



**EMI/RFI KORUMALI SAFİR OPTİK PENCERE GELİŞTİRİLMESİ VE  
PROTOTİP ÜRETİMİ**

**Özge ZORLU KAYMAK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FOTONİK BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2024**

## ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Özge ZORLU KAYMAK

26/12/2024

# EMI/RFI KORUMALI SAFİR OPTİK PENCERE GELİŞTİRİLMESİ VE PROTOTİP ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Özge ZORLU KAYMAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2024

## ÖZET

Tez kapsamında EMI kalkanlayıcı safir optik pencere geliştirildi. Bu hedefle, Kyropoulos sisteminde safir külçe büyütüldü. Külçenin büyütüldüğü A-eksenine dik olan C-ekseninde kesilen silindir dilimlenerek safir alttaşlar üretildi. Alttaşların yüzeyleri aşındırma ve parlatma işlemlerinden geçirilerek şeffaf optik pencereler elde edildi. Bu işlemlerden sonra yüzey pürüzlülüğü ve kristal kalitesinin ölçümü Atomik Kuvvet Mikroskobu ve X-ışını kırınım sistemi ile yapıldı. Ölçümler sonucunda safir optik pencerenin yüzey pürüzlülüğü 0.76 nm bulundu. Üretilen safir pencerelerin kristal kalitesinin iyi düzeyde olduğu X-ışını kırınım pikinin FWHM değerinin görece düşük (0,290) olmasından anlaşıldı. Optik geçirgenliğini arttırmak için safir optik pencerelerin yüzeyi SiO<sub>2</sub> yansıma önleyici tabaka ile kaplandı. Yansıma önleyici kaplama sonrasında safir optik pencerenin optik geçirgenliğinin %85'ten %90'a çıktığı belirlendi. Daha sonra iyi bir EMI kalkanlama etkinliği elde etmek için metal örgü tasarımı yapıldı; bu tasarım Ag nanoparçacık mürekkebi kullanılarak Aerosol Jet Baskı sistemi ile yansıma önleyicili safir optik pencere üzerine basıldı. Tüm kaplamalar bittikten sonraki FTIR ölçümleri sonucunda EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin geçirgenliğinin 0,2 - 5 µm aralığında ortalama %70'in üzerinde bulundu. Geliştirilen optik pencerenin yapılan kalkanlama etkinliği ölçümü sonucunda EMI kalkanlama etkinliğinin ortalama olarak 17 dB olduğu belirlendi.

Bilim Kodu : 20205  
Anahtar Kelimeler : EMI kalkanlama, metalik ağ, safir, aerosol jet baskı  
Sayfa Adedi : 51  
Danışman : Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

# EMI/RFI PROTECTED SAPPHIRE OPTICAL WINDOW DEVELOPMENT AND PROTOTYPE PRODUCTION

(M. Sc. Thesis)

Özge ZORLU KAYMAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2024

## ABSTRACT

In this thesis, an EMI shielding sapphire optical window was developed. For this purpose, a sapphire ingot was grown in the Kyropoulos system. The sapphire substrates were produced by slicing the cylinder cut along the C-axis perpendicular to the A-axis along which the ingot was grown. The surfaces of the substrates were subjected to etching and polishing to obtain transparent optical windows. After these processes, surface roughness and crystal quality were measured by Atomic Force Microscopy and X-ray diffraction system. As a result of the measurements, the surface roughness of the sapphire optical window was found to be 0.76 nm. The good crystalline quality of the sapphire windows produced was evident from the relatively low FWHM value (0.290) of the X-ray diffraction peak. In order to increase the optical transmittance, the surface of the sapphire optical windows was coated with SiO<sub>2</sub> antireflection layer. After the anti-reflective coating, the optical transmittance of the sapphire optical window was observed to increase from 85% to 90%. Then a metal mesh design was made to achieve a good EMI shielding efficiency; this design was printed on the anti-reflective sapphire optical window by Aerosol Jet Printing system using Ag nanoparticle ink. As a result of FTIR measurements after all coatings were completed, the transmittance of the EMI shielding sapphire optical window was found to be above 70% on average in the range of 0.2 - 5  $\mu$ m. As a result of the shielding efficiency measurement of the developed optical window, the average EMI shielding efficiency was determined to be 17 dB.

Science Code : 20205  
Key Words : EMI shielding, metallic mesh, sapphire, aerosol jet printing  
Page Number : 51  
Supervisor : Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

## TEŞEKKÜR

Yaptığım tez çalışmalarını süresince manevi yardımını esirgemeyen, bilimsel anlamda gelişimime yardımcı olan danışmanım Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK'a çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Başarılarıyla, çalışma hevesiyle, yardım severliğiyle bana örnek olan, bilgi ve tecrübelerini yararlanabilmemiz için her daim bizlerin yanında olan, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkez müdürü çok değerli hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e çok teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım süresince Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan tüm değerli hocalarım ve tüm çalışma arkadaşlarıma yardımları için teşekkür ederim.

Her anımda yanımda olup, her kararımı destekledikleri ve varlıkları ile bana güç verdikleri için canım annem Fadik ZORLU, canım babam Abbas ZORLU, ablam Özlem KURUN ve abim İbrahim KURUN'a çok teşekkür ederim. Benimle büyüdüğü, aldığı her kararda yanımda olduğu, en huzursuz anlarda huzur olduğu için canım eşim, yol arkadaşım Eren KAYMAK'a çok teşekkür ederim.

Ve son olarak;

Bizlerin Türk gençliği olarak hedeflerimize ulaşmamızda yol gösterici olan, Ulu önderimiz ve Başöğretmenimiz Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez 2019K12-149045 nolu proje ile Türkiye Cumhuriyeti (T.C.) Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından ve 122E352 nolu proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER .....	3
2.1. Elektromanyetik Girişim.....	3
2.2. Elektromanyetik girişim kalkanlama .....	4
2.3. Kalkanlama geometrisi.....	6
2.4. Kyropoulos Yöntemi .....	9
2.5. Aerosol Jet Baskı Tekniği .....	11
2.6. RF Magnetron Püskürtme Sistemi .....	12
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	15
3.1. Kyropoulos tekniği ile optik sınıf-1 kalitede safir kristalinin büyütülmesi .....	15
3.2. 100 mm çaplı c-eksenli safir silindir üretimi .....	17
3.3. C-eksenli safir dilim üretimi ve yüzeyinin işlenmesi.....	17
3.4. Metal ağların Aerosol Jet Baskı Tekniği ile üretimi .....	20
4. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ.....	23
4.1. Fourier Dönüştümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometresi .....	23
4.2. UV-VIS Spektroskopisi .....	24

	<b>Sayfa</b>
4.3. X-Işını Kırınım Sistemi (XRD).....	25
4.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	26
<b>5. BULGULAR</b> .....	<b>29</b>
5.1. Üretilen safir optik pencerenin optik karakterizasyonu .....	29
5.2. Üretilen safir optik pencerenin yüzey karakterizasyonu .....	30
5.3. Üretilen safir optik pencerenin yapısal karakterizasyonu .....	31
5.4. Safir optik pencere üzerine yansıma önleyici kaplama tasarımı .....	31
5.5. Metal Örgü kaplama yapılmış safir optik pencerenin optik karakterizasyonu ...	38
5.6. Izgaraların genişliklerinin profilometre ile belirlenmesi.....	39
5.7. EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin yüzey direnci .....	40
5.8. EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin kalkanlama etkinliği ölçümü .....	42
<b>6. SONUÇ VE TARTIŞMA</b> .....	<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>47</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>51</b>

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kare metal örgü ağ.....	6
Şekil 2.2. Ag metal ağ yapısının şematik gösterimi .....	7
Şekil 2.3. Safir kristali büyütme şeması .....	10
Şekil 2.4. Aerosol Jet Baskı Şematik Diyagramı.....	12
Şekil 2.5. RF magnetron püskürtme sistemi.....	13
Şekil 3.1. (a) Autocad programı ile çizilen metal örgü kaplama ve elektrotlar (b) Metal ağların çizgi genişlikleri .....	21
Şekil 4.1. X-ışını kırınımı .....	26
Şekil 4.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu Şematik Diyagramı .....	27
Şekil 5.1. Safir optik pencere optik geçirgenlik grafiği.....	29
Şekil 5.2. Üretilen yüzeyi parlatılmış safir optik pencerenin 2 ve 3-boyutlu AFM görüntüleri .....	30
Şekil 5.3. Yüzey pürüzlülük değeri .....	30
Şekil 5.4. Safir optik pencere XRD grafiği .....	31
Şekil 5.5. Safir kristali ve SiO <sub>2</sub> filminin kırılma indisleri .....	32
Şekil 5.6. 50, 100 ve 200 nm kalınlıklarında SiO <sub>2</sub> ile kaplanan safirin optik geçirgenlik değerlerinin modelleme grafiği .....	33
Şekil 5.7. Safir üzerine, 100 nm kalınlıklı SiO <sub>2</sub> ve onun üzerine 50, 150 ve 200 nm kalınlıklarında kaplanan MgF <sub>2</sub> film yapısının geçirgenlik spektrumu.....	34
Şekil 5.8. 100-800 nm kalınlıklı tekli katman SiO <sub>2</sub> filmleri ile kaplanan safirin optik geçirgenlik spektrumu .....	35
Şekil 5.9. SiO <sub>2</sub> ince filmi ile kaplanmış safir optik pencerenin 2 ve 3-boyutlu AFM görüntüsü. ....	36
Şekil 5.10. İki yüzeyi 650 nm SiO <sub>2</sub> filmi kaplanan safir pencerenin optik geçirgenlik spektrumu .....	37
Şekil 5.11. Metal örgü kaplı safir pencerenin optik spektrumu.....	38

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.12. Çizgi genişliklerinin profilometre sonuçları .....	39
Şekil 5.13. Ağ örgüye ait çizgiler arası boşlukların genişliklerinin profilometre sonucu .....	40
Şekil 5.14. 4 nokta prob tekniği şematik diyagramı .....	41
Şekil 5.15. Kalkanlama etkinliği ölçüm sonucu .....	43



## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. (a) Başlangıç malzemesi Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (b) Rehber Kristali .....	15
Resim 3.2. Kyropoulos sistemi .....	16
Resim 3.3. Safir kristali .....	16
Resim 3.4. Radyal matkap .....	17
Resim 3.5. Elmas tele sahip telli-kesme sistemi .....	18
Resim 3.6. Aşındırma-Parlatma Sistemi .....	19
Resim 3.7. (a) Aşındırma-Parlatma öncesi üretilen safir optik pencere (b) Aşındırma-Parlatma sonrası üretilen safir optik pencere.....	20
Resim 3.8. Optemec Marka Aerosol Jet 5X sistemi .....	21
Resim 3.9. Metal örgü kaplamalı safir optik pencere .....	22
Resim 4.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) (Bruker Vertex 80)..	24
Resim 4.2. Perkin Elmer Lambda 2S UV-VIS spektrometre cihazı.....	25
Resim 4.3. Nanomagnetic Instrument marka hpAFM cihazı .....	27
Resim 5.1. İki yüzeyi SiO <sub>2</sub> kaplı safir optik pencere.....	36
Resim 5.2. Safir EMI kalkanlayıcı 4 prob tekniği .....	41
Resim 5.3. Dört nokta prob sistemi .....	42

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
°	Derece
°C	Santigrat derece
$\mu$	Manyetik geçirgenlik
Å	Angstrom
Ag	Gümüş
E	Elektrik alan
eV	Elektron-volt
$\epsilon$	Elektriksel iletkenlik
$f$	Frekans
g	Çizgiler arası boşluk
H	Manyetik alan
Hz	Hertz
I	Akım
N	Newton
nm	Nanometre
R	Direnç
t	Kalınlık
V	Volt
w	Çizgi genişliği
Z	Empedans
$\delta$	Yüzey derinliği
$\theta$	Açı
$\lambda$	Dalga boyu
$\pi$	Pi sayısı
$\mu\text{m}$	Mikrometre

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AFM</b>	Atomik kuvvet mikroskobu
<b>AJB</b>	Aerosol Jet Baskı
<b>AR</b>	Yansıma önleyici
<b>dB</b>	Desibel
<b>EMI</b>	Elektromanyetik Girişim
<b>FTIR</b>	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
<b>FWHM</b>	Maksimum yarısı tam genişlik
<b>KÖ</b>	Kızılötesi
<b>RF</b>	Radyo frekansı
<b>SE</b>	Kalkanlama Etkinliği
<b>UV-VIS</b>	Morötesi-görünür bölge spektroskopisi
<b>XRD</b>	X-ışını kırınım sistemi

## 1. GİRİŞ

Günümüzde görüntüleme teknolojisinin geliştirilmesinin yanında optik ve elektro-optik sistemlerde görüntüleme ve iletişim kalitesini etkileyen problemlerin üstesinden gelinmesi önem arz etmektedir. Bu problemlerden biri elektromanyetik girişimin (EMI) oluşturduğu yıkıcı etkidir. Yeni bir kirlilik türü olarak değerlendirilen elektromanyetik girişim (EMI), elektronik ekipmanların kullanımlarını etkilemesi ve insan sağlığına yönelik potansiyel tehditleri beraberinde getirmesi nedeniyle ciddi bir sorun haline gelmiştir. Şimdiye kadar, mükemmel optik geçirgenliğe sahip yüksek performanslı EMI korumasının elde edilmesi, mobil iletişim cihazları, elektronik ekranlar ve uçaklar gibi çeşitli optoelektronik uygulamalarda bir zorluk olmaya devam ediyordu. Eş zamanlı olarak yüksek şeffaflık ve EMI kalkanlama etkinliği (SE) elde etmek için, optik olarak şeffaf ve elektriksel olarak iletken özelliklere sahip malzemeler kullanılmıştır. Grafen, metalik nanoteller ve karbon nanotüpler dahil olmak üzere, bazı malzemeler hem yüksek SE hem de optik geçirgenliğe ulaşmaları zor olduğundan yararlı olmamaktadır. Bu olumsuzluklar EMI'den etkilenen bileşenlerin önüne iletken ızgaralardan oluşturulan EMI kalkanlayıcı optik pencerelerin geliştirilmesi ile azaltılabilir. Hava, kara ve deniz savunma sistemlerinde kullanılan optik pencereler sert, çizilmeye dayanıklı, ultraviyole bölgeden kızılötesi dalga boylarına kadar geniş bant iletimi sağlamalıdır. Bu nitelikleri en iyi karşılayan optik pencere malzemesi safir kristalidir. Safir, mükemmel optik, mekanik, yüksek sıcaklık, aşınma direnci ve dielektrik özellikleri nedeniyle birçok yüksek teknoloji uygulamasında kullanılmıştır. Ancak pahalıdır ve kullanılan safir hacmi sınırlıdır. Safir, alüminyum oksidin ( $Al_2O_3$ ) tek kristal halindedir. Optik, mekanik özellikleri ve yüksek stabilite derecesi nedeniyle safir, büyük gözetleme pencereleri, yüksek hızlı füze kubbeleri, kızılötesi pencereler, lazer pencereler vb. gibi birçok yüksek teknoloji uygulamasında kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan EMI kalkanlayıcının safir kristali Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan kyropoulos sisteminde üretildi. Üretilen 100 kg'lık safir külçelerden 100 mm çapında c-eksenli safir silindirler elde edildi. Bu silindirlerden istenilen kalınlıkta safir dilimleri, elmas içeren çelik tel ile dilimlendi. İstenilen optik özelliklere ulaşabilmek için safir dilimin her iki yüzeyi aşındırma ve parlatma işlemlerinden geçirildi. Bu işlemlerden sonra optik geçirgenliği arttırmak için yapılan literatür araştırması sonucunda safir dilimin her iki yüzü  $SiO_2$  ile kaplandı. Kaplama sistemi

olarak RF magnetron sıçratma sistemi kullanıldı. EMI kalkanlayıcı olarak tasarlanan metal örgü ağlar tasarıma uygun bir şekilde Aerosol Jet Baskı Tekniği ile yapıldı. Kaplamalar sonrasında kalkanlama etkinliği ölçümleri alındı.

Tezin teorik bilgiler kısmında EMI kalkanlayıcı ile ilgili bilgiler, yapılan çalışmalar ve yaptığımız çalışmanın tasarımı ile ilgili detaylı bilgilere yer verildi. Gereç ve yöntemler bölümünde yapılan çalışmalar ve kullanılan sistemlerin detaylarına yer verildi. Bu bölümde safir kristalinin üretimi, tasarlanan metal örgü ağların baskısının yapıldığı Aerosol Jet Baskı Tekniğinden bahsedildi. Karakterizasyon yöntemleri kısmında Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezin’de bulunan Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, UV-VIS spektroskopisi, atomik kuvvet mikroskobu ve X-ışını kırınım sisteminin detaylarına yer verildi. Tezin bulgular bölümünde üretilen safir optik pencerenin optik karakterizasyon grafikleri, yüzey topoğrafyası ve pürüzlülüğü, safir kristalinin yapısal analizi, yüzey direnci ölçümü ve EMI kalkanlayıcı etkinliği ölçümleri ile birlikte bunların sonuçları bulunmaktadır.

Bu tez, yapılan çalışmalarla ilgili süreci ve bu çalışma sonucunda çıkan sonuçların detaylarını içermektedir.

## 2. TEORİK BİLGİLER

### 2.1. Elektromanyetik Girişim

Elektromanyetik girişim (EMI) genellikle elektronik cihazlarda gürültüye veya arızaya neden olabilecek ve hatta insan vücuduna zarar verebilecek birçok istenmeyen ışınım sinyalinden oluşur. Elektronik cihaz pazarının hızlı büyümesi, spektral bantların farklı iletişim kanallarına aşırı kalabalıklaşmasına neden olmakla kalmıyor, aynı zamanda ortamdaki elektromanyetik yayıcıların yoğunluğunu da artırıyor. Özellikle optik pencereler veya kubbeler için optoelektronik ekipmanlarda EMI korumanın gerçekleştirilmesi hala büyük bir zorluktur. Yüksek optik geçirgenlik ve güçlü EMI koruma etkinliği (SE), pratik uygulamalar için şeffaf EMI koruma malzemelerinin geliştirilmesini yönlendiren iki temel gereksinimdir [1]. EMI korumanın birincil mekanizması genellikle yansımadır. Elektromanyetik dalganın kalkan tarafından yansıtılması için, kalkanın elektromanyetik dalgadaki alanlarla etkileşime giren hareketli yük taşıyıcılara (elektronlar veya delikler) sahip olması gerekir. Sonuç olarak, yüksek bir iletkenlik gerekli olmasa da kalkan elektriksel olarak iletken olma eğilimindedir. EMI korumanın ikincil bir mekanizması genellikle emilimdir. Radyasyonun kalkan tarafından önemli ölçüde emilmesi için, kalkanın radyasyondaki elektromanyetik alanlarla etkileşime giren elektrik veya manyetik dipollere sahip olması gerekir [2]. EMI kalkanlama malzemelerinin tipik özelliği olan oldukça iletken malzemeler, aynı zamanda radyo dalgası ve mikrodalga rejimlerinde de işlev gören antenlerle ilgilidir [3]. EMI kalkanlaması için kullanılan malzemeler arasında metaller, karbonlar, seramikler, iletken polimerler, kompozitler ve yarıiletkenler bulunur. Metaller ve karbonlar, yüksek iletkenlikleri mevcudiyeti nedeniyle baskın malzemelerdir. Seramikler daha az etkilidir, ancak içlerindeki simgeler elektromanyetik dalgadaki elektrik alanıyla etkileşime girebilir. Polimerler, iletken tipte olmadığı için daha az tercih edilen malzemelerdir [2]. EMI kalkanı, elektromanyetik dalganın emilimi veya yansıması yoluyla ortaya çıkar ve böylece insanları ve diğer aletleri radyasyon kaynağından korur. İletken malzemeler, yani metaller ve karbon malzemeler, radyasyonun yansımasıyla koruma sağlarken, manyetik malzemeler genellikle emilim mekanizmasıyla koruma sağlar [4]. Grafen, metalik nanoteller ve karbon nanotüpler ucuz olmasına rağmen yüksek kalkanlama etkinliği ve optik geçirgenliğe ulaşmaları zor olduğu için çok tercih edilmemektedir. İndiyum kalay oksit şeffaf EMI koruyucu malzeme olarak uygulanıyor; ancak kırılğan

olması, yüksek işlem sıcaklığında veriminin düşük olması ve kızılötesi bölgede emici doğaları nedeniyle yeni nesil EMI kalkanlama malzeme adaylarının dışında tutuluyor. Son zamanlarda, metalik ağlar yalnızca olağanüstü optoelektronik performansı nedeniyle değil aynı zamanda tasarım esnekliği nedeniyle de büyük ilgi görmektedir. Yüksek geçirgenlik, yüksek kalkanlama etkinliğine sahip olmaları, oluşturulan metalik ağların yüksekliklerinin, genişliklerinin, eğimlerinin ve şekillerinin değiştirilerek ayarlanabiliyor olması metalik ağların tercih edilmesinde en büyük etkenlerdir [5]. Tek kristalli  $\alpha$ -alüminyum oksit veya safir, mükemmel mekanik ve optik özelliklerin yanı sıra kimyasal ve termal korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Safir, optik, lazer, yarı iletken ve optoelektronik endüstrilerinde yaygın uygulamalara sahiptir. Uygulamaların çoğu için, dökme safirin genellikle sırasıyla dilimleme, taşlama, alıştırma ve cilalama yoluyla yüksek yüzey bütünlüğüne sahip bir alt tabaka halinde şekillendirilmesi gerekir [6]. Çekici optik ve mekanik özellikleri ve yüksek stabilite derecesi nedeniyle safir, büyük gözetleme pencereleri, yüksek hızlı füze burun konileri, kızılötesi pencereler, lazer pencereler vb. Gibi birçok yüksek teknoloji uygulamasında rutin olarak kullanılmıştır. Ayrıca kimyasal dayanım uygulamaları ve yüksek sıcaklık kullanımı da safir ile yapıldı [7].

## 2.2. Elektromanyetik girişim kalkanlama

Kalkanlama esas olarak radyasyonun soğurulmasını ve yansımalarını içerir. Yansıma mekanizması, radyasyonun koruyucu malzemedeki sekmesiyle sonuçlanır. Yansıtılan radyasyon çevre için, özellikle orada bulunan insanlar için istenmeyen olabilir. Bu nedenle, güvenlik açısından, kalkanlama için soğurma mekanizması tercih edilir. Kalkanlamaya bağlı güç kaybı, desibel (dB) cinsinden ifade edilir ve kalkanlama etkinliği veya toplam kalkanlama etkinliği ( $SE_T$ ) olarak adlandırılır. Bu kaybın absorpsiyondan kaynaklanan kısmı absorpsiyon kaybı ( $SE_A$ ) olarak bilinir. Bu kaybın yansımadan kaynaklanan kısmı, yansıma kaybı ( $SE_R$ ) olarak bilinir. Yüksek frekanslardaki elektromanyetik radyasyon, bir elektrik iletkeninin yalnızca yakın yüzey bölgesine nüfuz eder. Buna cilt etkisi denir. Bir iletkene giren düzlem dalganın elektrik alanı, iletkenin derinliği arttıkça üstel olarak düşer. Alanın olay değerinin  $1/e$ 'sine düştüğü derinliğe yüzey derinliği ( $\delta$ ) denir ve yüzey derinliği eşitliği şu şekilde verilir:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.1)$$

Burada  $f$  : frekans,  $\mu$  ( $= \mu_0\mu_r$ ) : manyetik geçirgenlik,  $\mu_r$  : görelî manyetik geçirgenlik,  $\mu_0$  ( $= 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ ) : boşluğun manyetik geçirgenliği ve  $\sigma$  : elektriksel iletkenliktir ( $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ). Dolayısıyla frekans, iletkenlik veya geçirgenlik arttıkça deri derinliği azalır [3].

Elektromanyetik dalga bir ortamdan başka bir ortama geçerken üstel olarak azalmaktadır. Elektromanyetik dalgadaki bu azalma, kalkanlama içerisinde indüklenen akımlar, ohmik kayıplar ve kalkan malzemesinin ısınması gibi nedenlerle oluşmaktadır. Bundan dolayı iletilen dalganın elektrik ve manyetik alanları aşağıdaki eşitliklerde verildiği gibidir.

$$E_i = E_g e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (2.2)$$

$$H_i = H_g e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (2.3)$$

Bir kalkanlama malzemesinde meydana gelecek soğurma kaybı ise aşağıdaki eşitliktedir.

$$SE_A = 20 \log e^{\frac{t}{\delta}} \text{ dB} \quad (2.4)$$

Kalkanlama etkinliğindeki yansıma kaybı farklı iki ortam arasındaki empedanstaki kaynaklanır. Bu iki ortam arasındaki empedans farkının artması yansıma kaybında artışa neden olacaktır. Ayrıca bir kalkan malzemesi, kalkan ortamına giren ve çıkan elektromanyetik dalganın empedans farkıyla karşılaşacağı da bilinmektedir. Empedans farkı ile elektrik ve manyetik alan değerindeki değişim aşağıda eşitliklerdeki şekildedir:

$$E_t = \frac{4Z_w}{Z_s} E_0 \quad (2.5)$$

$$H_t = \frac{4Z_w}{Z_s} H_0 \quad (2.6)$$

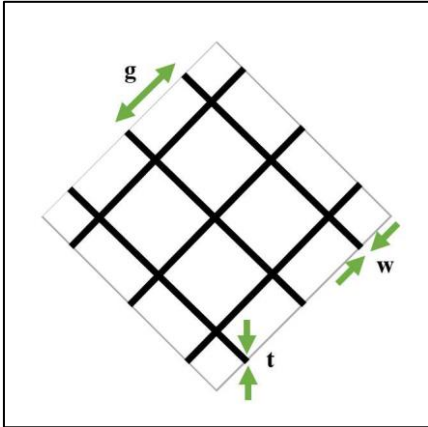
Burada  $E_t$  ve  $H_t$  kalkandan geçen elektrik ve manyetik alan,  $Z_w$  ortamdaki dalga empedansı ve  $Z_s$  kalkanın empedansıdır. Düzlem dalgalar için düşünüldeğinde,  $Z_w$  değeri boşluğun empedansına ( $377 \Omega$ ) eşit olacaktır. Yansıma kaybı şu şekilde ifade edilir:

$$SE_R = 20 \log \left( \frac{94,25}{Z_s} \right) \text{ dB} \quad (2.7)$$

### 2.3. Kalkanlama geometrisi

Optoelektronik uygulamalar, elektromanyetik girişime (EMI) karşı koruma sağlamak için özel koruma çözümleri gerektirir. Bu, optik olarak şeffaf ve yüksek performanslı bir elektromanyetik koruyucu malzemeye olan ihtiyacı vurgulamaktadır. Metal ağ hafiftir, esnektir ve mekanik olarak dayanıklıdır, ayrıca düşük maliyet ve bulunabilirlik kolaylığı gibi pratik avantajlar sunar. Metal ağ, karmaşık geometriler halinde şekillendirilme yeteneğine sahiptir ve benzersiz şekilli bileşenlerin korunmasına olanak tanır. Ağ boyutuna, malzemelere, tel çaplarına ve ağ desenlerine bağlı olarak piyasada çok çeşitli metal ağlar mevcuttur. Bu faktörler ve bunların birbirleriyle olan etkileşimleri, ağın hem ekranlama etkinliğini hem de optik şeffaflığını etkiler. Metal ağlar çoklu fiziksel boyutlar ve parametrelerle karakterize edilir. Zorlu veya aşırı çevre koşullarında EMI koruması gerekiyorsa, ağ malzemesinin bu gereksinim dikkate alınarak seçilmesi gerekir. Ham metal daha pahalı olduğundan, korozyona dayanıklı bir ağın malzemesi ekranlama maliyetini büyük ölçüde etkileyebilir. Paslanmaz çelik, gümüş veya alüminyum gibi farklı metallerden yapılan ağın özellikle büyük ölçekli üretimde gözle görülür bir fiyat farklılığına sahip olacağı açıktır.

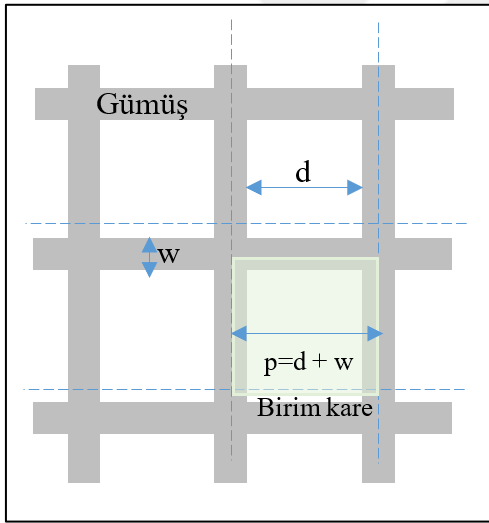
Önemli ağ ölçümleri tel çapı, açıklık boyutu ve açık alandır. Şekil 2.1'de genelleştirilmiş bir ağ gösterilmektedir; burada  $t$ , tel kalınlığı,  $w$ , çizgi genişliği ve  $g$ , ağ aralığı gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Kare metal örgü ağ [8]

Tüm metal ağların tek biçimli veya kare bir ızgaraya sahip değillerdir. Aslında rastgele örgü desenleri araştırılmış ve avantajlı optik özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Rastgele bir ağ deseni dikkate alınır, ortalama ağ aralığı, Şekil 2.1'deki  $g$  miktarının ölçümü için kullanılabilir. Daha kalın tel çapına, daha küçük açıklıklara veya daha az açık alana sahip ağlar için ağların daha yoğun olduğu kabul edilir. Bu faktörler ekranlama performansını ve optik şeffaflığı doğrudan etkiler. Oldukça şeffaf bir ekranlama çözümü istendiğinde sonuç genellikle ekranlama performansı ile görünürlük arasında bir dengedir [8].

Düzenli metal ağ desenleri, metal bazlı şeffaf EMI kalkanlayıcı elektrot teknolojilerinden biri olarak kapsamlı bir şekilde araştırılmış; farklı frekans aralıkları için geliştirilmeye devam etmektedir [9]. Geliştirme çalışmaları, yüksek optik geçirgenlik, yüksek kalkanlama verimliliği elde edilmesine odaklanmaktadır [10, 11]. Ayrıca düşük maliyetli üretim diğer bir çabadır.



Şekil 2.2. Ağ metal ağ yapısının şematik gösterimi

Optik geçirgenliği ve elektrik iletkenliği, ağ deseninin hat genişliği ( $w$ ), çizgiler arası mesafe ( $p$ ) ve kalınlığının ( $t$ ) değiştirilerek geniş bir aralıkta ayarlanabilir olması düzenli metal ağların bir avantajıdır.

Metal ağların optik geçirgenlik ve iletkenlik ihtiyacına göre tasarlanması aşağıdaki yöntemler dikkate alınarak gerçekleştirildi:

Gümüş ağ yapısının Şekil 2.2’de gösterilen büyüklükler cinsinden optik geçirgenlik değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$T_{ağ} = 100 \times \left( \frac{d^2}{p^2} \right) \quad (2.8)$$

Bu tezdeki hedefimiz optik geçirgenliği  $> \%70$  olan metal ağ yapısı geliştirmektir. Bu hedef için  $w = 25 \mu\text{m}$  ve  $p = 350 \mu\text{m}$  olacak şekilde ağ tasarımı ile yukarıda tanımlanan eşitlikten optik geçirgenlik  $T_{ağ} = \sim \%86$  olarak hesaplanmaktadır.

Kullanılacak safir alttaşın ortalama optik geçirgenliği  $\%85$  civarında değiştiğinden hedeflenen geçirgenliğin belirlenmesinde bu değer dikkate alınmalıdır. Toplam geçirgenlik:

$$T_{top} = T_{safir} \times T_{ağ} \quad (2.9)$$

olur.  $T_{safir} = \%85$  ise  $T_{top} = \%73$  civarında olacaktır. Bu nedenle, hedef optik geçirgenlik değeri üzerinde bir optik geçirgenlik için safir pencerenin her iki yüzeyine yansıma önleyici (AR) ince film kaplama gerçekleştirildi.

Elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlamasında düşük yüzey direnci, kalkanlama malzemesinin elektromanyetik dalgaları etkili bir şekilde yansıtması ve absorbe etmesi için kritik öneme sahiptir. Bundan dolayı kalkanlama malzemesi seçilirken düşük yüzey direncine sahip malzemeler tercih edilir. Elektriksel yüzey direnci aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (2.10)$$

Bu eşitlik sürekli iletken yüzeylere sahip kalkanlama malzemelerinin elektriksel yüzey direnci hesaplanırken kullanılmaktadır. Metal örgü ağlar sürekli iletken yüzeyler olmayıp  $g$  ve  $l$  parametrelerine sahiptirler. Metal örgü ağların elektriksel yüzey direnci hesaplanırken etkin yüzey direnci eşitliği kullanılır [12].

$$R_{eff} = \frac{g}{l} R_s \quad (2.11)$$

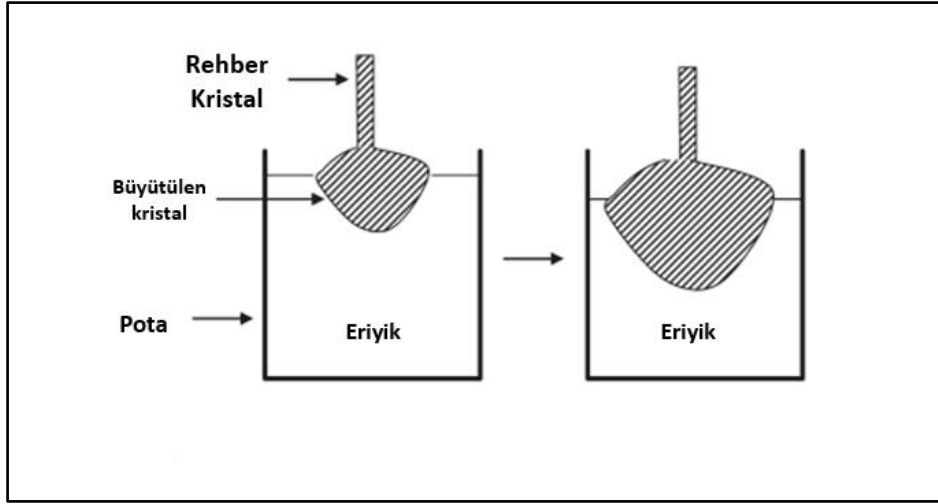
Optik geçirgenlik için belirlenen  $w = 25 \mu\text{m}$  ve  $p = 350 \mu\text{m}$  olacak şekilde ağ geometrisinde çizgi kalınlığı  $0,5 \mu\text{m}$  olarak üretilmesi durumunda ( $\rho = 1,6 \times 10^{-8} \text{ Ohm.m}$ ),  $R_{ağ} = 7,5 \text{ Ohm/kare}$  olarak hesaplandı. Çizgi kalınlığının  $1-2 \mu\text{m}$  seviyesine çıkartılması ile yüzey direnci için daha düşük değerler elde edilmesi mümkündür.

#### 2.4. Kyropoulos Yöntemi

Tek kristal safir, geniş bir dalga boyu aralığında yüksek sertliğe, mükemmel kimyasal kararlılığa ve optik şeffaflığa sahip bir malzemedir. Bu avantajları nedeniyle mühendislik, askeri tedarik, havacılık, optik ve sağlık hizmetleri dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Büyük çaplı tek kristaller için Kyropoulos (Ky) ve Czochralski (Cz) kristal büyütme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerdeki tohumlama işlemi, tohum kristalleri ile erimiş malzemenin yüzeyi arasında temas başlatarak ilk kristalleşmeyi başlatmalıdır. Ky ve Cz yöntemlerinde, tohumlama işlemi tüm büyüme süreci boyunca külçe büyümesinin temelini oluşturur [13]. Kyropoulos yöntemi, düşük sıcaklık gradyanları ve yavaş büyüme hızları sayesinde büyük boyutlu ve homojen kristallerin üretimini mümkün kılar. Bu yöntem, özellikle düşük gerilimli ve hatasız kristaller üretmek için tercih edilir. Safir üretiminde en kritik nokta, eriyik halindeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'nin yavaşça soğutulmasıdır. Kyropoulos yöntemi, düşük sıcaklık gradyanlarıyla çalışır ve bu sayede kristal homojenliği sağlanır. Kyropoulos yöntemiyle safir üretiminde başlangıç malzemesi olarak yüksek saflıkta (%99,99 veya daha yüksek) alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kullanılır. Safir kristallerin kalitesi doğrudan kullanılan hammaddenin saflığıyla ilişkilidir. Safir kristalleri, gerekli kristalin çapına sahip bir molibden (Mo) potası içerisinde büyütülür. Kristal kalitesi büyük ölçüde Kyropoulos fırınının sıcak bölgesine bağlıdır. Kristaldeki ısı değişimi ve eriyik taşınımı iyi kontrol edilmelidir. Molibdenin pota oksidasyonu nedeniyle, büyüme süreci sırasında  $\text{MoO}_2$  oluşumunu önlemek için yüksek vakum gereklidir [14].

Kyropoulos yöntemi ile büyütme, genellikle dirençli ısıtıcı elemanlara sahip bir fırında gerçekleştirilir. Fırın, düzgün bir sıcaklık dağılımını sağlayan çok bölmeli bir sıcaklık kontrol sistemine sahiptir. Pota,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  başlangıç malzemesinin yerleştirildiği kısımdır ve genellikle platin, molibden veya tungsten gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerden üretilir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , fırında  $2000 - 2100 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklık,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'yi erime noktasının ( $2050 \text{ }^\circ\text{C}$ ) üzerine çıkararak eriyik hale gelmesini sağlamaktadır. Safirin kalitesini

artırmak için, fırın genellikle argon veya azot gibi inert gazlarla doldurulmaktadır. Bu atmosfer, eriyik sırasında olası oksidasyon veya safsızlık birikimini engeller. Eriyik, rehber kristal yerleştirilmeden önce birkaç saat boyunca sabit bir sıcaklıkta bekletilir. Tohumlama işlemi, kristalizasyonun başlangıcını oluşturur. Rehber kristal, eriyik yüzeyine temas ettirildiğinde eriyik ile rehber kristal arasında hassas bir sıcaklık dengesi sağlanır. Yaklaşık 5 – 10 dakika boyunca eriyik yüzeyinde tutulur. Bu süre zarfında kristalizasyon başlamalı ve düzgün bir yapı oluşmalıdır. Rehber kristal, 1 – 2 mm/s hızında yavaşça yukarı doğru çekilir. Bu hız, kristalin homojen bir şekilde büyümesini sağlamak için optimize edilmiştir [15].



Şekil 2.3. Safir kristali büyütme şeması

Büyüme sırasında fırın sıcaklığı yavaşça düşürülür ve eriyik içindeki kristal çekirdeğin dengeli bir şekilde büyümesi sağlanır. Kyropoulos yönteminde büyüyen kristalin üst kısmı genellikle yuvarlak veya silindirik bir şekil alır. Oluşan kristal külçesinin çapı çekme hızı ve sıcaklık kontrolüne bağlı olarak değişir. Kristal büyütüldükten sonra iç gerilimleri ve kusurları azaltmak için soğutma işlemi uygulanır. Fırın sıcaklığı yavaşça düşürülerek soğutma işlemi gerçekleştirilir. Ani sıcaklık düşüşü kristalde çatlama veya kusurların oluşmasına neden olmaktadır. Soğutma işleminden sonra farklı ağırlıklarda safir külçeleri elde edilmektedir. Bu safir külçe istenilen ekseninde kesilerek, kullanılacak amaca uygun şekillendirilebilmektedir [16].

## 2.5. Aerosol Jet Baskı Tekniği

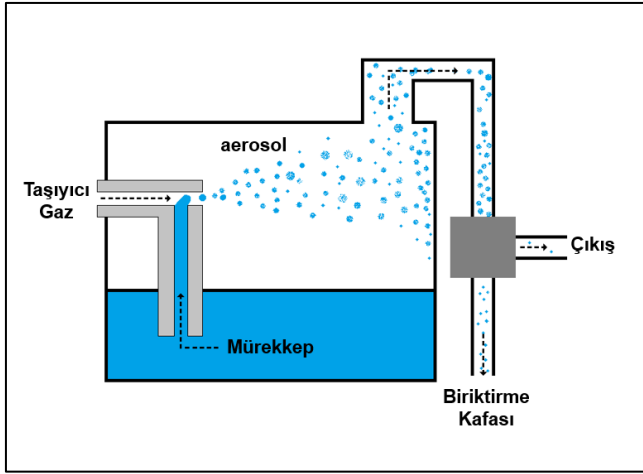
Son zamanlarda Aerosol Jet Baskı tekniği (AJB), biyomedikal alandan askeri uygulamalara ve baskılı yarı iletkenlere kadar bir çok çeşitli araştırmalarda uygulanan ve her geçen gün daha popüler bir teknoloji haline dönüşmektedir. AJB tekniği, 10  $\mu\text{m}$  kadar kk boyutta yapıların basılmasına olanak sağlayabilen temassız bir katmanlı üretim teknolojisidir. Ham madde viskozitesi 1 ile 1000 cp arasında olan çoğu mürekkep bu teknikte kullanılabilir. AJB tekniğinin baskı hızı, UPD (Universal Print Driver) baskıya göre daha fazladır. Ayrıca AJB tekniği ile düz olmayan yüzeylerde de kolayca baskı yapılabilir [17]. Sert, esnek veya uyumlu çeşitli alt tabakalara doğrudan baskı yapabilme yeteneği sayesinde, elektronik üretiminde kullanılan geleneksel tekniklere göre birçok avantaj sağlamaktadır. AJB tekniği, viskozitesi 1 cP ile 1000 cP arasında değişen çok çeşitli malzemeleri desteklediği için iki çeşit atomizasyon işlemi kullanılmaktadır. Dşuk viskozite (1- 5 cP) aralığına sahip malzemeler için ultrasonik atomizer ve daha yüksek viskozite (1 - 1000 cP) aralığına sahip olanlar için pnömatik atomizer kullanılmaktadır [18].

**Pnömatik Atomizasyon:** Pnömatik atomizasyon viskozitesi 1000 cP'ye kadar olan mürekkepleri atomize edebilmektedir. Sıkıştırılmış inert bir gaz (azot vb.), atomizer nozulunda genişleyerek yüksek hızlı bir gaz akışı üretir. Mürekkep hazneden atomizer nozulne doğru çekilir. Daha sonra yüksek hızlı gaz akışı, sıvı akışını damlacıklara böler ve bunları akış içinde askıya alır. Damlacıkları içeren gaz jeti rezervuarın yan duvarlarına çarparak daha büyük damlacıkları uzaklaştırır. Daha kk parçacıklar gazın içinde kalır ve biriktirme başlığına taşınır. Bu durum, yüksek bir gaz akışı gerektirdiğinden, taşıyıcı gazın bir kısmının çıkarılması gerekir. Aerosol biriktirme başlığına taşınır.

**Ultrasonik Atomizasyon:** Kk hacimli ( $\sim 2$  ml) ve dşuk viskoziteye sahip (1 – 5 cp) mrekkeplerden bir aerosol üretilir. Ultrasonik atomizörde mürekkep, piezoelektrik dönüştürücünün üzerindeki kk bir şişeye yerleştirilir. Bu dönüştürücü, bir sıvı aracılığıyla mürekkepli şişeye aktarılan yüksek frekanslı basınç dalgaları üretir. Bu şekilde üretilen kılcal dalgaların uçları sıkıştırılarak kk damlacıkların atomizasyonu sağlanır. Oluşan damlacıkların boyutu atomizasyon frekansı tarafından kontrol edilir. Atomize edilmiş damlacıklar daha sonra bir gaz akışına sürüklenir ve biriktirme başlığına taşınır. Pnömatik atomizör, geniş bir viskozite aralığı ve bir ile  mikrometre civarındaki nispeten büyük parçacık boyutları için kullanılabilirken, ultrasonik atomizör, nanopartikül

mürekkepleri veya metal organik mürekkepler için en uygundur. Pnömatik atomizasyonun dezavantajı, nebülizasyon için yüksek gaz akışının gerekli olması nedeniyle, taşıyıcı gazın bir kısmının çıkarılmasının gerekmesidir [19].

Literatür taramalarında, buna benzer yapılan çalışmalarda fotolitografi tekniği kullanıldı. Ancak bu teknik Aerosol Jet Baskı tekniğine göre daha uzun, maliyetli ve çok işlemlidir. Bu yüzden de bu çalışmada Aerosol Jet Baskı tekniği kullanıldı. Bu teknikte gümüş iletken mürekkep tercih edildi. Çünkü kullanılan iletken mürekkepler arasında iletkenliği en yüksek olan gümüştür [5].

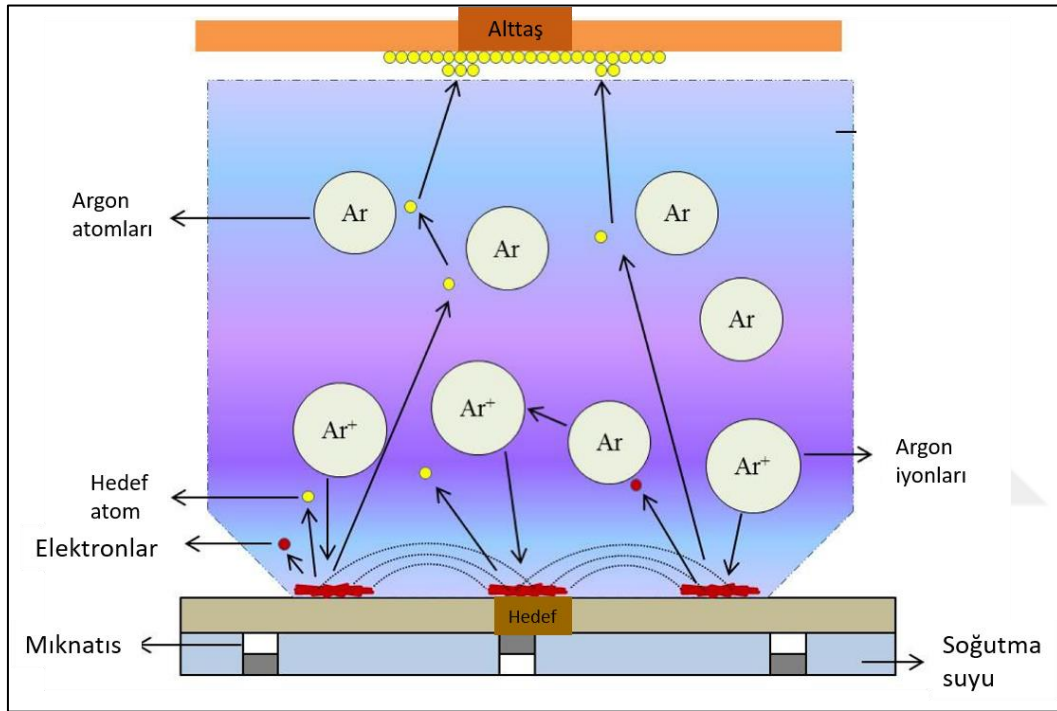


Şekil 2.4. Aerosol Jet Baskı Şematik Diyagramı

## 2.6. RF Magnetron Püskürtme Sistemi

Magnetron püskürtme çok çeşitli ince film malzemelerinin biriktirilmesi için en etkili işlem olarak kabul edilmektedir. Birçok durumda, magnetron püskürtmeli filmler artık diğer fiziksel buhar biriktirme işlemleriyle biriktirilen filmlerden daha iyi performans göstermektedir ve diğer yüzey kaplama teknikleriyle üretilen çok daha kalın filmlerle aynı işlevselliği sunabilmektedir. Magnetron püskürtme sistemleri hedef alanın yakınında güçlü bir manyetik alan oluşturur ve bu da hareket eden elektronların hedef yakınındaki manyetik akı çizgileri boyunca spiral şeklinde hareket etmesine neden olur. Bu düzenleme, plazmayı hedef alanın yakınında, alt tabaka üzerinde oluşturulan ince filmlere zarar vermeden sınırlar ve biriktirilen ince filmin stokiometrisini ve kalınlık düzgünlüğünü korur. Ayrıca, bir RF magnetron püskürtme sisteminde, üretilen elektronlar daha uzun bir mesafe kat eder, bu

nedenle inert gaz atomlarını ( $Ar^+$ ) daha fazla iyonlaştırma olasılığını artırır ve püskürtme işleminin verimliliğini artıran kararlı yüksek yoğunluklu plazma üretir. Temel bir püskürtme işleminde, bir alt tabaka üzerine biriktirilecek hedef malzeme, tipik olarak Argon ( $Ar^+$ ) gibi inert gaz iyonları olan enerjik iyonlarla bombardıman edilir. Bu inert gaz iyonlarının hedefe kuvvetlice çarpması, hedef atomların uzaklaştırılmasına (püskürtme olarak bilinir) neden olur ve bu atomlar alt tabaka üzerinde hedef malzemeninkine benzer ince bir stokiometri filmi olarak yoğunlaşır [20].



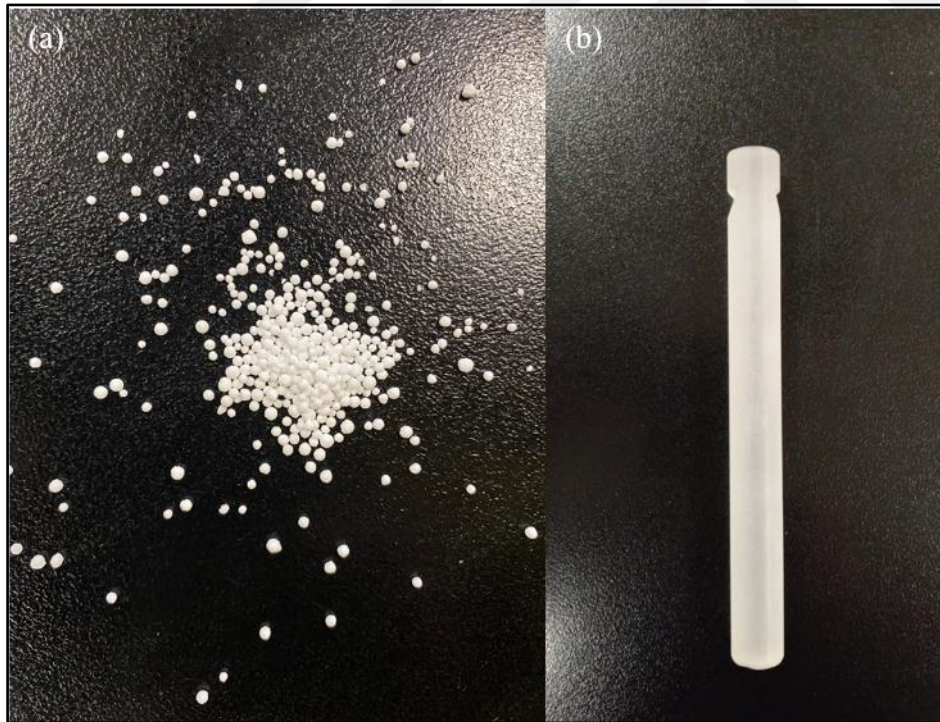
Şekil 2.5. RF magnetron püskürtme sistemi



### 3. DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1. Kyropoulos tekniği ile optik sınıf-1 kalitede safir kristalinin büyütülmesi

Safir kristalinin büyütülmesinde ham madde  $Al_2O_3$  'tür. Bu başlangıç malzemesi yüksek sıcaklıklara dayanabilen metal bir pota içerisinde eritilmektedir. Bu tez kapsamında üretilecek olan safir kristali Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Kyropoulos sisteminde üretildi. Başlangıç malzemesi olan  $Al_2O_3$  molibden pota içerisinde 2100 °C 'nin üzerinde vakum ortamında eritildi. Eritilen eriyiğın içerisinde rehber kristal yavaşça indirildi. Sıvı-katı arayüzeyinin soğutulması ve oluşabilecek kusurların engellenmesi için büyütme süresi boyunca argon gazı verildi. Kyropoulos tekniği ile safir kristali büyütme işleminde 100 kg safir elde külçesi üretildi. Yapılan optik analizde külçe içerisinde hava kabarcıkları oluşmadığı; büyütülen kütlenin %70 oranının optik sınıf 1 ve 2 kalitesinde optik pencere üretimine uygun olduğu değerlendirildi.



Resim 3.1. (a) Başlangıç malzemesi  $Al_2O_3$  (b) Rehber Kristali



Resim 3.2. Kyropoulos sistemi



Resim 3.3. Safir kristali

### 3.2. 100 mm çaplı c-eksenli safir silindir üretimi

Kyropoulos yöntemi ile a-eksenli safir kristali üretildi. Safir kristalinin mekanik dayanımı en yüksek olanı c-eksenli safir kristalidir. Bunu elde edebilmek için radyal matkap kullanılarak safir kristali üretildi. (Resim 3.4). Safir külçe büyüme doğrultusuna (a-ekseni) dik yüzeyinden elmas karot uç yardımıyla sıvı ortamında oyularak (core drill) c-eksenli silindir üretildi.



Resim 3.4. Radyal matkap

### 3.3. C-eksenli safir dilim üretimi ve yüzeyinin işlenmesi

Kristal büyütme işlemi sonrasında istenilen özellikleri elde etmek için safir kristalinin dilimleme ve temiz bir yüzey oluşturmak için parlatma işlemleri yapıldı. İstenilen kalınlıkta safir dilimleri elde etmek için üzerinde elmas parçacıkları içeren çelik tel (300  $\mu\text{m}$  kalınlıkta) kullanıldı. Dilimleme işlemi Meyer Burger marka tek telli elmas kesici ile gerçekleştirildi (Resim 3.5). Dilimleme işleminde, lepleme-parlatma payları dikkate alınarak yaklaşık 5 mm kalınlığında safir dilimleri üretildi.



Resim 3.5. Elmas tele sahip telli-kesme sistemi

Bu tez kapsamında hedeflenen 5 nm'den küçük yüzey pürüzlülüğü elde edebilmek için safir dilimine aşındırma ve parlatma işlemi yapıldı. Aşındırma prosesi 3 aşamada gerçekleştirildi. Birinci aşamada 240 grit aşındırıcı kullanıldı. %15 aşındırıcı ve %85 distile su süspansiyonu ile 15 saat işlendi.

İlk 1 saat boyunca devir hızı 10 devir/dakika olarak ayarlandı. 2. saate girişte devir hızı kademeli olarak 5 devir/dakika arttırılarak 25 devir/dakika'ya çıkarıldı. 25 devir/dakika'nın üzerine çıkarıldığında derin çiziklerin arttığı belirlendi.

İkinci aşamada 400 grit aşındırıcı ile %15 aşındırıcı, %85 distile su süspansiyonu hazırlanarak 6 saat işlendi.

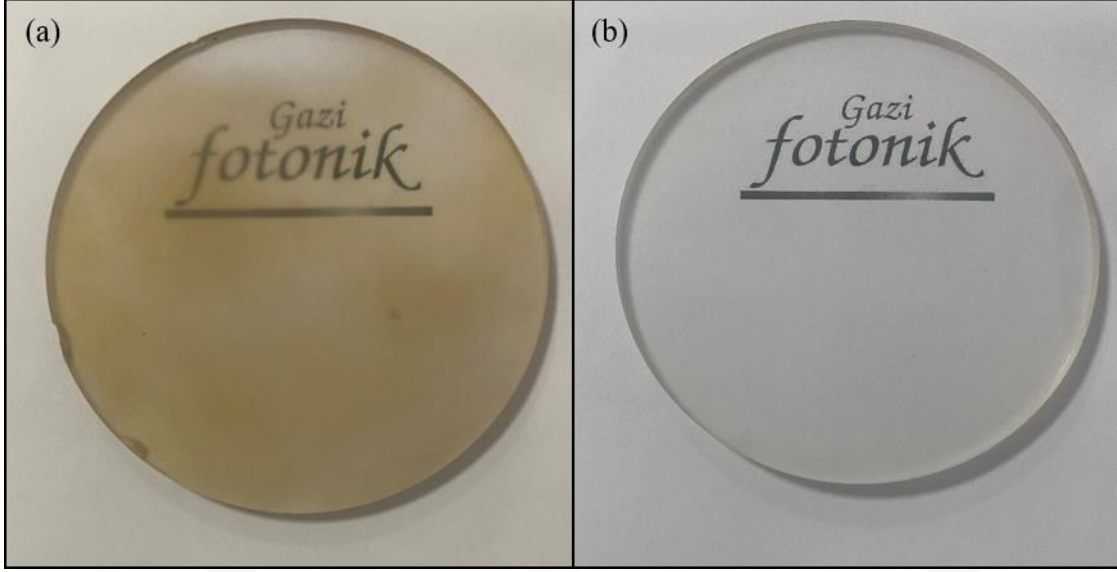


Resim 3.6. Aşındırma-Parlatma Sistemi

İkinci aşamada devir hızı düşürülmeden sabit 25 devir/dakika da bırakılarak işleme devam edildi.

Üçüncü aşamada ilk 2 aşamada olduğu gibi aynı oranlarda süspansiyon hazırlandı. Bu aşamada is 600 grit aşındırıcı kullanıldı. Üçüncü aşamada devir hızı çizilme ihtimali düşünülerek 20 devir/dakikaya düşürüldü. Aşındırma prosesi toplamda 27 saat sürdü.

Aşındırma işlemi tamamlandıktan sonra parlatma işlemine geçildi. Parlatma işlemi logipol 3  $\mu\text{m}$  CMD30 süspansiyonu kullanılarak yapıldı. Parlatma prosesi 2 aşamada gerçekleştirildi. Bu proste Logitech marka logipol 3 $\mu\text{m}$  CMD30 solüsyonu kullanıldı. Parlatma prosesinde hızlı kuruma ve tabla kenarından akma sorunu yaşadığı için %40 solüsyon, %60 distile su ile seyreltilerek bir süspansiyon hazırlandı ve bu süspansiyon kullanıldı. Parlatma işleminde devir hızı 45 devir/dakika olarak ayarlandı. Bu proses toplamda 38 saat sürmüştür.



Resim 3.7. (a) Aşındırma-Parlatma öncesi üretilen safir optik pencere (b) Aşındırma-Parlatma sonrası üretilen safir optik pencere

Gazi Fotonik'te üretilen safir disklerin sertlik ölçümleri Qness-Q30M Otomatik Vichers Sertlik Ölçüm Cihazı ile yapıldı. Sertlik değerinin 1980 Hv olduğu belirlendi. Bu değer, tek kristal safir diskler için bilinen uygun değerler aralığındadır.

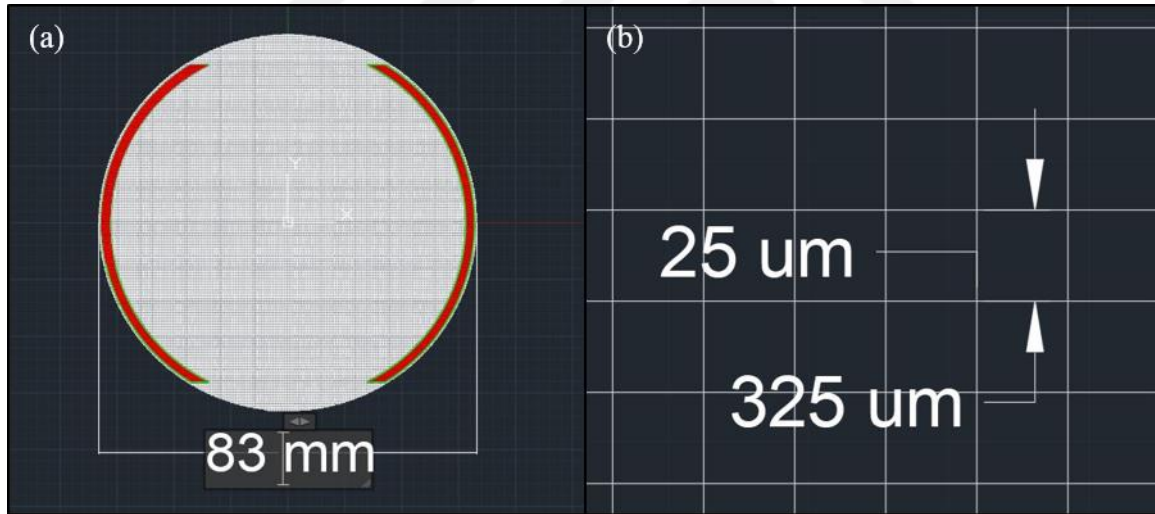
### 3.4. Metal ağların Aerosol Jet Baskı Tekniği ile üretimi

Tez kapsamında üretilen safir optik pencerelerin üzerine, tasarlanan Ag metal örgü kaplamalar ve kenar elektrotlar Optomec Aerosol Jet 5X baskı sistemi ile basıldı. Aerosol sisi oluşturmak için Ultrasonik atomizer (UA) ve 150 µm kalınlığında seramik nozül kullanıldı. Aerosol oluşturmak için, ultrasonik atomizere 0,680 V voltaj ve 25 °C sıcaklık uygulandı. Atomizer akış hızı, aerosolü ultrasonik atomizörden nozüle taşımak için kullanılan gazın akış hızıdır. Akış ne kadar yüksek olursa, nozül ucuna o kadar fazla malzeme birikimi olmaktadır. Sheat akış hızı, aerosol akışını odaklamak için kullanılan gazın akış hızını kontrol eder. Yapılan çalışmada atomizer akış hızı 20 sccm ve sheat akış hızı ise 54 sccm olarak uygulandı.

İstenilen kaplama şekilleri Şekil 3.1'da gösterilmektedir. Bu şekiller Autocad programı ile çizilip Optemec Aerosol Jet 5X baskı sistemine aktarıldı.



Resim 3.8. Optemec Marka Aerosol Jet 5X sistemi



Şekil 3.1. (a) Autocad programı ile çizilen metal örgü kaplama ve elektrotlar (b) Metal ağların çizgi genişlikleri



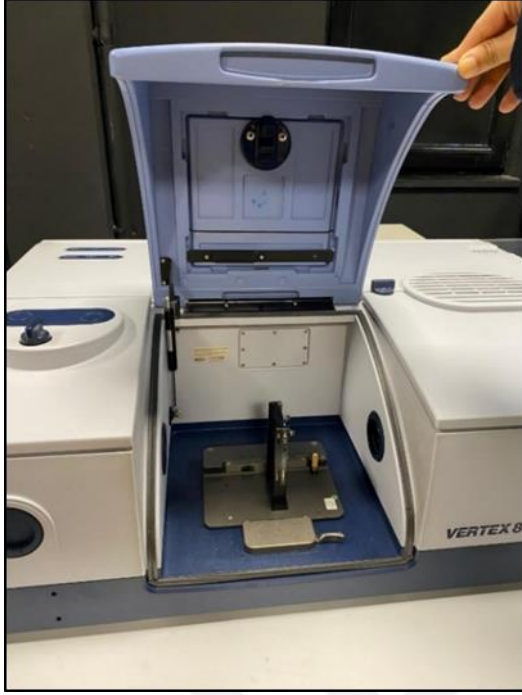
Resim 3.9. Metal örgü kaplamalı safir optik pencere

## 4. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

### 4.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometresi

Karakterizasyon yöntemleri arasında Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, bir örnekteki kimyasal bileşiklerin arasındaki olası moleküler bağların belirlenmesi için kullanılan araçlardan biridir. Bu yöntemde, moleküllerin kızılötesi (IR) ışığını absorbe etme özelliklerini kullanılarak örnekteki çeşitli kimyasal bağlar tespit edilir.

Moleküler spektroskopi, elektromanyetik dalga ile maddenin etkileşmesini inceler. Titreşimsel spektroskopi spektrumun kızılötesi bölgesinde oluşan moleküllerin titreşime bağlı olarak elektromanyetik dalganın absorplanması ya da saçılmasını inceler. Kızılötesi ışınım yaklaşık 1 ile 750  $\mu\text{m}$  arasındaki dalga boylarını kapsar. IR spektroskopisinde, kızılötesi bölgede tüm frekansları içeren  $I_0$  şiddetindeki elektromanyetik dalga, incelenmek istenen örnek üzerine gönderilir. Molekülün yapısına ve elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak geçen veya soğurulan ışık incelenir. Soğurulan dalganın frekansı iki titreşimsel enerji seviyesindeki enerji farkı ile belirlenir. Madde ile etkileşen elektromanyetik dalganın soğurulma miktarı Beer -Lambert yasası ile verilir [21]. Safir optik pencerelerin optik geçirgenliklerinin ölçümü için Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Vertex 80 spektroskopi cihazı kullanılmıştır.



Resim 4.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) (Bruker Vertex 80)

#### 4.2. UV-VIS Spektroskopisi

Morötesi-görünür bölge (UV-VIS) spektroskopisi görünür, ultraviyole ve yakın kızılötesi aralıklarındaki ışığı kullanan optik spektroskopinin fiziksel bir tekniğidir. Ultraviyole-görünür (UV-VIS) aralık, elektromanyetik spektrumun küçük bir parçasıdır ve genellikle yüksek enerjili ucundaki 190 nm'lik dalga boylarından, spektrumun düşük enerjili ucuna kadarki yaklaşık 750 nm'ye kadar olan bölge olarak tanımlanmaktadır. Malzemelerdeki 190 nm ile 750 nm aralığındaki bölgenin geçirgenlik, yansıtıcılık, absorpsiyon katsayısı veya optik bant aralığı gibi pek çok optik özelliklerini belirleyebilmek için UV-VIS spektrometresi kullanılır. Bu yöntemde, dalga boyu ultraviyole ve görünür aralıkta olan fotonlar malzemeye gönderilir ve gönderilen fotonların bir kısmı yansır, bir kısmı soğrulur ve bir kısmı da iletilir. İletilen fotonların şiddeti ölçülür [22].

Bu çalışmada, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan 200-1100 nm aralığında, halojen ve döteryum ışık kaynaklarına sahip Perkin Elmer Lambda 2s marka UV-VIS spektrometre cihazı, safir optik pencerelerin geçirgenlik spektrumunun ölçülmesinde kullanıldı.

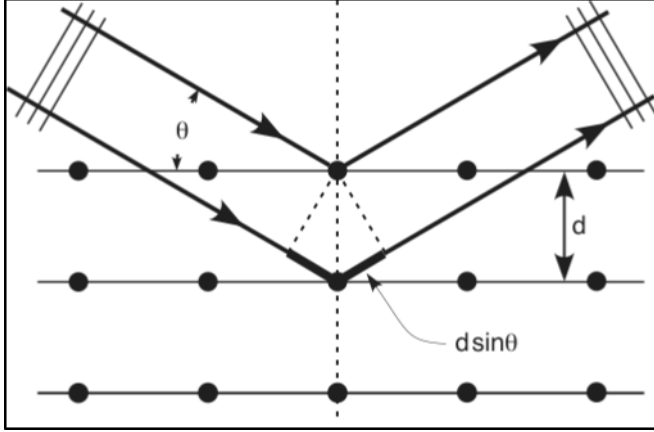


Resim 4.2. Perkin Elmer Lambda 2S UV-VIS spektrometre cihazı

### 4.3. X-Işını Kırınım Sistemi (XRD)

X-ışınları yüksek enerjili elektromanyetik ışınlardır. Elektromanyetik spektrumun gama ışınları ile ultraviyole ışınları arasında bulunan X-ışınları 200 eV ile 1 MeV aralığında enerjiye sahiptirler. X-ışınları dışardan gelen elektronlar ile atom kabuğunda bulunan elektronların etkileşmesi sonucunda üretilirler. Yüksek enerjiye sahip X-ışınları düşük dalga boylarına (0,1 - 100 Å) sahiptirler. Kristallerdeki atomlar arası mesafe yaklaşık olarak 0,2 nm olduğundan kristalin atomik yapısı X-ışını kırınım sistemi yardımı ile belirlenebilir.

X-ışınları madde ile zayıf etkileşimde bulunur. Bu nedenle, X-ışınları bir kırınım ile sınırlanır, yani gelen ışın birden fazla kırınıma uğratılmaz. Bragg, X-ışınlarının kırınımını düz kristal düzlemlerinden yansıma olarak kabul eder. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi paralel haldeki monokromatik X-ışını demeti kristale çarpar. Kırınıma uğrayan X-ışını demetinin şiddeti ölçülür. Gelen ve kırınıma uğrayan X-ışınlarının kristal ile yaptığı açı  $\theta$ 'dır. Yapıcı girişim oluşması için koşul, art arda yansıyan iki X-ışını demeti arasındaki yol farkının X-ışını demetinin dalga boyunun tam katları olmasıdır.



Şekil 4.1. X-ışını kırınımı

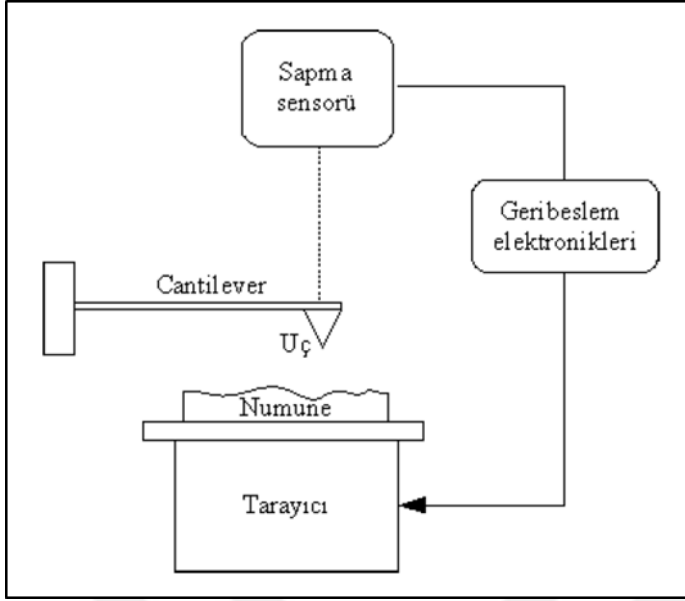
Bragg yasası:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4.1)$$

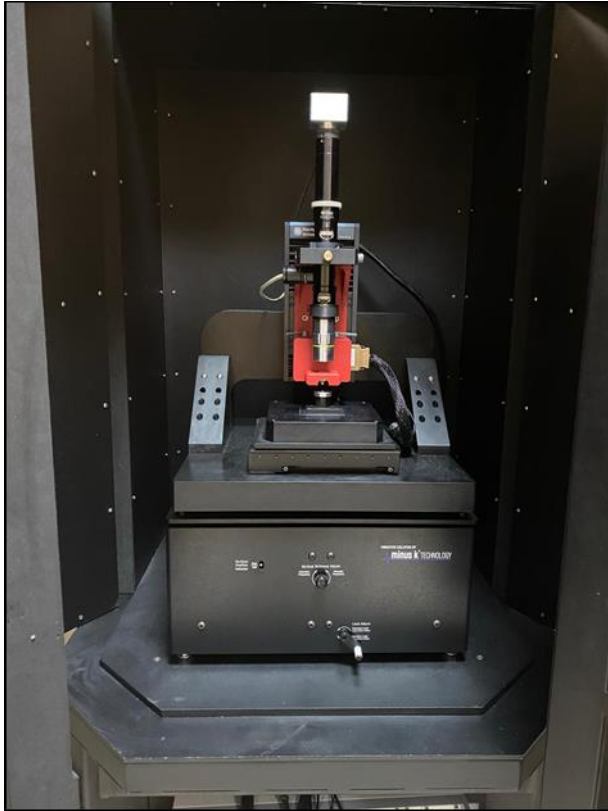
şeklinde ifade edilir. Eşitlikte;  $d$  düzlemler arası mesafeyi,  $\theta$  gelen X-ışını ile kristal düzlemi arasındaki açığı,  $n$ : dalgaboyu sayısını ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) ve  $\lambda$  ise gelen ışığın dalgaboyunu ifade etmektedir. X-ışını Kırınım cihazıyla tek kristal, polikristal ve ince filmlerin ayrıntılı kristal incelemeleri, fazları, tane boyutları, örgü parametreleri gibi analizleri XRD cihazıyla yapılır. Bu tez kapsamında XRD ölçümleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde APD 2000 PRO X-ışını kırınım cihazı ile yapıldı.

#### 4.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

AFM, yüzey topografisini angstrom seviyesinden 100 - 150  $\mu\text{m}$ 'ye kadar ölçebilen bir tekniktir. Tipik olarak bir AFM'nin çalışma prensibi çok basittir. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere cantileverın ucuna yerleştirilmiş birkaç mikron boyutundaki sivri iğne uç ile yüzey taraması yapılır. Tarama esnasında iğne ile yüzey atomları arasındaki atomik kuvvetler ( $10^{-11}$  -  $10^{-6}$  N) cantileverın sapmasına neden olur. Bu sapma bir sensör sayesinde ölçülür ve numune yüzeyinde taranan alanın yüzey topografisi elde edilir. AFM ile incelenen numunenin yüzey topografisinden parçacıkların büyüme modu, numunenin yüzey pürüzlülüğü, numune yüzeyindeki kusur tipleri ve kusur yoğunluğu gibi bilgiler elde edilebilir.



Şekil 4.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu Şematik Diyagramı



Resim 4.3. Nanomagnetic Instrument marka hpAFM cihazı

AFM ölçümleri kontak, non-kontak ve yarı-kontak (semicontact or tapping) olmak üzere üç farklı modda gerçekleştirilir. İşlemin modu uç-numune mesafesine göre belirlenir. Bu tez

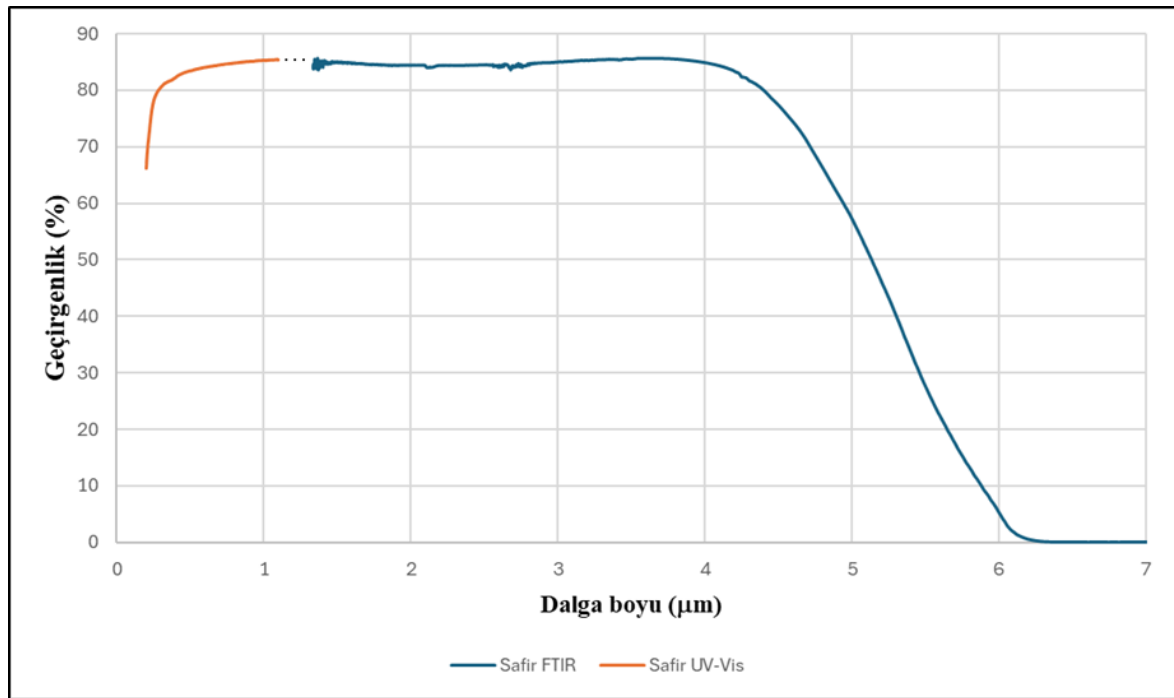
çalışması kapsamında yapılan AFM analizleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Nanomanyetik marka hpAFM sistemi ile yapıldı.



## 5. BULGULAR

### 5.1. Üretilen safir optik pencerenin optik karakterizasyonu

Şekil 5.1’de safir optik pencereye ait FTIR ve UV-VIS optik geçirgenlik grafiği görülmektedir. Safir optik pencereye ait geçirgenlik ölçümleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan Bruker marka Vertex 80 model FTIR spektrometresi ve Parkin Elmer Lambda 2S marka UV-VIS spektrometresi ile alındı.

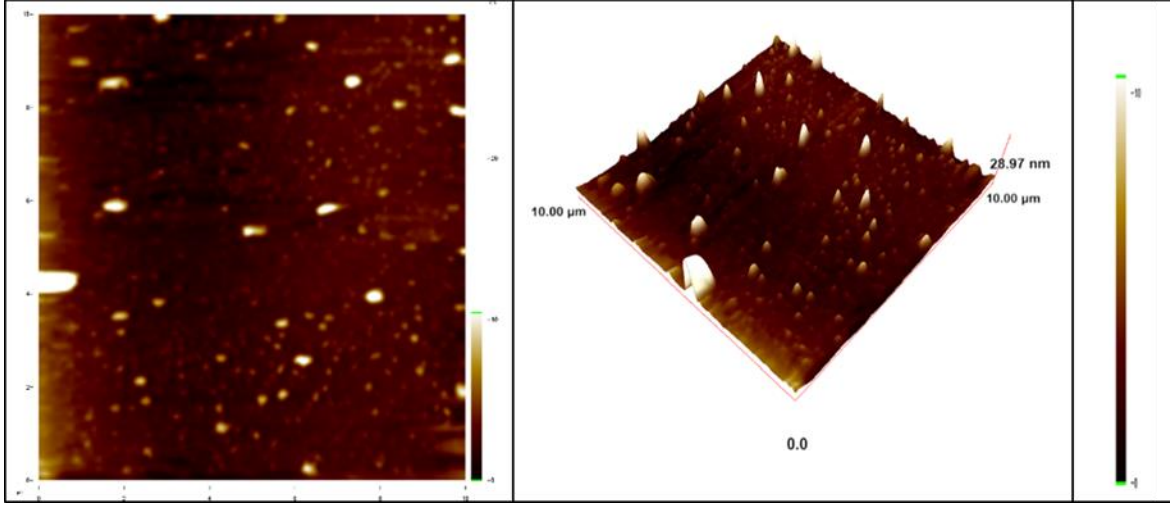


Şekil 5.1. Safir optik pencere optik geçirgenlik grafiği

FTIR spektrometresi ile 1,3 - 27 µm dalga boyu aralığında ölçüm alındı. FTIR ölçümleri sonucunda 1,36 – 4,24 µm aralığında safir optik pencerenin %86’ya yakın bir geçirgenlik sağladığı gözlemlendi. UV-VIS spektrometresi ile 0,2 - 1,1 µm dalga boyu aralığında alınan ölçümde 0,4 - 1,1 µm dalga boyu aralığında %84 - %85 aralığında bir geçirgenliğe sahip olduğu tespit edildi. Bu sonuçlar literatürde bulunan sonuçlar ile uyum içerisindedir [23].

## 5.2. Üretilen safir optik pencerenin yüzey karakterizasyonu

Üretilen safir optik pencerenin yüzey pürüzlülüğü tez kapsamında 5 nm'den düşük olması hedeflendi. Aşındırma ve parlatma işlemlerinden sonra yüzey pürüzlülüğü Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Nanomagnetics Instrument marka AFM cihazı ile dynamic modda  $3 \times 3 \mu\text{m}$  tarama alanında  $2 \mu\text{m/s}$  hız ile tarandı. Tarama sonucunda yüzey pürüzlülük değeri 0,76 nm elde edildi. Ayrıca,  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 'lik alanda alınan AFM görüntüsünden yüzey pürüzlülüğü (RMS) 1,93 nm olarak belirlendi. Bu değerlerin tez kapsamındaki hedeflerimiz için uygun olduğu değerlendirildi.



Şekil 5.2. Üretilen yüzeyi parlatılmış safir optik pencerenin 2 ve 3-boyutlu AFM görüntüleri

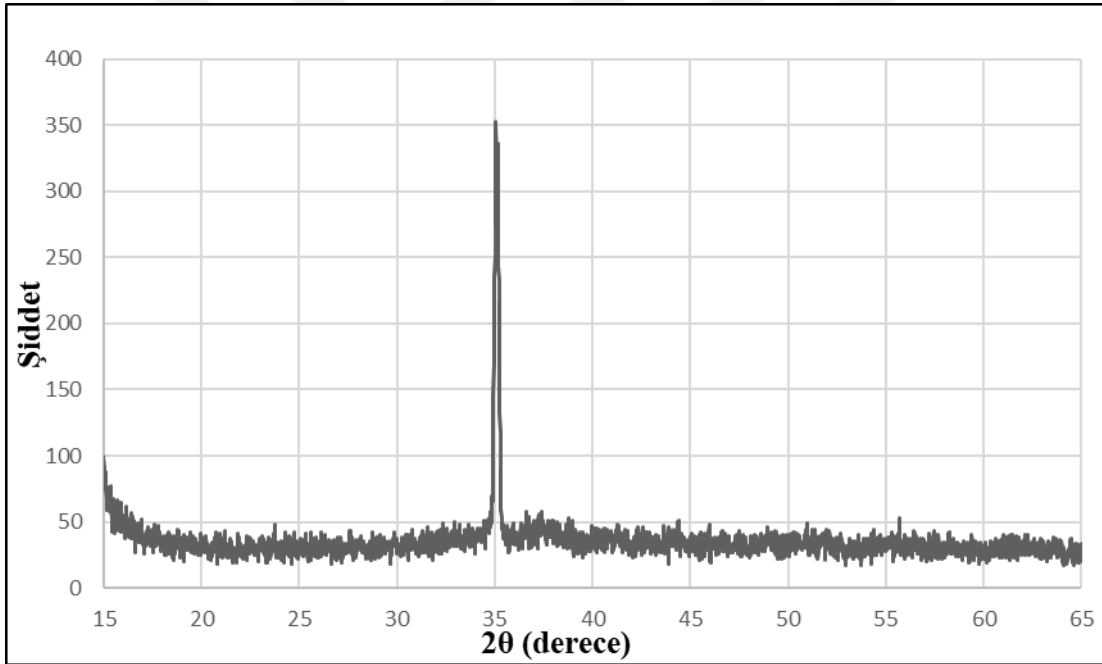
Roughness Parameters	
Coefficient	Value
Average (Ra)	0.52 nm
Root Mean Square (Rq)	0.76 nm
Skewness (Rsk)	1.711
Kurtosis (Rku)	9.197
Maximum (Rp)	8.47 nm
Minimum (Rv)	0.00 nm
Peak To Peak (Rt)	8.47 nm
Ten Point Height (Rz)	7.96 nm

Şekil 5.3. Yüzey pürüzlülük değeri

### 5.3. Üretilen safir optik pencerenin yapısal karakterizasyonu

Şekil 5.4'de safir optik pencereye ait XRD grafiği bulunmaktadır. XRD ölçümleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde APD 2000 PRO X-ışını kırınım cihazı ile yapıldı.

Optik pencerenin XRD desenlerinde (104) düzleminde  $2\theta = 35,06^\circ$ 'de verdiği kırınım piki görüldü. OriginPro programı yardımı ile FWHM (Full Width at Half Maximum) değeri hesaplandı. Hesaplama sonucunda FWHM değeri 0,29 olarak elde edildi. Safir optik pencereye ait XRD pikinin daha dar olması safir optik pencerenin iyi bir kristalitede olduğunu göstermektedir.



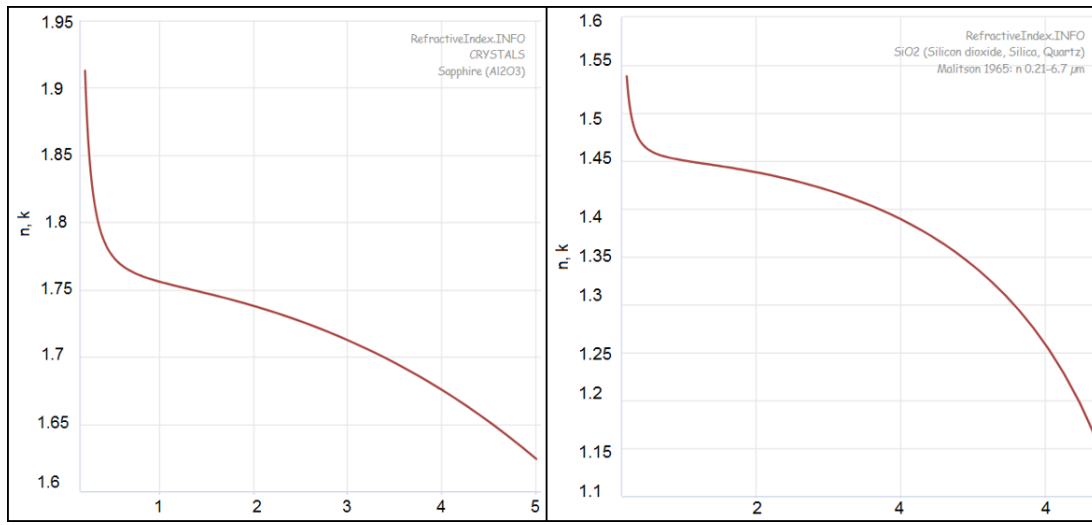
Şekil 5.4. Safir optik pencere XRD grafiği

### 5.4. Safir optik pencere üzerine yansıma önleyici kaplama tasarımı

Yansıma önleyici kaplamalar (AR), hem yüzeyden hem de alt tabakadan istenmeyen yüzey yansımalarını ortadan kaldırmak için yaygın olarak uygulanmaktadır. Farklı optoelektronik cihazlarda AR kaplamalar, yansımayı, parlamayı azaltmak ve ışık geçirgenliğini artırmak için görüntüleme cihazlarında potansiyel kullanıma sahiptir. Yansıma, ara-yüzlerde farklı bir kırılma indeksine ( $n$ ) sahip bir ortamda hareket eden ışık nedeniyle çoğalan optik bir

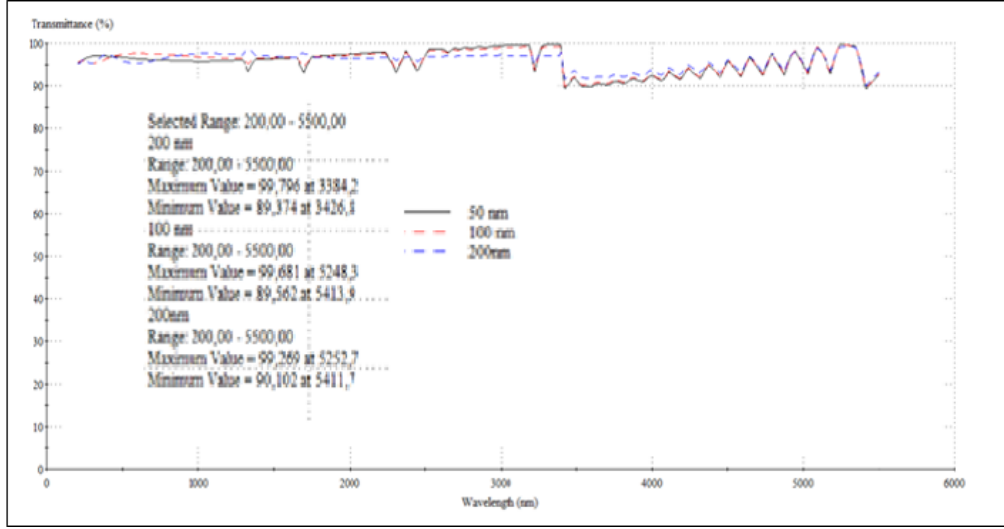
olgudur. Işık yansımaları, ayna ve filtreler hariç birçok optik cihazlarda istenmeyen, bir olgudur. Yansımaları azaltmak ve geçirgenliği artırmak için farklı stratejiler geliştirmek mümkündür. En iyi bilinen strateji, antirefleksif (AR) kaplama olarak bilinen bir filmle ya da film yığınlarıyla bu istenmeyen ışığı azaltmaya çalışmaktır.

Ardışık katmanların iyi optimizasyonu ile filmlerin kırılma indislerine bağlı olarak kaplama malzemelerinin belirlenmesi sayesinde yüzeyden yansımaları önlerken parıltıyı da azaltması mümkündür [24].



Şekil 5.5. Safir kristali ve SiO<sub>2</sub> filminin kırılma indisleri [25]

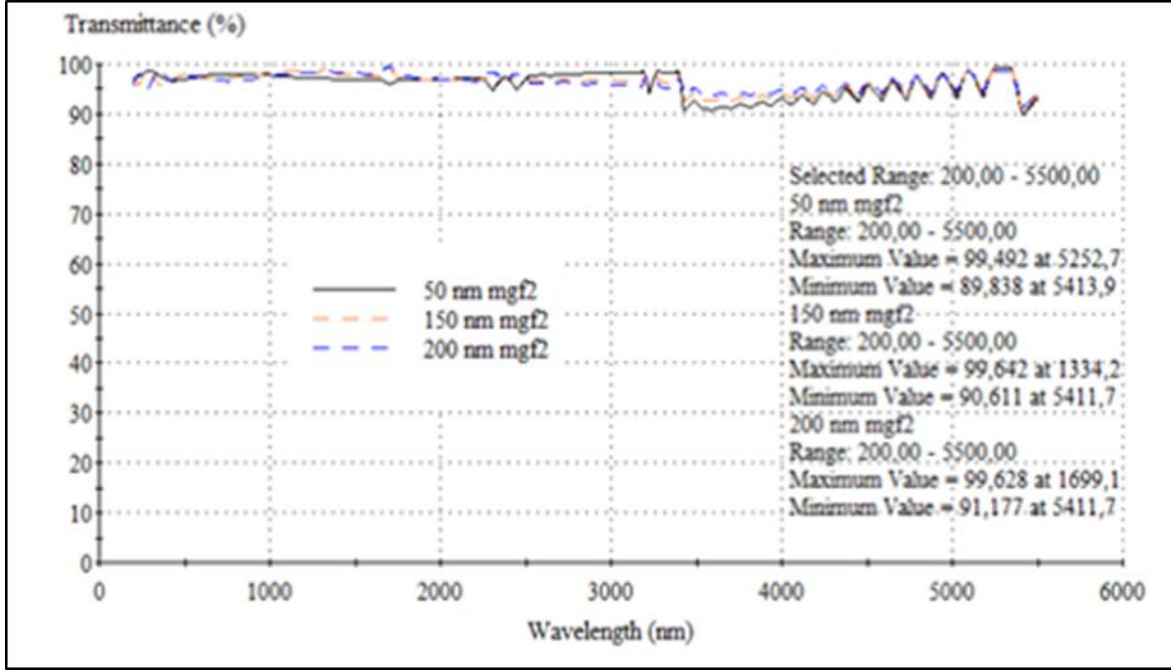
Tek katmanlı AR kaplama için uygun düşük n değerine sahip malzeme seçilmelidir. Safir kristali ve görece düşük kırılma indisli SiO<sub>2</sub> filminin kırılma indisleri 6 μm spektral değerine kadar Şekil 5.5'te verildi. Safir yüzeylerin kırılma indisi 1000 nm'de 1,75 ve SiO<sub>2</sub>'nin kırılma indisi 1,45 civarında olduğundan; ayrıca kırılma indisinin dalgaboyu bağımlılığı benzer davranışa sahip olduğundan safir yüzeylerine SiO<sub>2</sub> kaplanması üzerinde tasarım çalışmaları yapıldı. Essential Macleod yazılımının, ince film optik kaplamaların tasarımı, analizi, üretimi ve sorun gidermeye yönelik kapsamlı bir yazılım paketi olduğu bilinmektedir. Bu yazılımla SiO<sub>2</sub> filmlerinin farklı kalınlıklarda modellenmesi yapıldı.



Şekil 5.6. 50, 100 ve 200 nm kalınlıklarında SiO<sub>2</sub> ile kaplanan safirin optik geçirgenlik değerlerinin modelleme grafiği

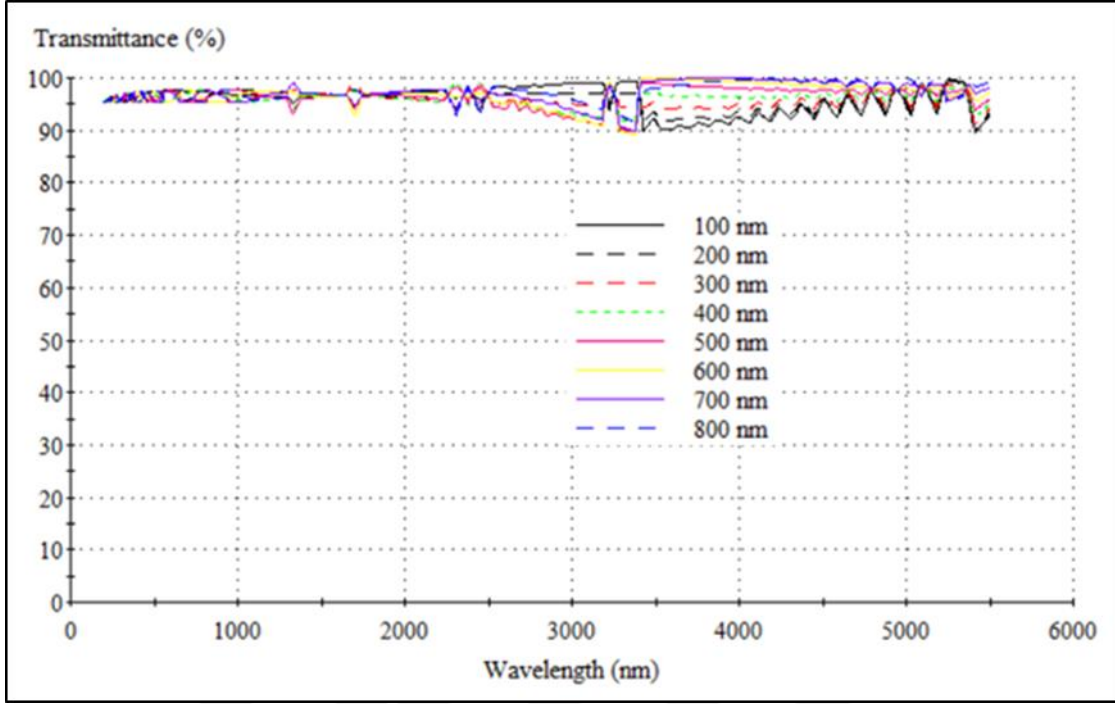
İlk olarak, 50, 100 ve 200 nm kalınlıklarında SiO<sub>2</sub> filmi için elde edilen geçirgenlik spektrumu Şekil 5.6'da verildi. Bu kaplamalarla ortalama geçirgenlik 90'nın üzerine çıkmaktadır.

Geçirgenliğin kalınlıkla bazı bölgelerde arttığı görüldü. Ardışık film kaplamasına örnek olarak 100 nm kalınlıklı SiO<sub>2</sub> üzerine kırılma indisi 1,37 (1000 nm'de) olan MgF<sub>2</sub> filmi 50, 150 ve 200 nm olacak şekilde üç farklı kalınlıkta optik geçirgenlik hesaplandı. Şekil 5.7'den görüldüğü gibi bu yığın yapısıyla optik geçirgenliğin ortalama %95'den daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.7. Safir üzerine, 100 nm kalınlıklı  $\text{SiO}_2$  ve onun üzerine 50, 150 ve 200 nm kalınlıklarında kaplanan  $\text{MgF}_2$  film yapısının geçirgenlik spektrumu

$\text{MgF}_2$  kullanımıyla oluşturulan yığın yapısının, 200 nm'ye kadarki tek katman  $\text{SiO}_2$  filmlerinden daha yüksek optik geçirgenlik vermesine rağmen, çoklu katmanlı kaplamalardan daha ekonomik olacağı değerlendirildi. Bu nedenle tek katman  $\text{SiO}_2$  filminin kalınlığına bağlı optik geçirgenlik değerleri modellendi. 100 - 800 nm kalınlıklı tekli katman  $\text{SiO}_2$  filmleri ile yapılan modelleme sonucu Şekil 5.8'de verildi. 600 - 800 nm kalınlıklı  $\text{SiO}_2$  filmlerinin 200 - 5000 nm aralığında ortalama % 98 geçirgenliğe sahip olduğu belirlendi.



Şekil 5.8. 100 - 800 nm kalınlıklı tekli katman SiO<sub>2</sub> filmleri ile kaplanan safirin optik geçirgenlik spektrumu

Şekil 5.8 incelendiğinde 200 - 3300 nm aralığı için 100 - 200 nm kalınlıktaki SiO<sub>2</sub> filminin %96 civarında geçirgenlik sağladığı, bu aralıktan büyük dalga boyları için geçirgenliğin ortalama %93 değerine düştüğü görüldü. 3000 - 5000 nm aralığındaki spektral bölge için 600 nm'den büyük kalınlıkların %98 optik geçirgenlik sağladığı anlaşıldı. Bu aralıktan düşük dalga boylu bölgede söz konusu kalınlıklarda optik geçirgenliğin %93 seviyelerinde olduğu; kaybın özellikle 2500 - 3200 nm bandında oluştuğu anlaşıldı. Tüm bölgeler dikkate alındığında safir optik pencere için SiO<sub>2</sub> tek katman kalınlığının 700 nm olacağı değerlendirildi.

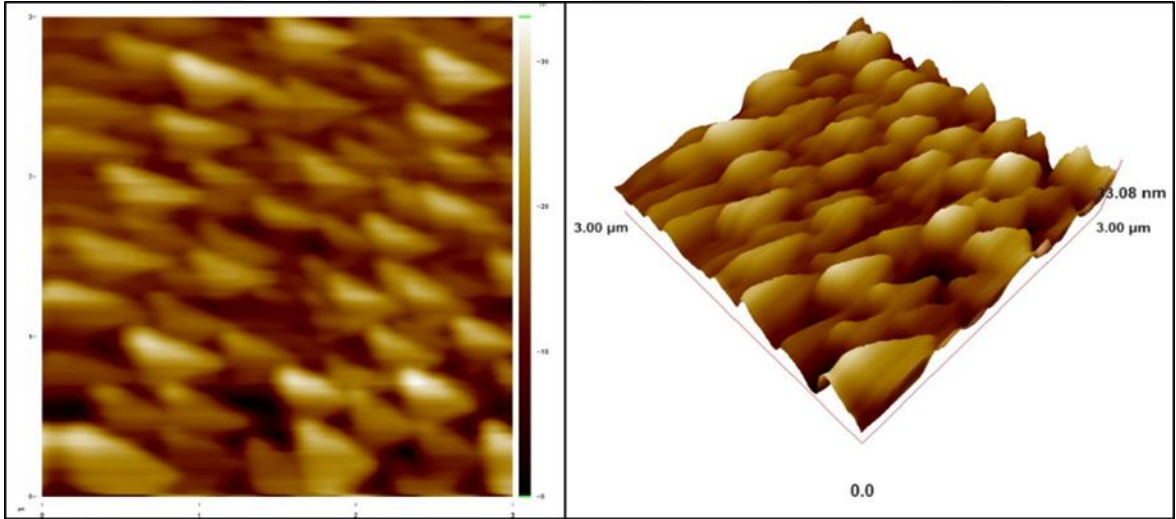
Yapılan bu tasarım verilerinin değerlendirilmesi sonucunda, ilk olarak SiO<sub>2</sub> tek katmanını yansıma önleyici olarak kullanmaya karar verildi.

SiO<sub>2</sub>'nin ürettiğimiz safir diskin her iki yüzeyine 700 nm olacak şekilde sıçratma tekniği uygulanması gerçekleştirildi (Resim 5.1). Püskürtme tekniği ile 30 mTorr işlem basıncında yapılan reaktif kaplamada Ar/O<sub>2</sub> oranı 90/10 olarak ayarlandı. Kaplama sonrası filmin kalınlık değeri Dektak-150 stylus tipli profilometre ile 650 nm olarak ölçüldü. Yapılan bant testinde, kaplanan filmin yüzeyden kalkmadığı görüldü.

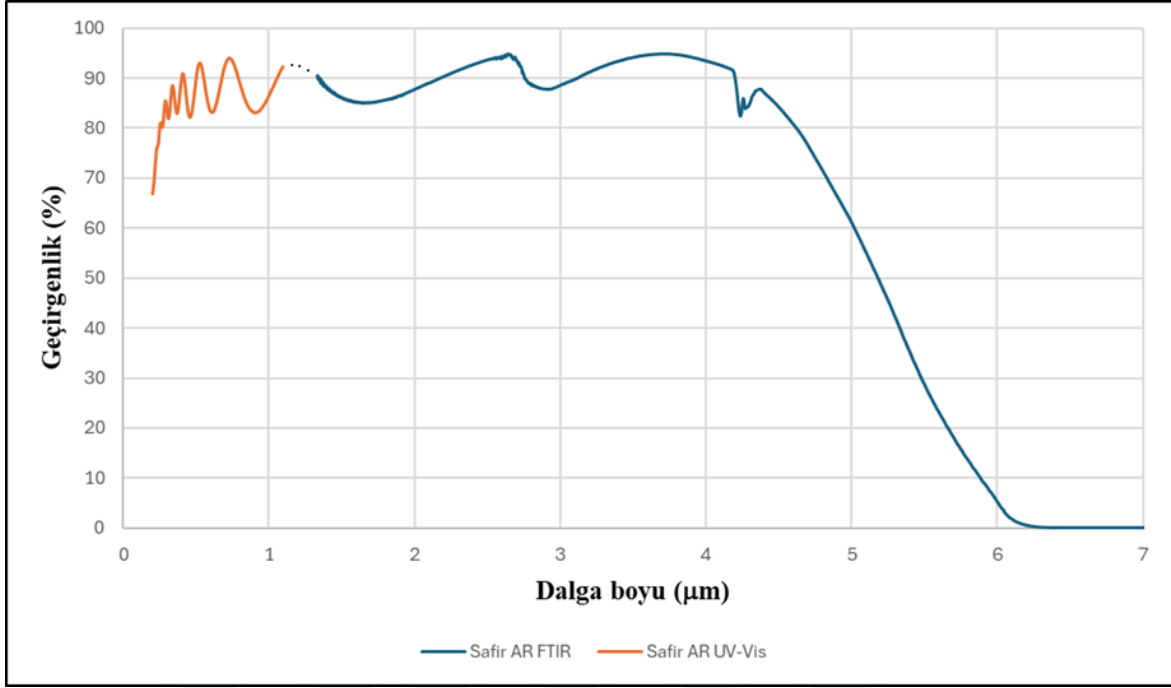


Resim 5.1. İki yüzeyi SiO<sub>2</sub> kaplı safir optik pencere

SiO<sub>2</sub> kaplı optik pencerenin 3x3  $\mu\text{m}^2$  alanda alınan AFM görüntüsü Şekil 5.9’da verildi. Yüzey pürüzlülük değeri 4,63 nm olarak belirlendi.



Şekil 5.9. SiO<sub>2</sub> ince filmi ile kaplanmış safir optik pencerenin 2 ve 3-boyutlu AFM görüntüsü



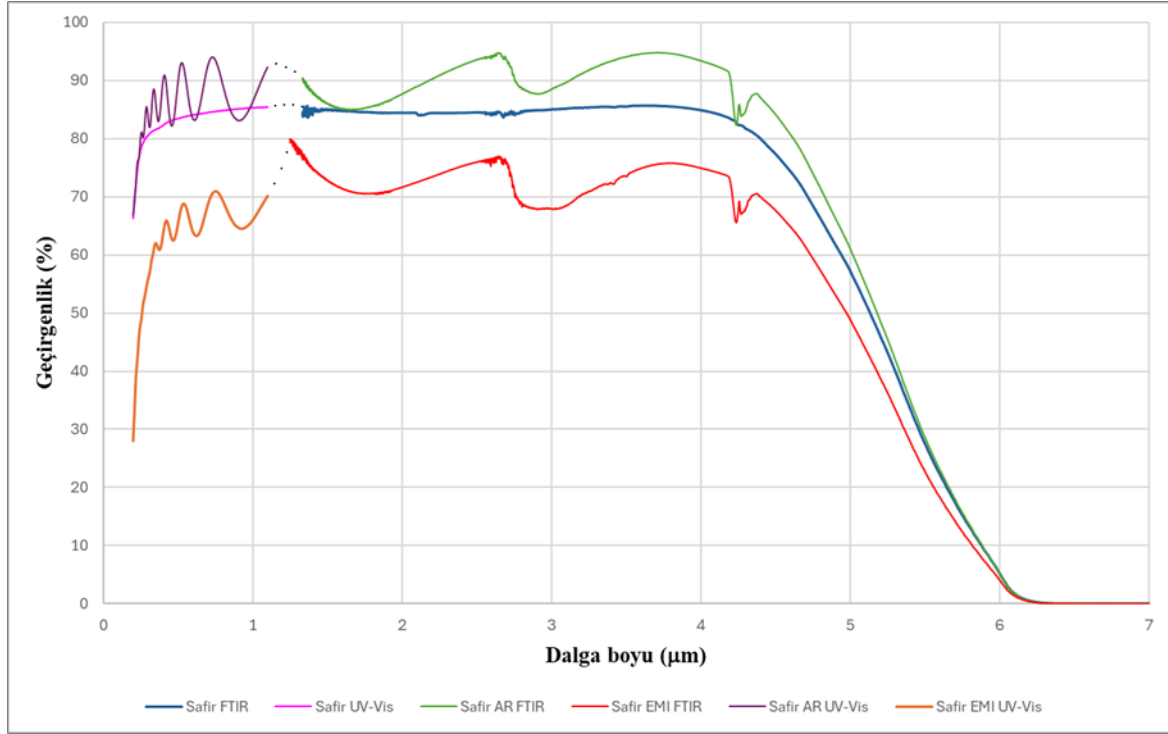
Şekil 5.10. İki yüzeyi 650 nm SiO<sub>2</sub> filmi kaplanan safir pencerenin optik geçirgenlik spektrumu

Oluşturulan yansımaya önleyicili safir optik pencerenin geçirgenlik spektrumu 0,2 - 1,1 μm aralığı için UV-VIS, 1,3 - 6,0 μm aralığı için FTIR spektrometresiyle ölçüldü ve elde edilen geçirgenlik spektrumu Şekil 5.10'da verildi.

Görüldüğü gibi SiO<sub>2</sub> filmi ile kaplama safir pencerenin optik geçirgenliğini belirli ölçüde artırmış; kızılötesi bölgede %90'ın üzerine çıkarmıştır. Bununla birlikte, önümüzdeki dönemde MgF<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> kaplamasını da yaparak optik geçirgenliği daha yukarıya çekme çalışmasını yürüteceğiz. Bunun dışında yapılan literatür taramaları sonucunda da SiO<sub>2</sub> ile çok katmanlı kaplamalar oluşturup optik geçirgenliği arttırabiliriz [26, 27]. Ayrıca, yüzey morfolojisinin, pencerenin optik kayıplarında etken olduğu bilinmektedir. İyi bir optik performans için farklı işlem gaz basıncında çalışılmasının gerekli olduğu değerlendirilmektedir.

### 5.5. Metal Örgü kaplama yapılmış safir optik pencerenin optik karakterizasyonu

Safir optik pencere üzerine tez kapsamında tasarlanan metal örgü ağlar ve elektrotlar basıldı.



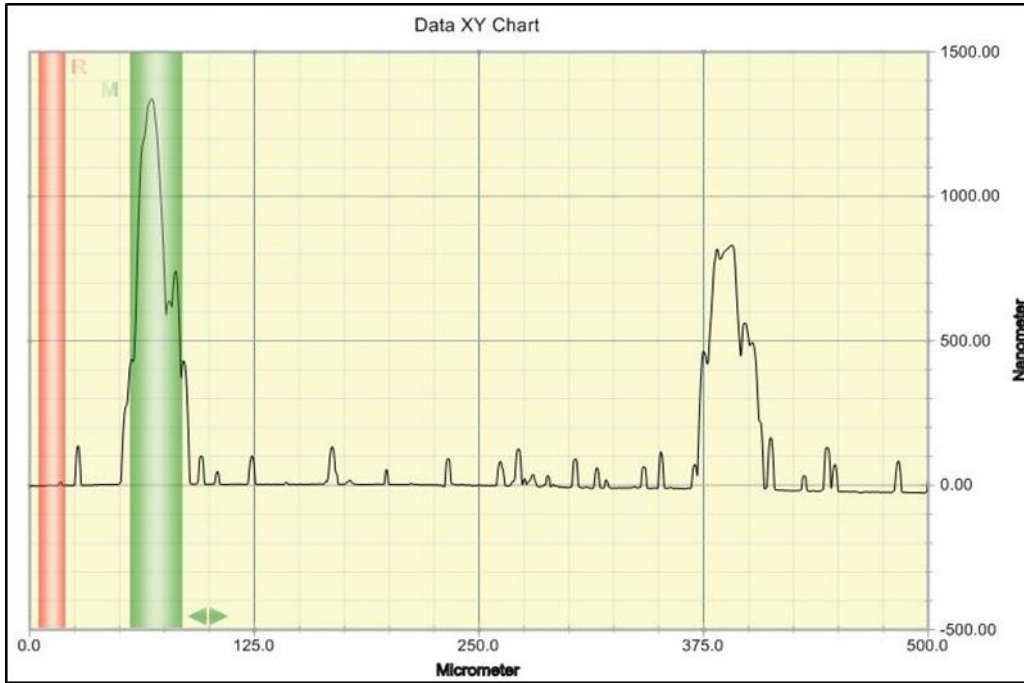
Şekil 5.11. Metal örgü kaplı safir pencerenin optik spektrumu

Şekil 5.11’de hazırlanan safir optik pencerenin FTIR geçirgenlik ölçüm sonuçları verildi. FTIR spektrometresi ile 1,3 - 6,0  $\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında ölçüm alındı. FTIR ölçümleri sonucunda 1,36 - 4,24  $\mu\text{m}$  aralığında safir optik pencerenin geçirgenliği yansımaya önleyici kaplama sonrasında %90’ın üzerine çıktığı görüldü. Yansımaya önleyici kaplama üzerine belirlenen değerlere uygun şekilde kare metal örgü kaplama yapıldı. Bu kaplama sonrasında alınan FTIR ölçümlerinde 2,60 - 4,50  $\mu\text{m}$  aralığında optik geçirgenlik %75 ile %66 arasında değişmektedir. Geçirgenliğin 5  $\mu\text{m}$ ’den sonra azalmasının sebebini, safir malzemesinin geçirgenliğinin bu değerden sonra sifıra düşmesine bağlayabiliriz.

UV-VIS spektrometresi ile 0,2 - 1,1  $\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında alınan ölçümde 0,4 - 1,1  $\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında yansımaya önleyici kaplama sonrasında geçirgenlik %85 - 90 seviyelerine ulaşmıştır. Kare metal örgü kaplama sonrası ise geçirgenlik %65 - 70 arasında değişmektedir.

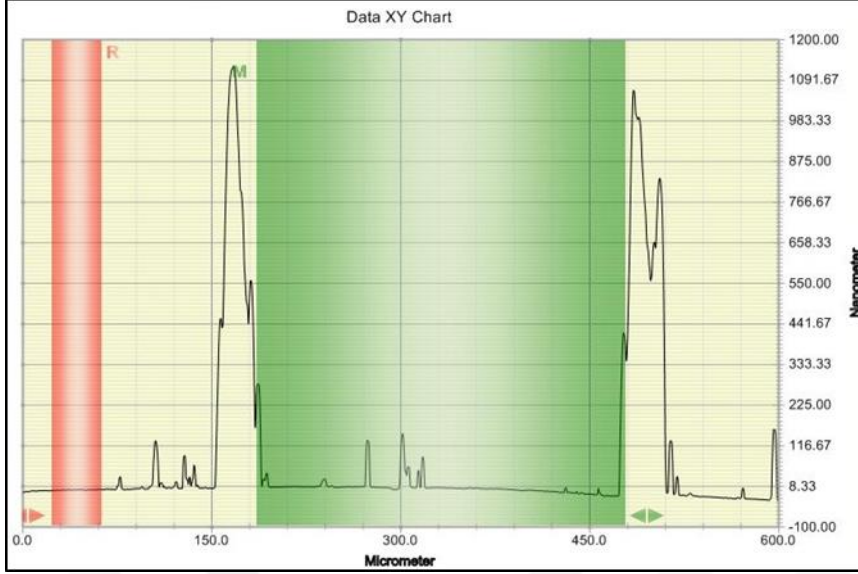
## 5.6. Izgaraların genişliklerinin profilometre ile belirlenmesi

Safir alttaş üzerine 25  $\mu\text{m}$  genişlikli ve 300  $\mu\text{m}$  çizgiler arası boşluğa sahip Ag kare örgü kaplama yapıldı. Profilometre sisteminde çizgi genişliği olan noktalarda ani pikler gözlemlendi. Şekil 5.12'de çizgi genişliklerinin profilometre sonucu verildi. Profilometre sonuçlarında çizgi genişlikleri 25  $\mu\text{m}$  ile 30  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir.



Şekil 5.12. Çizgi genişliklerinin profilometre sonuçları

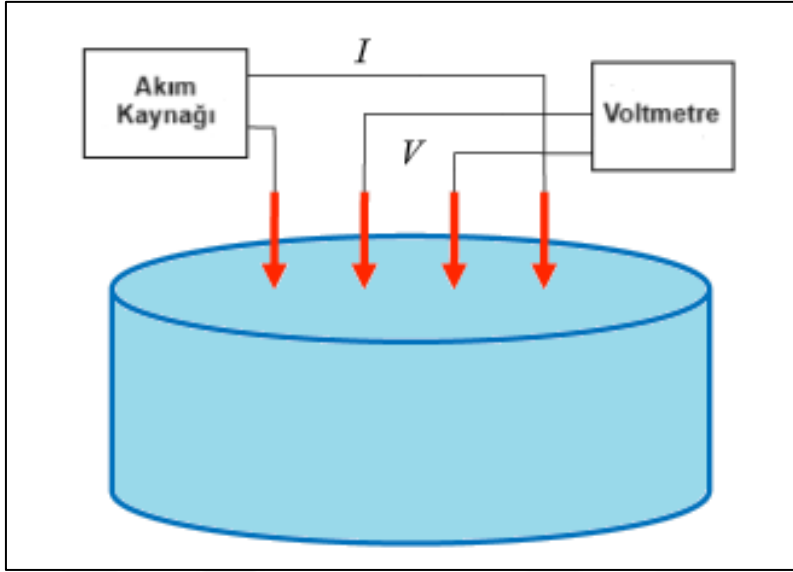
Şekil 5.13'de ise çizgiler arası mesafenin profilometre sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlara göre Ag örgünün çizgiler arası boşluklarının genişlikleri 293,3  $\mu\text{m}$  olarak ölçüldü.



Şekil 5.13. Ag örgüye ait çizgiler arası boşlukların genişliklerinin profilometre sonucu

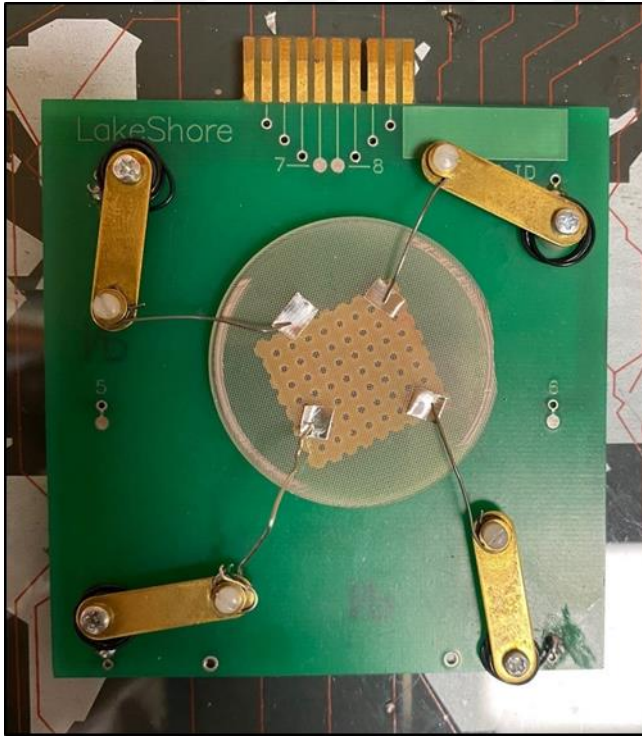
### 5.7. EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin yüzey direnci

Dört prob tekniği, malzemelerin yüzey direncini ve elektriksel özelliklerini incelemek için kullanılan bir tekniktir. Problar genellikle ince metal uçlardan oluşur ve malzeme ile temas halindedir. Bu iğneler ölçümü yapılacak yüzeye eşit uzaklıkta mesafelerle 4 noktaya yerleştirilir. 2 proba sabit bir akım verilir ve bu akım malzeme içerisinden geçirilir. Malzeme içerisinde geçen bu akım elektronların hareket etmesini sağlar. Diğer 2 prob bir voltmetreye bağlanır ve voltaj değeri ölçülür. Ölçülen bu voltaj değeri malzemenin akıma uyguladığı direncin düştüğü voltaj değeridir. Ölçülen bu değerler ile ohm yasası kullanılarak malzemenin direnci hesaplanır.

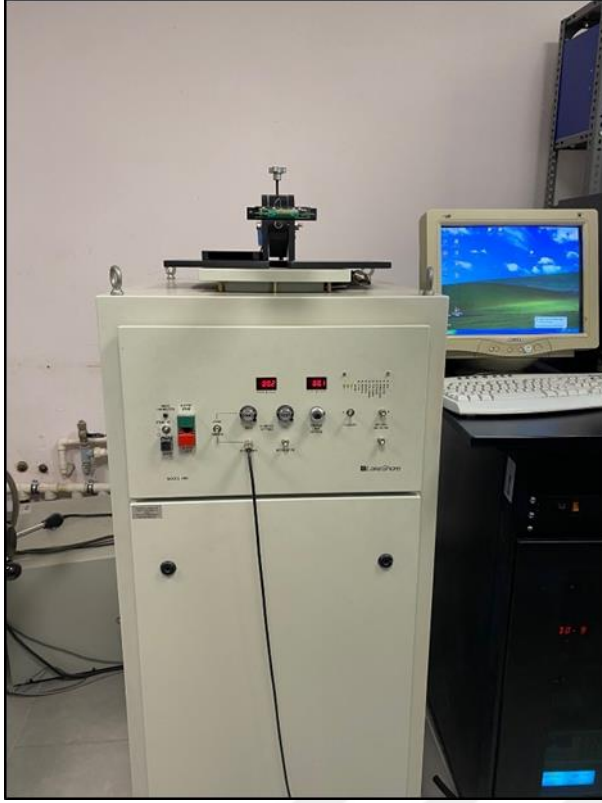


Şekil 5.14. 4 nokta prob tekniği şematik diyagramı

Bu tez çalışmasında üretilen EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin yüzey direnci oda sıcaklığında dört prob tekniği kullanılarak belirlendi. Ölçümler sonucunda numunemizin elektriksel yüzey direnci 2,06 Ohm/kare olarak bulundu.



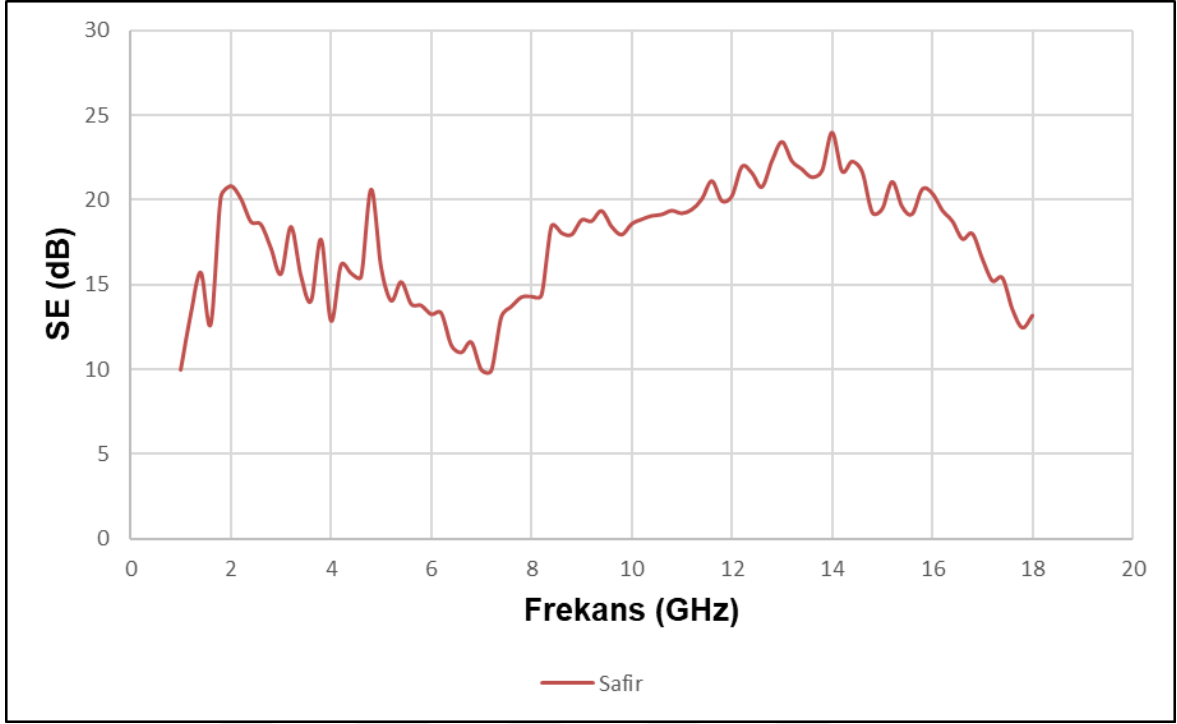
Resim 5.2. Safir EMI kalkanlayıcı 4 prob tekniği



Resim 5.3. Dört nokta prob sistemi

### 5.8. EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin kalkanlama etkinliği ölçümü

Üretilen EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin kalkanlama etkinliği ölçümleri 1 GHz ile 18 GHz aralığında yapıldı. Sonuçları Şekil 5.15'te verildi. Tez çalışmasında üretilen EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin kalkanlama etkinliği ortalama 17 dB'dir. Kalkanlama etkinliğini arttırmak için farklı yöntemler geliştirilebilir. Metal örgüler arası genişlikleri azaltmak daha iyi bir kalkanlama sağlayabilir ancak bu durum örgüler arası açıklıkların da azalması demektir. Örgüler arası açıklığın azalması da optik geçirgenliğin azalmasına neden olur. Bu nedenden dolayı örgüler arası mesafenin ayarlanması büyük önem arz etmektedir. Daha kalın örgü kaplamalar düşük frekanslarda yüzey direncini azaltır ve kalkanlama etkinliğini artırır. Bu çalışma da üretiminin kolaylığı ve esnekliği açısından kare metal ağlar tercih edildi. Ancak aerosol jet baskı tekniği ile düzensiz desenler basarak desen farklılığının kalkanlama etkinliği üzerindeki etkisi incelenebilir ve geliştirilebilir [28-30].



Şekil 5.15. Kalkanlama etkinliği ölçüm sonucu



## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında EMI/RFI korumalı optik pencere geliştirilmesi için safir kristali tercih edildi. Kyropoulos sisteminde a-eksenli safir kristali büyütüldü. Yüksek mukavemete, aşırı çevre koşullarına dayanıklı bir optik pencere geliştirilmesi açısından büyütülen a-eksenli safir kristali c-eksende silindir olarak kesildi. Kesilen bu silindir safir kristali, istenilen genişlikte safir optik pencerenin elde edilmesi için tek telli elmas kesici ile dilimlendi.

Elde edilen safir dilimlerinde geçirgenliğinin yüksek ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek için aşındırma ve parlatma işlemleri yapıldı. Bu işlemlerden sonra X-ışını kırınım sisteminden alınan ölçümler ile safir optik pencerenin kristal kalitesi belirlendi. EMI kalkanlama malzemelerinde yüksek geçirgenlik için yüzey pürüzsüzlüğü önemli bir etkidir. Yüzey pürüzsüzlüğünü ölçmek için atomik kuvvet mikroskobu kullanıldı. Ölçüm sonucunda safir optik pencerenin yüzey pürüzlülüğü 0,76 nm olarak belirlendi. Yüzey pürüzlülük değerinin düşük olması hazırlamış olduğumuz yüzeyin iyi olduğunu belirtmektedir.

EMI kalkanlamada önemli olan yüksek optik geçirgenliği elde edebilmek için safir optik pencerenin her iki tarafı yapılan literatür araştırmaları ve simülasyon sonuçları baz alınarak tek katman yansıma önleyici SiO<sub>2</sub> ile kaplandı. Kaplama sonucunda %85 optik geçirgenliğe sahip safir optik pencerenin kaplama sonrasında optik geçirgenliği kızılötesi-mikrodalga bölgelerinde %90 üzerinde seviyelere çıktığı görüldü. Kaplama sonrasında, kaplamanın yüzeyde nasıl dağıldığını belirlemek için atomik kuvvet mikroskobu ile optik pencerenin yüzeyi 3x3 µm<sup>2</sup> tarama alanında tarama yapıldı. Ölçüm sonucunda çıkan iki ve üç boyutlu AFM görüntüleri incelendiğinde kaplamanın yüzeye homojen bir şekilde dağıldığı belirlendi.

EMI kalkanlama yöntemi olarak metal ağlar tercih edildi. Metal ağlar yüzeye uygulanmadan önce yüksek optik geçirgenlik ve düşük yüzey direnci sağlayacak şekilde metal kare ağların tasarımı yapıldı. Bu tasarım sonucunda metal kare ağların çizgi genişlikleri 25 mm ve çizgiler arası boşlukların genişlikleri 350 mm olarak belirlendi. Bu tasarım aerosol jet baskı tekniği ile safir optik pencere üzerine basıldı. Metal ağ malzemesi olarak iletkenliği en yüksek olan gümüş tercih edildi.

Yapılan baskı sonucunda metal kare ağların genişlik ölçüleri profilometre cihazı ile ölçüldü. Bu ölçüm sonucunda çizgi genişlikleri 25 - 30 mm arasında değiştiği, çizgiler arası boşlukların ise 293 mm olduğu belirlendi.

EMI kalkanlamada bir diğer önemli etkende düşük yüzey direncine sahip malzeme geliştirmektir. Düşük yüzey direnci elektromanyetik dalganın absorbe ve yansımını kontrol etmekte önemli bir etkidir. Geliştirdiğimiz EMI kalkanlayıcı safir optik pencerenin yüzey direnci dört prob tekniği ile ölçüldü. Bu ölçüm sonucunda yüzey direnci 2,06 ohm/kare'dir.

Yapılan kalkanlama etkinliği ölçüm sonuçlarından, geliştirilen optik pencerelerin kalkanlama etkinliğinin ortalama olarak 17 dB olduğu belirlendi. Bu çalışma elektro optik sistemlerde kullanılmak üzere geliştirilen optik pencere üzerinedir. Geliştirilen bu pencerenin kalkanlama etkinliğini arttırmak adına ileri de farklı çalışmalarda yapılabilir. Çizgi genişlikleri değiştirilerek kalkanlama etkinliği arttırılabilir. Bunun dışında optik geçirgenliği arttırmak için farklı yansıma önleyici malzemeler veya çok katmanlı kaplamalar tercih edilebilir. Kare metal ağ tercih edildiği gibi düzensiz desenler de baskı yapılarak farklı kalkanlama etkinliği sonuçları değerlendirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Han, Y., Lin, J., Liu, Y., Fu, H., Ma, Y., Jin, P. and Tan, J. (2016, May 06). Crackle template based metallic mesh with highly homogeneous light transmission for highperformance transparent EMI shielding. *Scientific Report*, 25601, 6.
2. Chung, D. L. L. (2000, December 22). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, 39, 279-285.
3. Chung, D. L. L. (2020, July 25). Materials for electromagnetic interference shielding. *Materials Chemistry and Physics*, 255, 0254-0584.
4. Ajitha, A. R., Surendran, A., Aswathi, M. K., Geethamma, V. G., and Thomas, S. (2019). Advanced Carbon Based Foam Materials for EMI Shielding. *Wiley Semiconductors*, 1, 305-325.
5. Liang, Z., Zhao, Z., Pu, M., Lou, J., Xie, X., Wang, Y., Guo, Y., Ma, X., and Lou, X. (2020, March 1). Metallic nanomesh for high-performance transparent electromagnetic shielding. *Optical Materials Express*, 10, 796-806.
6. Huang, S., Li, X., Zhao, Y., Sun, Q. and Huang, H. (2020, September 17). A novel lapping process for single-crystal sapphire using hybrid nanoparticle suspensions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 191, 106099.
7. Khattak, C. P., Shetty, R., Schwerdtfeger, C. R. and Ullal, S. (2016, October 15). World's largest sapphire for many applications. *Journal of Crystal Growth*, 452, 44-48.
8. Amralah, N. (2022). Metal Mesh Selection Guide for Shielding Effectiveness and Optical Visibility. *Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*.
9. Lin, Y. M., Wu, H. W., and Chang, S. J. (2023, January 4). Design of LTE/Sub-6 GHz Dual-Band Transparent Antenna Using Frame-Structured Metal Mesh Conductive Film. *Nanomaterials*, 13(2), 221.
10. Hautcoeur, J., Castel, X., Colombel, F., Benzerga, R., Himdi, M., Legeay, G. and Motta-Cruz, E. (2011, January 28) Transparency and electrical properties of meshed metal films. *Thin Solid Films*, 519, 3851-3858.
11. Kim, H., Lee, S., Lee, J., Lee, E., Choi, J., Jung, J., Jung, J. and Choi, D. (2014, May 20) High-durable AgNi nanomesh film for a transparent conducting electrode. *Small*, 10 (18), 3767-3774.
12. Jacoby, K. T., Pieratt, M. W., Halman, J. I. and Ramsey, K. A. (2009, April). *Predicted and measured EMI shielding effectiveness of a metallic mesh coating on a sapphire window over a broad frequency range*. Paper presented at the International Society for Optics and Photonics, Orlando, Florida.
13. Kim, C. M., Kim, S. R. and Ahn, J. H. (2017, April 7). Development of Auto-Seeding System Using Image Processing Technology in the Sapphire Crystal Growth Process via the Kyropoulos Method. *Applied Science*, 7(4), 371.

14. Nehari, A., Brenier, A., Panzer, G., Lebbou, K., Godfroy, J., Labor, S., Legal, H., Cheriaux, G., Chambaret, J. P., Duffar, T. and Moncorge, R. (2010, December 27). Ti-Doped Sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) Single Crystals Grown by the Kyropoulos Technique and Optical Characterizations. *Crystal Growth and Design*, 11, 445-448.
15. Kim, Y. S., Park, J. H. (2018). Advances in Sapphire Growth Techniques for Optoelectronic Applications. *Journal of Materials Science*, 53(4), 1238-1248.
16. Chen, C., Chen, J., Lu, C. and Liu, C. (2012). Effect of Power Arrangement on The Crystal Shape During The Kyropoulos Sapphire Crystal Growth Process. *Journal of Crystal Growth*, 352, 9-15.
17. Gramlich, G., Huber, R., Haslich, F., Bhutani, A., Lmmer, U. and Zwick, T. (2023, July 20). Process considerations for Aerosol-Jet printing of ultra fine features. *Flexible and Printed Electronics*, 8(3), 035002.
18. Lall, P., Goyal, K., Schulze, K. and Miller, S. (2020). *Process-Consistency in Printed Layers in Multi-Layer Substrate Using Aerosol Jet Technology*. 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Orlando, Florida.
19. Mette, A., Richter, P. L., Hörteis, M. and Glunz, S. W. (2007, April 5). Metal Aerosol Jet Printing for Solar Cell Metallization. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15, 621-627.
20. Maurya, D. K., Sardarinejad, A. and Alameh, K. (2014, December 1). Recent Developments in R. F. Magnetron Sputtered Thin Films for pH Sensing Applications- An Overview. *Coatings*, 4, 756-771.
21. Berthomieu, C., Hienerwadel, R. (2009, June 10). Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Photosynthesis Research*, 101, 157-170.
22. Verma, G., Mishra, M. (2011, May 31). Development and Optimization of UV-VIS Spectroscopy- A review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 7, 1170-1180.
23. Feng, L., Liu, Z. (2005) Optical Properties of Silica Films Prepared on Sapphire. *Material Science Forum*, 475-479, 3709-3712.
24. Querry M. R. (1969). Direct Solution of the Generalized Fresnel Reflectance Equations. *Journal of the Optical Society of America*, 59, 876-877.
25. Polyanskiy, M. N. (2024). Refractiveindex.info database of optical constants. *Scientific Data*, 11, 94.
26. Zhao, D., Xu, F., Wang, G., Zhang, S., Qin, G., Wang, B. and Han, J. (2021).  $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$  Laser Film with Enhanced Protection and Antireflection for Sapphire Infrared Windows at High Temperatures. *Applied Electronic Materials*, 3, 4611-4617.
27. Feng, L., Liu, Z. (2007). Improving the Properties of Sapphire by Coatings. *Advanced Materials Research*, 26-28, 619-622.

28. Chung, S. I., Kim, P. K., and Ha, T. G. (2017, September 21). Ag paste-based nanomesh electrodes for large-area touch screen panels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27(10), 105019.
29. Liang, Y., Huang, X., Wen, K., Wu, Z., Yao, L., Pan, J., Liu, W., and Liu, P. (2023, April 12). Metal Mesh-Based Infrared Transparent EMI Shielding Window with Balanced Shielding Properties over a Wide Frequency Spectrum. *Applied Sciences*, 13, 4846.
30. Lu, Z., Wang, H., Tan, J., and Lin, S. (2014, December 16). Microwave Shielding Enhancement of High-Transparency, Double-layer, Submillimeter-Period Metallic Mesh. *Applied Physics Letters*, 105, 241904.







*Gazili olmak ayrıcalıktır*