır (Rajeswaran ve Umarji 2016).  $VO_2$  nin bu geçişte gerçekleştirdiği yapısal değişim ve direnç değişimi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5  $VO_2$  nin yapısal değişimi ve direnç değişimi (Budai vd., 2014)



VO<sub>2</sub> filmlerin aksine VO<sub>x</sub> filmler geniş bir sıcaklık aralığında daha dengeli bir davranış sergilerler. VO<sub>x</sub> filmler 25-100 °C arasında bu şekilde dengeli bir davranış göstermelerine rağmen yine de direnç değerleri oldukça yüksektir. Bu soruna çözüm Smith ve arkadaşları tarafından (Smith vd., 2014) ortaya atılmış ve direncin altın katkılmasıyla düşürülebileceği dahası bu katkılamanın elektriksel özellikleri çok değiştirmeden yapılabileceği gösterilmiştir. Bu pozitif özellik de VO<sub>x</sub> filmlerin düşük 1/f gürültü değeri, uygun ısı zaman sabiti ve düşük maliyetin yanına eklenmiştir (Rogalski 2009). Bu avantajları nedeniyle VO<sub>x</sub> filmler bolometre malzemesi olarak kızılötesi için reaktif saçtırma (Kusano 1988), buharlaştırma (Case 1984), metal organik ayrıştırma (Son vd., 2012), RF manyetik saçtırma (de Castro vd., 2013), atmalı lazer kaplama (Kumar vd., 2003) ve sol-gel (Yin vd., 1996) gibi birçok farklı teknikle üretilmiştir. Birçok farklı kaplama tekniği ile üretilmesine rağmen istenilen elektriksel ve yapısal özelliğe sahip VO<sub>x</sub> film üretmek oldukça zordur. Bunun nedeni kaplanan filmin kaplama parametrelerindeki en küçük değişime (örneğin gaz basıncı) bile çok duyarlı olması yüzündendir. Dahası oluşan vanadyum oksit fazlarının hepsi stabil değildir ve dengeli bir çoklu oksit filmi tekrarlanabilir olarak üretmek zordur. Birkaç grup yüksek direnç sıcaklık katsayılı filmleri düşük dirençlerle birlikte üretme çalışmaları yapmıştır (Soltani vd., 2004; Han vd., 2005). İstenilen film özelliklerini elde edebilmek için her bir teknik için parametrelerin optimizasyonu şarttır.

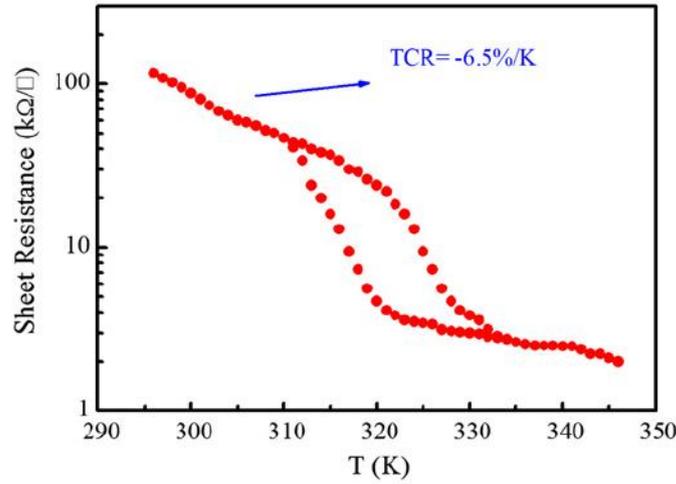
## **2.2 Bolometre malzemesi olarak çoklu oksit fazı içeren vanadyum ince filmleri**

VO<sub>x</sub> filmleri literatürde birçok farklı teknikle birçok farklı alttaş üzerine kaplanmıştır. Bu kısımda literatürde kızılötesi bölgede bolometre uygulamalarında kullanılmak üzere farklı alttaşlara farklı tekniklerle üretilmiş VO<sub>x</sub> filmleri içeren çalışmalar özetlenmiştir. Burada karşılaştırma yapılabilmesi açısından kaplama tekniği, kaplama sıcaklığı, varsa kaplama sonrası ısı işlem, alttaş ve elde edilen direnç sıcaklık katsayısı değerleri verilmiştir.

Genellikle VO<sub>x</sub> filmler silikon alttaş üzerine büyütülmekle birlikte kuvars alttaşa da kaplanmıştır. Chen ve arkadaşları reaktif iyon demeti ile kaplanan filmlerin kaplama sonrası 500 °C ısı işlem gördükten sonra -%1.8 1/K direnç sıcaklık katsayısına ulaştığını ve filmlerin herhangi bir geçiş göstermediğini bildirmiştir. Bu filmlerden cihaz üretimi de yapılmış bolometre karakteristikleri verilmiştir (Chen vd., 2000). Fakat 500 °C CMOS teknolojisi için yüksek bir sıcaklıktır (Kumar vd., 2003).

Yine VO<sub>x</sub> filmlerin avantajlarına vurgu yapıp bolometre malzemesi olarak kullanılması için bu filmlere olan ilgiyi artıran çalışmalardan biri Gonzalez ve arkadaşları tarafından

gerçekleştirilmiştir. Çalışmada  $VO_x$  filmlerden yapılan bolometre dizisinin Nb tabanlı olanlara göre daha iyi tepki süresi ve SNR (sinyal gürültü oranı) değerine sahip olduğu gösterilmiştir (González vd., 2003). Diğer bir çalışmada  $VO_x$  filmler iyon saçırma yöntemi ile üretilmiş ve üretim sonrasında ısıl işleme tabi tutulmuşlardır. Filmlerin nanoyapıda olduğu belirtilmiş ve bu yapının düşük gürültü ve yüksek direnç sıcaklık katsayısı değeri için gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Alttaş olarak  $Si_3N_4/SiO_2$  kullanılmıştır ve filmler  $-6.5$  direnç sıcaklık katsayısına sahiptirler. Fakat filmler 310 ile 330 K arasında bir geçiş göstermektedir (Wang vd., 2013).



Şekil 6 Yüksek TCR değerine sahip fakat faz geçişi gösteren  $VO_x$  film (Wang vd., 2013)

Aynı zamanda Hongchen ve arkadaşları iyon demet saçırma yöntemiyle  $Si_3N_4/SiO_2$  alttaşlar üzerine üretilmiş filmlerin  $450$  °C nin altında bir sıcaklıkta bile özelliklerinin değiştirilebileceğini göstermiştir. Filmlerin direnç sıcaklık katsayısı  $-1.8$  1/K olarak rapor edilmiştir. Dolayısıyla kaplama sonrası görece düşük sıcaklıklarda bile ısıl işlemin filmin kompozisyonunda değişim yapabileceği sonucuna varılmıştır. Aynı çalışmada sadece ısıl işlem gören filmlerin bir geçiş gösterdiği belirtilmiştir (Wang vd., 2006). Bunun yanında Lv ve arkadaşları inovatif bir yaklaşımla  $VO_x$  film üretmişlerdir. Yüz yüze bakan hedefler kullanılarak yüksek hızda kaplama sağlanmış ve filmler üretimden sonra vakum altında bir ısıl işleme tabi tutulmuşlardır. Yine bu çalışmada açıkça ısıl işlemin filmin direncini düşürmek için bir yöntem olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Filmler  $-4$  1/K direnç sıcaklık katsayısına sahiptir ve filmlerin yüzeyinin ısıl işlemten sonra bolometre yapımına daha uygun hale geldiği rapor edilmiştir. Fakat burada şunu belirtmek gerekir ki filmler pyrex cam üzerine kaplanmıştır (Lv vd., 2007). Genellikle saçırma yöntemi  $VO_x$  kaplama için seçilse de literatürde Son un çalışmasındaki gibi farklı teknikler de denenmiştir. Bu çalışmada metal

organik ayrıştırma tekniği kullanılmış ve filmler iki farklı alttaşa kaplanmıştır. Filmler kaplama sonrasında 500 °C ısıtım işlemi görmüş ve farklı alttaşlardaki bu filmlerin özellikleri incelenmiştir. Çalışmada kuvars üzerine kaplanan filmlerin Si/SiO<sub>2</sub> alttaşlar üzerine kaplanana göre çok daha iyi direnç sıcaklık katsayısına ulaştığı bildirilmiştir. Bu farkın farklı alttaşlarda büyüyen filmlerin farklı aktivasyon enerjine sahip olacağı için olduğu kanısına varılmıştır (Cui vd., 2011). Fakat bu çalışmada da direnç sıcaklık katsayısı -%4 1/K olan filmler geçiş göstermektedir (Son vd., 2012). İyon demeti saçtırma işlemi diğer bir grup tarafından uygulanmış ve önceki çalışmadan farklı olarak filmler hem kaplama sırasında hem de sonrasında ısıtım tabii tutulmuştur. Alttaş olarak kuvars ve silikon seçilmiş, kaplama sırasında örnekler 300°C kadar kaplama sonrasında ise 500°C e kadar oksitlemeye uygun bir ortamda ısıtılmıştır. Filmler -%1.86 1/K direnç sıcaklık katsayısı göstermiştir ve daha da önemlisi geniş bir sıcaklık aralığında geçiş göstermemiştir. Bu çalışmada da kaplama sonrası yapılan ısıtım işleminin direnç değerini düşürdüğü yargısı desteklenmiştir ve ısıtım işleminin uygulanacağı ortamın önemi de belirtilmiştir (Dai vd., 2008). VO<sub>x</sub> üretimi için diğer yaygın bir teknik ise atmalı DC saçtırma ve literatürde sıkça rastlanabilir. Bu yöntemi tercih eden ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> ile gözenekli silikonu alttaş olarak kullanılan başka bir çalışmada ise kaplama sırasında 250°C sıcaklığa kadar ısıtım yapılmıştır. Gözenekli silikon mikro üretim yöntemlerine kolaylık sağlaması açısından denenmiştir. Bu şekilde üretilen filmler herhangi bir geçiş göstermeyip -%3.5 1/K direnç sıcaklık katsayısı değerine ulaşmışlardır. Diğer bütün ileri özelliklerine rağmen oda sıcaklığındaki yüzey direnci 128 Ω/kare olması istenilen bir değer değildir. Bu değere rağmen bir cihaz üretilmiş ve karakteristikleri aynı çalışmada verilmiştir (Wang vd., 2012). Literatürde iyon demeti saçtırma yöntemi ile üretilen filmler genellikle üretim sırasında veya sonrasında ısıtım maruz bırakılmışlardır. Dai ve arkadaşları filmleri görece daha düşük sıcaklıklarda 200-220°C arasında üretilen diğer üretim parametrelerinin (DC güç, kaplama zamanı gibi) değişimiyle film özelliklerinin değişimini incelemiştir. Alttaş olarak Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si kullanılmış ve filmler -%2.05 1/K direnç sıcaklık değerine erişmiştir. Filmler aynı zamanda 20 ile 80 °C arasında herhangi bir geçiş göstermemektedir. Dai ve arkadaşları bu özellikteki filmlerin iyon demeti saçtırması ile üretimindeki optimum koşulları da rapor etmişlerdir (Dai vd., 2008). Yakın tarihli yapılan çalışmalarda saçtırma gerilimi ve oksijen konsantrasyonunun DC manyetik saçtırma ile kaplanmış filmlerdeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışma da alttaş olarak Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si kullanılmış ve kaplama sırasında 300 °C kadar ısıtılmıştır. Araştırma saçtırma geriliminin filmlerin direnç sıcaklık katsayısı üzerine yoğunlaşmıştır (Wei vd., 2014). Düşük saçtırma gerilimlerinin daha yüksek direnç sıcaklık katsayısı değerleri verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca istenilen değerlere ulaşmak için hedefin kaplama sırasında oksitlenip oksitlenmediğinin bilinmesi gerektiği bildirilmiştir (Berg ve Nyberg 2005). Chen ve arkadaşları ise DC manyetik saçtırma ile kaplanmış filmlerin

kaplama sonrası ısıtma işlemi ile değişen özelliklerini incelemiştir.  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  alttaşı olarak kullanılmış ve örnekler hem kaplama sırasında hem de sonrasında ısıtma işlemine tabi tutulmuşlardır. Kaplama sırasında  $200\text{ }^\circ\text{C}$  kadar ısıtılan filmler kaplama sonrası  $200$  ile  $300\text{ }^\circ\text{C}$  arasında  $\text{N}_2$  ortamında farklı sıcaklıklara maruz bırakılarak özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada da kaplama sonrası ısıtma işleminin filmlerin direnç değerlerini düşürdüğü belirtilmiş ve bunun nedeni olarak kaplama sonrası ısıtma işleminde filmlerin oksijen kaybetmesi (Öksüzoğlu vd., 2013) veya tanecik yapısının değişmesi (Li, ve Xie 2005) gösterilmiştir. Elde edilen direnç sıcaklık katsayısı  $-\%2$  ile  $-\%2.39\text{ }1/\text{K}$  arasındadır. Kaplama sonrası ısıtma işleminin direnç sıcaklık katsayısını değiştirmeden direncin düşmesini sağladığı ve bunda yapının içerisindeki  $\text{VO}_2$  nano parçacıkları ile mümkün olduğu kanısına varılmıştır. Aynı zamanda  $200\text{ }^\circ\text{C}$  de ısıtılan filmlerin kompozisyonunda bir değişim gözlemlenmediği de rapor edilmiştir (Chen vd., 2014).

$\text{VO}_x$  farklı tekniklerle üretilmiş olsa da bu filmlerin ortak sorunu olan direnç düşürülmesi için katkılama yaklaşımı yeni değildir. Literatürde tungsten, molibdenyum, lityum (Jiazhen vd., 2008; Hellmann vd., 2008) ile katkılanmış filmlerle ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Fakat bu çalışmaların haricinde Smith ve arkadaşları ilk kez altın ile katkılanmış  $\text{VO}_x$  filmlerin direnç sorunu için oldukça iyi bir yaklaşım olduğunu göstermişlerdir (Smith vd., 2014). Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri ise katkılama ile direnç düşürülmesi sağlanırken direnç sıcaklık katsayısı değerinin çok değişmediğinin gözlemlenmesidir. Bu çalışma da DC manyetik saçtırma yöntemi kullanılmış fakat alttaşa gerilim uygulanarak film kalitesi artırılmıştır.  $\text{VO}_x$  filmler ile kızılötesi bölge için bolometre dizisi geliştirilmiş ve bolometre karakteristikleri verilmiştir.

Literatür özetinden çıkarılabilecek iki önemli sonuç vardır. Bunlardan ilki üretilen filmlerin dirençlerinin yüksek olduğu ve düşürülmesi için kaplama sonrası ısıtma işleminin uygulandığı, ikincisi ise ısıtma işlemi alternatif olarak son dönemde altın katkılamanın önerilmiş olduğudur. Dikkat edilecek olursa elde edilen filmlerin direnç sıcaklık katsayısı yüksek ( $\leq -\%2\text{ }1/\text{K}$ ) olanların çoğu  $20$  ile  $80\text{ }^\circ\text{C}$  arasında bir geçiş gösterirler bu da daha önce nedenleriyle bahsedildiği gibi bolometre yapımı için istenilen bir durum değildir. Kızılötesi bölgede de şu anda ticari olarak satılan  $\text{VO}_x$  tabanlı bolometrelerdeki direnç sıcaklık katsayısı  $-\%1.5$  ile  $-\%3$  arasındadır. Literatürde bolometreler için uygun öz direnç  $10\text{ }\Omega\text{cm}$  değerinin altında ve direnç sıcaklık değeri  $-\%2$  ye yakın veya daha iyi olarak belirtilmiştir (Cole vd., 1998).

### **2.3 Vanadyum oksit tabanlı bolometreler**

Son dönemlerde oldukça iyi gürültü eşdeğer güç (NEP) değerlerine ulaşabilen hassas dedektörler yapılmıştır (Karasik vd., 2010; Barrentine vd., 2010; Wei vd., 2008). Fakat bu dedektörlerin bir kısmı pratik olmayan soğutma sistemlerine gereksinim duyar. Wei ve grubunun yaptığı ve NEP değeri  $10^{-19}$  W/Hz<sup>1/2</sup> olan bolometre bu dedektörlere verilebilecek bir örnektir ama bu değerlere ancak 100-300 mK arasında ulaşabilir. Bu da NEP değeri düşük olan dedektörlerin, bu değerleri hangi sıcaklıklarda elde ettiklerinin önemli olduğunu gösterir. Bu değerlere ulaşabilen bir dedektör oda sıcaklığında çalışmayabilir veya sıcaklık yükseldikçe NEP değeri çok hızlı bir şekilde artabilir. Bu durumdan kısmen az etkilenen dedektörleri, ya bir dizi haline getirmek imkansızdır ya da en iyi performanslarını THz altı bölgede verirler ki, bu da onları birçok uygulamanın dışında bırakır. Dolayısıyla şu anda ticari olarak satılan terahertz dedektörleri piroelektrik ve golay hücrelerinden oluşur. Diğerleri ise özel amaçlar için kısıtlı aralıklara yanıt verirler ve performansları bu amaçlar doğrultusunda sınırlıdır. Sıcak elektron bolometreleri en iyi hassasiyet değerlerine erişse de soğutma gereksinimleri nedeniyle yaygın değillerdir. Genel olarak oda sıcaklığında çalışan dedektörler de soğutmalı dedektörlere göre hassasiyetleri azdır ya da yavaşlardır. Kısmen hassas ve hızlı kabul edilebilecekler ise 1 THz 'in altında bu değerlere ulaşabilirler. 1 THz ve üzeri bölgede hassasiyetleri düşer veya hızları azalır. Performans karşılaştırılması sırasında bu hesaba katılarak karşılaştırma yapılır. Şu anda soğutmasız bolometrelerin performans karşılaştırmaları Sizov ve diğerlerinin (Sizov vd., 2011) yaptığı çalışmada verilmiştir. Oda sıcaklığında çalışan, 0.5 ile 10 THz arası (birçoğu 1.5- 3.5 THz arasında) olan patlayıcı tespit etme bölgesindeki (Shen vd., 2005) frekansa cevap verebilen, hassas bir dedektör yapılması güvenlik ve askeri alandaki uygulamalar için çok önemlidir. Yukarıda sayılan çalışmalar bazı yaygın patlayıcıların tespiti veya gizli obje tespitini içeren 0.1 ile 0.4 THz arası bölgenin içerisinde iyi sonuçlar verebilirler.

Vanadyum oksit (VO<sub>x</sub>) tabanlı bolometrelere olan ilgi ise ticari olarak, baryum-stronsiyum-titanattan (BST) yapılmış dedektörlere alternatif olarak doğmuştur. BST dedektörlerin elektriksel polarizasyonu dengelemek için termoelektrik soğutma kullanması bir dezavantaj olarak ortaya çıkmıştır. VO<sub>x</sub> dedektörlerin amorf silikondan yapılan dedektörlere göre empedans değerleri daha düşük olduğundan, Johnson gürültüsü değerleri düşüktür. Düşük maliyetli, hafif ve üzerine bir dizi yapma imkanı verecek boyutlarda malzemelerin uzun arayışı sonunda VO<sub>x</sub> 'in geleceğin teknolojisi olduğu düşünülmektedir (Rogalski, 2009). Vanadyum oksitten yapılmış dedektörlerin, soğutmasız dedektör pazarındaki yeri bu düşünceyi kuvvetlendirmiştir. Bu tip dedektörlerin kızılötesi bölgesindeki bu başarısını THz bölgesine taşıma amacıyla bu malzeme seçilmiştir.

Bolometrelerin performansının artırılması için genel olarak iki yöntem ön plana çıkmıştır. Bunlardan biri termal yalıtımı artırarak daha iyi performans elde etmek diğeri ise sıcaklık direnç katsayısını artırmaktır. Bu değer denklem 5'teki gibi verilir.

$$TCR=\alpha=\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (5)$$

Denklemden R bolometrenin direncidir. TCR, aygıttaki küçük bir sıcaklık değişiminin direncinde ne kadar büyüklükte bir değişim meydana getireceğinin göstergesidir. Bu değer büyük olması, az bir sıcaklık değişimi ile algılayıcı malzemenin direncinin çok fazla artması demektir. Bu da az bir sıcaklık değerinin bile tespit edilebilmesi anlamına gelir. Bu algılayıcı kısım için seçilen malzeme ile ilgilidir. Dolayısıyla bu kısım için seçilen malzemenin TCR değeri kullanılan malzemeye ve büyütülme koşullarına göre değişir. İşte bu nedenle TCR değeri önemlidir ve algılayıcı kısım için kullanılacak değişik malzemeler vardır (Neikirk ve Rutledge, 1984; Miller vd., 2004; Chong ve Ahmed, 1997). Genel olarak TCR değerleri metaller için pozitif bir değer, yarıiletkenler için negatif bir değer olarak verilir. Örneğin Bi için  $0.3\% K^{-1}$ , Nb için  $0.1\% K^{-1}$ , bu da düşük bir DC voltaj duyarlılığına neden olur. Bunun yanında vanadyum oksit için elde edilen TCR değerleri  $-2$  ile  $-4\% K^{-1}$  arasındadır ve görece olarak yüksektir. TCR değerinin yüksek olması performansın artışı açısından önemlidir. Bunu sağlamanın bir yolu direnci düşürmektir. Metallerin direnci düşük olmasına rağmen TCR değerleri bolometre yapımı için düşük kalmaktadır (Shie vd., 1996). Yalıtkan malzemeler görece yüksek TCR değerine sahip olmalarına rağmen yüksek dirençlere sahip olduklarından Johnson gürültüsüne neden olurlar (Smith vd., 2014). Yarıiletkenler ise metal ve yalıtkanların özelliklerinin getirdiği bu uçların arasında değerler gösterirler ki bu da onları bolometre yapımı için daha iyi bir aday yapar. Yüksek direnç yüksek Johnson gürültüsüne neden olur, bu da aygıtın performansını kötü yönde etkiler. Voltajda Johnson gürültüsü nedeniyle meydana gelen dalgalanma denklem 6'daki gibi verilir ve dirence de bağlıdır. Buradan direncin düşük olması TCR değerinin artmasına neden olup avantaj sağlarken, çok yüksek değerlerde Johnson gürültüsü vereceğinden dezavantajı beraberinde getirir.

$$\delta V_j = \sqrt{(4k_B TR\Delta f)} \quad (6)$$

Dedektörler için genel olarak gürültü, çıkış sinyalinde kaynağın dışındaki etmenlerin meydana getirdiği dalgalanmalar olarak tanımlanabilir ve dedektörün toplam gürültüsü denklem 7'deki gibi gösterilir.

$$\sqrt{V_n^2} = \sqrt{V_J^2} + \sqrt{V_{1/f}^2} + \sqrt{V_T^2} + \sqrt{V_B^2} \quad (7)$$

Burada  $V_J$  denklem 6'da da verilen Johnson gürültüsüdür, temelde sıcaklık ve dirence bağlıdır. Aygıtın düşük sıcaklıklarda çalışması veya direncin düşürülmesi bu gürültünün azaltılmasında etkili olur.  $V_{1/f}$  yük taşıyıcılarının Fermi seviyesinin uzağında hapsedilmesi ve serbest bırakılmasından kaynaklanır ve frekansa bağlıdır. Bu gürültünün üstesinden modülasyon frekansı yüksek tutularak gelinebileceği literatürde Smith ve arkadaşları tarafından belirtilmiştir.  $V_T$  dedektör ve çevresindekilerin ısı alış verişinden kaynaklanır.  $V_B$  ise arka plan gürültüsüdür.

Duyarlılıkta dedektörler için önemli bir parametredir ve TCR değeri ile doğru orantılıdır. Voltaj-akım dedektörleri için denklem 8 ve 9'daki gibi verilir.

$$R_v = \frac{I_b R \alpha \eta}{G \sqrt{(1 + \tau^2 \omega^2)}} \quad (8)$$

Burada R bolometre direncini,  $\alpha$  TCR değerini,  $\eta$  ışımaya soğurma katsayısını, G alttaş ile film arasındaki termal iletkenliği,  $\tau$  termal tepki süresini,  $I_b$  uygulanan akımı,  $\omega$  sinyal ışımının açısal modülasyon frekansını ifade eder.

$$R_i = \frac{V_b \alpha \eta}{R G \sqrt{(1 + \tau^2 \omega^2)}} \quad (9)$$

Denklemden  $V_b$  uygulanan voltajı ifade etmektedir. Denklemlerden görülebileceği gibi duyarlılığı artırmak için sadece TCR değerini yüksek tutmak yeterli değildir. Bunun yanında G değerinin düşük tutulması da önemlidir.

İdeal bir dedektör malzemesinin sağlaması gereken koşullar Schimert ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (Schimert vd., 2008). Bu özelliklerden en önemli olanları yüksek TCR değerine sahip olması ve düşük ısı tepki süresine sahip olmasıdır. Günümüzde dedektör için sıkça kullanılan malzemeler amorf silikon ve vanadyum oksittir. Bu malzemelerin TCR değerleri % -2 ile %-4 arasında değişmektedir (Jin vd., 2013). Vanadyum oksit metal yalıtkan geçişi gösterir ve  $VO_x$  ince filmleri, metallere 5-10 kat daha büyük TCR değerlerine sahiptir. Bu geçişle birlikte elektriksel ve optik davranışında da değişiklikler meydana gelir. Bu nedenle de elektriksel ve optik uygulamalarda sıkça kullanılır.  $VO_x$  vanadyum oksit filmler için genel bir gösterimdir ve buradaki x oksijenin vanadyuma oranını gösterir (Gaunt vd.,

2011). Vanadyumun VO, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, VO<sub>2</sub>, V<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, V<sub>6</sub>O<sub>13</sub> ve V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> gibi farklı fazları için vanadyum oksit, farklı metal- yalıtkan geçiş sıcaklığına sahiptir. VO<sub>2</sub> yarıiletken monoklinik yapıdan, tetragonal yapıya geçişini 340 K de yapar ve TCR değeri %1.5-5 K<sup>-1</sup> aralığındadır (Chen vd., 2004). VO<sub>x</sub> filmler kimyasal buhar biriktirme (Manning vd., 2004), atmalı lazer biriktirme (Narayandass vd., 2003), sol- gel yöntemi (Dachuan vd., 1996) ve saçtırma (Cui vd., 1998) ile elde edilebilir. Bu filmlerin elektriksel özellikleri alttaş sıcaklığı, kısmi oksijen basıncı gibi büyütme koşullarına ve kullanılan yöntemine göre değişir (Chain, 1987, Luo vd., 2013). Dolayısıyla bahsedilen TCR değerleri de sabit değildir ve belirli büyütme parametreleri oynanarak değiştirilebilir ve iyileştirilebilir (Gaunt vd., 2011). Farklı yöntemlerle oda sıcaklığında büyütülmüş filmlerin TCR değerlerinin karşılaştırması literatürde verilmiştir (Kumar vd., 2003). VO<sub>2</sub> fazındaki filmlerden yapılacak aygıtlar sadece faz geçiş sıcaklığında çalışabilirler, amorf yapıda yüksek TCR değerine sahip bir ince filmde yapılan aygıtlar ise daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışabileceklerdir. Literatürde silikon alttaş üzerine ara katman Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kullanılarak VO<sub>x</sub> ince film büyütülmüştür ve bu filmlerin 20-80°C arasında bir yarıiletken- metal faz geçişi göstermediği gözlemlenmiştir.

Son olarak grubumuzda bu bölgede güçlü sinyal elde edilmesi ile ilgili çalışmalar yapmaktadır ve sonuçları uluslararası dergilerde yayımlanmıştır (Ozyuzer vd., 2007, 2009; Koseoglu vd., 2011; Turkoglu vd., 2011, 2013). Bu alandaki tecrübemizin üzerine SANTEZ 'de yürüten bir diğer projede yine THz bölgesinde dedektör kısmıyla ilgili altyapı oluşturulmuş ve gerekli karakterizasyon sistemleri kurulmuştur. Bunun yanında vanadyum filmlerle ilgili devam eden bir diğer projede VO<sub>2</sub> filmler elde edilmiş ve vanadyum filmlerin yapısal kompozisyonu ve kaplama parametreleri incelenmiştir. Bolometrenin performansını artıracak filtrelerle ilgili 114F091 numaralı proje tamamlanmış buradaki sonuçlar uluslararası dergilerde yayımlanmıştır (Nebioğlu vd., 2017; Demirhan vd., 2016)



### 3. MOTİVASYON

VO<sub>x</sub> tabanlı bolometreler düşük maliyetleri, oda sıcaklıklarında gösterdikleri performansları açısından kızılötesi bölgede amorf silikondan yapılan dedektörler ile rekabet halindedirler. VO<sub>x</sub> bolometrelerinin rakiplerine göre avantajları Tablo 1 den görülebilir.

Tablo 1. VO<sub>x</sub> in rakiplerine göre üstün ve dezavantajlarının karşılaştırılması

	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Süperiletken Bolometreler (Nb, YBCO vb.)	Yüksek hassasiyet Hızlı tepki süresi	Soğutma sistemleri gerektirir
Golay hücreleri	Oda sıcaklığında çalışma	Bir dizi haline getirilememe
Piroelektrik	Oda sıcaklığında çalışma	En iyi performansı THz altı bölgede
Schottky Diyotları	Hızlı tepki süresi Oda sıcaklığında çalışma	Bir dizi haline getirilememe
<b>VO<sub>x</sub> detektörleri</b>	<b>Yüksek hassasiyet</b> <b>Oda sıcaklığında çalışma</b> <b>Bir dizi haline getirilebilme</b>	Düşük direnç ve yüksek TCR değerlerine sahip film elde edilmesinin zorluğu

Literatürdeki çalışmalarda VO<sub>x</sub>:Au filmleri kızılötesi bölgede MEMS tabanlı bolometre olarak üretilip test edilmiştir. Bununla rağmen VO<sub>x</sub>:Au tabanlı ince film bolometrelerden THz algılama yapabilecek aygıtlar henüz yapılmamıştır. Bunun nedeni ise MEMS tabanlı olarak yapılan aygıtlarda köprü altına açılan boşluk dalga boyunun dörtte biri kadar olması gerektiğidir. Örneğin 0.6 THz de çalışacak bir aygıt için rezonans boşluğunun aralığı 125 µm olmalıdır, dolayısıyla MEMS türü bolometre THz bölgesi için pratik değildir. VO<sub>x</sub>:Au tabanlı ince film bolometreler kızılötesi bölgede yüksek duyarlılık ve düşük Johnson gürültüsü göstermesi nedeniyle THz bölgesi için de gelecek vaat etmektedirler. Fakat bu özelliği elde edebilmek için çok kontrollü bir şekilde Au katkılamanın optimize edilmesi gerekmektedir. Smith ve grubu (Smith vd, 2014) bu filmlerin TCR değerleriyle öz dirençleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Yukarıda da bahsedildiği gibi bu yöntem yenidir ve sadece kızılötesi bölgede çalıştırılan bolometre için kullanılmıştır. Üretilen filmlerin TCR değerleri -%2 1/K iken öz direnç değerleri 2.3 Ωcm den altın katkılama ile 1.3 Ωcm düşürülmüştür. Dahası bu TCR değerinde

bir değişime neden olmamıştır. Dedektör performansını etkileyen önemli etkenlerden biri Johnson gürültüsüdür. Bu gürültü, dedektörün yapıldığı malzemenin özdirenci ile ilişkilidir. Dolayısıyla vanadyum oksit tabanlı filmlerle yapılan dedektörler için, Au katkılama ile direnci istenilen seviyeye indirebilme bu konuda atılan önemli bir adımdır.

Literatürde bulunan bu çalışmalarla kızılötesi bölge için  $VO_x$  potansiyelinin ne kadar yüksek olduğu bir kez daha gösterilmiştir. Fakat THz bölgesinde  $VO_x: Au$  için bir çalışma yapılmamıştır ve literatürde bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu konuda yapılan bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, hem bolometre malzemesi olarak  $VO_x: Au$  nun THz bölgesinde çalışacak vanadyum oksit tabanlı bolometre dizileri olarak ilk kez kullanımını sağlanmış hem de bu filmlerle yapılacak dizi için ilk kez THz bölgesi için anten tasarımları yapılmıştır. Anten tasarımları,  $VO_x: Au$  ile yapılmış bir aygıtın THz bölgesinde yüksek performansla çalışabilmesi için CST Microwave Studio ile anten tasarlandı ve önceden simülasyonu yapıldı. Bu konuda yapılan tasarım, dedektörün elimizde bulunan terahertz kaynağına (0.50-0.75 THz) uygun olarak tepki vermesini sağlamak amacıyla 0.67 THz rezonans frekansında en iyi verimi göstermesi için tasarlandı. Dolayısıyla THz bölgesinde böyle bir dedektörün yapılmasının başlıca avantajları, güvenlikten saha denetlemeye, gizli objelerin tespitinden, tıbbi görüntülemeye kadar birçok alanın ilgisini çekmesi ve bu teknolojinin ülkemizde üretilmesidir.

## 4. DENEYSEL

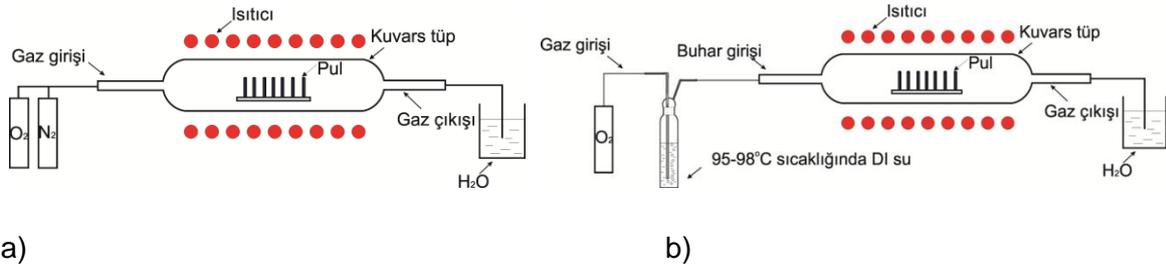
### 4.1 Altaş Seçimi ve Silikonun Termal Oksitlenmesi

#### 4.1.1 Teorik

Silikon oksit ( $\text{SiO}_2$ ) tabakaları yarıiletken endüstrisinde farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Yüzey pasivasyonu, maskeleme, transistörde kapı kısmında yalıtkan film olarak ( $\rho > 10^4 \Omega \text{cm}$ ) ve devreyi korumak bu amaçlar arasındadır. Silikon ve oksiti arasındaki tekrarlanabilir ve kararlı arayüzey sayesinde  $\text{SiO}_2$  yarıiletken endüstrisi için vazgeçilmez bir ara tabaka olmuştur. İstenilen silikon oksitin kalitesi ve kalınlığı uygulamaya göre değişir. Örneğin yüksek kalitede bir silikon oksit metal oksit yarıiletkenleri (MOS) uygulamaları için zorunluken, sadece devre koruma amaçlı bir silikon oksit görece olarak daha az kaliteli istenebilir. Silikon dioksit üretimi için dışarıdan sağlanan oksijen kadar silikonun kendisinde önemlidir. Eğer silikon oksit oluşumu sırasında silikon altaştan silikon yenmesi istenmiyorsa silikon gaz formunda ( $\text{SiH}_4$ ) silikon oksitleme sistemine verilir. Silikon oksit katmanı elde etmenin birçok farklı yolu olsa da, termal silikon oksit büyütme işlemi sıkça kullanılır ve kuru, ıslak ve pyrogenic olarak 3 grupta sınıflandırılabilir. Silikon dioksit silikon altaş üzerinde hiçbir işlem yapılmadan oda sıcaklığında da doğal olarak büyür ve kalınlığı yaklaşık 20 Angström dür. Fakat yarıiletken uygulamalarında kontrollü ve kaliteli bir  $\text{SiO}_2$  katmanı büyütülebilmesi için bu katman büyütmeden önce kaldırılır. Termal olarak silikon oksit büyütme işlemi silikon altaşların sıcaklığı 600 ile 1250 °C arasında değişen kuvars bir fırın içerisinde belirli gaz karışımı ortamında gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklık oksitleyici elementlerin yüzeyden difüzyonunu hızlandırmak için gereklidir ve bu sistemin 2 ana avantajı vardır;

- 1) Dış bir silikon oksit kaynağına ihtiyaç duyulmadığı için sistem daha basittir
- 2) Altaş kalınlığı  $\text{SiO}_2$  oluşu ile beraber azalır ki bu bazı uygulamalarda istenilen bir durumdur.

Yarıiletken endüstrisinde kullanılan iki ayrı termal oksitleme düzeneklerinin şematik gösterimi aşağıda verilmiştir.

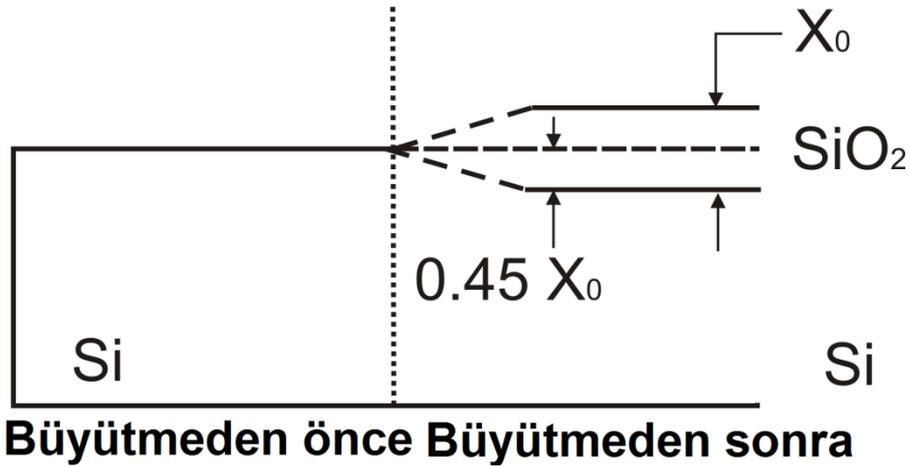


Şekil 7 a)Kuru ve b)ıslak termal oksitleme sistemlerinin şematik gösterimi

Kuru ve ıslak termal oksidasyonun mekanizması da birbirinden farklıdır ve aşağıdaki reaksiyonlar oksitleme sırasında gözlenir.



İki yöntem arasındaki fark oksijeni sisteme farklı olarak beslemekten geçer. En genel olarak ıslak oksitleme hızlı bir oksitleme sağlarken, kuru oksitleme daha yavaş ama daha kaliteli bir  $\text{SiO}_2$  katmanı oluşmasını sağlar. Burada kaliteli  $\text{SiO}_2$  katmanından, boşluksuz homojen ve silikon ile iyi tutunma sağlayan bir yapı anlaşılmalıdır. İki oksitleme yönteminde de alttaştaki silikonun bir kısmı yenir. Silikon oksit katmanı için harcanan silikon ve oluşan oksit katmanı arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde görülebilir.



Şekil 8 Oluşan silikon oksit katmanı ve onun için harcanan silikon arasındaki ilişki

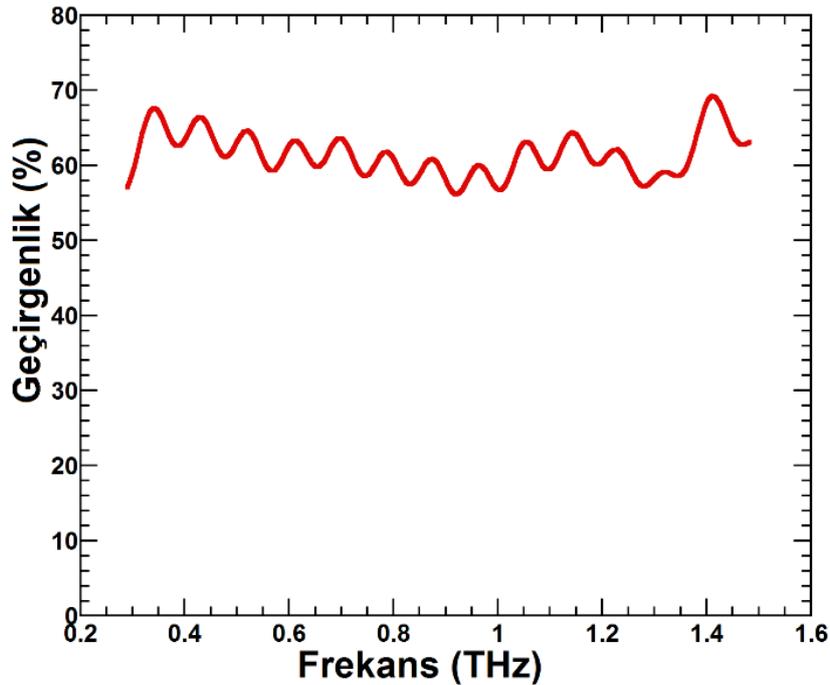
Bu ilişki şu şekilde formüle edilir;

$$\frac{Si \text{ kalınlığı}}{SiO_2 \text{ kalınlığı}} = \frac{\text{Molar hacim (Si)}}{\text{Molar hacim (SiO}_2)} = \frac{\frac{\text{Moleküler ağırlık (Si)}}{\text{Yoğunluk (Si)}}}{\frac{\text{Moleküler ağırlık (SiO}_2)}{\text{Yoğunluk (SiO}_2)}} = \frac{\frac{28.9 \text{ g/mol}}{2.33 \text{ g/cm}^3}}{\frac{60.08 \text{ g/mol}}{2.21 \text{ g/cm}^3}} = 0.46 \quad (12)$$

Proje kapsamında seçilen alttaş yüksek özdirençli silikonlardır (HRFZSi) ve özellikle THz uygulamalarında kullanılırlar. En önemli özelliklerinden biri THz bölgesinde düşük kayıp vermeleri ve termal iletkenliklerinin 1.5W/cmK olarak GaAs a göre (0.37 W/cmK) çok daha iyi olmasıdır. Bunun yanında THz bölgesinde diğer silikonlara göre çok daha iyi optik geçirgenliğe sahiptirler.

#### 4.1.2 Deneysel

HRFZSi pulların öncelikle THz bölgesindeki optik geçirgenlik değerlerine ile Bruker Vertex 80v Fourier Transform kızılötesi spektrometresi ile vakum ortamında inceledik. Ölçüm sırasında kaynak olarak glowbar ve uzak kızılötesi kaynak, dedektör olarak DLTGs ve DTGs dedektörleri kullanılmıştır. Ölçümün çözünürlüğü 1 cm<sup>-1</sup> dir ve 1200 tarama yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9 HRFZSi pul ların 0.3 ile 1.5 THz arası geçirgenlik ölçümü

Geçirgenlik ölçümünden de görülebileceği üzere, HRFZSi 0.3 ile 1.5 THz aralığında %60 ile %70 arasında optik geçirgenliğe sahiptir. Silikon pullar termal oksitlemeden önce 1x1 cm<sup>2</sup> boyutlarda pul kalemi ile kesildi ve %10 HF çözeltisi içerisinde doğal oksit kısmı atıldı ve aseton, metanol ve isopropanol ile yüzeyi temizlendi. Silikon oksitin bu projede kullanılma amacı iki tanedir.

1) SiO<sub>2</sub>/Si yapısı daha iyi VO<sub>x</sub> ince film üretimi için uygun bir arayüzey sağlamak

2) Tasarlanan bolometrenin köprü kısmının litografi sonrasında ayakta kalabilmesi için destek görevi görmek

Bu amaçlarla kullanılacak olan termal olarak büyütülmüş oksit katmanının kızılötesi bölgedeki uygulamalarda kalınlığı 100 ile 200 nm arasında değişir (Smith vd., 2014; Niklaus vd., 2007). Projede de köprü yapısını desteklemek için SiO<sub>2</sub> katmanının kalınlığı 200 nm ye optimize edilmiştir. Bu amaçla hem ıslak hem de kuru oksitleme işlemi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 2 de verilmiştir. Islak oksitleme işlemi şekilde gösterilen düzenele gerçekleştirilmiştir. O<sub>2</sub> MKS gaz kontrolörü ile seramik ocakta 98 °C ye kadar ısıtılmış deiyonize su (DI) içerisinde gönderilmiştir. Buradan çıkan su buharı 1x1 cm<sup>2</sup> boyutlarında kesilmiş kuvars fırının içerisinde 1000 °C sıcaklıktaki alttaşların olduğu bölmeye gönderilmiştir (Şekil 10). Kuvars fırının çıkışı ise bir bağlantı yardımıyla H<sub>2</sub> gazının dışarı verilmesi için DI dolu behere verilmiştir.

Tablo 2. Islak ve kuru oksitleme işlemlerinde oksit büyüme hızları

<b>Islak ve kuru silikon oksitlemede büyüme hızının karşılaştırılması</b>		
<b>Sıcaklık (°C)</b>	<b>Kuru (nm/h)</b>	<b>Islak (nm/h)</b>
<b>1000</b>	60	410

Kuru oksitlemede ise kuvars fırının giriş ve çıkışı açık bırakılarak 1000 °C da oksitleme yapılmıştır. Oksit katmanının kalınlığının belirlenmesi için hem spektroskopik elipsometre hem de SEM yanal alan görüntüleri kullanılmıştır. Tablo 2'den görüldüğü gibi büyüme hızları açısından ıslak oksitleme çok daha hızlı olsa da, kuru oksitleme oksit katmanının kalitesi açısından tercih edilerek örneklere kuru oksitleme yapılmıştır.



Şekil 10 Islak Oksitleme için kurduğumuz oksitleme düzeneği

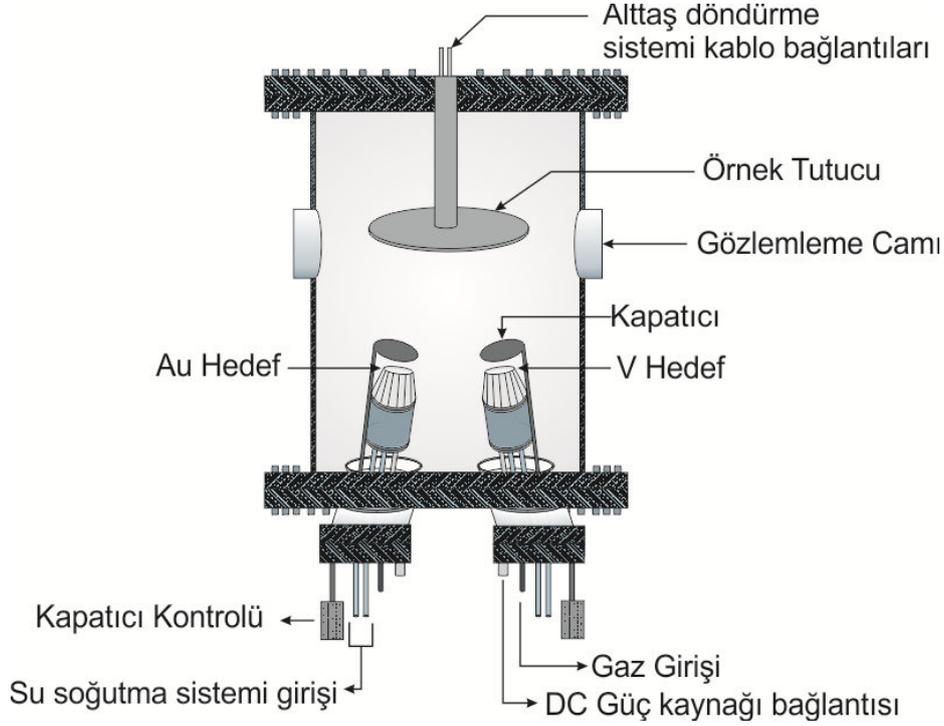
## 4.2 VO<sub>x</sub>:Au İnce Filmlerinin Manyetik Saçtırma Yöntemi ile Üretimi

### 4.2.1 Teorik

Proje kapsamında kullanılan DC manyetik saçtırma sisteminin şematik gösterimi Şekil 11 deki gibidir. Saçtırma sisteminde bulunan kaplama odacığı kaplama öncesinde 10<sup>-6</sup> Torr basınca kadar düşürülür. Böylece kaplama yapılmadan önce kaplama odacığı içerisinde bulunabilecek herhangi bir kirlenici sistemden atılır. İstenilen vakum değerleri sağlandıktan sonra sisteme inert bir gaz (Ar gibi) gönderilir ve kaplama odacığı kaplama sırası basınç olan 10<sup>-3</sup> ile 10<sup>-2</sup> Torr arasında bir basınca getirilir. Saçtırma sisteminde en temelde hedef malzeme katodu ve alttaşa anoda tuturulmuştur. Yüksek voltaj elektrotlar arasına uygulanır ve odacıktaki inert gaz iyonize olur. Elektronlar ve inert gaz arasında olan elastik olmayan çarpışmalar aşağıdaki denklemdeki gibi daha fazla ikincil serbest elektron, pozitif iyon veya plazma oluşmasını sağlar.



İkincil elektronların oluşumu her bir ikincil elektron 10 ile 20 arasında gaz molekülünü iyonize ettiğinde bir çığ etkisi meydana gelir ve bir noktada akım akmaya başlar. Elektronlar ilk baştaki elektron sayısını sağlayacak kadar gazı iyonize ettiklerinde sistem dengeli hale gelir ve ışılan plazma kısmı iletken haline gelir ve kaplama sırasındaki gerilim sabit hale gelir. Hedef atomlarının hedeften sökülüp alttaş yüzeyine taşınmasında momentum transferi rol oynar. Saçtırma sisteminde magnet kullanımı ise düşük iyonlaşma problemini aşabilmek için kullanılmaktadır. Elektronlar manyetik alanın içinde hapis kalarak dairesel eğriler içeren bir yolda ilerlemeye zorlanmış olur ve bu iyonizasyon işleminin artmasını sağlar.

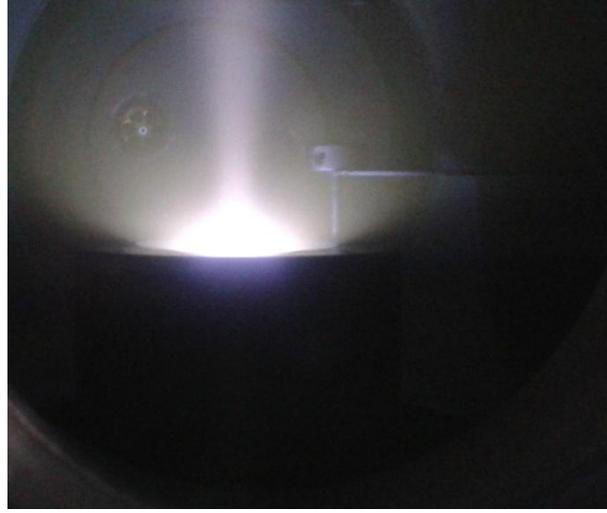


Şekil 11 DC Manyetik saçıtırma sisteminin şematik görünümü

#### 4.2.2Deneysel

$VO_x$  ince filmleri yüksek özdirençli yüzen bölge silikon altaşlarına (HRFZSi) (100) DC manyetik saçıtırma ile oda sıcaklığında kaplanmıştır. Kaplama odacığı önce  $5 \cdot 10^{-6}$  Torr basıncına kadar turbo moleküler pompa yardımı ile vakuma alınmıştır. Hedef olarak yüksek saflıkta (%99.95) vanadyum ve altın hedefler kullanılmıştır. Hedefin üzerinde bulanabilecek safsızlıklardan kurtulmak için 10 dakika kapatıcı kapalı kaplama yapılmıştır.  $VO_x$  ince filmler farklı  $Ar/O_2$  oranlarında sabit saçıtırma gücünde oda sıcaklığında kaplanmıştır. Kaplama odacığına gönderilen Ar ve  $O_2$  kaplama sırasında MKS ile 0.5 sccm hassasiyet ile kontrol altında tutulmuştur. Altaş tutucu filmin homojenliğinin artırılması için 15 dakikada dönüş sayısı (RPM) ile döndürülmüştür. Deneyde kullandığımız DC manyetik saçıtırma sisteminde kaplama sırasında oluşturulan plazma aşağıdaki gibidir.





Şekil 12 DC Manyetik Saçtırma Sisteminde oluşturulan plazma

Deneyin ilk kısmında kaplama odacığına gönderilen oksijen gazının oranı değiştirilmiş ve değişim sonucunda filmin elektriksel özellikleri incelenmiştir. İkinci kısımda elektriksel özellikleri incelenen bu filmlerden en iyi direnç sıcaklık katsayısı değerine ulaşan filmin kaplama koşulları kaydedilmiş ve aynı kaplama koşullarında bu sefer az bir miktar altın ile birlikte eşzamanlı kaplama yapılmıştır. Kaplanan filmlerin tümü için sabit olan kaplama koşulları Tablo 3 te görülebilir.

Tablo 3. Bütün filmler için ortak olan kaplama koşulları

<b>Kaplama Koşulları</b>	<b>Değer</b>
<b>Altaş Sıcaklığı</b>	Oda Sıcaklığı
<b>DC Saçtırma Gücü</b>	50 W
<b>Saçtırma süresi</b>	30 min
<b>Kaplama öncesi basınç</b>	$5 \cdot 10^{-6}$ Torr
<b>Kaplama sırasındaki basınç</b>	$3 \cdot 10^{-3}$ Torr

Projede aynı zamanda film kalınlıkları bolometre algılayıcı malzemesi olarak kullanılacak  $VO_x$  ince filmler için ideal kalınlık olan 150 nm ye optimize edilmiştir. Elektriksel öz direnç değerlerinin değişiminin lineer olmayan fit yapılmış değerleri Şekilde görülebilir ve ilgili direnç

sıcaklık katsayıları Tablo 4'te verilmiştir. Kaplama odacığına gönderilen Ar/O<sub>2</sub> oranı aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$\rho_{\text{Oksijen}} = [\text{Oksijen (sccm)}] / [(\text{Argon (sccm)}) + (\text{Oksijen (sccm)})] \quad (15)$$

Ayrıca sadece %8 oksijen oranı için, elde edilen deneysel veri ve nonlinear fit eğrisi elektriksel karakterizasyon kısmında Şekil 14 ün içerisinde ekli grafik olarak gösterilmiştir.

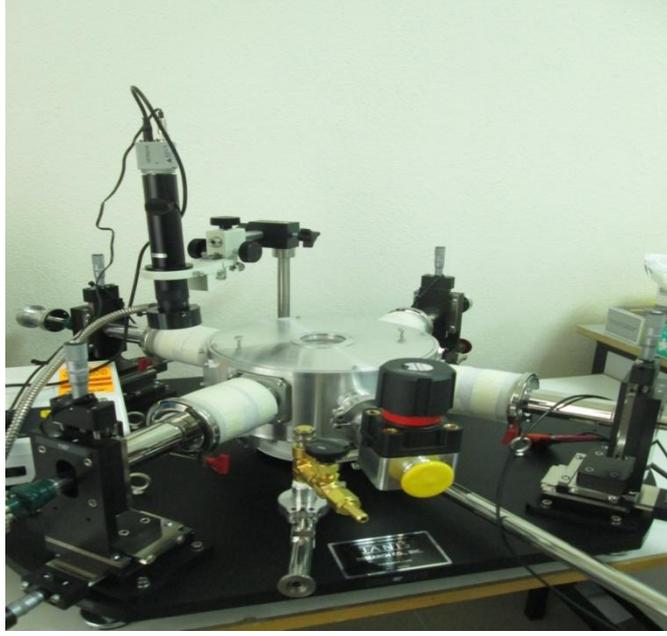
Tablo 4. Oksijen basıncı ve altın katkılamanın TCR üzerine etkisi

$\rho_{\text{Oksijen}}$ (%)	Kısmi Oksijen Basıncı	Altın Katkılama	Kaplama Sonrası Isıl İşlem	TCR (-%)
8		-	-	1.54
9		-	-	1.60
10		-	-	1.77
10		yapıldı	-	1.67
10		-	yapıldı	1.55

Tablo 4 te gösterildiği gibi kısmi oksijen basıncının artması ile birlikte TCR değerinde bir artış görülmüştür. Bu artış %10 oksijen basıncına kadar devam eder. Bu değerden sonra filmlerde direnç artışı ile birlikte tekrar üretilebilirlik azalmaya başlar. Daha iyi TCR değerleri elde etmek için atmalı lazer kaplama veya DC manyetik saçtırma sırasında altaşa gerilim uygulayarak kaplama yapılması gerekir. Bu değerde en iyi TCR değeri elde edildiğinden direnç değerlerinin düşürülmesi için altın kaplama veya kaplama sonrası ısıl işlem bu kısmi oksijen basıncı için gerçekleştirilip karşılaştırılmıştır. Kaplama sonrası ısıl işlem TCR değerini altın katkılamaadan daha fazla düşürmüş dahası ince filmin yüzey özelliklerini de değiştirmiştir. Bir sonraki bölümde verileceği gibi direnç değerlerini düşürmek için katkılamanın daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

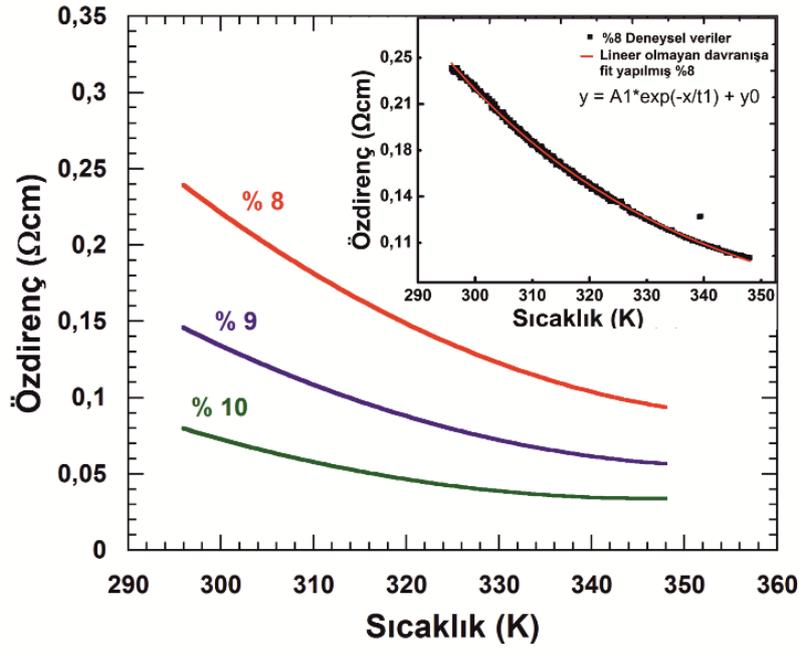
### 4.3 Elektriksel Karakterizasyon

Hazırlanan VO<sub>x</sub> ince filmlerin elektriksel ölçümü 295 ile 350 K arasında Şekil 13 te gösterilen Janis mikro uç istasyonu ile alınmıştır. Veriler Keithley multimetre ve LabView programı kullanılarak otomatik olarak kaydedilmiştir.

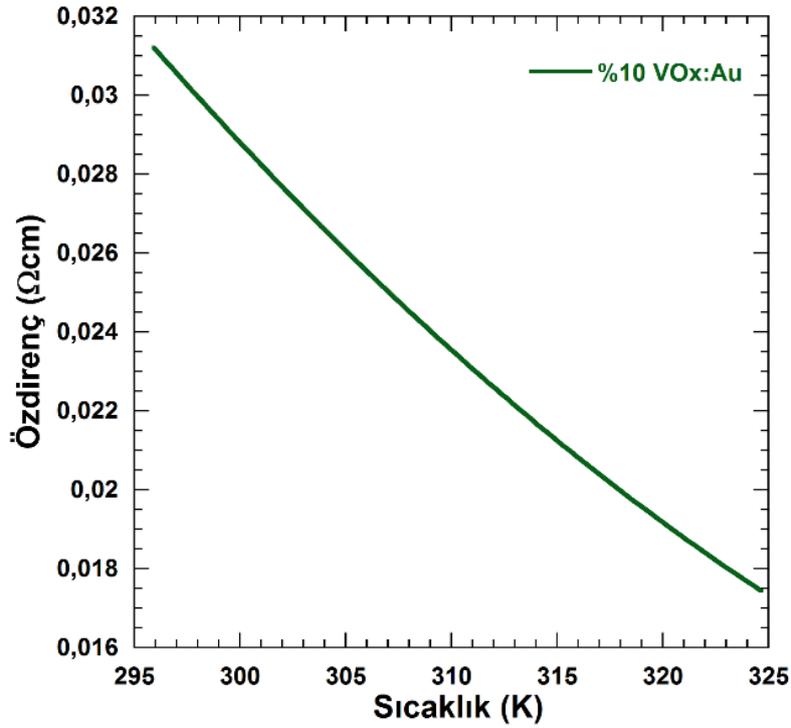


Şekil 13 Ölçümü yaptığımız Janis mikro uç istasyonu

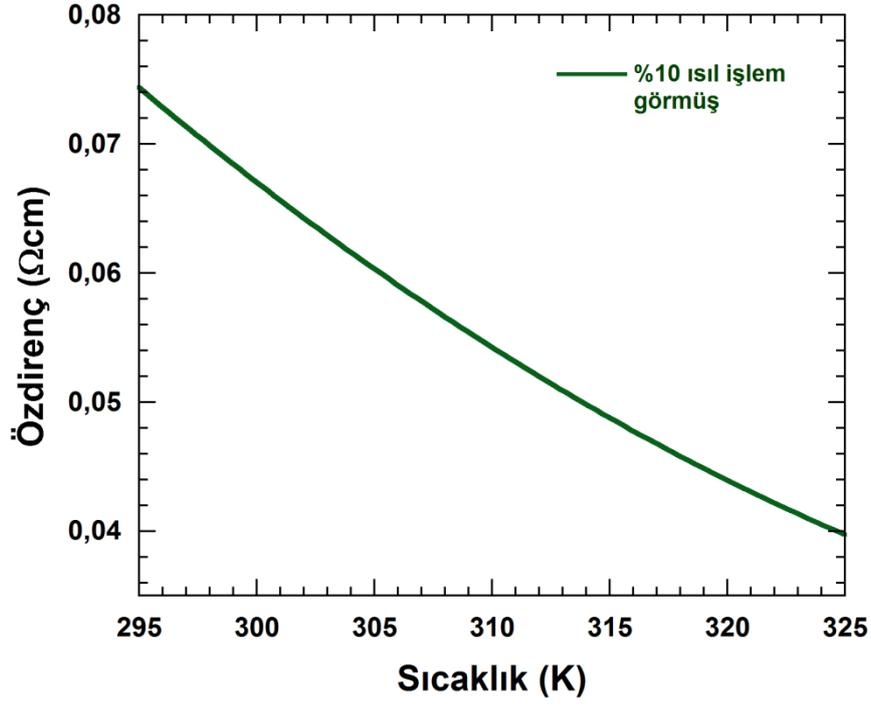
Elde edilen TCR değerleri bolometre yapımına uygun olsa da direnç değerleri altın katkılama ile TCR değerini çok değiştirmeden düşürülebileceği gösterilmiştir. İlk aşamada oksijen konsantrasyonu artırılarak en yüksek TCR ve en düşük direnç için optimizasyon yapılmış ve -%1.77 TCR değerine %10 oksijen basıncında ulaşılmıştır. Şekil 14'de farklı oksijen basınçlarının, katkılamanın ve katkılama sonrası ısı işlemin ince filmlerin öz direnç değerleri üzerindeki etkisi ve elde edilen TCR değerleri gösterilmiştir. Grafikler her bir ölçüm için linear olmayan fit eğrisi olarak çizdirilmiş sadece %8 oksijen basıncı için deneysel veri ve fit eğrisi Şekil 14 içerisine örnek olarak yerleştirilmiştir. Şekil 15'de %10 oksijen basıncına sahip altın katkılama yapılmış VO<sub>x</sub>:Au filmlerin öz direnç sıcaklık ilişkisi verilmiştir. Şekil 14'de ise %10 oksijen basıncına sahip VO<sub>x</sub> filmlerin ısı işleminden sonra elde ettiğimiz öz direnç sıcaklık grafiği gösterilmektedir.



Şekil 14 Kaplama sırasındaki oksijen basınçlarının değişimi ile VO<sub>x</sub> filmlerinin özdirenç-sıcaklık davranışı arasındaki ilişki (H. Alaboz vd., 2017)



Şekil 15 %10 oksijen basıncına sahip altın katkılama yapılmış VO<sub>x</sub>:Au filmlerin özdirenç-sıcaklık ilişkisi (H. Alaboz vd., 2017)

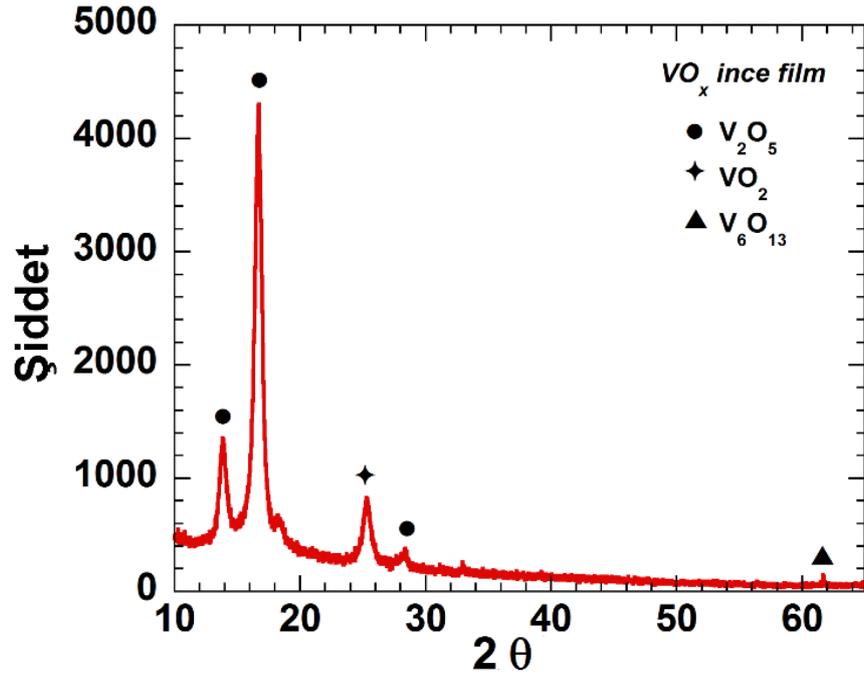


Şekil 16 %10 oksijen basıncına sahip VO<sub>x</sub> filmlerin ısıtılardan sonra elde ettiğimiz özdirenç sıcaklık ilişkisi (H. Alaboz vd., 2017)

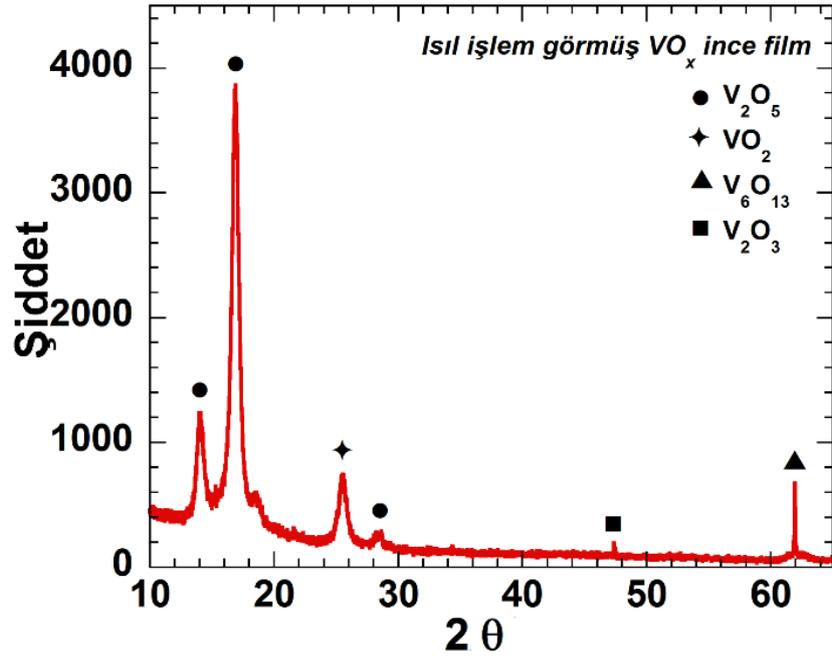
%10 oksijen basıncına kadar filmlerin özdirencinin azaldığı gözlemlenmiştir bu davranış literatürle de uyumludur (Subrahmanyam vd., 2008) ve bu değerden sonra filmlerin özdirencinde artış meydana gelmektedir. TCR değerinin optimum olduğu değer %10 oksijen basıncı olan değer olarak bulunmuştur. Elde edilen filmler kararlı ve tekrar üretilebilirliği yüksektir. Bunun yanında filmler 295 ile 350 K arasında herhangi bir geçiş göstermemektedir. Literatürde de rapor edildiği gibi kaplama sonrası ısıtılardan filmlerin direncini düşürmektedir. Metal katkılama da aynı şekilde filmlerin direncini düşürmek için kullanılmıştır. Projede yapılan optimizasyon çalışmalarında da bu etkiler gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu etkilerden hangisinin tercih nedeni olduğu belirtilmiştir.

#### 4.4 XRD Yapısal Karakterizasyon

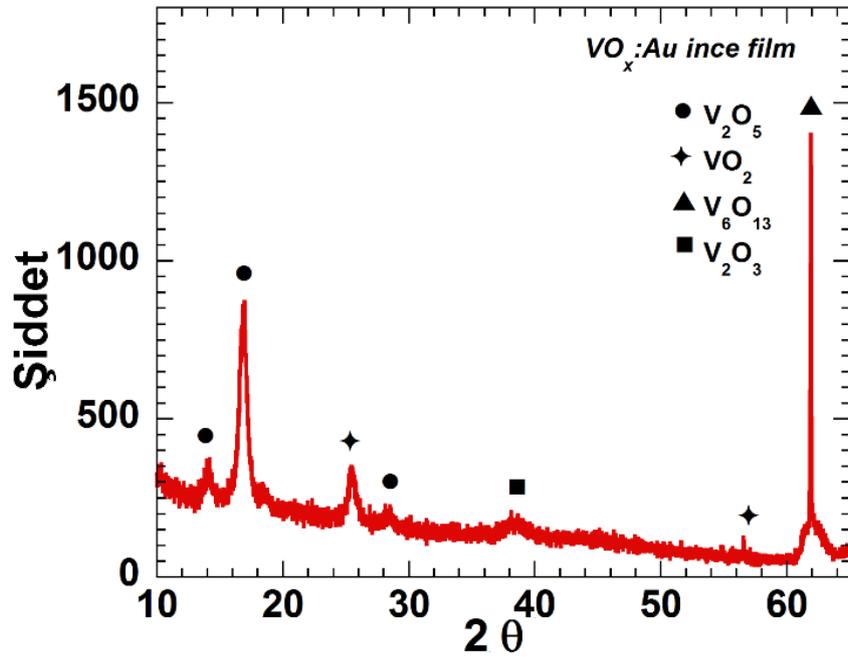
Kaplama sonrası ısıtılma işlemi ve katkılamanın ince filmlerin kompozisyonuna etkisinin incelenmesi amacıyla XRD spektrumları 10 ile 65° arasında alınmıştır. Spektrumlar Şekil 17-20'de gösterilmiştir.



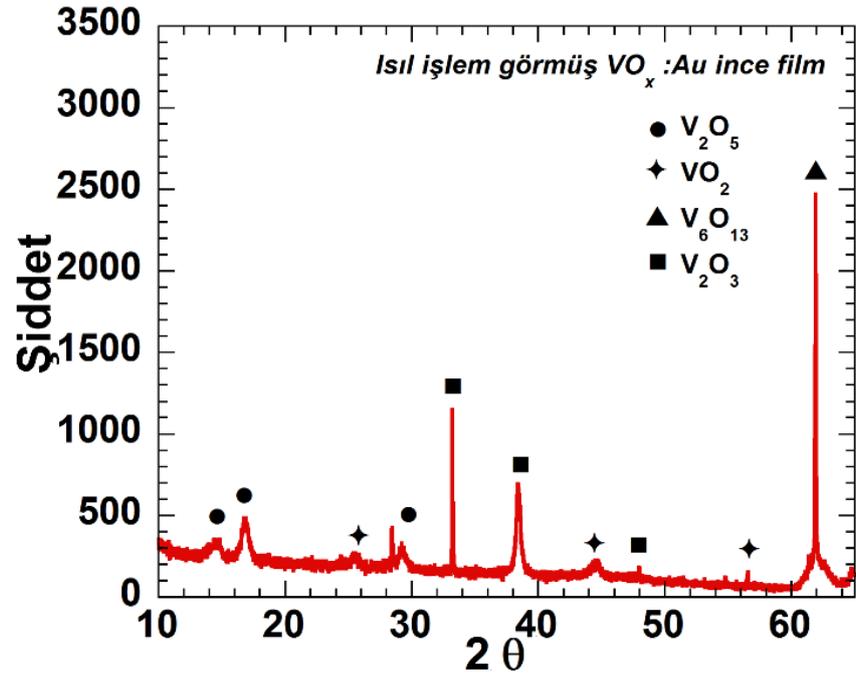
Şekil 17 İşlem görmemiş  $VO_x$  ince film (H. Alaboz vd., 2017)



Şekil 18 Isıl işlem görmüş VO<sub>x</sub> ince film (H. Alaboz vd., 2017)



Şekil 19 İşlem görmemiş VO<sub>x</sub>:Au ince film (H. Alaboz vd., 2017)



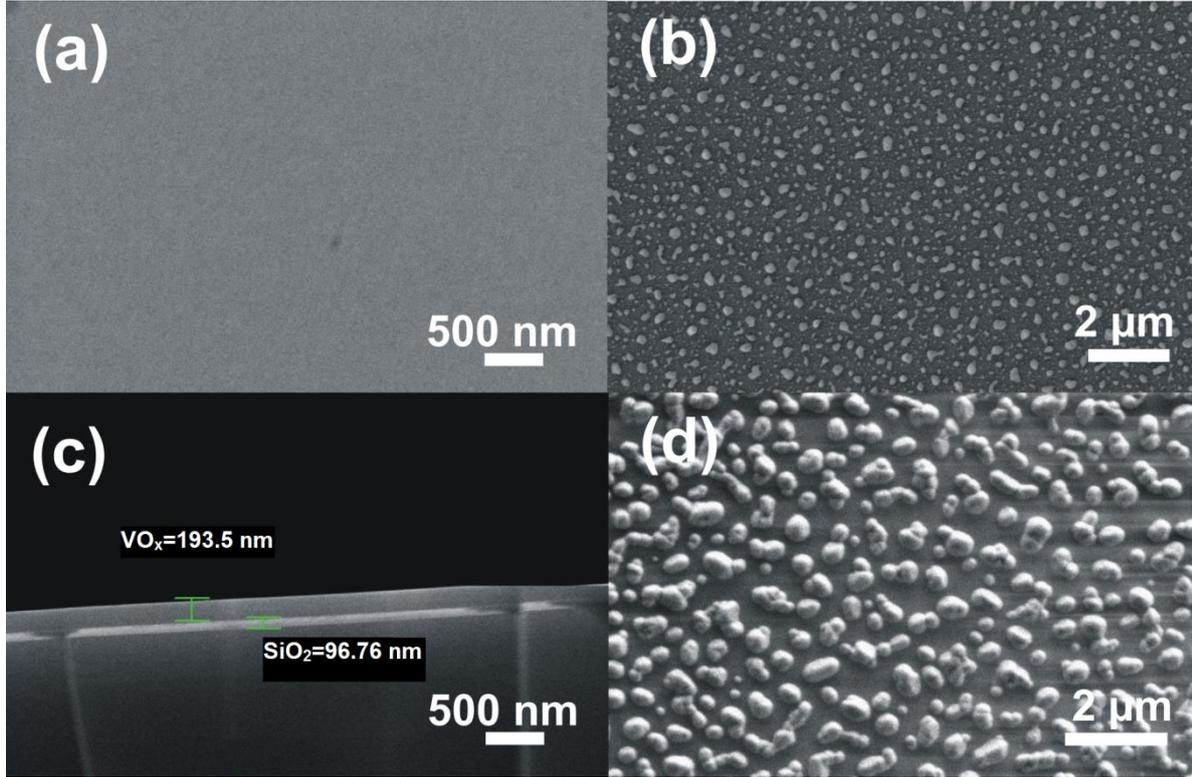
Şekil 20 Isıl işlem görmüş  $VO_x$ :Au ince filmi (H. Alaboz vd., 2017)



XRD spektrumlarından görüldüğü gibi filmlerin hepsi net bir şekilde çoklu oksit fazı göstermektedir.  $VO_x$  filmler çoğunlukla  $V_2O_5$  fazı ile birlikte küçük bir miktar  $VO_2$  fazı ve  $V_6O_{13}$  fazı içermektedir. Şekilde gösterildiği gibi içi dolu daireler ortarombik pentaoksiti (JCPDS card no 41-1426) ve içi dolu yıldızlar da vanadyum dioksiti (JCPDS card no 43-1051) nitelendirilmektedir. Isıl işlem görmüş örneklerde  $16.7^\circ$  deki  $V_2O_5$  in (200) pikinin şiddeti azalmakta ve  $61.6^\circ$  daki  $V_{16}O_3$  ün (042) pikinin şiddeti artmaktadır. Isıl işlemden sonra  $VO_x$  deki  $x$  değerinin düşüşü daha düşük seviye vanadyum oksit fazlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bir başka deyişle ısıl işlemden sonra filmler oksijen kaybetmektedir. Örnek olarak  $V_2O_5$  deki  $x=2.5$  iken ısıl işlemden sonra ortaya çıkan  $V_6O_{13}$  ün  $x$  değeri ise  $X=2.2$  dir. Düşük seviye oksitlerin ısı artışıyla yüksek seviye oksit vanadyumlarına göre yüksek sıcaklıklarda daha stabil olduğu sonucuna varılabilir. Bununla birlikte altın katkılamanın film kompozisyonunu az da olsa değiştirdiği sonucuna varılabilir. Altın katkılanmış filmler katkılanmamış olanlara kıyasla daha fazla  $V_6O_{13}$  fazı içerirken daha az  $V_2O_5$  fazı içerirler. Buradan altın katkılamanın daha yüksek seviyede vanadyum oksit fazlarının oluşumunu bir derecede kısıtladığı sonucuna varılabilir. Isıl işlem sonrası filmlerde de ısıl işlem sonrasında daha düşük seviye vanadyum oksit fazlarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu davranış ısıl işlem ve altın katkılama sonrasındaki öz direnç düşüşünü de açıklamaktadır.

#### 4.5 SEM analizi

$VO_x$  ve  $VO_x: Au$  filmlerin yüzey özelliklerine Philips SEM kullanılarak bakılmıştır. Şekil 21(a) da görüldüğü gibi işlem görmemiş  $VO_x$  filmlerin yüzeyi homojen ve düzdür. Filmler nanoboyutta bir kristallenme göstermiştir.  $VO_x: Au$  filmlerin yüzeyi de  $VO_x$  filmlerin yüzeyi ile aynı özelliktedir. Şekil 21(b) de gösterilen ısıl işleme tabi tutulmuş  $VO_x$  filmlerin yüzeyleri şekil 21(d) deki  $VO_2$  ağırlıklı  $500^\circ C$  sıcaklıkta safir üzerine büyütülmüş filmlerin yüzeyine benzer bir şekilde birbirinden ayrık adalar biçiminde taneciklenmeye başlar. Taneciklenme ve tanecik boyutları alttaşı ve büyütme koşulları ile değişse de bu davranış literatürde de daha önce rapor edilmiştir (Dou vd., 2015). Şekil 21(c) de kaplanan filmlerin yanal alanının kesiti, kalınlık doğrulama ve katmanların durumuna bakılmak için alınmıştır.



Şekil 21 VO<sub>x</sub> filmlerin a) ısıtılma işlemine tabi tutulmadan b) ısıtılma işlemine tabi tutulduktan sonra c) Yanal alan görüntüsü d) VO<sub>2</sub> ağırlıklı filmlerin yüzey görüntüsü (H. Alaboz vd., 2017)

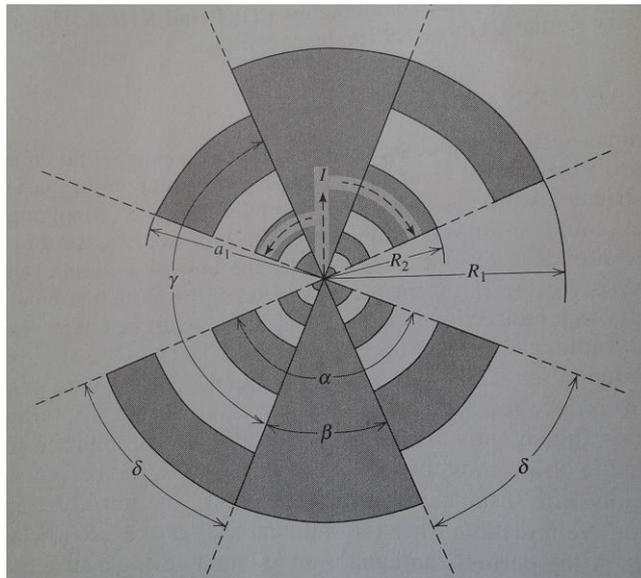
Dolayısıyla buradan ısıtılma işlemi sonunda filmlerin yüzeyinin belirgin bir şekilde değiştiği ve yüzey düzgünlüğünü yitirdiği görülebilir. Yüzey homojenliği bolometre uygulamalarında sinyal kayıplarının yaşanmaması için önemlidir. Bu derecede yüzeyde meydana gelen bir değişim sadece litografi aşamasında sorunlara yol açmayacak sonrasında da üretilen bolometrenin performansını etkileyecektir.

Kapladığımız filmlerde optimizasyon ile istediğimiz değerlere ulaştığımızda bunları bolometre olarak hazırlamak amaçlı önce anten tasarımları yapılmıştır. Bu konudaki projede yaptığımız çalışmalar bundan sonraki kısımda anlatılmaktadır.

## 4.6 CST Microwave Studio Anten Simülasyonları

### 4.6.1 Teorik

Anten genel olarak elektromanyetik dalgayı yaymak veya almak için tasarlanmış iletici ya da alıcı sistemlerdir (Committee, Antennas, ve Society 2014). Bu antenlerden en çok kullanılanlardan olan papyon (Bow tie) anten aslında sonlu bir bikonik antendir. Kaynaktan çıkan ve anten üzerine gelen elektromanyetik dalganın tekrar salınım yapacağı kısımlar metal bir tabakadan (mikroelektronikte bu genelde altındır) oluşur. Papyon antenler yüksek frekanslarda sıklıkla kullanılır. Frekanstan bağımsız anten grubuna girer ve bu gruba ilgili detaylı bilgi log periyodik antenin özelliklerini tanımlayacak şekilde literatürde verilmiştir (DuHamel ve Isbell, 1957). Papyon anten ile ilgili çalışmalar yapının geometrisi ve iki yayımcı metal tabakaların açıları üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalarda rezonans frekansını etkileyen parametreler incelenmiştir veya tasarımlar bu parametreler dikkate alınarak yapılır (Yang vd., 2011; Tu vd., 2013). Bu projede papyon anten tasarımı yapılmış ve anteni oluşturan geometrik parametrelerin rezonans frekansını ve yansıma katsayısı üzerine etkileri incelenmiştir. Log periyodik anteni geometrik olarak ayıran önemli nokta üzerine periyodik olarak dizilmiş dış yapılarıdır. Frekansın bir logaritması olarak empedansı ve radyasyon karakteristiği periyodik olarak tekrar eden bir yapıya sahiptir. Literatürde log periyodik antenler de sıkça kullanılırlar (Luukanen vd., 2006; Saijo vd., 1999; Lu vd., 2008) Genel yapısı Şekil 22 de gösterilmiştir.



Şekil 22 Kendini tamamlayan (self-complementary) log periyodik anten (Stutzmann ve Thiele, 1998)

Burada boyut faktörü aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilir;

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} < 1 \quad (16)$$

Yarık genişlikleri ise;

$$\sigma = \frac{a_n}{R_n} < 1 \quad (17)$$

olarak ifade edilir ve her bir n değeri için geçerlidir.

$$\sigma = \sqrt{\tau} \quad (18)$$

Bu ilişki ve kendini tamamlayan log periyodik anten tasarımı, geniş bant genişliğine ulaşmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu şekilde tasarlanan bir log periyodik antenin performansı f frekans olmak üzere  $f_n < f < f_{n+1}$  arasında büyük oranda değişmeyecek ve avantaj sağlayacaktır.

Antenler farklı yöntemlerle beslenebilir, bunlardan biri direk olarak koaksiyel olarak bir mikro hat üzerinden, ya da dolaylı olarak eş düzlemlı dalga kılavuzu veya elektromanyetik eşleşme ile yapılabilir. Anten tasarımcısı kullanım amacına göre birçok parametreyi optimize etmesi gerekebilir. Bu proje kapsamında antenler dolaylı yoldan (direk temas olmadan) beslenmiş ve rezonans frekansı yeri ile yansıma katsayısı parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır.

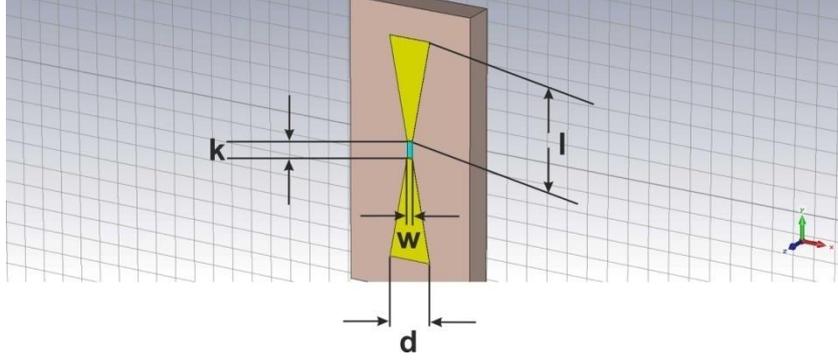
#### 4.6.2 Simülasyon

Anten tasarımı için 2 farklı anten yapısı ele alınmış ve simüle edilmiştir. Bunlardan ilki papyon diğeri ise log periyodik antendir. Simüle edilen papyon antenin CST programındaki modeli aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Simülasyonun hedefleri;

1) Rezonans frekansının 0.6 THz veya bu değere en yakın bir değerde elde edilmesi

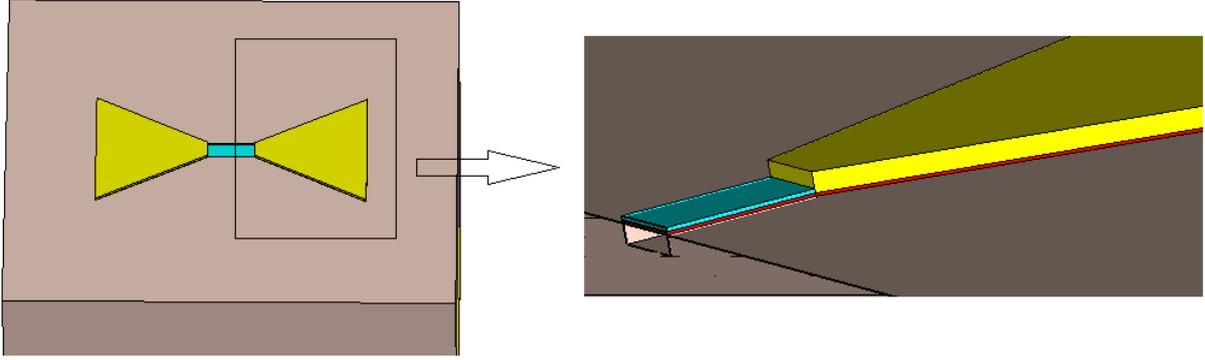
2) Rezonans frekansında antenin THz radyasyonu absorpsiyonunun en yüksek seviyeye çekilmesi dolayısıyla yansıma katsayısının düşük bir değerde olmasıdır.

şeklinde verilebilir. Bu hedeflerin gerçekleştirilmesi için rezonans frekansını etkileyen parametrelerin değişimleri tek tek simüle edilmiştir.

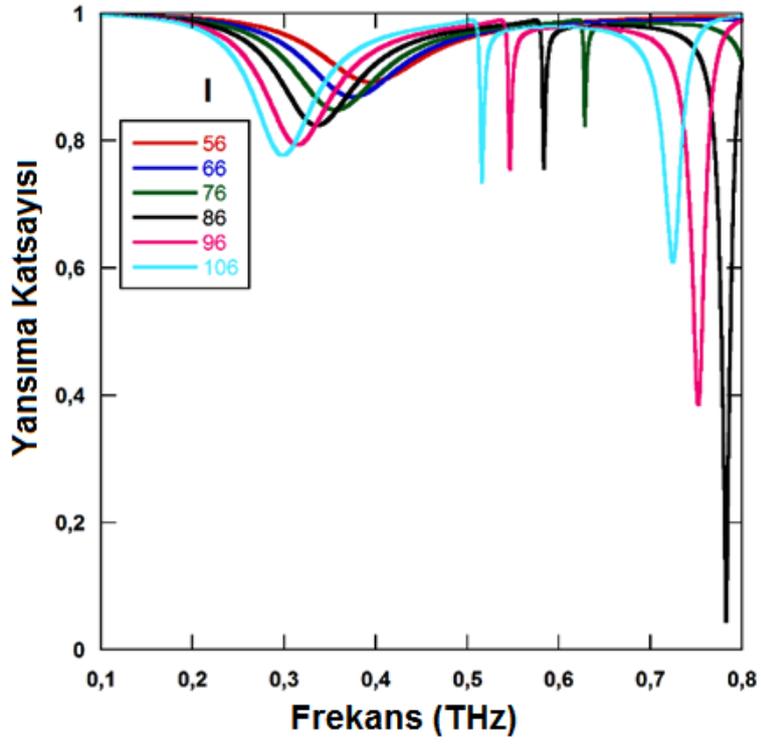


Şekil 23 Papyon anten tasarımı

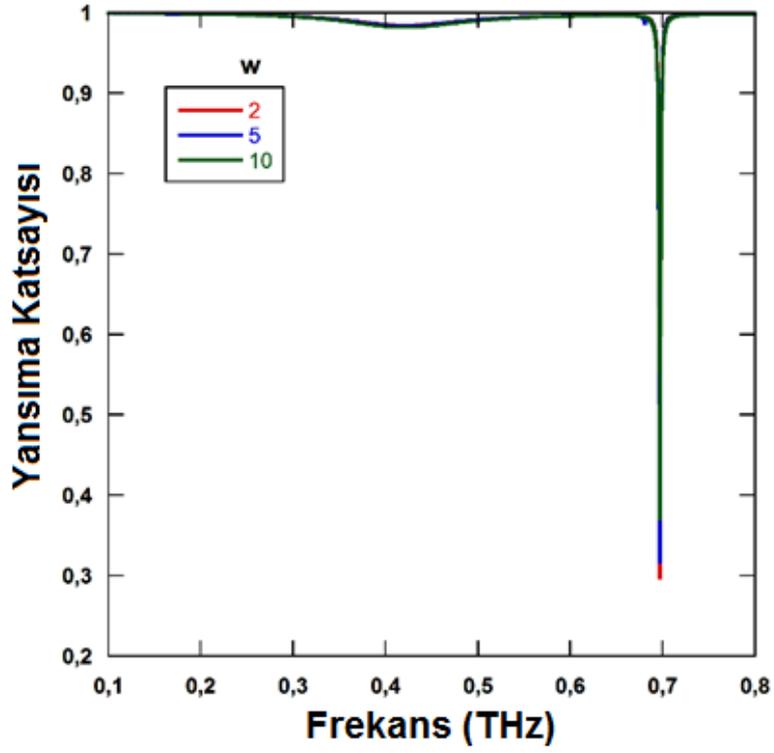
Burada literatürde de sıkça araştırılan (Raully vd., 2008) parametreler olan papyon antenin  $k$ ,  $l$ ,  $w$  ve  $d$  gibi şekilde gösterilen geometrik boyutlarındaki değişimin rezonans frekansının yerinde ve yansıma katsayısı değeri üzerindeki etkisi simüle edilerek araştırıldı. Bu araştırma yapılırken aşağıda gösterilen her şekilde sabit tutulan ve buna göre değişimi gözlemlenen parametreler şekil açıklamalarında verildi. Simülasyonda tasarlanan anten literatürden farklı olarak gerçek yapısının birebir kopyası olarak tasarlanıp simüle edildi. Şekil 23 te görülebileceği gibi Si/SiO<sub>2</sub>/VO<sub>x</sub>:Au/Au katmanları ve köprü altındaki hava boşluğu tasarıma eklendi. Kalınlıklar daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi optimize edilmiş değerlerden verildi. Dielektrik sabitleri literatürden alındı ve THz dalgası antenin üzerine dik bir şekilde gönderildi. Simülasyonlar birim hücre olarak yapılarak sadece tek bir anten elemanının değil dizi haline getirilecek yapının sonuçları incelenmiş oldu. Simülasyonların bu şekilde uygulanmasının simülasyon zamanını artırdığını da belirtmek gerekir.



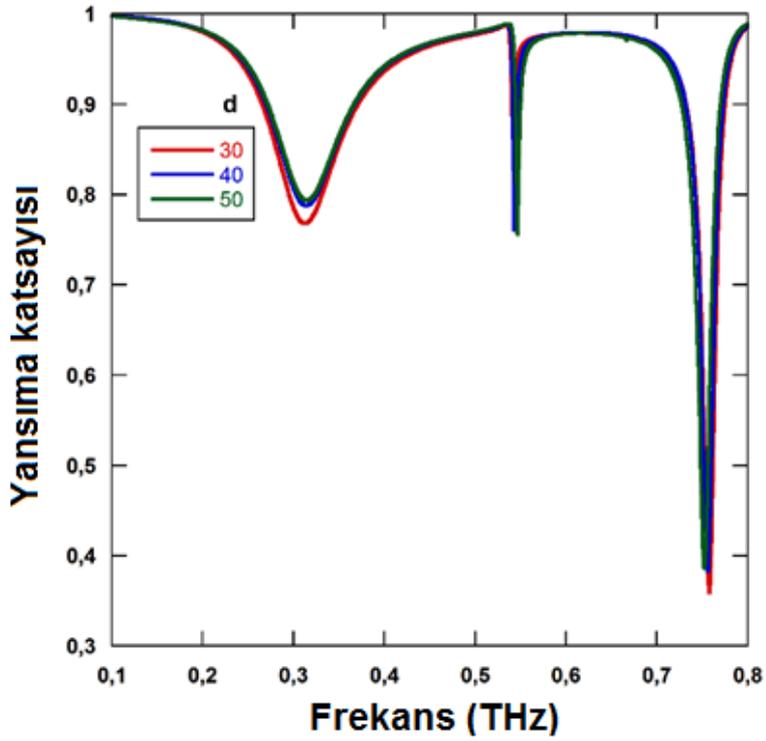
Şekil 24 CST MS ile tasarlanan papyon antenin yapının tüm katmanlarının gerçeğe uygun şekilde tasarımı



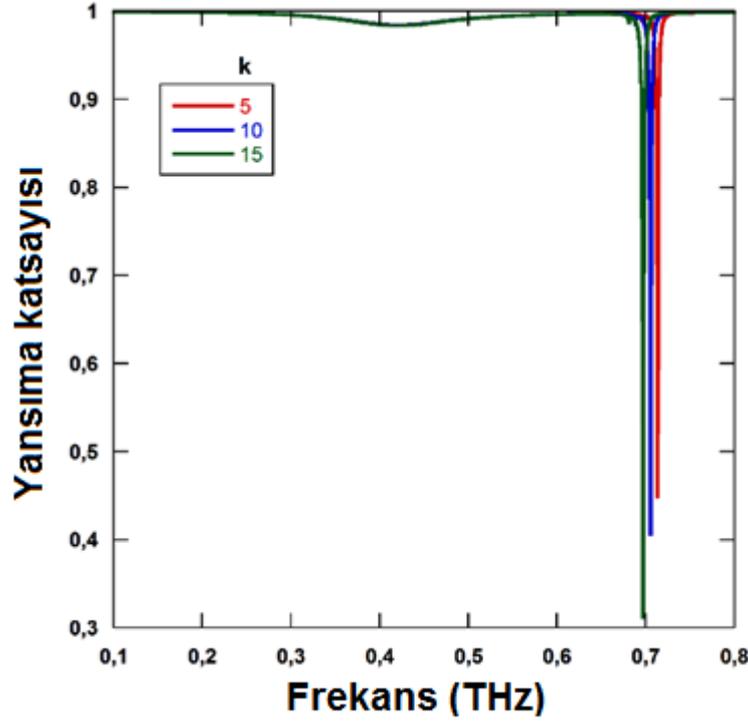
Şekil 25 Papyon tasarımında sadece l parametresinin değişimiyle rezonans frekansının değişimi ( $w=5$ ,  $k=15$ ,  $d=40 \mu\text{m}$ )



Şekil 26 Papyon tasarımında sadece  $w$  parametresinin değışimiyle rezonans frekansının değışimi ( $d=40$ ,  $k=15$ ,  $l=96$   $\mu\text{m}$ )



Şekil 27 Papyon tasarımında sadece  $d$  parametresinin değışimiyle rezonans frekansının değışimi ( $l=96$ ,  $w=5$ ,  $k=15$   $\mu\text{m}$ )



Şekil 28 Papyon anten tasarımında sadece k parametresinin değişimiyle rezonans frekansının değişimi ( $l=96$ ,  $w=5$ ,  $d=40$   $\mu\text{m}$ )

Tablo 5. Papyon anten tasarımında kullanılan parametreler

	$l(\mu\text{m})$	$w(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$	$k(\mu\text{m})$	Rezonans frekansı (THz)	Yansımaya Katsayısı
l değişiminin etkisi	56	5	40	15	>0.78	<0.12
	66	5	40	15	>0.78	<0.12
	76	5	40	15	>0.78	<0.12
	86	5	40	15	0.78	0.12
	96	5	40	15	0.75	0.41
	106	5	40	15	0.72	0.60
w değişiminin etkisi	96	2	40	15	0.70	0.29
	96	5	40	15	0.70	0.31
	96	10	40	15	0.70	0.35
d değişiminin etkisi	96	5	30	15	0.76	0.36
	96	5	40	15	0.76	0.37
	96	5	50	15	0.75	0.37
k değişiminin etkisi	96	5	40	5	0.72	0.45
	96	5	40	10	0.71	0.41
	96	5	40	15	0.69	0.29

l parametresinin artışı ile rezonans frekansının daha düşük frekanslara doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Fakat yansımaya katsayısı değeri l parametresinin 86  $\mu\text{m}$  den 106  $\mu\text{m}$  ye artışıyla 0.12 den 0.60 a kadar yükselmektedir. Dikkat edilecek olursa 0.2 THz de bir



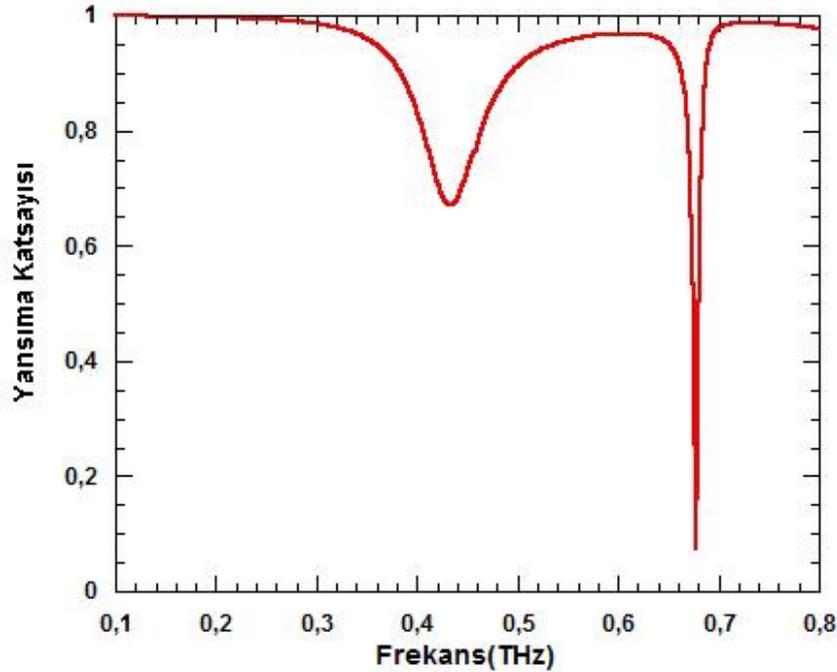
tekrarlayan bir rezonans gözlemlenir. Tablo 5 'te rezonans frekansı olarak verilen değerler yansımaya katsayısının en düşük değerini aldığı asıl rezonans frekansıdır.

$w$  parametresi antenin köprü kısmının genişliğini ifade eder ve bu parametrenin 2 ile 10  $\mu\text{m}$  arasındaki değişimi ile rezonans frekansının yeri değişmemiştir. Bu değer arttığında yansımaya katsayısı 0.29 dan 0.35 e çıkmıştır. Dolayısıyla tasarımı geliştirirken bu kısmın genişliği hem UV litografiye uygun şekilde hem de bu artış davranışını hesaba katarak tasarlandı.

$d$  parametresinin artışı ile rezonans frekansının yerinde göz ardı edilebilecek kadar az bir değişim gözlemlendi. Aynı şekilde yansımaya katsayısı değerinde de çok az miktarda değişim gözlemlenmiştir.

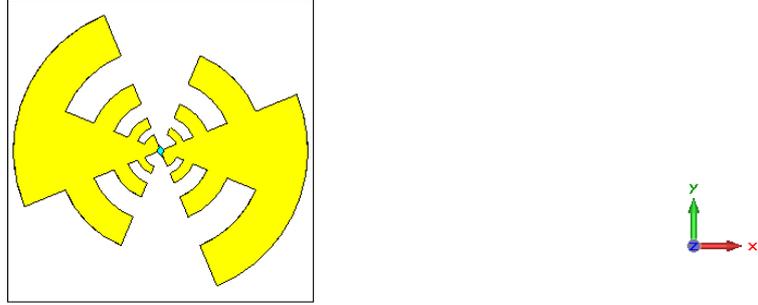
$k$  ile adlandırılan ve anten kolları arası boşluğu temsil eden parametrenin artışıyla birlikte rezonans frekansının da daha düşük frekanslara kaydığı gözlemlenmiştir. Bu etki yakın zamanda yapılan ve plazmonik rezonansların anten geometrisi ile değişimini inceleyen çalışmada rapor edilmiştir (Dong vd., 2012).

Yapılan tasarımda  $l$  için daha yüksek değerler verilerek rezonans frekansı 0.6 THz e doğru kaydırılmış, bu arada yansımaya katsayısının düşürülmesi için de  $k$  değeri olabildiğince yüksek tutulmuştur. 0.67 THz te rezonans veren anten tasarımının sonuçları Şekil 28 de gösterilmiş ve geometrik parametreleri şekil açıklamasında verilmiştir.

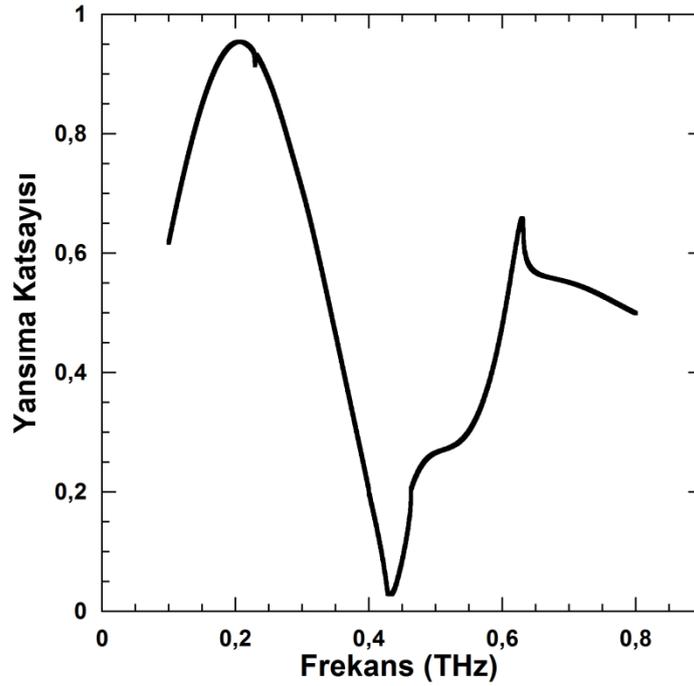


Şekil 29 0.67 THz de rezonans veren papyon tasarımı ( $k=15$ ,  $w=5$ ,  $l=126$  ve  $d=40 \mu\text{m}$ )

Projede sadece papyon değil log periyodik anten için de simülasyonlar yapıldı. Tasarlanan log periyodik antenin CST simülasyonundan görüntüsü Şekil 29 da verilmiştir. Tasarlanan log periyodik antenin simülasyonları birim hücre olarak yapılmış ve simülasyonda THz sinyali antenin algılayıcı bölgesine dik olarak gönderilmiştir (Şekil 30).



Şekil 30 CST MS ile tasarlanan log periyodik antenin simülasyondaki tasarımının görüntüsü  
Log periyodik anten simülasyonlarında da hedefler aynı şekilde hem rezonans frekansını 0.6 THz e ayarlayabilmek hem de yansımaya katsayısının değerini rezonans frekansında en düşük seviyeye indirebilmektir. Log periyodik anten de papyon gibi gerçek yapısının birebir kopyası şeklinde tasarlanmış ve köprü altındaki boşlukta simülasyona dahil edilmiştir. Log periyodik antenin simülasyon sonucu elde edilen rezonans frekansının yeri ve yansımaya katsayısının değeri Şekil 31 gösterilmiştir.

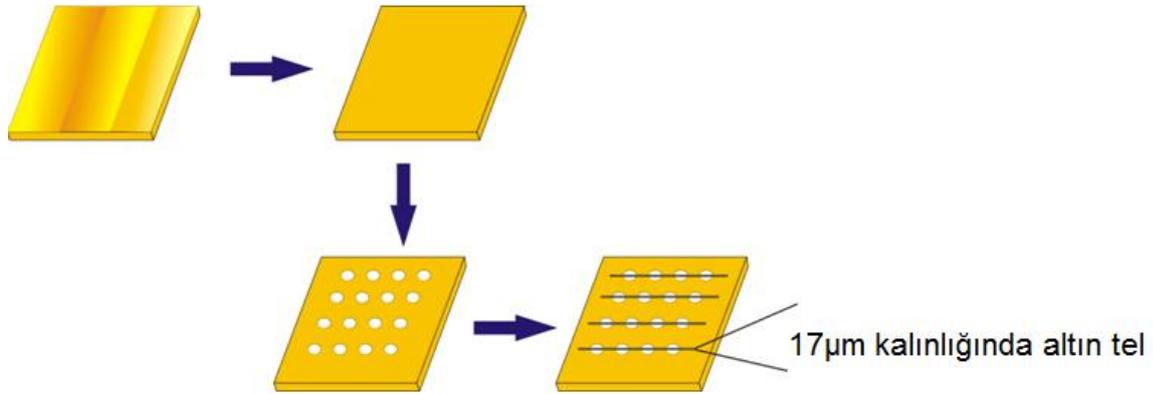


Şekil 31 Tasarladığımız log periyodik antenin yansımaya katsayısı ve rezonans frekansını

Elde edilen rezonans frekansının yeri literatürdeki sonuçlarla uyumludur (Saijo vd., 1999). Tasarlanan antenin köprü genişliği  $30 \mu\text{m}$  ve  $\tau = 0.49$  dur. Rezonans frekansı  $0.41 \text{ THz}$  de verir ve yansımaya katsayısı  $0.12$  dir. Log periyodik anten tasarımının papyon antene göre daha geniş bantta bir davranış sergilediği gözlemlendi.

#### 4.7 Litografi Basamakları

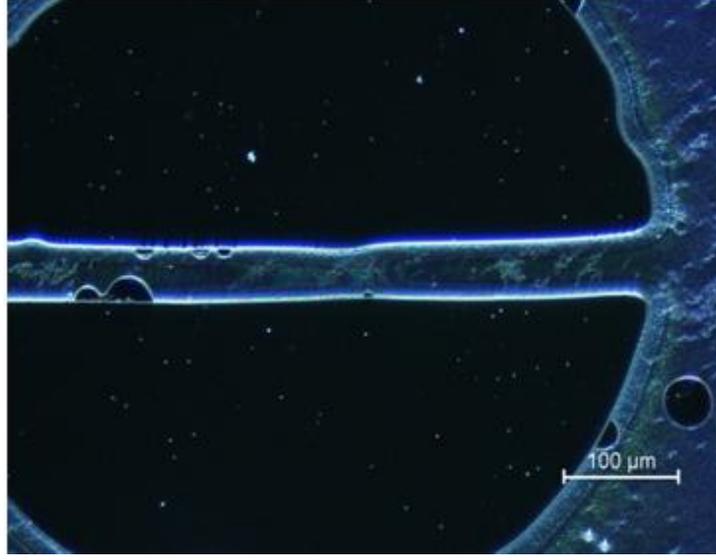
Litografi için ilk başta bir ön çalışma yapılmış ve UV maske tasarlanmadan önce bu el yapımı maske ile teorik beklenti test edilmiştir. Bunun için öncelikle kalınlığı  $0.5 \text{ mm}$  olan bakır plakalardan uygun ölçülerde kesilmiş ve zımparalanarak yüzeyi düzgünleştirilmiştir. Daha sonra yüzeyi düzgünleştirilmiş bakır plakaya enjeksiyon iğneleri yardımı ile elle çapı ortalama  $500$  mikrometrelik delikler açılmıştır. Bu işlemden sonra tekrar zımparalanıp temizlenmiştir. Daha sonra bu deliklerin tam ortasına mikroskop yardımı ile  $17$  mikrometrelik altın teller gerilip sabitlenerek litografi için gölge maskesi oluşturulmuştur. Bu basamaklar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



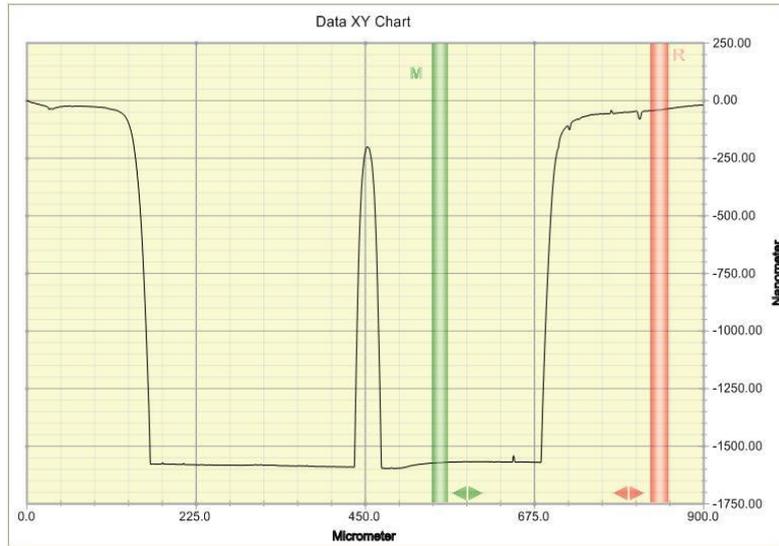
Şekil 32 Bakır plakadan gölge maske yapımı

Bu şekilde hazırlanan maske ile yapılan litografide filmlerin üzerine AZ5214 fotoresist spinner yardımıyla  $3000 \text{ RPM}$  de kaplanmıştır. Sonrasında filmlerin üzerine bu maske yerleştirilip  $7$  saniye UV ye maruz bırakılmıştır. Developer dan sonra maskenin koruduğu bölgelerde fotoresist kalmış ve filmler iyon demeti aşındırma ile  $\text{VOx:Au}$  olan katman korunmayan bölgelerden aşındırılarak silikon alttaşa kadar inilmiştir. Daha sonra silikon kısmının aşındırılması için  $\text{KOH}$  çözeltisi kullanılmış ve  $1$  mikrometreden daha fazla silikon alttaş

kimyasal olarak aşındırılmıştır. Bu işlemin sonucunda elde edilen yapının profilometre ile yüzey topolojisine bakılmış ve aşındırılan derinlik buradan tespit edilmiştir. Şekil 33'de bu yapının optik mikroskop görüntüsü ve Şekil 34'de profilometre ile bakılmış derinlik analizi görülebilir.

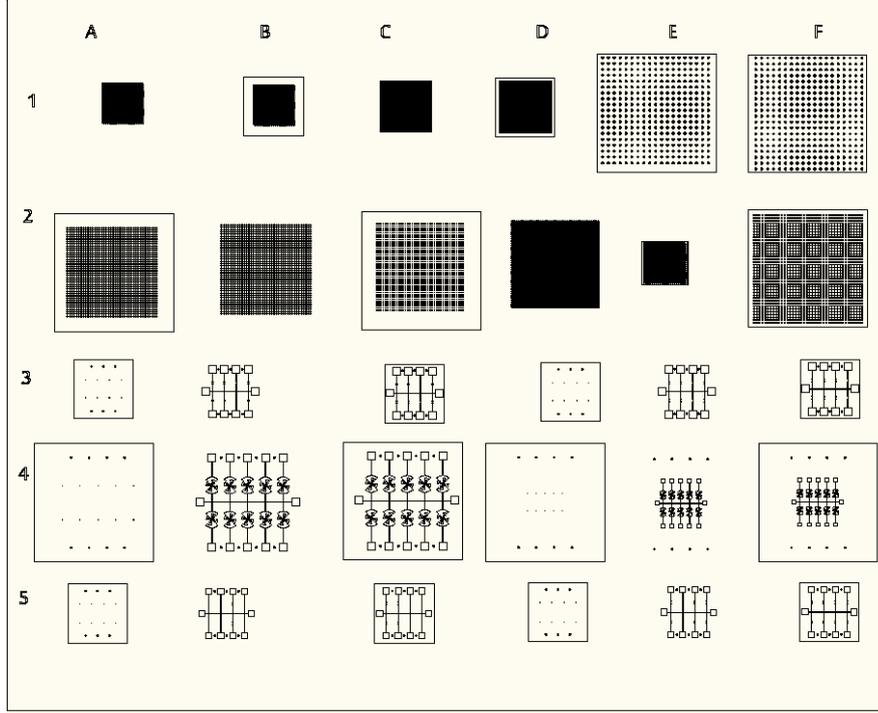


Şekil 33. El yapımı gölge maske ile litografi ve aşındırma sonrası elde edilen yapının optik mikroskop görüntüsü

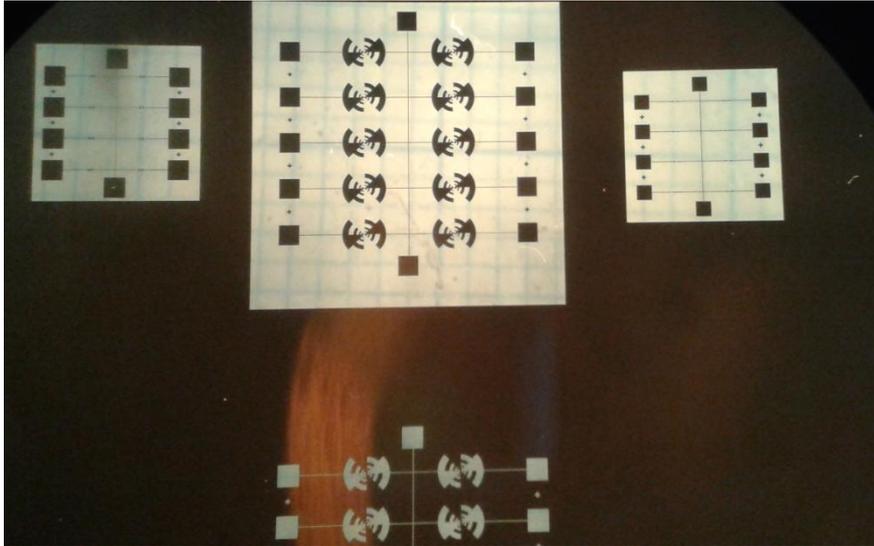


Şekil 34. El yapımı gölge maske ile litografi ve aşındırma sonrası elde edilen yapının Dektak profilometre ile analizi

Bu şekilde iyon aşındırma ve sonrasında KOH kimyasal aşındırma ile altta istenilen derinliğe kadar inilebileceği gösterilmiştir. Bu doğrulamadan sonra, CST Microwave Studio ile tasarımı yapılan dizi tasarımları Autocad ile tasarlanmış (Şekil 35) ve UV maske olarak yaptırılmıştır. UV maske üzerinde projemizle ilgili şekiller Şekil 36'da gösterilmiştir.

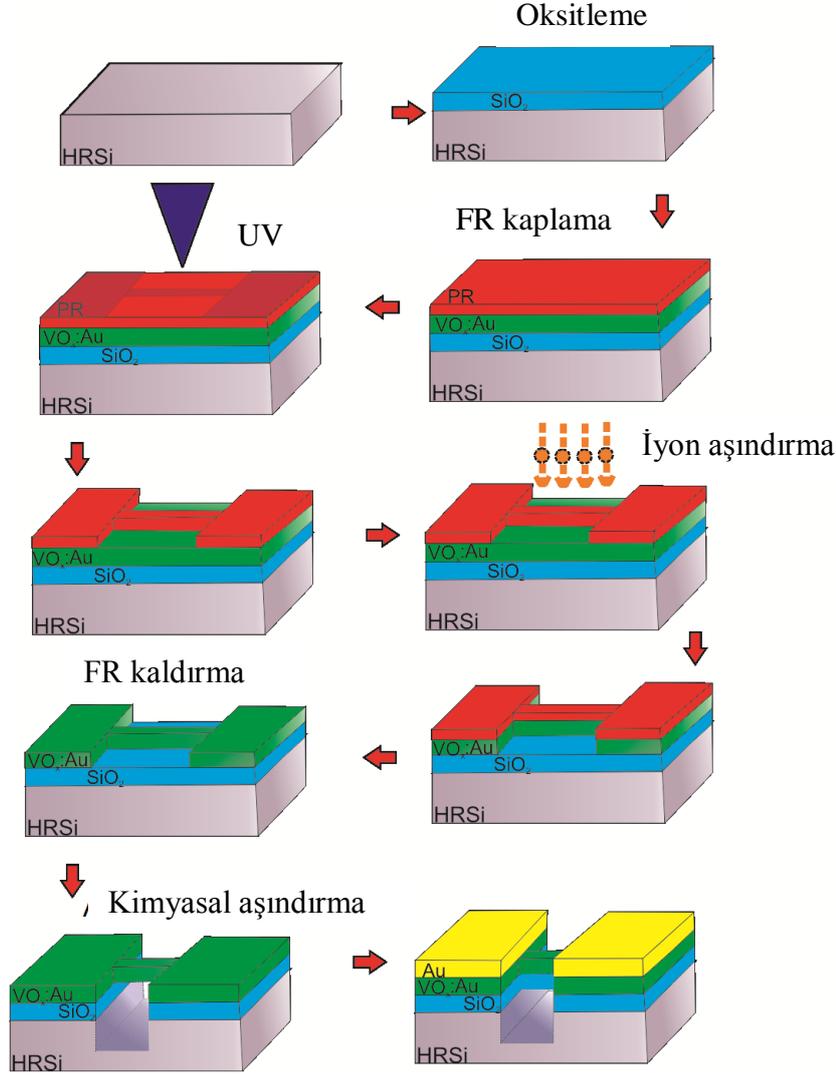


Şekil 35 Autocad yazılımı ile tasarladığımız UV litografi maskesi



Şekil 36 Yapılmış olan UV maskenin 3C, 4C, 5C hüccreslerinin tamamının ve 4B hüccresinin bir kısmının optik mikroskop görüntüsü

En temel haliyle litografi maskesiyle gerçekleştirilen litografi basamakları Şekil 37'de gösterilmiştir.

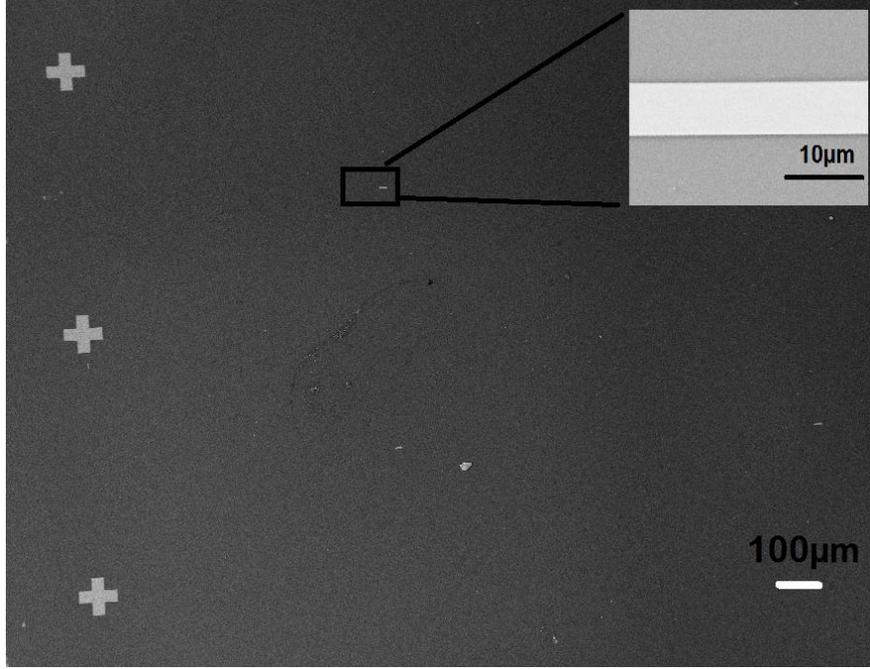


Şekil 37 Litografi Basamakları

İlk önce pul 1x1 cm<sup>2</sup> veya 5x5 mm<sup>2</sup> olarak kesilen örnekler bölüm 4.1.2 de anlatıldığı gibi oksitlenmiştir. Daha sonra oksitlenen örnekler AZ5214 fotoresist ile 3000 RPM de kaplanmış ve 30 dakika 90 °C de etüvde soft bake yapılmıştır. Sonrasında UV ye maruz bırakılıp hemen ardından developera ve deiyonize suya tutulmuştur. Azotla kurutulduktan sonra Litografi basamağı için ilk aşama şekli oluşturulmuş ve sadece köprü kısmı şekillendirilmiştir. İkinci basamağa geçmeden önce iyon demeti aşındırması 1 saat boyunca argon gazı ile iyon aşındırma sisteminde gerçekleştirilmiştir. İyon demeti reaktif aşındırmadan farklı olarak sadece demetin yolu boyunca aşındırma gerçekleştirir. Dolayısıyla sadece fotoresistin köprüyü koruduğu ilk aşamada dikdörtgen yapı çevresindeki tüm kısımlar iyon demeti ile aşındırılır. Bu aşındırma sırasında dikdörtgen köprü yapısının altından aşınma gerçekleşmez

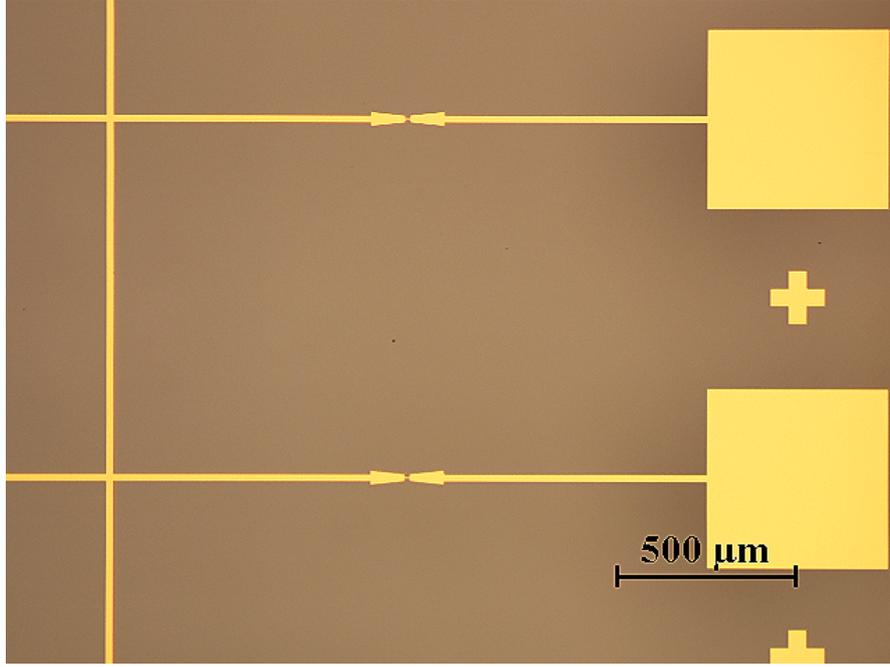
ve ilk aşama sonunda köprü kısmı korunarak diğer kısımlar iyon demeti ile aşındırılmış olur. İşlem sonrasında kalan fotoresist aseton yardımıyla sökülür.

İlk aşama sonrasında elde edilen yapının SEM görüntüsü Şekil 38 teki gibidir.



Şekil 38 İlk litografi basamağından sonraki köprü yapıları ve hizalama işaretlerinin SEM görüntüsü

Litografinin ikinci basamağı iletken kontakların köprü ile temasının gerçekleştirildiği aşamadır. Bunun için iletken kaplanacak yerler boşluk olacak şekilde maske tasarlanmış ve ilk basamaktaki fotolitografi basamakları tekrarlanmıştır. Bu basamaktaki yapının görüntüsü Şekil 39'da verilmiştir.

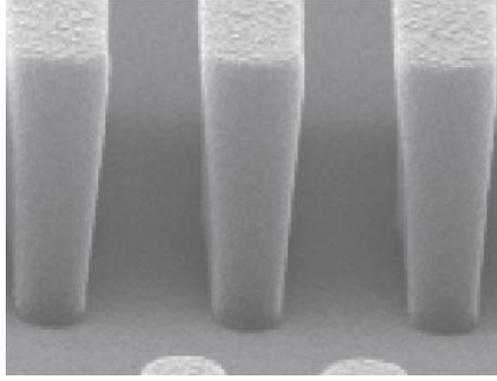


Şekil 39 İkinci Basamakta yapının optik mikroskop görüntüsü

Kontakların alınacağı boş kısımların oluşturulmasından sonra bu alana termal buharlaştırma sistemi ile altın kaplanmış, alan kısımlardaki fotoresist işlem sonrasında aseton ile sökülmüştür. Litografi basamağının son kısmında ise tüm bolometre dizisini koruyacak bir maske tasarlanmıştır. Bu maske ile yapılan bu son basamaktan sonra yapı KOH çözeltisine konulur ve köprü kısmının altında kalan silikon kimyasal olarak aşındırılmıştır.

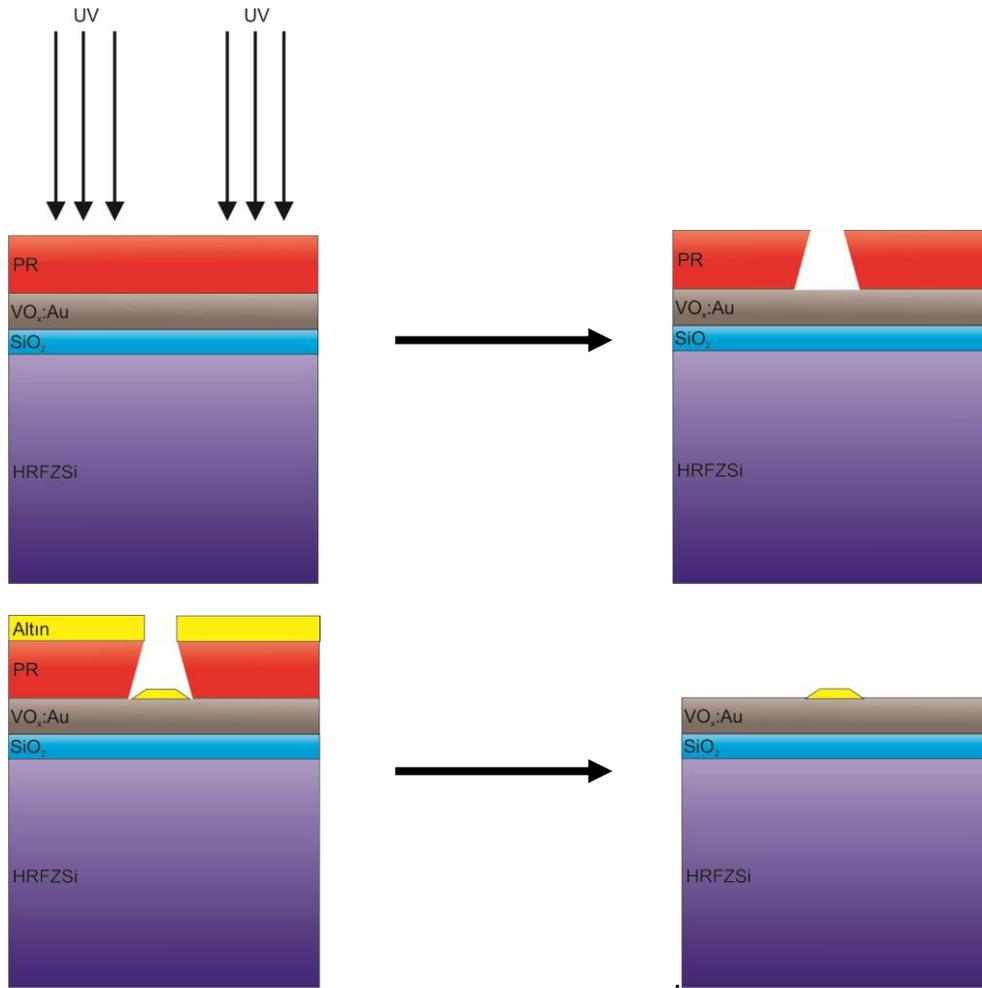
Kontakların sağlam ve düzgün atılması alınacak ölçüm için son derece önemlidir. Bu nedenle kontakların atıldığı lift-off basamağının her işlemde aynı sonucu verecek kadar hassas ve hatasız yapılması için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Lift-off basamağı projede önerilen litografi basamaklarından birisini içermektedir ve bu basamakta altın kontaklar, ilk basamakta oluşturulan köprü yapısı üzerine hizalayıcı yapıların (alignment marks) yardımı ile oluşturulmaya çalışılmaktadır. Lift-off basamağındaki en önemli nokta, işlem sırasında şekillendirilecek olan resistin yan duvarlarının kaplama sırasında kaplanmamasıdır. Bunu sağlamak için metal kaplanırken kaplama yöntemi ve resist doğru seçilmeli, uygulama bu seçimlere göre yapılmalıdır. Bu nedenle projede kontaklar için yapılan metal kaplama işleminde termal buharlaştırma kullanılmıştır. Termal buharlaştırma, manyetik saçırma tekniği gibi yan duvarların kaplanmasına neden olmaz. Bundan sonra bahsedilecek tüm kısımlarda kontaklar için termal buharlaştırma kullanılmıştır. Resist seçimi ise diğer önemli noktadır ve şekillendirilecek resist profili Şekil 40 da gösterildiği gibi undercut oluşturmalıdır.





Şekil 40 Negatif AZ® nLOF 2020 resistin litografi sonrasında oluşan undercut yapısı (Microchemicals, 2013).

Şekil 40'daki resistin kalınlığı 2  $\mu\text{m}$  dir ve resistin yüzeyinden derine indikçe alt kısmın daha fazla develop olduğu ve böylece undercut yapısına izin verdiği görülür. Lift-off işlemi için en uygun resist profili Şekil 1 deki gibi olmalıdır ve bu profil genellikle negatif veya image reversal resistler ile elde edilebilir. Negatif resistle yapılan bir lift-off işlemi Şekil 41'deki gibi şematize edilebilir.



Şekil 41 Negatif bir resistle yapılan lift-off işlemi

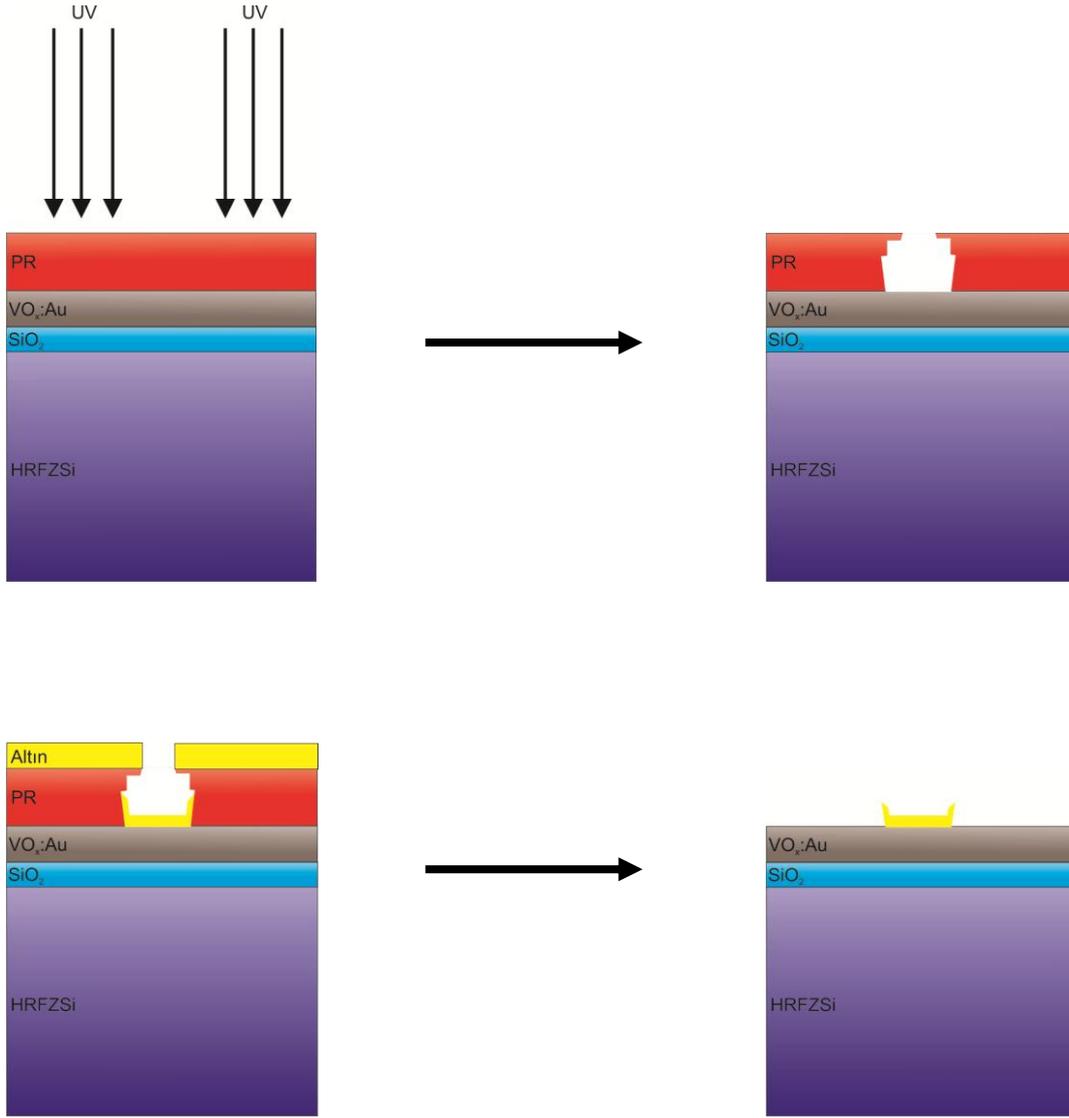
Negatif resist yüzeye kaplandıktan sonra maske ile birlikte UV litografi yardımıyla şekillendirilir. Daha sonra develop edilir ve maskedeki krom kaplı olmayan bölümlerdeki desen filmin üzerine aktarılmış olur. Kontaklar için altın kaplama işlemi yapılır ve en son basamakta da fotoresist aseton yardımı ile sökülür. Geriye sadece kontak alınmak istenilen noktalardaki altın tabakası kalır. Şekil 41'de görüldüğü gibi negatif resistlerde undercut yapısının oluşması altın kaplanırken yan duvarların kaplanmasını önleyerek son aşamada aseton içerisine sokulan resistin kolayca sökülmesini ve böylece lift-off işleminin yapılabilmesini sağlar.

Bunun yanında pozitif resistlerle bu işlemi gerçekleştirmek oldukça zordur. Pozitif bir resistin litografi sonrası profili Şekil 42'de gösterilmiştir.



Şekil 42 Pozitif AZ® MiR 701 resistin litografi sonrasında oluşan yapısı (Microchemicals, 2013).

Genellikle pozitif resistlerde litografi sonrasında duvar kenarları yuvarlanır ve dik bir duvar profili oluşmaz. Şekil 42'de görüldüğü gibi pozitif resistlerde dikkatli yapılmış bir litografi sonrasında dik yan duvarlar oluşturulabilir. Böyle bir durumda bile resistin üzerine kaplanacak metal dik profili olan yan duvarlara da kaplanabilir ve bu lift-off işlemi oldukça zor bir hale getirir. Ultrasonik ile titreştirme yapılması fotoresistin çıkarılmasında yardımcı olabilir fakat pozitif resistlerle bu işlemi gerçekleştirmek oldukça zordur. Fakat bu problemi aşmak için pozitif resist develop edilmeden önce toluene içerisinde bekletilerek resistin yüzeye yakın kısmı sertleştirilebilir. Bu şekilde yan duvarlar kaplansa bile lift-off yapma şansı artar. Bu işlem Şekil 43'te şematize edilmiştir.



Şekil 43 Pozitif resist ve toluene yardımıyla yapılmış lift-off aşamaları

Projede pozitif resist için bu şekilde, toluene yardımıyla lift-off aşaması optimize edilmeye çalışılmıştır. Tüm bu işlemlerin yanında, altın kontak için atılan metalin kalınlığı kaplanan resistin kalınlığının en fazla yarısı kadar idealde 2/3 ü kadar olmalıdır. Bu yöntem hem AZ5214E için denemiş hem de AZ1505 için denenmiştir. AZ5214E image reversal bir resisttir fakat iyon aşındırma işleminden sonra aseton içerisinde çıkarılmasının oldukça zorlaştığı tespit edilmiştir. Bu nedenle AZ1505 pozitif resist içinde Şekil 43'te bahsedilen yöntem denenmiştir. Tüm işlemlerde termal buharlaştırma ile kaplanan altının kalınlığı kalınlık monitöründen takip edilerek 150 nm ye sabitlenmiştir. Gümüş için termal buharlaştırma parametreleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6 Kontaklar için termal buharlaştırma parametreleri

Kaplama öncesi basınç (Torr)	Kaplama Sırasındaki basınç (Torr)	Kaplama Hızı (nm/saniye)	Kaplama Süresi (dakika)	Kaplanan kalınlık (nm)
$6.10^{-6}$	$4.10^{-3}$	0,5	5	150

AZ1505 için farklı kalınlıklarda kaplama yapılmış ve bu kaplamaların hepsi aynı sürede develop işleminden önce 3 dakika toluene e batırılmıştır. Farklı dönme hızlarına göre elde edilen resist kalınlıkları Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7 AZ1505 için farklı dönme hızlarında elde edilen farklı kalınlıklar

Dönme Hızı (RPM)	2000	3000	4000
kalınlık (nm)	716	560	512

Bu kalınlıklar profilometre yardımı ile ölçülmüştür ve 2000, 3000 ve 4000 RPM de elde edilen bu kalınlıkların yüzey profilometresi ile ölçümü Şekil 44,45 ve 46'da gösterilmiştir. Resist kalınlığı daha önce bahsedildiği gibi kaplanacak metalin kalınlığının en az 2 katı olmalıdır.



Şekil 44 2000 RPM de yapılan kaplama ile elde edilen resist kalınlığı

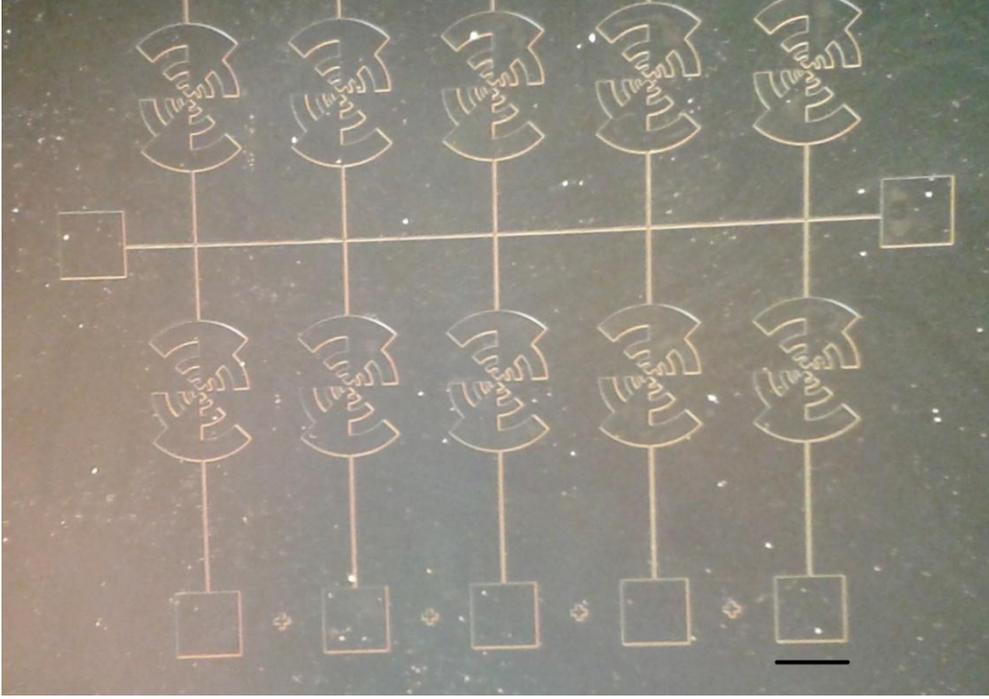


Şekil 45 3000 RPM de yapılan kaplama ile elde edilen resist kalınlığı



Şekil 46 4000 RPM de yapılan kaplama ile elde edilen resist kalınlığı

Şekil 44, 45 ve 46 de gösterilen resist kalınlıkları lift-off için yeterlidir. Bu işlemden sonra termal buharlaştırma ile 150 nm gümüş kaplanmıştır. Bir örnek olarak 2000 RPM de kaplanan fotoresistin üzerine yapılan kaplamanın hemen ardından alınan, yapının optik mikroskop görüntüsü Şekil 47'de verilmiştir.



Şekil 47 Termal buharlaştırma sonrası yapının optik mikroskop görüntüsü. Bar 500  $\mu\text{m}$  yi göstermektedir.

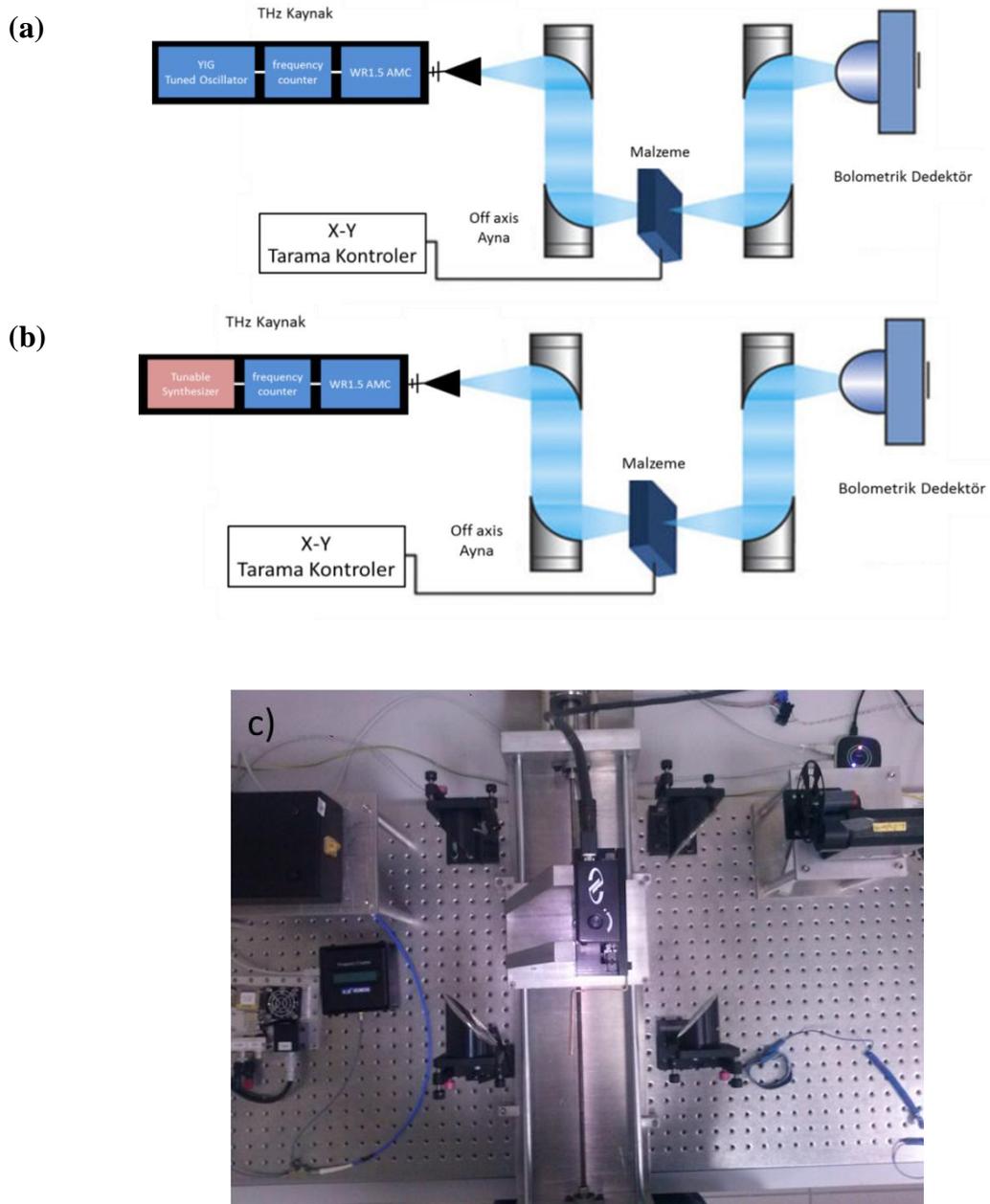
Toluene uygulamasına rağmen farklı kalınlıklardaki tüm örneklerde aseton kaplanan tüm metali sökmüştür. Bunun nedeni yan duvarların kaplanmasıdır. Bu aşamaların aynısı AZ5214E resisti için de denemiş ve AZ5214E nin pozitif resist olarak kullanımında sonuç aynı şekilde gerçekleşmiştir. Şu anda toluene tutma süreleri artırılarak resistin pozitif olarak kullanılmasına çalışılmaktadır. Diğer bir yöntem olarak AZ5214E resistinin image reversal özelliği kullanılarak lift-off işlemini optimize etme çalışmaları devam etmektedir. AZ5214E de karşılaşılan fotoresistin iyon aşındırma sonrası sertleşmesi sorunu başka yollarla aşılamazsa oksijen aşındırma ile aşılmaya çalışılacaktır.

Bu bolometre yongasının tasarımından sonraki adım ise bu bolometrelerin karakteristiklerinin THz dalgaları altında incelenmesidir. Bundan sonraki kısımda THz kaynağımız ve özellikleri anlatılmıştır.

## 4.8 THz Görüntüleme Sistemi

### 4.8.1 Teorik

Bizim bilgimiz dahilinde olduğu kadarıyla, VO<sub>x</sub>-Au filmlerinden yapılan bolometre ile THz frekanslarında görüntüleme henüz rapor edilmemiştir. Böylece, Şekil 48'de görüldüğü gibi Terahertz (THz) görüntüleme sisteminin kurulumu tamamlanmıştır. THz görüntüleme sistemi, 0.500 - 0.750 THz frekans aralığında çalışan THz dalga kaynağı, 90° off axis parabolik ayna (4 adet), x-y hareket düzeneği ile birlikte malzeme tutacağı ve algılayıcıdan oluşmaktadır.



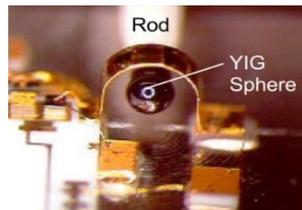
Şekil 48 a) YIG ayarlı Osilatör kullanılarak, b) Ayarlanabilir Sentezleyici kullanılarak Terahertz Görüntüleme Sistemi şematik görünümü c) Terahertz Görüntüleme Sistemi Resmi

THz Kaynağı 3 kısımdan oluşmaktadır. 1) Referans RF sinyal üretici, 2) Frekans sayıcı ve 3) WR1.5 AMC. Referans RF sinyal üretici olarak **YIG Osilatör** ve **VDI Sentezleyici** vardır. Bu sebepten 2 seçeneğimiz vardır. Bu iki üretici arasındaki fark şu şekildedir, Sentezleyici ms mertebesinde tarayacağımız (sweep) edebileceğimiz frekansı oldukça kararlı bir kaynaktır ancak YIG osilatör ise mikrosaniye mertebesinde tarayacağımız frekansı iyi ama çok aşırı sabit olmayan bir üreteç olmasıdır. THz kaynağının ikinci kısmında frekansı gözlemleyebileceğimiz basit bir frekans sayıcı vardır. Son kısımda ise THz kaynağının ana parçası olan WR1.5 AMC vardır. WR1.5 AMC, düzlemsel GaAs schottky diyot teknolojisine dayanan varistör modlu frekans çarpanları ile THz dalgası üretir. İlerleyen sayfalarda THz Kaynağı 3 kısmı hakkında tekrar kısa bir bilgi verilecektir.

Yitrium Demir Garnet (YIG) yüksek Q karakteristiğine sahip kristaldir. Bu yüksek Q karakteristiği, osilasyon sırasında çok düşük faz gürültüsü ve osilatörler ve filtreler için çoklu oktav ayarlamalarına olanak sağlar.

YIG kristalleri silikon kristalleri gibi büyütülür. Çekilen kristaller “dilimlenerek ve doğranarak”, küçük kübik YIG kristallerini oluşturur. Maalesef, kübik şeklinde ancak düzgün olmayan kristallerin sonucu olarak, rezonans devresinde düzgün olmayan bağlanmaya neden olur. Buna bağlı olarak, YIG osilatörlerinde küre şeklinde YIG kristalleri kullanılır. YIG kürelerin uçlarına termal olarak iletken çubuk (genellikle berilyum) monte edilir. Bu iki nedenden dolayı yapılı: **1)** çubuğun sıcaklığı sabit tutulduğu zaman, rezonans devresinde YIG küresini yönlendirmek için bir “ayar çubuğu” gibi davranır **2)** sıcaklık sabit tutulduğu zaman YIG en iyi performansa sahip olur; çubuk, doğrusal ısıtıcı ve YIG küresi ile termal iletkenlik sağlar.

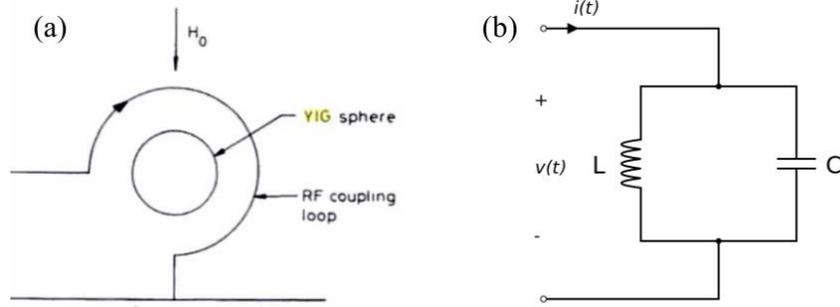
YIG DC manyetik alan içerisine daldırıldığında mikrodalga frekanslarında rezonansa sahip ferrit bir malzemedir. Bu rezonans, uygulanan manyetik alanın gücü ile doğrudan orantılıdır ve çok oktav mikrodalga frekansları üzerinden çok doğrusal bir ayarlama mevcuttur. Bir iletken döngü birleştiğinde, akım manyetik alan üretirken, manyetik alan akım üretir. Küçük iletken döngüler kullanarak YIG kürelerinden rezonans manyetik alanlar sağlar.



Şekil 49 Osilatör uygulaması için bir YIG küre üzerinde iletken döngü

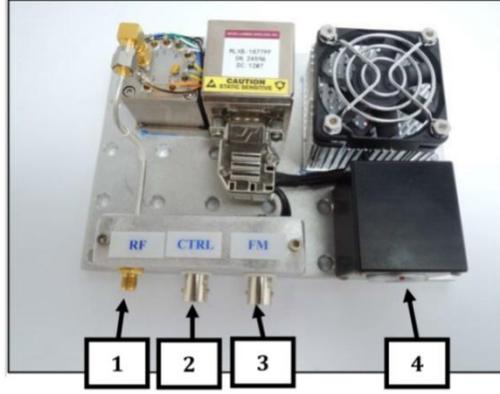


Bir rezonatörden bir osilatör oluşturmak için, küre etrafında bir döngü şeklinde iletken eleman (tel) bulunmaktadır (Şekil 49, Şekil 50a). Dış manyetik alan  $H_0$  nun rolü devreye girer.  $H_0$  sadece kürenin içindeki manyetikleşmenin devinimine neden olmaz. Aynı zamanda, RF tarafından üretilen  $h_{RF}$  manyetik alan kablodaki elektriksel akıma neden olur. Şekil 50a üzerinde düzenlemeye uygun olarak,  $h_{RF}$ 'ye  $H_0$  dik olarak yönlendirilir. Harici manyetik alan içinde kendisini çevreleyen bir döngü paralel LC devresi gibi davranarak frekans sinyali  $\omega_0$  olan salınım sinyaline neden olur. Döngü (loop) L indüktansa sahip indüktör, küre C kapasitansa sahip kapasitör görevlerini görürler. Yük, kapasitör plakaları arasında ileri ve geri yaparak indüktör (Şekil 50b) üzerine akar.



Şekil 50.(a) Harici  $H_0$  manyetik alan etkisi altındaki YIG küre etrafındaki çiftleme döngüsü çizimi (b) çıktı olarak salınım yapan sinyalin üretilebileceği paralel LC devresi'nin basit çizimi

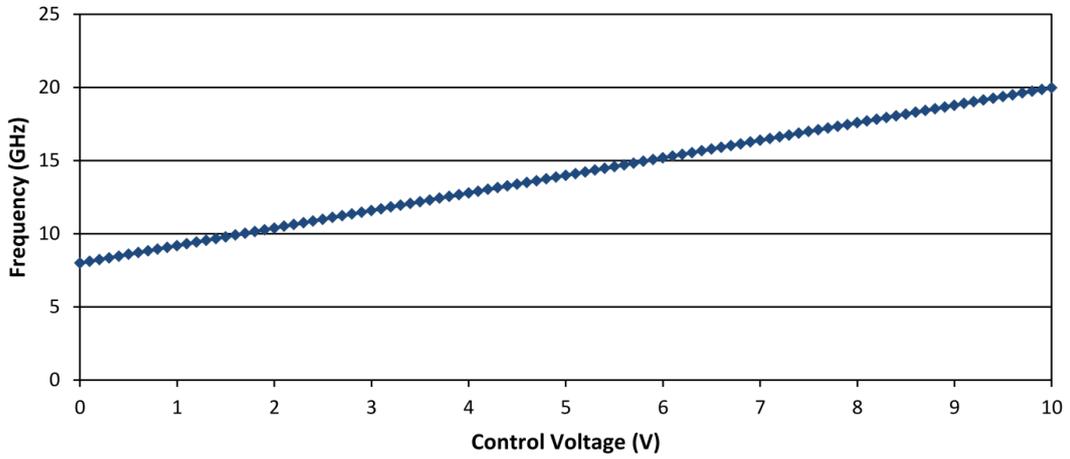
Bu Microlambda Wireless ürünü YIG ayarlı osilatör VDI WR1.5AMC ile kullanabileceğimiz çok basit çalışan ancak mikrosaniye mertebesinde sweep edebileceğimiz frekansı iyi ama çok aşırı sabit olmayan bir üreteçtir. YIG Osilatörünün çıktı frekansı CTRL girişine uygulanan voltajı değiştirilerek 8 ile 20 GHz arasında ayarlanabilir. YIG osilatörünün ürün resmi ve özelliklerini Şekil 51'de görebilirsiniz. Çıkış frekansına karşılık YIG kontrol voltajı grafiğini Şekil 52'de görebilirsiniz. YIG osilatör'e Pasco ve Keithley 2420 ile 1.5 Volt uygulayarak üretilen 9.6 GHz, WR1.5 AMC'ye bağlanarak 0.518 THz dalga üretilmiştir ve YIG osilatörün zamanla frekans grafiği Şekil 45'de görülmektedir. Keithley 2420 ile uygulanan voltaj Pasco ile uygulanan voltaja göre daha stabil olduğu için Keithley 2420 ile üretilen dalga daha kararlıdır.



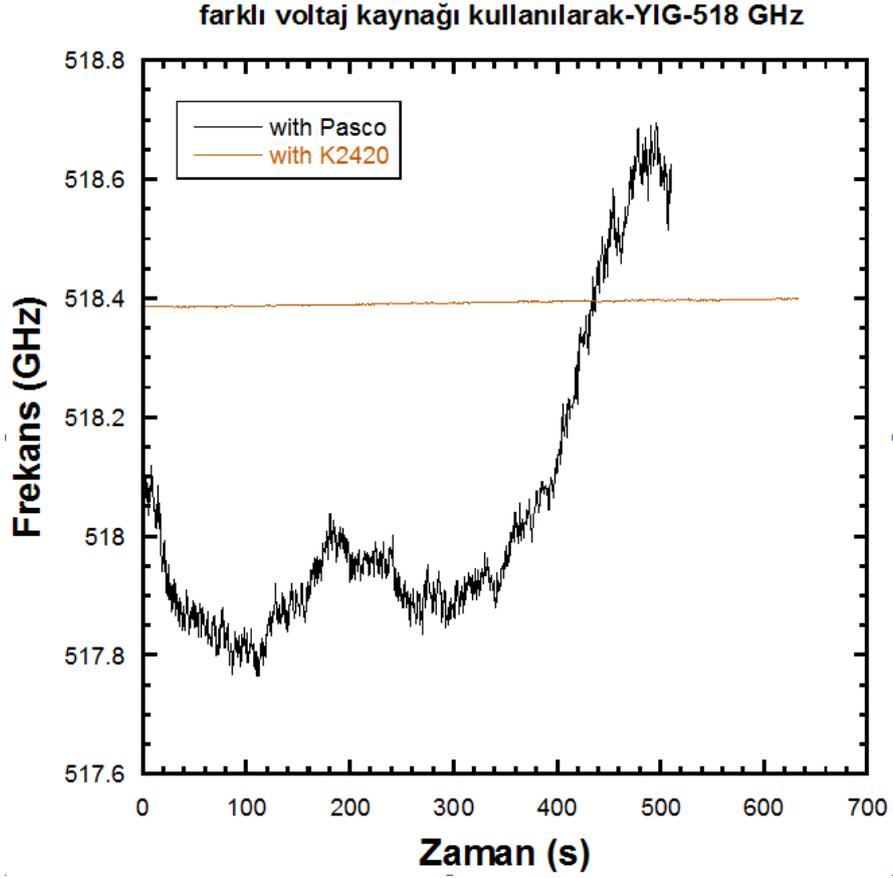
Şekil 51. YIG osilatörünün resmi

Tablo 8 YIG osilatörünün özellikleri

No.	Kısım Tanımı	Özelliği
1	RF Çıkışı	8-20GHz; ~17-20dBm [SMA(f)]
2	Frekans Kontrolü	0-10V [BNC]
3	Frekans Modülasyonu	$\pm 10V$ [BNC]
4	DC Güç bağlantısı	10-pin 3B Series LEMO



Şekil 52 Çıkış frekansına karşılık YIG kontrol voltajı grafiği



Şekil 53 YIG osilatör'ün ölçtüğümüz zamanla frekans grafiği

Frekans sayacı elektronik bir alet ve ya bir bileşeni olup, frekans ölçümü için kullanılır. Frekans, belirli bir süre içerisinde meydana gelen özel tür olayların sayımı olarak tanımlanır. Frekans sayacı, genellikle salınım sayısını veya tekrarlayan elektronik sinyal içerisinde ki atımlı saniye sayısını ölçer.

Birçok frekans sayaçları, belirli bir süre içerisindeki gerçekleşen olayların sayısını biriktiren sayaç olarak çalışmaktadır. Geçiş zamanı olarak bilinen olağan periyottan sonra (örneğin, 1 saniye), sayaç değeri bir ekrana aktarılır ve sayaç sıfırlanır. Eğer, ölçülen olay yeterli stabilite ile kendini tekrarlar ve kullanılan saat salıncağtan önemli ölçüde daha küçük frekansı varsa, önceden süre (genellikle karşılıklı teknik olarak adlandırılır) için sayılan tüm döngülerin sayılarından daha çok ölçümün çözünürlüğü döngünün bütün numaraları için gerekli olan zamanın ölçülmesi ile gerçekleştirilebilir. Zaman tabanı olarak adlandırılan zaman sinyallerini sağlayan iç salıncağın çok doğru bir şekilde kalibre edilmesi gerekmektedir.

Radyo frekansları için dizayn edilmiş frekans sayacı oldukça yaygın ve düşük frekans sayaçları ile aynı prensipte çalışmaktadır. Genellikle, maksimum seviye aşılma'dan önce daha çok aralığa sahiptirler. Çok yüksek (mikrodalga) frekanslar için; birçok dizayn normal

dijital devre çalışan noktalara düşürmek için, sinyal frekans getirerek yüksek hız ön ölçekleyici kullanır. Doğru değeri gösterebilmek için, bu tür aygıtlar içerisinde ki görüntüleyiciler bu hesabı kullanmaktadır. Mikrodalga frekansları sürekli olarak neredeyse 100 GHz'e kadar frekans ölçümü yapabilmektedir. Bu frekanslar üzerinde, lokal salıncağtan alınan sinyal ile karışım içerisinde birleştirilerek sinyal ölçülebilmekte, doğrudan ölçülebilen kadar düşük olup farklı frekanslarda sinyal üretebilmektedir.

VDI frekans sayaçları (Şekil 54), özellikle temel frekans sürücü VDI frekans çoğaltıcıları ölçmek için dizayn edilmişlerdir. Dizayn, ekstra boyut ve gereksiz maliyetleri önlemek için elverişlidir. Frekans aralığı, 0-10 dBm giriş gücü için 0.5-20 GHz aralığındadır. Ekran çözünürlüğü 7 dijittir fakat 32 bit bir görüntü USB kablosu ile bilgisayara bağlanarak okunabilir. Ölçüm süresi, 100 mS içinde 4kHz gibi makul göreceli doğruluk ile hızlı ölçümler yapabilmek için ayarlanabilmektedir. Birimi küçük olup (3.75x3.75x2"), güç kaynağı veya duvar fişi olmadan USB kablo aracılığı ile bilgisayara bağlantı yapılabilmektedir.

Bizim sistemimizde 10 dB Coupler (ATM C126H-10) kullanarak YIG Osilatör ve Sentezleyiciden çıkan referans RF sinyalini aynı frekansta ikiye çoğaltıp birini frekans sayıcıya diğerini WR1.5 AMC ye yolluyoruz. Bu şekilde üretilen sinyalin değerini ölçebiliyoruz.

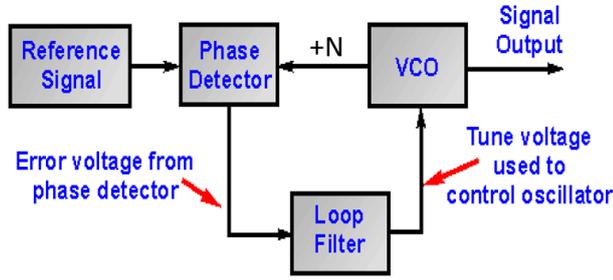


Şekil 54 VDI 0.5-20 GHz Frekans Sayacı

Bir frekans sentezleyicisi, tek referans frekanstan çok sayıda kesin frekans üreten bir cihazdır (elektronik bir sistem). Frekans sentezleyicisi çok kanallı radyo alıcısı içerisinde kristal rezonatörlerin pahalı düzen yerine geçebilmektedir. Tek bir kristal osilatör referans frekansı sağlar ve frekans sentezleyici diğer frekansları üretir. Ucuz ve dijital devre tarafından kolayca kontrol edilebildikleri için frekans sentezleyiciler birçok yeni iletişim sistem tasarımları bünyesinde bulundurmaktadır. Frekans sentezleyiciler, radyo alıcıları, mobil telefonlar, telsiz

telefonlar, uydu alıcıları, GPS sistemleri gibi birçok cihazda bulunmaktadır. Frekans sentezleyici, frekans çoğaltma, frekans bölme ve frekans karıştırma (frekans karıştırma süreci toplam ve fark frekansları yaratmaktadır) işlemleri istenen çıkış sinyalini üretmek için birleştirilebilmektedir.

Doğrudan frekans sentezleyici frekans sentezleme metotlarının en eski olanıdır. Harmonik üreticiler, bant geçirgen filtreler, bölücüler ve frekans karıştırıcıların bir veya daha fazla referans frekanslarından belirli frekans sentezler. Doğrudan sentez ile ilişkili dezavantajları faz kilitlenme döngüsü ile çalıştırılan frekans sentezi tekniği (genellikle dolaylı sentez olarak anılır) ile azaltılır. Basit PLL frekans sentezleyici Şekil 55'te gösterilmiştir.



Şekil 55 Dolaylı (PLL) frekans sentezleyici

Faz detektörü, iki adet giriş sinyalinin farkından oluşan bir adet çıkış sinyali üretir. Çıkış detektörü filtrelenir (belki de yükseltilir), dc bileşeninin hata sinyali voltaj kontrollü osilatöre tatbik edilir. İki faz detektörünün giriş frekansları yeteri kadar yakın ise, PLL geri besleme mekanizması iki-faz detektörlerinin giriş sinyallerini eşit olmaya zorlar. Bu;

$$f_r = f_d \quad (19)$$

Bölücü çıkış frekansı  $f_d$ , N tarafından  $f_0$  voltaj kontrollü osilatörün (VCO) çıkış frekansı bölünmesiyle elde edilir:

$$f_d = \frac{f_0}{N} \quad (20)$$

Bu nedenle, çıkış frekansı referans frekansının tam sayısı katıdır, veya:

$$f_0 = Nf_r \quad (21)$$

Döngüdeki bir frekans bölücü ile PLL, tek bir referans frekansı arasındaki frekanslarda çok sayıda frekans elde edilmesi için bir yöntem sağlar. Bölünme oranı N, programlanabilir bir

bölücü kullanılarak gerçekleştirilirse (bütünleşmiş devre, dijital programlanabilir bölücü ucuz bir devre bileşenidir),  $f_r$  artışlarıyla çıkış frekansını değiştirmeye kolaylık sağlar. Programlanabilir bir bölücü ile PLL, bütün hepsi referans frekansının tam katsayısı olan yüksek numaralı frekansları senkronize etmek için kolay bir metottür. Frekans sentezleri PLL'lerin çok önemli bir uygulamasıdır.

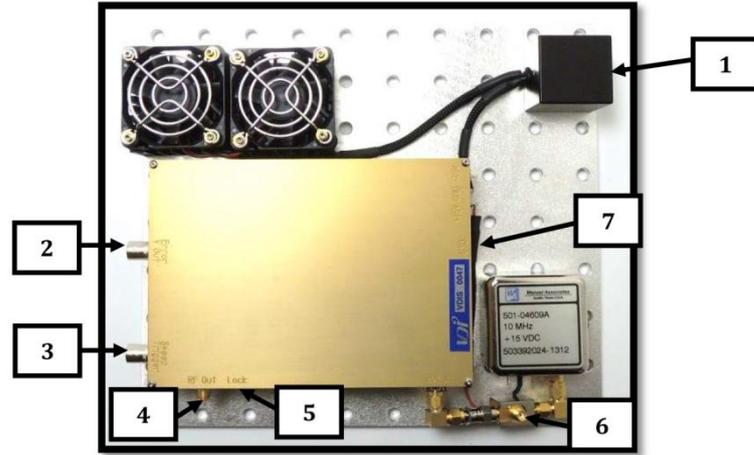
Eşitlik  $f_0=Nf_r$  frekans çözünürlüğünün  $f_r$  eşit olduğuna dikkat etmemiz gerekir. Bu çıkış frekansı  $f_r$ 'da meydana gelecek çok küçük artışlarla bile değiştirilebilir; ancak bu frekansları değiştirmek için gerekli olan kısa bir zaman aralığına duyulan ihtiyaç ile çatışmaktadır. Anahtarlama zamanı için gerekli tam ifade daha yeni olmasına rağmen, sıklıkla kullanılan başparmak kuralı anahtarlama zamanı için:

$$t_s = \frac{25}{f_r} \quad (22)$$

Bu frekansları geçmek için yaklaşık 25 referans periyoda ihtiyaç vardır. Bu nedenle frekans çözünürlüğü anahtarlama hızı ile ters orantılıdır. Referans çözünürlüğü 10 Hz ve anahtarlama süresi 10 saniyeden az olan frekans sıçramalarının kullanımı uydu iletişim sistemleri için çağdaş bir özellik sağlamaktadır. Yukarıda bahsettiğimiz başparmak kuralı anahtarlama zamanını 2.5s olarak öngörmesinden dolayı, basit PLL frekans sentezleyici iki özelliğe de uymadığı açıktır. Referans frekansının seçimi döngü performansına hâkimdir.

VDI sentezleyiciler VDI kaynakları ve alıcıları ile gelecekte kullanılacak PLL prensibi ile çalışan terahertz uygulamaları için özel olarak üretilmiştir. 8-20 GHz frekans aralığı ve 17 dBm güç birçok VDI çoğaltıcı zincirler ile uyumludur. Bu sentezleyiciler ~6x4.5x1.5" boyutundaki paketi içinde yarıştırıcı faz gürültüsü ve 20Hz frekans kararlılığı sunarlar. Frekans bir bilgisayarın USB bağlantısı ile sağlanan yazılımla kontrol edilebilir. USB komutları ile derecelendirilen sürekli dalga frekansları 1mS içinde derece boyutunu 40 MHz yüksekliğine çıkarmayı başarabilir. Frekans bandın herhangi bir kısmından 20 Hz'den daha kararlı ve adım süresi 4 nS den düşük sürekli olarak frekans ayarı sağlamak için yayılabilir. Faz benzer olarak 0.5 derece ile kontrol edildi.

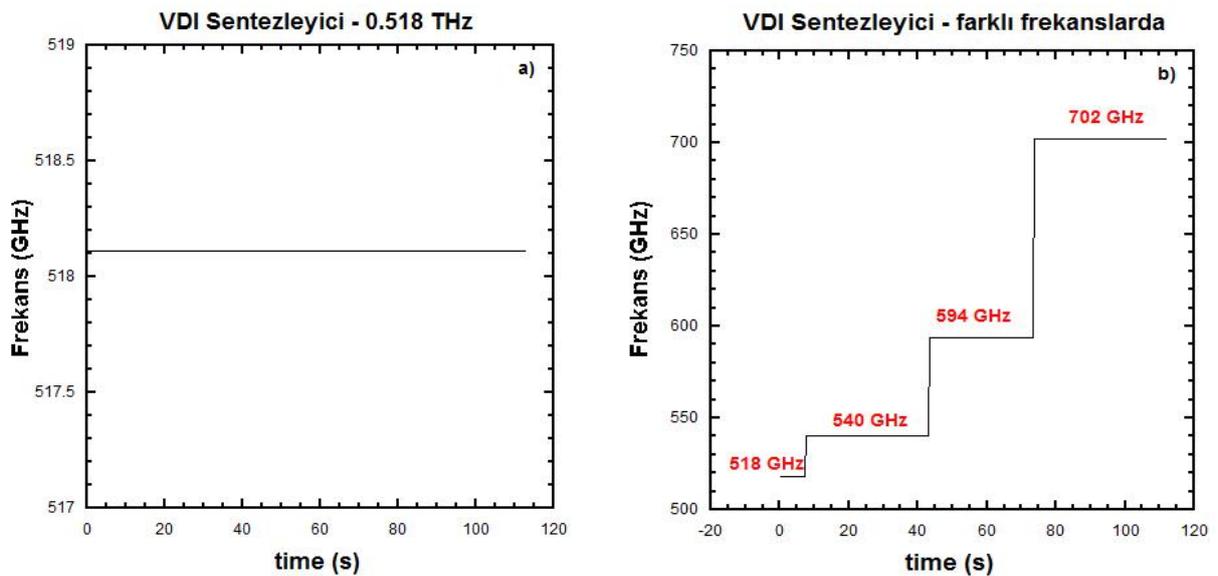
Frekans adım boyutu ve süresi 3kHz oranında +/-25 MHz aralığında değiştirilebilir ve 8-20 GHzden 170 mS içinde minimum frekans hatası yayılır. Harekete geçirici çıkış sinyali diğer aletler ile yayılım başlangıcını senkronize etmeyi sağlar. Sentezleyici faz 10 ya da 100 MHz referansına kadar kilitlenebilir, VDI çarpan zinciri ile tek bir yuva içerisine monte edilebilir ya da ayrı ayrı sağlanabilir. VDI sentezleyicinin resmi ve özellikleri Şekil 56'da gösterilmiştir.



No.	Part Description	Specification
1	DC Power Connection	10-pin 2B Series LEMO
2	Error V Out	BNC(f)
3	Sweep Trigger	BNC(f)
4	RF Output	8-20GHz; ~16dBm [SMA(f)]
5	Phase Lock Light	LED ON = LOCKED
6	10MHz Output	SMA(f)
7	USB Synthesizer Control	USB Type B

Şekil 56 VDI sentezleyici ürün resmi ve özellikleri

VDI Sentezleyici ms mertebesinde sweep edebileceğimiz frekansı oldukça stabil bir referans RF sinyal üreticidir. Yazılan Labview programıyla kontrol edilen sentezleyici ile üretilen 9.6 GHz, WR1.5 AMC'ye bağlanarak 0.518 THz dalga üretilmiştir ve sentezleyicinin zamanla frekans grafiği Şekil 57(a)'da görülmektedir. Ayrıca değişik frekanslardaki zamanla değişimi de Şekil 57(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 57 a) 0.518 THz b) farklı değerlerde VDI sentezleyici ile üretilen THz dalgaları frekans zaman grafiği

VDI's AMC'ler mikrodalga kaynaklarına THz aralığında yüksek performanslı frekans genişlemeyi sağlamaktadırlar. Bu modüller, düşük faz gürültüsü ile yüksek test port gücünü özel performans sağlamak için birleşmektedir. Standart özellikler TTL kontrollü ~2kHz'e kadar açma/kapama modu ve voltaj kontrollü RF zayıflatıcı içermektedir (UCA). Mikrometre sürülen değişken RF zayıflatıcı, artırılmış genlik modülasyon oranı ( PIN anahtar ile birlikte), dalga kılavuzu burulmaları, test portları ve boş alan birleştirmek için boynuz anten gibi performans seçenekleri içermektedir. VDI AMC'ler, dolu dalga kılavuzu bant frekansı çoğaltma ve anahtar işlemi önermektedirler. Bunlar, bağımsız çalışmalarda veya optik masada kullanıma uygun bir şekilde 8"x5"x3" ebatlarında yerleştirilmiştir. Tablo 7'de WR1.5 AMC (Şekil 58) THz kaynağının bazı parametreleri görülmektedir. THz kaynağının gücü herhangi bir tam band'lı katı-hal kaynağından oldukça yüksektir ve daha kullanışlıdır. Şekil 59'de WR1.5 AMC'nin frekansa karşılık çıkış gücü grafiği gösterilmektedir.

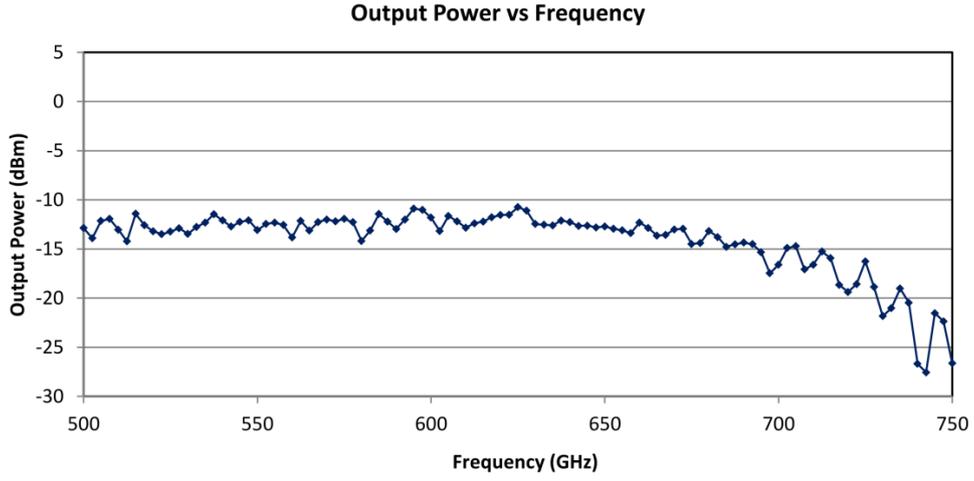


Şekil 58 VDI WR1.5 AMC

Tablo 9 VDI WR1.5AMC bazı standart parametreleri

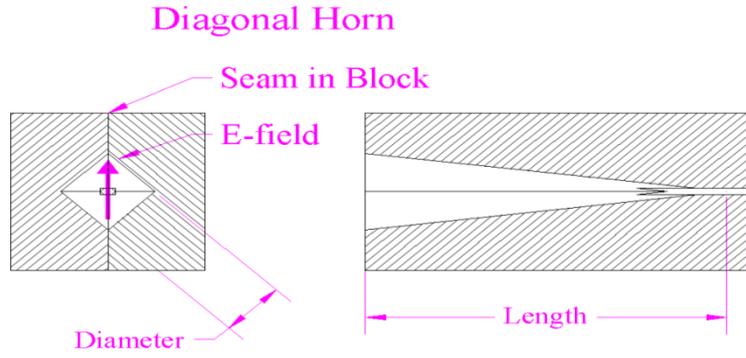
VDI part	Band (GHz)	RF Giriş Modu	Giriş Frekansı (GHz)	Çarpım Faktörü	Çıkış Gücü (dBm)	
					Tipik	Minimum
WR1.5AMC	500 - 750	Standart	9.3 – 13.9	54	-21	-30
		Yüksek	27.8 – 41.7	18		





Şekil 59 WR1.5 AMC'nin frekansa karşılık çıkış gücü grafiği

Alınan diyagonal boynuz antenin WR1.5 AMC'ye monte edilmesiyle ekstra güç kaybını minimum seviyeye çektik. Diyagonal boynuz antenin Şematik görünümü Şekil 60'de görülmektedir. Ayrıca AMC'e takılı olduğu resimde Şekil 61'de görülmektedir.



Şekil 60 WR1.5 AMC için Diyagonal boynuz antenin şematik görünümü



Şekil 61 Diyagonal boynuz anten ile birlikte VDI WR1.5 AMC'nin resmi

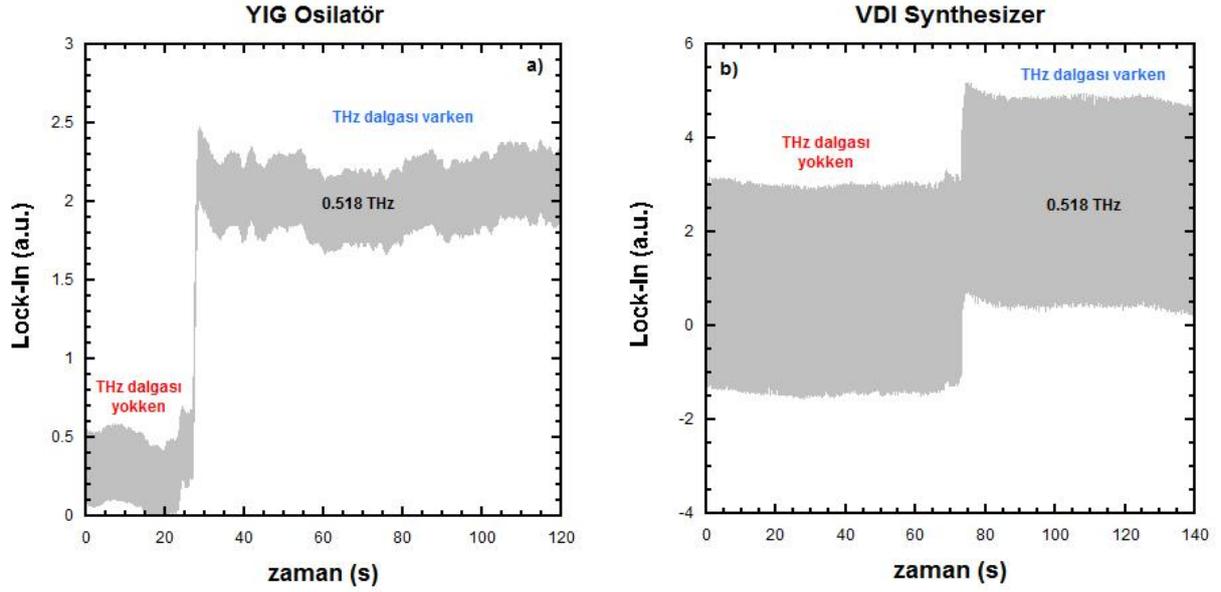
Tablo 10 WR1.5 AMC için Diyagonal boynuz antenin özellikleri

Waveguide Band	Freq. Range (GHz)	Horn Type	Horn Length (mm)	Aperture Diameter (mm)	Taper Half-Angle (deg)	Full 3 dB Beamwidth (deg)	Gain (dB)	Beam Waist Radius (mm)
WR-1.5	500 - 750	Diagonal	11.8	2.4	5.8	12	25	0.89

#### 4.8.2 Deneysel

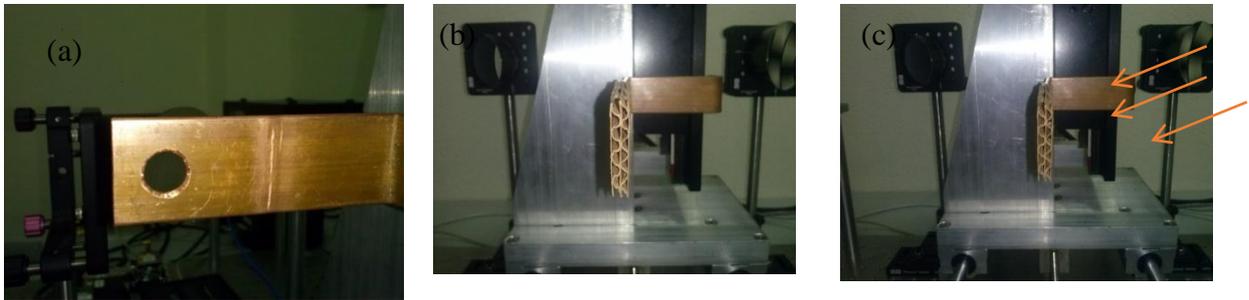
Algılayıcı olarak ilk etapta oda sıcaklığı algılayıcısı olan Golay hücresini kullanarak THz görüntüleme sistemi faal hale getirildi. Öncelikli olarak 90° off eksen parabolik aynalar, THz kaynağı, x-y tarayıcı modül ve Golay hücresi hassas bir şekilde THz dalgasının kaynaktan algılayıcıya minimum kayıpla gidebilmesi için ayarlamalar yapıldı. Bu yapılırken en çok titiz davrandığımız olay aynaların mekanik eksenlerinin aynı hizada olması ve aynı zamanda aynaların odak noktalarıyla THz dalgasının çıktığı yer ve dedektörün algılayıcı kısmının aynı hizada olmasıdır.

Şekil 62'de Lock-in ile THz dalgası yok iken ve var iken 15 Hz'de çalışan chopper ile modüle edilmiş Golay hücresinin algıladığı sinyalin zamana bağlı ölçümü görülmektedir. Şekil 62.a'daki ölçümü YIG osilatör, Şekil 62.b'deki ölçümü VDI Sentezleyici kullanarak alınmıştır. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi ölçümdeki gürültü net bir şekilde görülmektedir. Sentezleyici ile alınan data'da YIG ile alınana göre daha fazla gürültü vardır. Bu denli gürültü farkının sebebi sentezleyicide daha fazla soğutucu fan olması olabileceği gibi Lock-in deki ölçüm parametrelerinden de kaynaklanabilir.



Şekil 62 a)YIG Osilatör ile b) Sentezleyici ile Golay hücresinin algıladığı sinyalin zamana bağlı ölçümü

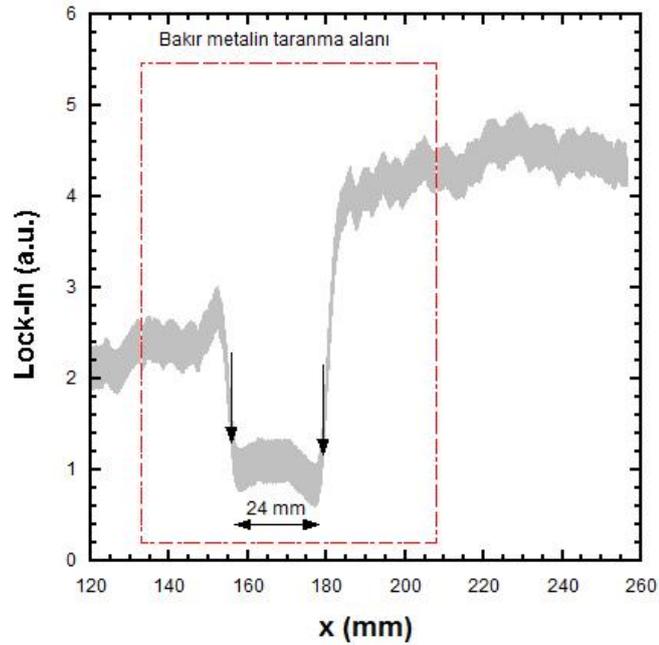
THz görüntüleme sistemi ile x-y taraması yapmadan önce ön çalışma olması adına YIG osilatörü kullanarak tek bir eksende tarama gerçekleştirdik. Bu ön çalışmada 25 mm eninde 3.1 mm et kalınlığında bir bakır çubuk, boş paketlenme kartonu ve içerisine 1.6 mm çapında metal teller yerleştirilmiş paketlenme kartonunu taradık. Şekil 63'te malzemelerin fotoğrafları verilmiştir. Karton içindeki metaller fotoğraf üzerinde kırmızı ok ile işaretlenmiştir. Bu tarama için tarama bölgesine koyduğumuz malzemeyi odak noktasında olmadığı pozisyona getirip THz dalgası var iken dikey ekseninde Newport marka lineer modül hareket ettirilip lock-in ile Golay hücresinin algıladığı sinyali ölçtük. Bakır çubuk 1 mm/s ilerleme hızı ile +75 mm'den -30 mm, diğer iki paketlenme kartonu ise 0.01 mm/s ilerleme hızı ile +45 mm'den -5 mm pozisyonuna gidecek şekilde tarama gerçekleştirildi.



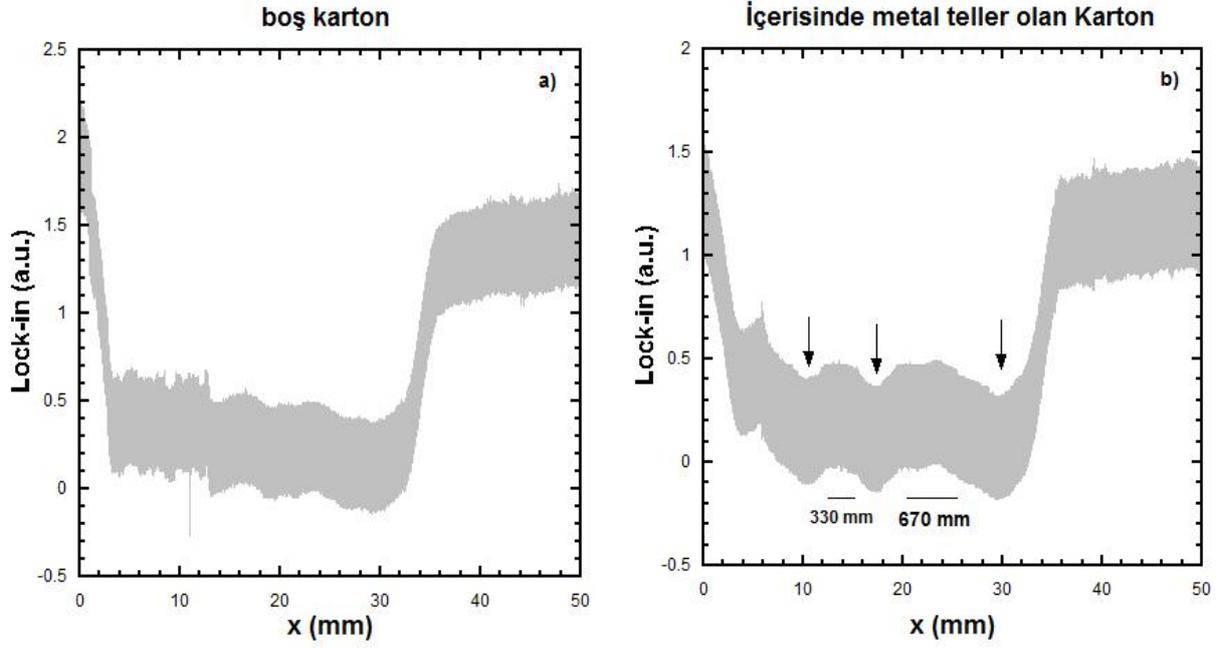
Şekil 63 Tek eksende taranan malzemelerin resimleri, a) bakır metal b) boş karton c) içinde metal tel olan karton.

Şekil 64'da Bakır çubuk taramasının sonucu görülmektedir. 25 mm enindeki Bakır çubuk odak noktasından geçerken metal sinyali soğurduğu için THz sinyalinde azalma olmuştur. Sinyaldeki azalma gerçekleştikten sonra yaklaşık 24 mm boyunca devam ettiği grafikten de görülmektedir.

Şekil 65.a) ve b)'de paketlenme kartonlarının tarama sonuçları gösterilmektedir. Metal çubukta olduğu gibi THz kartondan geçerken THz sinyalinde azalma olacaktır. İçerisinde metal tel olan karton için azalan sinyalde metallerin yeri ok ile işaretlenmiştir. Boş karton taramasıyla karşılaştığımızda metallerin olduğu yerde sinyal daha düşük algılanmalıdır. Ortadaki metal üstündeki (grafiğe göre solundaki) 1 birim, altındaki metale (grafiğe göre sağındaki) 2 birim uzaktır. Tarama sonucundan da yaklaşık olarak bu görülmektedir.

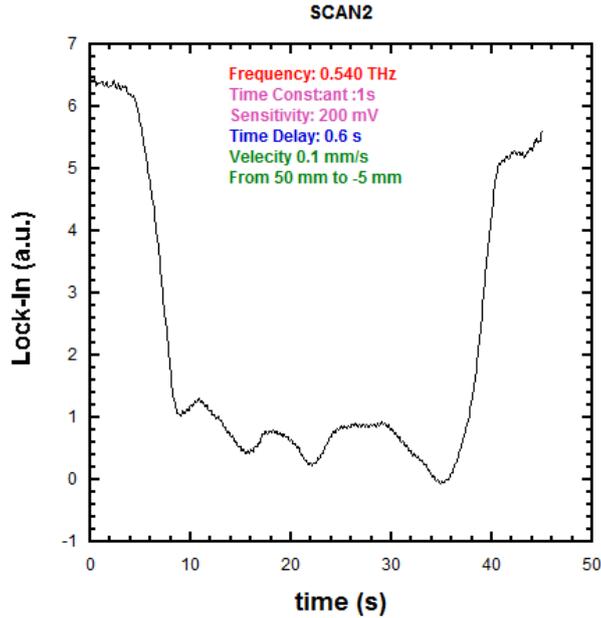


Şekil 64 Bakır çubuğun THz dalgası ile tarama sonucu

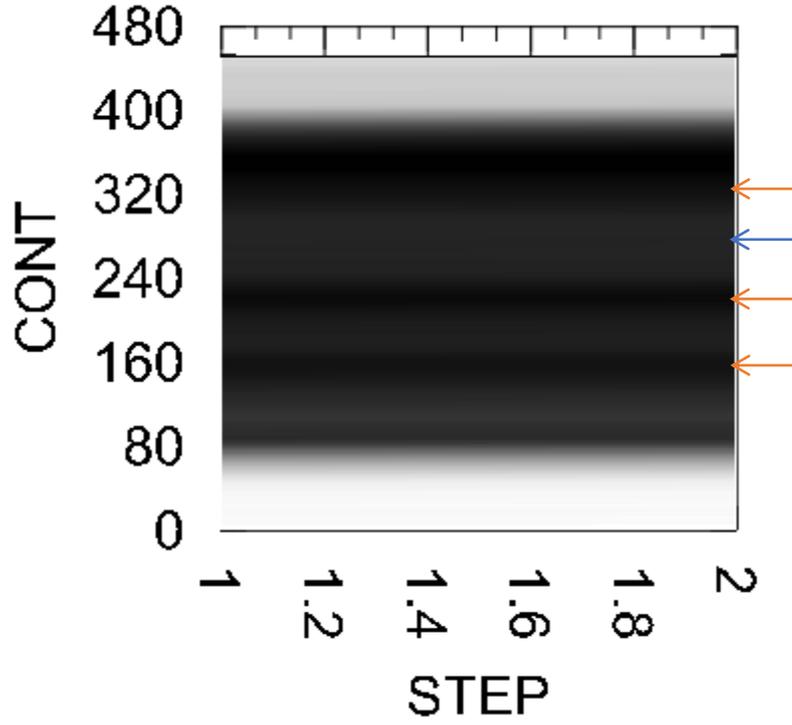


Şekil 65 a) boş paketleme kartonunun b) içerisinde metal olan paketleme kartonunun THz ile tarama sonuçları

Lock-in de zaman sabiti ve hassaslık ayarları değiştirilip gürültü minimize edilerek Şekil 65.b'deki ölçüm tekrar alınarak Şekil 66'de gösterilmiştir. Buna ek olarak tek bir eksende aldığımız dataları 2 kez tekrarlayıp 2 adımda ölçüm almış gibi görüntüye döktüğümüzde Şekil 67'deki görüntüyü elde etmiş bulunmaktayız. Siyah yerler THz sinyalinin metallere dolayı az geçtiği yerlerdir. kartonun içinde bilmediğimiz bir şey olmasından dolayı 3. Metalde diğer iki metalde olduğu gibi görünmemektedir ama ilk çalışma için iyi bir sonuçtur.



Şekil 66 Gürültünün azaltılıp içerisinde metal olan paketleme kartonunun THz ile tarama sonuçları



Şekil 67 Önceki verinin (Şekil 66) 2 adımda çizdirilen tarama görüntüsü

THz kaynağımızın çalışma karakteristikleri bulunduğundan sonra bu kaynağın bolometrik dedektör olarak kullanılacak yongalarımızı test amaçlı kullanılması sağlanmıştır. Papyon dedektör ve log periyodik dedektör dizileri üretilmiş olup bunların THz testleri başlamıştır. Özellikle e-demeti litografi sistemimizde oluşan sorun ve Almanya'dan servisin geç gelmesi ve servisin sorunu tam anlamıyla çözememesi sonucu cam maskeye ve UV litografiye geçilmiş maske tasarımı ve üretimi uzun zaman aldığından proje takvimi içerisinde THz ölçümleri tamamlanamamıştır. Bu ölçümler devam etmekte olup hazırlanan doktora tezinde yer bulacaktır.

## 6.SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Projede terahertz bölgesi için bolometre malzemesi hazırlanmış ve bu malzemenin özellikleri istenilen şekilde optimize edilmiştir.  $VO_x$  malzemesi literatür tarafından bilinen bir malzemedir ve kızılötesi bolometrelerde algılayıcı kısım olarak uzunca bir süredir kullanılmaktadır. Bu projede ise  $VO_x$  malzemesinin soğutmasız dedektörlerdeki en önemli dezavantajı olan yüksek direnç değerleri altın katkılama ve kaplama sonrası ısıl işlem gibi iki farklı yöntemle düşürülmüştür. Direnç düşürülmesinin yanında filmin TCR ve yüzey özelliklerinin değişmemesi de önemlidir ve gözlemlenmiştir ki kaplama sırasında yapılan altın katkılama filmin direncini önemli ölçüde düşürürken TCR değerinde çok az değişime neden olmaktadır. Dahası filmin yüzeyi kaplama sonrası ısıl işlemle değişip katkılama ile değişmediği de saptanmıştır. Her ne kadar literatürde çok yüksek TCR değerleri rapor edilmişse de bu değerlere sahip olan filmlerin birçoğu literatür özetinde örneklendiği gibi geçiş gösterir. Bu geçiş bir histerisis içerir ikinci bölümde belirtildiği gibi bolometre yapımı için istenilmeyen bir durumdur. Ticari bolometrelerin TCR değerleri  $-2$  1/K ye yakın veya en fazla  $-3$  1/K dir. Bunun bir diğer nedeni de  $VO_x$  malzemesinin tekrarlanabilir üretiminin zor olmasıdır. Projede elde edilen filmlerin TCR değerleri  $-2$  1/K ye yakındır ve bolometre üretimi için uygundur. Filmler aynı zamanda stabil ve tekrar üretilebilirliği yüksektir. Filmler 295 ile 325 K arasında hiçbir geçiş göstermezler. Sonuçta edilen  $VO_x$ :Au filmler DC manyetik saçtırma yöntemi ile üretilmiş ve optimize edilmiştir. Çalışmada elde edilen bir kısım veriler Optical and Quantum Electronics dergisine gönderilmiş revize istemiş ve şu anda hakem değerlendirme aşamasındadır.

İkinci kısımda filmlerin üzerine tasarlanacak olan anten yapısı CST Microwave studio ile tasarlanmış ve antenin boyutlarının rezonans frekansına etkisi incelenmiştir. Burada elde edilen bilgilerle antenin rezonans frekansı elimizdeki terahertz kaynağının en verimli çalıştığı 0.5-0.75 THz frekansı arasına çekilmeye çalışılmıştır. Detaylı bilgi 4. Bölümde verilmiştir ve tasarlanan papyon anten 0.68 THz de rezonans vermektedir. Bununla birlikte tasarımda kullanılan en önemli yeniliklerden birisi de yapılacak olan sistemin birebir simüle edilmesidir. Birçok literatür çalışmasında bu yapılmayarak alttaş veya diğer önemli kısımların etkisi net olarak verilmemiştir. Bu projede köprü altına açılacak olan boşluğa kadar tüm kısımlar simülasyona eklenmiş ve gerçek tasarımın birebir kopyası simüle edilerek her bir parametrenin etkisi incelenmiştir. Rezonans frekansını istenilen frekans değerine çekmenin ötesinde bu frekanstaki en düşük yansıma elde edilmeye çalışılmıştır. Simülasyon sonucunda 0.15 ile 0.2 arasında yansıma değerleri elde edildi. Log periyodik anten simülasyonu da yapılmış buradan elde edilen sonuçlarda 0.41 THz e rezonans frekansı

ayarlandı ve daha geniş bir bantta ve 0.12 yansıma katsayısı değerleri elde edildi. Tasarlanan UV maskeye elde edilen en iyi performanstaki log periyodik anten tasarımı da maskeye eklendi. Papyon anten de log periyodik anten de bu alanda en sık kullanılan anten çeşitlerindedir ve proje için önemli olan rezonans frekansının kaynağa göre ayarlanması ve bu frekanstaki yansımanın en aza indirilmesidir. Tasarım başarıyla yapılmış ve bu koşullar simülasyon sonrasında sağlanmıştır.

Projenin son aşamasında litografi basamakları tasarımı CST MS ile, çizimi Autocad ile yapılan UV maskesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu aşama üç basamaklı olarak uygulanmış ve ilk önce köprü kısmı sonra kontaklar ve en sonunda tüm devreyi kimyasal aşındırmadan koruyacak fotoresist ile gerçekleştirilmiştir. Bu basamakta köprüyü desteklemek için silikon oksitleme sistemi kurulmuş ve oksit büyütme işlemi optimize edilmiştir. Sonrasında KOH kimyasal aşındırma parametreleri optimize edilmiştir. Litografi 3 basamak olarak tasarlanmış ve ilk basamak sonuçları deneysel kısma eklenmiştir. Litografi sonrasında cihaz karakterizasyonun yapılacağı sistemin özellikleri de aynı zamanda raporda verilmiştir.



## Kaynaklar

Alaboz, H., Demirhan, Y., Yuce, H., Aygun, G., Ozyuzer, L., 2017. "Comparative study of annealing and gold dopant effect on DC sputtered vanadium oxide films for bolometer applications." *Optical and Quantum Electronics* 49, 238-49. doi:10.1007/s11082-017-1072-x.

Appleby, Roger, and Rupert N. Anderton. 2007. "Millimeter-Wave and Submillimeter-Wave Imaging for Security and Surveillance." In *Proceedings of the IEEE*, 95:1683–90. doi:10.1109/JPROC.2007.898832.

Baker, C., T. Lo, W. R. Tribe, B. E. Cole, M. R. Hogbin, and M. C. Kemp. 2007. "Detection of Concealed Explosives at a Distance Using Terahertz Technology." *Proceedings of the IEEE* 95 (8): 1559–65. doi:10.1109/JPROC.2007.900329.

Berg, S., and T. Nyberg. 2005. "Fundamental Understanding and Modeling of Reactive Sputtering Processes." *Thin Solid Films* 476 (2): 215–30. doi:10.1016/j.tsf.2004.10.051.

Budai, John D, Jiawang Hong, Michael E Manley, Eliot D Specht, Chen W Li, Jonathan Z Tischler, Douglas L Abernathy, et al. 2014. "Metallization of Vanadium Dioxide Driven by Large Phonon Entropy." *Nature* 515 (7528). Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers Limited. All Rights Reserved.: 535–39. <http://dx.doi.org/10.1038/nature13865>.

Case, F Cardillo. 1984. "Modifications in the Phase Transition Properties of Predeposited VO<sub>2</sub> Films." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 2 (4): 1509–12. doi:10.1116/1.572462.

Castro, Marcelo S.B. de, Carlos L. Ferreira, and Roberto R. de Avillez. 2013. "Vanadium Oxide Thin Films Produced by Magnetron Sputtering from a V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Target at Room Temperature." *Infrared Physics & Technology* 60 (August). Elsevier B.V.: 103–7. doi:10.1016/j.infrared.2013.03.001.

Changhong Chen, Xinjian Yi, Xingrong Zhao, and Bifeng Xiong. 2000. "Preparation and Properties of Vanadium Dioxide Thin Films for Uncooled Microbolometer." In *25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (Cat. No.00EX442)*, 145–46. IEEE. doi:10.1109/ICIMW.2000.892973.

Chen, Rong Hong, Yu Long Jiang, and Bing Zong Li. 2014. "Influence of Post-Annealing on Resistivity of VO<sub>x</sub> Thin Film." *IEEE Electron Device Letters* 35 (7): 780–82. doi:10.1109/LED.2014.2326691.

Choi, S B, J S Kyoung, H S Kim, H R Park, D J Park, Bong-Jun Kim, Y H Ahn, et al. 2011. "Nanopattern Enabled Terahertz All-Optical Switching on Vanadium Dioxide Thin Film." *Applied Physics Letters* 98 (7): 71105. doi:10.1063/1.3553504.

Cole, B. E., R. E. Higashi, and R. A. Wood. 1998. "Monolithic Two-Dimensional Arrays of Micromachined Microstructures for Infrared Applications." *Proceedings of the IEEE* 86 (8): 1679–86. doi:10.1109/5.704273.

Committee, Antennas, IEEE Antennas, and Propagation Society. 2014. "IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas IEEE Antennas and Propagation Society." *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993)* 2013: 50. doi:10.1109/IEEESTD.2014.6758443.

Cui, Yanjie, and Shriram Ramanathan. 2011. "Substrate Effects on Metal-Insulator Transition Characteristics of Rf-Sputtered Epitaxial VO<sub>2</sub> Thin Films." *J. Vac. Sci. Technol. A* 29 (4): 41502–7. doi:10.1116/1.3584817.

Dai, Jun, Xingzhi Wang, Shaowei He, Ying Huang, and Xinjian Yi. 2008. "Low Temperature

Fabrication of VO<sub>x</sub> Thin Films for Uncooled IR Detectors by Direct Current Reactive Magnetron Sputtering Method.” *Infrared Physics and Technology* 51 (4): 287–91. doi:10.1016/j.infrared.2007.12.002.

Demirhan, Y., H. Alaboz, L. Ozyuzer, M. A. Nebioğlu, T. Takan, H. Altan, and C. Sabah. 2016. “Metal Mesh Filters Based on Ti, ITO and Cu Thin Films for Terahertz Waves.” *Optical and Quantum Electronics* 48 (2): 170. doi:10.1007/s11082-016-0427-z.

Demirhan, Y., H. Saglam, F. Turkoglu, H. Alaboz, L. Ozyuzer, N. Miyakawa, and K. Kadowaki. 2015. “Area Dependence and Influence of Crystal Inhomogeneity on Superconducting Properties of Bi2212 Mesa Structures.” *Vacuum* 120 (October): 89–94. doi:10.1016/j.vacuum.2015.05.002.

Dong, Ruilin, Yixuan Nie, Shang Yao, Yucheng Jiang, Jing Meng, and Yuping Yang. 2012. “Plasmonic Resonance of Bowtie Antennas and Their Geometry Dependence.” In , edited by Cunlin Zhang, Xi-Cheng Zhang, He Li, and Sheng-Cai Shi, 8562:85621L. doi:10.1117/12.999703.

Dou, Yan-Kun, Jing-Bo Li, Mao-Sheng Cao, De-Zhi Su, Fida Rehman, Jia-Song Zhang, and Hai-Bo Jin. 2015. “Oxidizing Annealing Effects on VO<sub>2</sub> Films with Different Microstructures.” *Applied Surface Science* 345 (August): 232–37. doi:10.1016/j.apsusc.2015.03.044.

DuHamel, R., and D. Isbell. 1957. “Broadband Logarithmically Periodic Antenna Structures.” *IRE International Convention Record* 5 (616): 119–28. doi:10.1109/IRECON.1957.1150566.

Federici, John, and Lothar Moeller. 2010. “Review of Terahertz and Subterahertz Wireless Communications.” *Journal of Applied Physics* 107 (11): 111101. doi:10.1063/1.3386413.

Gol'tsman, G N, Y B Vachtomin, S V Antipov, M I Finkel, S N Maslennikov, K V Smirnov, S L Polyakov, et al. 2005. “NbN Phonon-Cooled Hot-Electron Bolometer Mixer for Terahertz Heterodyne Receivers.” In *Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics IV*, edited by Hwu, RJ and Linden, KJ, 5727:95–106. PROCEEDINGS OF THE SOCIETY OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS (SPIE). doi:10.1117/12.590490.

González, F J, M Abdel-Rahman, and G D Boreman. 2003. “Antenna-Coupled VO<sub>x</sub> Thin-Film Microbolometer Array.” *Microwave and Optical Technology Letters* 38 (3). Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company: 235–37. doi:10.1002/mop.11024.

Han, Yong-hee, Kun-tae Kim, Hyun-joon Shin, Sung Moonin-hoon Choi, Yong-hee Han, Kun-tae Kim, Hyun-joon Shin, and Sung Moon. 2005. “Enhanced Characteristics of an Uncooled Microbolometer Using Vanadium – Tungsten Oxide as a Thermometric Material Enhanced Characteristics of an Uncooled Microbolometer Using Vanadium – Tungsten Oxide as a Thermometric Material” 254101: 1–4. doi:10.1063/1.1953872.

Hancox, I, L A Rochford, D Clare, P Sullivan, and T S Jones. 2011. “Utilizing N-Type Vanadium Oxide Films as Hole-Extracting Layers for Small Molecule Organic Photovoltaics.” *Applied Physics Letters* 99 (1): 13304. doi:10.1063/1.3607478.

Hellmann, I, Ch Täschner, R Klingeler, a Leonhardt, B Büchner, and M Knupfer. 2008. “Structure and Electronic Properties of Li-Doped Vanadium Oxide Nanotubes.” *The Journal of Chemical Physics* 128 (22): 224701. doi:10.1063/1.2931542.

Il'in, K.S., a. Stockhausen, a. Scheuring, M. Siegel, a.D. Semenov, H. Richter, and H.-W. Huebers. 2009. “Technology and Performance of THz <newline/>Hot-Electron Bolometer Mixers.” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 19 (3): 269–73. doi:10.1109/TASC.2009.2018266.

Jagtap, Vishal S., Annick F. Dégardin, and Alain J. Kreisler. 2012. "Low Temperature Amorphous Growth of Semiconducting Y-Ba-Cu-O Oxide Thin Films in View of Infrared Bolometric Detection." In *Thin Solid Films*, 520:4754–57. doi:10.1016/j.tsf.2011.10.127.

Jiazhen, Yan, Zhang Yue, Huang Wanxia, and Tu Mingjin. 2008. "Effect of Mo-W Co-Doping on Semiconductor-Metal Phase Transition Temperature of Vanadium Dioxide Film." *Thin Solid Films* 516 (23): 8554–58. doi:10.1016/j.tsf.2008.05.021.

Ko, Changhyun, and Shriram Ramanathan. 2009. "Dispersive Capacitance and Conductance across the Phase Transition Boundary in Metal-Vanadium Oxide-Silicon Devices." *Journal of Applied Physics* 106 (3). doi:10.1063/1.3186024.

Koenig, S, D Lopez-Diaz, J Antes, F Boes, R Henneberger, A Leuther, A Tessmann, et al. 2013. "Wireless Sub-THz Communication System with High Data Rate." *NATURE PHOTONICS* 7 (12): 977–81. doi:10.1038/NPHOTON.2013.275.

Kreisler, A J, and A Gaugue. 2000. "Recent Progress in High-Temperature Superconductor Bolometric Detectors: From the Mid-Infrared to the Far-Infrared (THz) Range." *SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY* 13 (8): 1235–45. doi:10.1088/0953-2048/13/8/321.

Kumar, R T R, B Karunagaran, D Mangalaraj, S K Narayandass, P Manoravi, M Joseph, and V Gopal. 2003. "Study of a Pulsed Laser Deposited Vanadium Oxide Based Microbolometer Array." *SMART MATERIALS & STRUCTURES* 12 (2): 188–92. doi:10.1088/0964-1726/12/2/305.

Kusano, E. 1988. "Deposition of Vanadium Oxide Films by Direct-Current Magnetron Reactive Sputtering." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 6 (3): 1663. doi:10.1116/1.575304.

Li, Jinhua, Ningyi Yuan, and Jiansheng Xie. 2005. "Annealing Characteristics of the Vanadium Oxide Films Prepared by Modified Ion Beam Enhanced Deposition." *Applied Surface Science* 243 (1–4): 437–42. doi:10.1016/j.apsusc.2004.09.103.

Liu, H B, Y Q Chen, G J Bastiaans, and X C Zhang. 2006. "Detection and Identification of Explosive RDX by THz Diffuse Reflection Spectroscopy." *OPTICS EXPRESS* 14 (1): 415–23. doi:10.1364/OPEX.14.000415.

Lu, X H, L Kang, J Chen, Y Y Zhong, N He, L B Zhang, B B Jin, et al. 2008. "A Terahertz Detector Operating at Room Temperature." *Proc. SPIE 7277: 72770N–72770N–7*. doi:10.1117/12.821570.

Luukanen, A, L Grönberg, P Heliö, J S Penttilä, H Seppä, H Sipola, C R Dietlein, and E N Grossman. 2006. "An Array of Antenna-Coupled Superconducting Microbolometers for Passive Indoors Real-Time THz Imaging." *Proc. SPIE*. doi:10.1117/12.669044.

Lv, Yuqiang, Ming Hu, Miao Wu, and Zhigang Liu. 2007. "Preparation of Vanadium Oxide Thin Films with High Temperature Coefficient of Resistance by Facing Targets D.c. Reactive Sputtering and Annealing Process." *Surface and Coatings Technology* 201 (9–11): 4969–72. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.07.211.

Magnéli, Arne, Niels Hofman-Bang, and Poul Gjertsen. 1948. "The Crystal Structures of Mo<sub>9</sub>O<sub>26</sub> (beta'-Molybdenum Oxide) and Mo<sub>8</sub>O<sub>23</sub> (Beta-Molybdenum Oxide)." *Acta Chemica Scandinavica*. doi:10.3891/acta.chem.scand.02-0501.

Microchemicals Company," Lift-off Processes with Photoresists", 2013,

[www.microchemicals.com/downloads/application\\_notes.html](http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html) Son erişim tarihi: 15 Mayıs 2017

Moreno, M., A. Kosarev, A. Torres, and R. Ambrosio. 2007. "Fabrication and Performance Comparison of Planar and Sandwich Structures of Micro-Bolometers with Ge Thermo-Sensing Layer." *Thin Solid Films* 515 (19 SPEC. ISS.): 7607–10. doi:10.1016/j.tsf.2006.11.172.

Morin, F J. 1959. "Oxides Which Show a Metal-to-Insulator Transition at the Neel Temperature." *Physical Review Letters* 3 (1). American Physical Society: 34–36. doi:10.1103/PhysRevLett.3.34.

Öksüzoğlu M. R., Bilgiç P., Yıldırım M., Deniz O., 2013. "Influence of Post-Annealing on Electrical, Structural and Optical Properties of Vanadium Oxide Thin Films." *Optics & Laser Technology* 48 (June): 102–9. doi:10.1016/j.optlastec.2012.10.001.

Nebioğlu, Mehmet Ali, Taylan Takan, Hakan Altan, Yasemin Demirhan, Hakan Alaboz, Lütfi Özyüzer, and Cumali Sabah. 2017. "An Indium Tin Oxide Metasurface Filter for Terahertz Applications: Design, Fabrication, and Characterization." *Modern Physics Letters B* 31 (8): 1750074. doi:10.1142/S0217984917500749.

Niklaus, Frank, Christian Vieider, and Henrik Jakobsen. 2007. "MEMS-Based Uncooled Infrared Bolometer Arrays – A Review." *Photonics Asia 2007* 6836: 68360D–68360D–15. doi:10.1117/12.755128.

Ozyuzer, L., A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Gopalsami, Q. Li, M. Tachiki, K. Kadowaki, et al. 2007. "Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors." *Science* 318 (5854): 1291–93. doi:10.1126/science.1149802.

Ozyuzer, L, Y Simsek, H Koseoglu, F Turkoglu, C Kurter, U Welp, A E Koshelev, et al. 2009. "Terahertz Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions in High- Tc Superconductors." *Supercond. Sci. Technol.* 22 (11): 114009 (7pp). doi:10.1088/0953-2048/22/11/114009.

Podraza, N. J., B. D. Gauntt, M. A. Motyka, E. C. Dickey, and M. W. Horn. 2012. "Electrical and Optical Properties of Sputtered Amorphous Vanadium Oxide Thin Films." *Journal of Applied Physics* 111 (7). doi:10.1063/1.3702451.

Radu, Iuliana P, Koen Martens, Sofie Mertens, Cristoph Adelman, Xiaoping Shi, Hilde Tielens, Marc Schaeckers, et al. 2011. "(Invited) Vanadium Oxide as a Memory Material." In *SILICON COMPATIBLE MATERIALS, PROCESSES, AND TECHNOLOGIES FOR ADVANCED INTEGRATED CIRCUITS AND EMERGING APPLICATIONS*, edited by V Roozeboom, F and Kwong, DL and Timans, PJ and Gusev, EP and Iwai, H and Ozturk, MC and Narayanan, 35:233–43. ECS Transactions. doi:10.1149/1.3568865.

Rajeswaran, Bharathi, and Arun M Umarji. 2016. "Effect of W Addition on the Electrical Switching of VO<sub>2</sub> Thin Films." *AIP Advances* 6 (3): 35215. doi:10.1063/1.4944855.

Rampelberg, Geert, Bob De Schutter, Wouter Devulder, Koen Martens, Iuliana Radu, and Christophe Detavernier. 2015. "In-Situ X-Ray Diffraction Study of the Controlled Oxidation and Reduction in the V-O System for the Synthesis of VO<sub>2</sub> and V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thin Films." *J. Mater. Chem. C* 3 (Cvd). Royal Society of Chemistry: 11357–65. doi:10.1039/C5TC02553B.

Raully, Dominique, Alessandro Monfardini, Angel Colin, and Pascal Febvre. 2008. "Design of Two-Band 150-220 GHz Superconducting Bolometric Detection Structure." *PIERS Online* 4 (6): 671–75. doi:10.2529/PIERS071220141852.

Rinzan, M, G Jenkins, H D Drew, S Shafranjuk, and P Barbara. 2012. "Carbon Nanotube Quantum Dots As Highly Sensitive Terahertz-Cooled Spectrometers." *NANO LETTERS* 12 (6): 3097–3100. doi:10.1021/nl300975h.

Rogalski, A. 2009. "Infrared Detectors for the Future." *Acta Physica Polonica A*.

Rogalski, A, and F Sizov. 2011. "Terahertz Detectors and Focal Plane Arrays." *Opto-Electronics Review* 19 (3): 346–404. doi:10.2478/s11772-011-0033-3.

Root, Michael J. 2011. "Resistance Model for Lithium-Silver Vanadium Oxide Cells." *JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY* 158 (12): A1347–53. doi:10.1149/2.049112jes.

Saijo, H., M. Morimoto, M. Yamashita, M. Tonouchi, and M. Hangyo. 1999. "Terahertz Radiation from Log-Periodic Antennas." In *Technical Digest. CLEO/Pacific Rim '99. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (Cat. No.99TH8464)*, 2:451–52. IEEE. doi:10.1109/CLEOPR.1999.811515.

Sanphuang, Varittha, Nima Ghalichechian, Niru K Nahar, and John L Volakis. 2016. "Reconfigurable THz Filters Using Phase-Change Material and Integrated Heater." *IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY* 6 (4): 583–91. doi:10.1109/TTHZ.2016.2560175.

Shibata, K, A Umeno, K M Cha, and K Hirakawa. 2012. "Photon-Assisted Tunneling through Self-Assembled InAs Quantum Dots in the Terahertz Frequency Range." *PHYSICAL REVIEW LETTERS* 109 (7). doi:10.1103/PhysRevLett.109.077401.

Shie, Jin Shown, Yeong Maw Chen, Mang Ou-Yang, and Bruce C S Chou. 1996. "Characterization and Modeling of Metal-Film Microbolometer." *Journal of Microelectromechanical Systems* 5 (4): 298–306. doi:10.1109/84.546409.

Siegel, P H. 2002. "Terahertz Technology." *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES* 50 (3): 910–28. doi:10.1109/22.989974.

Sizov, Fiodor F, Vladimir P Reva, Alexandr G Golenkov, and Vyacheslav V Zabudsky. 2011. "Uncooled Detectors Challenges for THz/sub-THz Arrays Imaging." *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 32 (10): 1192–1206. doi:10.1007/s10762-011-9789-2.

Smith, E. M., J. C. Ginn, A. P. Warren, C. J. Long, D. Panjwani, R. E. Peale, and D. J. Shelton. 2014. "Linear Bolometer Array Using a High TCR VOx-Au Film." *Proc. SPIE 9070, Infrared Technology and Applications* 4 (1): 90701Z. doi:10.1117/12.2050434.

Soltani, M, M Chakere Haddad, R V Kruzeleckyj Margot, and J Margot. 2004. "Effects of Codoping on the Optical and Electrical Switching of Vanadium Dioxide Thin Films Grown by a Reactive Pulsed Laser Deposition Effects of Ti – W Codoping on the Optical and Electrical Switching of Vanadium Dioxide Thin Films Grown by a Reactive Pu" 1958: 11–14. doi:10.1063/1.1788883.

Son, L N, T Tachiki, and T Uchida. 2012. "High TCR of VOx Thin Films Fabricated by Metal-Organic Decomposition for Bolometer Detectors." In *2012 37TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED, MILLIMETER, AND TERAHERTZ WAVES (IRMMW-THZ)*. International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves.

Subrahmanyam, A, Y Bharat Kumar Redd, and C L Nagendra. 2008. "Nano-Vanadium Oxide Thin Films in Mixed Phase for Microbolometer Applications." *Journal of Physics D: Applied Physics* 41 (19): 195108. doi:10.1088/0022-3727/41/19/195108.

- Tonouchi, Masayoshi. 2007. "Cutting-Edge Terahertz Technology." *Nature Photonics* 1 (2): 97–105. doi:10.1038/nphoton.2007.3.
- Tu, X C, Q K Mao, L Xu, C Wan, Z L Sun, L Kang, J Chen, and P H Wu. 2013. "Antenna-Coupled Uncooled Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> Microbolometers for Terahertz Imaging." In *TERAHERTZ PHYSICS, DEVICES, AND SYSTEMS VII: ADVANCED APPLICATIONS IN INDUSTRY AND DEFENSE*, edited by Anwar, MF and Crowe, TW and Manzur, T. Vol. 8716. Proceedings of SPIE. doi:10.1117/12.2014414.
- Turkoglu, F., L. Ozyuzer, H. Koseoglu, Y. Demirhan, S. Preu, S. Malzer, Y. Simsek, H. B. Wang, and P. Muller. 2013. "Emission of the THz Waves from Large Area Mesas of Superconducting Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>+ $\delta$  By the Injection of Spin Polarized Current." *Physica C: Superconductivity and Its Applications* 491: 7–10. doi:10.1016/j.physc.2013.01.014.
- Turkoglu, F, H Koseoglu, Y Demirhan, L Ozyuzer, S Preu, S Malzer, Y Simsek, P Müller, T Yamamoto, and K Kadowaki. 2012. "Interferometer Measurements of Terahertz Waves from Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>+ $\delta$  Mesas." *Supercond. Sci. Technol.* 25 (12): 125004. doi:10.1088/0953-2048/25/12/125004.
- Vicarelli, L, M S Vitiello, D Coquillat, A Lombardo, A C Ferrari, W Knap, M Polini, V Pellegrini, and A Tredicucci. 2012. "Graphene Field-Effect Transistors as Room-Temperature Terahertz Detectors." *NATURE MATERIALS* 11 (10): 865–71. doi:10.1038/NMAT3417.
- Vitiello, Miriam S, Dominique Coquillat, Leonardo Viti, Daniele Ercolani, Frederic Teppe, Alessandro Pitanti, Fabio Beltram, Lucia Sorba, Wojciech Knap, and Alessandro Tredicucci. 2012. "Room-Temperature Terahertz Detectors Based on Semiconductor Nanowire Field-Effect Transistors." *NANO LETTERS* 12 (1): 96–101. doi:10.1021/nl2030486.
- Wang, Bin, Jianjun Lai, Hui Li, Haoming Hu, and Sihai Chen. 2013. "Nanostructured Vanadium Oxide Thin Film with High TCR at Room Temperature for Microbolometer." *Infrared Physics & Technology* 57 (March): 8–13. doi:10.1016/j.infrared.2012.10.006.
- Wang, Bin, Jianjun Lai, Erjing Zhao, Haoming Hu, and Sihai Chen. 2012. "Research on VO<sub>x</sub> Uncooled Infrared Bolometer Based on Porous Silicon." *Frontiers of Optoelectronics* 5 (3): 292–97. doi:10.1007/s12200-012-0224-7.
- Wang, Hongchen, Xinjian Yi, and Sihai Chen. 2006. "Low Temperature Fabrication of Vanadium Oxide Films for Uncooled Bolometric Detectors." *Infrared Physics & Technology* 47 (3): 273–77. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2005.04.001.
- Wei, Xiongbang, Shibin Li, Jun Gou, Xiang Dong, Xiaohui Yang, Weizhi Li, Tao Wang, Zhiming Wu, Yadong Jiang, and Zhi Chen. 2014. "Preparation and Characteristics of Vanadium Oxide Thin Films by Controlling the Sputtering Voltage." *Optical Materials* 36 (8): 1419–23. doi:10.1016/j.optmat.2014.02.021.
- Wood, R A. 1995. "Use of Vanadium Oxide in Microbolometer Sensors." Google Patents. <https://www.google.com/patents/US5450053>.
- Woodward, R M, B E Cole, V P Wallace, R J Pye, D D Arnone, E H Linfield, and M Pepper. 2002. "Terahertz Pulse Imaging in Reflection Geometry of Human Skin Cancer and Skin Tissue." *PHYSICS IN MEDICINE AND BIOLOGY* 47 (21): 3853–63. doi:10.1088/0031-9155/47/21/325.
- Woodward, R M, V P Wallace, R J Pye, B E Cole, D D Arnone, E H Linfield, and M Pepper. 2003. "Terahertz Pulse Imaging of Ex Vivo Basal Cell Carcinoma." *JOURNAL OF INVESTIGATIVE DERMATOLOGY* 120 (1): 72–78. doi:10.1046/j.1523-1747.2003.12013.x.

Yang, Yuping, Ranjan Singh, and Weili Zhang. 2011. "Anomalous Terahertz Transmission in Bow-Tie Plasmonic Antenna Apertures." *Optics Letters* 36 (15): 2901. doi:10.1364/OL.36.002901.

Yin, Dachuan, Niankan Xu, Jingyu Zhang, and Xiulin Zheng. 1996. "High Quality Vanadium Dioxide Films Prepared by an Inorganic Sol-Gel Method." *Materials Research Bulletin* 31 (3): 335–40. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0025-5408(95)00191-3.

Zhou, T, R Zhang, X G Guo, Z Y Tan, Z Chen, J C Cao, and H C Liu. 2012. "Terahertz Imaging With Quantum-Well Photodetectors." *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS* 24 (13): 1109–11. doi:10.1109/LPT.2012.2196033.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. LÜTFİ ÖZYÜZER
Proje No:	115F549
Proje Başlığı:	Terahertz Dalgaları Duyarlı Soğutmasız Vanadyum Oksit Bolometre Dizisi
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENS. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/02/2016 - 01/02/2017
Onaylanan Bütçe:	29980.0
Harcanan Bütçe:	29412.75
Öz:	<p>Terahertz bölgesindeki araştırmalar ve bunun sonucu olan teknolojik gelişmeler son dönemde hızla artmıştır ve günümüzde terahertz bölgesinin uygulama alanları güvenlikten medikal görüntülemeye, patlayıcı tespitinden, örneklerle zarar vermeden yapılabilen testlere ve geniş bant kablosuz iletişime kadar birçok alana yayılmıştır. Terahertz ışınması birçok plastikten, kumaşlardan geçer, metallere yansır ve bilinen birçok patlayıcı malzemesinin tespitinde kullanılır. Bu avantajları ve uygulama alanlarının büyüklüğüne rağmen, ucuz, kompakt ve soğutmasız THz dedektör yapmanın zorluğu sektörün yavaş ilerlemesine neden olmaktadır. İstenilen bu özellikler sağlansa bile yapılan dedektörlerin performansı istenilen uygulama için yeterli olmayabilir. Şu anda yaygın olarak THz alanında kullanılan dedektörler, piroelektrik, Schottky bariyer diyotları, alan etkili transistörler, kolay hücreleri olarak sayılabilir. Düşük duyarlılık, bir dizi haline getirme zorluğu ve düşük hızda çalışmaları bu dedektörlerin dezavantajlarıdır. Kızılötesi bölgede şu anda yaygın olarak kullanılan dedektörler, amorf silikon ve VOx tabanlı olanlardır. VOx dedektörler amorf silikondan yapılan dedektörlere göre daha düşük Johnson gürültüsüne sahip olmaları, soğutma gereksinimleri olmaması, düşük maliyetli olmaları ve kolay olarak bir dizi haline getirilebilmeleri nedeniyle daha çok tercih edilirler. Kızılötesi bölgede bu dedektör MEMS tabanlı yapılabilmektedir. Kızılötesi alanındaki bu başarısı nedeniyle VOx, terahertz bölgesi içinde gelecek vaat etmektedir. Fakat THz bölgesinde bu tip dedektörlerin yapılması için, büyük dalgaboyu nedeniyle MEMS tabanlı yapılamayıp yeni tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu proje kapsamında DC manyetik saçtırma sistemi ile hazırlanan VOx:Au ince filmler yüksek direnç sıcaklık katsayısı (TCR) değerlerine sahip olmaları için optimize edilmiş, THz bölgesinde çalışacak anten tasarımı yapılmış ve sonrada bolometre yapımında kullanılmıştır. TCR değerini iyileştirmek büyük oranda gaz oranları gibi kaplama parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler en yüksek TCR değeri ve Au katkılama ile en düşük direnç elde edilince kadar değiştirilmiştir. Özgün olarak, yüksek öz direnç silikon yongalar üzerine büyütülen ve altın katkılanan bu filmler, bolometrenin THz bölgesinde verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla kullanılabilir. Aygıtın üzerine yapılan anten tasarımı, grubumuzun elinde bulunan 0.5 ile 0.75 THz arası kaynağa tepki vermesi için profesyonel bir yazılım olan CST Microwave Studio ile yapılmıştır. Tasarımı yapılan anten ve bolometre dizisi için UV Maske yapılmış ve litografi için kullanılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Terahertz, Soğutmasız bolometre, Vanadyum oksit
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır