T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERAHERTZ DALGALARI İÇİN VO_2 İNCE FİLM METAYÜZEYLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ŞEHRİBAN ZEYBEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2021

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERAHERTZ DALGALARI İÇİN VO_2 İNCE FİLM METAYÜZEYLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ŞEHRİBAN ZEYBEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FİKRET YILDIZ
II. DANIŞMANI
PROF.DR. LÜTFİ ÖZYÜZER

GEBZE
2021

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

DEPOSITION AND CHARACTERIZATION OF THİN FİLM VO_2 METASURFACES FOR TERAHERTZ WAVES

ŞEHRİBAN ZEYBEK

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. FİKRET YILDIZ

II. THESIS SUPERVISOR

PROF.DR. LÜTFİ ÖZYÜZER

GEBZE

2021

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ ……Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun …..…/…..…/…..… tarih ve ..……/……..… sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından …..…/…..…/…..… tarihinde tez savunma sınavı yapılan ……'ın tez çalışması ……Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :

ÜYE :

ÜYE :

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..…/…../…… tarih ve ……/…..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Terahertz bandının kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, modülatörler, vericiler ve alıcılar gibi terahertz ve milimetre dalga boyu teknolojilerine dayalı pasif ve aktif aygıtların geliştirilmesinin önemi artmıştır.Terahertz bandında yüksek hızda çalışan modülatörlerinin gerçekleştirilmesi için birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmaların sonuçlarına göre, yüksek hızda çalışabilen THz modülatörlerinin geliştirilebilmesi için bazı zorluklar bulunsada, öncelikle optik veya elektrik alan vb. uygulanarak modüle edilebilen, çok iyi THz elektriksel özelliklere sahip, ayarlanabilir bir aygıta ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda hızlı modüle edilen taşıyıcının uygun bir alıcı yapısı ile çözümlenmesi gerekmektedir**.** Bu tezde terahertz aralığında ayarlanabilir frekansta üretilebilen metamalzeme yapılar, yalıtkan-metal geçiş özelliğini gösteren yüksek kalitede vanadyum (VO_2) ince filmler ile özgün tasarımlarda üretilerek yüksek hızda çalışabilen modulatörler geliştirilmiştir**.** Vanadyum ince filmlerinden metamalzeme yapıları tasarlanmıştır fakat THz bölgesinde hızlı çalışabilen bir modülator aygıt veya sensor yapısı olarak henüz kullanılmamıştır. THz bölgesinde çalışan bu tür aygıtları sağlamak için ayarlanabilir özellikte metamalzeme yapıların tasarlanması ve rezonans özelliklerinin optimize edilmesi gerekir. Bu çalışmada vanadyumdioksit metamalzeme yapılarının tasarım ve simülasyonu ve nümerik hesaplamalar için CST Microwave Studio programı kullanılmıştır. Projenin deneysel kısmında DC mıknatıssal saçtırma sistemi ile safir alttaşlar üzerinde vanadyum ince filmler büyütülmüştür. Büyütülen ince filmlerin yapısal ve elektriksel karakterizasyonları yapıldıktan sonra karakterizasyon sonuçlarından elde edilen özellikler nümerik simülasyon programına tanıtılararak bu yapıların hızlı modülasyonu uygulamasında kullanılması için en uygun (optimum) metamalzeme yapısı belirlenmiştir. Vanadyum metamalzeme yapıların geçirgenlik ve THz modulator özellikleri deneysel olarak THz spektroskopisi ile analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler:Terahertz, Modulatörler, Metamalzemeler, VO_2 İnce Filmler, Yalıtkan-Metal Geçişi.

SUMMARY

THz modulators, the goal is to develop devices which have excellent electrical characteristics and that also can be modulated by applying an electrical or optical signal. At the same time the fast modulated carrier wave needs to be decrypted with an appropriate detector. In this regard this thesis proposal gains importance. Unique metamaterial structures tailored to work in the terahertz range combined with high quality vanadium (VO_2) thin films was investigated in order to develop fast modulators. Even though vanadium thin films have been utilized in metamaterial designs no one has been able to show that these devices can be used as a fast modulator or sensor in the THz region. In this tesis the we planned to design and create unique metamaterial devices based on the metal insulator transition in vanadium thin films that work in the terahertz region and characterize those using numerical and experimental methods. The metal insulator transition for vanadium will be triggered using optical and electrical techniques, resulting in a rapid phase change this will allow the vanadium based metamaterial devices to modulate the THz radiation at high rates. Similarly, the phase change will change the resonant behavior of a similarly structured device created for sensor applications. To ensure that these devices work well in the THz region the frequency tunable metamaterial structures as well as the resonant features have to be optimized. The design and optimization of the vanadium based metamaterial devices was performed using numerical simulations aided by CST Microwave Studio program. In the experimental part, using a DC magnetic sputtering system the VO_2 thin films was grown. The as grown films optical and electrical characteristics was measured and then the parameters was fed in to the numerical simulations so that the best metamaterial designs can be selected for both high speed modulation. Finally the transmission through the modulators was assessed using the THz Spectroscopy systems.

Key Words: **Terahertz, Modulators, Metamaterıals, VO_2 Thin Films, MIT**

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışmanım Prof.Dr Lütfi ÖZYÜZER' e teşekkürlerimi sunarım. 118F069 ve 119R038 numaralı TÜBİTAK projelerinde çalıştığım süre zarfında Prof.Dr. Lütfi ÖZYÜZER ve Prof.Dr. Gülnur AYGÜN' e ait laboratuvarlardaki imkânlar sayesinde literatür araştırmalarımı deney ve benzetimleri ayrıntılı olarak gerçekleştirme imkânı buldum. Tez konum ile alakalı "Investigation of Resonant Propertiesof Metametarial THz Modulators Fabricated from Vanadium Dioxide Thin Films" başlığı ile Prof.Dr.Lütfi ÖZYÜZER, Dr.Yasemin DEMİRHAN, Prof.Dr. Hakan ALTAN önderliğinde çıkardığımız makale için, değerli Hocalarıma sonrasında 118F069 ve 119R038 numaralı projeler kapsamında sağladığı destekler için TÜBİTAK' a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. VO_2 ve METAMALZEMELER	3
2.1. Geçiş Metal Oksitler	3
2.1.1. Metal Yalıtkan Geçişi	3
2.1.2 Vanadyum Dioksit	4
2.2. Metamalzemeler	7
2.2.1 Metamalzemelerin Teorik Açıdan incelenmesi	9
2.2.2 Elektromanyetik Dalganın Matemalzeme İçerisinde İlerliyişi	10
2.2.3 Metamalzemlerin Elde Edilmesi	14
2.2.4 Frekans Seçici Yüzeyler	15
2.3 Terahertz Dalgaları	17
3. DENEYSEL YÖNTEMLER	19
3.1. Doğru Akım (DC) Mıknatıssal Saçtırma Yöntemi	19
3.2. Ölçüm Teknikleri	20
3.2.1 Elektriksel Karaterizasyon	20
3.2.2 Four-cross Metamalzeme VO_2 Filtre Tasarımı ve Üretimi	21
3.2.3 Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) İle Metamalzeme Tasarımı ve Modellemesi	22
3.3.4 Four-cross Metamalzeme Üretimi Buharlatırma Tekniği	25
3.3.5 Fotolitografi	26

3.3. THz Ölçüm Sistemi 29
3.3.1 THz Ölçüm Sisteminin Çalıştırılması 31
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 33
4.1. VO_2 Film Üretim Parametreleri 33
4.2 Elektriksel Analiz 33
4.3 Optik Mikroskop ve CST Similasyon Analizi 36
4.4 THz Spektrum Ölçüm Analizi 39
5. SONUÇLAR ve YORUMLAR 54

KAYNAKLAR 56
ÖZGEÇMİŞ 61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
∇	:	Nabla operatörü
μ	:	Manyetik Geçirgenlik
E	:	Elektrik alan vektörü
ε	:	Dielektrik sabiti
Hz	:	Hertz
Ω	:	Açısal Frekans
K	:	Dalga Vektörü
H	:	Manyetik alan vektörü
n	:	Kırılma İndisi
EM	:	Elektromanyetik dalga
υ_g (k)	:	Grup Hızı
S	:	Poynting Vektör
J	:	Serbest akı yoğuluğu
Nm	:	Nanometre
DPS	:	Çifte pozitif metamateryal
ENG	:	Dielektrik sabiti negatif ortam
DNG	:	Çifte negatif ortam
MNG	:	Manyetik geçirgenliği negatif ortam
FSY	:	Frekans Seçici Yüzey
MIT	:	Yalıtkan fazdan metala geçiş
İYTE	:	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
PR	:	Potoresizist

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	VO_2 metal-yalıtkan geçiş özelliğinin (a) ısıtma, (b) UV ışık, (c) elektrik alan ile tetiklenerek gösterimi	5
2.2:	VO_2'nin (a) monoklinik ve (b) tetragonal kristal yapısı.	6
2.3:	Yalıtkan ve metalik fazlar için VO_2 'nin bant yapısı.	7
2.4:	Malzemelerin elektromanyatik dalgalara verdikleri tepkilere göre sınıflandırılması.	9
2.5:	Elektromanyetik dalganın sağ elli ve sol elli malzemelerindeki davranışını göstermektedir.	10
2.6	Metamalzemlerin elde edilmesinin gösterimi.	14
2.7:	(a) yuva (slot) tipi FSS'yi (b) yuma (patch) tipi FSS'yi ve göstermektedir.	16
3.1:	VO_2 Mıknatıssal saçtırma sistemi gösterimi.	20
3.2:	Ekranlama etkinliği olarak hesaplanan saçılan değerlerinin deneysel ve teorik karşılaştırılması.	21
3.3:	CST microvawe propramı ile metayüzey tasarımı gösterimi.	23
3.4:	(a) Elde edilen tasarıma ait eşdeğer devredir (b) (1)-(3) denklemlerdeki kullanılan sembollerin yerine kullanılan değerleri göstermektedir	25
3.5:	Buharlaştırma sistemi gösterimi.	26
3.6:	UV- Fotolitografi tekniği aşamaları.	27
3.7:	İYTE Fizik Bölümü İnce Film Lab. bulunan iyon demeti aşındırma sistemi.	28
3.8:	İYTE Fizik Bölümü İnce Film Lab. Bulunan İyon Demeti Aşındırma Sistemi.	29
3.9:	Terahertz ölçüm sistemi gösterimi.	29
3.10:	a) Lazer diode ısıtma tekniği, b) holder ısıtma tekniği gösterilmiştir.	32
4.1:	Elektriksel analizin yapıldığı mikroprobe station sistemi gösterilmiştir.	33
4.2:	$SZVO_2$-21 direnç sıcaklık grafiği gösterilmiştir.	34

4.3: Meta02 direnç sıcaklık grafiği gösterilmiştir. 34

4.4: Meta03 direnç sıcaklık grafiği gösterilmiştir. 35

4.5: Meta04 direnç sıcaklık grafiği gösterilmiştir. 35

4.6: a) ve b) maskeye ait optik mikroskop görüntüleri ve ölçüleri c) ve d) four- cross yapının optic mikroskop görünteleri ve ölçüleri gösterilmiştir. 36

4.7: Deneysel olarak ölçülen değerlere göre CST programi ile oluşturulan four-cross frekans seçici yüzey. 37

4.8: Deneysel olarak ölçülen değerlere göre CST programi ile oluşturulan four-cross frekans seçici yüzey. 38

4.9: Deneysel olarak ölçülen değerlere göre CST programi ile oluşturlan four-cross frekans seçici yüzey similasyon sonucu grafiği. 38

4.10: a) Havanın 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu b) Havanın 0.2-1 THz aralığındaki THz spectrum 40

4.11: a) Safir alttaşın 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu-holder ısıtma b) Safir alttaşın 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu-lazer ısıtma. 41

4.12: a) VO_2-21 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu b) VO_2-21 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu normalize edilmiş. 42

4.13: Şekil.4.13: a) Meta02 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu b) Meta02 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu-normalize edilmiş. 43

4.14: a) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu b) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu-normalize edilmiş. 44

4.15: a) Meta04 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu b) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu-normalize edilmiş. 45

4.16: a) VO_2-21 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spectrumu b) VO_2-21 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spectrumu . 47

4.17: : a) Meta02 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu b) Meta02 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu. 48

4.18: a) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu b) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu. 49

4.19: a) Meta04 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu b) Meta04 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu. 50

4.20: VO_2-21 farklı sıcaklıklardaki geçiş sıcaklığı grafiği. 51

4.21: Meta-02 farklı sıcaklıklardaki geçiş sıcaklığı grafiği. 51

4.22: Meta-03 farklı sıcaklıklardaki geçiş sıcaklığı grafiği. 52

4.23: Meta-04 farklı sıcaklıklardaki geçiş sıcaklığı grafiği. 52

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
2.1:	Vanadyum oksit bileşiklerinin metal-yalıtkan geçişlerinin hangi sıcaklıkta olduğu gösterilmiştir.	5
4.1:	Magnetron şaçtırma tekniği ile üretilen VO_2 kaplama parametleri gösterilmiştir.	33
4.2:	Sıcaklık artışına karşılık gelen sıcaklık değeri gösterilmiştir.	39
4.3:	Lazer güç kaynağının akım, güç ve sıcaklık değerleri gösterilmiştir.	46

1. GİRİŞ

Terahertz (THz) dalgası mikrodalga ve kızılötesi arasındaki frekans boşluğana ve buna karşılık gelen 3 mm ile 30 μm arasında değişir. İletişim, biyotıp, güvenlik gibi alanlardaki büyük potansiyeli nedeni ile THz teknolojisi son yıllarda giderek gelişmektedir. THz teknolojisinin yaygın olarak kullanılamamasının temel sebebi mükemmel performansa sahip fonksiyenel cihazların eksikliğidir. Bunun nedeni, doğada THz dalgası ile etkileşime girecek malzemenin olmamasıdır. Metamalzeme olarak adı verilen periyodik olarak düzenlenmiş yapısal birimlerden oluşan bu yapay malzeme tipi bu sorunu çözmek için kullanılabilir. Doğada bulunan malzemeler için elektriksel ve manyetik geçirgenlik katsayıları genellikle pozitif değerlere sahip olmasına karşı elektriksel geçirgenlik sabiti negatif değer alan malzemeler de bulunmaktadır. Bu parametrelerin her ikisinin negatif olduğu malzemeler ise ancak metamalzemelerin oluşturulması ile mümkündür. Sensör ve modülatör yapılarında resonant etkilerinden dolayı metamalzeme yapıların kullanımı dalga boyunun büyüklüğü ve yapıların daha kolay fabrikasyonu nedeniyle terahertz bölgesinde tercih edilmektedir. THz aralığında mekanik, optik, elektronik veya termal modülasyon mekanizmalarıyla ayarlanabilen modülatör ve sensör aygıtları literatürde bulunmaktadır [1-2]. Bunların arasında, en büyük ilgiyi elektriksel olarak kontrol edilen modülatörler toplamıştır ve araştırmalarda farklı malzemeler ile üretilebilen çeşitli cihaz tasarımları önerilmiştir.Son yıllarda modülatör ve sensor amaçlı geliştirilen yapılarda tek ve multi-katmanlı grafen malzemesinin yoğun olarak araştırılmaktadır. Grafen temelli, düşük kayıplı ve geniş bant genişliğine sahip elektro-soğurma modülatörleri tasarlanmıştır. Ancak, bu cihazlardaki erişilebilir modülasyon derinliği, grafenin karakteristikleri nedeniyle sınırlıdır. Dar bant genişliğine sahip, modülasyon derinliği iyileştirilmiş cihazlar, grafenin elektrik alan genliği frekans seçici yüzeyler veya elektromanyetik kavite entegre edilerek sağlanmıştır buna rağmen geniş alanlı olmalarına bağlı elde edilen modülasyon hızı sadece birkaç kilohertz (kHz) kadardır. 0.46 THz de yüksek hızlı modülasyon (10 MHz), cihaz üzerine entegre edilen, yeniden yapılandırılabilen özelliklere sahip metamalzeme yapıların rezonant özellikleri değiştirilerek elde edilmiştir. Vanadyum dioksitin (VO_2) tepkisi temel olarak grafenden daha farklıdır. Yüksek kalitede fotoelektrik fonksiyonel bir malzeme olarak VO_2 bensersiz bir yalıtkan ve metal

oksittir. Isı, ışık veya stressin harici uygulanması ile yalıtkan fazdan iletken faza (metal-insulator transititon MIT) geçiş söz konusudur. VO_2 ince filmin iletkenliği 4-5 ile değiştirilebilir faz geçişi picosaniyeler içerisinde tamalanabilir. Son zamanlarda, VO_2' nin MIT özelliğine dayanan aktif ayarlanabilir metamalzeme elektromanyatik frekanslarına uygulanmıştır [3-4].

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışma kapsamında vanadyum dioksit ince filmlerinden terahertz dalgaboylarında çalışabilen metamalzeme modulatör yapısı geliştirilmiş ve üretiletilmiştir. Öncelikle nümerik simülasyonlarla THz frekans aralığında özgün metamalzeme yapılar tasarlanmıştır. Bu çalışmalara parallel olarak DC mıknatıssal saçtırma sistemi safir alttaşlar üzerinde vanadium dioksit ince filmler büyütülmüştür. DC mıknatıssal saçtırma tekniğinde, filmin yüzeye tutunması, düzgün dağılımı, boşluksuz yapıda olması, yüzey pürüzlülüğü, elektriksel iletkenlik ve optik geçirgenlik gibi özellikler kaplama parametrelerine bağlıdır ve yapılacak karakterizasyonların sonuçlarına gore bu parametreler değiştirilmiş ince film kalitesi iyileştirilmiştir. Karakterizasyon sonuçlarından elde edilen elektriksel özellikler nümerik simülasyon programına tanıtılarak vanadyum ince filmlerin THz resonant etkileşimleri için en uygun metamalzeme yapıları belirlenmiştir. İnce film karakterizasyonundan sonra, fotolitografi sisteminde vanadyum dioksit ince film tabanlı katmanlı yapılar tasarımlanan metamalzeme yapılarına uygun olarak şekillendirilmiştir. Tasarladığımız metamalzeme yapıların geçirgenlik özellikleri ve THz frekanslarına hassasiyeti deneysel olarak THz ölçüm spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Yapılacak aygıtların oda sıcaklığında çalışması planlanmış olsada, ölçümler oda sıcaklığından vanadyum dioksit metamalzemenin yalıtkan metal geçiş gösterdiği geçiş sıcaklığını (VO_2 için yaklaşık 68 ^{0}C) kapsayacak şekilde yüksek sıcaklıklara kadar alınmıştır [5-7].

2. VO_2 ve METAMALZEMELER

2.1. Geçiş Metal Oksitler

Geçiş metali oksitleri, ferroelektriklik [8], ferromanyetizma [9], anti-ferromanyetizma [10] ve yüksek Tc süperiletkenliği [11] gibi keşfedilen hemen hemen her yoğun madde fenomenini sergileyen dikkate değer bir bileşik sınıfıdır. Bu metal oksitler hem metal hem de yalıtkan özellikleri taşımaktadır böylece metal-yalıtkan geçişleri sergilerler [12-13]. Bu bileşiklerin dikkat çekici elektronik özellikleri, periyodik tablodaki oksijenin konumuna, geçiş metallerinin çoklu değerlik durumlarına ve bu bileşikleri kuvvetli iyonik arasına ara yerleştirmek için bir araya gelen elektron-elektron Coulomb etkileşimlerine bağlıdır [14]. Mikroskobik düzeyde, bu bileşik sınıfının çeşitliliği, yük, spin, yörünge ve serbestlik dereceleri arasındaki bir rekabetten doğan çeşitli rakip zemin durumlarının sonucudur. Bu nedenle, yeni fenomenleri keşfetmek için verimli bir zemin sağlarlar ve bu bileşikleri basınç, gerinim, doping ve sıcaklıktaki değişikliklere karşı çok hassas hale getiren bir dengesizliğe yakınlığı nedeniyle mevcut olanları manipüle etme potansiyeli sunarlar [15-16].

2.1.1. Metal Yalıtkan Geçişi

Metal yalıtkan (MIT) geçişleri ilk olarak çeşitli geçiş metal oksitlerinde gözlenmiştir [17-18]. Genel olarak, geçişler birinci derecedir ve elektrikli taşıma verilerinde net bir histerezis gözlenir. İletkenlikteki değişiklikler genellikle manyetik duyarlılık ve kristal simetrisindeki değişikliklerle ilişkilidir [15]. Hem yapısal hem de elektronik geçişlerin varlığı genellikle teorik modellemeyi karmaşıklaştırır. Geçişin, elektron lokalizasyonunu destekleyen yapısal simetri değişikliklerine bağlı olup olmadığı ya da yapısal geçişin güçlü elektron-elektron korelasyonları tarafından yönlendirilip yönlendirilmediği bu geçişlerin birçoğu için hala yoğun bir şekilde tartışılmaktadır [19-22].

Bu geçişlerin açıklanmasında iki farklı yaklaşım vardır ilki Mott-Hubbard geçişi ikinci ise Peierls geçişidir. Basitçe Mott geçişi değişik sebeplerden dolayı meteryal özelliklerinin yalıtkan yapıdan iletken yapıya geçişini tanımlar. Mott aynı

iyondaki ters spindeki iki 3d elektronunun kolombik itme hareketleri ile elektronların belirli bölge içinde lokalize olduklarını belirtmiştir. Metalik ve iletken duruma dönüşümü sağlayacak elektron hareketleri potansiyel bariyerinin aşılması için termal uyarılma gerekliliğini savunmuştur. Peierls elektron-elektron dağılımlarına dikkati çekmiş ve düşük sıcaklıklarda elektronların kendi uygun pozisyonlarında bulunduğu ve elektronlar arasındaki güçlü elektriksel itme davranışının yalıtkanlığın doğasında olduğunu belirtmiştir. Metal-yarı iletken dönüşümünün teorisi günümüzde halen tartışmalıdır [23-24]. Özet olarak Vanadyum oksit bileşenlerinin oksijen oranı, faz geçiş sıcaklığı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Peierls geçişine göre, metal-yalıtkan faz geçişi sıcaklığının (68 ^{o}C) üzerindeki sıcaklıklarda kristal yapısı değişir, sonrasında band aralığı kapanır ve VO_2 metal olur. Bu görüş, tek elekron üzerinden yapılan tüm görüşler ve teoriler üzerinden açıklanabilir. Mott-Hubbard geçişine göre, VO_2 oda sıcaklığında Mott yalıtkanı durumundadır. Oda sıcaklığında, VO_2'nin fermi enerji seviyesi iletkenlik bandını kesmesine rağmen VO_2 yalıtkan fazdadır. Bu durum lektron korelasyon etkisi üzerinde bir ipucu olarak açıklanabilir. Bu durumda, sıcaklığın değişimi etkisiyle bir faz geçişi gerçekleşir ve bu durum sıradan band teorisi ile açıklanamaz. Bu farklı iki görüş göz önünde bulundurulduğunda, henüz kabul gören bir cevap görülmemektedir [25].

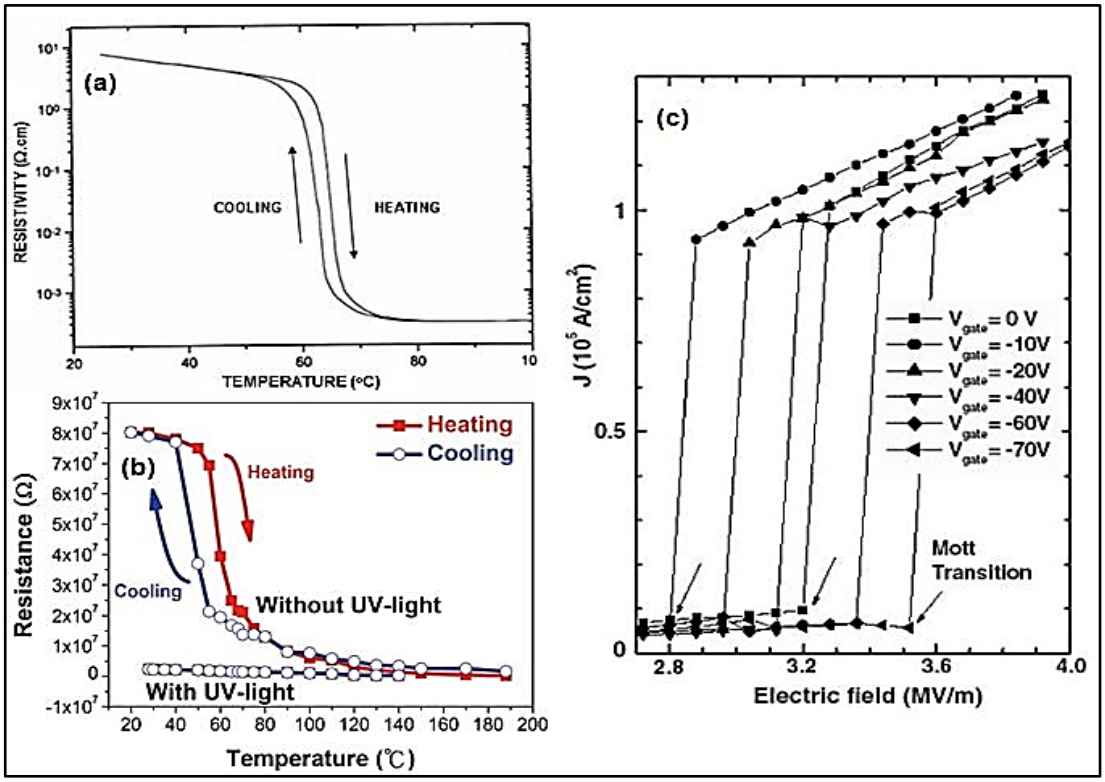
2.1.2. Vanadyum Dioksit (VO_2)

Vanadyum oksit fazları arasında, VO_2 en yaygın olarak incelenmiştir, çünkü VO_2 MIT sergileyen bileşiklerin en kararlısıdır. VO_2, eşlik eden yapısal faz geçişi ile birlikte oda sıcaklığına yakın bir MIT (T_{MIT} ~ 340 K) sergiler [26]. Oda sıcaklığına yakın MIT değişimi sergileyen VO_2 oda sıaklığında yapılan deneyler için bir numaralı aday olmuştur. Tablo 2.1'de gösterildiği gibi vanadyum bileşiklerinde oksijen içeriği geçiş sıcaklığında büyük rol oynar. VO_2 bileşiğinin metal-yalıtkan geçişi farklı yöntemlerle Şekil 2.1'de görüldüğü gibi tetiklenebilir [27-28].

Tablo 2.1: Seçilmiş bazı vanadyum oksit bileşiklerinin metal-yalıtkan geçişlerinin hangi sıcaklıkta olduğu gösterilmiştir.

Bileşik	T_{MIT}(K)
VO	Metallik
V_2O_3	168
V_3O_5	430
V_6O_{11}	170
V_2O_5	Yalıtkan
VO_2	340
V_9O_{17}	70

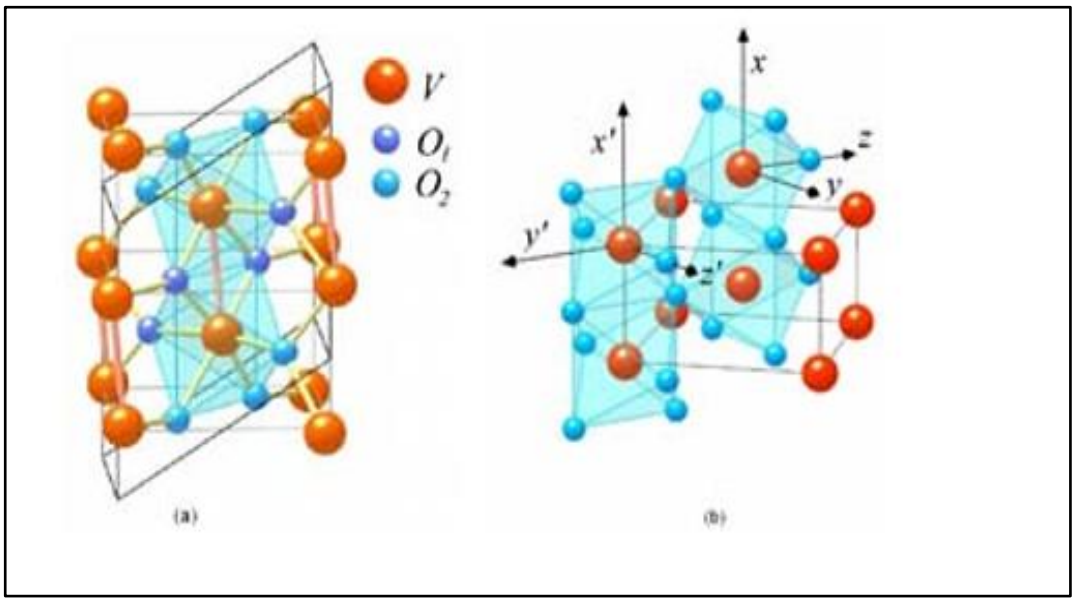
VO bileşiklerinde oksijen içeriği geçiş sıcaklığında büyük rol oynar [30]. VO_2 bileşiğinin metal-yalıtkan geçişi farklı yöntemlerle Şekil 2.1'de görüldüğü gibi tetiklenebilir [29].



Şekil 2.1: VO_2 metal-yalıtkan geçiş özelliğinin (a) ısıtma, (b) UV ışık, (c) elektrik alan ile tetiklenerek gösterimi.

VO_2'nin kristal yapısı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi [31] düşük scaklıklarda VO_2 monoclinic kristal yapısı gözlenirken bu durum VO_2 malzemesinin yaklaşık olarak

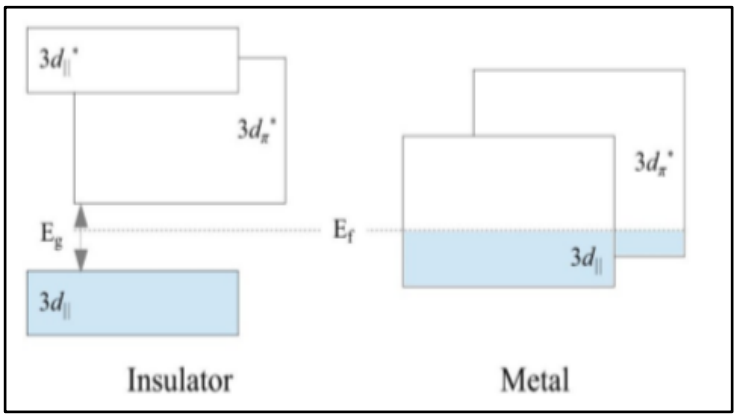
10 Ω.cm özdirenç değeriyle yalıtkan özellik göstermesine yol açar. Malzeme ıstılmaya başlandığında ise metallik özellik göstermeye başlar ve kristal yapı tetragonal rutile krisatal yapısına dönüşür. Metal VO_2 için, V-V atomlarının ortalama uzaklığı 0.288 nm olduğu zaman, tüm V atomları tek bir çizgide dizilirler. Bu yüzden, tüm V atomları d orbital elektronlarıyla üst üste gelir. Bu durum ise VO_2 malzemesinin yaklaşık olarak 10^{-4} Ω.cm özdirenç değeriyle metalik özellik kazanmasına yol açar [18]. Oda sıcaklığında yapı metallik değildir ve IR- bölgesinde geçirgendir (transperent) fakat yapı 68 ^{o}C değerinin üzeride ise metallik özellik kazanmaya başladığı için IR- bölgesini yansıtmaya başlar (reflection).



Şekil 2.2: VO_2'nin (a) monoklinik ve (b) tetragonal kristal yapısı.

Mott-Hubbard bakış açısına göre, olağandışı yalıtım davranışı ve buna karşılık gelen bir bant boşluğunun oluşumu, daha önce tartışıldığı gibi güçlü elektron-elektron etkileşiminin bir sonucu olarak bölünmüş 3d bantlarından kaynaklanır. VO_2 'nin hem metalik hem de yalıtkan fazları için 3d bant yapısı yeterince iyi anlamak gerekir. Metalik fazda, V^{4+} iyonunun 3d bandında önce t_{2g} bantlarına dönüşerek daha sonra da 3d|| 'ye 3dπ* ayrılır, bu durum tetragonal kristal alan ile belirtilir . 3dπ * ve 3d|| orbitaller üst üste biner ve Fermi seviyesinin etrafında bulunur, ancak 3dπ* bandı O 2p orbitalleri ile daha fazla hibritleştiği için enerjide daha yüksektir [21-22]. Fermi seviyesi artık iletim bandında yer aldığından, malzeme metalik özellikler sergiler.

Yalıtkan fazında, monoklinik bozulma V-O hibridizasyonunda, 3dπ* bandını daha da yüksek enerjiye yükselten değişikliklere neden olur, böylece bant artık Fermi seviyesinin üzerinde kalır ve boşalır [32]. Ayrıca, 3d|| c_R ekseni boyunca hizalanan bant, V atomlarının eşleşmesi nedeniyle dolu ve boş bir duruma bölünür. Bu değişikliklerin bir sonucu olarak, 3d|| valans bantları arasında ve 3dπ* iletim bandı enerji arasında enerji boşluğu oluşur [33]. Yalıtkan fazdaki çoğunluk taşıyıcıların, iletim bandına termal olarak aktive edilen n-tipi olduğu kabul edilmektedir [34-35]. Yalıtım ve metalik fazlar için bant yapıları Şekil 2.3' de şematik olarak sunulmaktadır [37], modifiye edilmiş O 2p seviyelerinden olan V 3d seviyelerinin oldukça altında bulunur ve şekle dahil edilmemiştir[36].



Şekil 2.3: Yalıtkan ve metalik fazlar için VO_2 'nin bant yapısı.

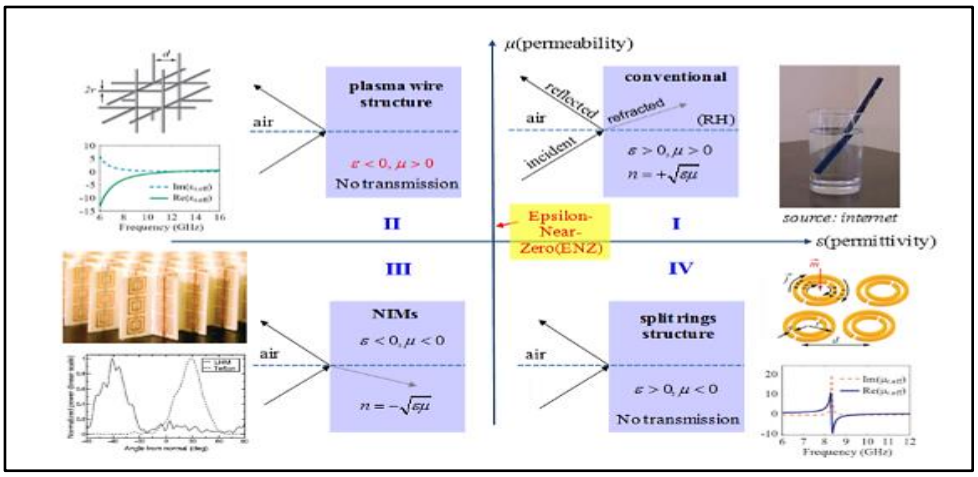
2.2. Metamalzeme

Tüm elektromanyetik olaylar, elektromanyetik dalgalar ile maddenin etkileşimi sonucu ortaya çıkmaktadır. Böylece malzemelerin geometri ve yapıları üzerinde çalışılarak elektromanyetik fonksiyonelliğe sahip cihaz veya malzemeler üretilebilir. Fakat tasarlanan elektromanyetik cihazların işlevsellikleri mevcut malzemeler ve bunların özellikleri ile sınırlanmaktadır. Yeni elektromanyetik özelliklerin gerçeklenmesi için diğer bir yaklaşımda dalga boyundan daha küçük ayrıtlara sahip, yapay fonksiyonel yapılar içeren malzemelerin üretilmesidir. Bu yapay fonksiyonel yapıların boyutları moleküler seviye ile karşılaştırıldığında çok daha büyüktür fakat boyutların çalışılan dalga boyundan küçük olması malzemenin etkin elektrik ve manyetik geçirgenlik katsayılarının tanımlanmasına imkân sağlamaktadır. Bu şekilde belirli bir elektromanyetik özelliğin gerçeklenmesi

amacıyla dalga boyundan daha küçük boyutlara sahip olan fonksiyonel yapılar ile oluşturulmuş malzemelere metamalzeme denilmektedir [38]. Şu anda, doğada bulunamayan ve geleneksel malzemelerden farklı olağanüstü elektromanyetik özellikler sergilemek için "Metamalzemeler" olarak bilinen doğal olmayan bir alt dalga boyu malzemeden elektromanyetik esaslı malzemeler üretmeye büyük ilgi duyulmaktadır. Temel olarak, metamalzeme kavramı, doğal malzemelerin verilen ışık dalga boyundan çok daha küçük boyutlu yapay malzemelerle değiştirilmesinden üretilir. Doğada bulunmayan ve yapay olarak elde edilebilen metamalzemeler 19. Yüzyıldan bu yana araştırmacıların ilgi odağı olmuş ve her geçen gün daha dikkat çekici hale gelmiştir. Elektromanyetiğin sol eli olarak da adlandıralan bu malzemeler temel olan dielektrik sabitinin ve mayetik geçirgenliklerinin negatif olması nedeniyle çok fazla ilgi görmektedir. Metamalzemelerin dielektrik sabiti (ε) ve manyetik geçirgenliği (μ) periyodik olarak düzenlenmiş elemanlarının şekli ve içeriği belirlenerek kontrol edilebilir [34]. Veselago yaptığı teorik araştırmalarda düzlem dalaganın bir ortamda yayıyılırken negatif dielektrik geçirgenliğe ve negatif manyetik geçirgenliğe sahip olabileceğini kanıtladı. Çalışmasında, verilen monokromatik düzlem dalgasının grup hızının, eşzamanlı olarak negatif ε ve μ ortamlarında (malzeme) seyahat ederken Poynting vektörüne (enerji vektörü) karşı yönde ilerlediğini, fakat geleneksel malzemelerde bu durumun tersi yaşandığında gurup hızı her zaman enerji vektörü ile aynı yönde hareket ettğini belirtti ayrıca bu durum Maxwell deklemleri ile çakışmamaktadır [34]. Bu çalışmanın ardında Pendry ve grubu dalganın yayılması boyunca metalik tellerin düzenlenmesinin negatif etkili dielektirk geçirgenlik sağlayabileceği kanıtlanmıştır [38]. Yine aynı grup kısa bir süre sonra da, dalganın yayılma yönüne göre iyi tasarlanmış yarık halkaların da negatif manyetik geçirgenliğe neden olduğunu açıklamışlardır. Elde edilen bütün bu bilgilerden sonra da Smith yaptığı çalışmada solak malzemelerin belirli spektrumlarda negatif elektriksel ve manyetik geçirgenşiğe sahip anten rezanatör ve sensorler geliştirebileciğinin çalışmasında açıklamıştır [25]. Metamalzemeler ile ilgili mikrodalga ve THz frekans bölgesinde oldukça fazla çalışma ve uygulama yapılmıştır. Optik frekans bölgesi ise halen birçok potansiyel çalışma ve uygulama alanı açısından araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

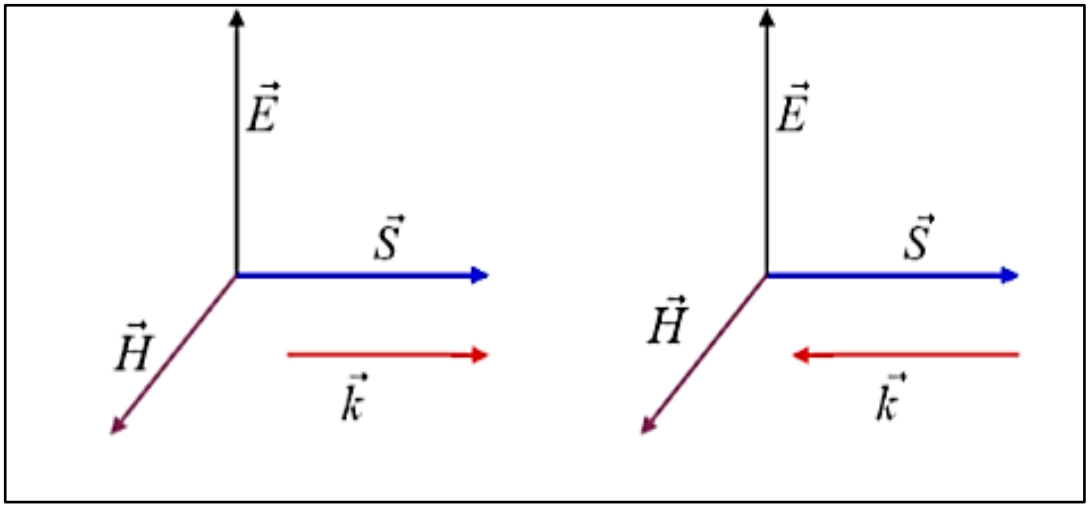
2.2.1. Metamalzemelerin Teorik Açıdan İncelenmesi

Malzeme seçimi optik ve fotonik gibi alanların geliştirilmesinde anahtar rol oynar, bu alanların amacı ise, ışık yayılımı ve ışık-madde etkileşimi üzerinde kontrol elde etmektir. Geleneksel bir malzemede, ışığın yayılması kırılma indisinden etkilenir $n = \sqrt{\mu\varepsilon}$. Bir metamalzemenin EM yanıtı, iki frekansa bağlı olarak tanımlanabilir makroskopik parametreler, elektriksel geçirgenlik ε (ω) ve manyetik ve geçirgenlikdir μ (ω). Şekil 2.4' de malzemelerin elektromanyatik dalgalara verdikleri tepkilere göre sınıflandırılmasını görebilirsiniz [39]. Bölge I, hem elektriksel geçirgenliği ε (ω) hem de manyetik ve geçirgenliği μ (ω) pozitif olan geleneksel dielektrik malzemelerdir. Bölge II, metallarin ve aşırı katkılanmış yarı iletkenlerin olduğu kısımdır. Mikrodalga spektrum aralığında, negatif geçirgenlik elde etmek için şeklin sol üst kısmında gösterildiği gibi yapay olarak tasarlanmış tel yapıların olması gerekir. IV. Bölgenin sağ üst kısmında gösterildiği gibi negatif manyetik geçirgenliği sağlanabilmesi için μ (ω) i ayrık halka rezonatörler (SRR'ler) yapıların kullanılması gerekmektedir.. Bölge III, en ilginç bölgedir nedeni ise ε (ω) ve μ (ω) aynı anda negatiftir ve bu doğal bir durum değildir.. Mikrodalga frekanslarında negatif kırınım indisi elde edelebilmesi için SSR yapılar ve metalik tellerin bir araya getirilmesi gerekir.



Şekil 2.4: Malzemelerin elektromanyatik dalgalara verdikleri tepkilere göre sınıflandırılması.

Elektromanyatik dalga madde içerisinden geçerken elektrik alan vektörü $\vec{E}$, elektromanyetik vektörü $\vec{H}$ ve dalga vektörü $\vec{k}$ sağ elli malzemlerde vektörel olarak aynı yöndedir fakat bu durum sol elli malzemelerde geçerli değildir. Sol elli malzemelerde dalga vektörü $\vec{k}$ ile enerjiyi taşıyan (Poynting) vektör $\vec{S}$ zıt yönlüdür. Fakat bu durum vektörün ilerlemesini engeleyemez çünkü manyetik geçirgenlik ile elektrik geçirgenlik çarpımları pozitiftir [39].



Şekil 2.5: Elektromanyetik dalganın sağ elli ve sol elli malzemelerindeki davranışını göstermektedir.

2.2.2. Elektromanyetik Dalganın Matemalzeme İçerisinde İlerliyişi

Maxwell denklemlerinin dalga denklemi şeklinde yazılacak olursa [26]

$$\left(\nabla^2 - \frac{n^2}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\psi = 0 \tag{2.1}$$

Burada "n" kırılma indisi, "c" ışık hızıdır. $\frac{\eta^2}{c^2} = \mu\varepsilon$ kırılma indisinin değeri ise aynı anda hem elektriksel geçirgenliğe hem de manyetik geçirgenliğe bağlıdır fakat η^2 değeri ne μ işaretinin ne de ε işaretinin değişimi etkiler. 2.1 denklemine işaretleri değiştirilmiş μ, ε uygulandığında herhangi bir değişiklik olmaz. Düzlem dalganın genel ifadesi aşağıdaki denklemde verilmiştir [40].

$$\vec{E} = \overrightarrow{E_0}\, e^{-j\vec{k}\vec{r}} \tag{2.2}$$

$$\vec{H} = \overrightarrow{H_0}\, e^{-j\vec{k}\vec{r}} \tag{2.3}$$

Burada $\overrightarrow{E_0}$ ve $\overrightarrow{H_0}$ rastgale yönlerde vektörlerdir, $\vec{k}$ sabit büyüklükte vektörün yününü belirler $\vec{r}$ ise hareket eden dalganın gözlenen pozisyon vektörüdür.

$$\vec{k} = k_x\widehat{x} + k_y\widehat{y} + k_z\hat{z} \tag{2.4}$$

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_y^2} \tag{2.5}$$

$$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z} \tag{2.6}$$

Dalga çözümünü elde etmek için Maxwell denklemlerinin çözmek yerine, sistemi kısmı diferansiyel denklemlere dönüştürerek daha kolay bir bir çözüm elde edilebilir. Buna göre Maxwell denklerimin harmonic formu aşağıdaki denklemler gibidir.

$$\nabla \times \vec{E} = \text{-j}\varpi\vec{B} \tag{2.7}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \text{-j}\varpi\vec{D} + \vec{J} \tag{2.8}$$

Bilindiği üzere;

$$\nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot \mu\vec{H} = 0 \tag{2.9}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot \varepsilon\vec{E} = \rho_V \tag{2.10}$$

2.7 ve 2.8 denklemeleri şu şekilde yazılabilir;

$$\nabla \times \vec{E} = \text{-j}\omega\mu\vec{H} \tag{2.11}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \text{-j}\omega\varepsilon\vec{E} + \vec{J} \tag{2.12}$$

Kayıplı ortam hesaplamasından önce Amper yasası yeniden düzenlenmelidir. Serbest yüklerin olduğu bir ortam da akması gerken akım $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ şeklinde hesaplanır.

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} + \sigma\vec{E} = j\omega\left[\varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right]\vec{E} \tag{2.13}$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} + \sigma\vec{E} = j\omega\underbrace{\left[\varepsilon - \frac{\sigma}{j\omega}\right]}_{\varepsilon_{ef}}\vec{E} \tag{2.14}$$

Elde edilen ifadelerde yeni bir sanal elektriksel geçirgenlik elde edilir.

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon - \frac{\sigma}{j\omega} = \varepsilon_0\left[\varepsilon_r + j\frac{\sigma}{\epsilon_0\omega}\right]\varepsilon_0\varepsilon_{ref} \tag{2.15}$$

Farklı bir notasyonlada ifade edilebilir;

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - j\varepsilon' \tag{2.16}$$

Kayıplı ortamlar için Amper yasası aşağıdaki denklem gibi yazılabilir,

$$\nabla \times \vec{H} = j\varepsilon\omega\vec{E} \tag{2.17}$$

Burda ε kompleks değerdedir.

$$\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{k} \tag{2.18}$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\eta}\,\hat{k} \times \vec{E} \tag{2.19}$$

$$\vec{E} = \eta \vec{H} \times \hat{k} \tag{2.20}$$

Düzlem dalga için $\vec{E} = \overrightarrow{E_0}\exp(-j\vec{k}.\vec{r} + j\omega t)$ ve $\vec{H} = \overrightarrow{H_0}\exp(-j\vec{k}.\vec{r} + j\omega t)$ 2.11 ve 2.17 denklemlerine indirgenirse;

$$\hat{k} \times \hat{E} = \omega\varepsilon\vec{E} \tag{2.21}$$

$$\hat{k} \times \hat{H} = -\omega\varepsilon\vec{E} \tag{2.22}$$

Böylece sağ elli ortamlar için μ ve ε pozitiftir, $\vec{E}$, $\hat{H}$ ve $\vec{k}$ biribirlerine diktir. Fakat μ<0 ve ε<0 ortamlar için 2.3.22 denklemi şu şekilde yazılabilir,

$$\hat{k} \times \hat{E} = -\omega|\mu|\vec{H} \tag{2.23}$$

$$\hat{k} \times \hat{H} = \omega|\varepsilon|\vec{E} \tag{2.24}$$

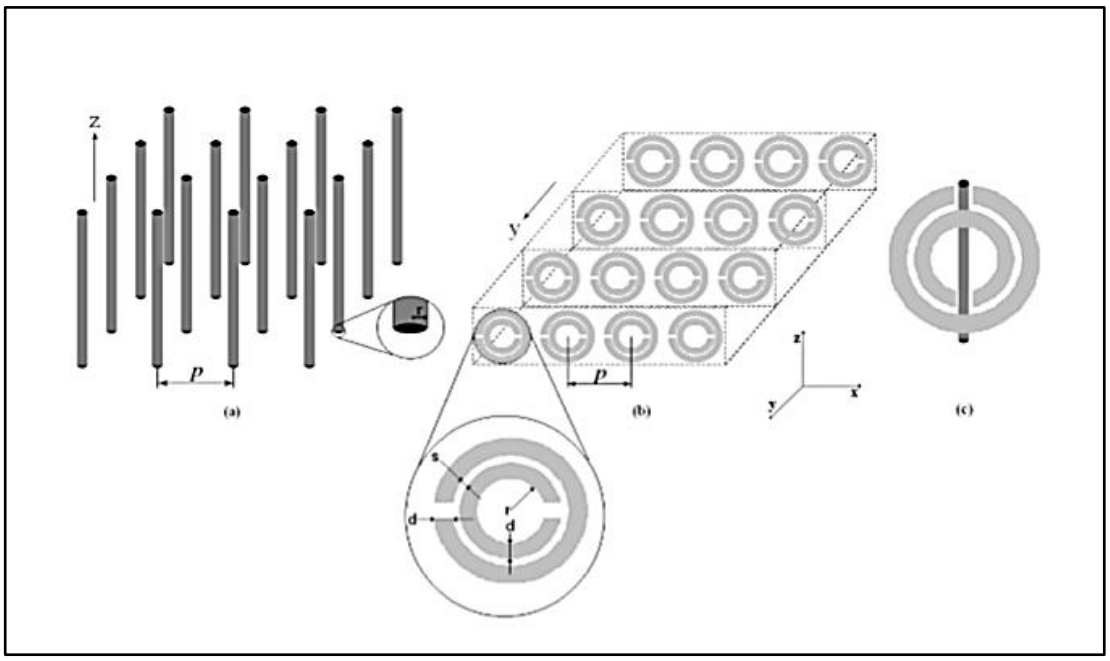
Eğer her iki parametresi (ε ,μ) negatif olan bir ortam farz edilip sanal kısımları çok küçük alınıp ihmal edilirse; ortam içerisinde $\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $\vec{k}$ dalga bileşenleri sol el kuralına uygun üçlü bileşen şeklinde hareket edeceklerdir. Dalga vektörü ile ortamın kırılma indisi arasındaki ilişki kullanılırsa; kırılma indisinin de negatif olduğu gözlenebilir. Burada w açısal frekansı temsil etmektedir. Bu tip bir ortamda dalganın zıt faz hızı ile ilerleyebileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca poynting vektör;

$$\vec{S} = \frac{1}{2}\,\vec{E} \times \overrightarrow{H^*} \tag{2.25}$$

ile faz vektörünün ($\vec{k}$) zıt yönde hareket ettiği görülmektedir. Şekil 2.5'de μ, ε parametreleri için dört farklı bölgenin elektromanyetik özellikleri belirtilmiştir.

2.2.3. Matemalzemelerin Elde Edilmesi

Metamalzemelerin elde edilmesi genellikle periyodik yapılarla sağlanır. Birim hücrenin yinelenen yapısı tarafından bu şekilde metamalzeme tasarlamak ve üretmek elverişli bir yöntemdir. Birim hücre bir yarık halka rezonatör ve metal kablonun bir araya gelmesiyle Şekil 2.6' da gösterildiği gibi oluşturulabilir [41]. Bir birim hücre serisinin oluşturulmasıyla ise metamalzeme elde edilmiş olur. Metamalzemelerin yapısı deneysel olarak Smith tarafından denendi bu çalışma Pendry'e ilham oldu negatif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip mikrodalga bandında çalışan bir yapay malzemeyi oluşturdu.



Şekil 2.6: Metamalzemeler genellikle metaller ve dielektrik malzemelerden oluşturulur.a) negatif elektriksel geçirgenlik ve pozitif mayetik geçirgenlik yapısını, b) pozitif elektriksel geçirgenlik ve negatif mayetik geçirgenlik yapısını, c) elektriksel geçirgenliğin ve manyetik geçirgenliğn negatif oldu yapının tamamı (DNG).

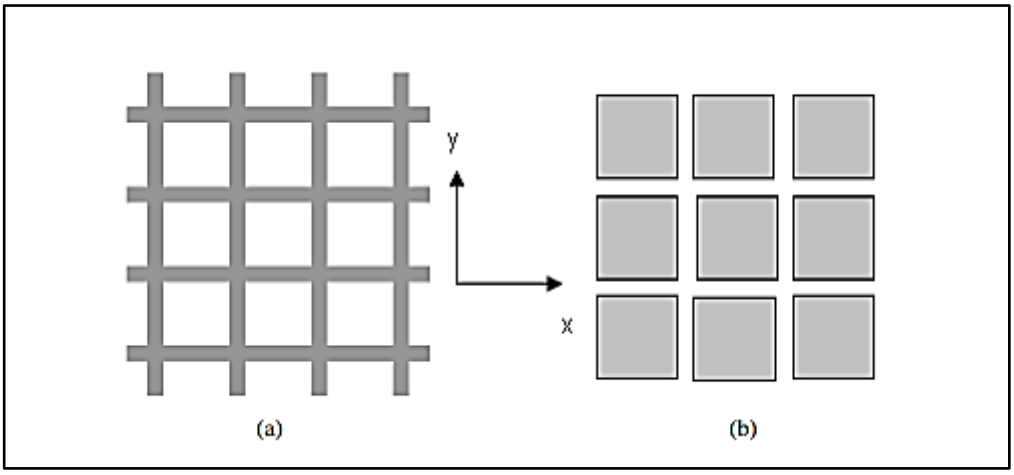
Elektriksel geçirgenlik sabitinin negatif elde edilmesi için ince tellerden metalik ağlar elde edilir. Havayla ayrılmış ince metalik katmanlar içeren periyodik ortamlar etkin olarak plazma frekansıyla sönümlenen ortamlar gibi hareket ederler. Manyetik tepkinin oluşturulması için kullanılabilecek en basit yapı metal bir halkadır. Negatif manyetik geçirgenlik sabitinin elde edilmesi için periyodik bir yarık halka rezonatör dizisi oluşturulur. Bir yarık halka rezonatör eş merkezli ve birbirlerine zıt yönlerde

yarığa sahip olan iki metalik halka kullanılarak elde edilir. Halkalar dairesel veya paralelkenar formunda olabilmektedir. Bu halkalar kendi başlarına birer indüktans gibi davranırken, İç ve dış halka arasındaki boşluğun bir kapasitör görevi üstlenmesi sonucunda LC rezonans devresi eşdeğeri ortaya çıkar. Oluşan bu devre sayesinde metamalzemenin oluşturacağı rezonans frekansı hesaplanabilir. Bu çalışma kapsamındaki metayüzeye ait LC devresi bölüm üçte detaylı olarak anlatılmıştır.

2.2.4. Frekans Seçici Yüzeyler

Frekans seçici yüzeyler veya FSS, bir boyutta veya iki boyutta tekrar eden düzlemsel periyodik yapılardır. Düzgün bir şekilde tekrar eden birim hücreler olarak adlandırılan öğelerden oluşur. Elemanlar arasındaki boyut, şekil ve boşluk FSS yapılarının rezonansını belirler. Üzerlerinde meydana gelen elektromanyetik radyasyonları yansıtabilir veya emebilir. Rezonans ayrıca kırılma açısına ve polarizasyona da bağlıdır. FSS yapılarını oluşturmada temel olan dielektrik malzeme de rezonansı etkiler [41]. Yuva (slot) tipi ve yama (patch) tipi olmak üzere iki tür FSS vardır. Doğal olarak görülmeyen özellikler metamalzemeler kullanılarak elde edilebilir. Fakat metamalzeme ve frekans seçici yüzeyler arasında temelde benzerlikler olsa da bazı farklılıklara da sahiptirler. Her ikisi de istenen frekans tepkilerini oluşturmak için kullanılırlar. FSS ve metamalzemeler dalga yönlerini değiştirmek için kullanılabilecek özellikler gösterir. Genellikle elektromanyetik spektrumda çalışmak için metamalzemeler ve FSS yapılar kullanılır. Elektromanyetik dalgaların genliği, frekansı ve fazı metamalzemeler tarafından yönlendirilebilir. Metamalzemeler genellikle doğada bulunmayan özellikleri gösterir [42-43-44]. FSS, EM filtre gibi davranan özdeş düzlemsel yapıların bir birleşimidir. FSS doğada frekans seçicidir. Hem FSS hem de metamalzemelerin farklı tasarımı ve yönlendirilmesi farklı özellikler ve olgular sağlar. FSS ve metamalzemeler arasındaki temel fark FSS'nin yapısından ve metamalzemelerin elemanlarından kaynaklanmaktadır. FSS ve metamalzemelerin seçimi, belirli bir frekans aralığında yansıma, iletim veya belirli bir frekans aralığında emilim gibi uygulamaların türüne bağlıdır. FSS'ler iki boyutlu yapılardır. Yuva tipi ve yama tipi FSS farklı rezonans özellikleri gösterir. Yuva (patch type) tipi FSS, yama (slot type) tipi FSS'nin tam tersi rezonansını gösterir. Yama tipi FSS alçak geçiren filtre görevi görürken, yuva

tipi yüksek geçiren filtre işlevi görür [45-46]. Her iki efekt birleştirildiğinde, düz bir tepki verir. FSS, öğelerin şekline bağlı olarak bir bant geçişi (band pass) veya bant durdurma (band stop) filtresi görevi görür [47]. FSS, Şekil 2.7'de gösterilen periyodik bir yuva veya yama elemanları dizisidir. Yuva açıklığı FSS düşük frekanslarda yansır ve yüksek frekanslarda (yüksek geçişe benzer) iletim yapar filtre, buna karşılık patch elemanı FSS düşük frekanslarda iletir ve yüksek frekanslarda yansıtır (düşük geçişli filtreye benzer) [48].



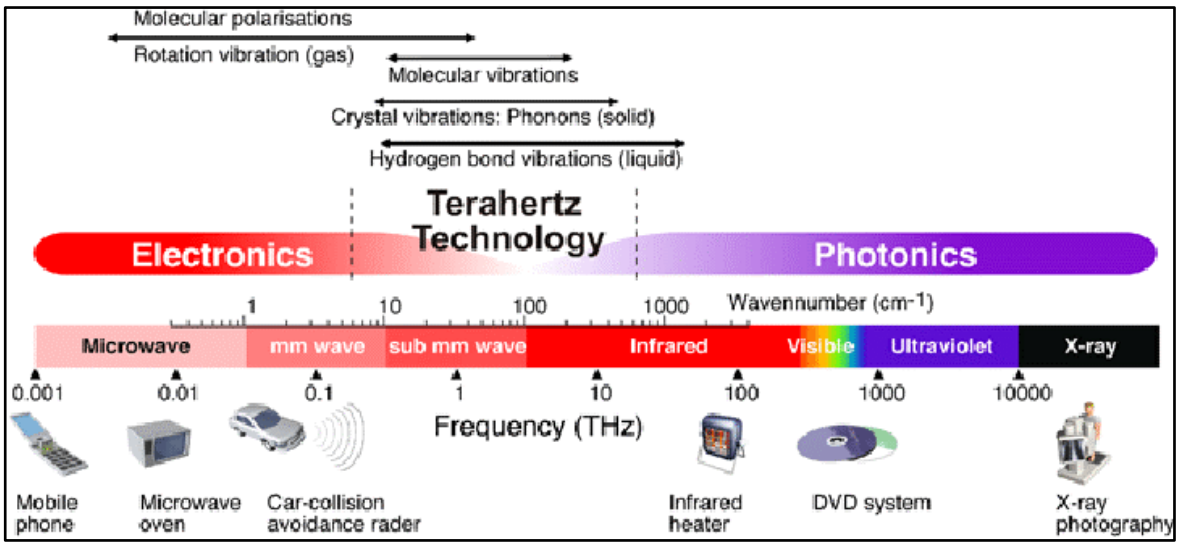
Şekil 2.7: (a) yuva (slot) tipi FSS'yi (b) yuma (patch) tipi FSS'yi ve göstermektedir.

Genellikle bir yama tipi FSS için elemanların bir dielektriğe kazınmasıyla üretilir. Bu elementler genellikle altın gibi yüksek iletkenliğe sahip bir metaldir. Yuva tipi FSS için, FSS'nin karşılık gelen şekli metalik bir tabakadan kesilir.

2.3. Terahertz Dalgaları

Elektromanyetik spektrum, elektromanyetik radyasyonun gözlemlenen tüm frekanslarının bölgesi olarak tanımlanır. Belirli bir nesne tarafından yayılan veya emilen elektromanyetik radyasyonun karakteristik dağılımı, o nesnenin "elektromanyetik spektrumu" olarak adlandırılır. Elektromanyetik spectrum, binlerce kilemetreden atom boyutunun belli bir kısmına kadar uzanabilir. Bu spektrumda, üst sınır evrenin büyüklüğüdür, burada kısa dalga boyu sınırı Planck uzunluğunun yakınında olduğu için spektrumun sonsuz ve sürekli olduğu kabul edilir. Elektromanyetik (EM) dalgalar üç farklı fiziksel özellik ile tanımlanır; frekans, dalga boyu ve enerji (foton enerjisi). Foton enerjisi ile dalga frekansı arasında doğrudan bir orantısallık vardır, bu da gama ışınlarının en yüksek enerjiye (yaklaşık bir milyar elektron volt) sahip olmasına, radyo dalgalarının çok düşük enerjiye (feta elektron volt civarında) sahip olmasına yol açar [49]. EM radyasyonunun sınıflandırılması genellikle dalga boyu kullanılarak yapılır; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi bölge, görünür bölge (ışık), ultraviyole bölge, X-ışınları ve gama ışınlarıdır. Terahertz radyasyonunun spektrumda yer aldığı alan uzak kızılötesi ve mikrodalga arasında bir bölgededir. 300 gigahertz= 3×10^{11} Hz ile 3 terahertz = 3×10^{12} Hz frekans aralığındaki elektromanyetik radyasyon terahertz radyasyonu olarak adlandırılır. 1 THz = 1012 Hz = 1 ps, λ=300m = 0.3 mm, bu radyasyonun mikrodalga bölgesi ile kızılötesi bölge arasında olduğunu gösterir. Sonuç olarak, bu bölge 1 THz (10^{12} Hz) değerine karşılık gelen foton enerjisinin 4.1 meV (33.33 cm^{1}) olduğu elektronikten optiğe geçiş bölgesidir [50]. Literatürde terahertz radyasyonunun meydana geldiği bu bölge elektromanyetik spektrumda kalan son bölge olarak kabul edilmiştir. Terahertz dalgalarının gelişmesi için uygun ve ucuz kaynaklar, dedektörler, diğer bileşenler geliştirmek için yeni bilimsel çalışmalar gerekmektedir [51]. Şekil 2.8' de gösterildiği gibi terahertz ışıması, elektromanyetik spekturumun diğer bölümlerinde bulunmayan benzersiz özelliklere sahiptir [52]. Terahertz ışıması su ve metal haricindeki hemen hemen her maddeye belirli bir derecede nüfus edebilir ve kimyasal, biyolojik moleküllerin büyük bir kısmının titreşim hareketine uyan frekans aralığındadır. T-ışınları plastik, karton, kumaş gibi çoğu malzemeden geçerek su ve su buharında soğrulup metallerden yansır. Bu sayede havaalanı güvenliğinde uygulama alanı bulabilmekle birlikte, THz dalgaboyları çoğu kimyasal ve biyolojik malzemeninde parmak izi spektrumunuda

oluşturduğundan, tehlikeli maddelerin tanımlanmasında kullanılabilir. THz dalgaları çok hızlı kablosuz iletişimde, tıbbi görüntülemede, kara mayınlarının uzaktan algılanmasında yeni avantajlar sağlayacaktır. Bütün bunların yanında T-ışınları biyolojik dokuları iyonize etmeme özelliğinden dolayı X-ışınlarına göre zararsızdır. Canlılar üzerinde dozaj sınırı olmadan tıbbi görüntüleme veya başka amaçlarla kullanılabilir.

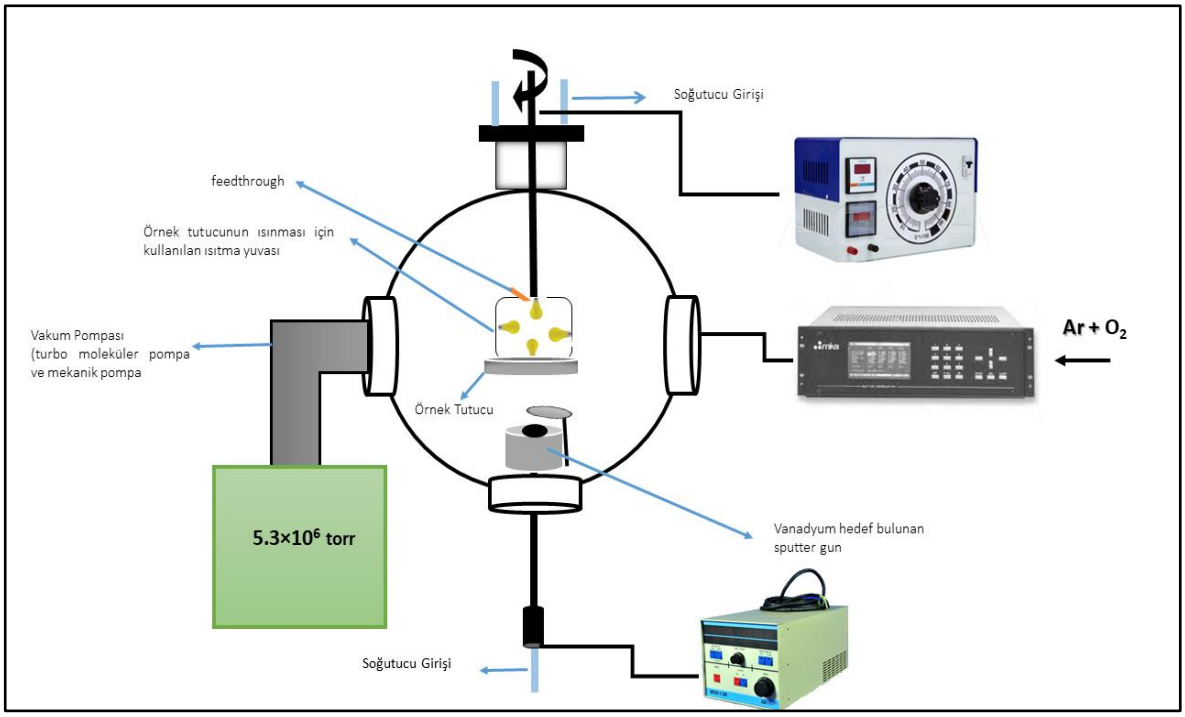


Şekil 2.8: THz boşluğuna sahip elektromanyetik spektrum gösterimi.

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1. Doğru Akım (DC) Mıknatıssal Saçtırma

Vanadyum oksit ince film kaplamak için uygulanabilecek pek çok yöntem mevcuttur. Bunlar genel olarak; kimyasal buhar biriktirme (CVD), püskürtme (sputtering), lazer biriktirme, fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve sol-jel yöntemleridir Bu çalışmanın temel amacı DC magnetron saçtırma tekniği ile c-kesim safir [Al_2O_3 (0001)] üzerinde VO_2 ince film üretmektir ve üretilen yüksek kalite filmlerin metamalzeme haline getirilip THz boşluğunda çalışabilen modulator haline getirmektir.VO_2 ince film büyütülmesi için farklı üretim teknikleri kullanabilir. Bu çalışma kapmasında DC mıknatıssal saçtırma tekniği kullanılmıştır. Bu teknik üretilen filmin yüzeye iyi tutunması, yüksek kalite film üretimi ve yüzeyde sağladığı homojenlik sayesinde tercihimiz olmuştur. Mıknatıssal saçtırma kaplama tekniği ile metalik veya metalik olmayan çeşitli formlarda, geniş alanlı yüzeyler üzerinde, çok ince (nanometre mertebesinde) kaplamalar yapılabilmektedir. Bu yöntem, ince filmlerin kolayca tekrarlanabilir olarak üretilebilmesi açısından diğer kaplama yöntemlerine (ısısal buharlaştırma, spray pyrolysisv.b.) göre en çok tercih edilen yöntemdir. Mıknatıssal saçtırma tekniğinde, hedef atomların plazma iyon bombardımanının yardımıyla koparılarak alttaş yüzeyinde biriktirilir. DC voltaj uygulanarak argon gazı iyonize edilir ve hedef malzemeye doğru hızlandırılır ve hedef atomlara çarparak enerji ve momentum transferi sonrasında hedef atomlar kopartılarak iyonizasyon gerçekleştirilir. Kopan hedef atomları, kaplanmak istenilen yüzeye tutunup biriktirilerek istenilen kalınlıkta ince film kaplaması tamamlanmış olacaktır. Burada kaplanan ince filmin kalınlığı birkaç parametre ile değiştirilebilir. Örneğin, hedefe uygulanan güç değiştikçe, film büyütme hızı değişecek ve böylelikle kalınlık da değişecektir. Bir diğer etken ise kaplanma süresidir [53-54]. Mıknatıssal saçtırma yöntemi yüksek oranlı kaplama metodudur ve geniş alanlara metalik filmler kaplama imkânı sunar.

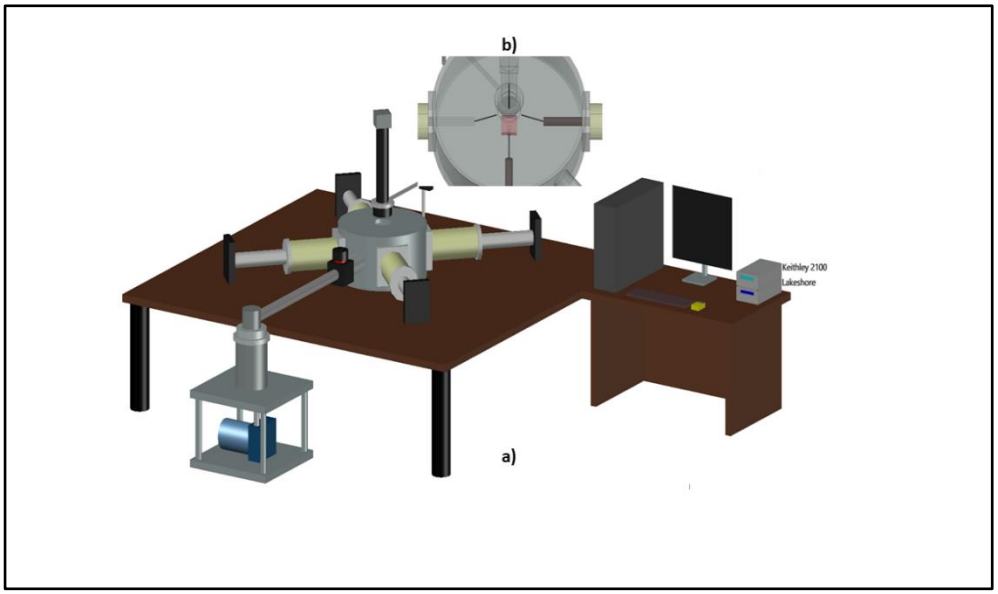


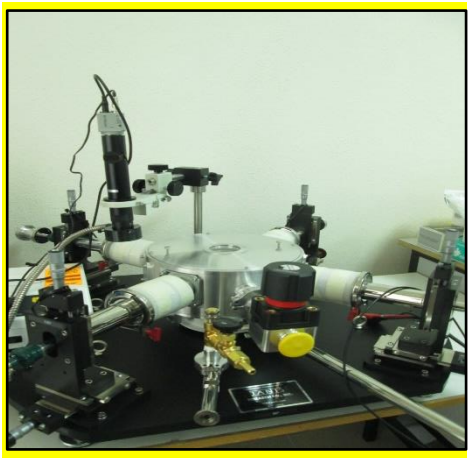
Şekil 3.1: VO_2 Mıknatıssal saçtırma sistemi gösterimi.

3.2 Ölçüm Teknikleri

3.2.1. Elektriksel Karakterizasyon

Elektrisel karakterizasyon için İYTE Fizik Bölümü Dielektrik Lab. Bulunan Şekil 3.2' de şematik olarak gösterilen mikroprobe station cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz sıcaklığa bağlı direnç değişimini ölçekmektedir. Bu ölçümler herhangi bir ısı kaybının olmaması için vakum ortamında gerçeleştirilmektedir. Bu karakterizasyon tekniğinde lakeshore, Keithly 2100 cihazı ve labwiew yazılım programları ile sıcaklığa bağlı direnç ölçümü alınmıştır. Sıcaklık değeri oda sıcaklığından 100 ˚C kadar geniş bir alanda alınarak metal-yalıtkan geçişi gözlenmiştir.





Şekil 3.2: a) Mikroprobe station sistemin şematik olarak gösterilmi b) cihazın iç kısmının üstten görünümü.

3.2.2. Fourcross Metamalzeme VO_2 Filtrelerin Tasarımı ve Üretimi

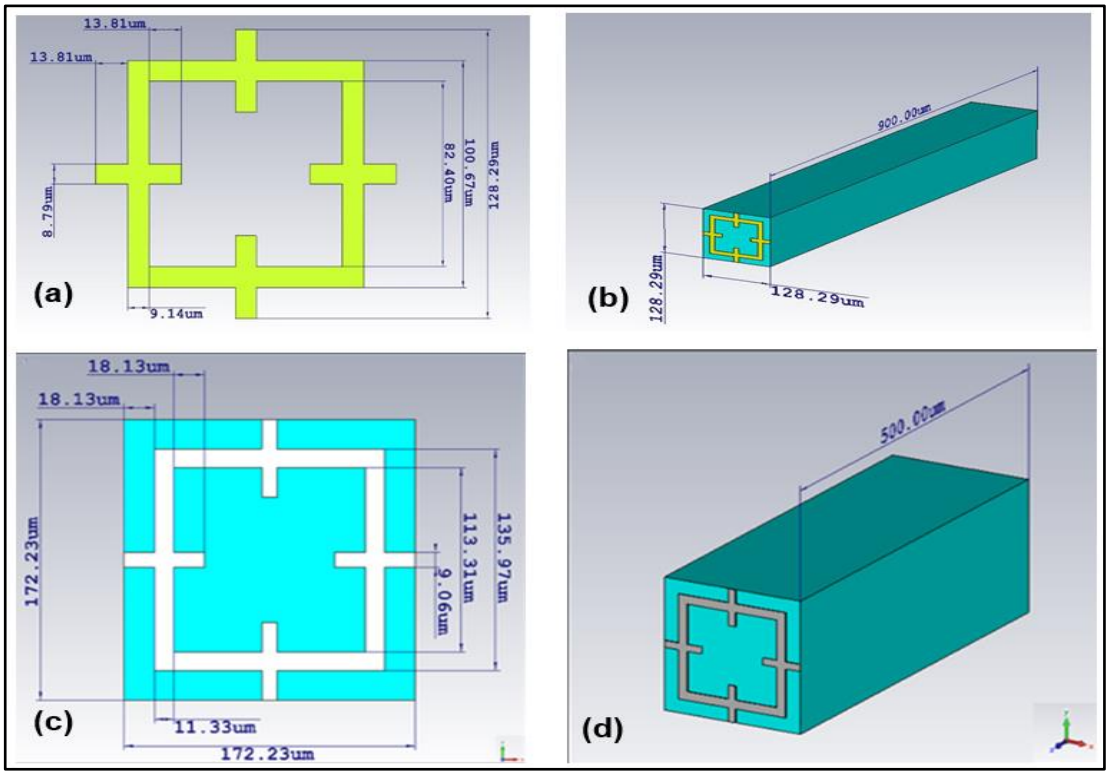
Frekans seçici yüzeyler-filtre, dielektrik bir alttaş üzerinde iletken olan çeşitli şekillerin birbirini bir veya iki boyutta periyodik olarak tekrarlamasıyla oluşan yapılardır. metamalzemelerin davranışı, alttaş üstündeki iletkenin büyüklüğüne, şekline ve metal ekranın kalınlığına bağlıdır. Frekans seçici yüzeylerin, üzerine gelen bir elektromanyetik dalga ile etkileşiminin özelliklerini şeklin tipi, numune ölçüleri, periyodiklik, kullanılan dielektrik materyalin elektromanyetik parametreleri ve kalınlık gibi birçok parametre tarafından kontrol edilmektedir. Bundan dolayı kullanılan farklı frekans seçici yüzeyler uygulanan elektrik ve manyetik alanlara farklı tepkiler verebilirler. Frekans seçici yüzeyler (FSS) belirli bir frekans bandını

soğuran veya yansıtan pasif dizilerdir. Günümüzde soğurucu özellikte malzemeler sentezlenmesi için frekans seçici yüzey uygulamaları oldukça artmasına rağmen optimize bir soğurma için frekans seçici yüzeyin ölçülerinin uygun şekilde belirlenmesi ve istenen tüm koşullar altında belli bir materyal için elverişli olacak uygun FSS'in seçilmesi çok kolay değildir. Bu çalışmada terahertz modulatör uygulamaları için farklı frekans seçici yüzeyler geliştirilmiştir. Bu yapılar dielektrik (VO_2) malzeme üzerine altın ince film kaplanmasıyla FSS deseninin de bu yüzeye aktarılması ile elde edilmiştir. Tasarlanan frekans seçici yüzeyin materyal seçimi ve ölçülerinin optimizasyonu, maksimum modulasyonun elde edilmek istenen 0.500-0.750 THz frekans aralığına uygun olacak şekilde yapılmıştır. Frekans seçici yüzeylerin ölçülerinin optimize edilmesi için eşdeğer devre metodundan faydalanılmıştır. Eşdeğer devre analizi sayesinde tasarlanan desenin oluşturması beklenen kapasitans ve indüktans etkilerinin rezonans frekansı üzerinde sebep oldukları değişiklikler hesaba katılmıştır. Bu şekilde desen üzerinde yapılan uygun ayarlamalar ile optimum ölçülere sahip metamalzeme FSS tasarımı tamamlanmıştır. Ayrıca bu yapıların sentezinde kullanılacak malzemenin sahip olması istenen elektromanyetik özelliklerin belirlenmesi ve böylelikle doğru malzeme seçimi CST Microwave Studio simülasyon programı yapılan hesaplamalar neticesinde sağlanmıştır.

3.3.3. Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) İle Metamalzeme Tasarımı ve Modellemesi

Solak malzeme elde etmenin en kolay yolu: negatif elektriksel geçirgenlik ve negatif manyetik geçirgenlik elde etmek gerekir; bunun için ince metal çubukların ve ikinci bileşen olarak periyodik olarak düzenlenmiş yarık halka rezanatörü kullanılmasıdır. Bu yapının elektromanyatik özelliklerini anlayabilmenin yolu da maxwell denklerimin yardımı ile çözülmesidir fakat bu sonuçları analitik olarak elde etmek zordur. Metamalzeme yapılarında metal geometrik modellerin temel fiziksel davranışını anlayabilmek için bu denklemlerin çözümlenmesi gerekmektedir fakat bu çok kolay olmadığından, geometrik yapıların nümerik hesaplamaları için çeşitli ticari yazılımlar geliştirilmiştir. Metamalzeme tasarımlarında ticari yazılımlara örnek olarak Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) verilebilir,

bu program yapının anlaşılabilmesi için kullanılabilinirken bunun dışında eşdeğer devre teorisinden de yararlanılabilir. Bu çalışma kapsamında; Terahertz filtre olarak çalışabilen modellemesi özgün olan metamalzeme yüzey yapısı tasarlanmıştır[55]. Şekil 3.3' de yapının nasıl tasarlandığı detaylı olarak gösterilmiştir [56].



Şekil 3.3: (a-b) Fourcross filtre tasarımının birim hücre boyutlarıyla önden ve perspektif görünüşü; birim hücrenin genişliği (W)128,29µm, kare döngü (L) uzunluğu 100,67 µm ve şerit çizgisinin (M) genişliği 8,79 µm dir.
(c-d) Ön ve perspektif birim hücre boyutları ile VO_2 fourcross filtre tasarımının görünümü; birim hücrenin (W) genişliği 172.23 um, kare döngüsünün (L) uzunluğu 135.97 ve şerit çizgisinin (M) genişliği 9.06 um dir.

Metamalzemenin yapısı, yani dört çapraz dikdörtgen rezonatör, şerit çizgilerinin bulunduğu dikdörtgen bir şekle sahiptir. halkanın bir dielektrik alttaş üzerindeki yanları Şekil 3.3 (a), (b) gibidir. Geleneksel yapılarana nazaran fourcross tasarımnda yarık yoktur bunun yerine dört şeritin birleştirilmesiyle oluşan yapı vardır. Genel olarak, metamalzeme yapıları için, LC eşdeğer devre modeli, metamalzeme tasarımının rezonans davranışını tahmin etmek için kullanılabilir. Verilen tasarımda toplam kapasitan değerini hesaplamak için parallel plaka kapasitans formülü ile hesaplanır.

$$C_1 = KW\varepsilon_0 \frac{2}{\pi} ln \frac{H}{S} \tag{3.23}$$

$$C_2 = KW\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_0 - 1}{\frac{s}{ln_s}} \tag{3.24}$$

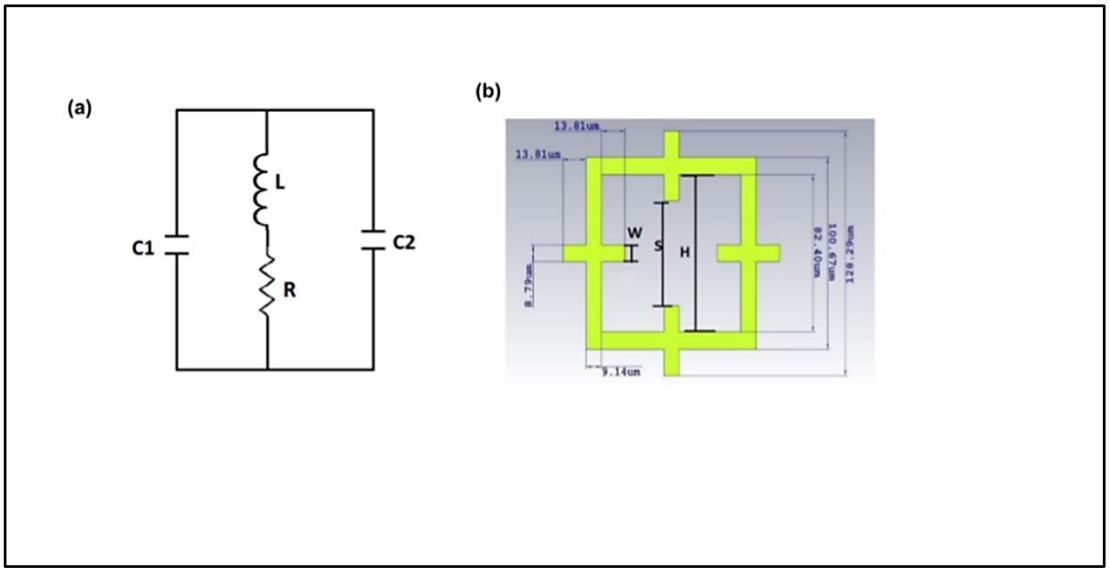
$$C = C_1 + C_2 \tag{3.25}$$

Burada K = n $\frac{\omega}{c}$, ε_0 boş uzayın geçirgeniliği (permittivity), ε_s dielektrik sabiti, h_s ise alttaşın kalınlığıdır. Şekil 3.3– b' de gösterildiği gibi (3.1) ve (3.3) denklemlerindeki değerler H,S ve W ile değiştirildiğinde toplam indüktans hesaplanabilir [56].

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\ln (\frac{2l}{b}) + \frac{l}{2} + \frac{b}{3l} - \frac{b^2}{24l^2}) \tag{3.26}$$

Bu denklemde l ve b metallic şeritkerin uzunluğu ve enliğidir 1. ve 4. deklemlerden elde edilen C_1, C_2 ve L değerleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

- $C_1 = 1.94 \times 10^{-15}$ F
- $C_2 = 1.59 \times 10^{-18}$ F
- $L = 1.6 \times 10^{-11}$ H



Şekil 3.4: (a) Elde edilen tasarıma ait eşdeğer devredir, (b) (3.1)-(3.3) denklemlerdeki kullanılan sembollerin yerine kullanılan değerleri göstermektedir.

Toplam kapasitans ve toplam endüktansa bağlı rezonans frekansı aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanmıştır [57].

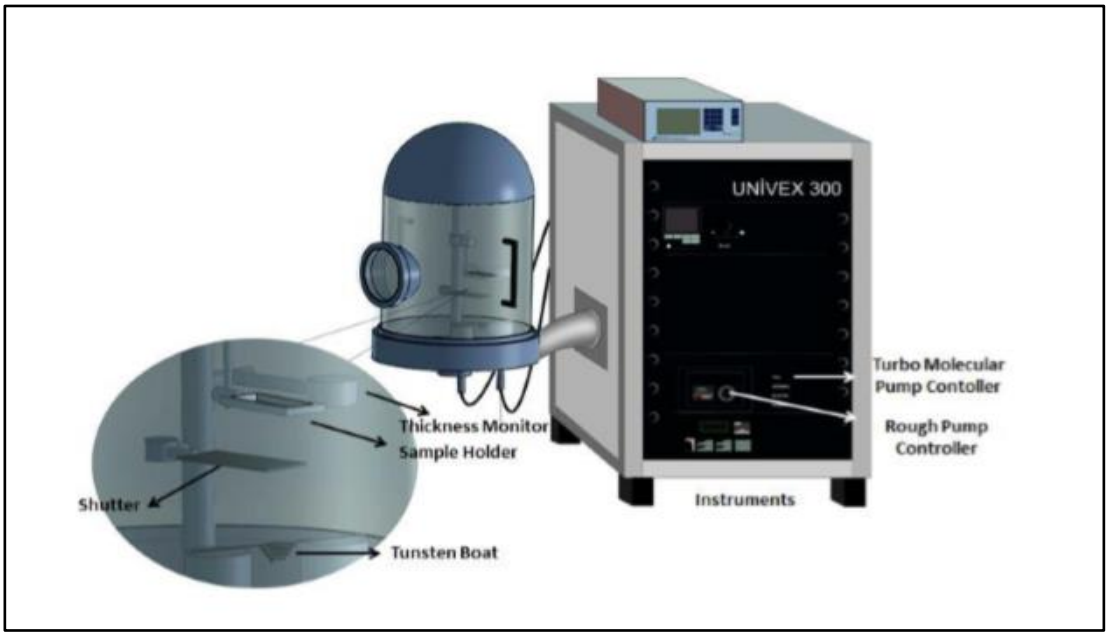
$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L\,(C_1+C_2\ )}} \tag{3.27}$$

Yapılan hesaplama sonucunda rezonans frekansı $f_0 = 0.67$ THz dir. Teorik olarak hesaplanan bu değer sonuç kısmında deneysel veriler ile yakın olup olmadığı tartışılacaktır.

3.3.4. Fourcross Metamalzeme Üretimi: Buharlaştırma Tekniği

İYTE Fizik Bölüm'ü İnce Film Lab. bulunan termal buharlaşma sistemimi Şekil 3.5' de görülebilir. Bu yöntem diğer ince film büyütme yöntemlerine nazaran hızlı, basit ve alttaşa zarar vermeyen bir tekniktir. Bu teknik, malzemenin yüksek akım kaynağı ile ısıtılan potanın (filament boat) içinde bulunan malzemenin örn;Ag,Cu.. buharlaşmasını ve ısıtılan malzemenin vakum ortamında kendinden daha soğuk olan alttaş üzerine ince film olarak büyütülmesidir. Genellikle malzemeyi buharlaştırmak için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır. Buharlaşma sıcaklığı için gerekli akımın değeri, potanın direncine (boyutları) göre değişir. Kaliteli ince

film üretimi için vakum değerinin 10^{-6} Torr civarında olması gerekir. Vakum ortamı değerinin 10^{-6} Torr civarında olması hem üretilcek olan film buharı ve atmosfer arasındaki reaksiyonları engeller hem de atomların ortalama serbest yolunu artırır. Alttaş üzerine filmin birikmesi ve kalınlığı shutter tarafından kontrol edilir. Ayrıca malzemenin eriteleceği pota yüksek sıcaklıklara dayanan elementlerden üretilirler ve üretilen ince filmin kalitesini bozmazlar. Biriktirmenin kalınlığı, kalınlık mönitörü ile ölçülür ve gerekli kalınlığa ulaşıldığında shutter kapatılır. Bu çalışma kapsamında da yaklaşık 300 nm olan VO_2 (safir üzerine büyütülmüş ince film) üzerine buharlaştırma tekniği kullanılarak 100 nm altın (Au) film büyütülmüştür.

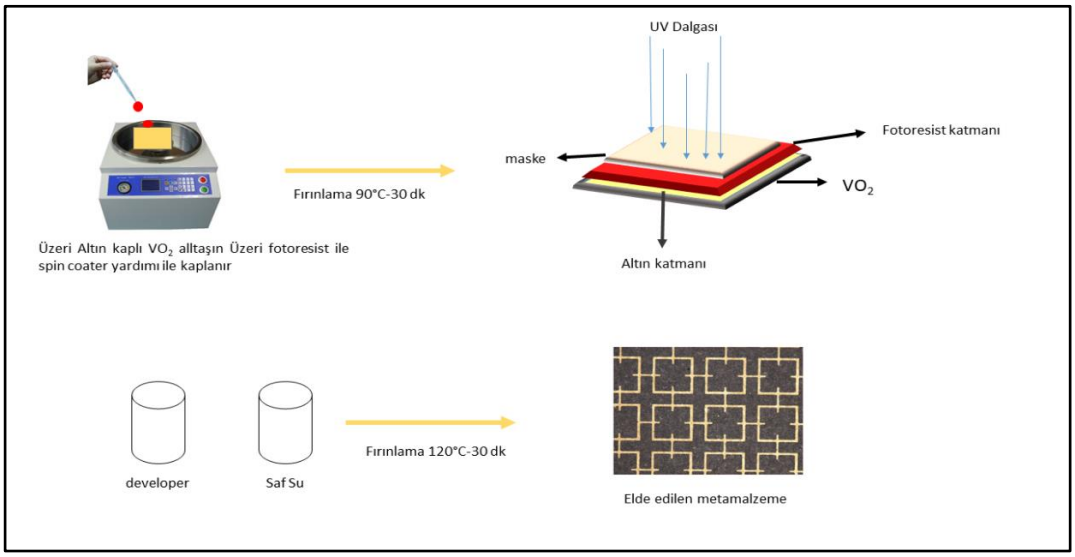


Şekil 3.5: Buharlaştırma sistemi gösterimi.

3.3.5. Fourcross Metamalzeme Şekillendirme Süreci: Fotolitografi

Litografi, kelime anlamı olarak ışıkla yazma olarak tanımlanabilir. Fotolitografi de en çok tercih edilen yöntem UV-litografidir. UV ışık bir maske üzerinden, bu dalga boyundaki ışığa duyarlı ve alltaş üzerine serilmiş olan fotoreziste iletilir. Maskenin şekli, rezistin özellikleri ve takip eden bir takım kimyasal süreçler sonunda arzu edilen mikro veya nano şekil alttaş üzerine transfer edilmiş olmaktadır. Fotorezist madde alttaşın üzerine spin coating; döndürülerek kaplama yöntemiyle kaplanır. Spin kaplama yönteminde üzerine fotorezist damlatılan alttaş dönen bir disk

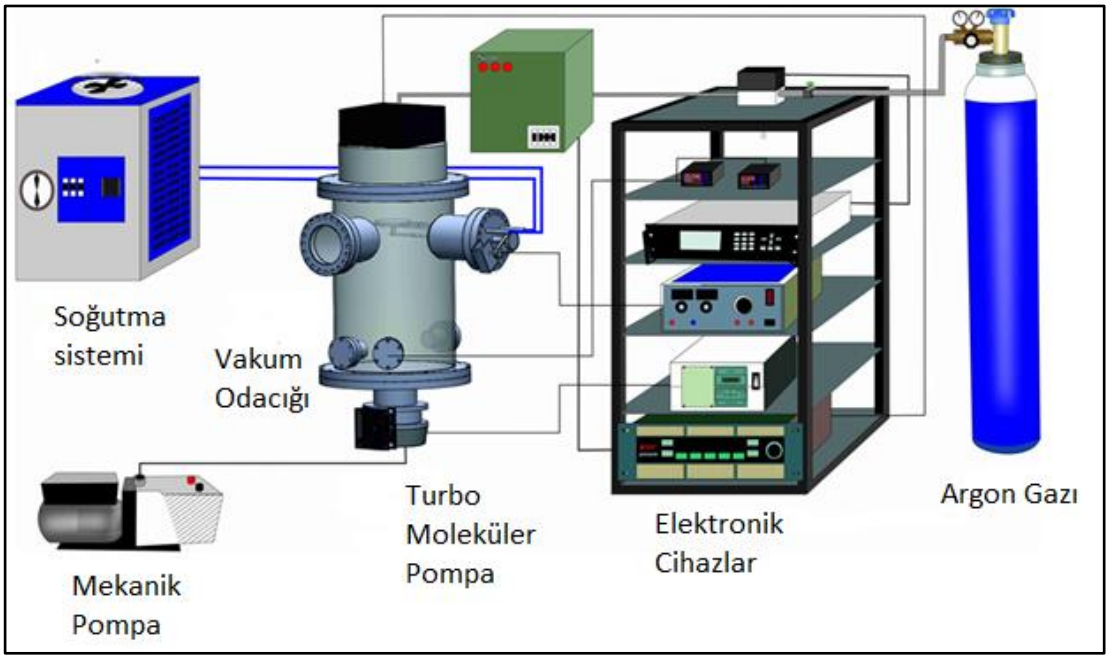
üzerine vakum ile tutturulur. Bu dönüş hareketiyle fotorezistin sonraki geliştirme işlemlerine dayanıklı olacak kalınlıkta ve aynı zamanda altaşşın her yerinde eşit kalınlıkta olacak şekilde kaplanması sağlanır. Iki çeşit fotoresist bulunmakatadır, negatif ve pozitif. Bu çalışma kapsamında üzeri buharlaştırma tekniği kullanılarak altın film kaplanan VO_2 ince filmim metamalzeme haline getirilebilmesi için ilk olarak spin coater tekniği ile altın kaplı yüzeyine negatif fotoresist (PR) AZ5214 ile yaklaşık 60 saniye boyunca 3000 rpm hızında kaplama yapılmıştır. PR kuruması için örnek 90°C olan fırında 30 dakika bekletilmiştir. Bir sonraki işlem; örneğin UV-Litografi sitemine konması ve üzerine maske yerleştirilmesidir. Numune maske ile birlikte 30saniye boyunca UV ışığına maruz bırakılmıştır. Şekillendirelen örnek developer da 10 saniye tutulduktan sonra saf su ile temizlenip bir kez daha fırınlama işlemine tabi tutulmuştur bu ise 120°C 30 dakika sürmüştür. Bütün bu işlemler 1000 sınıfı temiz odalarında gerçekleştrilmiştir. Bu aşamalar şematik olarak Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: UV- Fotolitografi tekniği aşamaları.

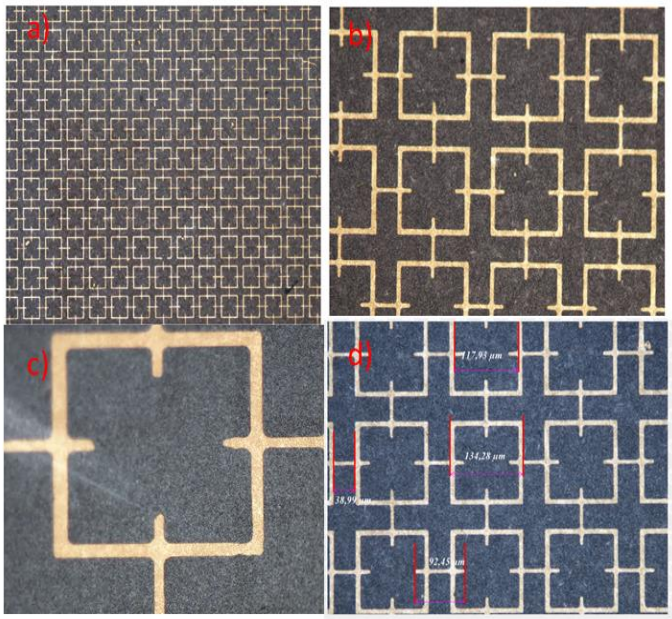
Büyütülen vanadyum ince filmlerin üzerine simulasyon programı ile tasarlanan metamalzeme yapısı, elektron demeti litografisi ile fotorezist (PR) yüzeyine transfer edildikten sonra iyon demeti aşındırma sistemine konulmuştur. İyon demeti aşındırma sisteminde , aşındırma işlemi başlamadan önce ilk olarak aşındırma çemberine turbo moleküler pompa ve geri pompa ile 10^{-6} Torr basınç değerine kadar

pompalanır. Çünkü serbest iyon demetinin hızlanmasını arttırmak için düşük basınç değerleri gereklidir. İstenilen basınç değerine ulaşıldığında ilk olarak MKS (kütle akış kontrolcüsü) tarafından gönderilen argon gazı sisteme sürülür. Argon gazı gönderilerek örneklerimiz 67.5^{o}'lik açıyla yerleştirilerek fotoresist tabakası tarafından korunmayan alanlar aşındırılır. Yazdırılmış olan metamalzeme üzerinde fotoresist tabakası olduğundan iyon demeti ile aşındırılamaz ve böylece tasarlanmış olan metamalzeme yapısı ince film üzerine transfer edilmiş olur. Şekil 3.7' de İYTE Fizik Bölümü İnce Film Lab. bulunan iyon demeti aşındırma sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.7: İYTE Fizik Bölümü İnce Film Lab. bulunan iyon demeti aşındırma sistemi.

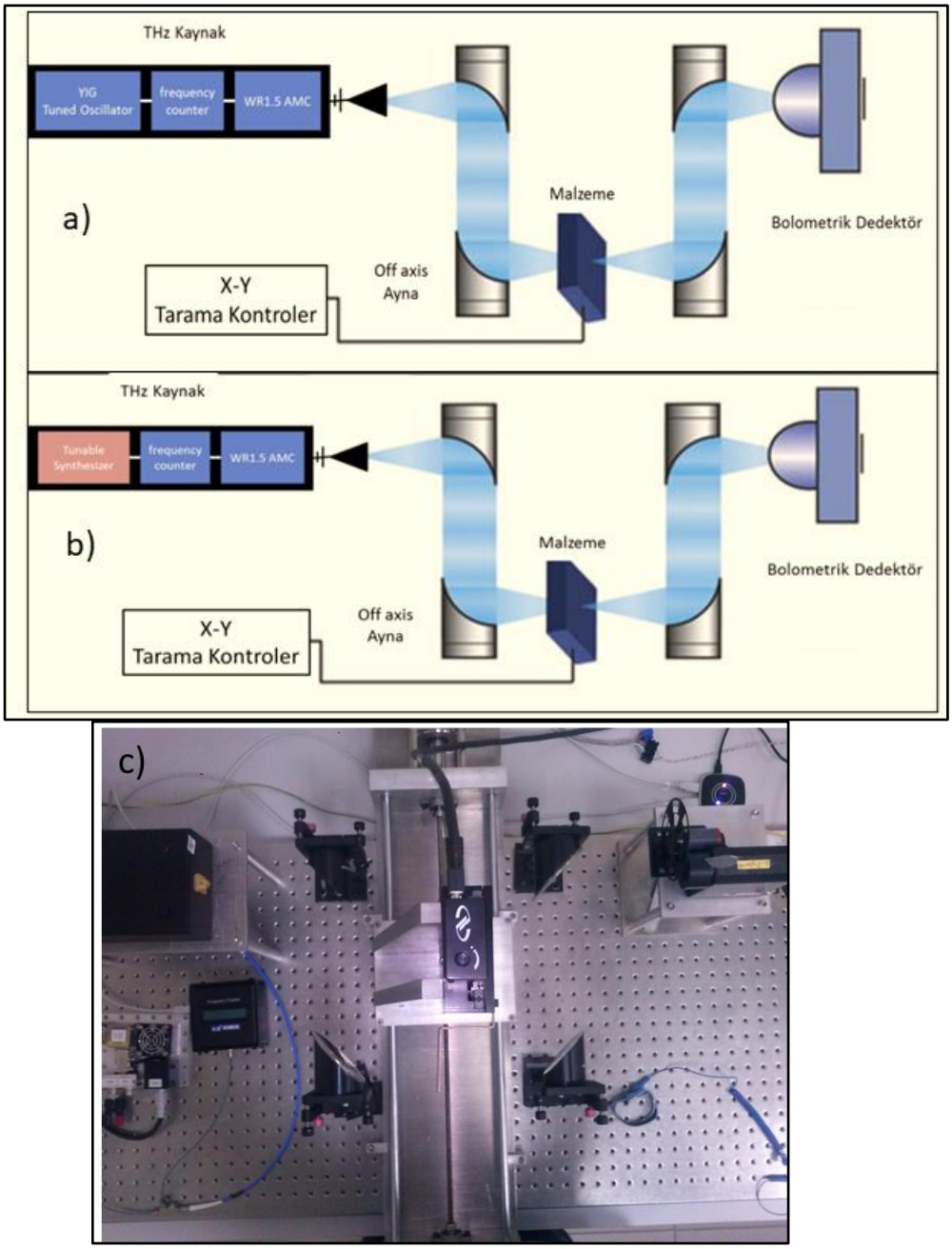
Vanadyum oksit ince filmin ile şekilledirme işlemi tamamlandıktan sonra desende herhangi bir defermasyon olup olmadığını anlamak için Nikon ECLİPSE LV150 optik mikroskobu kullanılarak Şekil 3.8'te görülebileceği gibi farklı büyüklükte görüntüler alınmıştır.



Şekil 3.8: (a-b-c) Fourcross VO_2 İnce film üzerine kaplanmış altın filtrelerin optik mikroskop görüntüleri. (d) Boyut ölçümleri görüntüsü.

3.3. THz Ölçüm Sistemi

Terahertz zamana dayalı spektroskopisinde, THz ışının genliği ve fazı zamanın fonksiyonu olarak ölçülebilir. Kısacası malzeme karakterizasyonu için pratik bir yöntemdir. Tasarlayacağımız vanadyum metamalzeme yapıların geçirgenlik ve modülasyon THz zamana dayalı spektroskopi ile detekte edilebilir. 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.



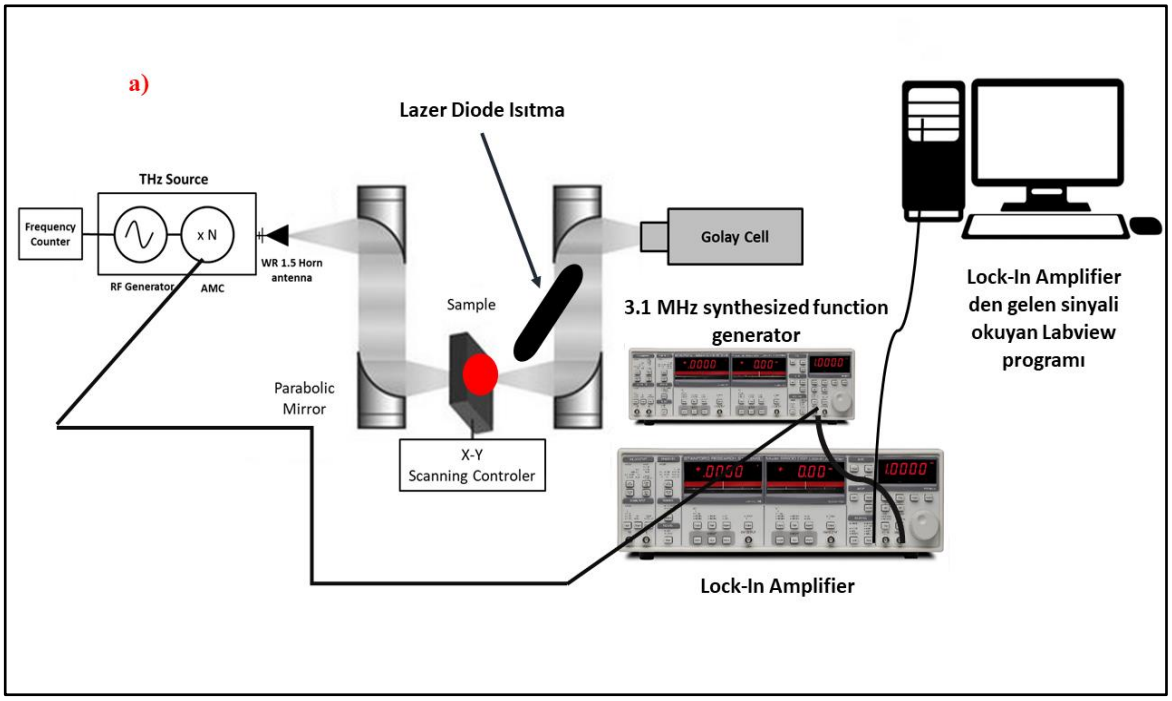
Şekil 3.9: a) YIG ayarlı Osilatör kullanılarak, b)Ayarlanabilir sentezleyici kullanılarak Terahertz görüntüleme sistemi şematik görünümü c) Terahertz görüntüleme istemi resmi.

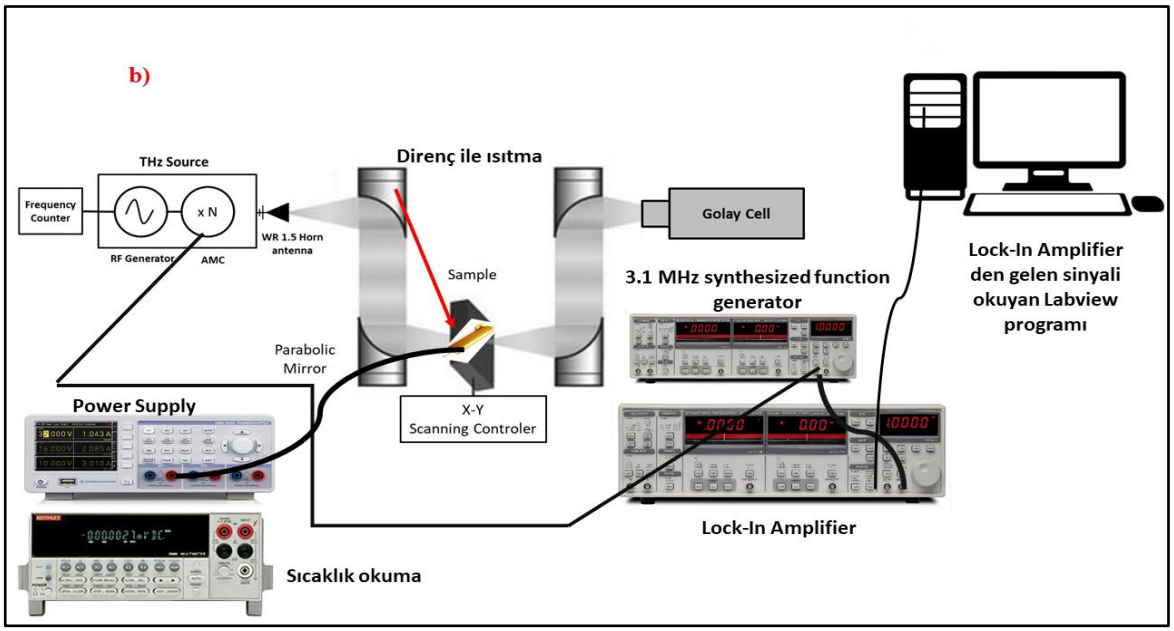
THz Kaynağı 3 kısımdan oluşmaktadır. 1) Referans RF sinyal üretici, 2) Frekans sayıcı ve 3) WR1.5 AMC. Referans RF sinyal üretici olarak YIG Osilatör ve VDI Sentezleyici ’ye sahibiz [58]. Bu sebepten dolayı 2 seçeneğimiz vardır. Bu iki üretici arasındaki fark şu şekildedir, Sentezleyici ms mertebesinde sweep edebileceğimiz frekansı oldukça stabil bir kaynak ancak YIG osilator ise mikrosaniye mertebesinde sweep edebileceğimiz frekansı iyi ama cok 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.

3.3.1. THz Ölçüm Sisteminin Çalıştırılması

Algılayıcı olarak ilk etapta oda sıcaklığı algılayıcısı olan Golay hücresini kullanarak THz spektrum sistemi faal hale getirilmiştir. 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 yapılmıştır. Bu yapılırken en çok titiz davranığılından olay aynaların mekanik eksenlerinin aynı hizada olması ve aynı zamanda aynaların odak noktalarıyla THz dalgasının çıktığı yer ve dedektörün algılayıcı kısmının aynı hizada olmasıdır. THz spectrum sisteminde ölçüm alınmadan önce ilk olark x-y taraması yapılmıştır. THz sinyalini frekans üretici ile 500 GHz'den 740 GHz'e kadar 1.0 GHz artırarak havanın THz spektrumu daha sonra sırasıyla, metal plakanın, boş safirin, sadece VO_2 ince filmin ve son olarak metamalzeme haline getirilmiş ince film VO_2' nin spectrum analizi yapılmıştır. Bu deneyler sıcaklığın kontrollu olarak arttırıldığı deneyler olmuştur. Bu analizler yapılırken sistemi kontrol eden çeşitli Labwiev programlarından yararlanılmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak alınan spectrum analizinde VO_2 ince film metamalzemenin sıcaklığa bağlı Lock-In değişimi (power transmission) gözlenilmiştir. Isıtma işlemi örneğin bağlı olduğu THz dalgasının odaklandırılığı metal plakanın örnek bulunmayan yüzeyine direnç bağlanarak ve bu dirençe güç uygulanarak plaka ısıtılmış böylece örnek de ısıtılmış olmuşdur. MIT geçişinin gözlenebilmesi için sıcaklık kontrollu olarak arttırılmıştır. İkinci teknik olarak da aynı yollar izlenip metamalzeme örnekleri Aerodiode CCM Multilaser diode driver kullanılarak direk olarak örneğin üzerine odaklandırılmıştır , böylece örnekler dolaylı olarak değil direk olarak optik güç uygulanmıştır. Bu güç değişim kademeli olarak arttırılımıştır. Şekil 3.10' da gösterildiği gibi THz ölçüm siteminde ölçümleri alınmıştır.





Şekil 3.10: a) Lazer diode ısıtma tekniği, b) holder (Joule Heating) ısıtma tekniği gösterilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. VO_2 Film Üretim Parametleri

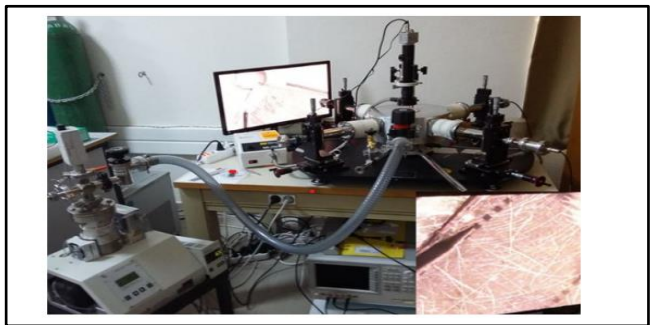
Tablo 4.1' de gösterildiği gibi farklı film parametlerine sahip 3 farklı frekans seçici yüzeye sahip VO_2 filmi üretilmiştir. $SZVO_2$-21 örneği ise metayüzey haline getirilmemiştir. THz spectrum sisteminde bu farklı dört örnek analiz edilmiştir.

Tablo 4.1 Magnetron şaçtırma tekniği ile üretilen VO_2 kaplama parametleri gösterilmiştir.

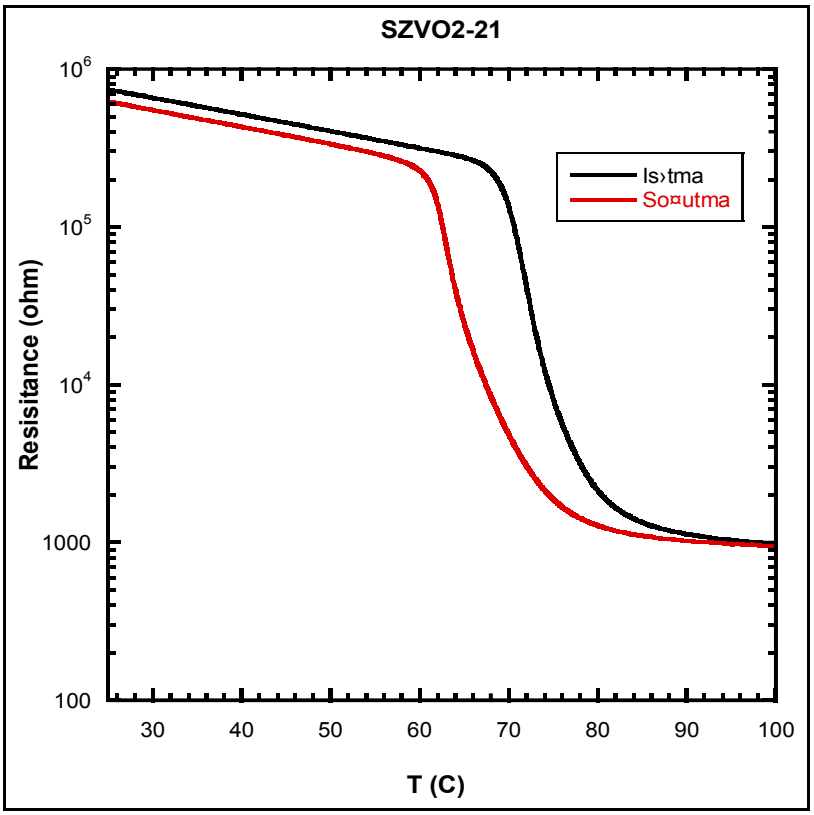
Örnek Adı	O_2 (sccm)	Ar (sccm)	Film Büyütme Süresi (dk)	MIT
Meta02	2.48	136	45	10^4
Meta03	2.60	136	45	$10^{3.5}$
Meta04	2.50	136	60	10^3
$SZVO_2$-21	2.65	136	75	10^3

4.2. Elektriksel Analiz

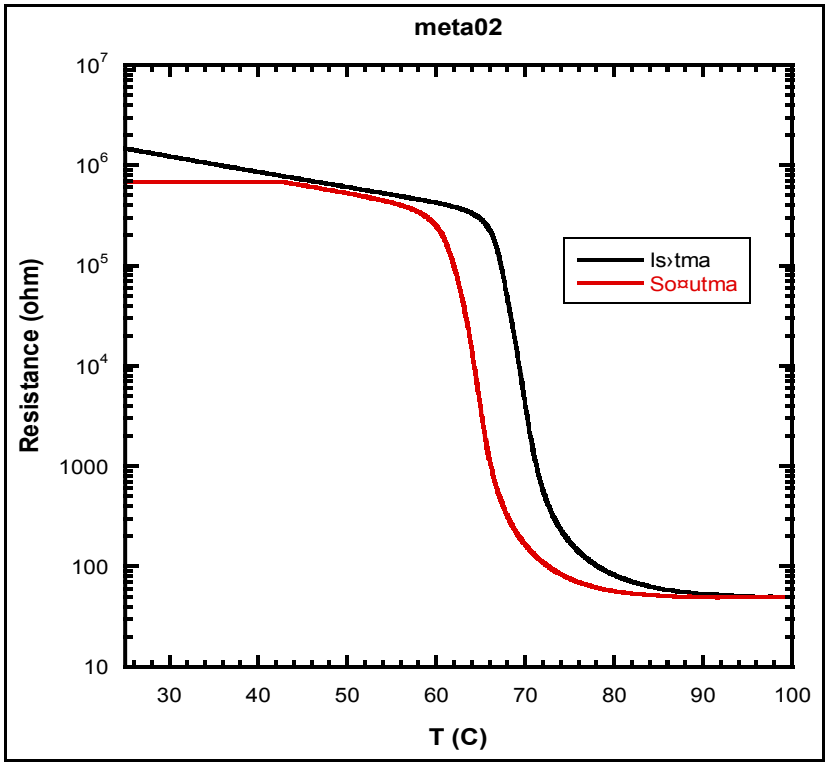
Metal oksitlerin analiz edilmesinde kullanılaan elektriksel analiz tekniği sayesinde VO_2 fazında film üretip üremetiğimizi anlamaktayız.oda sıcaklığından 100 C kadar vakum ortamında ısıtılan örnekler gösterdikleri histerisis eğrilerinin büyüklüklerine göre değerlendirilmiştir. VO_2 örnekler 10^4 ve 10^3 geçişler göstermektedirler.



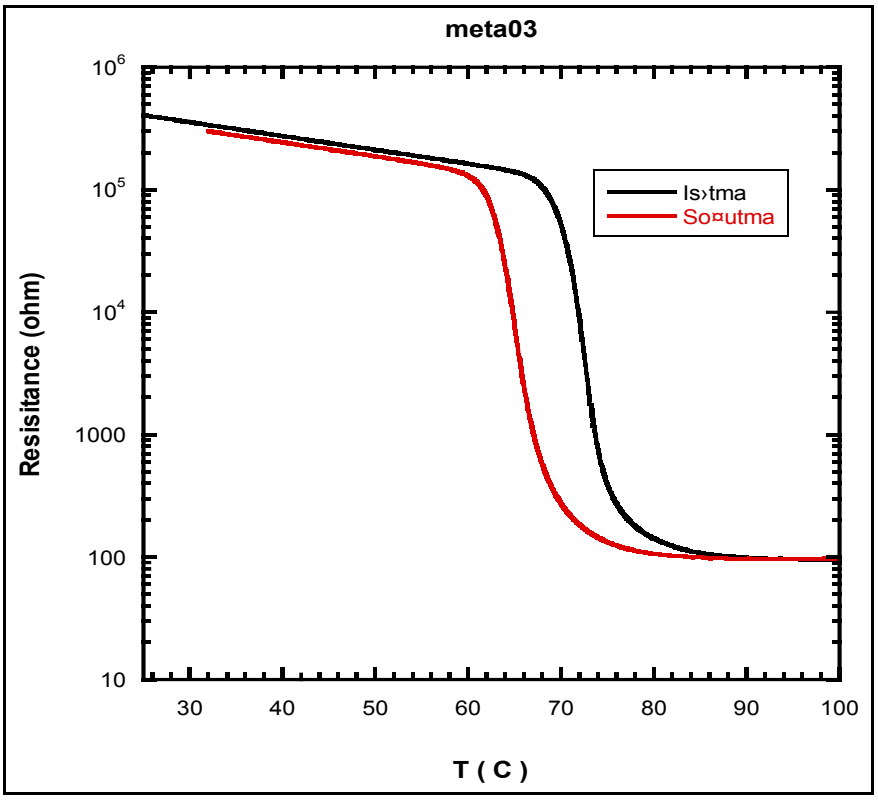
Şekil 4.1: Elektriksel analizin yapıldığı mikroprobe station sistemi gösterilmiştir.



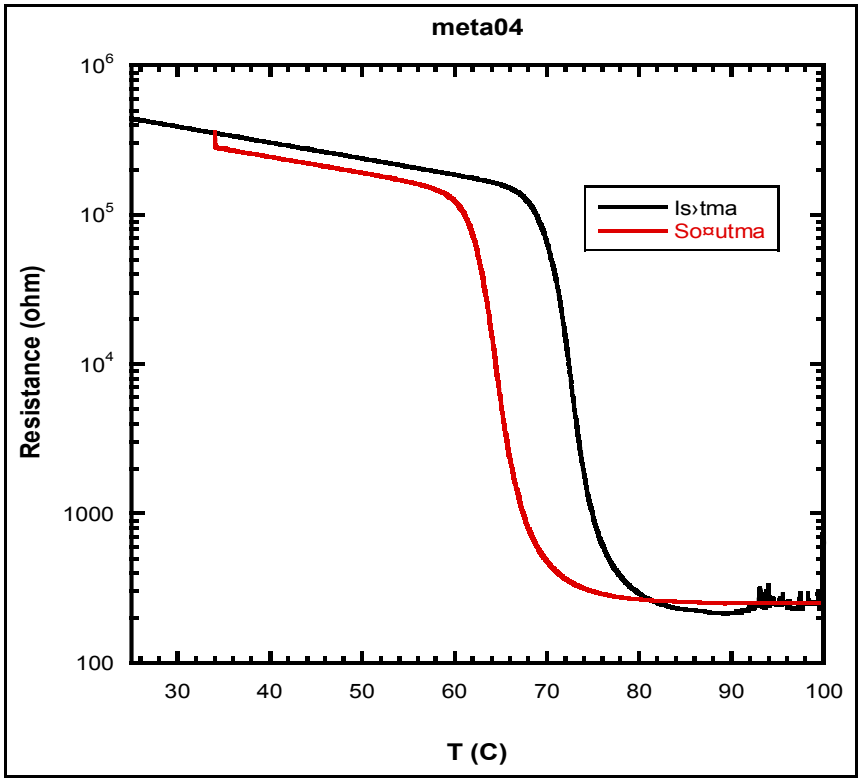
Şekil 4.2: $SZVO_2$-21 direnç sıcaklık grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Meta02 direnç sıcaklık grafiği gösterilmiştir.



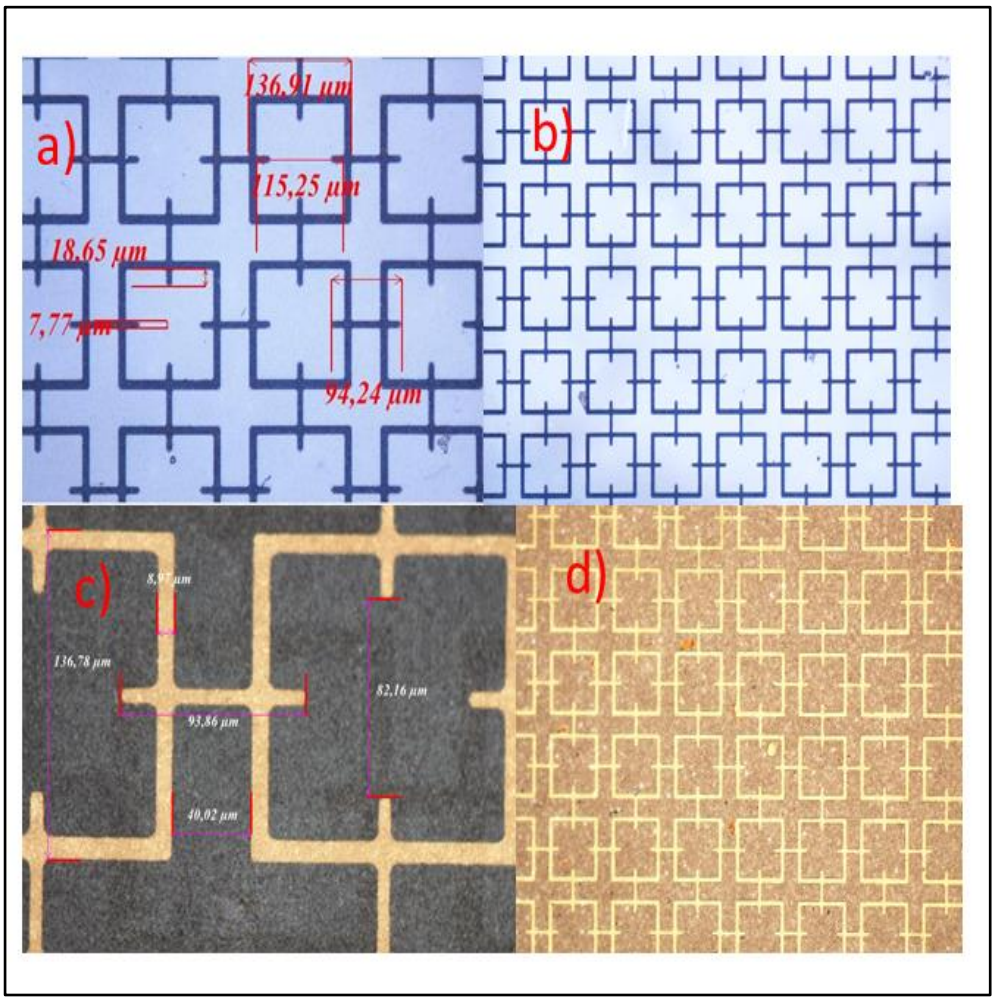
Şekil 4.4: Meta03 direnç sıcaklık grafiği gösterilmiştir



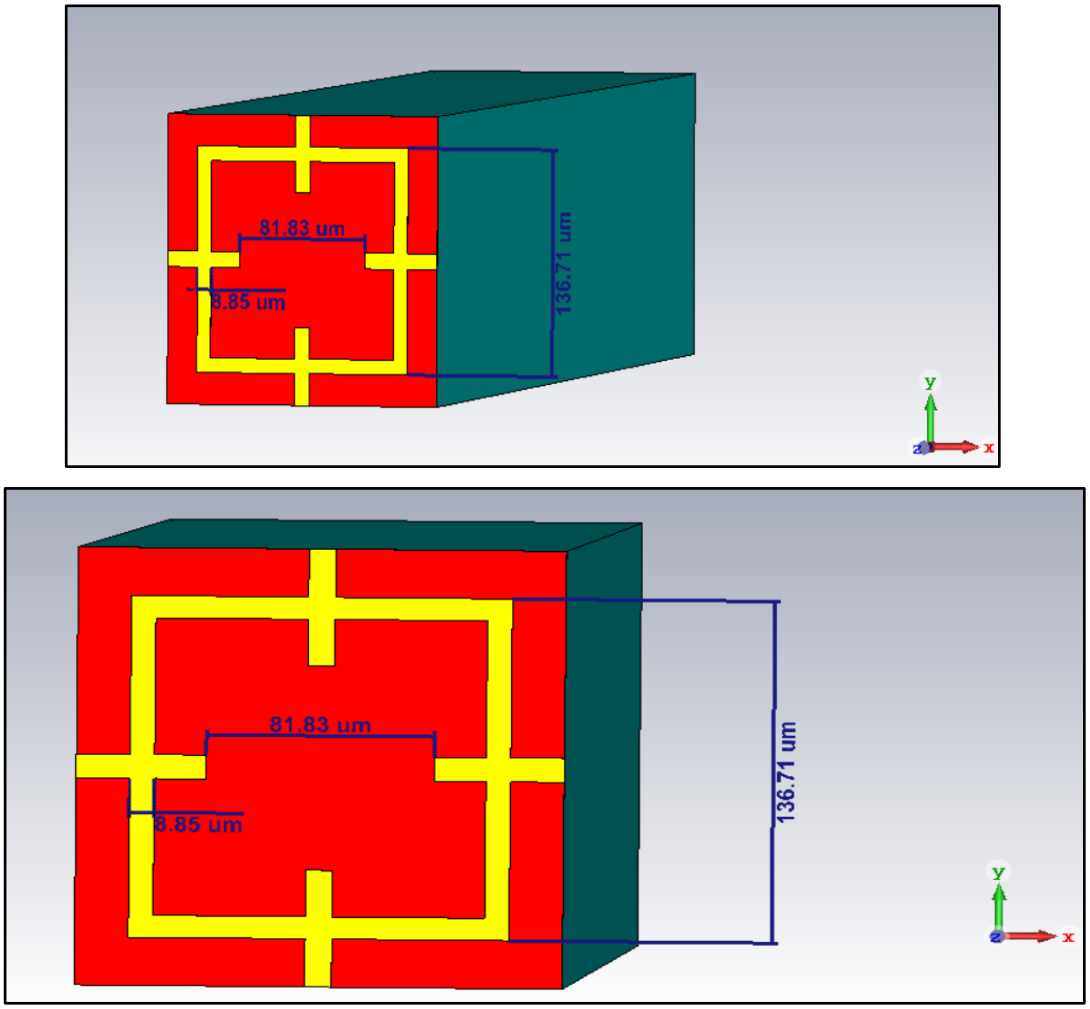
Şekil 4.5: Meta04 direnç sıcaklık grafiği gösterilmiştir.

4.3. Optik Mikroskop ve CST Similasyon Analizi

Şekil 4.6' da gösterildiği gibi a ve resimlerimde litrografi öncesi maskenin optic mikroskop görünteleri ve four-cross frekans seçici yüzeyin ölçüleri görünmektedir, c ve d resimlerinde ise VO_2 +Au filmin üzerine litrografi yapılan four-cross yapı gösterilmektedir. Maske ölçüleri ve gerçek yapının ölçümleri biribiri ile uyuşmakta ve herhengi bir litrografi hatası gözlenmemektedir.Four-cross yapı mükemmel bir şekilde baskınlanmıştır.

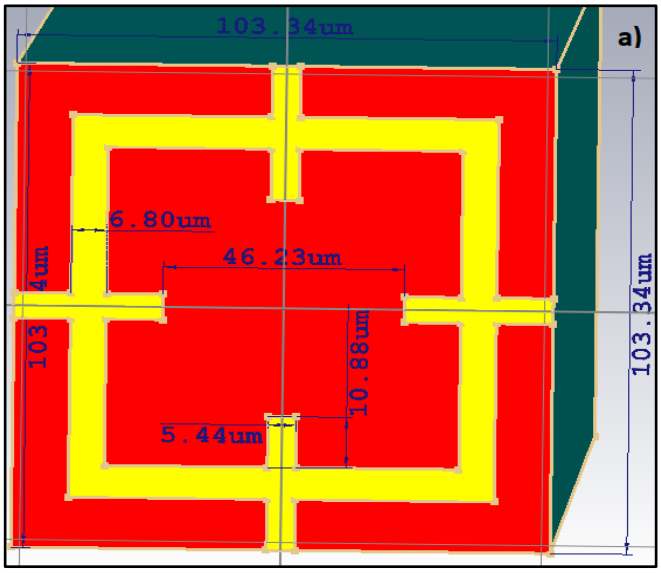


Şekil 4.6: a) ve b) maskeye ait optik mikroskop görüntüleri ve ölçüleri c) ve d) four- cross yapının optic mikroskop görünteleri ve ölçüleri gösterilmiştir

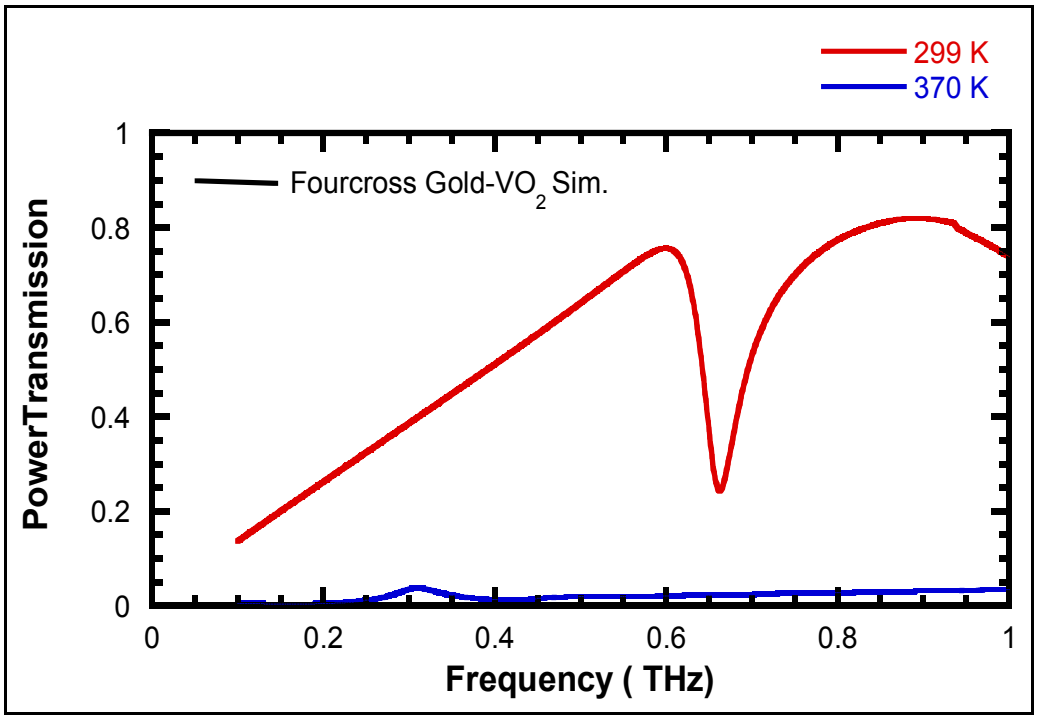


Şekil 4.7: Deneysel olarak ölçülen değerlere göre CST programi ile oluşturulan four-cross frekans seçici yüzey.

Şekil 4.6' da gösterildiği gibi deneysel olarak ölçülenen yapı CST programı yardımı ile çizilmiş ve oluşak band stop yapının sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.7' de elde edilen similasyon gösterilmiştir. Oda sıcaklığı ve geçiş sıcaklığının üzerinde olmak üzere similasyon grafiği gösterilmiştir. Band stop frakansı ise $f_0 = \frac{1}{2\pi}$ $\sqrt{\frac{1}{L\,(C_1+C_2\,)}}$ förmülü ile $f_0 = 0.67$ THz şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 4.8: Deneysel olarak ölçülen değerlere göre CST programi ile oluşturulan four-cross frekans seçici yüzey.



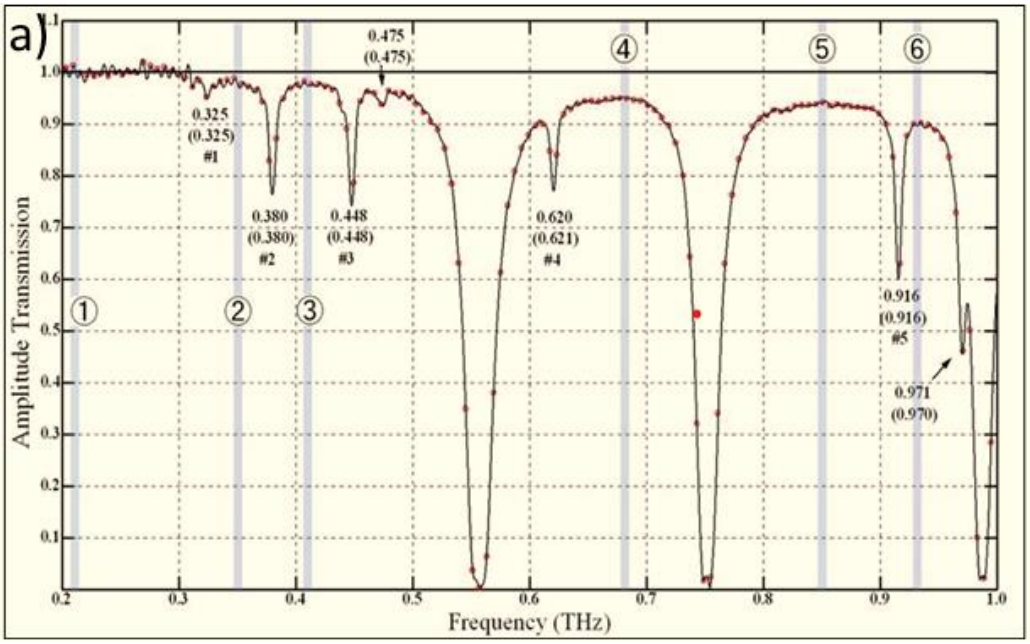
Şekil 4.9: Deneysel olarak ölçülen değerlere göre CST programi ile oluşturlan four-cross frekans seçici yüzey similasyon sonucu grafiği.

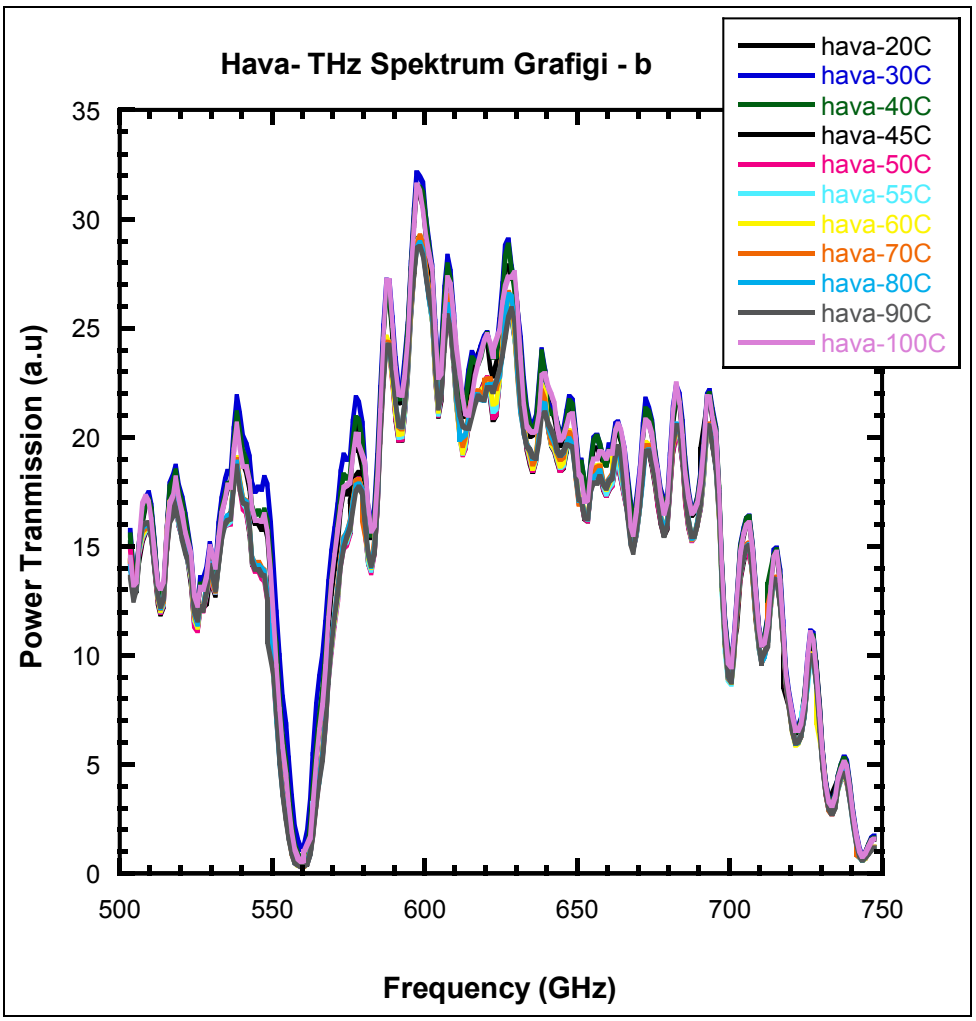
4.3. THz Spektrum Ölçüm Analizi

THz kaynağı, x-y tarayıcı modül ve Golay hücresi hassas bir şekilde THz dalgasının kaynaktan algılayıcıya minimum kayıpla gidebilmesi için ayarlamalar yapılmıştır. THz sinyalini frekans üretici ile 500 GHz'den 740 GHz'e kadar 1.0 GHz artırarak havanın THz spektrumu daha sonra sırasıyla, metal plakanın, boş safirin, sadece VO_2 ince filmin ve son olarak metamalzeme haline getirilmiş ince film VO_2' nin spectrum analizi yapılmıştır. Bu deneyler sıcaklığın kontrollu olarak arttırıldığı deneyler olmuştur. Bu analizler yapılırken sistemi kontrol eden çeşitli Labwiev programlarından yararlanılmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak alınan spectrum analizinde VO_2 ince film metamalzemenin sıcaklığa bağlı Lock-In değişimi (power transmission) gözlenilmiştir. Isıtma işlemi örneğin bağlı olduğu THz dalgasının odaklandırılığı metal plakanın örnek bulunmayan yüzeyine direnç bağlanarak ve bu dirençe güç uygulanarak plaka ısıtılmış böylece örnek de ısıtılmış olmuşdur. MIT geçişinin gözlenebilmesi için sıcaklık kontrollu olarak arttırılmıştır.İlk olarak havanın THz sepktrumu ölçülmüştür ve litaretür ile karşılaştırılması gösterilmiştir [58]. Havanın THz ölçüm sisteminde ölçümü alındıktan sonar c-cut VO_2 ince filmleri büyütmek üzere üzere kullanılan safir THz spektrumu alınmıştır. Tablo 4.2 de gösterildiği gibi sıcaklık değer artışına göre voltaj değeri arttırılmıştır.

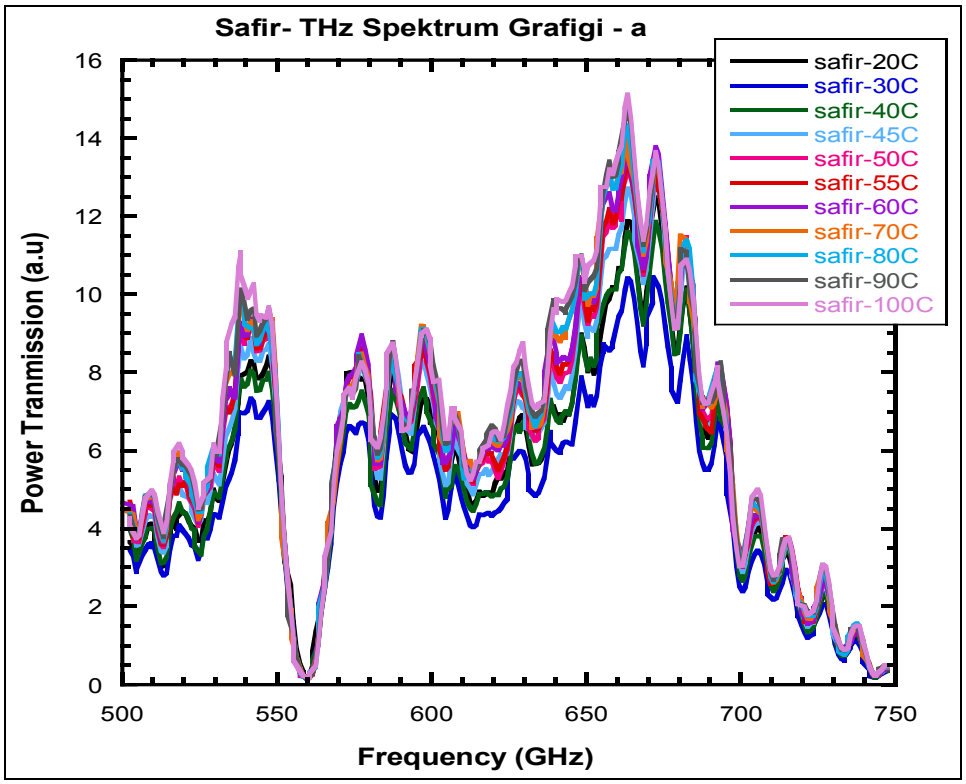
Tablo 4.2 Sıcaklık artışına karşılık gelen akım ve voltaj değeri gösterilmiştir.

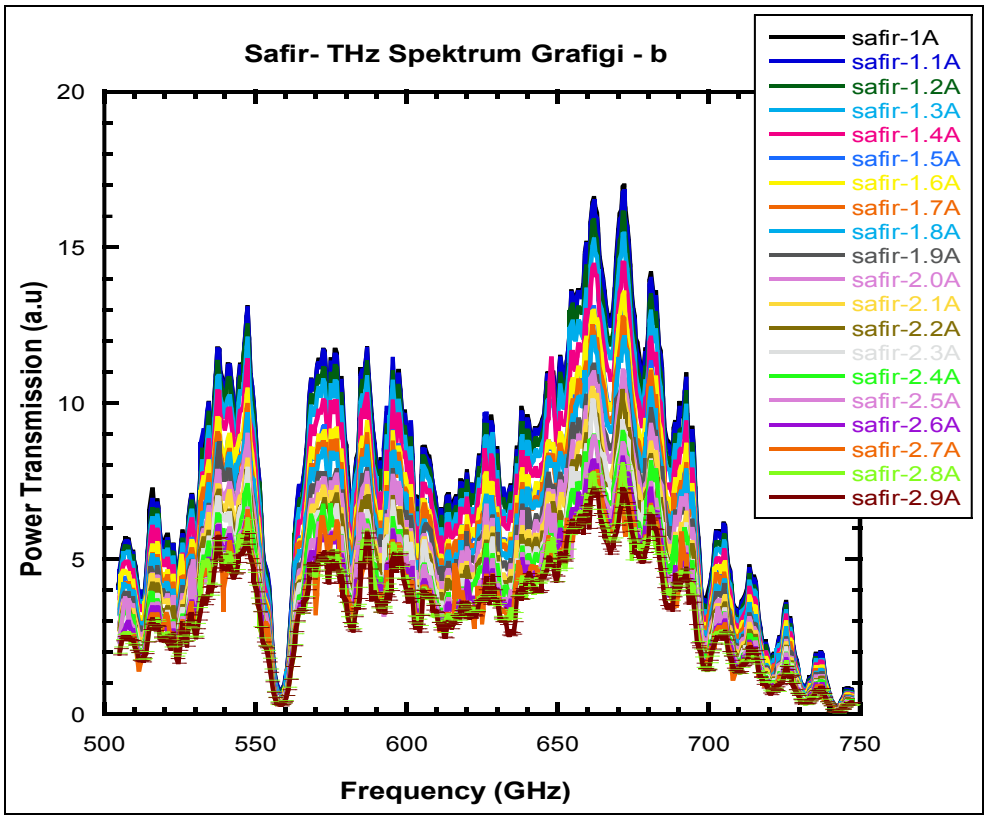
Voltaj (V)	Akım (A)	Sıcaklık (C)
4.1	1.2	30
4.3	1.3	35
5.0	1.5	40
5.7	1.7	45
6.7	1.9	50
7.3	2.2	55
8.0	2.4	60
8.5	2.5	65
9.0	2.7	70
9.8	2.8	80
10.6	3.1	90
11.5	3.4	100



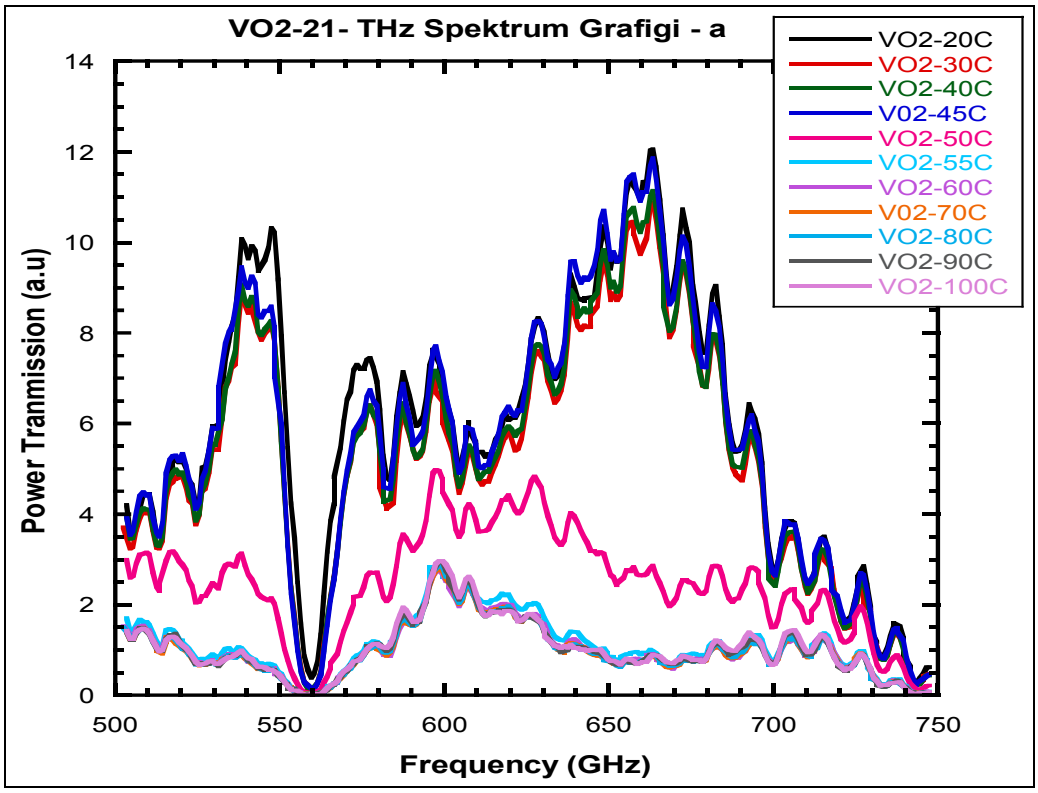


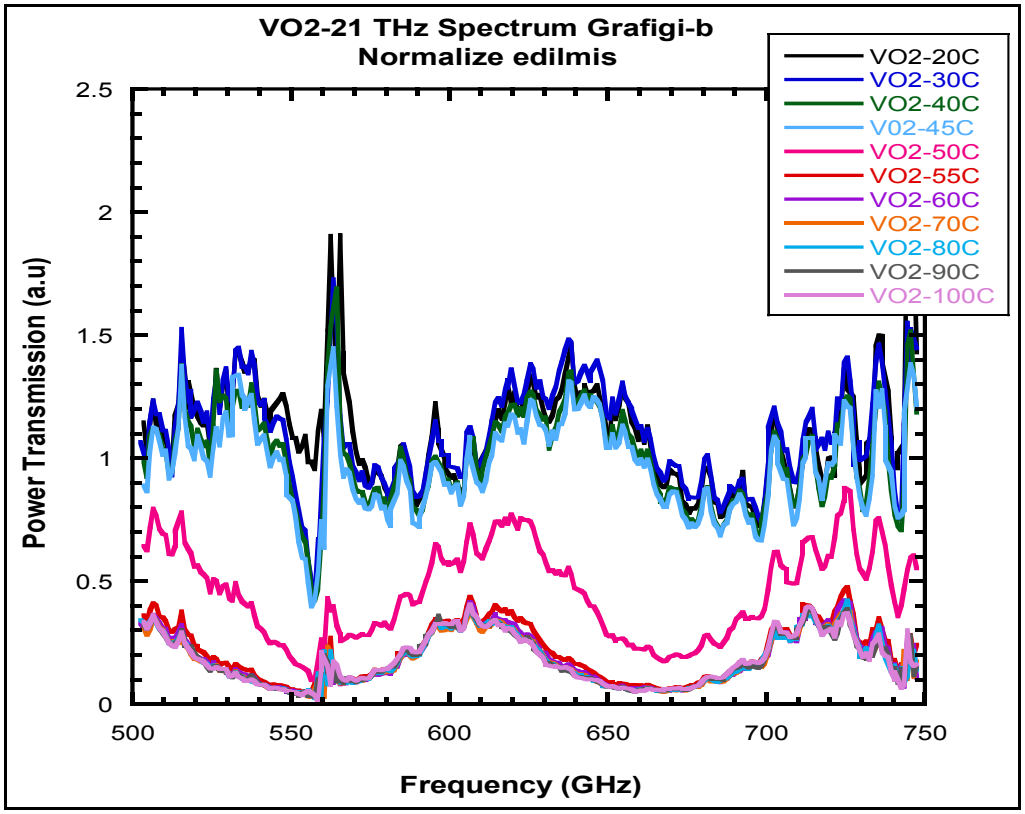
Şekil 4.10 a) Havanın 0.2-1 THz aralığındaki THz spectrum b) Havanın 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrum



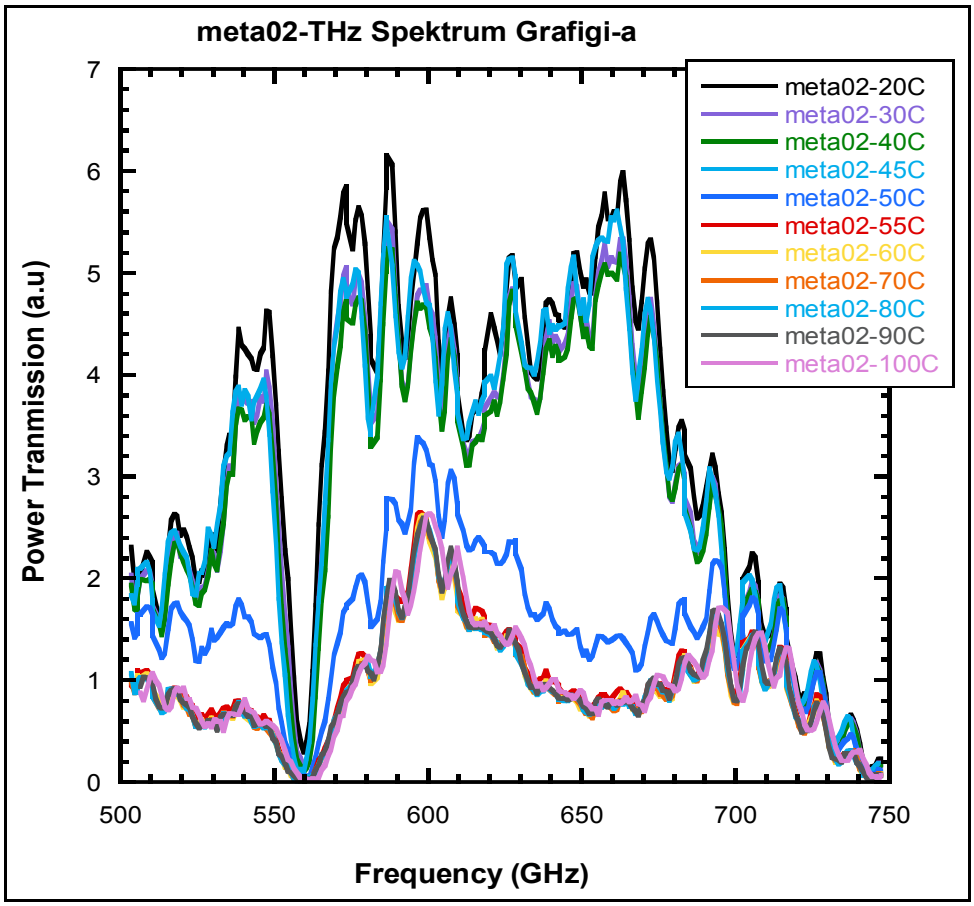


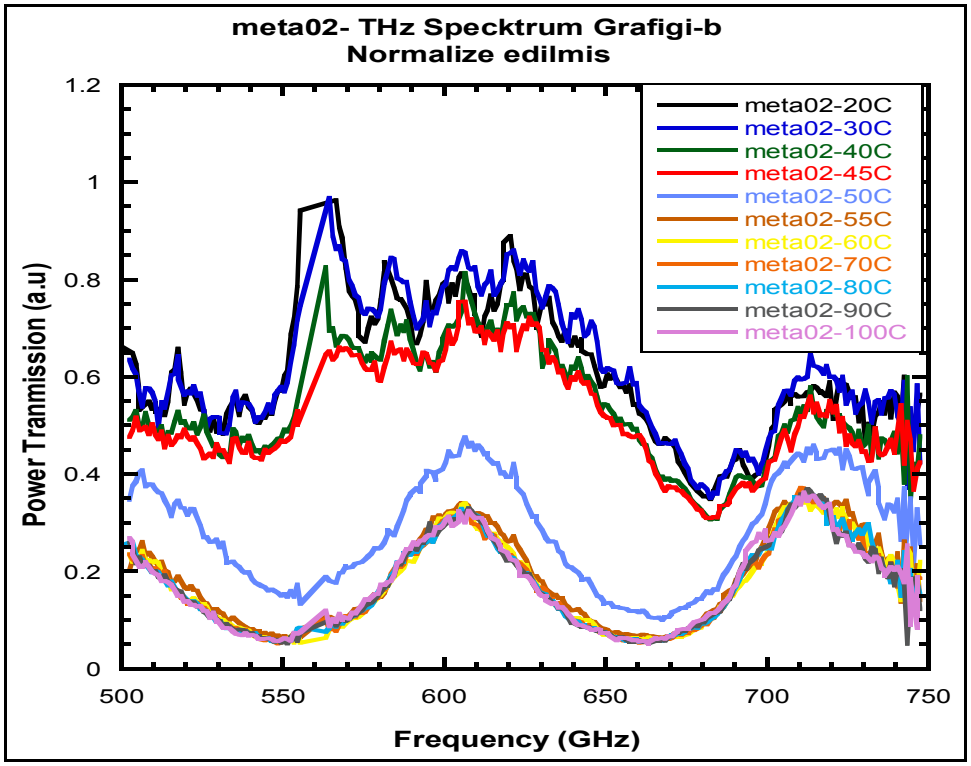
Şekil.4.11 a) Safir alttaşın 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu-holder ısıtma b) Safir alttaşın 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu-lazer ısıtma.



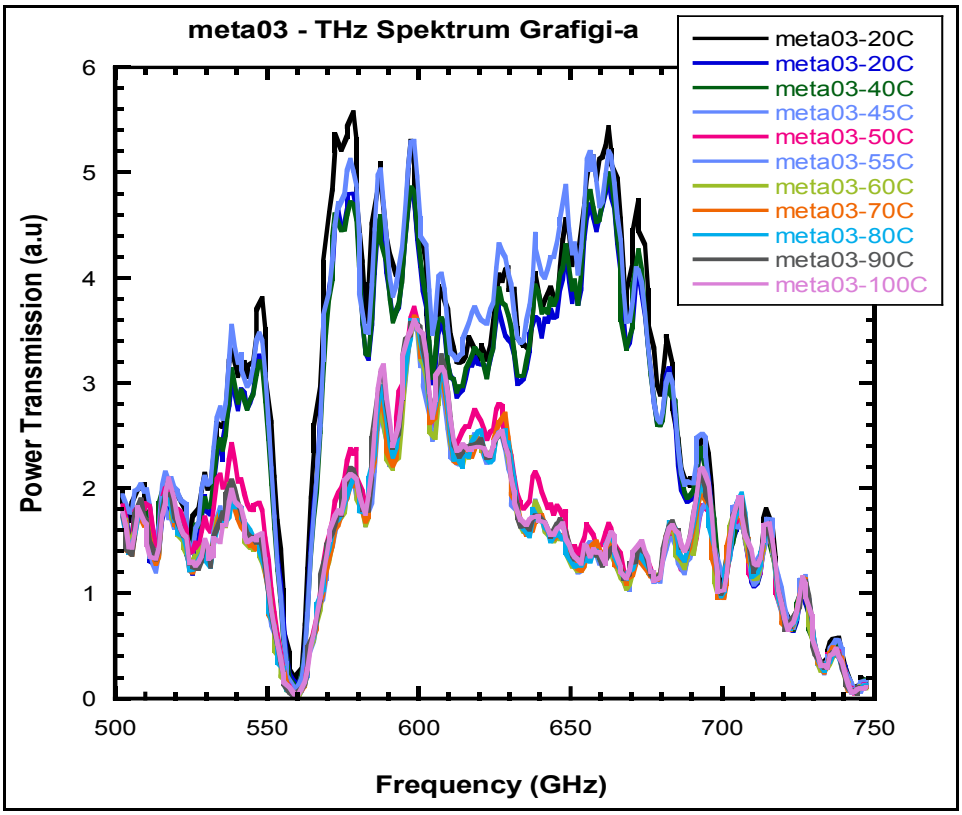


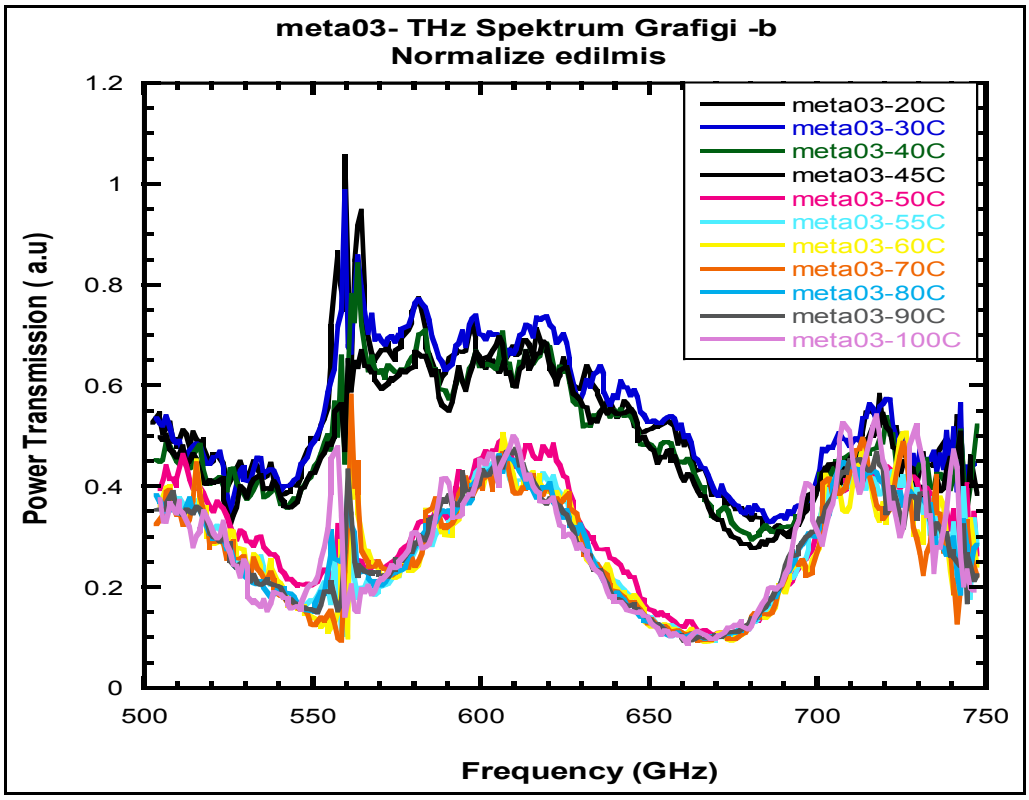
Şekil.4.12: a) VO_2-21 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektumu
b) VO_2-21 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen Spectrumu normalize edilmiş.



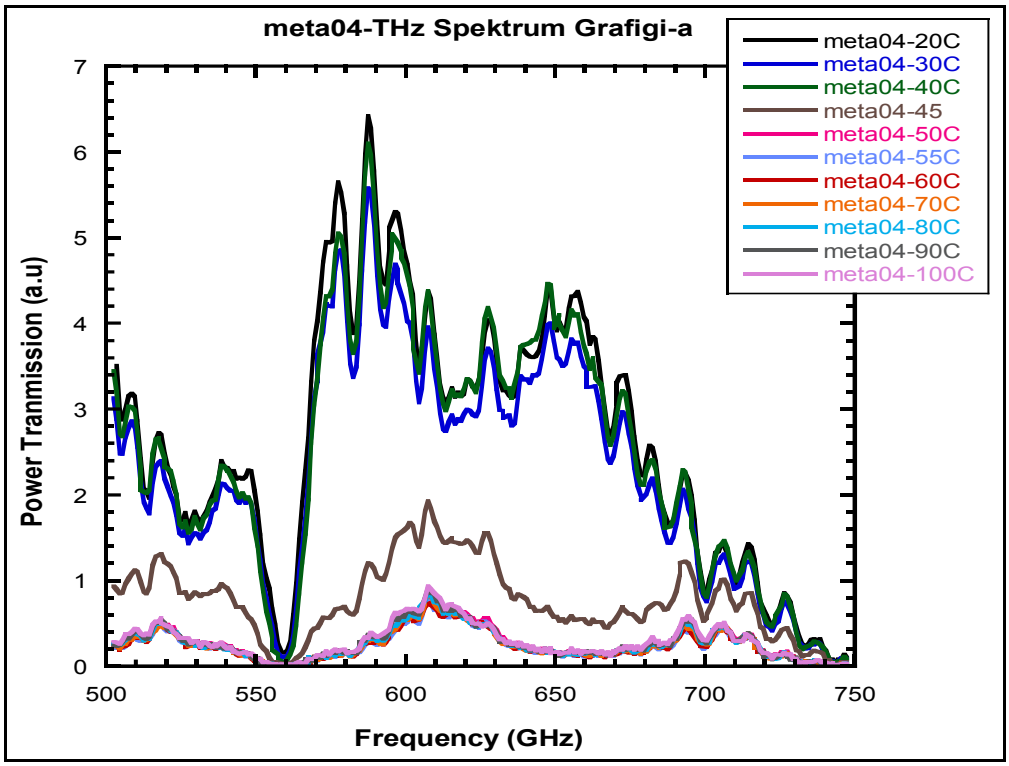


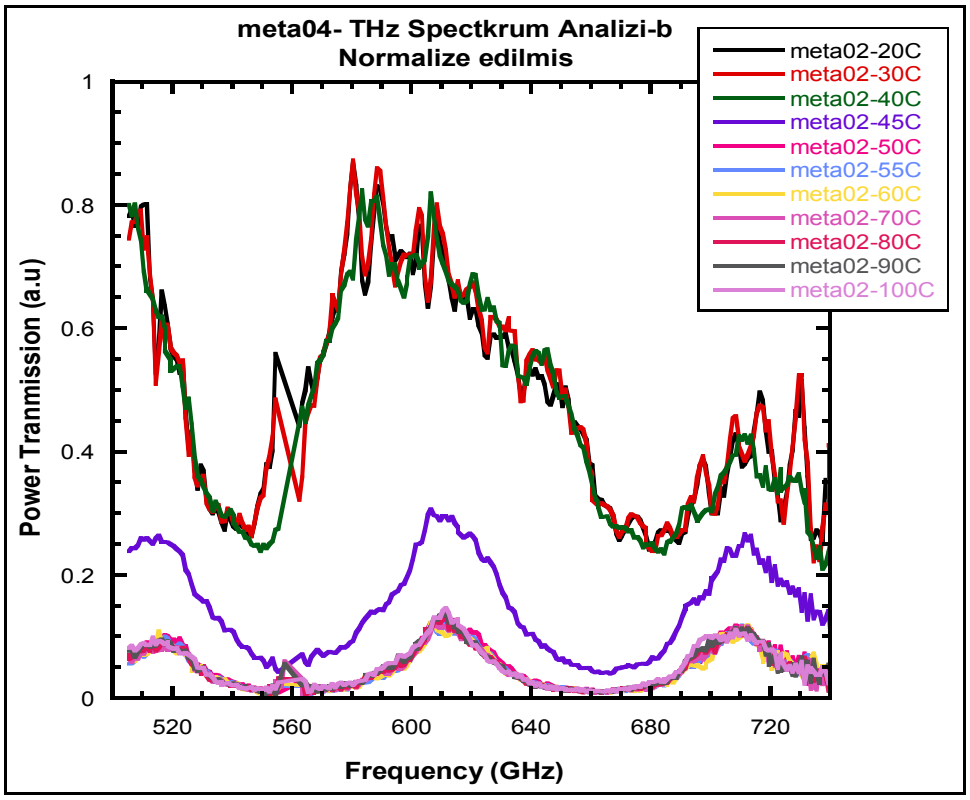
Şekil.4.13: a) Meta02 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu
b) Meta02 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu-normalize edilmiş.





Şekil.4.14: a) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu
b) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu-normalize edilmiş.



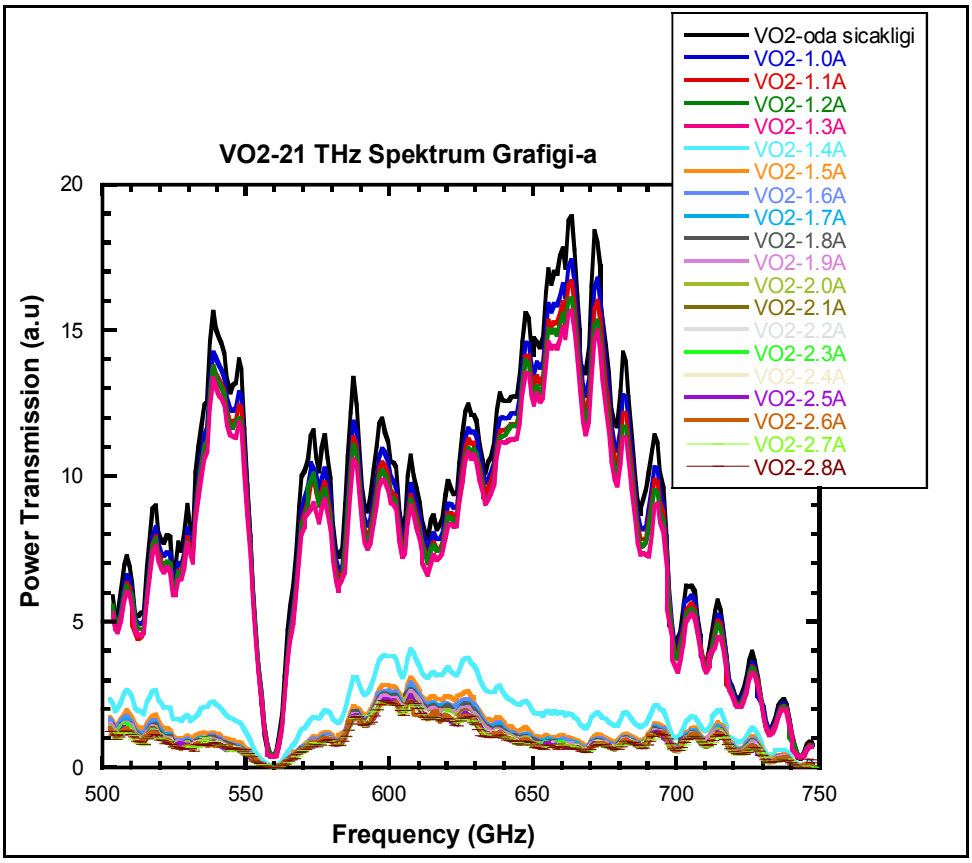


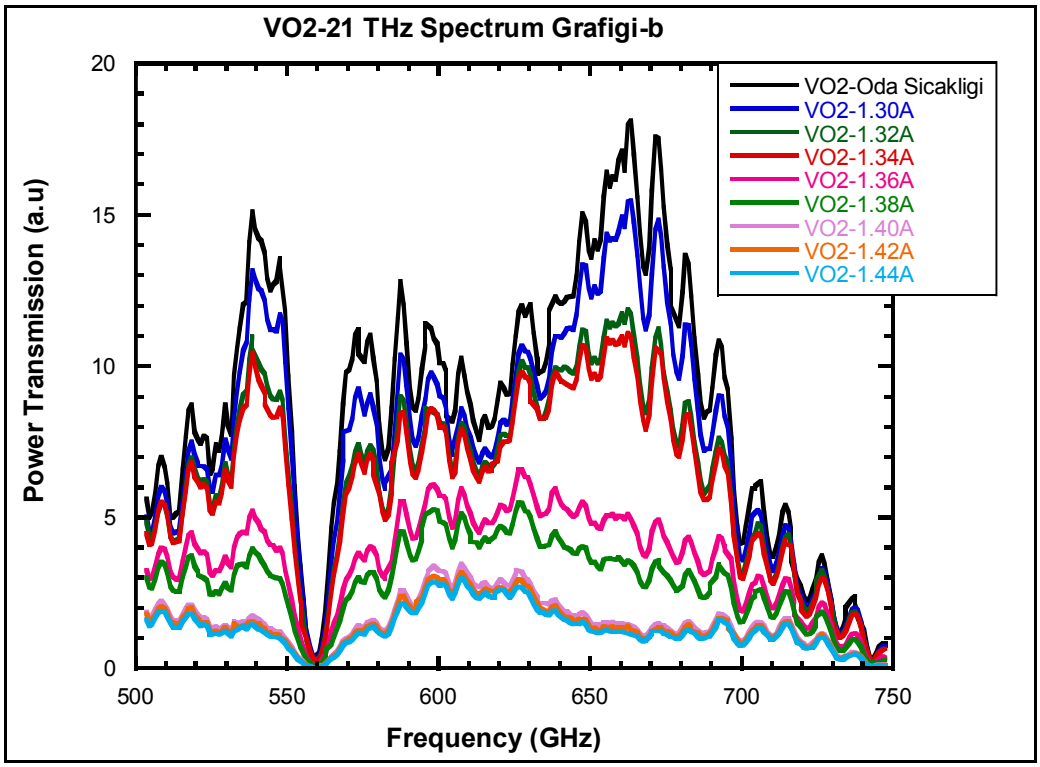
Şekil.4.15: a) Meta04 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu
b) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu-normalize edilmiş.

Örneklerin doğrudan değil sadece tuturuldukları yüzeyin kontrollü ısıtılması ile elde edilen analiz sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere MIT geçişi gözlenmesi gereken 68 C altında 45-50 C civarında olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi alınan ölçümlerin vakum ortamıda değil de oda koşularında vakumsuz ortamda alınmasıdır. Isı kaybına neden bu durum olması gerken değerin altında gibi davranış sergilemektedir. Frekans seçici yüzeye sahip olan meta02-03-04 örneklerinde ise beklendiği gibi band stop filtre gözlenmiştir. Şekil 4.3.4 te gösterilen similasyon sonuçu ile uyuşmaktadır. Fakat örnekleri doğrudan değil de dolaylı ısıtmak tam olarak hangi akım ve voltaj değerinde modulasyonun gerçekleştiğini saptamakta zorluk çıkarmaktadır. Bunun yerine Lazer diode ile doğrudan örnekler ısıtıldığında daha ince ve MIT geçişin başladığı akım voltaj değerleri kolayca saptanabilir. Tablo 4.3' de ayrıntılı olarak gösterildiği gibi arttırılan akım değerine karşılık elde edilen sıcaklık ve lazer diode optik güç değerleri gösterilmiştir.

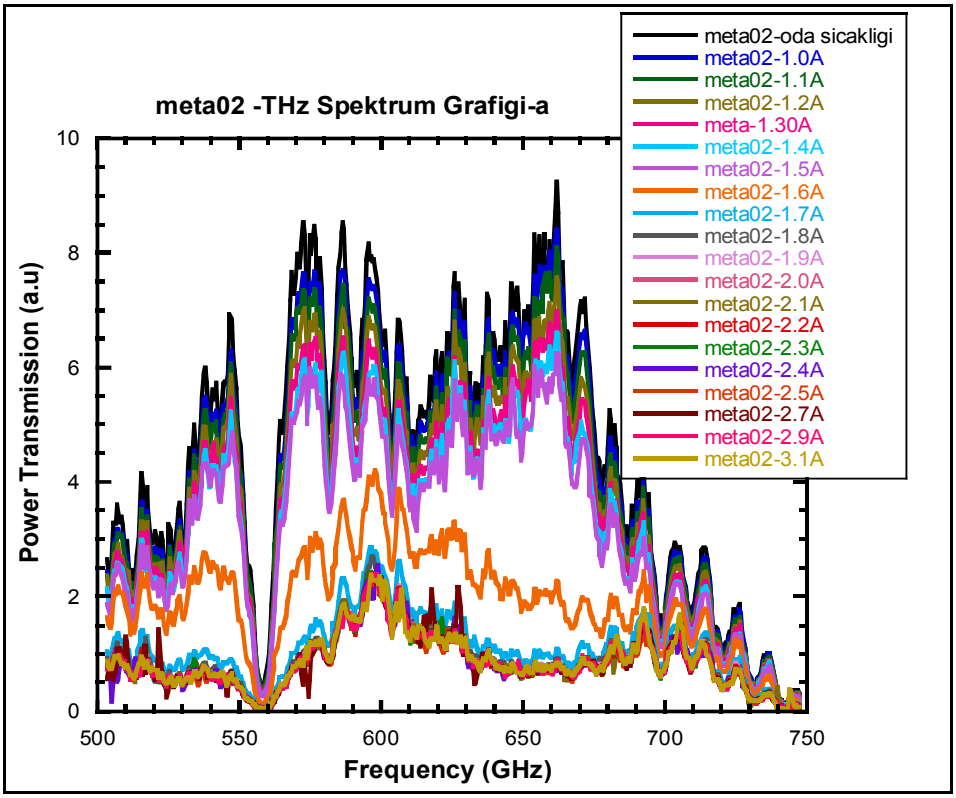
Tablo 4.3 Lazer güç kaynağının akım, güç ve sıcaklık değerleri gösterilmiştir

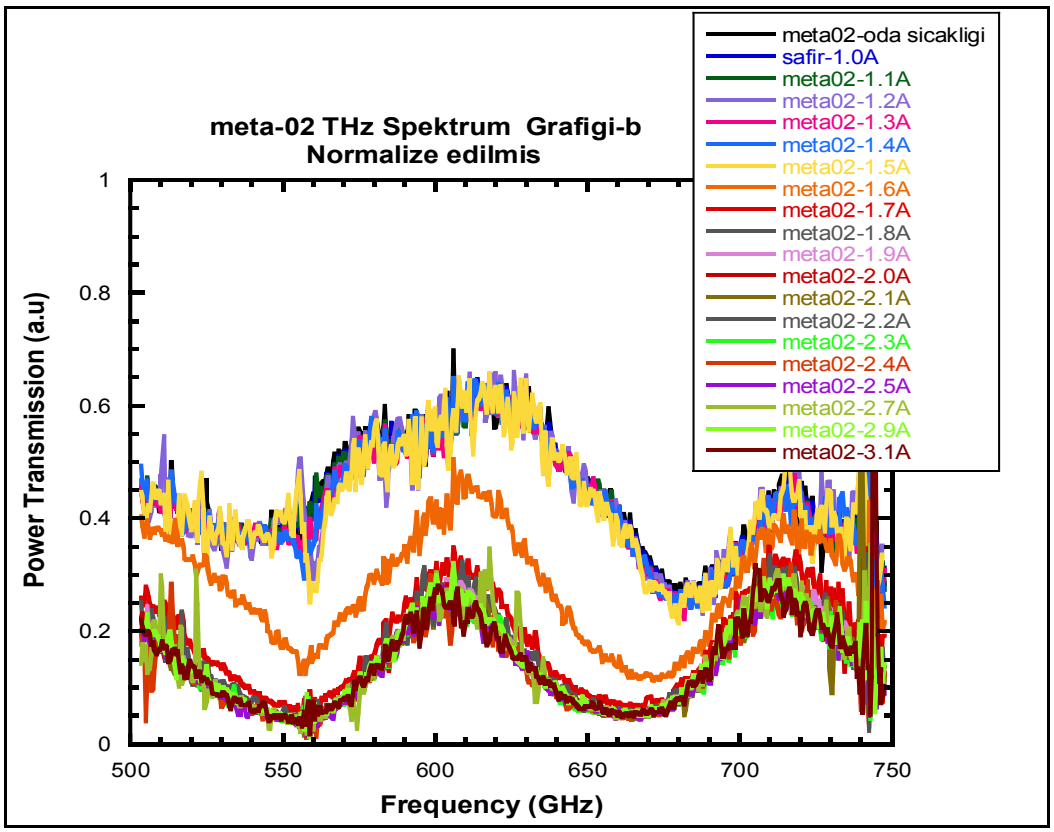
Lazer Akımı (Amper)	**Optik Çıkış Gücü (Watt)**	**Sıcaklık (C)**
1.0	0.92	30
1.1	1.34	40
1.2	1.71	50
1.3	2.08	55
1.4	2.45	60
1.5	2.82	70
1.6	3.19	90
1.7	3.56	100
1.8	3.93	120
1.9	4.03	130
2.0	4.67	145
2.1	5.04	160
2.2	5.41	170
2.3	5.78	185
2.4	6.15	200
2.5	6.52	230
2.6	6.89	250
2.7	7.26	260
2.8	7.63	275
2.9	8.01	300
3.0	8.44	310
3.1	8.74	320
3.2	9.11	330
3.4	9.85	350



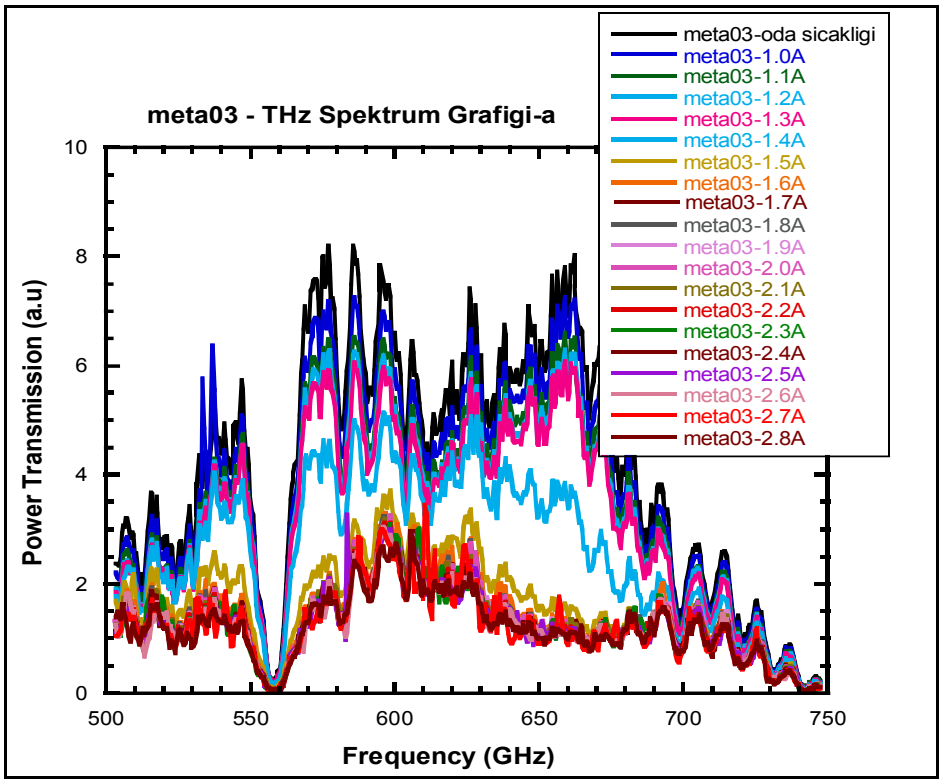


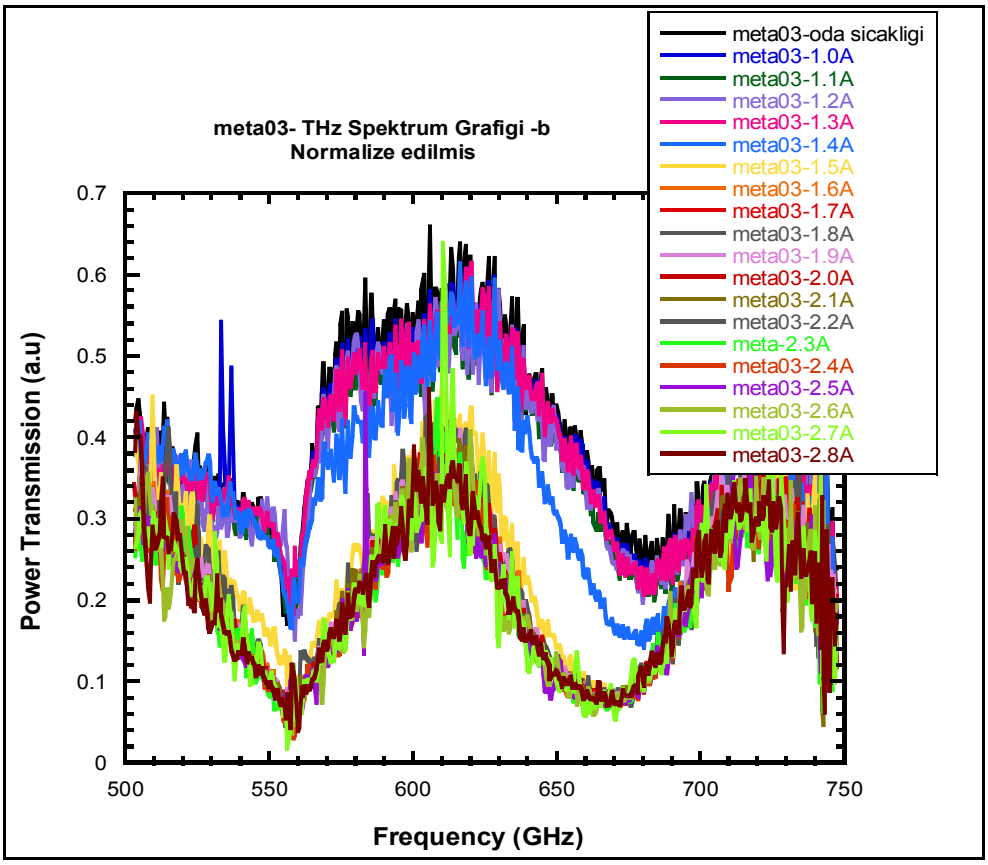
Şekil.4.16: a) VO_2-21 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu
b) VO_2-21 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu .



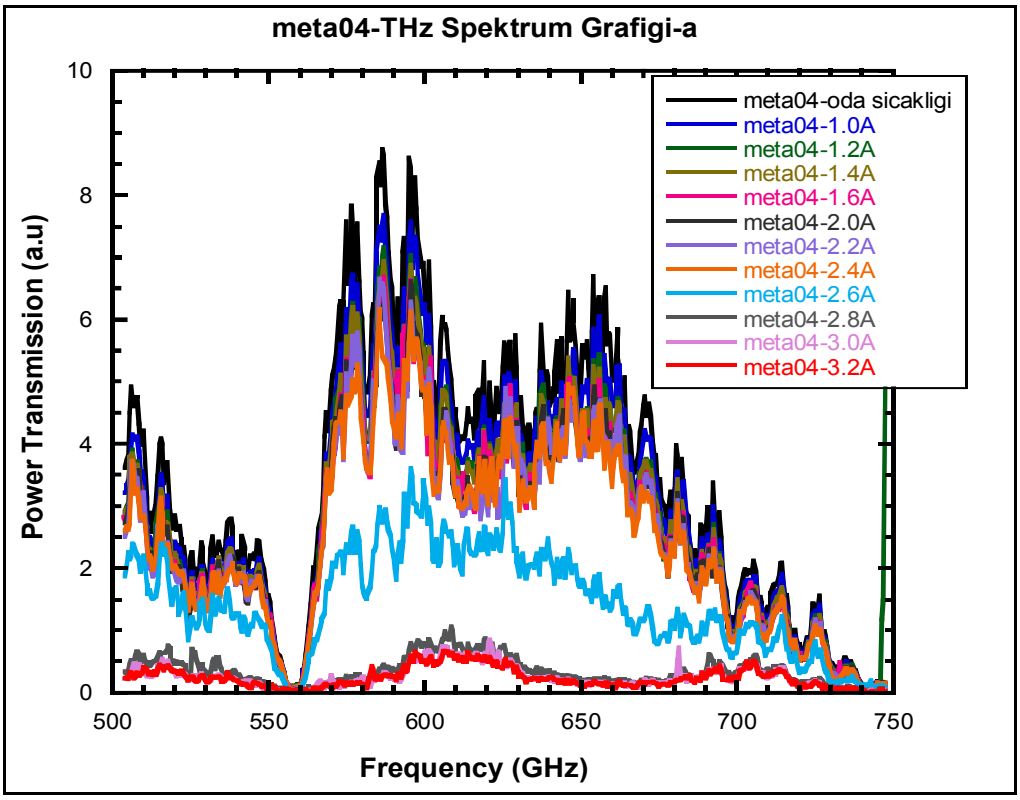


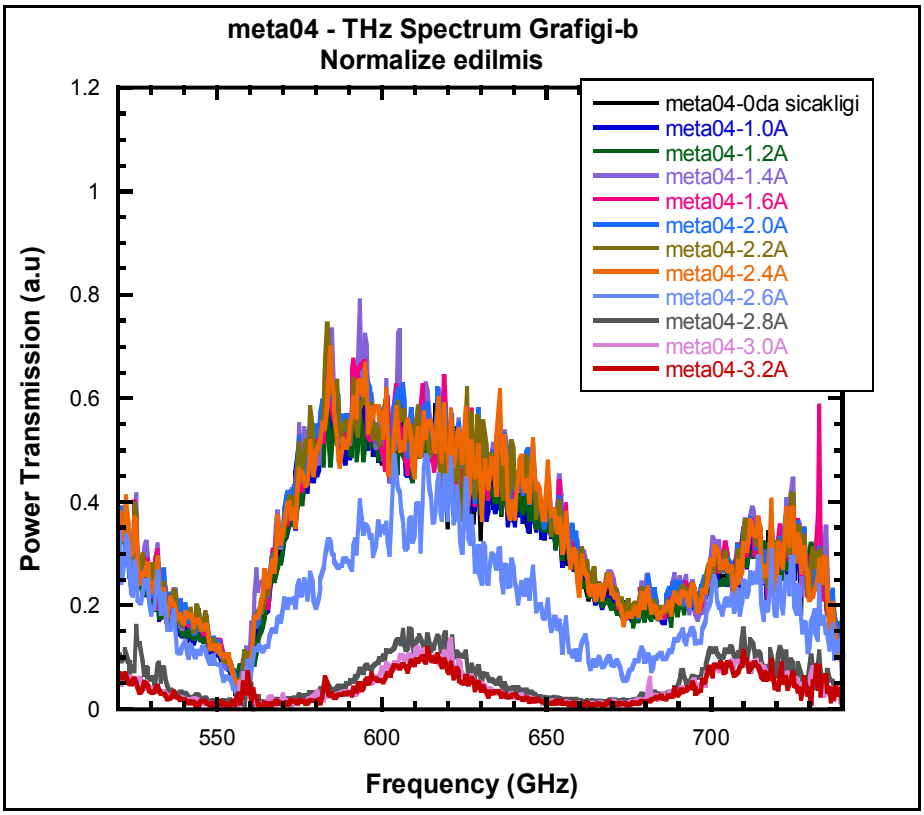
Şekil.4.17: a) Meta02 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu
b) Meta02 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu.



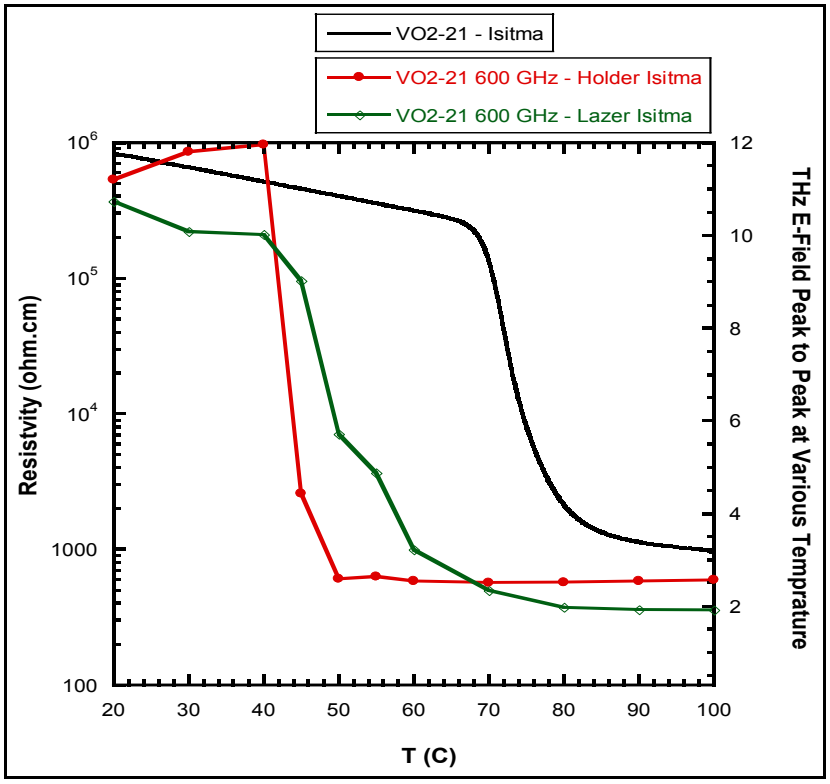


Şekil.4.18: a) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu
b) Meta03 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu.

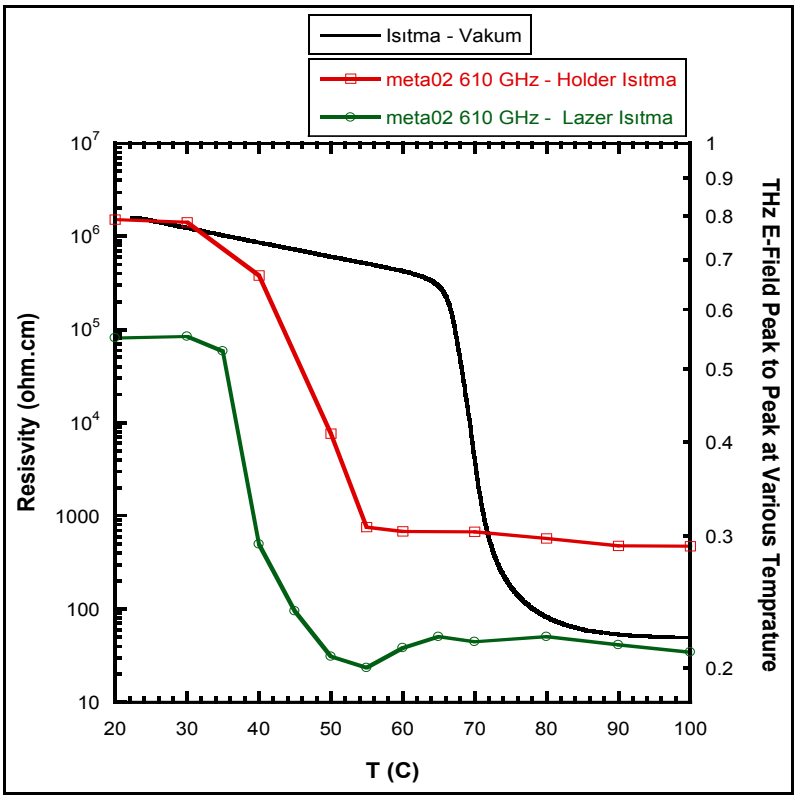




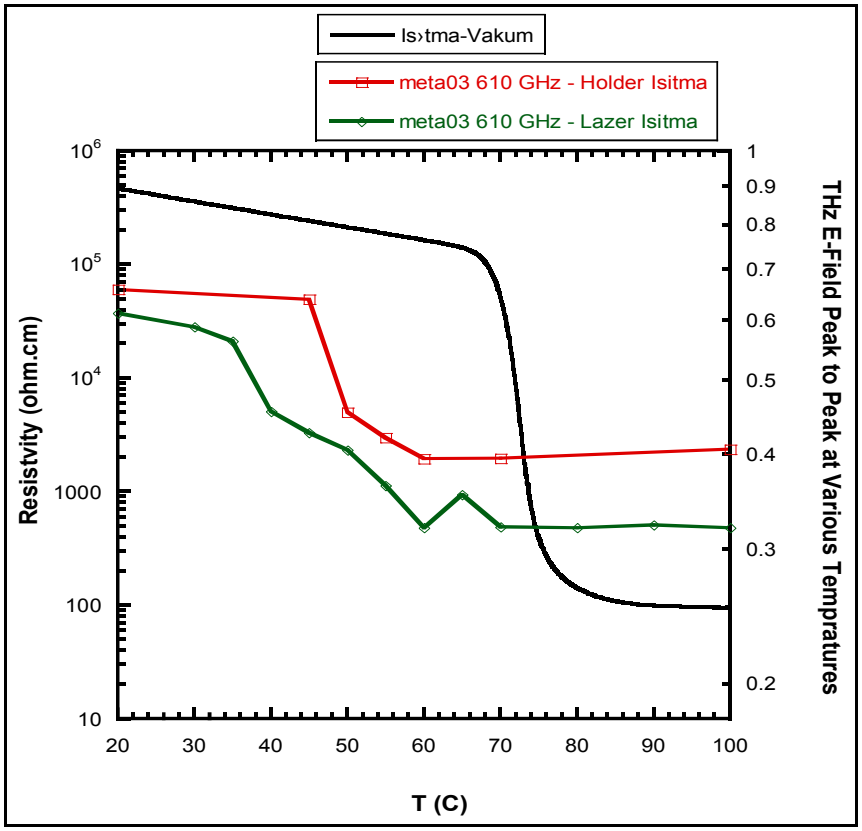
Şekil.4.19: a) Meta04 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu
b) Meta04 0.5-0.75 THz aralığında ölçülen spektrumu.



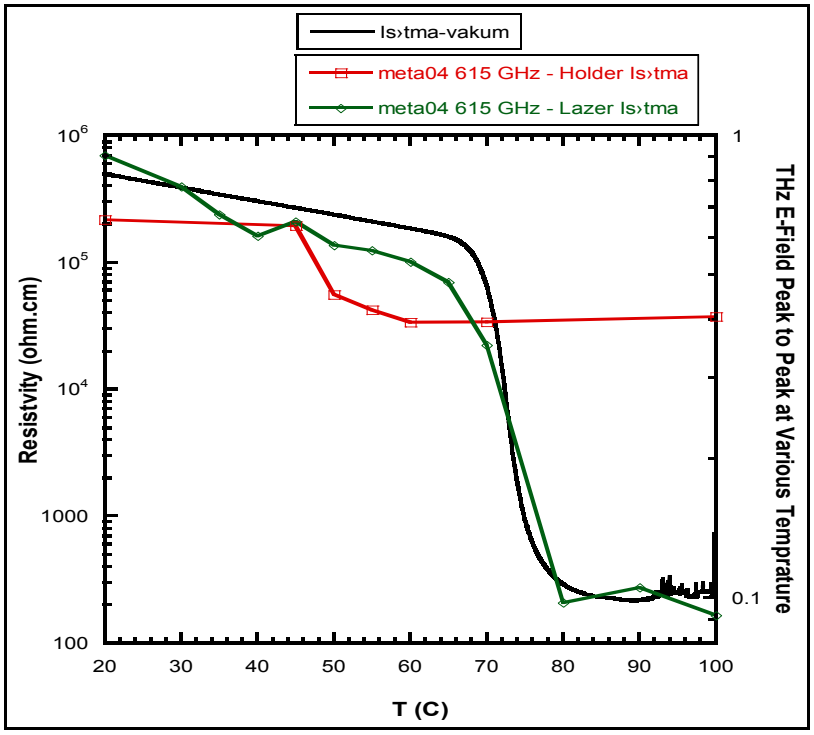
Şekil 4.20: VO_2-21 farklı sıcaklıklardaki geçiş sıcaklığı grafiği.



Şekil 4.21: Meta-02 farklı sıcaklıklardaki geçiş sıcaklığı grafiği.



Şekil 4.22: Meta-03 farklı sıcaklıklardaki geçiş sıcaklığı grafiği.



Şekil 4.23: Meta-04 farklı sıcaklıklardaki geçiş sıcaklığı grafiği.

Filtre haline getirilmeden microprobe cihazı yardımı ile vakumda sıcaklık direnç ölçümü yapılan $SZVO_2$-21, meta02, meta03 ve meta04 örneklerinin daha sonrasında iki farklı yöntem kullanılarak ısıtılan örneklerin THz spectrum analizi sonuçu ve bu örneklerin belirli frekanslarda belirlenen sıcaklık değerlerine göre noktaları seçilmiştir. Nokta nokta olarak düşünebileceğimiz holder ısıtma ve lazer ısıtma için peak to peak grafikleri vakum sıcaklığı ile karşılaştırılması için aynı grafikte iki y ekseni kullanılarak çizilmiştir. Şekil 4.3.10-11 de görüldüğü gibi $SZVO_2$- 21 ve meta02 örneğinin holder ısıtma ve lazer ısıtma yapıldığında 40 C civarı geçiş gözlendiği gösterilmiştir. Meta03 örneğinde ise lazer ısıtmanın 40 C civarı iken holder ısıtma 50 C göstermektedir. Meta04 ise lazer ısıtmanın neredeyse 60 C civarı geçiş yaptığı gözlenmiştir. Bunun nedeni örneğin önceki örneklerden daha kalın olduğunu söylemek gerekmektedir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında lazer ısıtma tekniğinin yüzey ısıtma tekniğinden daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Lazer ısıtma tekniği elde edilen altın filtre de daha etkili olduğu alınan THz spekrum grafikleri incelendiğinde daha net görülmektedir. Bunlara ek olarak modulasyon işlemi lazer kaynak kullanılarak daha hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Örneklerin farklı sıcaklıklarda THz Spektrum ölçümünün tekrarlanmasının sebebi sıcaklılıkla birlikte değişen gönderilen terahertz dalgasının değişen genlik değeri daha net bir şekilde gözlenmektedir.zaten tezin amacıda VO_2 filmlerin sahip olduğu 68 C altında terahertz dalglarına transparan 68 C değeri üstü değerlerde ise terahertz dalgasını yansıtması amaçlanmış ve böyle bir amplitude modulasyon elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Terahertz alanı güvenlik uygulamalarından kablosuz iletişim teknolojilerine kadar birçok farklı uygulamada özgün çözüm önerileri sunabileceği için günümüzde yoğun olarak araştırılmaktadır. Doğal olarak elektromanyetik spektrumun diğer bölgeleri gibi bu bölgede frekans ayarlanabilir veya geniş bantta çalışabilen terahertz üreticileri, detektörleri ve optik ara birimlerin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Özellikle kablosuz iletişimde, geleneksel teknolojiye kıyasla çok daha hızlı bir şekilde kablosuz veri iletimini mümkün kılacak olan Terahertz bandının kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, modülatörler, vericiler ve alıcılar gibi terahertz ve milimetre dalga boyu teknolojilerine dayalı pasif ve aktif aygıtların geliştirilmesinin önemi artmıştır. Bu nedenle herhangi bir iletişim platformunun gerçekleştirilmesinde modülatörler, verici ve alıcı birimleri ile beraber kilit yapıtaşlarıdır. Terahertz bandında yüksek hızda çalışan modülatörlerinin gerçekleştirilmesi için birçok araştırma yapılmıştır. . Terahertz teknolojisinde metamalzemeler, doğal malzemelerden elde edilemeyen elektromanyetik özellikler gösterdiği ve istenen fonksiyonellikte tasarlanabildiğinden, yapay optik elemanların tasarımında önemli bir yere sahiptir. Metamalzemeler geometrik olarak ölçeklendirilebilirler ve böylece radyo, mikrodalga, milimetre-dalga, uzak infrared (FIR), orta infrared (MIR), yakın infrared (IR) frekanslarında ve hatta görünür dalga boylarını kapsayan geniş bir frekans aralığında çalışabilirler. Terahertz boşluğu elektronik ve fotonik alanların arasında geçiş bölgesi olarak düşünülebilir, metamalzeme yapıları frekans ayarlı olduğundan kolayca mikrodalgadan THz bölgesine çekilebilir. Metamalzemelerin farklı terahertz frekanslarında gösterdikleri rezonant etkiler, özellikle sensör ve spektroskopi uygulamaları açısından son derece önemli bir yer edinmeye başlamıştır. Vanadyum ince filmlerinden metamalzeme yapıları tasarlanmıştır fakat THz bölgesinde hızlı çalışabilen bir modülator aygıt veya sensor yapısı olarak henüz kullanılmamıştır. Bu çalışmada THz bandında çalışabilen yalıtkan metal geçiş özellikli vanadyum ince filmlerini kullanan özgün metamalzeme yapılar üretip nümerik ve deneysel metotlarla geliştirilmesi amaçlanmıştır. Vanadyumun yalıtkan-metal geçiş özelliği optiksel veya elektriksel yöntemler ile tetiklenecek olup, hızlı bir şekilde faz geçişi gerçekleştirilebilmesi vanadyum metamalzeme yapıların istenen THz frekans aralığında modüle

edilebilmesine olanak sağlayacaktır. THz bölgesinde çalışan bu tür aygıtları sağlamak için ayarlanabilir özellikte metamalzeme yapıların tasarlanması ve rezonans özelliklerinin optimize edilmesi gerekir. Bu çalışmada vanadyum metamalzeme yapılarının tasarım ve simülasyonu ve nümerik hesaplamalar için CST Microwave Studio programı kullanılmıştır. Tezin deneysel kısmında DC mıknatıssal saçtırma sistemi ile safir alttaşlar üzerinde vanadyum ince filmler büyütülmüştür. Büyütülen ince filmlerine elektriksel karakterizasyonları yapıldıktan sonra karakterizasyon sonuçlarından elde edilen özellikler nümerik simülasyon programına tanıtılararak bu yapıların hızlı modülasyonu v uygulamasında kullanılması için en uygun (optimum) metamalzeme yapısı belirlenmiştir. Üretilen katmanlı yapılar litografi sistemi ile tasarlanan metamalzeme yapıları ile şekillendirilmiştir. Vanadyum metamalzeme yapıların geçirgenlik ve THz spektrum özellikleri deneysel olarak THz spektrum ölçüm sistemi ile analiz edilmiştir. Bu analizler sonucu farklı kalınlıklarda üretilen VO_2 ince filmlerin THz ölçüm sisteminde analizi yapılırken aynı zamanda iki farklı ısı tekniği ile MIT gerçekleşmiştir. Her bir örnek similasyon sonuçlarına uygun olarak davranmıştır. En başta hedeflenen THz bölgesinde çalışabilen Au+VO_2 filtreler modülator olarak kullanılabileceklerdir.

KAYNAKLAR

[1] Zhang, Y., Qiao S., Sun L., Shi W. Q., Huang W., Li L., Yang Z., (2014), "Photoinduced active terahertz metamaterials with nanostructured vanadium dioxide film deposited by sol-gel method", Optics Express, 22, 1170-11078.

[2] Jepsen P. U., (2006), "Metal-insulator phase transition in a VO_2 thin film observed with terahertz spectroscopy", Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 74, 205103.

[3] Choi S. B., Kyoung J. S., Kim H. S., Park H. R., Ahn Y. N., Kim H. T., Kim S., (2011), "Nanopattern enabled terahertz all-optical switching on vanadium dioxide thin film", Applied Physics Letters, 98, 071105.

[4] Fu G., Polity A., Volbers N., Meyer B. K., (2009, "Annealing effects on VO_2 thin films deposited by reactive sputtering" Thin Solid Films, 515, 2519-2522.

[5] Liu M., Tao H., Fan K., West K. G., Lu J., Zhang X., Nelson K. A., Averitt N. D., (2012), "Terahertz-field-induced insulator to metal transition in vanadium dioxide metamaterial", Nature, 487, 345-348.

[6] Pashkin A., (2011), "Ultrafast insulator-metal phase transition in VO_2 studied by multiterahertz spectroscopy", Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 83(19), 1955120.

[7] Jeong J. H., Kang B. J., Kim J. S., Yun H., Rotermund F., Kwon O. P., (2013), "High-power broadband organic THz generator", Scientific Reports, 3, 3200.

[8] Nájera O., (2017), "Resolving the VO_2 controversy: Mott mechanism dominates the insulator-to-metal transition", Physical Review B, 95(3), 1–14.

[9] Haverkort M. W., Hu Z., Tanaka A., Reichelt W., Tjengh L. H., (2005), "Orbital-assisted metal-insulator transition in VO_2", Physical Review Letters, 95, 196404.

[10] Verwey E. J. W., (1939), "Electronic conduction of magnetite (Fe_3O_4) and its transition point at low temperatures", Nature, 144(3642), 327–328.

[11] Liu K., Fu. D.,Suh J., Khan A., Wu J., (2012), "Dense electron system from gate-controlled surface metal-insulator transition", Nano Letters, 12(12), 6272–6277.

[12] Senn M. S., Wright J. P., Attfield J. P., (2012), "Charge order and three-site distortions in the Verwey structure of magnetite", Nature, 481,173-176.

[13] Biermann S., (2005), "Dynamical singlets and correlation-assisted peierls transition in VO_2", Physical Review Letters, 94(2), 1–4.

[14] Appavoo K., Haglund R. F., (2011), "Detecting nanoscale size dependence in VO2 phase transition using a split-ring resonator metamaterial", Nano letters,11(3), 1025-1031.

[15] Imada M., Fujimori A. Tokura Y., (1998), "Metal-insulator transitions", Reviews of Modern Physics, 70, 1041-1293.

[16] Barker A. S., Verleur H. W., Guggenheim H. J., (1966), "Infrared optical properties of vanadium dioxide above and below the transition temperature" Physical Review Letters, 17(26), 1286.

[17] Kim H., Charipar N., Breckenfeld E., Rosenberg A., Piqué A., (2015), "Active terahertz metamaterials based on the phase transition of VO_2 thin films", Thin Solid Films, 2015, 596, 45-50.

[18] Morin F. J., (1959), "Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature", Physical Review Letters, 3(1), 34–36.

[19] Muraoka Y., Hiroi Z., (2002), "Metal-insulator transition of VO_2 thin films grown on TiO_2 (001) and (110) substrates", Applied Physics Letters, 80,583-585-

[20] Nolting F., Scholl A., Stöhr J., Seo J. W., Toney M. F., Padmore H. A.,(2000), "Direct observation of the alignment of ferromagnetic spins by antiferromagnetic spins", Nature, 405, 767-769.

[21] Jin S., Tiefl T. H., Cormak M., Fastnacth R. A., Chen L. H., (1994), "Thousandfold change in resistivity in magnetoresistive La-Ca-Mn-O films", Science, 264, 413-415.

[22] Wang J., Neaton J. B., Zeng H., (2003),"Epitaxial $BiFeO_3$ multiferroic thin film heterostructures", Science, 299,1719-1722.

[23] Ramírez J. G., (2009), "First-order reversal curve measurements of the metal-insulator transition in VO_2: Signatures of persistent metallic domains", Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics., 86, 1-9.

[24] Ruzmetov D., Gopalakrishnan G., Deng J., (2009), "Electrical triggering of metal-insulator transition in nanoscale vanadium oxide junctions", Journal of Applied Physics, 106, 1-5.

[25] Finlayson D. M., (1990), "Metal-insulator transition in InP", Philosophical Magazine Letters, 61(5), 293–296.

[26] Yang Z., Hart S., Ko C., Yacoby A., Ramanathan S., (2011), "Studies on electric triggering of the metal-insulator transition in VO_2 thin films between 77 K and 300 K", Journal of Applied Physics. 110, 1-5

[27] Yüce H., (2015). “Characterization of Vanadıum Oxide Thin Films Grown By Magnetron Sputtering Technique”, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

[28] Cui H. N., (2008), “Thermochromic properties of vanadium oxide films prepared by dc reactive magnetron sputtering”, Thin Solid Films., 516,1484-1488.

[29] Tu H., Kim B., Chae G.,Youn H., Kim K., Kang S. J., Kim K., Lim Y. S., (2005), “Raman study of electric-field-induced first-order metal-insulator transition in VO_2-based devices”, Applied Physics Letters, 3(9),3523-3527.

[30] Fadlelseed M. M. F., (2017), “Investıgation of the effects of thickness on the metal-insulator transition in vanadium dioxide nanocrystals, and development of a novel vanadium dioxide mott field-effect transistor”, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi.

[31] Wu C., Feng F., Xie Y., (2013), “Design of vanadium oxide structures with controllable electrical properties for energy applications”, Chemical Society Reviews., 42, 5157-5183.

[32] Wu J. M., Liou L., Bang L., (2011), “Room temperature photo-induced phase transitions of VO_2 nanodevices”, Journal of Materials Chemistry.,21,5499-5504.

[33] Eyert V., (2002), “The metal-insulator transitions of VO_2: A band theoretical approach”, Annalen der Physik (Leipzig)., 11, 650-702.

[34] Cavalleri T., Dekorsy H. H. W., Chong J. C., Kieffer R. W., Schoenlein R., (2004), “Evidence for a structurally-driven insulator-to-metal transition in VO_2: a view from the ultrafast timescale”, Physical Review B, 70. 161102.

[35] Kim H. T., Chae G., (2004), “Mechanism and observation of Mott transition in VO_2-based two- and three-terminal devices”, New Journal of Physics, 6, 52.

[36] Yu P., Li Z. W., Yao R., Xu Y. F., Cheng X. H., Cheng Z. Q., (2020) “A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium dioxide films”, The European Physical Journal D, 74, 2-4.

[37] Dicken M. J., Aydin K., Pryce I. M., Sweatlock L. A., Boyd E. M., Walavalkar S., Ma J., Atwater H.A, (2009), “Frequency tunable near-infrared metamaterials based on VO_2 phase transition”, Optic Express, 17,18330-1339.

[38] Yüce H., Alaboz H., Demirhan Y., Özdemir M., Özyuzer L., Aygün G., (2017), “Investigation of electron beam lithography effects on metal–insulator transition behavior of vanadium dioxide”, Physica Scripta 92 (11), 114007.

[39] Capolino F., (2017), “ Theory and Phenomena of Metamaterials”, Theory and Phenomena of Metamaterials, 1th Edition, Boca Raton.

[40] Cui T. J., Liu R., Smith D. R., (2010) , “Introduction to metamaterials’, in Metamaterials: Theory, Design, and Applications.”, 1th Edition, Springer.

[41] Weng Z. B., (2007), “Design and experiment of one dimension and two dimension metamaterial structures for directive emission”, Progress in Electromagnetics Research, 106, 107-119.

[42] Fan Y., Qian Y., Yin S., Li D., Jiyang M., Lin X., Hu F., (2019), “Multi-band tunable terahertz bandpass filter based on vanadium dioxide hybrid metamaterial”, Materials Research Express, 6, 055809.

[43] Anwar R. S., Mao L., Ning H., (2018), ‘Frequency Selective Surfaces” Applied Science, 8(9),1689.

[44] Nouman M. T., Hwang J. H., Faiyaz M., Lee K. J., (2018), “Vanadium dioxide based frequency tunable metasurface filters for realizing reconfigurable terahertz optical phase and polarization control”, Optics Express, 26, 12922-12926.

[45] Sanphuang V., Nahar K. N., (2016), “Reconfigurable THz Filters Using Phase-Change Material and Integrated Heater”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6, 583-591.

[46] Veselago V. G., (1968), “ The electrodynamıcs of substances wıth sımultaneously negatıve values of μ and ε” Usp.Fiz. Nauk, 10, 517-526.

[47] Jepsen P. U., Ficher B. M., (2006), “Metal-insulator phase transition in a VO_2 thin film observed with terahertz spectroscopy”, Physical Review. B,74,205103

[48] Gianvittorio J. P., (2003), “Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces for Multiband and Dual-Polarized Applications”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 51(11), 3088–3096.

[49] Dobroiu A., Otani C., Kawase K., (2006) “Terahertz-wave sources and imaging applications”, Measurement Science and Technology, 17, 161-174.

[50] Ozyuzer L., Koshelev A. E., Kurter C., Kadowaki K., Tachiki M., (2007), “Emission of coherent THz radiation from superconductors”, Science, 318, 1291-1293.

[51] Wang D. S., Chan C. H., (2016), “Frequency selective surfaces in handbook of antenna technologies”, 1th Edition, Springer.

[52] Anderson T., Alexeff I., Raynolds J., (2003), “Plasma Frequency Selective Surfaces”, IEEE International Conference on Plasma Science, 58, 2096-2097

[53] Fukunaga K., (2009), “Terahertz imaging systems: a non-invasive technique for the analysis of paintings”, O3A Optics for Arts, 7391, 73910.

[54] Kelly P. J., Arnell R. D., (2000), "Magnetron sputtering: A review of recent developments and applications", Vacuum, 56,159-172.

[55] Vendik O. G., Zubko S. P., Nikol'skiĭ M. A., (1999), "Modeling and calculation of the capacitance of a planar capacitor containing a ferroelectric thin film", Technical Physics, 44, 349.

[56] Demirhan Y., Alaboz H., Nebioğlu M. A,. Mulla B., Akkaya M., Altan H, Sabah C., Ozyuzer L., (2017), "Fourcross shaped metamaterial filters fabricated from high temperature superconducting YBCO and Au thin films for terahertz waves", Superconductor Science and Technology, 30, 074006.

[57] Akkaya M., Demirhan Y., Yüce H., Aygün G., Özyuzer L., Sabah C., Altan H., (2017), "Terahertz transmission through patterened vanadium oxide thin films on dielectric substrates". Proceedings of the 5th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology - Photoptıcs, 1,334-339.

[58] Yang Y., Shutler A., Grischkowsky D., (2011), "Measurement of the transmission of the atmosphere from 02 to 2 THz", Optics Express, 19, 8830.

ÖZGEÇMİŞ

Şehriban ZEYBEK 1992 yılında Diyarbakır'da doğdu. 2011 yılında başladığı İzmir Yüksek Teknolji Enstitüsü Fen Fakültesi Fizik Bölümünü 2016 yılında başarıyla tamamlayarak 2018 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Anabilim Dalında başladı. 2016 yılında İzmir Teknolojiyi Geliştirme Bölgesin'de (İZTEGEB) araştırmacı olarak çalıştığı işyerinden ayrılarak Torun Bakır Metal Alaşımları A.Ş firmasında Ar-Ge Uzman Yardımcısı olarak başladı.