
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KIZILÖTESİ IŞIK KIYICI GELİŞTİRİLMESİ

Yusuf Mert GÜMÜŞAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2022

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Yusuf Mert GÜMÜŞAY

06/02/2023

KIZILÖTESİ IŞIK KIYICI GELİŞTİRİLMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Yusuf Mert GÜMÜŞAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat, 2023

ÖZET

Pyroelektrik termal kameralarda ışığın modüle edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için chopper adı verilen ışık kıyıcı kullanılır. Yapılan çalışmada üretilen ışık kıyıcı, Silisyum (Si) alttaş yüzeyi Arşimedyan eğrisi şeklinde desenlenmiş ve işlem görmemiş desensiz bölge olmak üzere temel olarak iki kısımdan oluşturuldu. Desenli bölgenin dedektörün çalışma aralığı olan IR dalga boyu aralığında (8-12 μm) geçirgenliğin %25 civarında; desensiz olan bölgede ise %90 üzerinde olması hedeflendi. Desenli bölge litografi yöntemi ile alttaş üzerine oluşturuldu. Dedektör üzerine düşürülen ışık, ışık kıyıcı yardımıyla sinüsoidal dalga halini alır ve sensörde oluşan ısı farkları dedektörde polarizasyon oluşturarak elektrik akımına dönüştürülür. Bu çalışmada, katkısız Si alttaş üzerine termal buharlaştırma metodu ile çinko sülfür (ZnS) ince film kaplanarak IR bölgedeki ışık geçirgenliğini arttırmak hedeflendi. İlk olarak ZnS filmlerinin termal buharlaştırma tekniği ile Si, safir ve cam alttaşlar üzerine farklı alttaş sıcaklıklarında gerçekleştirildi. Büyütülen filmlerin karakterizasyonu yapıldı. Daha sonra kaplamalar nihai alttaş olan 69 mm çapında 650 mikron kalınlığında katkısız Si (100) alttaş üzerine 10^{-6} mbar basınçta gerçekleştirildi. %99.9 saflıkta ZnS pellet ve Sulfide (S) toz iki pota kullanılarak eş zamanlı olarak buharlaştırıldı ve bu sayede yüzeyde oluşacak sülfür eksikliğinin önüne geçilmesi hedeflendi. Oluşturulan kaplamaların kalınlığı Stylus tip (VEECO- DEKTAK 150) profilometre ile ölçüldü. Yapısal analizler için X Işını Kırınımı Difraktometresi (XRD), ve X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) Nanomanyetik Marka Pro-AFM sistemi, optik geçirgenlik analizi için Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) teknikleri kullanıldı. Optik analizler sonucunda 1100nm kalınlığındaki örneklerin IR bölgedeki geçirgenliğinin desensiz bölge için %90, desenli bölge için ise %25 civarında olduğu gözlendi. Elde edilen yapısal ve optik sonuçlar değerlendirildiğinde tek başına ZnS pelletten yapılan kaplamanın buharlaşma esnasında Sülfürce fakirleştiği gözlendi. Bu durumu önlemek için, ZnS ve S malzemeleri Termal Eş-Buharlaştırma Tekniği ile birlikte buharlaştırılmış ve tek katman ZnS yapısının başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği gözlenmiştir.

Bilim Kodu	:	20215
Anahtar Kelimeler	:	ZnS, İnce film kaplama, Termal buharlaştırma, Si , ARC kaplama
Sayfa Adedi	:	39
Danışman	:	Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

DEVELOPMENT OF INFRARED LIGHT CHOPPER

M. Sc. Thesis

Yusuf Mert GÜMÜŞAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

Februrary, 2023

ABSTRACT

In pyroelectric thermal cameras, the light falling on the detector takes the form of a sinusoidal wave with the help of a light chopper, and thus, the image is obtained by converting the temperature differences in the sensor into electric current. The chopper consists of two parts on the surface of the Silicon (Si) substrate, one is Archimedean spiral and the other is a non-patterned surface. It is aimed to achieve a permeability of approximately 30% in the patterned area and 90% or more in the non-patterned surface. The Archimedes spiral, which converts the light into a sinusoidal wave, is patterned on the surface by lithography method. In this work, Firstly, ZnS films were coated on Si, sapphire and glass substrates at different substrate temperatures by thermal evaporation technique. After the characterization of the thin films, needed product Si chopper which is 69 mm diameter and 650 um thickness is coated at 1100 nm thickness at room temperature by thermal evaporation method to increase transmittance in IR wavelength. Coatings were carried out using a ZnS pellet and Sulfide of 99,9% purity at 10^{-6} mbar. ZnS pellet and Sulfide powder in different evaporation boats were evaporated at the same time to prevent deficiency of Sulfide on thin film surface. Thickness of deposited thin films are measured by a tylus type (Dektak150) profilometer. structural properties of the films were evaluated by X-Ray Diffractometer (XPS) systems Optical properties are evaluated by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). As a result of optical analysis, it is observed that IR transmittance of samples with 1000 nm thickness is 90% at unpatterned and about 25% at patterned surface. Optical and structural analysis show that sulfide deficiency occurs on the surface of thin film by evaporating only ZnS pellet. In this work proper one-layer ZnS pattern without sulfide deficiency is obtained by evaporating ZnS pellet and sulfide powder at the same time by using thermal evaporation technique.

Science Code : 20215

Key Words : ZnS, Thin film coating, Thermal evaporation, Si wafer, ARC coating

Page Number : 39

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Yapılan çalışmanın her adımında gerekli imkanları sağlayan, çalışmalarımı yönlendiren ve tüm sabrı ile tecrübesini benimle paylaşan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e sonsuz teşekkür ederim. Çalışmalarımda beni yalnız bırakmayan kullanılan kaplama sistemini öğreten ve kaplamalarda daha iyi sonuçlar almamı sağlayan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan hocam Dr. Halil İbrahim EFKERE'ye teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım sırasında her türlü kolaylığı sağlayan, yardım etmek için ellerinden geleni yapan cihazların kullanımı ve amaçlarını büyük bir sabırla bana anlatan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma bu yardımlarından ve arkadaşlıklarından dolayı teşekkür ederim. Bu çalışma sırasında iş hayatımı kolaylaştıran ve her konuda bana destek olan ortağım Emre ÖZÇELİK'e anlayışından ve sabrından dolayı teşekkür ederim. Her anımda yanımda olan, desteklerini esirgemeyen ve her zaman motivasyonumu yüksek tutan canım aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde, 2019K12-149045 nolu proje ile T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji Bütçe Başkanlığı ve ASENTEK Savunma ve Enerji Teknolojileri <LTD. ŞTİ.'de 2019-701-429 nolu Kosgeb projesi ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER 5

2.1. Işık Kıyıcılar 5

2.2. Si Tek Kristalinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri 7

2.3. ZnS İnce Filminin Özellikleri 8

3. KULLANILAN YÖNTEMLER VE KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ 11

3.1. Kuru Aşındırma Tekniği (Dry Etching) 12

3.2. Vakumlu Termal Buharlaştırma Sistemi 14

3.3. X Işınları Kırınımı (XRD) 17

3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) 18

3.5. Profilometre 19

3.6. Morötesi-Görünür Bölge (UV-Vis) Spektrometresi 20

3.7. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) 21

4. KIZILÖTESİ IŞIK KIYICILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU 23

4.1. ZnS İnce Filmlerinin Termal Buharlaştırma Parametreleri 23

Sayfa

4.2. ZnS Filmlerin Karakterizasyonu 24

4.2.1. Yapısal karakterizasyon 24

4.2.2. Optik karakterizasyon 26

4.2.3. Yüzey morfolojisi 28

4.2. Kızılötesi Işık Kıyıcının Karakterizasyonu 30

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 35

KAYNAKLAR 35

ÖZGEÇMİŞ 39

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Si tek kristalinin bazı özellikleri 7

Çizelge 2.2. ZnS malzemesinin bazı özellikleri..... 8

Çizelge 4.1. Büyütülen ZnS filmlerinin bazı yapısal parametreleri..... 26

Çizelge 4.2. Filmlerin yüzey pürüzlülükleri 30

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. (a) Işığı modüle eden farklı iki dairesel eksene dizilmiş 10 boşluklu ışık kıyıcı (b) Işık şiddetinin zamana bağlı modülasyonu 5

Şekil 2.2. (a) İki eğri bölgeli modülatör (Manning and Peter, 2000) (b) Archimedyan eğrili modülatör (c) Archimedyan eğrili bölgede Fresnel mercek dizileri .. 6

Şekil 3.1. Si disk FTIR verileri 11

Şekil 3.2. Fresnel mercek deseninin Si diske işlenmesia 12

Şekil 3.3. Kuru Aşındırma Şeması (Nojiri, 2015). 13

Şekil 3.4. Termal Buharlaştırma Sisteminin Şematik Gösterimi 15

Şekil 4.1. Kübik (111) ve Hegzagonal (207) kristal yapıda ZnS nin XRD pikleri 24

Şekil 4.2. Si alttaş üzerine büyütülen ZnS filmlerinin XRD desenleri 25

Şekil 4.3. Farklı sıcaklıklarda korning cam üzerine büyütülen ZnS filmlerinin optik geçirgenlik spektrumları 27

Şekil 4.4. ZnS filmlerinin Tauc grafikleri 27

Şekil 4.5. Büyütülen ZnS filmlerinin 2 ve 3 boyutlu AFM yüzey görüntüleri (a) TH327 (b) TH328 (c) TH329 ve (d) TH330. 29

Şekil 4.6. Tek Yüzeyi Kaplı Si Disk Geçirgenlik Değerleri 31

Şekil 4.7. İki yüzeyi ZnS kaplı Si Disk Geçirgenlik Değerleri 31

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Mikro Fresnel lenslerin görünümü 14

Resim 3.2. Kaplama öncesi Si disk..... 14

Resim 3.3. ASENTEK Firmasında kullanılan Termal Buharlaştırma Sistemi..... 16

Resim 3.4. APD 2000 PRO XRD cihazı..... 17

Resim 3.5. Nano Magnetics hp AFM atomik kuvvet mikroskobu. 18

Resim 3.6. ‟Veeco Dektak-150‟ profilometre..... 19

Resim 3.7. Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis Spektrometresi. 21

Resim 3.8. Bruker Vertex 80 FTIR Spektrometresi 22

Resim 4.1. Motor montajı ile birlikte ZnS kaplı Si Disk 32

Resim 4.2. Geliştirilen Si ışık kıyıcı kullanılarak termal kmera ile elde edilen görüntü. 33

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
Å	Angstrom
dk	Dakika
RPM	dakikadaki devir sayısı
λ	Dalgaboyu
°	Derece
°C	Derece santigrat
W	Güç (Watt)
g	Gram
n	Kırılma indisi
µm	Mikrometre
µs	Mikro saniye
mm	Milimetre
nm	Nanometre
mbar	Mili bar
cm	Santimetre
s	Saniye

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
ARC	Yansıma önleyici kaplama
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
eV	Elektrovolt
FTIR	Kızılötesi dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
FWHM	Pik yarı genişliği
H_2S	Hidrojen Sülfür
KÖ	Kızılötesi

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
RPM	dakikadaki devir sayısı
S	Sülfür
XRD	X-ışını Kırınımı
Vis	Görünür
ZnS	Çinko Sülfür
ZnSe	Çinko Selenid

1. GİRİŞ

11 Şubat 1800'de astronom Sir William Herschel, güneş gözlemleri sırasında teleskoplardaki güneş görüntüsünün parlaklığını azaltmak için optik filtre malzemesi aramaktaydı. Parlaklıkta benzer azalmalar sağlayan farklı renkli cam örneklerini test ederken, bazı filtre örneklerinin güneş ısısının çok azını geçirdiğini fark etti. Bazı filtre örnekleri ise o kadar çok ısı geçiriyordu ki, yalnızca birkaç saniyelik gözlemden sonra göz hasarı riski ortaya çıkmaktaydı. Kullandığı kırmızı filtrede sıcaklığın çok fazla olduğunu gördü. Daha sonra güneşten gelen ışığı prizmadan geçirerek görünür bölgedeki kırmızı ışığın sonuna termometre koydu ve bu kısmın diğer bölgelerden daha sıcak olduğunu gözlemledi. Bu da ona görünür bölge dışında da ışımaların olduğunu düşündürdü ve kızılötesi radyasyonu keşfetmesini sağladı.

1878'de bolometrenin keşfine kadar kızılötesi bölgedeki ışınımlar hakkında fazla bir gelişme yaşanmadı. Bolometre sıcaklık değişimine göre malzemelerin dirençlerindeki değişimi belirleyen bir ölçüm aletidir. Mutlak sıfır (-273 °C) sıcaklığa sahip olmayan her cisim kızılötesi bölgede bir elektromanyetik ışıma yapmaktadır. Bu nedenle her nesne doğal halinde gözle tespit edilemeyen bir ışık yayar. Kızılötesi görüntüleme sistemleri bu ışımaları algılayarak görüntüye dönüştürür. Bu ışımaları tespit edebilmenin birçok avantajı vardır. Örneğin, bir yangın tespit edilebilir, bir canlının karanlık bir ortamda görüntülemesi yapılabilir veya füzeler için erken uyarı sistemleri geliştirilebilir. Pyroelektrik malzemeler yüzeylerinde oluşan sıcaklık farklarını elektrik akıma dönüştüren malzemelerdir. Bu nedenle pyroelektrik dedektörler üzerine düşen kızılötesi ışınım periyodik bir şekilde düzenlenirse sıcaklık farkı yaratılacak ve bu sayede görüntü elde edilecektir. Aynı sıcaklıktaki cisimler benzer dalgaboyunda elektromanyetik dalga yaratacaklarından görüntüleri birbirinden ayırmak zordur. Bu nedenle dedektörlerin üzerine düşen ışığın şiddetini arttırmak ve hassas bir algılama sağlanması gerekmektedir. Algılama sistemleri temel olarak mercek optik pencere, dedektörden ve dedektörde oluşan sinyalleri görüntüye dönüştüren bir yazılım sisteminden oluşur (Çalışan, 2011).

Farklı spektral aralıklara göre optik kaplamlalar görüntüleme sistemleri ve optik sistemler için önemli bir role sahiptir. Kızılötesi bölgede çalışan görüntüleme sistemlerinde ışığın geçirgenliğini arttırmak önemlidir. Işık geçirgenliğini arttırmak için yüzeylere ince film

kaplamaları yapılmaktadır. Yansıma önleyici ince filmlerin tekli ya da çoklu katmanlarının oluşturulması ile ışık geçirgenlikleri artmaktadır. Kızılötesi optikler genellikle Si ve Ge tek kristallerinden oluşmaktadır. Kızılötesi termal görüntüleme sistemlerinde ışığı modüle etmek amacıyla Si optik pencereler tercih edilmektedir. Bu pencerelerin ışığı modüle edebilmesi için yüzeylerinde özel geometriler bulunması ve yüzeylerinin yansıma önleyici ince filmler ile kaplanması gerekmektedir. Bu desenlemeler çeşitlilik göstermektedir. Arşimedyan geometrisi bazı teknolojik açılardan kızılötesi kameralarda tercih edilmektedir. Bu optik pencerelerin üzerine yansıma önleyici filmlerin geliştirilmesi hem kristalin hem de kaplanan filmin kırılma indislerine bağlıdır. Filmlerin kalınlıkları λ/4 kuralı dikkate alınarak ilgili spektral bölgeye göre geliştirilmelidir. Soğutmasız termal kameralarda 8-12 μm dalgaboyundaki ışık kullanılmaktadır. Kızılötesi bölgede geçirgenliği yüksek yansıma önleyici malzemeler ZnS, ZnSe, PdS, CdTe şeklinde literatürde yer almaktadır (Ghosh ve Upadhyaya, 2009; Sood, Puri, Becker, Tidrow, Balcerak, Brill, Wijewarnasuriya, Dhar, Boieriu, Fulk, Sivananthan veFinke, 2006). Bu malzemeler içerisinde yüksek saflıkta, ucuz ve kolay elde edilebilen ZnS, 0,4 μm'den 11 μm'ye kadar kayda değer soğurma bandına sahip olmaması nedeniyle yansıma önleyici optik kaplamalarda tercih edilmektedir (Petrosky, 1991; Sood, A. K., Zeller, Sood, A. W., Babu, Gunapala, Soibel, Ting, Chaudhary ve Efstathiadis, 2022)

Yansıma önleyici filmlerin yaygın üretim teknikleri vakumlu termal buharlaştırma, elektron-demeti ile buharlaştırma sol-gel, spin kaplama, CVD, püskürtme (sputter) tekniği şeklinde sıralanabilir (Abdallah, Alnama ve Nasrallah, 2019). ZnS, ZnSe gibi yansıma önleyici filmlerin kaplama süreçlerinde kullanılan tekniğe bağlı olarak çeşitli zorlukları vardır. Bu zorlukları gidermek için çeşitli kaplama prosedürlerinin gerçekleştirildiği bilinmektedir. Bu zorluklardan biri; püskürtme sistemi kullanıldığında, filmdeki S oranının düşüklük olmaktadır ve bu düşüklüğü engellemek amacıyla kaplama sırasında H2S gazını kullanılır. Ancak bu gazın toksik etkisi nedeniyle gerekli önlemlerin alınması gerekliliği maliyet yönünden olumsuz etkilemektedir. Çalışmamızda da kullanılan Vakumlu Termal Buharlaştırma Sistemi; ZnS kaplama için kullanılan tekniklerden bir diğeridir. Bu tez çalışmasında üretilen ince filmler ASENTEK Savunma ve Enerji Teknolojileri Ltd. Şti.'deki Termal buharlaştırma sistemi ile geliştirildi. Bu teknikle ZnS buharlaştırılarak kaplanması ile oluşan ince filmde sülfür eksikliği oluşabilmektedir. Bu olumsuzluk ZnS ve S malzemelerinin eş buharlaştırılması ile aşılabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında ZnS

ince filmleri Si optik pencereler üzerine Vakum Buharlaştırma Sisteminde ZnS ve S eş zamanlı olarak buharlaştırılarak geliştirildi. Büyütülen ARC filmlerin optik ve yapısal özellikleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma merkezinde bulunan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) cihazı ile; kristal yapı analizleri X–ışını Kırınımı (XRD) cihazı ile ve filmlerin yüzey analizleri Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile incelendi. Yüzeydeki mikrolensler hizmet alımı ile kuru aşındırma yöntemi ile oluşturuldu.

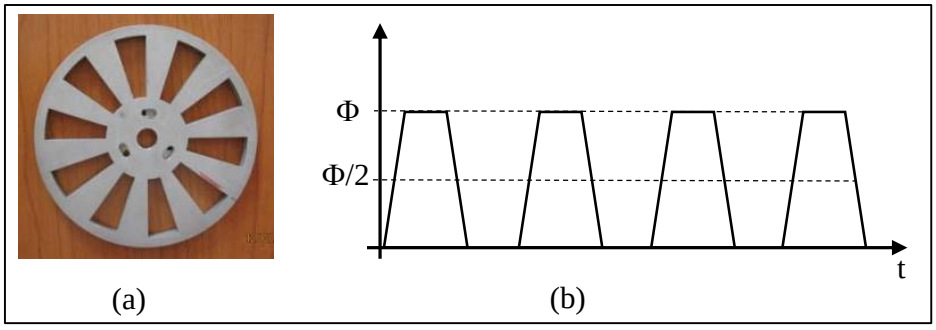
Tezin ikinci bölümünde, ışık kıyıcılar, Si optik pencereler ve ZnS hakkında literatüre dayalı genel bilgiler sunuldu. Çalışmada Kullanılan Yöntemler ve Karakterizasyon Teknikleri üçüncü bölümde verildi. Dördüncü bölümde ise elde edilen bulgular verildi. Beşinci bölümde ise bu sonuçların değerlendirmeleri ve öneriler yapıldı.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Işık Kıyıcılar

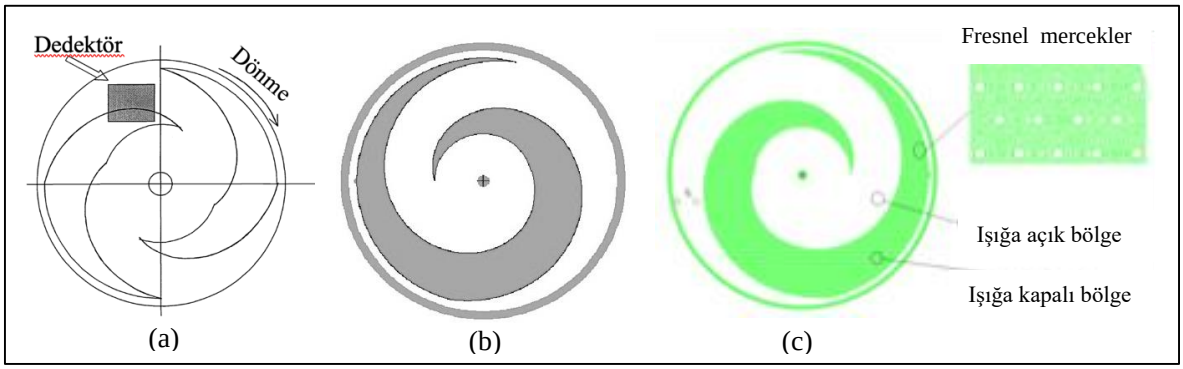
Bir ışık demetini mekanik yollarla periyodik olarak iletmek ve kesmek için kullanılan cihazlara ışık kıyıcı adı verilir. Optik kıyıcılar, radyometriden teleskoplara ve lazer kurulumlarına kadar algılamada geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır (Csukas ve Duma, 2018). Genellikle, bir ışının optik gücünü periyodik olarak modüle etmek için kullanılırlar. Dönel optik kıyıcılar, ışığın kontrollü modülasyonu amacıyla kullanılan makroskopik optomekanik cihazlardan bazılarıdır (Duma, 2013).

Basit mekanik ışık kıyıcılar genel olarak ışığın geçişine izin veren ve ışığın geçişini engelleyen kısımlardan oluşur. Herhangi bir optik dalgaboyu için çalışmasını sağlar ve açık durumda ışın bozulmaları önlenir. Mekanik kıyıcılar, frekans ve anahtarlama hızı bakımından sınırlıdır ve anahtarlama sırasında kısmen kesilmiş kirişler verirler. Işığın geçişini engelleyen kısımlar ışık kıyıcının bıçağı olarak adlandırılır. Bu bıçaklar ışık kıyıcının uygulanacağı sisteme göre değişiklikler gösterir. Optik kıyıcıların en yaygın şekli dönen disk kıyıcılardır. Bir motor yardımı ile diskler döndürülür. İstenilen yoğunlukta ışığın geçirilebilmesi için diskin döndürülme frekansı hassas bir şekilde ayarlanmalıdır. Optik sistemlerde istenmeyen titreşimler olmaması amacıyla motor seçimi büyük önem taşır. Şekil 2.1(a)'da ışık kıyıcı için bir örnek sunulmaktadır.



Şekil 2.1. (a) Işığı modüle eden farklı iki dairesel eksene dizilmiş 10 boşluklu ışık kıyıcı (b) Işık şiddetinin zamana bağlı modülasyonu (Duma, 2013).

Bu modülatörün ışığı kıyma davranışı Şekil 2.1(b)'de görüldüğü gibidir. Bu modülasyon ışık şiddetinin yarıya düştüğü bölgede yüzde elliden fazla ışık geçirmektedir. Bu ve benzeri modülatörlerin, kıyıcı altına yerleştirilen bir sensör için yeterli ışık kısıtını sağlayamadığı değerlendirilmektedir. KÖ soğutmasız dedektör sensörü üzerinde ışığın veya sıcaklığın değişiminin yumuşak geçişle sağlanması önemlidir. Bu bakımdan ışık modülasyonunun sinüzoidal değişim göstermesi uygun olacaktır. Bu amaçla literatürde geliştirilen iki modülatör disk geometrisi Şekil 2.2'de verildi.



Şekil 2.2. (a) İki eğri bölgeli modülatör (Manning ve Peter, 2000) (b) Archimedyan eğrili modülatör (Hu, Yuan ve Long, 2010) (c) Archimedyan eğrili bölgede Fresnel mercek dizileri (Hu ve diğerleri, 2010).

Şekil 2.2-(a)'da verilen geometride eğrisel bölgeler ışık için açık bölgelerdir. Bu modülatörde ışık sinüzoidal modüle edilmektedir. Şekil 2.(b)'de verilen modülatörde ışığı kısıtlı geçiren bölge (Şekil 2.(c)) yüzeyde oluşturulan mikro Fresnel merceklerle sağlanmaktadır. Bu mercekler sayesinde ışığa kapalı bölge, modülatör altına yerleştirilen dedektör çipinin üzerine %20-30 civarında ışık düşürmekte ve ışık modülasyonu açısından avantajlı hale gelmektedir.

Bu modülatörle dedektör sıcaklığı optimum değerde tutulur. Açık aşamasında, dedektör cismin yüksek çözünürlüklü görüntülerini alır. Kapanma aşamasında, mercekler sayesinde modülatör çıkışında ışığın kırınımı ile dedektör düşük seviyede düzgün radyasyon alır ve bu sayede düşük frekanslı sinyalleri etkili bir şekilde azaltır.(Hu ve diğerleri, 2010) Çalışmamızda bu modülatör diski Si kristalinden özgün Fresnel mercek dizini tasarımı ile gerçekleştirildi.

2.2. Si Tek Kristalinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Günümüz teknolojisinde yarıiletkenler kritik malzemelerdir. Özellikle elektronik teknolojide hemen her üründe karşımıza çıkmaktadır. Doğada hazır halde element olarak bulunan Ge ve Si yarıiletkenleri birçok optomekanik ve elektronik cihazda kullanılmaktadır. Kullanım alanlarının genişlemesi ve cihazların verim, performans artışında önemli bir rol oynaması sebebiyle bu yarıiletkenlerin laboratuvar ortamında yüksek saflıkta üretimi için belirli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler Czochralski, Bridgman ve Kryopolous olarak kısaca sıralanabilir. (Brown, 1988)

Silikon tek kristalleri, ilk olarak germanyumdan yapılan transistörün icadından 2 yıl sonra, 1950'de pota çekerek büyütüldü. İki yıl sonra, potasız yüzdürme bölgesi çekme icat edildi. Bu aşamada, kristal çekme için başlangıç polisilikonunun düşük saflığı en büyük problemdi. Tekrarlanan potasız bölge eritme (bölge rafine etme) yoluyla silikonun rafine edilmesi sağlandı. Ancak bor bu teknikle yeterince uzaklaştırılamamaktadır. 1961'den beri, ham silikon önce bir silana dönüştürülür, daha sonra silan damıtma ve adsorpsiyon yoluyla saflaştırılır ve son olarak kimyasal buhar biriktirme ile yeniden element silikona dönüştürülür. Bu saflaştırma tekniği, bölge arıtma ile daha fazla saflaştırma gerektirmeyen bir polisilikon verir. 1958'de yüksek düzeyde entegre cihazların üretimi için mutlak bir gereklilik olan çıkıksız kristal büyümesinin icadıydı. İlk kristaller, yaklaşık 0,5" çapında ve yaklaşık 100 g ağırlığındadır. Ağırlıklı olarak ekonomik nedenlerden dolayı, pota çekilmiş kristallerin boyutu, bugüne kadar yaklaşık her 4 yılda bir 12" çapa (300 mm dilimler için) ve 250 kg ağırlığa kadar kademeli olarak artmıştır. Üretilen tek kristal Si çapı ihtiyaç doğrultusunda günden güne büyümektedir. (Zulehner, 2000). Si tek kristaller kızılötesi ışık geçirgenlikleri sebebiyle termal uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Si tek kristalinin başlıca özellikleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Si tek kristalinin bazı özellikleri

Elektron dizilimi	[Ne] $3s^2$ $3p^2$
Yoğunluk (g/cm3)	2,33
Yasak enerji aralığı (eV)	1,17
Erime sıcaklığı (°C)	1410
Kaynama sıcaklığı (°C)	2355
Kırılma indisi	1,46

2.3. ZnS İnce Filminin Özellikleri

Teknolojinin gelişiminde en önemli kriterlerden biri malzeme geliştirilmesidir. Elektronik ve optoelektronik uygulamalarda II-VI grup bileşik yariletkenlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. ZnS malzemesi II-VI grup geniş bant aralıklı n-tipi bir yarıiletkendir. ZnS malzemesi Kübik (Zinc Blend) ve Hegzagonal Würtzite olmak üzere iki farklı kristal yapıda bulunur.

Son yıllarda çevre dostu, ucuz maliyetli ve yüksek verimlilikte ürünler geliştirilmek için çalışmalar artmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda nano yapılara olan ilgi günden güne artmaktadır. Nano yapılar hem optik alanında hem de kullanılan ürünlerin kompakt bir hale getirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Bu hedef doğrultusunda sahip olduğu optik ve elektronik özellikleri sayesinde ZnS materyaline olan ilgi artmıştır. ZnS ince filmler, başta güneş hücrelerindeki verimi arttırmak olmak üzere mavi ışık diyotlarda, optik pencerelerde, transistörlerde ve diyotlarda kullanılmaktadır (Salih, 2017). ZnS malzemesinin temel özellikleri Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. ZnS malzemesinin bazı özellikleri

Kırılma indisi	2,20 – 2,20
Molekül ağırlığı (g/mol)	97,474
Yasak enerji aralığı (eV)	3,5-3,93
Yoğunluğu (g/cm3)	4,090
Erime sıcaklığı (°C)	1830

Bu çalışmalar sonucunda; 3.50-3.85 eV arasında değişen geniş bant aralığına sahip, kimyasal olarak kararlı ve görünür ve kızılötesi bölgede düşük optik soğurmaya sahip olması nedeniyle çinko sülfür (ZnS) materyaline olan ilgi artmıştır. 2-12 μm bölgesinde yüksek optik geçirgenliği ve 2,26-2,20 (Firoozifar, Behjat, Kadivar, Ghorashi ve Zarandi, 2011) aralığında kırılma indisine sahip olan ZnS ince filmlerini, bu spektral bölgede kullanılan Si ve Ge optik pencereler üzerinde yansıma önleyici olarak kullanımında ideal malzeme haline getirmektedir. Yansıma önleyici kaplamaların kalınlıkları, ilgili spektral bölgede önem taşır. Si alttaş üzerinde kaplanmış ZnS filminin en yüksek optik geçirgenliği 10 μm civarındadır.

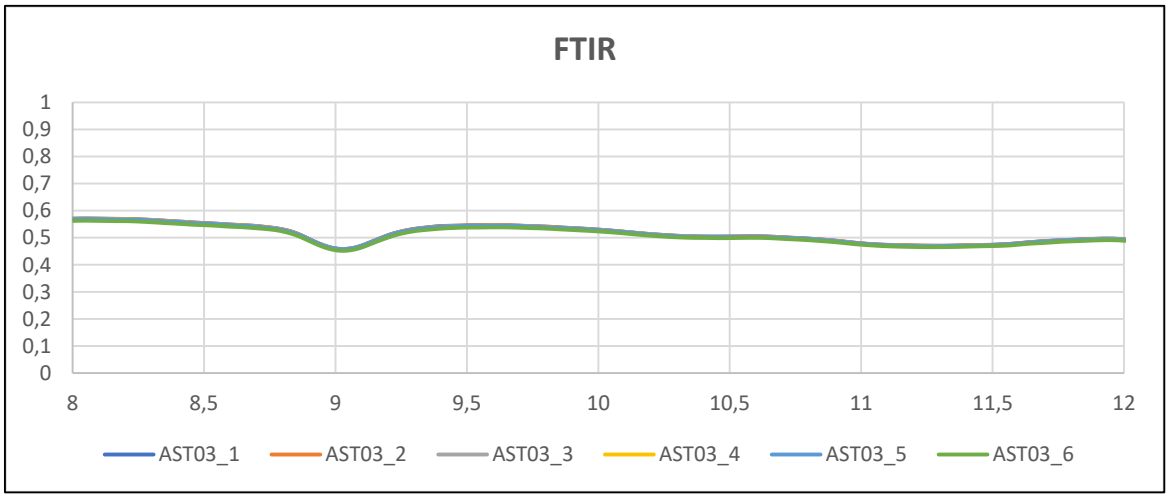
Bu dalgaboyu civarında en düşük yansıma (veya en yüksek optik geçirgenlik) elde edebilmek için kaplanacak ZnS filminin kalınlığı λ /4 kuralı olarak bilinen aşağıdaki denklem ile belirlendi. (Resnick, Halliday ve Krane, 1916)

$$d_f = \frac{\lambda}{4n_f} \tag{2.1}$$

Burada d_f filmin kalınlığı, n_f filmin kırılma indisi ve λ ilgili spektral aralığın ortalama dalgaboyudur.

3. KULLANILAN YÖNTEMLER VE KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

Işık kıyıcının taban malzemesi olarak 600 µm kalınlığında yarı-yalıtkan Si tek kristal disk kullanıldı. Si kristalinin, termal görüntüleme sistemleri için atmosferin optik olarak şeffaf bölgesi olan 8-12 µm spektral aralığında optik geçirgenliği ortalama %50 civarındadır ve Şekil 3.1'de FTIR ölçümleri verilmiştir.



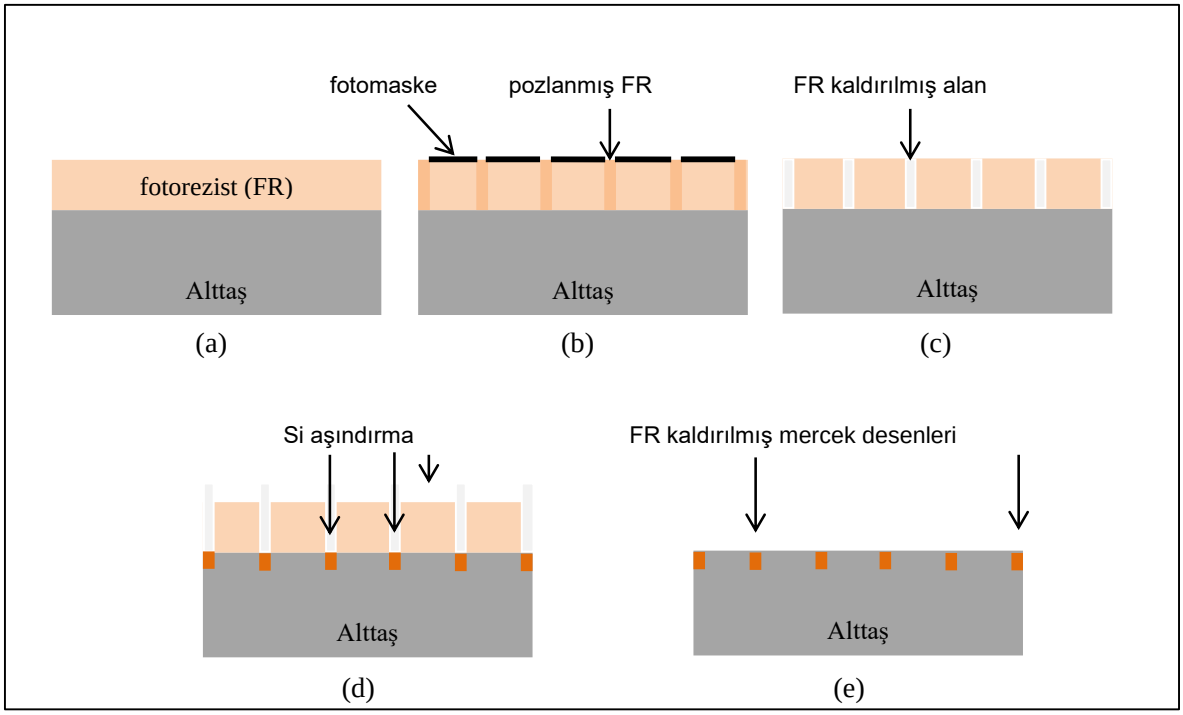
Şekil 3.1. Si disk FTIR grafiği

Termal görüntüleme sistemlerinde kullanımı için yüzeyine yansıma önleyici film kaplayarak, Si diskin optik geçirgenliğinin %90 seviyesine çıkarılması gereklidir. Çalışmamızda yansıma önleyici olarak ZnS malzemesi kullanıldığından, ZnS ince filmleri Si üzerine büyütülerek karakterizasyonları incelendi. Işık kıyıcı üretiminde ilk olarak Si disk üzerine düşük geçirgenlik gösteren Arşimedyan eğrisi şeklinde desenlenmiş kısım litografi tekniği ile oluşturuldu. Devamında ZnS materyali Si disk üzerine vakumlu termal buharlaştırma yöntemi ile kaplandı. Elde edilen kaplamaların kalınlık ölçümleri iğne uçlu (Sylus tip) profilometre (Dektak 150) ile ölçüldü. Yapısal analizler için X ışınları Difraktometresi (XRD) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) sistemleri, optik geçirgenlik analizi için görünür bölgede UV-Vis spektrometresi ve KÖ bölgede Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) sistemi kullanıldı.

3.1. Kuru Aşındırma Tekniği (Dry Etching)

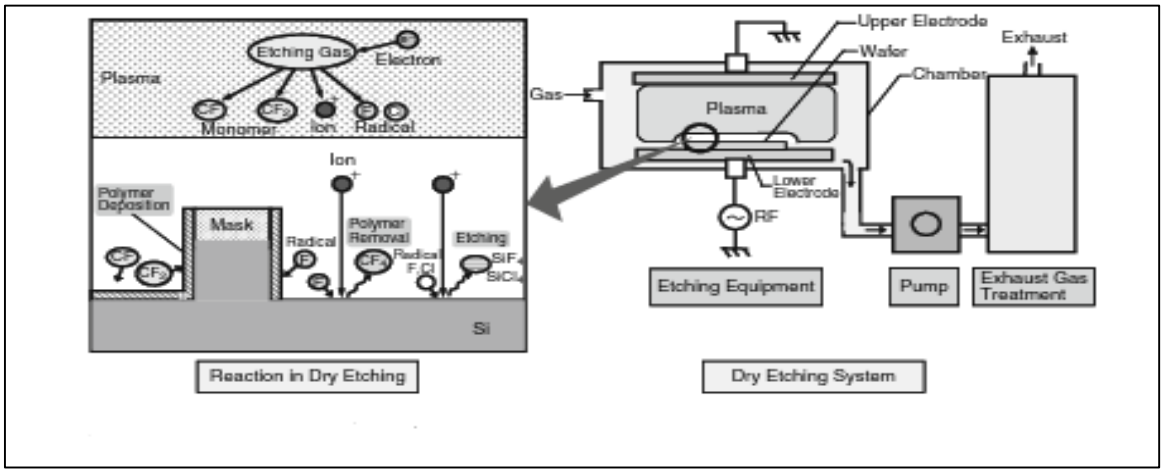
Işık kıyıcı Si diskin yüzeyinde Archimedyan eğri ve alan içerisindeki bölge üzerinde Fresnel mercekler tasarlandı. Tasarlanan geometri ve merceklerin Si disk üzerine aktarılması için fotomaske tasarlandı ve üretildi. Tasarım parametreleri, ticari kaygılar nedeniyle bu çalışmada detaylandırılmadı. Tasarlanan desenlerin Si üzerine aktarımı bilinen fotolitografik yöntemle: fotorezist kaplama, fotomaske desenlerinin oluşumu için UV ışıkla pozlama, fotorezist kaldırma adımları ile gerçekleştirildi:

1. Ön yüzeyin spin kaplama sistemi ile (homojen dağılım için yaklaşık 4000-6000 rpm hızında) fotorezistle (FR) kaplanması,
2. 90-100 ^{o}C ısıtılarak foto rezistin organik çözücüsünün uzaklaştırılması,
3. Maskeleme ve Maske Hizalayıcı ile yüzeyin UV pozlandırılması,
4. Pozlandırılan kısmın kaldırılması,
5. Yüzeyin aşındırılarak maske deseninin yüzeye işlenmesi,
6. Foto rezist filmin kaldırılması (aseton vb. ile)



Şekil 3.2. Fresnel mercek deseninin Si diske işlenmesi (a) fotorezist (FR) kaplama (b) Maskeleme ve pozlandırma (c) FR aşındırma-uzaklaştırma (d) yüzeye işleme-aşındırma (e) FR uzaklaştırma

Mercek desenleri kuru aşındırma ile gerçekleştirildi. Uygulanan kuru aşındırma süreci şematik olarak Şekil 3.3'de verildi.

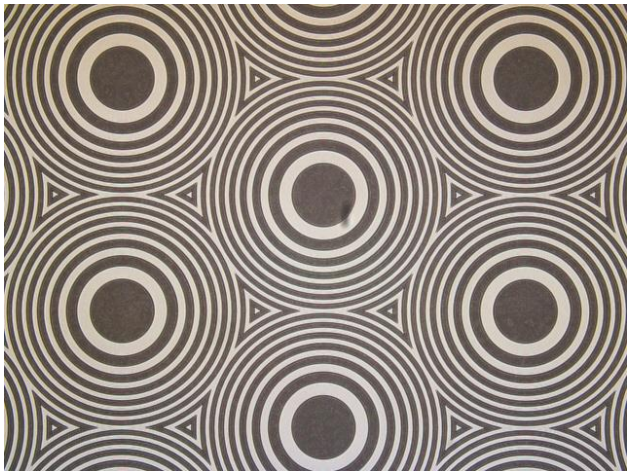


Şekil 3.3. Kuru Aşındırma Şeması (Nojiri, 2015).

Şekil 3.3'de reaktif iyon aşındırma (RIE) kuru aşındırma işlemine genel bir bakış gösterildi. Aşındırma odası ilk önce yüksek vakuma pompalandıktan sonra, aşındırma gazı verilir. Daha sonra, birbirine bakan bir çift elektrota radyofrekans (RF) gücü uygulanarak bir plazma üretilir. Asitleme gazı, iyonlar ve radikaller gibi reaktif türler ve polimerlerin temelini oluşturan monomerler oluşturmak için bu plazmadan ayrışır. Bu reaktif türler ve monomerler, alttaş yüzeyine taşınır ve aşındırma hedef malzemesi ile reaksiyona girer. Si alttaş üzerinde ilk olarak bir oksit filmi oluşturulur. Litografi tekniği ışığa duyarlı fotomaskelerin numune üzerine hassas bir şekilde yerleştirilme işlemidir. Ardından, litografi teknolojisi ile bir direnç maskesi üzerinde desenleri oluşturulur. Alttaş kuru aşındırma ekipmanına yerleştirilir. Alttaki Si, maske olarak kullanılan rezistör ile kazınır ve oksit filmi açığa çıktığında aşındırma işlemi durur. Artık ihtiyaç duyulmayan rezistör çıkarılır ve Si aşındırma işlemi tamamlanır (Nojiri, 2015). Bu metotla birlikte alttaşlar üzerinde nano-mikro yapılar oluşturulur.

Diskin yüzeyinde ışık geçirgenliği düşük bölge oluşturulması gerekmektedir. Bu sayede diskin döndürülmesi ile birlikte dedektör üzerine düşen ışığın sinüs dalgaları haline yani dedektörün üzerinde düzenli bir sıcaklık farkı oluşturarak pyroelektrik dedektörün polarizasyonunu sağlamaktadır. Bu ışık geçirgenliği düşük bölge yüzeyde oluşturulan fresnel lensler ile oluşturuldu. Bu fresnel lensleri oluşturmak için litografi tekniği uygulandı. Fotomaske oluşturuldu. Kuru aşındırma metodu ile yüzey aşındırıldı. Bu fresnel lens yapısı

sayesinde ışık geçirgenliği düşürülürken dedektör üzerine düşen ışığın kırınımı düzenlenerek ve ışık kaybı minimize edildi. Oluşturulan desenler Resim 3.1'de verildi. Bu desenler Si disk yüzeyine Arşimedyan geometride oluşturuldu. Kaplamasız diskin görüntüsü Resim 3.2' de verildi.



Resim 3.1. Mikro Fresnel lenslerin görünümü

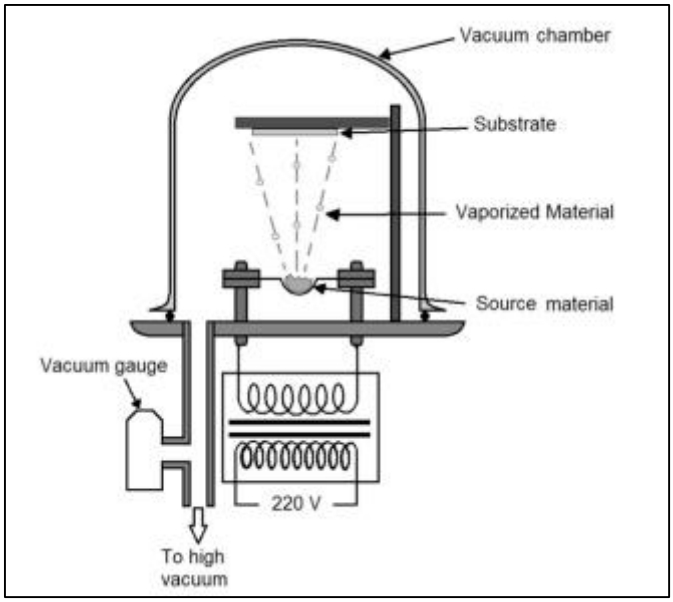


Resim 3.2. Kaplama öncesi Si disk

3.2. Vakumlu Termal Buharlaştırma Sistemi

Vakumlu termal buharlaştırma sistemi, düşük basınç ortamında bir malzemenin buharlaştırılarak alttaş üzerine kaplanmasını sağlayan bir sistemdir. Malzeme genellikle tungstenden yapılan potaya yerleştirilir. Kaplama ortamı uygun basınçlara geldiğinde güç kaynağı ile tungsten pota ısıtılır. Pota ile alttaş arasındaki mesafe, uygulanacak güç ve

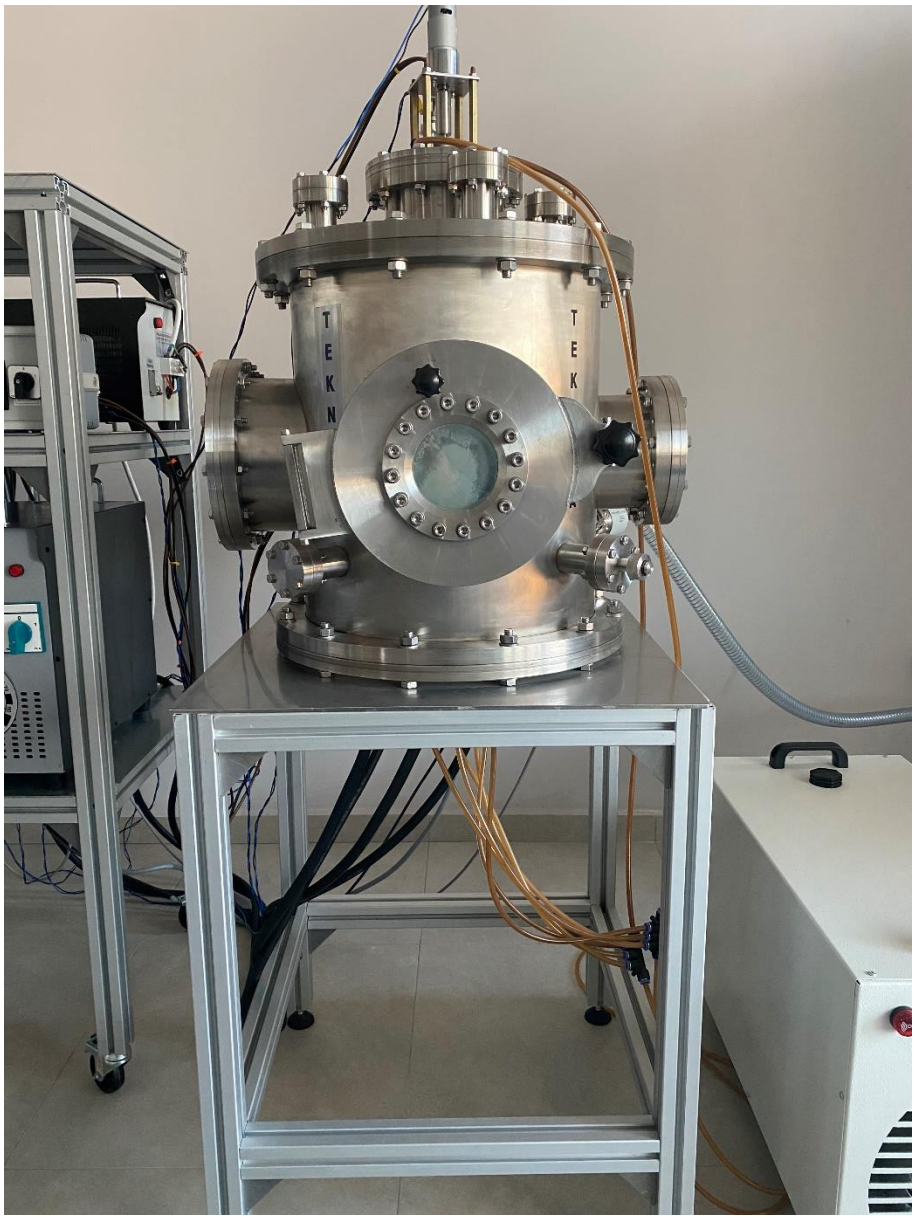
vakum değeri kaplamayı etkileyen parametrelerdir. Pota ile alttaş arasındaki mesafe arttıkça saçılmalar artacağından kaplama hızı düşmekte ancak daha geniş bir alana kaplama yapmaya olanak sağlamaktadır. Verilen güç ise potadaki sıcaklığı değiştirdiğinden malzemeye uygun bir güç uygulanmalıdır. Vakum değeri alttaş üzerinde oluşacak olan kaplamanın kalitesi ve buharlaştırılan malzemenin buharlaşma sıcaklığını etkilediğinden önemlidir. Düşük basınç ortamı sayesinde filmlerde oluşabilecek yabancı atomların önüne geçilir. Termal buharlaştırma sistemi yüksek kaplama oranına sahiptir; bu sayede hızlı ve ekonomik ince filmler üretmeye olanak sağlar. Termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.4' de verildi.



Şekil 3.4. Termal Buharlaştırma Sisteminin Şematik Gösterimi

Yapılan tez çalışmasında ZnS ince filmlerinin karakteristiklerini belirleme çalışmalarında Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma Merkezinde bulunan Termal Buharlaştırma Sistemi kullanıldı. Bu sistem iki adet güç kaynağı içermekte ve aynı anda iki malzemenin buharlaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Sistemin numune tutucusu Z ekseni etrafında dönebilmektedir. Bu döndürme işlemi sayesinde daha homojen filmler elde edilmesi sağlandı. Ayrıca numune tutucu ısıtılabilmekte ve bu sayede farklı alttaş sıcaklıklarında kaplama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında Si alttaşlar üzerine farklı alttaş sıcaklıklarında ve farklı kalınlıklarda yansıma önleyici ince film kaplamaları geçekleştirildi.

Çalışmamızın Si modülatör diskleri ASENTEK firmasında bulunan eş-buharlaştırma sistemin kullanılarak gerçekleştirildi. Kullanılan sistemin fotoğrafı Resim 3.3'de verildi. Bu sistem, homojen kaplama için z-ekseni etrafında döndürülebilen 16 cm çaplı numune tutucuya, üç malzemenin aynı anda buharlaştırılabileceği potalara sahiptir.

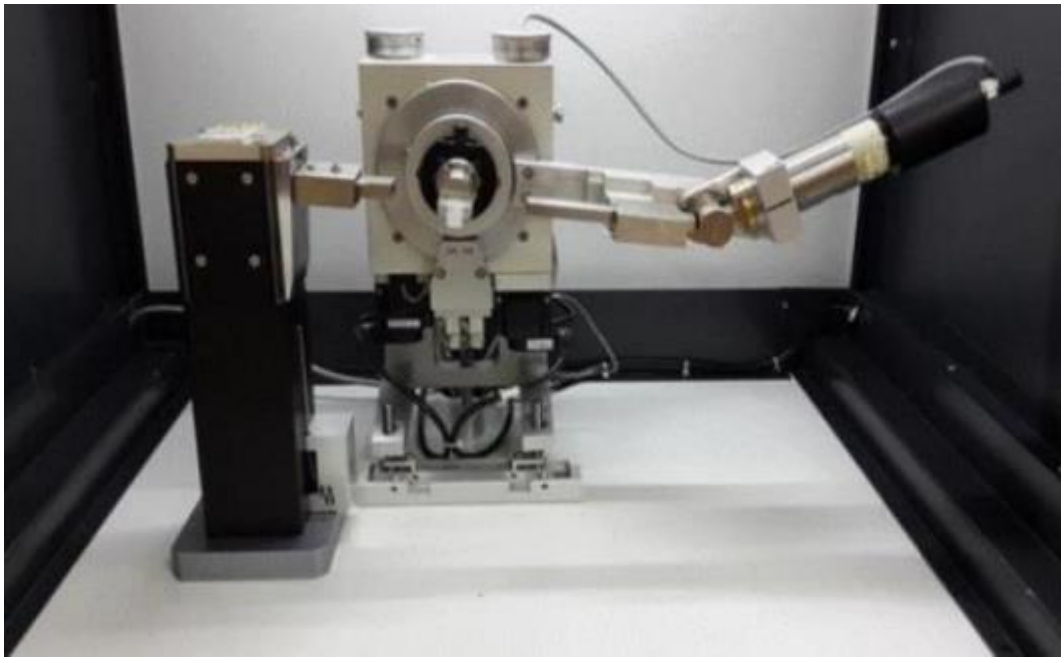


Resim 3.3. ASENTEK Firmasında kullanılan Termal Eş-Buharlaştırma Sistemi

3.3. X Işını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınım analizi (XRD), bir malzemenin kristalografik yapısını belirlemek için malzeme biliminde kullanılan bir tekniktir. X-ışınları düşük dalgaboyuna (0.1-100 Å) ve yüksek enerjiye sahiptir. XRD sisteminde, malzeme yüzeyine X-ışınları gönderilir ve malzeme yüzeyini terk eden X-ışınlarının yoğunluklarını ve saçılma açılarını ölçülerek malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi sahibi olunur. Numune üzerine X-ışını demeti belirli bir θ açısı ile gönderilir. Numuneden yansıyan geçen ve kırılan X ışınları bir ışık girişimi oluşturur. Aynı dalgaboyuna sahip ışıklar üst üste gelerek birbirini güçlendirir diğerleri ise soğurarak girişim desenleri oluşur. Bu sayede pik noktaları malzeme hakkında bilgi verir.

XRD analizinin birincil kullanımı, malzemelerin kırınım modellerine göre tanımlanmasıdır. XRD, faz tanımlamasının yanı sıra, iç gerilmeler ve kusurlar nedeniyle gerçek yapının ideal olandan nasıl saptığı hakkında da bilgi verir. Bu tez çalışmasında Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma Merkezinde bulunan XRD Sistemi kullanıldı. (Resim 3.4)



Resim 3.4. APD 2000 PRO XRD cihazı

3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

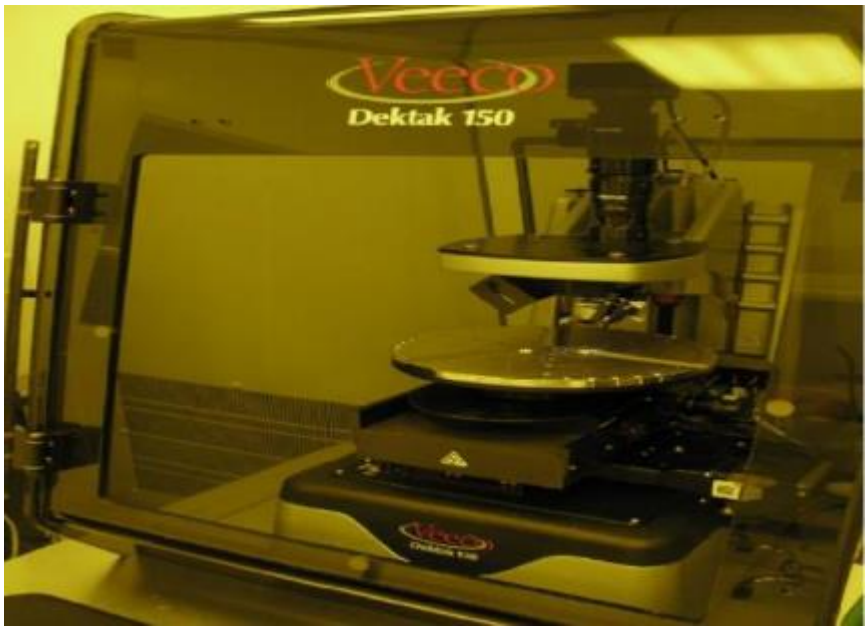
Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) cantilever adı verilen birkaç mikron uzunlukta bir iğne ucun yüzey üzerinde tarama yaparak topografisini elde etmeyi sağlayan sistemdir. Bu iğne uç yüzey üzerinde tarama yaparken uç ile numune yüzeyi arasındaki atomik kuvvetler iğne ucunda hassas sapmalara sebep olur. İğne ucundaki bu yer değiştirmeler piezoelektrik malzeme ile tespit edilir ve atomik kuvvetlerin büyüklüğü hakkında bilgi verir. Her atomik bağ farklı kuvvetler oluşturacağından numunenin atomik yapısı hakkında bilgi sahibi olunur. İki boyutlu veya üç boyutlu görüntüler elde edilmesine olanak sağlar. AFM sistemi ile molekküller arası ilişki, yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki kusurlar ve bu kusurların yoğunlukları tespit edilebilir. Yüzey pürüzlülüğünü tespit etmek için kullanılan en yaygın yöntem ortalama karekök (RMS) metodudur. Bu çalışmada, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Nanomanyetik marka Pro-AFM sistemi ile yüzeyler incelendi (Resim3.5).



Resim 3.5. Nano Magnetics hp AFM atomik kuvvet mikroskobu.

3.5. Profilometre

Profilometreler optik ve iğne uçlu (Stylus tip) olmak üzere temel olarak iki farklı tipte ölçüm yapar. Optik profilometreler ışığın girişim desenini kullanır. Numune üzerine düşürülen referans ışık yüzeyden yansıyan ışık ile bir girişim deseni oluşturur. Daha sonra oluşan bu girişim desenleri Fourier dönüşümü ile 3B görüntüye dönüştürülür. İğne uçlu (Stylus tip) profilometreler ise numune tutucu tablanın veya iğnenin yüzey üzerinde tarama yapması ile çalışır. İğne uç numune yüzeyine hafifçe dokundurularak tarama işlemi başlatılır. İğne uç numune üzerinde gezerken yüzeydeki yükseklik farklarından dolayı uç üzerinde kuvvetler oluşur ve bu kuvvetler iğne uçta sapmalara sebep olur. Bu sapma verileri kullanılarak yüzey üzerindeki film kalınlıkları okunur. Bu tip profilometreler temaslı bir ölçüm yaptığı için tarama sırasında oluşacak titreşimleri azaltmak ve filme zarar vermemek amacıyla yavaş taramalar tercih edilmelidir. Bu sayede hem ölçümüm doğruluğu artacak hem de film yüzeyinde oluşabilecek deformasyonların önüne geçilecektir. İğne uçlu profilometre fiziksel bir tarama gerçekleştirdiğinden yüzeyde bir referans noktası alınmalıdır. Film kaplanmamış yüzey referans noktası olarak alınarak film kaplı bölgeye doğru tarama gerçekleştirilir ve böylece film kalınlıkları hakkında bilgi sahibi olunur. Bu tez çalışmasında büyütülen ince filmlerin kalınlık ölçümleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Laboratuvarında bulunan "Veeco Dektak-150" iğne uçlu (Stylus tip) profilometre ile yapıldı (Resim 3.6).



Resim 3.6. "Veeco Dektak-150" profilometre

3.6. Morötesi-Görünür Bölge (UV-Vis) Spektrometresi

Yakın mor ötesi ve görünür bölge ışımalarının dalgaboyları sırası ile 200-400 nm ve 400-700 nm dir. Yapılan çalışmada üretilen ince filmlerin optik geçirgenlik değerleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis spektrometresi ile ölçülmüştür (Resim 3.7). Bu cihaz 200 nm ile 1100 nm dalgaboyu arasında çalışmaktadır. Morötesi-Görünür bölge spektrometrisi ile numunelerin morötesi ve görünür bölgedeki optik soğurma, geçirgenlik ve yansıma miktarları tespit edilir. Bu değerler sayesinde yarıiletken ince filmlerin bant aralıkları hesaplanır. Sistem temel olarak bir ışık kaynağı, odaklamayı sağlayan mercekler, prizma, monokromatörler, fotodedektör ve sinyal işleme sisteminden oluşur. Cihazda genellikle UV bölge için ışık kaynağı olarak hidrojen lamba veya dötaryum lamba kullanılır. Görünür bölge ve yakın kızılötesi bölge için ise halojen lambalar veya tungsten flamentler kullanılır. Işık ilk olarak ışık kaynağından gelen ışığın spesifik bir dalgaboyunun seçilebilmesini için monokromatörden geçer daha sonra mercek yardımı ile prizma üzerine düşürülür. Prizmadan gecen ışık odaklayıcı mercekten geçerek çıkış monokromatörüne ulaşır. Bu sayede numune üzerine farklı dalgaboylarında ışık düşürülmesi sağlanır. Son olarak numune üzerinden geçen ışık fotodedektör yardımı ile sinyale dönüştürülür ve bilgisayar yardımı ile numunenin istenilen değerleri okunur. Fotodedektör üzerine düşen ışık ışık kaynağından gönderilen ışık ile karşılaştırılır ve fotodedektör üzerine düşen ışığın numunenin kalınlığına ve malzeme cinsine bağlı değeri

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \tag{3.1}$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikte x yarıiletken kalınlığını ve α malzemenin soğurma katsayısını ifade eder. Fotodedektör üzerine düşen ışık yoğunluğu ışık kaynağından çıkan ışığın yoğunluğu ile oranlanarak

$$T = \frac{I}{I_0} \tag{3.2}$$

eşitliği ile numunenin geçirgenlik değeri elde edilir. Elde edilen geçirgenlik değerleri kullanılarak soğurma değerleri hesaplanır ve bu değereler ile ince filmlerin yasak enerji aralıkları Tauc teorisi ile hesaplanır.

$$ahv = A(hv - E_g)^n \tag{3.3}$$

Bu eşitlikte A sabit bir değerdir, α ise "$-lnT$" ile doğru orantılı olan soğurma katsayısını ifade eder. hv fotonun enerjisidir ve E_g yasak enerji aralığı gösterir. n değeri ise yarıiletken malzemenin doğrudan veya dolaylı bant aralığına göre değişkenlik gösteren sabittir. Yarıiletken doğrudan yasak enerji aralığına sahip ise bu değer 1/2, dolaylı yasak enerji aralığına sahip ise 2 olarak alınır (Makuła, 2018).



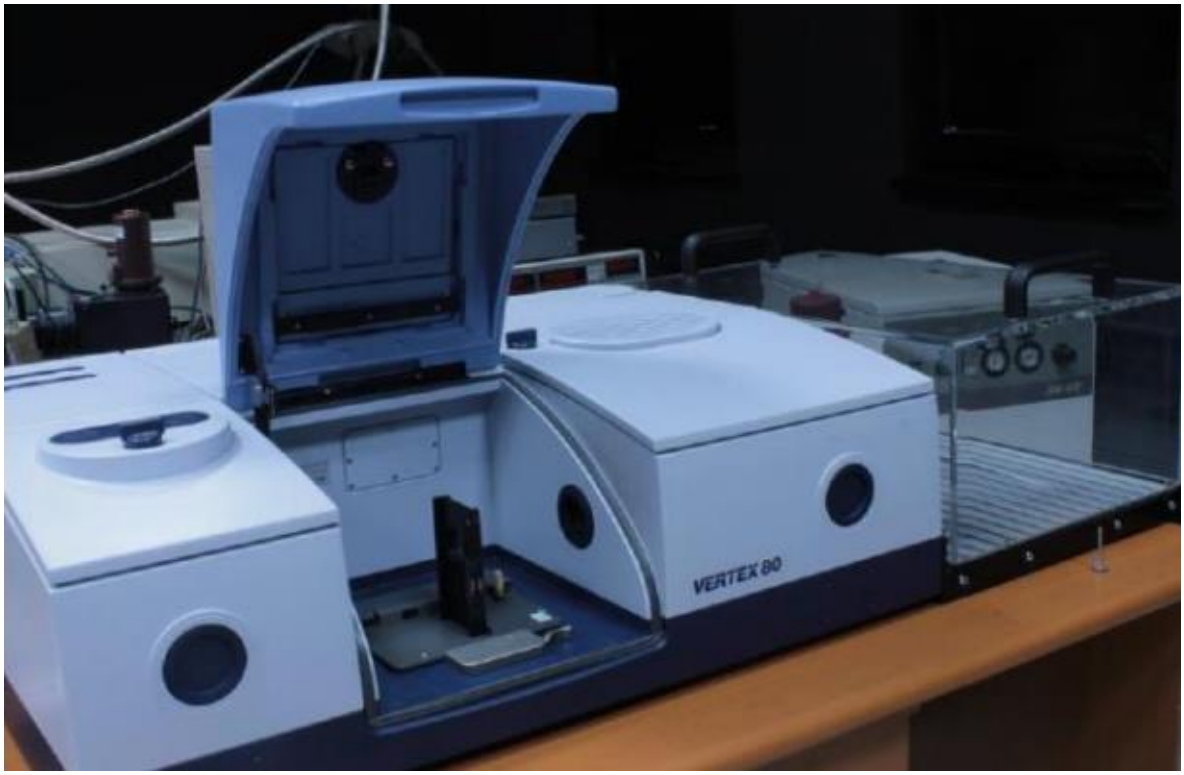
Resim 3.7. Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis Spektrometresi.

3.7. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR)

Kızılötesi ışıma 700 nm ile 1 mm arasında dalgaboyuna sahip ışımaları ifade eder. Yakın kızılötesi, orta dalga kızılötesi, uzun dalga kızılötesi ve uzak kızılötesi olmak üzere kendi içinde ayrılırlar. Yakın kızılötesi 0,75-1,4 μm dalgaboyuna sahiptir ve yüksek enerjiye sahip olması sebebiyle kayıp miktarı azdır. Bu sebeple genellikle fiber optik iletişimde kullanılmaktadır. Orta dalga kızılötesi 3-8 μm dalgaboyu aralığına sahiptir ve füze algılama teknolojisinde kullanılır. Uzun dalga kızılötesi 8–15 μm dalgaboyuna sahip kızılötesi

ışımalardır. Dışarıdan bir ışınım kaynağına gerek duymadan sadece cisimlerin yaydığı ısıyla çalışan termal görüntüleme cihazları bu bandı kullanır. Yapılan bu tez çalışmasında kullanılan dedektör 8-12 µm dalgaboyu aralığında çalışmaktadır.

Kızılötesi spektrometresinde numune üzerine referans bir kızılötesi radyasyon düşürülür. Bu referans ışık malzemede atomlar arası bağlarda titreşime sebep olur. Bu titreşimlerin soğurma frekanslarına karşılık gelen noktalarda pik değerleri gözlenir. Bu değerler Fourier dönüşümü ile incelenerek değişen dalgaboylarında numunenin optik geçirgenlik ve soğurma değerleri ölçülür. Bu ölçüm aralığı genellikle 2-25 µm aralığındadır. Ölçüm hızları yüksektir. Bu tez çalışmasında Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan ve Resim 3.8'de verilen Bruker Vertex 80 FTIR sistemi kullanıldı. Cihaz temel olarak HeNe lazer kaynağı, geniş bant MTC dedektör, yakın kızılötesi bölgede çalışan InGaAs diyot dedektör ve hava soğutmalı DLaTGS detektörden oluşmaktadır.



Resim 3.8. Bruker Vertex 80 FTIR Spektrometresi

4. KIZILÖTESİ IŞIK KIYICILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

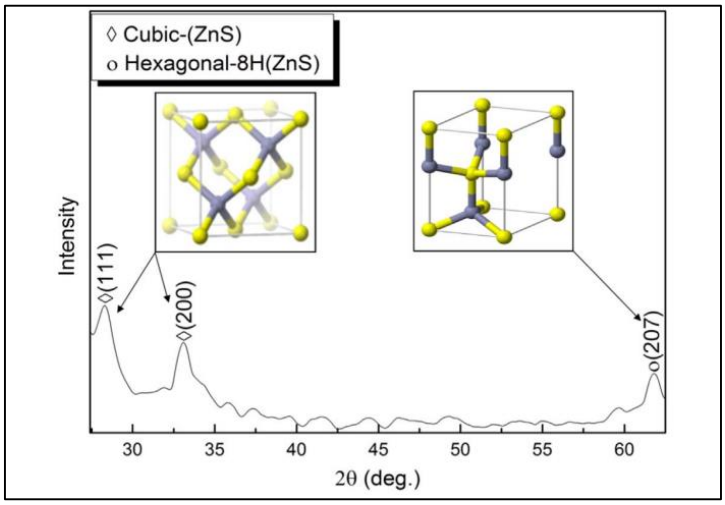
4.1. ZnS İnce Filmlerinin Termal Buharlaştırma Parametreleri

İlk olarak çalışmada, ince filmler alttaş oda sıcaklığında (TH327), 100 °C (TH328), 200 °C (TH329) ve 300 °C (TH330) alttaş sıcaklıklarında kaplamalar ile gerçekleştirildi. Bu kaplamalar gerçekleştirilirken cam, safir ve Si alttaşlar numune tutucuya yan yana tutturuldu. Alınan ölçümlerin sonuçları verilirken TH327 kodlu büyütme sonucunda oluşan cam numuneye TH327_cam, Si alttaşlı numuneye TH327_Si kodu verildi. Cam numuneden UV-Vis ölçümleri alındı. ZnS filminin kırılma indisi hesaplandı ve kalınlık optimizasyonu yapıldı. Daha sonra kalınlık ve alttaş sıcaklığına karar verildikten sonra AST kodlu çalışmalar Asentek firmasında gerçekleştirildi ve yüzeyi desenlendirilmiş 69 mm çaıpında Si dilimler üzerine büyütüldü. Yapılan çalışmada Si (silisyum), cam ve safir alttaş öncelikli olarak sırasıyla aseton ve alkol ile sırasıyla ultrasonik banyoda 10'ar dakika temizlendi. Daha sonra saf su ile yıkandıktan sonra azot gazı ile kurutuldu. Si, cam ve safir numune tutucu ile birlikte buharlaştırma sistemine takıldı. Çalışmada Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma Merkezindeki termal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Buharlaştırma öncesinde sistem $4.5x10^{-6}$ mbar basınca ulaşıncaya kadar pompalandı. Homojen bir kaplama için buharlaştırma süresince alttaşlar, z-ekseni etrafında 5 rpm ile döndürüldü. Yapılan litaretür araştırmasında ZnS materyalinin 10^{-6} mTorr basınçta buharlaşma sıcaklığının yaklaşık 800 °C olduğu görüldü. Yapılan çalışmada bu sıcaklığa ulaşabilmek için kullanılan potaya 325 W güç uygulandı. Kaplama basıncı $2.4x10^{-5}$ mbar olarak not edildi. İşlem sırasında büyüme oranı yaklaşık 5 Å olarak okundu. İşlem sonucunda 450 nm kalınlığında ince filmler elde edildi. Film kalınlıkları, büyütme odasında bulunan kuartz kristalli kalınlık ölçerle belirlendi.

4.2. ZnS Filmlerin Karakterizasyonu

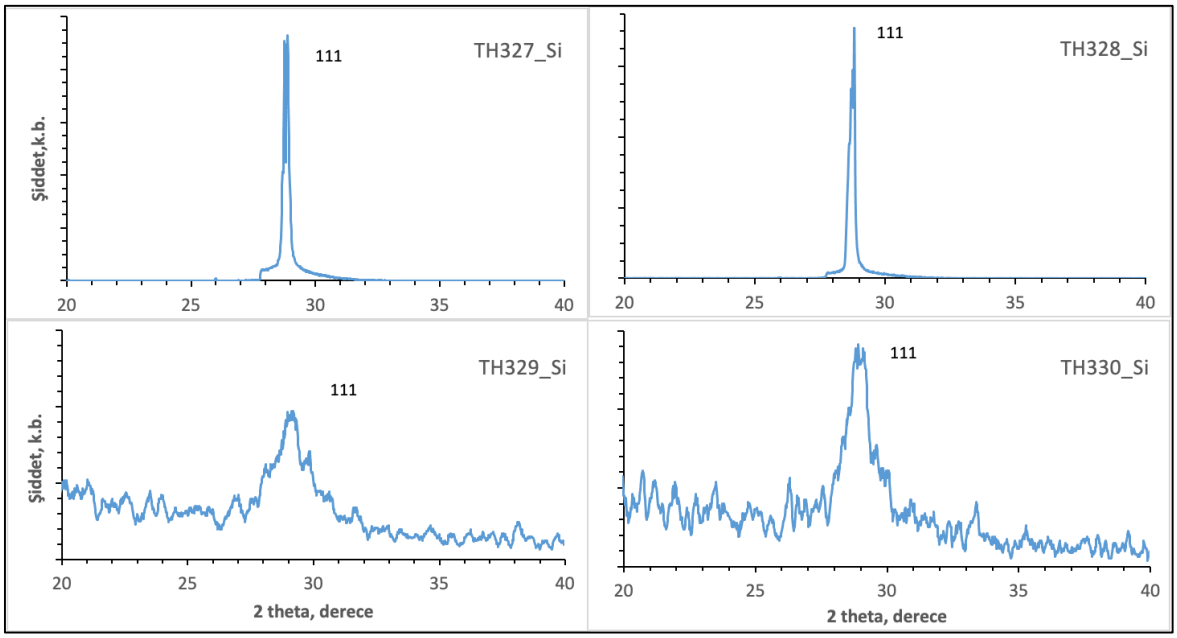
4.2.1. Yapısal karakterizasyon

Büyütülen ZnS filmlerin yapısal karakterizasyonları XRD kırınım deseni ile belirlendi. Filmlerin XRD desenleri Şekil 4.1'de verildi. XRD deseninde kırınım piki 28.92^{o} civarında gözlendi.



Şekil 4.1. Kübik (111) ve Hegzagonal (207) kristal yapıda ZnS nin XRD pikleri (Salih, 2017)

Şekil 4.1'de kübik ve hegzagonal yapıda ZnS materyalinin XRD pikleri gösterildi. Bu pikin filmlerin (111) düzlemi boyunca yönlendirilmiş kübik kristal yapıya sahip olduğu görülmektedir (Joint Committee on Powder Diffraction Standards, "JCPDS Card No. 77-2100").



Şekil 4.2. Si alttaş üzerine büyütülen ZnS filmlerinin XRD desenleri

İnce filmlerin ortalama kristal boyutu, D,

$$D = \frac{K\lambda}{\beta cos\theta} \quad (4.1)$$

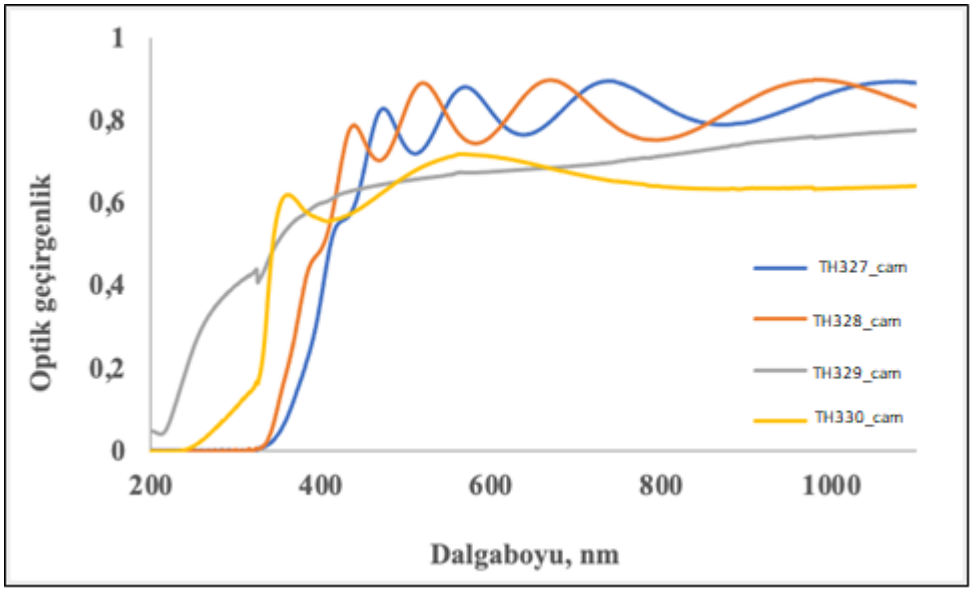
Scherrer formülü (Gayou, 2010) kullanılarak hesaplandı. Burada K, 0.94'e eşit olarak alınan şekil faktörüdür. λ=1,54178 Å, X-ışını kaynağının dalgaboyudur; β (111) kırınım pikinin yarı genişliğidir (FWHM) ve θ, derece olarak Bragg kırınım açısıdır. TH327-328-329-330 filmlerinin partikül büyüklükleri Çizelge 4.1'de verildi.

Çizelge 4.1. Büyütülen ZnS filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Numune Adı	2θ, (derece)	FWHM(derece)	D, nm
TH327	28,92	0,24	35,73
TH328	28,91	0,27	31,76
TH329	28,96	1,12	7,66
TH330	28,95	0,95	9,03

4.2.2. Optik karakterizasyon

Üç farklı alttaş sıcaklığında Si ve safir alttaş üzerine kaplanan ZnS filmlerinin UV-Vis (200-1100 nm aralığında) optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.3'de verildi. TH327 ve TH328 filmlerinin optik geçirgenlikleri (200-1100nm aralığında) %80 civarında iken diğer filmlerin %60 civarında olduğu görülmektedir. Optik geçirgenlikteki bu düşüşün sıcaklıkla film yoğunluğunun arttığı ve yüzeyden yansımaların arttığı şeklinde değerlendirilmektedir.

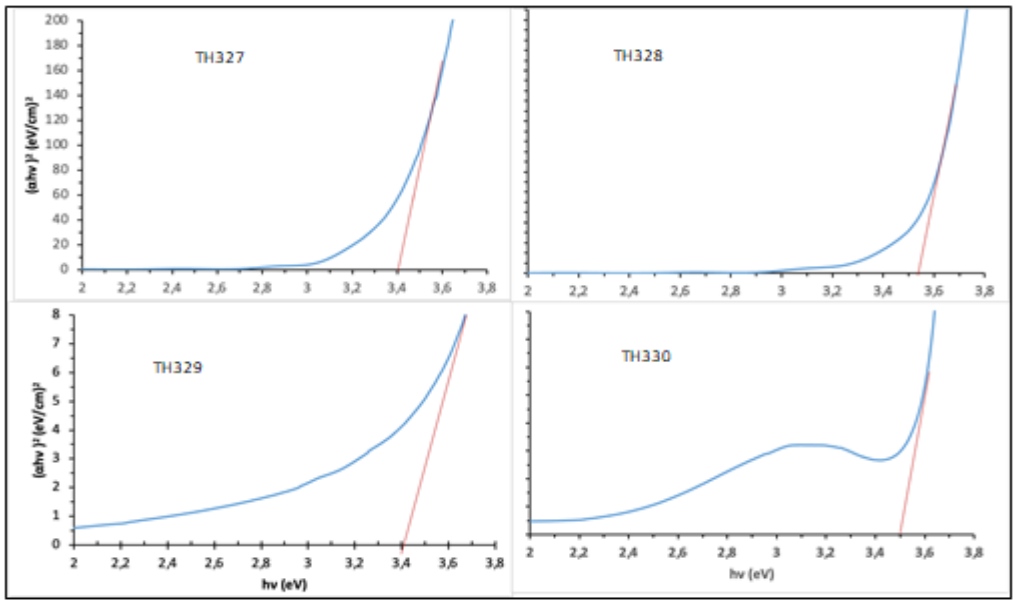


Şekil 4.3. Farklı sıcaklıklarda cam üzerine büyütülen ZnS filmlerinin optik geçirgenlik spektrumları

Direkt bant aralığına sahip ZnS filmlerinin yasak enerji aralığı (Eg) ve soğurma katsayısı (α) arasında

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^{1/2} \tag{4.2}$$

ilişkisi bulunmaktadır (Chiad, Jabbar ve Habubi, 2011).



Şekil 4.4. ZnS filmlerinin Tauc grafikleri

Filmlerin Eg değerleri, UV-Vis soğurma spektrumlarından bu ifadeye göre elde edilen Tauc'un $(h\nu\alpha)^2$'ye karşı (hv) grafiği ve eğrilerin (Şekil 9) lineer bölümlerinin *hv* eksenine ekstrapolasyonu ile belirlendi. Tauc eğrisinden TH327-328-329-330 filmlerinin yasak enerji aralıkları, sırasıyla 3.4, 3.56, 3.4 ve 3.50 eV civarında olduğu belirlendi. Elde edilen bu değerler, literatürde verilen ZnS'nin bant aralıkları ile uyumludur.

Filmlerin kırılma indisi zarf metodu ile hesaplandı. Bu metotta kırılma indisleri geçirgenlik spektrumunda maksimum ve minimum noktaları dikkate alınarak

$$n = \left[N + \sqrt{N^2 - n_s^2}\right]^{1/2} \tag{4.3}$$

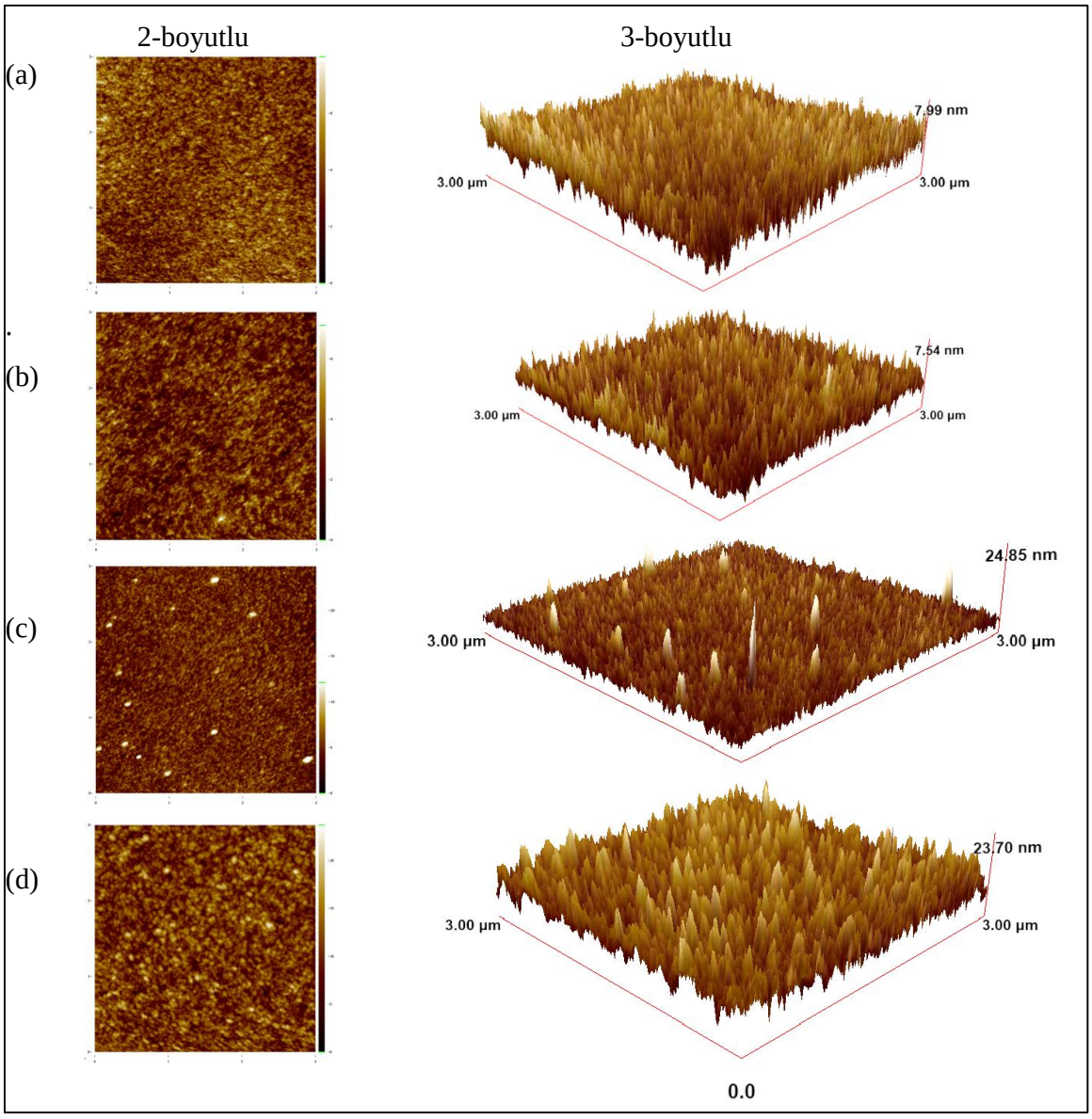
Burada,

$$N = \frac{n_{s+1}^2}{2} + 2n_s \frac{T_{maks} - T_{min}}{T_{maks} T_{min}} \tag{4.4}$$

eşitliği ile belirlendi. Bu formülde $n_s$alttaş(cam) kırılma indisini temsil etmektedir. Bir örnek olarak TH327_cam kodlu numunenin Şekil 4.2'de verilen optik geçirgenlik spektrumu dikkate alınıp zarf metodu uygulandığında Tmax değeri 524 nm dalgaboyu için %89,280 olarak Tmin değeri ise %61.886 olarak okundu. Cam alttaşın kırılma indisi ise literatürden 1.5 olarak alındı. Zarf metodu uygulandığında ZnS materyalinin 400-600 nm dalgaboyu aralığı için kırılma indisi n= 2,41 olarak bulundu. Bulunan bu değer 400 nm kalınlığa sahip ZnS filmi için literatürde belirlenen 2.33 değerindeki kırılma indisi ile uyum içerisindedir (Mohamed, El-Hagary ve Emam-Ismail, 2010). Kırılma indisinin filmin büyütülme şartlarına bağlı olduğu dikkate alındığında elde ettiğimiz kırılma indisinin ZnS filmler için beklenen bir değer olduğu değerlendirildi.

4.2.3. Yüzey morfolojisi

Çalışmamızda optik ışık kıyıcı Si üzerine gerçekleştirildiğinden, Si üzerine kaplanan ZnS filmlerinin yüzey morfolojileri AFM sistemi kullanılarak analiz edildi. Filmlerin AFM görüntüleri Şekil 4.4'de sunuldu.



Şekil 4.5. Büyütülen ZnS filmlerinin 2 ve 3 boyutlu AFM yüzey görüntüleri (a) TH327 (b) TH328 (c) TH329 ve (d) TH330.

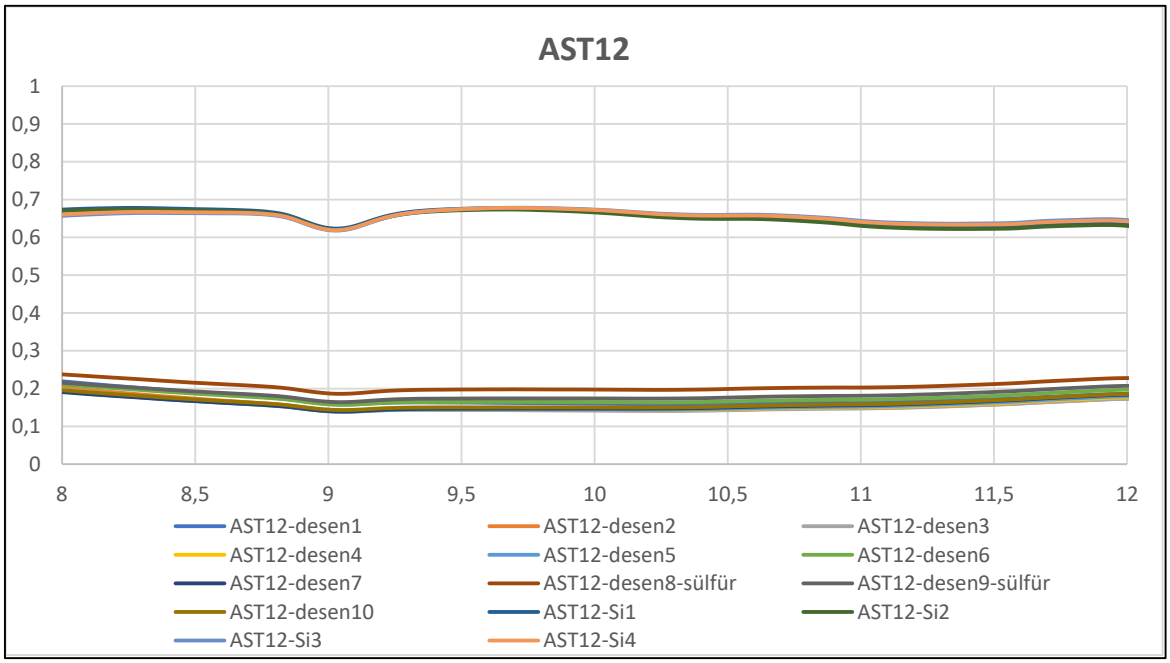
Bu şekillerden görüldüğü gibi filmler boşluksuz ve homojen bir yüzeye sahiptir. TH327-330 nolu numunelerin yüzey pürüslülükleri (RMS), sırasıyla, 1,03, 0,87, 1,4 ve 2,82 nm olarak belirlendi (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Filmlerin yüzey pürüzlülükleri

Numune Kodu	Alttaş Sıcaklığı	RMS(Yüzeypürüzlülüğü) değerleri(nm)
TH327	Oda sıcaklığı	0,55
TH328	100	1,2
TH329	200	0,86
TH330	300	1,19

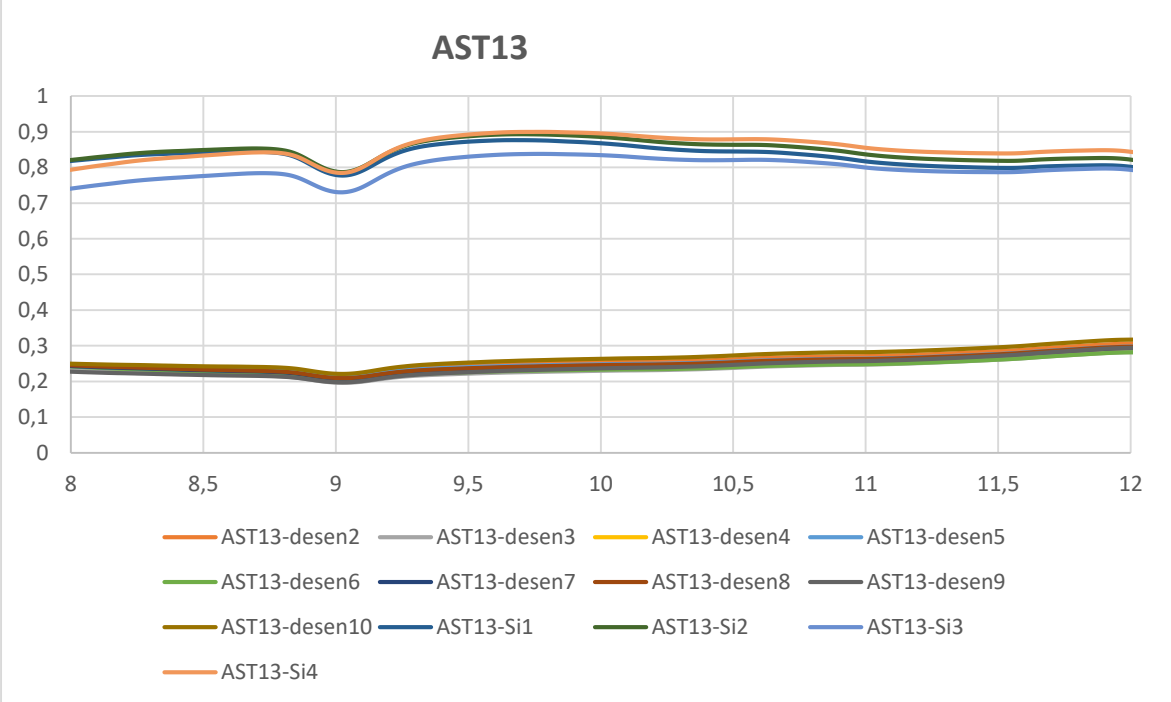
4.2. Kızılötesi Işık Kıyıcının Karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında Arşimedyan geometride, Fresnel lens içeren Si diski üzerine farklı kalınlıklarda ZnS filmi diskin ön ve arka yüzeyi olmak üzere kaplandı. Bu ışık kıyıcıların kızılötesi ışık geçirgenlikleri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) ile ölçüldü ve spektrumlar Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verildi. AST12 nolu numunede tek yüzeyi kaplı, AST13 de ise çift yüzeyi kaplı Si disklerin geçirgenlik değerleri verildi. Bu numuneler yüzeyi desenlendirilmiş diskler üzerine gerçekleştirildi.Grafiklerde 10 adet desenli bölgeden ve 4 adet işlem görmemiş bölgeden ölçüm alındı. Optik geçirgenliğin homojenliğini değerlendirmek hedefiyle diskin yüzeyinde bir çok faklı noktadan optik geçirgenlik spektrumu ölçüldü. Şekillerden görüldüğü gibi farklı noktalardan alınan spektrumlar hemen hemen üst üste binmektedir. Bu durum ZnS filminin homojen kaplanmasının başarıldığını göstermektedir.



Şekil 4.6. Tek Yüzeyi Kaplı Si Disk Geçirgenlik Değerleri

Tek yüzü ZnS ile kaplanan diskin (AST12) 8-12 µm spektral aralığında desenli kısmının ortalama %20 ve desensiz bölgenin %65 civarında olduğu görülmektedir. Diskin optik geçirgenliğinin düşük olması, arka yüzeyde oluşan Fresnel yanısıma kayıplarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

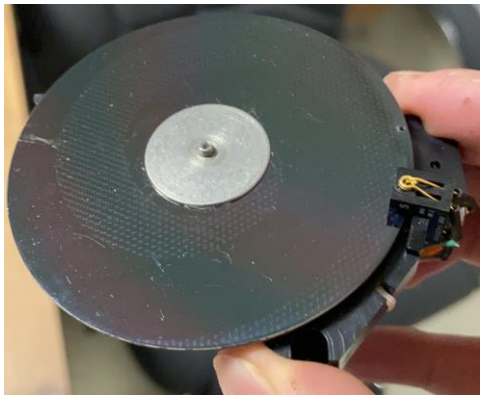


Şekil 4.7. İki yüzeyi ZnS kaplı Si Disk Geçirgenlik Değerleri

Amacımız termal kameraların çalışma aralığı olan 8-12 μm aralığında yüksek optik geçirgenliğe sahip yansıma önleyici ZnS kaplamaları geliştirmektir. Bu hedefle, tek yüzü kaplı Si diskin, Fresnel yansımalarını en aza indirebilmek amacıyla arka tarafı da ön taraf ile aynı kalınlıkta ZnS ile kaplanan Si diskin(AST13) aynı spektral aralıkta optik geçirgenliğinin (Şekil 4.7) desensiz-desenli bölgeler için %25-%88 civarında olduğu görüldü. Bu sonuçlar, geliştirilen diskin söz konusu spektral aralıkta soğutmasız termal kameralarda kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Elde edilen optik geçirgenlikler incelenerek Si yüzeye çift taraflı olarak 1100 nm kaplama yapılması gerektiği görüldü. Nihai üründe Si diskin iki yüzüne 1100 nm kaplamalar gerçekleştirildi ve ardından 3 dakika 200 °C de tavlama işlemi gerçekleştirildi. Bu tavlama sayesinde nem testinde başarı sağlandı.

Disk yüzeyine geliştirilen ZnS ince filmlerin yüzeye tutunma kalitelerini belirlemek amacıyla standart izolabant testi uygulandı. İzole bant yüzeye yapıştırıldı ve çekildi. Filmin bant ile birlikte yüzeyden kopmadığı gözlendi. Geliştirilen diskin dedektör üzerine düşen ışığı belirli bir düzende geçirmesi için motor ile bağlanarak gerekli frekansta döndürülmesi gerekmektedir. Geliştirdiğimiz Kızılötesi Işık Kıyıcı disk bir step motor ve frekans belirleyici ışık sensöründen oluşan mekanik döndürücüye monte edilerek optomekanik ışık kıyıcının üretimi tamamlandı (Resim 4.1).



Resim 4.1. Motor montajı ile birlikte ZnS kaplı Si Disk

Üretilen bu optik kıyıcı termal kamera sistemine takılarak test edildi. Bu test sonuçları Resim 10’ da görülmektedir.



Resim 4.2. Geliştirilen Si ışık kıyıcı kullanılarak termal kamera ile elde edilen görüntü.

Yapılan testlerde görüldüğü gibi geliştirilen ışık kıyıcı sistem üzerinde performans olarak görevini yerine getirdiği anlaşıldı.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında temel hedef, soğutmasız termal kameralarda kullanılan optomekanik ışık kıyıcısı için yüksek optik geçirgenlikte Si ışık kıyıcı diskinin tasarımı, üretimi ve yüzeyinin yansıma önleyici ile kaplanarak kıyıcının performans testini başarmak şeklindedir. Bu amaçla öncelikle, 400 nm kalınlığında ve farklı sıcaklıklarda büyütülen ZnS filmlerinin büyütülmesi gerçekleştirilerek yapısal, optik ve morfolojik karakterizasyonu belirlendi. Üretilen filmlerin Si alttaş üzerine (111) düzlemine dik olarak büyüdüğü XRD analizleri ile belirlendi. Filmlerin yasak enerji aralıklarının 3.4-3.56 eV aralığında olduğu belirlendi. UV-Vis spektrumlarından yüksek optik geçirgenliğe sahip ZnS filmelerinin AFM analizleri ile oldukça homojen olarak büyütüldüğü görüldü. Elde edilen sonuçlar 400 °C sıcaklığa kadar büyütülen filmlerin karakterlerinin birbirlerine yakın olduğunu gösterdi. Bununla birlikte TH327 ve TH328 nolu numunelerin cam örneklerinden optik geçirgenliklerinin UV-Vis ve yakın KÖ bölgede en yüksek değerde olması nedeniyle ışık kıyıcı geliştirmede kullanıma daha uygun olduğu değerlendirildi. Işık kıyıcı disk olarak Si alttaş kullanıldı. Si alttaşın yüzeyi, kamera sensörünün kıyılmış ışığa muhatap olabilmesi amacıyla, açık-kapalı bölgelerden oluşacak şekilde Archimedyan geomeride hazırlandı. Archimedyan bölgede yüzlerce mikro Fresnel mercek tasarlandı. Tasarlanan bu mikro merceklerin litografik süreçleri için foto maske üretildi. Fotomaske kullanılarak mikro mercek desenleri Si yüzeyine aktarılarak litografi tekniği ile mikro mercekler üretildi. Üretilen ışık kıyıcı diskinin mercekli/merceksiz (desenli-desensiz) bölgeleri için KÖ optik geçirgenliğinin 8-12 μm aralığında %25-%88 civarında olduğu belirlendi. Geçirgenlikteki bu değişimin soğutmasız termal kameralar için uygun bir ışık kıyıcılığı olduğu değerlendirildi. Gerçek sistem üzerimde yapılan görüntü alma işlemleriyle, üretilen diskin uygulamada kullanılabileceği belirlendi.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında kazanılan optik desenleme ve yansıma önleyici teknolojik bilgisinin KÖ görüntüleme sistemleri için farklı alttaşlar için uygulanabilirliğinin, ayrıca, KÖ ışık kıyıcılığı ile farklı deneysel sistemlerde kullanılabilirliğinin araştırılarak geliştirilebileceği önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Abdallah, B., Alnama, K. ve Nasrallah, F., (2019) Deposition of ZnS thin flms by electron beam evaporation technique, effect of thickness on the crystallographic and optical properties. *Modern Physics Letters B*, 33(4), 1950034

Brown, R. A. (1988). Theory of transport processes in single crystal growth from the melt. *AIChE Journal*, 34(6), 881-911.

Chiad, S. S., Jabbar, W. A. ve Habubi, N. F. (2011). Effects of annealing on the electronic transitions of ZnS thin films. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 65(1), 39-42.

Csukas, E. S. ve Duma, V. F. (2018). *Optical choppers with cylindrical rotational shafts for laser applications: a finite element analysis*. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXII, Berlin, 315-322.

Çalışan, M. ve Türkoğlu, Ġ. (2011). *Termal kameralar ve uygulamaları*. Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Fırat Üniversitesi 1-5.

Duma V.F. (2013). Prototypes and modulation functions of classical and novel configurations of optical chopper wheels. *Latin American Journal of Solids and Structures* 10, 5,18.

Firoozifar, S. A. R., Behjat, A., Kadivar, E., Ghorashi, S. M. B. and Zarandi, M. B. (2011). A study of the optical properties and adhesion of zinc sulfide anti-reflection thin film coated on a germanium substrate. *Applied Surface Science*, 258(2), 818-821.

Gayou, V. L., Salazar-Hernandez, B., Constantino, M. E., Andrés, E. R., Díaz, T., Macuil, R. D. ve López, M. R. (2010). Structural studies of ZnS thin films grown on GaAs by RF magnetron sputtering. *Vacuum*, 84(10), 1191-1194.

Ghosh, A., ve A. S. Upadhyaya. (2009) Broad band antireflection coating on zinc sulphide simultaneously effective in SWIR, MWIR and LWIR regions. *Infrared Physics & Technology*, 52(4), 109-112.

Hawkins, G. J. (1998). *Spectral characterisation of infrared optical materials and filters*. Doctoral Dissertation, University of Reading.

Hu, X., Yuan, J., & Long, L. (2010, December). Binary optics pyroelectric chopper technology. In Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation Vol. 7544, pp. 874-880. SPIE.

İnternet: Deposition Materials (2022). *Depositionmaterials Evaporationmaterials* . Web: https://www.lesker.com/newweb/deposition_materials/depositionmaterials_evaporationmaterials_1.cfm?pgid=zn4. Erişim tarihi: 06.07.2022.

Makuła, P., Pacia, M. ve Macyk, W. (2018). How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV–Vis spectra. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 9(23), 6814-6817.

Manning P.A ve Fairley P. (2000). *A solid-state modulator for thermal imaging applications*. Proceedings of SPIE, Berlin, 310-315.

Monshi, A., Foroughi, M. R. ve Monshi, M. R. (2012). Modified Scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD. *World Journal of Nano Science and Engineering*, 2012(2), 154, 160.

Nojiri, K. (2015). Dry etching technology for semiconductors (pp. 1-116). Cham: Springer International Publishing.

Petrovsky, G. T. (1991, December). Optical materials for infrared range of spectrum. In Proc. SPIE Vol. 1540, pp. 401-411.

Resnick, R., Halliday, D. and Krane, K.S. (1916). *Physics (5th edition).* New York: John Wiley & Sons 475-478.

Mohamed, S. H., El-Hagary, M. ve Emam-Ismail, M. (2010). Thickness and annealing effects on the optoelectronic properties of ZnS films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(7), 075401.

Salih, A.T., Najim, A.A., Muhi, M.A. and Gbashi, K.R. (2017). Single-material multilayer zns as anti-reflective coating for solar cell applications. *Optics Communications*, 388, 84-89.

Sood, A. K., Puri, Y. R., Becker, L., Tidrow, M. Z., Balcerak, R. S., Brill, G., Wijewarnasuriya, P., Dhar, N., Boieriu, P., Fulk, C., Sivananthan, S. and Finke, S.. (2006). *Development of high performance radiation hardened antireflection coatings for LWIR and multicolor IR focal plane arrays*. Infrared Technology and Applications XXXII, Berlin, 404-416.

Sood, A. K., Zeller, J. W., Sood, A. W., Ghuman, P., Babu, S., Gunapala, S., Soibel, A., Ting, D., Chaudhary, L. ve Efstathiadis, H. (2022). *Nanostructured antireflection coating technology for enhanced MWIR and LWIR band sensing performance*. Infrared Sensors, Devices, and Applications XII, Berlin, 71-79.

Zulehner, W. (2000). Historical overview of silicon crystal pulling development. *Materials Science and Engineering: B*, 73(1-3), 7-15.



Gazili olmak ayrıcalıktır…