

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIÇRATMA YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ İLETKEN
CAMLARIN OPTİK VE YAPISAL KARAKTERİZASYONLARI**

Aydın Kamil ERDEM

**Danışman
Doç. Dr. Nalan Çiçek BEZİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2016**



© 2016 [Aydın Kamil ERDEM]

TEZ ONAYI

Aydın Kamil ERDEM tarafından hazırlanan "**Sıçratma Yöntemi ile Kaplanmış İletken Camların Optik ve Yapısal Karakterizasyonları**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **FİZİK Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Doç. Dr. Nalan Çiçek BEZİR**

Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Atilla EVCİN**

Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. İskender AKKURT**

Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Adı SOYADI**

Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Adı SOYADI**

Süleyman Demirel Üniversitesi

Enstitü Müdürü **Doç. Dr. Yasin TUNCER**

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Aydın Kamil ERDEM

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI.....	i
TAAHHÜTNAME.....	i
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. TEORİK İNCELEMELER	8
3.1. İnce Film Kaplama Teknikleri	8
3.2. Fiziksel Buhar Biriktirme ile Kaplama	10
3.3. Sıçratma Yöntemi.....	14
3.4. DC Magnetron Sıçratma Yöntemi.....	20
3.5. Geçirgen İnce Filmler.....	21
3.6. İndiyum Kalay Oksit (ITO).....	22
3.7. İnce Film Optiği	25
3.7.1. Tek bir filmde ışığın yansıması ve geçiği	30
3.7.2. Optik Sabitler.....	34
3.8. İnce Filmlerde Elektriksel Özellikler	38
4. MATERYAL VE YÖNTEM	40
4.1. Alt Tabanların Hazırlanması ve Temizlenmesi.....	40
4.2. Sıçratma Sistemindeki İnce Film Üzerinde Etkisi Olan Parametreler	42
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	45
6. SONUÇLAR	54
7. KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	58

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SIÇRATMA YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ İLETKEN CAMLARIN OPTİK VE YAPISAL KARAKTERİZASYONLARI

Aydın Kamil ERDEM

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nalan Çiçek BEZİR

Bu çalışmada şeffaf ve iletkenin indiyum-kalay oksit (ITO); DC magnetron püskürtme yöntemi ile bir cam alt-tabaka üzerinde biriktirilmiştir. Elde edilen ince filmin optik ve elektriksel özellikleri incelenerek optimum büyüme koşulları belirlenmiştir. Yüzey morfolojisi X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Ayrıca ince filmlerin elektriksel özellikleri dört nokta metodu kullanılarak belirlenmiştir. Bu ince filmlerin ısı ve oksijene bağlı olarak Kristal yapısı değişmiştir. Depolama basıncı 7×10^{-3} Barr ve 200 sıcaklık ve 150 magnetron gücünde argon ve oksijen oranı 28:1 ve depolama zamanı 6 dakika olarak alınmıştır. Optimum direnç 10 ohm geçirgenlik %85-95 olarak elde edilmiştir. Depolama zamanının azalması ile geçirgenlik artmıştır depolama ısısı ile de direnç değişmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnce Filmler, İndiyum Kalay Oksit, Magnetron Siçratma.

2016, 58 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

CHARACTERIZATION OF ITO THIN FILMS PREPARED BY MAGNETRON SPUTTERING DC SYSTEM

Aydın Kamil ERDEM

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Physics**

Supervisor: Assoc.Prof. Nalan Çiçek BEZİR

In this study, transparent and conductive indium-tin oxide (ITO) was deposited on glass substrate by DC magnetron sputtering method. The optical and electrical characteristics were investigated to achieve optimum growth conditions. The surface morphology was characterized by X-ray diffraction (XRD). More over the resistivity were measured by four prop to find out electrical properties of grown films. It is found that thin films were grown crystal was depend on heat and oxygen. In addition that the resistivity decreasing with an increase in the deposition heat. The transparency increase with an decrease in deposition time the optimum growth condition DC power:150 deposition pressure 7×10^{-3} Barr deposition heat 200 C, and the gas of argon and oxygen 28:1 and the deposition time was 6 minute. With the optimum condition resistivity of 10 ohm, transmittance %85-95 for films grown on glass substrate. We conclude that the deposition heat improve the resistivity and with decrease of deposition time increase the transmittance.

Keywords: Thin Films, ITO, Magnetron Sputtering.

2006, 58 Pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni ynlendiren, bilgi ve tecrbesi ile yardımcı olan değerli Danışman Hocam Yrd. Do. Dr. Nalan ÇİÇEK BEZİR'e teőekkrlerimi sunarım.

Deneysel alışmalarımda laboratuvarını kullandığım ve bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Dumitru Luca hocama teőekkürlerimi sunarım.

3158_YL-12No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Araştırma alışmalarımda Süleyman Demirel Üniversitesi Fen–Edebiyat Fakültesi Fizik bölümündeki ğretim yesi hocalarıma, her zaman yanımda olan desteklerini hiç esirgemeyen anneme, babama ve aileme teşekkür ederim.

Aydın KAMİL ERDEM
ISPARTA, 2016

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Işımalı geçiş (Ohring, M., 1992; Ağırseven, 2011).	13
Şekil 3.2. Sıçratma Yöntemi ile İnce Film Üretim Şeması (Anonim)	16
Şekil 3.3. Sıçratma Yöntemi Şeması.....	21
Şekil 3.4. ITO'nun kristal yapısının şematik gösterimi	24
Şekil 3.5. Bir filme gelen ışığın çoklu yansıma ve geçişleri	31
Şekil 3.6. Taşıyıcı üzerine kaplı ince film sistemi	35
Şekil 3.7. Geçirgenliğin dalga boyuna göre değişimi grafiği.....	36
Şekil 4.1. Cam alt tabanların temizleme işlemi.....	40
Şekil 4.2. Sıçratma sistemi	41
Şekil 4.3. Kullanılan düzenek	44
Şekil 5.1. Farklı şartlarda kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri.....	49
Şekil 5.2. 250 °C'de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri	50
Şekil 5.3. 250 °C'de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri	50
Şekil 5.4. 250 °C'de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri	51
Şekil 5.5. 200 °C'de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri	51
Şekil 5.6. 150 derecede kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri	52
Şekil 5.7. 200 °C'de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri	52
Şekil 5.8. Elde edilen ince filmlerin farklı sıcaklıklardaki kristal yapısı (a) 150, (b) 200, (c) 250 °C.	53

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Deneyde Kullanılan Parametreler ve Sonuçları.....	46



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	Manyetik İndüksiyon Vektörü
c	Işığın Boşluktaki Hızı
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme Metodu
CH₃	Metil
C₂H₅	Etil
D	Elektrik İndüksiyon Vektörü
d	Taşıyıcı üzerine kaplanan filmin kalınlığı
E	Elektrik Alan
e	Işığa eşlik eden dalganın frekansındaki dielektrik sabiti
FTO	İletken cam
H	Manyetik Alan
K	Filmin söndürme katsayısı
N	Filmin 550 nm ışık için kırma indisi
N	Kırılma İndisi
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme Metodu
R	Yansıma
S	Poynting vektörü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
s	Taşıyıcının kırılma indisi
T	Geçirgenlik
TiO₂	Titanyum dioksit
OCH₃	Metoksil
OC₂H₅	Etoksil
UV-Vis	Ultraviyole ve görünür ışık absorpsiyon spektroskopisi
w	Açısal hız
XRD	X ışınları kırınım cihazı
λ	Dalga Boyu
σ	Yük Yoğunluğu
A	Soğurma katsayısı

1. GİRİŞ

İnce filmler, kalınlığı nanometre boyutundan mikrometrelere kadar uzanan bir altlık üzerindeki atomların birikimi ile üretilen tek tek atomik moleküler ve iyonik türlerin yoğunlaşmayan tarafından oluşturulan düşük boyutlu bir madde olarak tanımlanır. İnce film uygulamalarından yararlanan en önemli uygulamalar elektronik yarı iletken aygıtlardır.

Geçmişten bu güne kadar, ince filmler elektronik cihazların, optik kaplamaların, sert kaplamaların ve dekoratif parçaların yapımında oldukça fazla kullanılmaktadır. Aslında ince filmlerin günlük yaşamımızda her zaman kullandığımız, değişik boyut ve şekillerde oluşturulan bir cam ve arka yüzünde yansıtma sağlayan ince, metal kaplamadan oluşan aynalardır. İnce filmlerde optik olarak daha iyi bir kaplama elde edebilmek için, çeşitli kalınlıklara ve yansıtma indekslerine sahip çoklu katmanlar oluşturmak gerekmektedir. Hemen hemen bütün alanlarda faydalandığımız yarıiletken aygıtlar içerisinde çeşitli şekillerde üretilebilen ince filmler çok önemli bir yere sahiptir ve gelişen teknolojiyi de göz önüne aldığımızda, ince filmlerin kullanım alanları artmaktadır.

Elektronik ve opto elektronik teknolojinin temel unsurlarından olan ince filmler sensörler, diyotlar, güneş pilleri ve birçok cihaz yarıiletkenlerin ya da foto lüminesans özelliği gösteren maddeler için temel oluşturmaktadır. Bu demektir ki günlük hayatımızda sıkça kullandığımız bilgisayarlar, cep telefonları, led lambalar, güneş pilleri gibi aygıtların üretiminde ince filmler önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca farklı şekillerde üretilen ince filmler, sağlık alanında ve daha birçok amaç için kullanılan malzemelerin de temelini oluşturmaktadır.

Bazı metal ve metal oksitlerden (kalay oksit ve indiyum oksit) oluşan ince filmlerin varlığı yıllardan beri bilinmektedir. İnce filmler kendine özgü optik, elektriksel ve mekanik özelliklerinden dolayı elektronik ve optik endüstrinin vazgeçilmez elemanlarından. Bazı biriktirme teknikleri ile ince film formunda kalay, indiyum, çinko oksitlerin katkı filmleri ve onların alaşımları uygun olarak elde edilebilmektedir. Günümüzde yüzey karakterizasyonu için birçok destek maddeler kullanılmaktadır. En önemlileri arasında altın kaplı filmler, cam, silikon, mika, cam

kürecikler, titanyum oksit kaplı cam yüzeyi ve indiyum kalay oksit kaplı cam yüzeylerdir.

Mikrometre hatta nanometre boyutlarında oluşturulabilen ince filmler; elektronik devre bileşenleri, detektörler, sensörler, göstergeler gibi birçok uygulama alanı bulabildiğinden günümüzde büyük bir ilgi odağı olmuştur. İstenilen yapı ve fonksiyon özelliklerine sahip moleküllerin incelenebilme olasılığı artırılıp bunun da ince film biriktirme teknikleri ile birleştirilmesi sonucunda nanometre boyutlarında üretilen ince filmler elektrik, optik hatta biyolojik alanlarda kullanılabilir.

Son zamanlarda, İndiyum tin okside (ITO) gibi saydam ve iletken camlar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. ITO elektriksel iletken ve optik geçirgen bir ince film kaplama çeşidi olduğundan sensörler, güneş pilleri, elektro kromik camlar, LCD ekranları, OLED displaylerde ve ısı bariyerleri olarak da kullanılabilir.

Bu çalışmada fiziksel buharlaştırma tekniklerinden biri olan ve oldukça iyi sonuçlar elde edilen magnetron sıçratma yöntemi kullanılarak indiyum kalay oksit (ITO) ince filmler üretilmiştir. Elde edilen ince filmlerin optik, elektriksel ve kristal yapıları incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

İnce film kaplama tekniği kullanılarak kaplanan cam yüzeylere değişik sistemlerde kullanmak üzere yüzey dayanaklığı, estetik görünümü, optik ve elektriksel özellikleri açısından oldukça faydalı özellikler kazandırılılabilmektedir. Sistemde kullanılacak camın, spektrumun görünür bölgesinde optik geçirgen ve elektriği iyi ileten bir malzeme olabilmesi için üretilecek olan ince filmlerin saydam ama iletken bir madde ile kaplanması gerekmektedir. İndiyum kalay oksit (ITO) gibi ince filmler, görünür bölge içinde yüksek optik geçirgen saydam iletken, geniş bant aralıklı, n-tipi yarıiletken oksitlerdir. İndiyum kalay oksit ince film oluştururken kaplama yapılan altlığa çok iyi tutunduğu için elektronik ve mekanik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir saydam iletkenidir. İndiyum kalay oksit, kalay oksit gibi metal oksitler düşük elektrik direncine, metalik iletkenliğe yakın bir iletkenliğe, görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahiptirler (Kamei, 2001).

İnce filmlerin kullanım alanları gelişen teknolojiye paralel olarak artmakta ve bu ince filmler, elektronik ve opto elektronik endüstrisinin ana unsurları haline gelmektedir. Bu alanlarda kullanılan diyotlar ve diğer birçok cihaz yarı iletkenlerin ya da elektro luminesans özelliği gösteren maddeleri ince tabaka haline getirilerek meydana getirilmiştir. İlk defa ince film olarak saydam iletken oksit (TCO) Badeker tarafından 1907 yılında, 100 yıl önce ortaya çıkmıştır. İlk TCO; Cd metali kullanılarak termal olarak filmi oksitleyen bir vakum püskürtücüsü ile hazırlanan CdO ince filmiydi. Saydam iletken ince filmler opto-elektronik aygıtların üretilmesindeki önemleri açısından yoğun bir şekilde çalışılmaktadır (Bright 2007; Kırmızıgül, 2008).

Saydam iletken ince filmleri üretme yöntemlerinden biri metal oksidi biçimlendirmek için metal filmlerden buharlaştırma şeklindeydi. İlk olarak 1937 de TO üretildi. İlk defa 1954 de IO saydam iletkeni ise ince film metalinin yine oksidasyonu sonrası elde edildi. Son elli yıldır ise en çok kullanılan saydam yarı iletkenler indiyum-tin-okside ITO ince filmlerdir (Bright, 2007).

ITO çok iyi bir ışık geçirgenliği ve elektriksel iletkenliği nedeniyle opto elektronik aygıtlarda güneş hücrelerinde yansıtmayan yüzeylerde SnO₂ ve ZnO gibi saydam oksit filmlere göre daha çok tercih edilmektedir (Kumar,2011).

Kumar ve arkadaşları DC magnetron püskürtme yöntemi kullanarak ITO ince filmler üretmişler ve foto katalitik özelliklerinin ince film kalınlığı ile nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Araştırmacılar DC magnetron sıçratma yöntemi ile kaplanan ince filmlerin kristal yapısı, optik özellikleri, elektriksel özellikleri film kalınlığı ile önemli ölçüde değiştiğini bulmuşlardır. Yine aynı çalışmada ITO ince filmlerin foto katalitik özellikleri de incelenerek bu yönde çalışmaların olacağı belirlenmiştir (Kumar, 2011).

Sibin ve arkadaşları florlu Esnek etilen propilen (FEP) altlıklar üzerine ITO ince filmler üreterek bu ince filmlerin optik ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. 140 °C sıcaklıkta bu altlık üzerine magnetron sıçratma yöntemi ile ince filmler kaplanmıştır. Oksijen miktarı ince filmlerin direncini ve geçirgenliğini oldukça etkilemiştir. Yüksek oksijen oranı filmleri daha geçirgen yapıyorken, düşük oksijen oranı filmleri daha opak metalik bir halde bırakmıştır (Sibin,2015).

Seob Park ve arkadaşları ITO ince filmleri güneş hücrelerinde kullanabilmek için oksijen miktarının filmler üzerindeki özelliklerini incelemişlerdir. Radyo frekans magnetron sıçratma yöntemiyle kaplanan indiyum-tin-oksit filmlerin optik ve yapısal özelliklerine oksijenin etkisi incelenmiştir. İnce filmler kimyasal buharlaştırma yöntemi kullanılarak farklı oksijen miktarlarına maruz bırakılmışlardır. ITO filmlerin dirençleri hemen hemen sabit kalmasına rağmen optik geçirgenlik çok az da olsa değiştirerek geçirgenliği biraz artırmıştır. ITO filmlerin optik, elektriksel ve yapısal özellikleri RF magnetron yöntemi ile incelenmiştir. Oksijen miktarının katkısının malzemenin kristal yapısını değiştirdiği belirlenmiştir (Park, 2013).

Heo ve arkadaşları magnetron sıçratma yöntemiyle üretilen ITO ince filmlerin ek bir magnetik alandaki özelliklerini incelemişlerdir. (ITO) ince filmler cam altlıklar üzerine 100 C düşük sıcaklıkta ve bir magnetik alan altında üretilmişlerdir. Elektrik direnci ve mobility (hareketlilik) 0,2 Amper'den yukarıya çıkıldıkça azalmıştır (Heo, 2015).

Erjing ve arkadaşları nano kristal silikon güneş hücrelerine ITO ince filmleri kaplamışlardır. ITO ince filmler; DC magnetron sıçratma yöntemi kullanarak ve gaz akış oranı, basınç, zaman gibi deneysel parametreleri değiştirilerek kaplanmıştır. Elde edilen ince filmlerin karakteristik özellikleri incelenmiştir (Erjing, 2011).

Houng ve arkadaşları In_2O_3 altlık üzerine üretilen ITO ince filmlerin karakteristik özelliklerini incelenmişlerdir. Sunulan çalışmada (In_2O_3) ince film ITO (indium tin oxide) üzerine oda sıcaklığında RF magnetron sıçratma yöntemiyle biriktirilmiştir. Kristal yapısı ve yüzey özellikleri incelenmiştir. Üretilen malzemenin elektriksel ve kristal yapısının oldukça iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Houng, 2011).

Lin ve arkadaşları tekrarlanabilir yüksek lazer oranı ile kaplanan ITO ince filmlerin elektrot olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. ITO ince filmler radyo frekans magnetron sıçratma yöntemi ile cam altlıklar üzerine kaplanmıştır. Oluşturulan ince filmlerin kalınlığı 100 nm ve geçirgenliği 550nm dalga boyunda %79 olarak elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda ITO ince filmlerin elektrot olarak kullanılabilirliği ortaya koyulmuştur (Lin, 2014).

Long Hu ve arkadaşları GaN altlık üzerine ürettikleri ITO ince filmlerin özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen ince filmlerin LED olarak kullanılacağı belirlenmiştir (Hu, 2015).

Eshaghi ve arkadaşları nano yapıları ITO ince filmleri poli karbonat altlıklar üzerine üretmişler ve bu ince filmlerin optik ve elektriksel karakteristiklerini ince filmlerin kalınlıklarına bağlı olarak incelemişlerdir. Magnetron sıçratma tekniği ile çeşitli kalınlıklarda (200, 250, 300, 350, 400 nm) polimer altlıklara ITO ince filmler elde etmişlerdir. Tane büyüklükleri film kalınlığı ile artmıştır. Daha kalın filmler daha iyi elektriksel özellik göstermişlerdir. Geçirgenlik artan film kalınlığı ile azalmıştır (Eshaghi, 2014).

Elmas ve arkadaşları yine PET altlıklar üzerine ve cam altlıklar üzerine ITO ince filmler üreterek optik karakterizasyon yapmışlardır. Yapılan çalışmada daha çok ince filmlerin fabrikasyonu, karakterizasyonu geçirgenliği ve iletkenliği gibi fiziksel özelliklerine odaklanılmıştır. ITO ince filmler termo iyonik vakum ark tekniği

kullanılarak cam altlıklar ve PET altlıklar üzerine üretilmiştir. Çalışmadan çıkan sonuçlara göre cam ve PET altlıklar üzerine üretilen ITO ince filmlerin iyi bir iletkenlik ve geçirgenlik özelliğine sahip olduğu bulunmuştur. Filmlerin optik özellikleri incelendiğinde 400-700 nm dalga boylarında %80 geçirgenliğe sahip oldukları bulunmuştur. İnce filmlerin kalınlıklarının 110 nm ve 115 nm olduğu hesaplanmıştır. Bant aralığı ise 3.99 ve 3.88 eV olarak elde edilmiştir (Elmas, 2013).

Madhi ve arkadaşları ITO ince filmlerin elektriksel özellikleri üzerine NO₂ adsorpsiyonu ve sıcaklığın etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada cam altlıklar üzerine elde edilen ince filmlerin Kristal yapıları incelenmiş ve yapının kübik olduğu bulunmuştur (Madhi, 2015).

Chun Lu ve ITO ince filmleri yine düşük sıcaklıklarda sol jel yöntemi ile cam altlıklar üzerine elde etmişlerdir. Sol jel yöntemi olarak spin coating yöntemi kullanmışlardır. Elde edilen ince filmlerin geçirgenliğinin %89 olduğu ve elektriksel iletkenliğinin $1.9 \times 10^5 \Omega/\square$ olduğu bulunmuştur (Lu, 2013).

Donnell ve arkadaşları PET altlıklar üzerine ITO ince filmleri laser yöntemi ile biriktirmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen ince filmlerin kalınlığı 30nm olarak bulunmuştur. Sonuç olarak bu çalışmada oldukça ince ve esnek olarak ITO ince filmler elde edilmiştir (Donnell, 2015).

Meshram ve arkadaşları ITO ince filmlere katkılama yapılarak sıcaklığın etkisini ince filmler üzerine çalışmışlardır. ITO/Ag(Cr)/ITO(IAI) çok katmanlı ince filmlerin elektriksel, optik and yapısal özellikleri saydam iletken elektrot (TCE) uygulamaları için incelenmiştir. IAI filmler, yüksek sıcaklıkta (500 1C) önemli bir optic geçirgenlik (%T) of 96% (at 550nm dalga boyunda) göstermişlerdir. IAI çoklu tabakalar oldukça iyi elektriksel ve optik özellikler göstermişlerdir (Meshram, 2015).

Aqing Chen ve arkadaşları magnetron sıçratma yöntemi kullanarak ITO ince filmlerin üzerindeki oksijen akışını incelemişlerdir. ITO ince filmleri cam altlıklar üzerine magnetron sıçratma yöntemi kullanarak oksijen akış oranını da değiştirerek biriktirmişler ve ITO ince filmlerin geçirgenliklerini belirlemişlerdir. Oksijen akış

oranının artmasıyla absorpsiyonun azaldığını tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak da enerji bant yapısının değiştiğini bulmuşlardır (Chen, 2014).

Del Villar ve arkadaşları silikon altlıklar üzerine üretilen ITO ince filmlerin termal davranışı üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda elde edilen ince filmlerin optik filtreler ve sensörlerde kullanılabilceği ortaya koyulmuştur (Villar, 2015).

Köseoğlu ve arkadaşları elektro tavlama yöntemiyle elde edilen ITO ince filmlerin optik ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Elektrik akımı ITO ince filmlerin elektronik aygıtlarda kullanılması için çok önemli bir role sahipti olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmada sıcaklığın 250 °C olmasının uygun olacağı bulunmuştur (Köseoğlu, 2015).

3. TEORİK İNCELEMELER

Bu bölümde ince filmler bunların kaplama teknikleri hakkında bilgi verildikten sonra çalışmamızda kullandığımız fiziksel buharlaştırma yöntemi ve bu yöntemde kullanılan magnetron sıçratma tekniği açıklanmıştır. Ayrıca saydam iletken ince filmler hakkında da bilgi verilmiştir

3.1. İnce Film Kaplama Teknikleri

İnce film, kalınlığı mikrometreden nanometreye kadar küçülebilen ve farklı katmanlarda oluşturulan malzemelerine denir. Optik kaplamalar, güneş pilleri, diyotlar, sensörler elektronik yarı iletkenler gibi malzemelerin çoğu ince film yapılardan faydalanan temel uygulamalardır. Farklı kalınlıklarda ve farklı yansıtma indekslerine sahip değişik katmanlardan oluşan ince filmler üretilerek ince filmlerin optik verimlilikleri artırılabilir.

Kaplama malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alındığında ince film kaplama tekniklerini katı halden yapılan kaplamalar, çözültiden yapılan kaplamalar, sıvı ya da yarı sıvı halden yapılan kaplamalar, buhar fazından yapılan kaplamalar olarak dört ana grupta inceleyebiliriz. Yine ince film kaplama yöntemlerini elektrolitik kaplama, termokimyasal kaplama, galvanizleme, emaye kaplama, termal sprej prosesi, sol-jel kaplama, kimyasal buhar çökeltme (CVD), fiziksel buhar çökeltme (PVD), polimer kaplama şeklinde sıralayabiliriz (Evcin, 2006).

Metalik veya metalik olmayan bir malzeme yüzeyine elektro-kimyasal metotlarla metalik film oluşturma yöntemine elektrolitik metal kaplama adı verilir. Gümüş kaplanan saatler, farklı renklerde kaplanan gözlükler, altın, araba ve uçaklarda yapılan kaplamalar elektrolitik kaplama yöntemleri uygulanarak yapılabilmektedir (Bayrak, 2007; Yüncü, 2012).

Demir esaslı bir malzemenin sıvı çinko banyosu içerisine daldırılarak yüzeyinin koruyucu bir çinko tabakasıyla kaplanması işlemine ise galvanizleme denir (Evcin, 2006).

Emaye kaplama ise sadece dekoratif amaçlı eşyalar, endüstriyel kazan ve kaplar, mutfak eşya ve cihazlarının kaplanmasında uygulanan yöntem olarak kalmamış; ulaşım, nakliye ve iş merkezlerinin bina ve yapı dış yüzeyinde kullanılan çelik esaslı malzemelerin kaplanması yönünde de uygulama alanı bulmaya başlamıştır (Islak, 2011; Yüncü, 2012).

Kaplanacak malzemenin değişken bir bileşiği, buharlaştırıldığında ve buhar termal olarak bozulduğunda ya da diğer gazlarla reaksiyona girdiğinde, altlıkta buhar ya da sıvılar değişken olmayan kaplamalar şeklinde büyürler bu işlem kimyasal buhar kaplama tekniği olarak adlandırılır. CVD işleminde yüksek sıcaklıklar kullanılır (Kaya, 1998).

İnce filmlerin nasıl kaplandığı ve kaplama sonucunda bu ince filmlerin özelliklerinin nasıl olduğu hakkında bilgi sahibi olmak oldukça önemlidir. İnce filmi oluşturan malzemelerin bileşimi; yüzey özellikleri, kristal yapısı, elektriksel özellikleri, optik özellikleri elde edilen ince filmi direk olarak etkilemektedir. İnce filmlerin mikroskobik özelliklerini etkileyen temel etkenlerin başında kaplama yöntemleri gelmektedir. Filmler ne kadar homojen ve pürüzsüz kaplanırsa yüzey özellikleri oldukça iyi olabilmektedir. ITO ve benzeri oksit filmlerin çoğu reaktif prosesler ile üretilmektedir. Metallerde arzu edilen oksidasyon, oksijen içeren atmosfer ile reaksiyon hızını arttıran ilave enerjinin kombinasyonu ile gerçekleşebilmektedir. Çeşitli biriktirme tekniklerinin birbirinden farklı proses koşulları ile, oksijen ve metal arasında farklı kimyasal bağlanma durumları ortaya çıkabilmektedir. Bu durumda optik ve elektriksel özellikler gibi makroskobik film özellikleri değişim gösterebilmektedir. Bu nedenle oksit tabakası içindeki metalin oksidasyon durumunun bilinmesi, biriktirme proses parametrelerinin optimizasyonu açısından önemlidir (Çolak, 2002).

Katı bir kaynağın vakum altında atomizasyonu veya buharlaştırılarak bu maddenin kaplama oluşturmak için altlık üzerine biriktirilmesi işlemine fiziksel buhar biriktirme (PVD) denir. Vakum teknolojisinin gelişmesi ile fiziksel buharlaştırma ile kaplama tekniği büyük bir gelişme göstermiştir. Fiziksel buharlaştırma ile kaplama yönteminin gelişmesinde en büyük katkıyı plazma destekli iyon kaplama ve reaktif PVD türleri sağlamıştır (Anonim, 2015).

3.2. Fiziksel Buhar Biriktirme ile Kaplama

PVD (Fizik Buhar Biriktirme) kaplama teknolojisi 1800lü yıllardan beri bilinmekte, ancak son 50 senedir kendisine endüstride bir yer bulabilmiş, ince film kaplama tekniğidir. Fiziksel buharlaştırma ince film kaplama tekniğinde vakumlu ortamda, bir ısıtıcı kullanılarak buharlaştırılan kaplayıcı malzeme, kaplanacak olan hedef altlık üzerine ince bir film katmanı halinde biriktirilir. . Fiziksel buharlaştırma ince film kaplama tekniğinde katı haldeki ham madde yüksek enerji ile plazma haline getirilip kaplanacak altlık üzerine aktarılır. Bu kaplama tekniğine bilimsel anlamda ilk olarak 19. yüzyıl sonlarında çalışmaya başlanmış daha sonra vakum teknolojisindeki gelişmeler ile bu çalışmalar hız kazanmıştır. Özellikle sanayileşmenin artması ile birlikte aşınma dayanımı ciddi anlamda bir ihtiyaç haline gelmiş ve 1960'lı yıllarda günümüzde kullanılan sistemlerin ilk adımları atılmıştır. PVD kaplama tekniğinde; kaplanacak malzeme yüksek vakumlu bir kabine yerleştirilir ve yüksek enerji ile iyonlaştırılmış ve reaktif gazlarla oluşturulmuş plazma ile kaplanır. Kaplamanın homojen olabilmesi için kaplanacak malzemeye maksimum hareket kazandırılır. PVD ile ince film kaplama teknikleri; termal buharlaştırma, biriktirme sıçratma, biriktirme katodik ark biriktirme, iyon kaplama, lazer biriktirme (PLD), elektron demeti (EBPVD) olarak çeşitli şekillerde yapılabilmektedir (Anonim, 2015).

PVD yönteminde kullanılan vakuma alma işlemi, filmlerin biriktirilmesi ve karakterizasyonu için buldukları ortamı yapılacak işleme etki edebilecek gaz moleküllerinden arındırmak için önemlidir. Bu vakum sistemleri bir seri pompa, boru sistemi, vana ve gösterge parçalarından oluşurlar. Vakum pompaları genel olarak iki ana tür altında incelenir. Bunlar gaz transfer pompaları ve hapsetme pompalarıdır. Gaz transfer pompaları gaz moleküllerini vakuma alınmak istenen bölgeden alarak bir veya birkaç kademede dış ortama aktarır. Hapsetme pompaları ise gaz moleküllerini içinde yoğunlaştırır ya da kimyasal olarak pompalanan odanın duvarlarına bağlar. Gaz pompaları gazı ortamdaki tamamen uzaklaştırırken bazı hapsetme pompaları ısınma aşamasında tutmuş olduğu gaz moleküllerini aldığı ortama geri verebilir. Gaz transfer pompaları kendi içinde pozitif yer değiştirme ve kinetik vakum pompaları olarak ikiye ayrılırlar. Döner mekanik ve Roots pompaları pozitif yer değiştirme türüne örnek olarak verilebilirler. Difüzyon ve turbo moleküler pompalar kinetik vakum pompalarının önde gelen örnekleridir. Döner mekanik

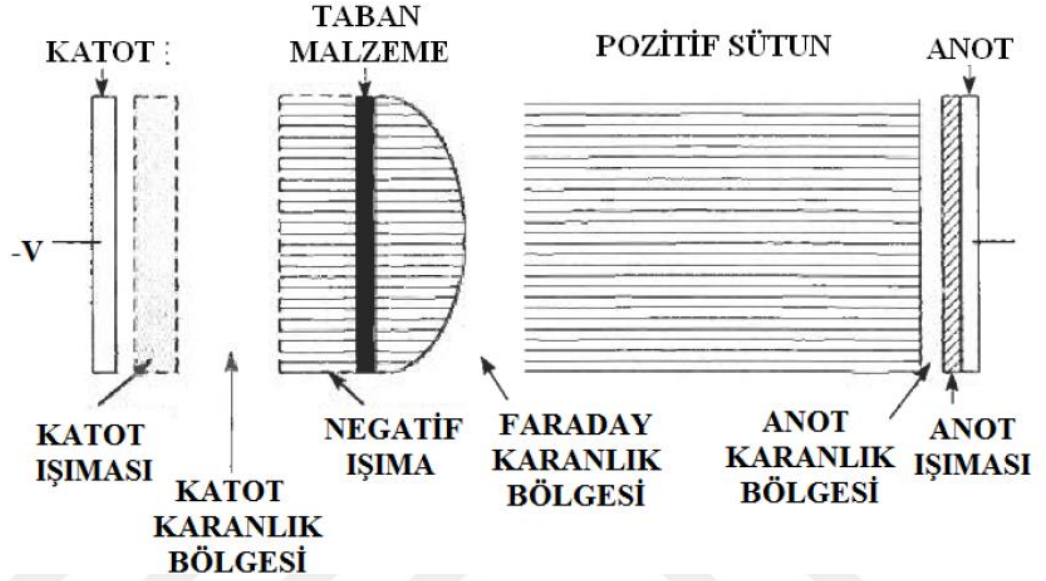
pompada; döner piston ve döner kanatlı pompa düşük basınç elde etmek için en sık kullanılan iki cihazdır. Piston pompaları genel olarak büyük sistemleri boşaltmak ve Root tipi pompalara destek olmak için kullanılır. Tek kademeli pompalar yaklaşık 1 Pa basınç sağlarken iki kademeli pompaların basınç değeri 10-2 Pa seviyesindedir. Döner pompalar genel olarak yağ difüzyonu ve turbo moleküler pompaların çalışmaları için gereken öncü vakum değerini elde etmek için kullanılırlar. Turbo moleküler pompalar dakikada 20.000 devirin üzerindeki hızlarda dönen türbin rotorları ile moleküllerin yüksek hızlarda istenen yöne aktarılmasını sağlarlar. Gaz molekülleri üst kademede yakalanıp alt kademelere geçirilerek vakum öncesi basınç seviyesinde sıkıştırılır. Maksimum sıkıştırma değeri rotorların dairesel hızıyla lineer, gazın moleküler ağırlığının karekökü ile eksponansiyel olarak orantılıdır. Çok yüksek sıkıştırma değerlerine ulaşmanın en önemli sonuçlarından biri pompa içinde oluşan yağ ters akımını önemsenecek kadar düşük seviyelere indirilmesidir. Herhangi bir yakalama mekanizmasına ihtiyaç duymadan, turbo moleküler pompa bir döner pompa ile desteklenerek etkili yağsız pompalama sağlanabilmektedir. Turbomoleküler pompalar pahalı olmalarına rağmen ince film üretimi ve karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu pompalar genel olarak 103 L/saniye pompalama hızına ve 10-8 Pa basınç değerine sahiptirler (Ohring, M.,1992; Ağırseven, 2011).

PVD yönteminde filmin sentezlendiği malzemeye veya biriktirilecek malzemenin bulunduğu plakaya hedef malzeme adı verilir. Bu malzemeye, doğu akım veya radyo frekansı güç kaynağının negatif ucuna bağlandığı için katot da denir ve genel olarak kilovoltlarca gerilim uygulanır. Hedef malzemenin karşısına kaplanmak üzere yerleştirilmiş olan taban malzeme, topraklanmış, elektriksel olarak değişken tutulmuş, negatif veya pozitif bias uygulanmış, ısıtılmış, soğutulmuş veya bu durumların bir birleşimi uygulanmış durumda bulunabilir. Kaplama odası vakuma alındıktan sonra ortamda deşarj oluşturup bunun devamlılığını sağlamak üzere odaya gaz girişi başlar. Bu görev için genel olarak argon gazı tercih edilir. Elektrotlara uygulanan gerilim sonucunda aralarında gözle görünür bir ışımalı deşarj oluşur. Bunun sonucunda bir akım oluşur ve taban malzeme üzerinde film toplandığı gözlemlenir. Film oluşumu için öncelikle deşarj içindeki pozitif iyonlar katot plakaya çarpmaya başlarlar ve momentum aktarımı sayesinde bu plakadan nötr atomlar kopartırlar. Bu atomlar deşarj bölgesinden geçerler ve taban malzeme üzerinde

birikmeye başlarlar. Bunun yanında hedef malzeme tarafından ortama ikincil elektronlar, ayrışan gazlar ve negatif iyonlar da yayılırlar. Elektrik alan içinde negatif yüklü iyonlar büyüyen filmi bombardıman altına almak üzere, anoda yani taban malzemeye doğru hızlanırlar. Tüm sıçratma türlerinde kabaca benzer deşarj, elektrot düzeni ve gaz-katı etkileşimleri oluşur (Ohring, M.,1992; Ağırseven, 2011).

Işımalı deşarjın oluşabilmesi için düşük basınç ve yüksek empedanslı doğru akım güç kaynağı gerekmektedir. Şarj oluşturma işleminin başında ortamda çok az yük taşıyıcı bulunduğundan ilk olarak küçük bir elektrik akımı oluşur. Gerilim yükseldikçe yüklü iyonlar daha fazla enerji elde etmeye başlarlar. Yüklü iyonlar yeterli enerjiye ulaşıncaya nötr gaz atomlarını çarpışmayla iyonize ederek ve katotla yaptıkları çarpışmalar sonucunda ortama ikincil elektron saçılmasını sağlayarak, ortamdaki yük taşıyıcılarının sayısını yükseltmiş olurlar. Şarj çoğalmasıyla birlikte akım da hızlı bir şekilde artar. Fakat bu süreç boyunca güç kaynağının çıkış empedansı ile sınırlandırılmış olan gerilim sabit kalır. Bu duruma Townsend deşarjı adı verilir. Yüksek miktarda elektron ve iyon üretilir. Oluşan elektronlar başlangıç elektronları kadar elektronu üretebilecek sayıda iyon oluşturdukları zaman deşarj kendi kendine devam eden bir duruma gelir. Ortamdaki gaz ışımaya başlar ve akım ani bir yükselmeye beraber gerilim düşer. Bu durumda normal ışımaya oluşur. Başlangıçta katoda uygulanan bombardıman katot yüzeyine homojen dağılmamış durumdadır ve katodun kenarlarıyla yüzey düzensizliklerinde yoğunlaşmıştır. Daha fazla güç uygulandıkça bu bombardıman yüzeyin her bölgesine yayılır ve homojene yakın bir akım yoğunluğu elde edilir. Bu aşamadan sonra gücün daha da artırılması daha yüksek voltaj ve akım yoğunluğuna neden olur ve anormal deşarj bölgesine gelinir. Anormal deşarj bölgesi, sıçratma ve plazma dağlama gibi deşarj işlemlerinin yapıldığı bölgedir. Katodun hemen yanında yüksek aydınlığa sahip katot ışması adı verilen tabaka oluşur. Yayılan ışık miktarı gelen iyonlarla ve katot malzemeye bağlı olarak değişir. Gelen deşarj iyonları ve pozitif katot iyonları katot ışma bölgesinde nötrleşirler. Bu bölgede ikincil elektronlar katottan uzağa doğru hızlanırlar ve katottan biraz uzakta bulunan nötr gaz atomlarıyla çarpışırlar. Katot ışmasından sonraki ara bölgede uygulanan gerilimin tamamına yakının düştüğü karanlık bölge bulunur. Karanlık bölge içinde pozitif gaz iyonları katoda doğru hızlanırlar (Ohring, M.,1992; Ağırseven, 2011).

Karanlık bölgeden hemen sonra negatif ışımaya bölgesi gelir. Bu bölgede hızlandırılmış elektronlar nötr gaz moleküllerini iyonlaştıracak enerjiye ulaşırlar. Bu bölgenin sonrasında Faraday karanlık bölgesi ve pozitif sütun gelir. Taban malzeme Faraday karanlık bölgesinin önündeki negatif ışımaya bölgesine yerleştirilir. Bu nedenle genelde Faraday karanlık bölgesi ve pozitif sütun bölgesi sıçratma işlemi sırasında ortaya çıkmaz (Ohring, M.,1992; Ağırseven, 2011).



Şekil 3.1. Işımalı geçiş (Ohring, M., 1992; Ağırseven, 2011).

Işımalı deşarjın özelliklerinin büyük bölümünü elektronların, yüklü ve yüksüz parçacıkların birbirleriyle yaptıkları çarpışmalar belirler. Çarpışan parçacıkların iç enerjilerinin korunma durumuna göre çarpışmalara elastik veya inelastik olarak gerçekleşirler. Elastik çarpışmada yalnızca kinetik enerji transferi olur. Momentum ve transferle ilgili hareketin kinetik enerjisi korunur. Potansiyel enerji çarpışan iyonların, atom, molekül ve benzeri parçacıkların elektronik yapısında bulunur. Bu yüzden potansiyeldeki artış, iyonizasyon ve diğer uyarılma işlemleriyle meydana gelir. Elastik çarpışmada atomik uyarılma meydana gelmez ve potansiyel enerji korunur. Bu nedenle çarpışma ile ilgili hesaplamaya yalnız kinetik enerji dahil olur (Ohring, M.,1992; Ağırseven, 2011).

Fiziksel buharlaştırma ile ince film kaplama yöntemlerinden biri olan magnetron sıçratma yöntemi, endüstriyel olarak çok hızlı bir şekilde gelişmiş ve kaplamalarda en iyi seçenek durumuna gelmiştir. Bu kaplama yöntemi ile elde edilen ince filmler

farklı sektörlerde kullanılmak üzere kaliteli, kullanışlı ve değişik fonksiyonlara sahip olduğu için tercih edilen bir kaplama çeşidi halini almıştır. Fiziksel buharlaştırma yöntemlerinden biri olan magnetron sıçratma yöntemi ile kaplanan ince filmler farklı yöntemlerle kaplanan yüzey kaplama teknikleri ile karşılaştırıldığında hatta daha kalın kaplama yapılmış filmler ile karşılaştırıldığında aynı işlevi görmektedirler. Özellikle daha kalın kaplamalarla karşılaştırıldığında aynı işlevi gördüğü için sert, aşınmaya dirençli kaplamalar, düşük sürtünme katsayılı kaplamalar, korozyona dirençli kaplamalar, dekoratif kaplamalar ve özel optik ya da elektriksel özelliği olan kaplamaları içine alan uygulama alanlarında magnetron sıçratma metodu önemli bir avantaja sahiptir (Çalışkan, 2010).

3.3. Sıçratma Yöntemi

Sıçratma (sıçratmalı biriktirme) işlemi sıçratılan yüzeyden çıkan parçacıkların biriktirilmesi işlemidir. Sıçratma biriktirmesi işlemi ilk olarak 1877'de Wright tarafından makul şekilde gerçekleştirilmiştir. 1904 yılında Edison, fotoğraf silindirleri üzerine gümüş biriktirme çalışmasıyla bu yöntemin patentini almıştır (Ağırseven, 2011).

PVD yöntemi ile ince film kaplama yapılırken, buhar kaynağı olarak, genellikle sıçratma yöntemi kullanılmaktadır. Sıçratma, ince film biriktirme işleminde kullanılan en yaygın metotlardan birisidir. Diğer yöntemlere göre birçok avantajı bulunan fiziksel buharlaştırma ile ince film kaplama yönteminde kullanılan başlangıç malzemesi pozitif iyonlarla bombardıman edilerek, atomlar yüzeyden kopartılır. Fiziksel tekniklerin kullanılmasındaki kolaylık ve birçok parametrenin değiştirilebilmesi sayesinde ince filmler sıçratma kaplama yöntemi ile daha kaliteli bir şekilde kaplanabilmektedir (Çolak, 2002).

Sıçratma tekniği ile ince film üretimi DC diyot sıçratma, AC sıçratma RF (Radyo frekans) sıçratma, DC magnetron (DC manyetik alan) sıçratma, DC darbeli magnetron sıçratma, iyon ve plazma ışın sıçratma gibi farklı yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir.

Sıçratma işlemlerinde, en çok kullanılan yöntem, DC sıçratma işleminde iki tane düzlem halinde elektrot vardır ve bu elektrotlardan birincisi soğuk katot, diğeri ise anotdur. Katodun ön yüzeyi, kaplanacak hedef malzeme ile örtülürken altlıklar ise anot üzerine yerleştirilir. Sıçratma çemberi, argon gazı ile doldurulmuştur ve ışıldama deşarjı ise elektrotlar arasında uygulanan DC gerilim ile meydana getirilmiştir. Ar⁺ iyonları, altlık üzerinde ince bir film tabakası oluşturmak üzere hedef malzemeyi saçtırır. DC sıçratma sayesinde, metal kaynak yerine bir yalıtkan hedef olarak kullanıldığında, sıçratma deşarjı oluşmaz. Yalıtkan hedefle, ışınlama deşarjının devamı için RF voltaj kullanılır. Bu sisteme RF-diyot sıçratma adı verilir. Soğuk katot doğru akım diyot sıçratması bir doğru akım diyot deşarjında genelde sıçratılan malzeme katot görevi yapar ve taban malzeme de anot üzerine yerleştirilir. Uygulanan gerilim katoda yakın bölgede oluşur ve katod yüzeyine yakın bölgede plazma meydana gelir (Ağırseven, 2011).

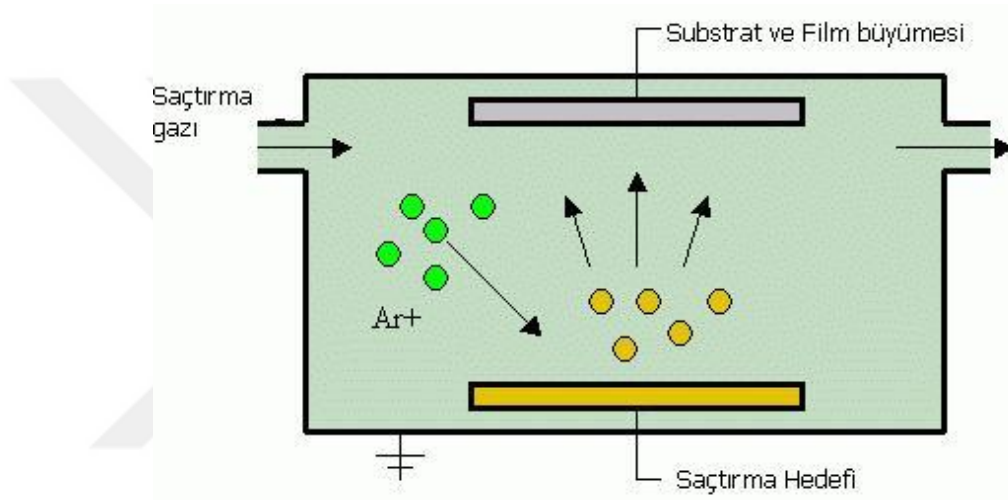
Doğru akım diyot deşarjında kullanılan yüzey yalıtkan olursa yüzeyde yük toplanacaktır ve iyon bombardımanına engel olacaktır. Bu yüzden yüzeyin elektriksel iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Doğru akım diyot düzeni vakum biriktirmesinden yavaş ve pahalı olmasına rağmen basit yapıda elektriksel iletken malzemeleri sıçratmak için kullanılır. Doğru akım diyot sıçratmanın avantajı plazmanın homojen olarak geniş bir bölgede oluşturulabilmesi ve bu sayede geniş alanlı buharlaştırma kaynağı oluşturabilmesidir (Ağırseven, 2011).

Fiziksel buharlaştırma ile ince film kaplama yöntemlerinden biri olan diyot sıçratma yönteminde iki yüzey arasına bir potansiyel uygulanması ile elektron akışı elde edilerek sıçratma gerçekleştirilebilir. Sistemde ortama gaz verildiğinde yoğun atom çarpışmalarından dolayı, bir elektron çarptığı atomdan elektron koparabilirse atom iyon haline geçmektedir. Sıçratma işleminde, iyonun yüzeyden atom koparması için kütlelerin oldukça büyük olması gerekir. Bunun için, argonla yapılan sıçratma işlemi diğer inert gazlara (He) göre daha verimli olmaktadır. Sıçratma yönteminde, iyon oluşturmak için, negatif plazma, pozitif yüklü veya yüksüz parçacıklar, X ışınları veya bunların çarpışmaları sonucu oluşan iyonlar kullanılır (Anonim, 2015).

Diyot sıçratma, sıçratma etkisinin düşük olması sebebiyle fazla tercih edilmemektedir. Konvansiyonel ve dengesiz manyetik alanda sıçratma sistemleri,

manyetik alanla birlikte kullanılır. Bunun için mıknatıslardan yararlanır. İyonizasyonlu manyetik alan sistemler mikronüstü kaplama teknolojisinde büyük gelişmeler sağlanmıştır (Anonim, 2015).

Reaktif sıçratma tekniğinde ise, sıçratma çemberine verilen reaktif gazlar (oksijen, nitrojen vb.), hedefle reaksiyona girerek saçtırılır ve film oluşmasını sağlarlar. Böyle reaktif gazlar bazen vakum çemberini temizlenmesinde de kullanılmaktadır. Reaktif sıçratma, pek yaygın olmasa da optik kaplamalarda ve tantalum nitrit kaplı dirençler yapımında kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Sıçratma Yöntemi ile İnce Film Üretim Şeması (Anonim)

Reaktif sıçratma ile biriktirme elemental bir hedef malzemeden reaktif sıçratma üç farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlardan ilki biriken parçacıkların gaz fazındaki parçacıklar ile reaksiyona girmesidir. Bunun haricinde yüzeye tutunan parçacıklar ile reaksiyona girme ve başka bir bileşikle beraber biriktirme yapma yöntemleri vardır. Reaktif gazlar genel olarak düşük atom ağırlığına sahiptirler. Bu yüzden sıçratma işlemi için kullanımları verimli olmaz. Sıçratma işleminin verimli olması için kullanılan gazın ağır ve biriktirme işlemine etki etmeyecek şekilde inert olması gerekmektedir. Bu nedenle genel olarak argon ve benzeri gazlar kullanılmaktadır ve argonun reaktif gaz ile karıştırılması Penning iyonizasyon prosesi ile reaktif gazın uyarılmasını sağlar. Hedef malzemenin kirlenmesi reaktif sıçratma işleminde en sık rastlanan sorunlardan biridir ve sıçratma hızı ve verimini önemli ölçüde azaltır. Magnetron sıçratma gibi yüksek hızlı sıçratma kullanarak ve ortamdaki reaktif gazın

oranı kontrol altında tutularak bu sorunun önüne geçilebilmektedir. Özellikle yüzeyle tepkimeye girecek kadar gaz kullanmak ve ortamda gaz fazlası bulunmasını engellemek kirlenmeyi büyük ölçüde engeller. Gaz miktarı ve kaplamadaki katkısı plazma deşarjının empedansı ile veya ortamdaki gazın kısmi basıncı ayarlanarak kontrol edilir. Reaktif biriktirmede, biriken film tarafından reaktif gazlar pompalanır. Biriken film reaktif gaz ile tepkimeye girdiğinden, tepkime bölgelerinde ve film biriktirme hızındaki değişimler mevcut reaktif gaz oranını ve filmin özelliklerini değişime uğratacaktır. Bu yüzden eğer yeniden üretilebilen bir reaktif sıçratma biriktirme işlemi gerçekleştirilmek istenirse aynı düzen, taban malzeme, vakum yüzey alanı ve biriktirme hızı değiştirilmeden kullanılmalıdır (Ağırseven, 2011).

Magnetron sıçratma işleminde, manyetik bir alan, katotla üst üste bindirilir ve katot yüzeyine paralel bir ışıltama deşarjı oluşturur. Dairesel bir hareket gösteren ışıltama deşarjı içerisindeki elektronlar, manyetik alanla birlikte katotta plazma yoğunluğunu artırır. Plazma yoğunluğunun artması, akım yoğunluğunu da artırır. Düz magnetronun kullanımı, yarı iletkenlerin üretilebilmesi için bir zorunluluktur. 1936 yılında Penning tarafından bulunmuştur. Penning deşarjı adı verilen bu yöntemde, elektrik ve manyetik alanın kombinasyonu ile yüzey yakınında bir plazma oluşturulur. Sıçratma işleminde diğer malzemeler ile reaksiyona girmeyecek gazlar kullanılmalıdır (Ör: Ar⁺). İyon kaynağı olarak iyon tabancası ya da plazma kullanılabilir. Elde edilen iyonlar yüksek hızlarda, kaplayıcı malzeme yüzeyine çarptırılarak, buhar oluşturulur. Çarptırılan iyonlar malzeme latisi içerisine girip kalabilir, enerjilerini bırakarak geri saçılabilir veya yüzeyden atom koparabilirler. Doğru akım manyetik alanda (magnetron) sıçratma; manyetik alanda sıçratma 1970'lerde metalleri yüksek hızda biriktirme, yarı iletken ve dielektrik filmler için geliştirilmesinden beri çok gelişme göstermiştir. Bu yöntem, konvansiyonel diyot biriktirmenin aksine, düşük basınçta yüksek hızda biriktirmeye ve düşük taban malzeme sıcaklığında yüksek kaliteli ince film elde etmeye olanak sağlar. Doğru akım diyot sıçratmada katottan çıkan elektronlar katot yüzeyinden uzaklaştıkları için deşarjı devam ettirmek için verimli olarak kullanılamamaktadırlar. Yüzey üzerinde bir manyetik alan yaratılarak bu elektronların yüzeyden uzaklaşmaması sağlanabilmektedir. Manyetik alan etkisi, elektronlar için, kesişen manyetik ve elektrik alanlarından oluşan kapalı yönelme yolları olarak özetlenebilir. Duruma

uygun şekillerde dizilmiş mıknatıslarla böyle bir manyetik alan yaratılabilmektedir. Örneğin basit düzlemsel bir manyetik alan katodu oluşturmak için, arkasında sabit mıknatıslar bulunan düzlemsel bir katot hazırlanır. Bu sayede mıknatıslar toroidal bir alan oluştururlar ve bu alanın eğrileri yüzeye yakın kapalı yollar oluştururlar. Kesişen elektrik ve manyetik alana giren ikincil elektronlar katoda yakın mesafede uzun yol alacakları yörüngelere yakalanırlar ve bu yörüngeleri izlerler. Etkili elektron yakalanan bölgelerde elektron yoğunluğu kritik değerlere ulaşır ve iyonizasyon olasılığını en üst seviyeye ulaştırır. Bu da etkili sıçratma için yüksek enerjili pozitif iyonlarla daha fazla ikincil elektron üretimi gereksinimini ortadan kaldırmaktadır (Ohring, M.,1992; Ağırseven, 2011).

İyon ve elektronların hareketliliklerindeki farktan dolayı hedef katodun yüzeyine yakın, plazmaya göre daha negatif bir gerilimde süzülen pozitif bir iyon bölgesi oluşur. Katotta meydana gelen iyon bölgesinin etkisiyle iyonlar plazmadan çıkarılıp hedefe doğru hızlandırılırlar ve hedefe vurmaları suretiyle momentum transferiyle malzemenin sıçratılmasına neden olurlar. Sonuç olarak yüzeyin hemen üzerinde yoğunlaşarak daha verimli bir sıçratma yöntemi meydana getirir. Bu yöntem manyetik alanda sıçratma veya magnetron sıçratma adı verilir. Pek çok manyetik alan kaynağı 1-25 Pa ve 300-700 V katod geriliminde çalışır. Sıçratma hızı öncelikli olarak hedefteki iyon akım yoğunluğu ile belirlenir. Birikme hızı ise uygulanan güç, kaynak ile taban malzeme arasındaki mesafe, hedef malzeme cinsi, basınç oranı ve sıçratma gazı yoğunluğu gibi faktörler ile belirlenir. En yaygın kullanılan manyetik alan düz bir doğrultuda mıknatıs dizilimine sahip olan düzlemsel magnetronudur. Düzlemsel magnetron düzeni, herhangi bir uzunlukta iki paralel sıradan meydana gelir ve katod sonrası güç kaynağı, silindir ya da silindirik bir armatür içinde biriktirme sağlar. Magnetron sıçratmanın en önemli avantajlarından biri, düşük basınçta katoda yakın bölgede yoğun plazma oluşturup, fiziksel ve şarj değişimi çarpışmalarının sebep olabileceği enerji kaybına uğramadan, iyonların plazmadan katoda doğru hızlandırılabilmesidir. Bu durum doğru akım diyot tekniğinden daha düşük gerilimde daha yüksek sıçratma hızı sağlamaktadır (Ohring, M.,1992; Ağırseven, 2011).

Manyetik alanda sıçratma tekniğinde, plazma kullanılarak katottan ayrılan elektronlar, anot yüzeyine doğru ilerlerken ortamdaki gaz atomları ile çarpıştırılarak

iyonizasyon sağlanır. Bu iyonizasyon, katot yüzeyine yakın yerlerde çarpışmalara sebep olur. Manyetik alanda sıçratma işlemleri önceleri çok başarılı olamasa da, zaman içerisinde geliştirilmiş ve günümüzde en çok kullanılan sıçratma sistemi haline gelmiştir (Anonim, 2015).

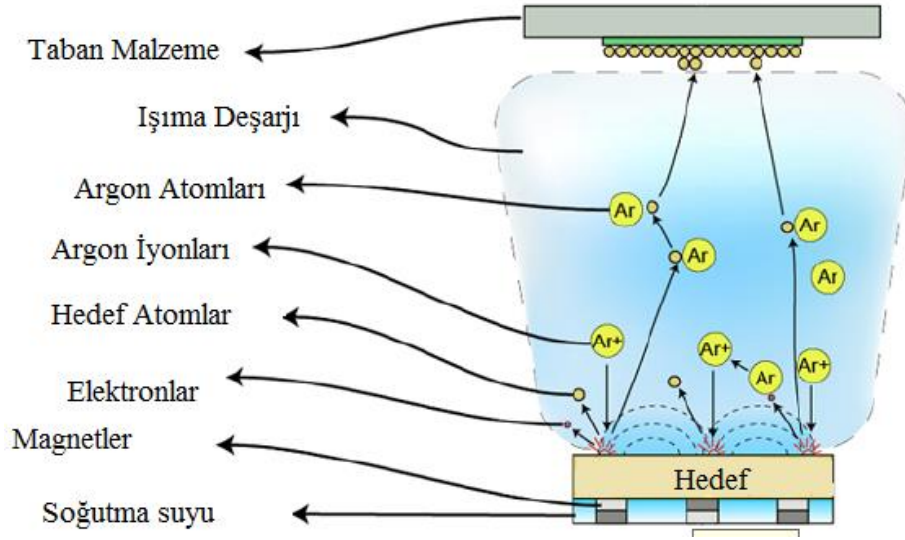
Manyetik alan yönteminde, hedef malzemesi su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşmuş tutucunun üzerine yerleştirilmiştir. Hedefin merkez eksenini, mıknatısın bir kutbunu oluşturur. İkinci kutbu ise, hedefin kenarlarına yerleştirilen mıknatıslar tarafından halka şeklinde oluşturulur. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve manyetik alanların hedef üzerinde birbirine dik olmasını sağlar. Manyetik alanlar dairesel ve dikdörtgen şeklinde düzenlenebilir (Anonim, 2015).

Sıçratma yönteminin daha iyi anlaşılması için iyonlarla yüzey arasındaki etkileşimi daha iyi anlamak gerekir. Yüzey üzerindeki tüm etkileşimler iyon ağırlığı, iyon yükü, iyon enerjisi ve etkileşime katkıda bulunan yüzey atomlarının yapısına bağlı olarak değişiklik gösterirler. Bu etkileşimlerin her biri, ince film işleme, biriktirme ve karakterizasyon teknikleri için kullanılmaktadır. Örnek olarak, hedef yüzeyin altına iyon gömülmesini sağlayarak iyon aşılama yapılır ve bu işlem sırasında iyonların sahip oldukları enerjiler iyon aşılamanın ne ölçüde gerçekleşeceğini belirler. İstenilen miktarda ve yapıda katkılama yapmak için yüzeye gelen iyon akısı, çarpışma zamanları ve enerjileri hassas olarak ayarlanmalıdır. Buna karşılık, iyon saçma spektroskopisinde ise enerji kaybının ölçülmesi gerektiğinden yüzeye çarpan iyonların geri yansımaları istenmektedir. Bu analitik tekniklerin en önemlilerinden biri Rutherford geri saçılmasıdır ve saçılan iyonların oluşturduğu sinyaller, yüzeydeki filmlerin ve yüzey altı tabakaların kalınlıkları ve kompozisyonları hakkında bilgi alınmasını sağlamaktadır. Film oluşumu çekirdeklenme ve büyüme olmak üzere iki aşamadan oluşur. Film oluşumunun ilk safhalarında, yeterli sayıda atomu veya molekülü bir araya gelip yoğunlaşarak taban malzeme üzerinde kalıcı bölge oluştururlar. Film oluşumları çoğunlukla bu çekirdeklenme aşamasında meydana gelir. Taban malzemenin ilk buhar temasıyla birlikte yüzeyde küçük ama yüksek hareketliliğe sahip homojen öbekler ya da adalar gözlenir. Bu aşamada ilk oluşan çekirdek, çarpışan atomları ve kritik altı öbekleri kendisine katarak büyür ve adanın yoğunluğu yavaşça doygunluğa ulaşır. Bir sonraki aşamada oluşan adalar sıvı gibi

davranarak birbirine tutunmaya ve birleşmeye başlarlar. Bu birleşme adaların yoğunluğunu azaltır ve bu sayede taban malzeme üzerinde bölgesel açıklıklar oluşturarak daha çok çekirdeklenmenin oluşmasını sağlar (Ohring, M.,1992; Ağırseven, 2011).

3.4. DC Magnetron Sıçratma Yöntemi

DC magnetron sıçratma yönteminde iyonlaşmış argon atomlarını hızlandırmak için kullanılan elektrik alana dik doğrultuda bir de manyetik alan uygulanır ve bu alan sayesinde hedef üzerinde iyon konsantrasyonu artırılmış olur. Manyetik alanın etkisi hedeften kopan elektronların yüzey etrafında dolanmasına sebep olur. Dolanan bu elektronlar yüzey üzerinde yüksek yoğunluklu bir plazma oluşturarak DC magnetron sıçratma sürecini başlatır. Bu sıçratma tekniğinin en önemli avantajı, yüksek yoğunluklu sıçratma işlemlerinin bu yoğun plazma ortamının yardımıyla gerçekleştirilebilmesidir. Diğer taraftan, DC magnetron sıçratmanın olumsuz tarafı ise, hedef üzerinde oluşan düzgün olmayan plazmanın magnetron oluşumunu etkilemesidir. Ayrıca, üretim sürecinin düzgün gerçekleştirilmesi için altlığın hedefe göre pozisyonu iyi ayarlanması gerekmektedir. Manyetik alanda sıçratma, nanokristal yapıda boyut, yoğunluk ve kalınlığının kontrol edilebildiği bir üretim metodudur. Son yıllarda sıçratma teknolojisine bağlı gelişmelerin büyük çoğunluğunun manyetik alanda yapıldığı ifade edilmektedir. Bunun sebebi ise, manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilen malzemelerin mikro elektronik, optik, manyetik ve optik kayıt ortamları, solar kontrol endüstrisi gibi geniş bir endüstriyel kullanım alanının olması olarak vurgulanmaktadır. Bu teknik çok tabakalı film büyütme içinde elverişli bir yöntem olduğu ve bu yöntem kaplama işlemi sırasında sıcaklık, film kalınlığı, kaplama oranı ve gazın kimyasal bileşimi gibi kaplama parametrelerinin iyi bir şekilde kontrolünü sağladığı bilinmektedir. Çok tabakalı filmlerin büyütülmesinde genellikle çok hedefli sıçratma sistemleri kullanılmaktadır (Coşkun, 2011).



Şekil 3.3. Sıçratma Yöntemi Şeması

Şekil 3.3 de sıçratma yöntemi ile ince filmlerin nasıl kaplandığı görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi hedef üzerinden kopan malzeme alt taban olarak yerleştirilen altlık üzerine kaplanmaktadır.

3.5. Geçirgen İnce Filmler

Görünür bölgedeki optik geçirgenliğin (% 80' den fazla) ve yüksek elektriksel iletkenliğin (103 ohm-1cm-1'den fazla) bir arada bulunması için üstün incelik yönünden daha kullanışlı olarak tanımlanan ince film teknolojisini uygulamaya başlatmıştır. Üretilen filmler 1nm ile 1µm arasında değişirler. Bu üretilen ince filmler yarıiletken aletlerin yapımında, Manyetik kayıt ve algılama sistemlerinde Dekoratif işlerde, yaygın olarak kullanılmaktadır.

İyi optik geçirgenlik elde etmenin tek yolu, geniş bant boşluğuna sahip oksitte elektron hareketi sağlamak amacıyla yapıya kontrollü olarak katkı miktarı ilave edilmelidir. Bu şartlar ince film formundaki kadmiyum, kalay, çinko ve diğer alaşımlarda kolaylıkla elde edilmektedir. Başta antimon dop edilmiş kalay oksit (ATO) veya florin dop edilmiş kalay oksit (FTO) ve kalay dop edilmiş indiyum (ITO) olmak üzere bir takım yararlı geçirgenin iletken oksidin biriktirimi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Geçirgen iletken malzemeler üzerine kurulu elektronik, opto-elektronik ve mekanik uygulamalar ortaya çıkmıştır. Bu ince filmlerin uygulamaları

olarak; dirençler, uçaklar için geçirgen ısı elementleri, enstrüman pencereler için anti-statik kaplamalar, cam pencereler için ısı yansıtan aynalar, yansıtmasız kaplamalar, güneş ısı toplayıcılarda seçici absorbe edici bileşenler, gaz sensörleri, sıvı kristaller için elektrotlar, elektrokromik ve ferroelektrik fotoiletken depolayıcı ve gösteri aletleri, güneş pilleri, yarıiletkenler/ yalıtkanlar/yarıiletken malzemeler, koruyucu ve cam kaplar için aşınma dirençli kaplamaları sayılabilir. Bu filmlerin elektronik ve optik taşıma proseslerine ışık tutacak elektro-optik özelliklerin ortak yanları aşağıda özetlenmiştir.

- a. Görünür bölgedeki elektriksel iletkenlik, optik geçirgenlik ve IR yansımaları birbirleri arasında ilişkilidir. Başta biriktirme süresince ve sonrasında, altlık sıcaklıkları ve oksidasyon prosesleri olmak üzere, büyük ölçüde biriktirme özelliklerine bağlıdır.
- b. Elektron taşıma özellikleri ve optik sabitlerin her ikisi de çok ince filmlerde kalınlığa bağlıdır. Bu değişkenlik, oksijence zengin yüzey tabakasının varlığı , artan tane boyutundan kaynaklanan artan mobilite, kristal yapıdaki tercihli yönelme ve (yüksek oranda anizotropik malzemeler olması durumunda) refraktif indeksteki değişim nedeniyledir.
- c. Bütün iletken oksitler yaklaşık $10^{18} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ derecesindeki yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna ve yaklaşık $1-50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ mertebesindeki düşük mobiliteye sahip olup n-tipi iletkenliğe sahiptirler.
- d. Doplamanın etkinliği dopant ve matris oksite bağlıdır.

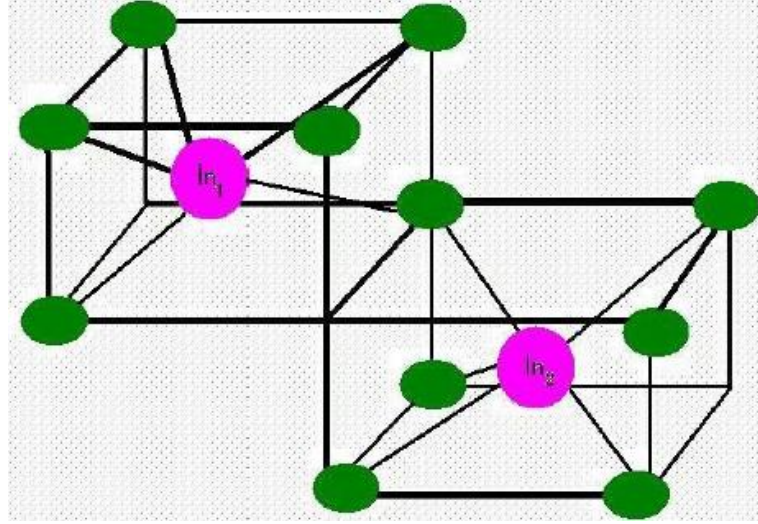
Metaloksit yapılar Düşük elektrik direncine Metalik iletkenliğe yakın iletkenliğe, 400 nm ile 700 nm arası görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahip iletkenlerdir (Çolak, 2002).

3.6. İndiyum Kalay Oksit (ITO)

Saydam iletken malzemeler, iletken ve optik geçirgen yapıya sahiptirler. İndiyum kalay oksit, kalay oksit gibi metal oksitler düşük elektrik direncine, metalik iletkenliğe yakın bir iletkenliğe, 400 ile 700 nm arası görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahiptirler. Genelde iletkenler saydam değildir, saydamlar da iletken

değildir. Enerji skalasında, fotonların adsorplanabileceği düşük enerji aralığına sahip olan maddelere iletken, enerji aralığı geniş olan, fotonların adsorplanmadan geçtiği maddelere ise saydam denir. Saydam iletkenlerde iletkenlik ve geçirgenlik, katkılama yapıldığında yerine geçen vericilerle ya da mevcut girişler sayesinde dejenere olan, geniş bant aralıklı (>3 eV) yarı iletken oksitlerin seçimiyle sağlanmaktadır. ITO, n-tipi, geniş bant aralıklı, kırılgen, pahalı, az zehirli ve saydam iletkenler içinde oldukça iletken, dejenere bir yarı iletken oksittir. ITO'nun elektrik iletkenliği, indiyum oksit örgüsü içindeki indiyuma kalay katkılanmasına bağlıdır, katkılama ile indiyum oksidin iletkenliği büyük ölçüde iyileştirilir. ITO ince filmler düşük dirence ve görünür bölgede %80 gibi yüksek optik geçirgenliğe sahiptir. Bu nedenle ITO ince filmler güneş pilleri, elektro-lüminesans ve sıvı kristal ekranlar gibi opto-elektronik cihaz alanlarında geniş çaplı olarak kullanılmaktadırlar. İndiyum kalay oksit (ITO) yüzeylerinin bazı özellikleri ise; indiyum kalay oksit (ITO) yüzeyleri, indiyum oksidin (IO) yığın haldeki yapısını korumaktadır fakat biriktirme şartlarına bağlı olarak latis sabitinde hafif bir artış olmaktadır. Tane boyutu tipik olarak 40 ile 60 nm arasında değişmektedir (Kaymak, 2010).

ITO filmlerin direkt optik bant genişlikleri genellikle 3,75 eV den büyüktür. Görünür bölgede ve yakın IR bölgede optik geçirgenlik oldukça yüksektir ve yansıma foton kaybının başlıca nedenidir. Görünür bölgede absorpsiyon tipik olarak % 2'dir. Çeşitli araştırmalarda elde edilen sonuçlara göre görünür bölgede kırılma indisi 1,8 ve 2,1 olmak üzere aynı zamanda belirgin bir saçılma göstermektedir, n aynı zamanda özellikle altlık sıcaklığı basta olmak üzere, biriktirme şartlarına bağlıdır. Yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarından dolayı bu filmler 1,2-1,6 seviyesinde plazma kenarına ve yüksek mobilitelerinden kaynaklanan ve hızla artan IR yansıma faktörüne sahiptirler IR yansıma faktörü yüksektir ve dolayısıyla düşük termal emisiyona sahiptirler. Kalay sahip olduğu yükseltgenme basamağına göre +2 veya +4 olarak bulunur. ITO, indiyum oksit (In_2O_3) Sn^{4+} katılmasıyla oluşmuş n-tipi yarı iletkendir (Kaymak,2010).



Şekil 3.4. ITO'nun kristal yapısının şematik gösterimi

ITO ince filmleri; uçakların geçirgen ısı elemanlarında, araba camlarında, anti statik olarak, elektronik gösterge kaplamalarında, ısı yansıtıcı aynalarda, anti ısıtıcı kaplamalarda, gaz sensörlerinde kullanımları vardır. Ayrıca ITO; elektro optik aletlerde, sıvı kristal göstergelerinde, saydam elektrot olarak kullanılır. Bunların yanı sıra ITO; güneş pilleri, ışık yayıcı foto diyotlar, foto transistorlar ve lazerlerde olduğu gibi opto-elektronik aletlerde saydam kontak olarak kullanılır.

İndiyum kalay oksit (ITO) geniş bant aralığına sahip (3,5 eV), n-tipi bir yarıiletken oksittir. Düşük dirence (10-4 ohm cm) ve görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe (80%) sahiptir. Bu nedenle ITO ince filmler; güneş pilleri, elektro-lüminesans ve sıvı kristal ekranları gibi opto-elektronik cihaz alanlarında geniş çaplı olarak kullanılmaktadırlar. Uygun ölçüde yüksek iletkenliğe ve geçirgenliğe sahip film elde etmek için ITO filmler buharlaştırma, dc/rf sızdırma, iyon kaplama, CVD, sprey, piroliz gibi yöntemlerle biriktirilmektedirler. Kalay dop edilmiş indiyum oksit (ITO) filmler, geçirgen iletken kaplama yapımında kullanılmaktadır. İnce film tabakaları, elektron ışın buharlaşması veya sızdırma ile biriktirilebilmektedirler (Çolak, 2002).

Kalay dop edilmiş indiyum oksit (ITO) filmler, indiyum oksidin (IO) yığın haldeki yapısını korumaktadır; fakat biriktirme şartlarına bağlı olarak latis sabitinde hafif bir artış olmaktadır. Bu filmler aynı zamanda, biriktirme şartlarına bağlı olarak güçlü <100> veya <111> yönlenmesi göstermekte; ancak elektriksel ve optik özellikleri bu yönlenmeden etkilenmemektedir. Bu filmlerin dirençleri artan kalay konsantrasyonu

ile azalmakta, fakat daha yüksek konsantrasyonlarda artmaya başlamaktadır. Spreyleme ile elde edilen ITO filmler üzerinde yapılan araştırmalarda, oksijen boşluklarının iletkenliğe katkısını ıspat etmek amacıyla, yüksek ölçüde dop edilmiş ITO filmlerde bile, 400oC’ de havada veya argon atmosferinde uygulanan tavlama sonucunda iletkenliğin arttığı gözlenmiştir (Çolak,2002).

3.7. İnce Film Optiği

1980’lerin sonlarında J.C. Maxwell’in çalışması ve daha sonraki gelişmeler, ışığın kesin elektromanyetik doğada olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Elektromanyetik dalgalar aracılığıyla sürekli bir enerji aktarımının anlatımı klasik elektrodinamikte doğrudan sağlanır. Buna karşılık, daha modern kuantum elektrodinamiğinde enerji taşınması ve elektromanyetik etkileşmeler, sınırlı enerji kuantumlarından oluşan “fotonlar” olarak bilinen kütesiz temel “taneciklerle” anlatır. Işıyan enerjinin kuantumlu doğası her zaman açık değildir. Optiğin uygulamalarında her zaman bu gerekli de değildir. Ölçme düzeneğinin kuantumları tek tek ayırt edemeyeceği ve bunun özellikle böyle olmasının istendiği birçok durum vardır. Çoğu kez gelen ışık demeti oldukça büyük enerji taşır ve böyle durumlardaki olaylarda tanecikli yapı kaybolur. Işığın dalga boyu, aletin boyutlarına göre küçükse, ilk yaklaşımda geometrik optik teknikleri kullanılabilir. Aletin boyutlarının küçük olması durumunda uygulanabilen daha duyarlı işlem fiziksel optik incelemesidir. Kullanılan dalganın türü belirtilmeden de işlemler büyük ölçüde gerçekleştirilebilir. Fiziksel optikte ışığın baskın özelliği onun dalga doğasıdır. Fiziksel optiğin klasik incelemesinde ışığı bir elektromanyetik dalga olarak göz önüne almak son derece yeterlidir. Işık maddenin başka bir görüntüsü gibi düşünülebilir. Gerçekte, kuantum mekaniğinin temel ilkelerinden biri, hem ışığın, hem de maddesel biçimlerin benzer dalga-tanecik özellikleri ortaya koymalarıdır. Kuantum teorisinin kurucularından biri olan E.C Schrödinger (1887-1961) bunu řu şekilde ortaya koymuştur:

Fotonlar için, dalga doğası Maxwell’in klasik elektromanyetik alan denklemleriyle temsil edilir. Fotonların yüklerle etkileşmelerinin kuantum mekaniksel bir teorisi bunlarla ortaya koyulabilir. Işığın ikili doğası, uzayda dalga şeklinde yayılmasında, yayımlama, soğurma süreçlerinde tanecik benzeri davranış göstermesinde ortaya çıkar. Elektromanyetik ışımaya enerjisi, klasik bir dalgada olduğu gibi sürekli olmayıp

kuantumlar veya fotonlar halinde oluşur ve yok olur. Bununla beraber, bir mercekte, boşlukta veya yarıklar düzeneğindeki hareketinde dalga özellikleri baskındır. Büyük ölçekli dünyada bu cins davranışlara alışık olunmamasının nedeni, bir cismin dalga boyunun onun momentumu ile ters orantılı olmasıdır (Bilgiç, 2014).

Maxwell, 19. yüzyılın 2. yarısında elektrik ve magnetikten bilinen konuları inceleyerek elektromagnetik alan teorisini ortaya koymuştur. Yaptığı araştırmalar sonucunda kendisinin adını taşıyan denklem sistemini elde etmiştir.

Tek katlı bir filmde veya çok katlı filmlerden yansıyan ve geçen ışık demetlerinin şiddetlerinin ve genliklerinin belirlenmesinde de Maxwell eşitlikleri kullanılır. Maxwell eşitliklerinin kullanılması için uygun sınır şartları seçilir. İzotropik (fiziksel özellikleri doğrultuya bağlı olmayan) ortamlar için elektromagnetizma kanunları aşağıdaki gibidir,

$$\text{div}\vec{D} = \varepsilon\text{div}\vec{E} = 4\pi\rho \quad (3.1)$$

$$\text{div}\vec{B} = \mu\text{div}\vec{H} = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{4\pi\sigma\vec{E}}{c} + \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \quad (3.4)$$

(3.1) (3.2) (3.3) ve (3.4) denklemlerinde alanın ortama etkisini ifade eden $\mathbf{D}=\varepsilon\mathbf{E}$ ve $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$ gibi maddesel denklemler kullanılmıştır. Burada \mathbf{D} ve \mathbf{B} sırasıyla elektrik ve manyetik indüksiyon vektörleridir. Elektriksel nicelikler elektrostatik birimlerde ve magnetik nicelikler elektromagnetik birimde ölçülür. Uzay yükü olmayan bir ortam için ortamdaki elektromanyetik dalganın yayılmasını temsil eden bağıntılar doğrudan Maxwell eşitliklerini gösterir.

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} + \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} = \nabla^2\vec{E} \quad (3.5)$$

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} + \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \nabla^2 \vec{H} \quad (3.6)$$

İletken olmayan ($\sigma=0$) bir ortamdaki yayılma için bu denklemler

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \nabla^2 \vec{E} \quad (3.7)$$

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = \nabla^2 \vec{H} \quad (3.8)$$

olarak indirgenir. Dalga denkleminin iyi bilinen basit şekli, dalganın $\frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$ hızı ile yayıldığını gösterir. Optik frekanslarda μ 'nun değeri tüm malzemeler için 1'den farklıdır.

Yayımla hızı $\frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$ dir ve ε ışık dalgasının frekansındaki dielektrik sabittir (Heavens,1991). Kırma indisinin tanımından $n = \sqrt{\varepsilon}$ sonucu elde edilir. İki ortamı ayıran sınırdaki yansıyan ve gelen ışığın genliğinin hesaplanması, Maxwell eşitliklerine sınır koşullarının uygulanması ile yapılır, $z = 0$ yüzeyine gelen bir düzlem dalga için geliş düzlemi x-y düzlemi olsun. φ_0 geliş açısı ve φ_1 kırma açısıdır. Koordinat sistemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Yüzeye gelen dalganın elektrik alan vektörlerinin genlikleri, iki bileşen için E_{0p}^+ ve E_{0s}^+ 'dir. Yansıyan dalganın genlikleri E_{0p}^- , E_{0s}^- ve geçen dalganın genlikleri E_{1p}^+ , E_{1s}^+ gösterilir. Gelen ve yansıyan dalgalarla ortak olan faz açısı, gelen dalga için,

$$\exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi m_0 x \sin \varphi_0}{\lambda} - \frac{2\pi m_0 z \cos \varphi_0}{\lambda}\right)\right] \quad (3.9)$$

ve yansıyan dalga için,

$$\exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi m_0 x \sin \varphi_0}{\lambda} + \frac{2\pi m_0 z \cos \varphi_0}{\lambda}\right)\right] \quad (3.10)$$

şeklindedir. Geçen dalga için ise

$$\exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi n_1 x \sin \varphi_1}{\lambda} - \frac{2\pi n_1 z \cos \varphi_1}{\lambda}\right)\right] \quad (3.11)$$

olur. λ , boşluktaki dalga boyudur. Sınırdaki gelen dalganın izi olarak koordinat eksenini $z = 0$ 'dır. x ve y yönündeki elektrik ve manyetik vektörlerin toplam bileşenleri

$$E_{0x} = (E_{0p}^+ + E_{0p}^-) \cos \varphi_0$$

$$E_{0y} = E_{0s}^+ + E_{0s}^- \quad (3.12)$$

$$E_{0y} = n_0 (-E_{0p}^+ + E_{0p}^-) \cos \varphi_0$$

$$E_{0y} = E_{0p}^+ - E_{0p}^-$$

alınır. Birinci ortam için

$$E_{1x} = E_{1p}^+ \cos \varphi_1$$

$$E_{1y} = E_{1s}^+ \quad (3.13)$$

$$H_{1x} = n_1 E_{1s}^+ \cos \varphi_1$$

$$H_{0y} = n_1 E_{1p}^+$$

yazılır. Geçen ve yansıyan dalgaların genlikleri, gelen dalga vektörüne sınır koşulları uygulanarak bulunur.

$$\frac{E_{0p}^-}{E_{0p}^+} = \frac{n_0 \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_0}{n_0 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_0} = r_{1p} \quad (3.14)$$

$$\frac{E_{1p}^+}{E_{0p}^+} = \frac{2n_0 \cos \varphi_0}{n_0 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_0} = r_{1p} \quad (3.15)$$

$$\frac{E_{0s}^-}{E_{0s}^+} = \frac{n_0 \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_0}{n_0 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_0} = r_{1s} \quad (3.16)$$

$$\frac{E_{1s}^+}{E_{0s}^+} = \frac{2n_0 \cdot \cos \varphi_0}{n_0 \cdot \cos \varphi_1 + n_1 \cdot \cos \varphi_0} = r_{1s} \quad (3.17)$$

r_{1p} ve r_{1s} Fresnel yansımaya katsayıları, t_{1p} ve t_{1s} Fresnel geçirme katsayılarıdır. Çok katlı tabakalar, bu katsayılar yardımıyla çözülür. (3.14)-(3.17) denklemlerinde $t_{1p}=1+r_{1p}$ ve $t_{1s}=1+r_{1s}$ dir. $n_0 > n_1$ durumunda ise t_{1p} ve t_{1s} birliğe geçer. Her ortamdaki enerji düşünüldüğünde, enerji korunumu için Poynting teoremi dikkate alınır. Poynting vektörü S ile gösterilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$S = \frac{c}{4\pi} [E \times H] \quad (3.18)$$

$$S = \frac{c}{4\pi} n \cdot [E]^2 \quad (3.19)$$

Burada soğurma olmadığı kırma indisi n olan bir ortamda yayılma düşünülmüştür (n yerine $|n|$ yerleştirilse (3.19) denklemi soğurma olan bir ortamdaki yayılmayı verebilir) (Bilgiç 2014;Heavens, 1991)

Yansımaya faktörü (Yansıyan ve gelen enerjilerin oranı olarak tanımlanır.)

$$R_p = \frac{(E_{0p}^-)^2}{(E_{0p}^+)^2} = r_{1p}^2 \quad R_s = \frac{(E_{0s}^-)^2}{(E_{0s}^+)^2} = r_{1s}^2 \quad (3.20)$$

Geçirme faktörü (Geçen ve gelen enerjilerin oranı olarak tanımlanır.)

$$T_p = \frac{n_1 (E_{1p}^+)^2}{n_0 (E_{0p}^+)^2} = \frac{n_1}{n_0} t_{1p}^2 \quad T_s = \frac{n_1 (E_{1s}^+)^2}{n_0 (E_{0s}^+)^2} = \frac{n_1}{n_0} t_{1s}^2 \quad (3.21)$$

ile verilir. İzotropik bir ortama normal olarak gelen ışın için kırma indisinin terimleri ile ifade edilen yansımaya ve geçirme katsayıları;

$$R_p = R_s = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (3.22)$$

$$T_p = T_s = \frac{4n_0n_1}{(n_0 + n_1)^2} \quad (3.23)$$

dır. Geçiş için Snell kanunlarını kullanarak Fresnel katsayılarını yazabiliriz. (Heavens, 1991)

$$r_{1p} = \frac{\tan(\varphi_1 - \varphi_0)}{\tan(\varphi_1 + \varphi_0)} \quad (3.24)$$

$$t_{1p} = \frac{2 \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_0}{\sin(\varphi_1 + \varphi_0) \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_0)} \quad (3.25)$$

$$r_{1s} = \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_0)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_0)} \quad (3.26)$$

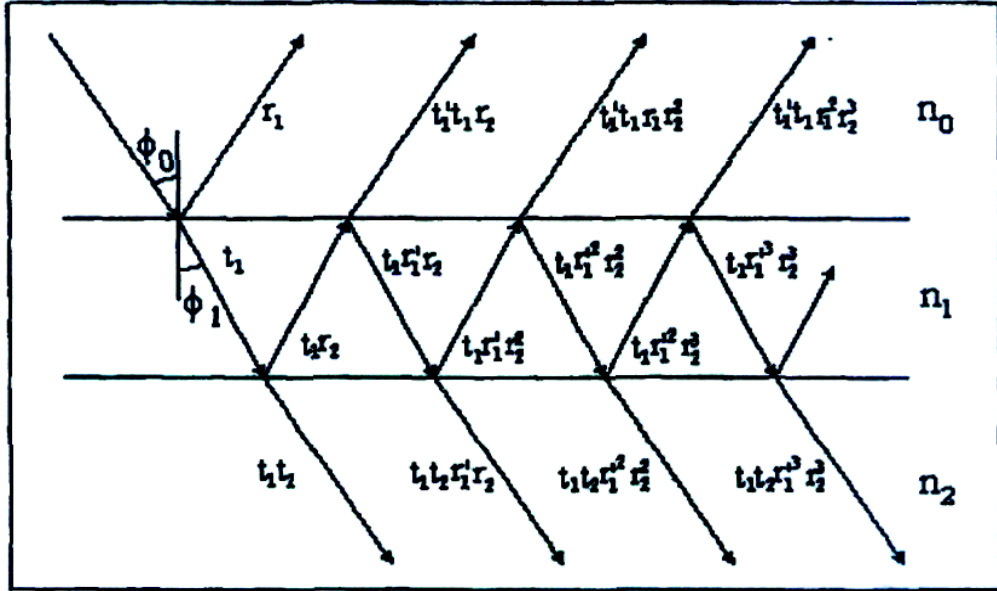
$$t_{1s} = \frac{2 \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_0}{\sin(\varphi_1 + \varphi_0)} \quad (3.27)$$

3.7.1. Tek bir filmde ışığın yansıması ve geçişi

Her seferinde ara yüzeye gelen ışın da böyle bir ayırmanın olması ile yansıyan ve gelen ışınlar, çoklu yansıyan ve çoklu geçen elementlerin toplamı ile elde edilir. Tek katlı durum için ve yalnız bu durum için toplama kolayca yapılabilir. Sonuçlar Fresnel katsayılarının uygun terimleri ile ifade edilir. Kırma indis n_2 olan taşıyıcı üzerinde kırma indisi n_1 , kalınlığı d olan film bulunur. Sisteme λ dalga boylu ve birim genlikli paralel ışık demeti düşsün. İlk ortamın kırma indisi n_0 ve ortama geliş açısı φ_0 olsun. (3.14-3.17) denklemlerinde verilen Fresnel katsayılarına dayanarak ard arda gelen yansıyan ve geçen ışın demetlerinin genlikleri yazılabilir. Bu katsayıların tanımından, verilen sınır için r ve t 'nin değerlerinin sınıra karşı ışığın yayılma doğrultusuna bağlı olduğu açıktır.

Kırma indisleri n_0 ve n_1 olan ortamların ara yüzüne normal geliş için Fresnel yansımaya katsayısı n_0 'dan gelen ışığın yansımaları için $\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$ alınır. Geçirmeye karşılık Fresnel katsayıları n_0 'dan n_1 'e, geçen yayılma için $\frac{2n_0}{n_0 + n_1}$ ve n_1 'den n_0 'a geçen yayılma için $\frac{2n_1}{n_0 + n_1}$ dır.

Tek katmanlı problemleri ele almak için (3.14-3.17) denklemlerinde verilen Fresnel katsayıları n_0 'dan n_1 'e geçişte r_1 ve t_1 n_1 'den n_0 'a geçiş için r_1 ve t_1 olarak yazılır.



Şekil 3.5. Bir filme gelen ışığın çoklu yansımaları ve geçişleri

Aşağıda verilen ifadeler, polarizasyonun her iki yönünde geçerli olacaktır (3.14-3.17) denklemlerinden uygun değerler r ve t 'ye verilir. Böylece ikinci indis (p ve s) dahil edilmeyecektir. Fresnel yansımaya katsayısı için ifadenin şeklinden r_1^1 'nin r_1 'e eşit olduğu görülür. n_0 ortamında yansıyan ardışık ışın demetlerinin genlikleri $r_1, t_1 r_2, -t_1 t_1 r_1 r_2^2, t_1 t_1 r_1^2 r_2^3 \dots$ ve geçen genlikleri. $T_1 t_2, -t_1 t_2 r_1 r_2, t_1 t_2 r_1^2 r_2^2 \dots$ ile verilir. Filmin bir yanından öbür yana geçen ışığın faz değişimi δ_1

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_1 d_1 \cos \varphi_1 \quad (3.36)$$

yansıyan genlik,

$$r_1, t_1, t_2, r_2 e^{-2i\delta_1} - t_1 t_1' r_1 r_2^2 e^{-2i\delta_1} + \dots = \frac{r_1 + t_1 t_1' r_2 e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad (3.37)$$

ile verilir.

Zamana bağımlı terim ihmal edilir. Absorblayıcı olmayan ortamlar için Fresnel geçirme katsayıları r_1 ve t_1 ile ilgili olarak daha kolay yazılabilir. Enerji korunumundan (Denklem (3.14-3.17))

$$t_1 t_1' = 1 - r_1^2 \quad (3.38)$$

Böylece (3.37) denklemi

$$R = \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad (3.39)$$

olur. Geçen genlik

$$T = t_1 t_2 e^{-i\delta_1} - t_1 t_2 r_1 r_2 e^{-3i\delta_1} + t_1 t_2 r_1^2 r_2^2 e^{-5i\delta_1} + \dots = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad (3.40)$$

ile verilir. (3.39) ve (3.40) denklemleri genellikle geçerlidir. Normal olmayan geliş için iki olası durum vardır bu da gelen ışığın polarizasyon durumuna bağlıdır.

Polarize ışığın geliş düzlemine paralel elektrik vektörü için (3.14) ve (3.15) denklemlerinin uygun ifadelerinden r_1 , r_2 , t_1 ve t_2 'nin yerine konulmasıyla yansıyan ve geçen genlikler elde edilir. Polarize ışığın geliş düzlemine dik elektrik vektörü için Fresnel katsayıları (3.16) ve (3.17)'de verildiği gibi kullanılır. Eğer film soğurucu ise veya soğurucu ortamlarla sınırlıysa, n_0 , n_1 , n_2 'nin değerlerine uygun

kompleks nicelikler yerleştirilir. Bu koşullarda Fresnel katsayıları da kompleks olur. R ve T'nin değerleri hesaplanabilir ancak ifadeler karışıktır. Bu ifadelerde, filmi sınırlayan ortamlardaki dalgaların genliklerinin ve ışık demetlerinin uygun enerjilerinin verildiği hatırlanmalıdır (Heavens,1991).

$$n_0 RR^* = \frac{n_0(r_1^2 + 2r_1r_2 \cos(2\delta_1) + r_2^2)}{1 + 2r_1r_2 \cos(2\delta_1) + r_1^2r_2^2} \quad (3.41)$$

$$n_0 TT^* = \frac{n_2 t_1^2 t_2^2}{1 + 2r_1r_2 \cos(2\delta_1) + r_1^2r_2^2} \quad (3.42)$$

Birinci ortamda birim genlikli bir dalga (enerjisi birim değil) düşünüldüğünde yansıma ve geçirgenlik

$$R = \frac{r_1^2 + 2r_1r_2 \cos(2\delta_1) + r_2^2}{1 + 2r_1r_2 \cos(2\delta_1) + r_1^2r_2^2} \quad (3.43)$$

$$T = \frac{n_2}{n_0} \cdot \frac{t_1^2 t_2^2}{1 + 2r_1r_2 \cos(2\delta_1) + r_1^2r_2^2} \quad (3.44)$$

ile verilir.

Normal geliş durumu için yansıyan ve geçen ışınların genlikleri için ifadelerin şekli kırma indisi ile ifade edildiğinde bile oldukça sıktır. (3.14)-(3.17) denklemlerinden Fresnel katsayılarının

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad t_1 = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} \quad (3.45)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_1}{n_1 + n_1} \quad t_2 = \frac{2n_1}{n_1 + n_1} \quad (3.46)$$

denklemlerine indirgenildiği görülür. Böylece (3.39) ve (3.40) denklemlerinden

$$R = \frac{(n_0 - n_1)(n_1 + n_2) + (n_0 + n_1)(n_1 - n_2)e^{-i\delta_1}}{(n_0 + n_1)(n_1 + n_2)e^{i\delta_1} + (n_0 - n_1)(n_1 - n_2)e^{-i\delta_1}} \quad (3.47)$$

$$T = \frac{4n_0n_1}{(n_0 + n_1)(n_1 + n_2)e^{i\delta_1} + (n_0 - n_1)(n_1 - n_2)e^{-i\delta_1}} \quad (3.48)$$

olur. Yansıtma ve geçirgenlik

$$R = \frac{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2)4n_0n_1^2n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2)\cos(2\delta_1)}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2)4n_0n_1^2n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2)\cos(2\delta_1)} \quad (3.49)$$

ile verilir.

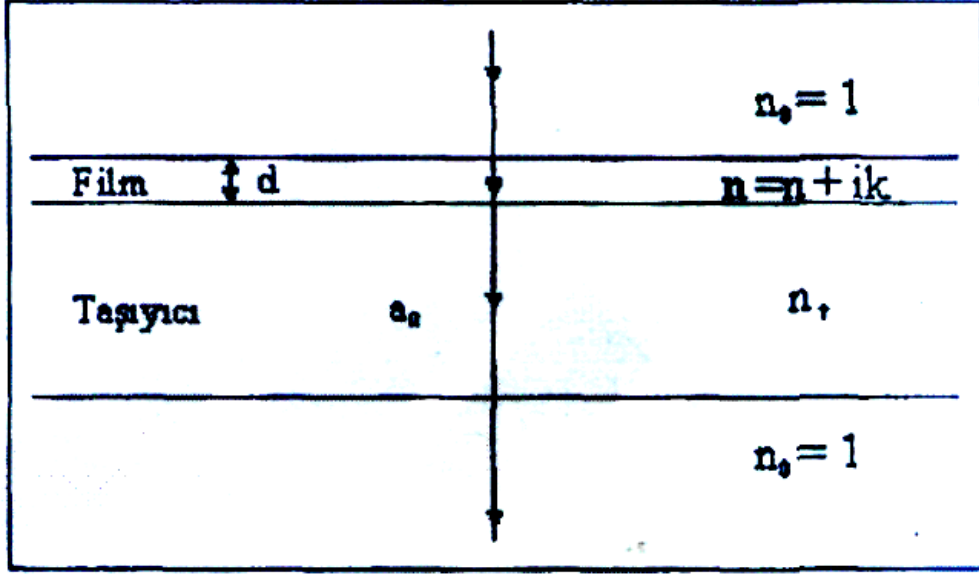
Soğurucu olmayan ortamlar için bu ifadeler kolayca hazırlanır. Eğer film veya sınırlanan ortamlar soğurucu olursa n_0 , n_1 , n_2 'nin değerleri kompleks $n = n - ik$ ile yerine konur. İfadelerin sonuçlarını açıkça yazmak kullanışsızdır. Ardışık adımların değerlendirilmesi daha iyidir (Heavens, 1991; Bilgiç 2014).

3.7.2. Optik Sabitler

İnce filmlerin optik sabitlerinin hesaplanması için yoğun çalışmalar yapılmış ve farklı yöntemler kullanılmıştır. Bazı yöntemler filmlerin hem optik geçirgenlik, hem de yansıtma spektrumlarının ölçülmesi esasına dayanırken, bazıları filmin her iki yüzünden geçirgenlik ve yansıtma ölçülmesine ya da geçirgenlikle birlikte değişik açılarda yansıtmanın ölçülmesi esasına dayanır.

Optik sabitlerin ölçülmesi ile ilgili yöntemler vardır. Bu yöntemler optik geçirgenliğin ölçülmesine dayanır. İnterferans gösteren filmlerde optik geçirgenlik spektrumlarından yararlanılarak indis ve absorpsiyon katsayısının spektral değişimi ile filmin kalınlığı hesaplanabilir. Hazırlanan filmler kalınlık bakımından çok düzgün olabildiği gibi genelde homojen kalınlıkta olmayabilir.

Saydam ince filmlerin kalınlık hesaplanmasında oldukça yaygın olarak kullanılan yöntemler, geçirgenlik ölçümüne dayanır. Şekil 3.8'de, şeffaf bir alt tabaka üzerine (çoğu zaman cam) kaplı soğurucu bir ince film sistemi görülmektedir (Bilgiç 2014).



Şekil 3.6. Taşıyıcı üzerine kaplı ince film sistemi

Burada;

d: Taşıyıcı üzerine kaplanan filmin kalınlığı

k: filmin söndürme katsayısı

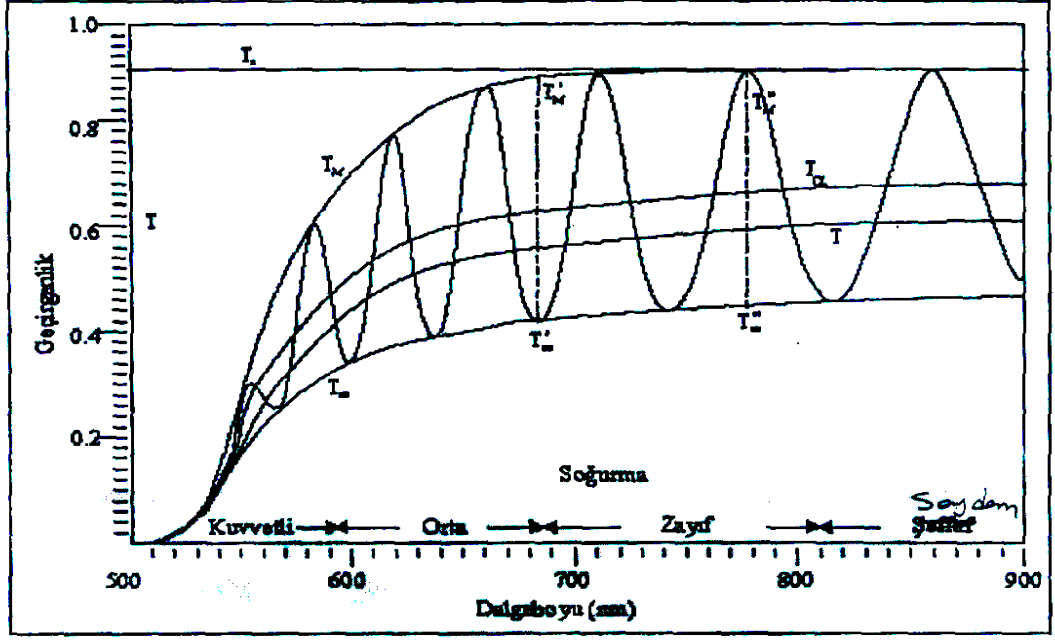
n: Filmin kırılan insisi

$n=n-ik$: Filmin kompleks kırılma indisi

olarak ifade edilir. Filmin söndürme katsayısı, λ dalga boyu ve α soğurma katsayısı cinsinden

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (3.50)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece söndürme katsayısı, soğurma katsayısı cinsinden tarif edilebilir. Saydam alt tabakanın kalınlığı film kalınlığından çok büyük, kırılma indisi s , soğurma katsayısı $\alpha=0$ olup, sistemi çevreleyen havarim kırılma indisi $n_0=1$ alınmıştır. Geçirgenlik spektrumu, film üzerine gönderilen ışığın frekansını değişimiyle elde edilir (Bilgiç, 2014).



Şekil 3.7. Geçirgenliğin dalga boyuna göre değişimi grafiği

Burada film kalınlığı d düzgün değil ise, girişim etkilerinin tümü yok olur ve geçirgenlik eğrisi düzgün bir eğri haline gelir. Geçirgenliğin dalga boyuna göre değişimi grafiği, soğurmanın şiddeti bakımından 4 ana bölgeye ayrılabilir. Saydam (geçirgen) bölgede soğurma katsayısı $\alpha=0$ olup, geçirgenlik çoklu yansımalarla n ve s sabitlerinden belirlenir. Zayıf soğurma bölgesinde α küçüktür ve geçirgenlik azalmaya başlar. Orta soğurma bölgesinde α büyüktür ve geçirgenliğin azalmasının ana sebebidir. Kuvvetli soğurma bölgesinde geçirgenlik, orta derecede soğurma bölgesindeki geçirgenliğe oranla 5-10 kat daha küçüktür. Geçirgenlik, tamamı ile α 'nın etkisinde şiddetli bir şekilde azalmaktadır. Eğer film kalınlığı d düzgün ise, girişim etkilerinin meydana getirdiği desenler belirginleşir. Geçirgenlik eğrisindeki bu maksimum ve minimumlar, filmin optik sabitlerini hesaplamak için kullanılırlar. Üzerinde film olmayan kalın bir taşıyıcı tabaka düşünülürse, s taşıyıcının kırma indisi olmak üzere girişimin olmadığı bir geçirgenlik

$$T_s = \frac{2s}{s^2 + 1} \quad (3.51)$$

şeklinde verilir. Burada kırma indisi s

$$s = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (3.52)$$

olacaktır. Girişimin maksimum ve minimumları için temel eşitlik bilindiği üzere

$$2nd = m\lambda \quad (3.53)$$

olup burada m, maksimumlar için tamsayı, minimumlar için yarım tamsayıdır. Bu eşitlik, kırma indisi ve kalınlık hakkında bilgi saklamakla birlikte n ve d'yi ayrı ayrı belirlemek imkânsızdır. T geçirgenliği, sözü edilen parametrelerin fonksiyonudur.

$$T = T(\lambda, s, n, d, \alpha) \quad (3.54)$$

Alt tabakanın kırma indisi s bilirse $n(\lambda)$ ve $x(\lambda)$ ($x = e^{-\alpha d}$) dalga boyunun fonksiyonları olmak üzere $T = T(n, \lambda)$ şeklinde yazılabilir. n=n-ik ifadesinde k=0 alınarak spektrumun her yerinde geçerli bir geçirgenlik bağıntısı

$$T = \frac{Ax}{B - Cx \cos \phi + Dx^2} \quad (3.55)$$

şeklinde verilebilir.

Burada A, B, C, D katsayıları ile ϕ açısı

$$A = 16n^2 s$$

$$B = (n+1)^3 (n+s^2)$$

$$C = 2(n^2+1)(n^2-s^2)$$

$$D = (n+1)^3 (n-s^2) \quad (3.56)$$

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda}$$

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi}$$

eşitlikleri ile belirlenir. Geçirgenlik grafiğindeki maksimum ve minimumlar

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2}, \quad T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2} \quad (3.57)$$

bağıntıları ile verilirler. Böylece artık T_M ve T_m ler λ 'ya bağımlı sürekli fonksiyonlar haline dönüşmüş olur. Herhangi bir dalga boyundaki bir T_M değerine karşılık gelen bir T_m değeri mutlaka vardır. Aynı şekilde her T_m değerine karşı gelen bir T_M değeri de mutlaka vardır (Bilgiç, 02014)

3.8. İnce Filmlerde Elektriksel Özellikler

Son yıllarda çeşitli uygulamalarda, ince filmlerin elektriksel özellikleri üzerinde önemle durulmuş ve bu özellikleri teorileri açıdan da ilgi uyandırmıştır. Yığın malzemenin iletkenlik davranışı hakkındaki bilgiler, ince filmlerin davranışlarının anlaşılması açısından önemlidir. Malzemenin fiziksel durumundan, ait olduğu malzeme sınıfından bağımsız olarak yığın veya film halinde olması durumunda, uygulanan elektrik alan ε sonucu, (V/cm) q yüküne sahip bir taşıyıcı konsantrasyonu (taşıyıcı sayısı/cm³) v (cm/sn.) hızı ile referans bir düzlemi geçtiğinde bir akım yoğunluğu J (amp/cm²) oluşmaktadır. Akımın büyüklüğü, n taşıyıcı konsantrasyonu

$$J = nqv$$

ile gösterilmektedir. Özellikle düşük elektrik alan uygulanması durumunda, birçok malzeme için taşıyıcı hızı ε ile doğru orantılıdır ve bunun sonucunda

$$v = \mu\varepsilon$$

olmaktadır. Doğru oran sabiti veya birim alandaki hız mobilite μ olarak bilinmektedir. Bu yüzden

$$J = nq\mu\varepsilon$$

dir ve Ohm Kanunu'na göre ($J = \sigma \epsilon$) iletkenlik σ veya direncin karşıtı ρ ile ifade edilmektedir. Elektriksel iletkenliğe ilişkin kantitatif teoriler bu denklemlerde verilen malzeme sabitlerinin, büyüklüğünü ve özelliklerini belirlemede kullanılmaktadırlar. n ve ν veya μ' nn sıcaklık, kompozisyon, yapı hataları ve elektriksel alana göre değişimi büyük önem taşımaktadır (olak,2002).

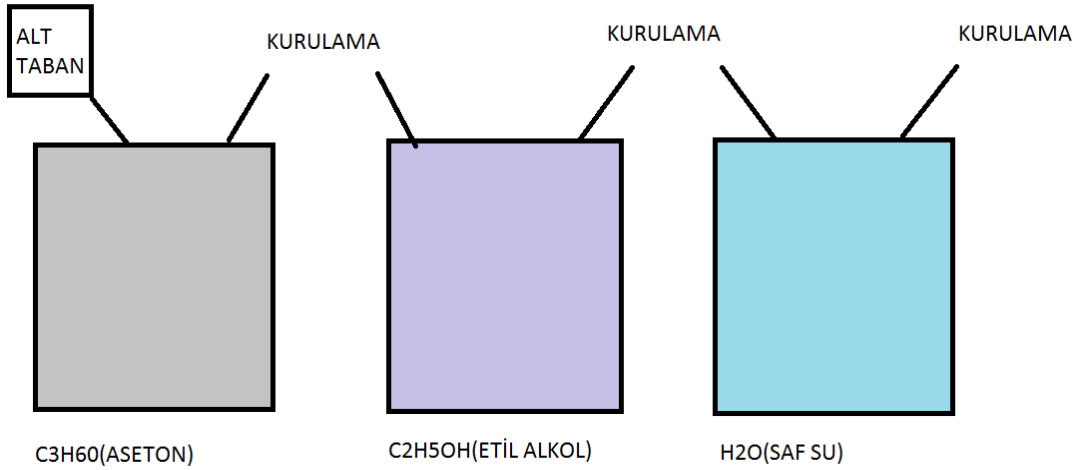


4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde alt taban olarak kullanılan camlar nasıl camlar üzerine depolanan ITO (İndiyum kalay oksit %90 oranında açık yaz In_2O_3 ve %10) ince filmler oluşturulmuştur. İnce filmler farklı çalışma şartları altında üretilerek optimum özellikler belirlenmiştir. Oluşturulan ince filmlerin optik özellikleri, kristal özellikleri, iletkenlikleri gibi karakterizasyonları incelenmiştir.

4.1. Alt Tabanların Hazırlanması ve Temizlenmesi

Alt taban olarak kullanılacak olan cam malzemelerin temizliği ve fiziksel düzgünlüğü film kalitesi ve kristalleşmesi üzerinde çok büyük öneme sahip olduğu için ince film oluşumu öncesi alt taban camların temizliği üzerinde durulmuştur. Temizlik aşamasından önce camların kaplama sistemine ve istenilen boyuta uygun şekilde (2x2 cm) boyutunda kesilip hazırlanmıştır. Hazırlanan camlar aşağıdaki üç aşamada temizlik gerçekleştirilmiştir.

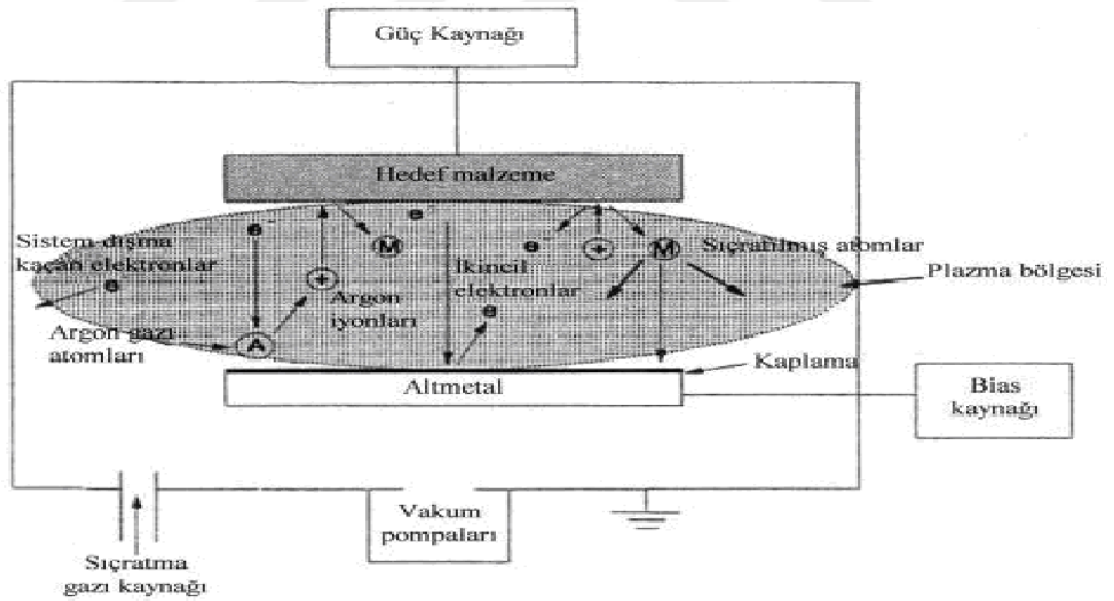


Şekil 4.1. Cam alt tabanların temizleme işlemi

1. Öncelikle küçük cam bir kaba doldurulmuş aseton içerisine yerleştirilmiş cam altlıklar ultra sound aleti içerisine yerleştirilmiş belirli aralıklara altlıkların yüzeyleri ters çevrilmiş ve 8-10 dk aseton içerisinde temizlenen cam altlıklar kurutulmaya bırakılmıştır.

2. Daha sonra tekrar aynı küçük cam içerisine etil alkol yerleştirilmiştir ve cam kap içerisinde su bulunan ultra sound aletinin içinde titreşime bırakılmıştır. Böylece cam altlıklar sadece etil alkol içerisinde bırakılmamış aynı zamanda cihazın titreşimi sayesinde daha iyi temizlenmesi gerçekleştirilmiştir ve kurumaya bırakılmıştır.
3. En son yukarıdaki işlemler saf su içerisinde gerçekleştirilerek alt camlıklar üzerinde leke oluşumunu önlemiş olduk ve bütün camları temiz bir ortamda kurutulmaya bırakıldı.

Magnetik alanda sıçratma yöntemi; katı bir yüzeyden atomları iyon bombardımanı ile fiziksel olarak sökölüp kopartılarak, malzemenin buhar faza geçtikten sonra istenilen alt taban üzerinde biriktirilmesiyle ince film oluşturulmasını sağlayan çok modern ve verimli bir yöntemdir. Sıçratma yöntemi modern ve verimli olmasının yanında yavaş bir depolama sistemi olduğu için zaman kaybına sebep verse de surecin yavaş işlemesi sisteme müdahale edilebilir olmasına olanak sağladığı için kaliteli ürünler elde edilebilen, birçok çeşit malzeme kaplanabilen bir sistemdir.



Şekil 4.2. Sıçratma sistemi

Sıçratma yöntemi sistemi genel olarak vakum edilecek kazan (kaplamanın gerçekleşeceği ortam) kazan içinde hedef malzemeyi ve kaplama yapacağımız alt tabanı sabitleyeceğimiz iki nokta ve bu iki nokta arasındaki mesafeyi yapacağımız kaplamaya göre ayarlayabileceğimiz araç ve gerekirse alt taban sıcaklığını

yükseltebileceğimiz ısıtıcı bulunmaktadır. Kazan dışında kazan içini vakumlayacağımız turbo motorlar, istediğimiz kaplamayı yapacağımız kaplamaya göre kullanacağımız inert gaz tankları, gerilim sağlayacağımız güç kaynağından oluşmaktadır.

Magnetron sıçratma yöntemi gelişmişliğinin yanında kaplama esnasında birden çok olayın aynı anda gerçekleştiğinden dolayı ince film kalitesini arttırmak için bütün bu olayların akışını belirleyen parametreler üzerinde dikkatlice durulmalıdır.

4.2. Sıçratma Sistemindeki İnce Film Üzerinde Etkisi Olan Parametreler

Cam altlıkların fiziksel özellikleri (temizliği ve pürüzsüzlüğü); kristalleşme ve kaplamanın alt tabana tutunması açısından büyük öneme sahiptir. Ayrıca başlangıç gaz basıncının ayarlanması da büyük öneme sahiptir. Başlangıç gaz basıncı sistem içine altlıklar ve target (sıçratılacak olan hedef malzeme) yerleştirilip vakumlamaya hazır hale geldikten sonara turbo motorlar yardımıyla içerisinde istenilen değere kadar mümkün olduğunca indirilmesi gerekir.

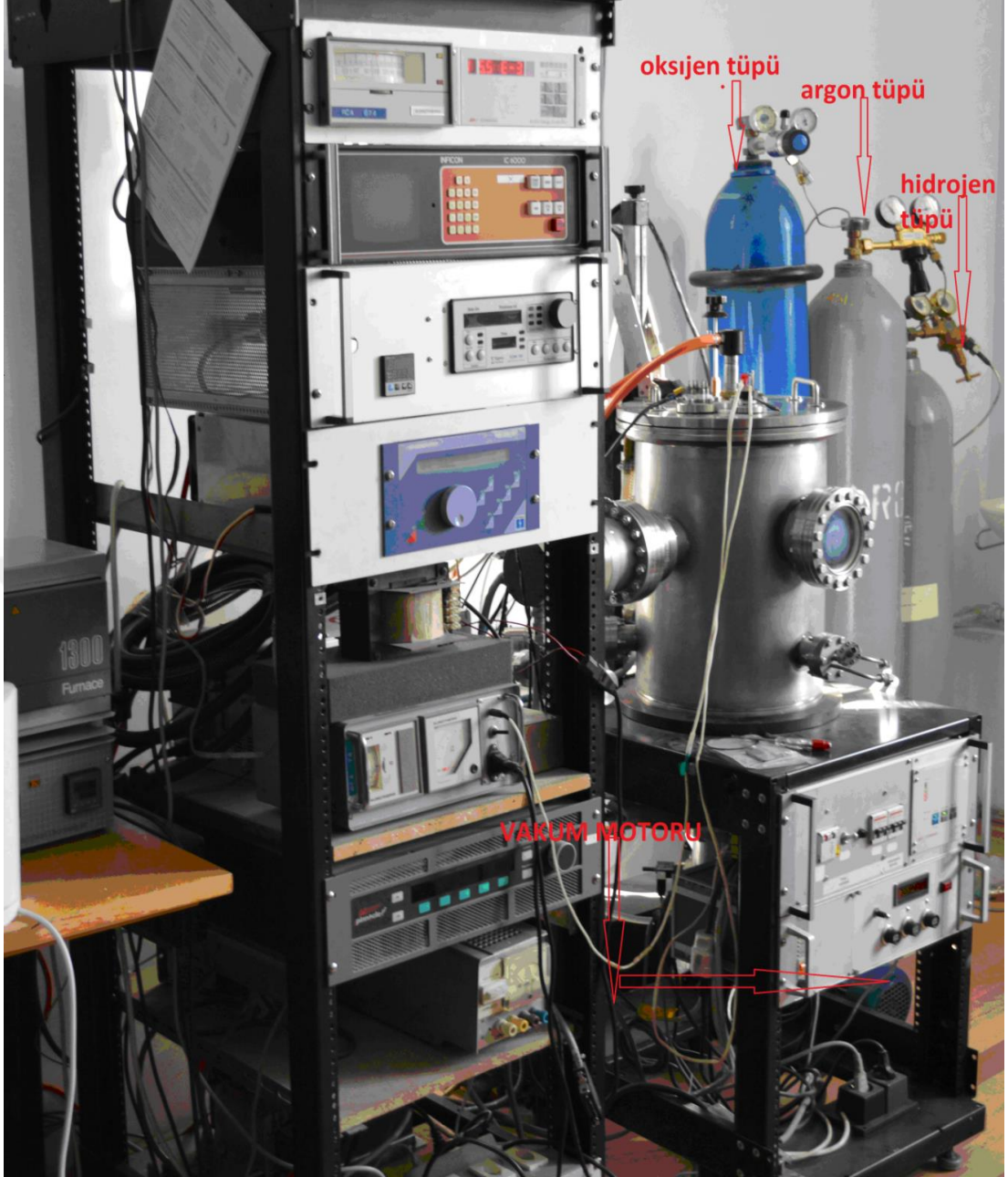
Her sistem istenilen başlangıç basıncına kadar vakumlama yapamamaktadır bu da sistemin gelişmişliğine ve donanımına bağlıdır. Fakat başlangıç basıncının mümkün olan en düşük değere kadar indirilmesi ince film kaplama esnasında içeride kalan havadaki gaz moleküllerinin inert gaz (hedef malzemedeki çarpışma esnasında molekül söktürecek olan gaz) molekülleriyle çarpışıp enerjilerini düşürmek yada artırmak gibi teorik olarak hesapta olmayan olayların gerçekleşme olasılığını azalttığı için istenilen değerde bir film elde edilmesi açısından çok önemlidir.

Inert gaz yoğunluğunun değerinin iyi belirlenmesi veya yapılan deneme ve deneylerle elde etmek istediğimiz film için en uygun değerlerin iyi saptanması da çok önemlidir çünkü inert gazın çok yoğun olması aşırı derecede kopartılan hedef malzeme moleküllerinin alt taban üzerinde aşırı yığılması hem homojen olmayan hem de istenilen ya da en iyi kalınlık değerinden ya çok fazla ya da çok az olmasıyla hem saydamlığı hem de iletkenliği doğrudan etkileyeceği için dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir husustur.

Kaplama zamanı; ince film oluşumunun aktif olarak gerçekleştiği bölümdür bu zaman dilimine paralel olarak ince film tabakasının kalınlığı artacak ya da azalacaktır. Film tabakasının kalın yada ince olması ise saydamlığını ve iletkenliğini etkileyecektir.

Alt camlar ve hedef malzeme arasındaki mesafe; Bu mesafe hedef malzemedeki kopartılan moleküllerin alttabanlar üzerine gelince sahip oldukları enerji üzerinde etkisi olacağı için bu parametrede oluşan film üzerinde karakteristik bir rol oynamaktadır. Kaplama esnasında sistem içerisindeki oksijen miktarı; Ortam içinde yeterli oksijen olmaması iletkenliği doğrudan etkilemektedir.

Uygulanan elektriksel güçte uygulanan gerilim farkı da çok yada az olması homojenliği ve kaplama hızını ve kalınlığını etkilemektedir ayrıca aşırı uygulanan gerilim target malzemenin bozulmasına (kırılıp dökülmesine) sebep olabilmektedir. Alt taban sıcaklığı; Sıcaklıkla doğru orantılı olarak elde edilen ince filmin elektriksel iletkenliği belli bir noktaya kadar doğru oranda artmaktadır fakat aşırı ısıtma alt tabanın cinsine bağlı olarak değişimlere buda filmin kalitesini değişime uğratmaktadır.



Şekil 4.3. Kullanılan düzenek

Yukardaki resim tez çalışmalarını yaptığımız bütün deneyleri gerçekleştirdiğimiz magnetron sputtering düzeneğini göstermektedir. Yukarıdaki sıçratma sisteminin çalışmasını açıkladığımız bölüm ve resim sıçratma yöntemiyle parametrelere ve dolayısı ile ince film kaplamaların karakterine nasıl müdahale edebileceğimizi göstermektedir. Aşağıdaki tabloda adım adım en iyi sonuca ulaşmak için izlediğimiz yolun matematiksel anlatımını içermektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmamızda alt taban temizleme, alt tabanların yerleştirilmesi, vakumlama adımları sıra ile yapıldıktan sonra ince filmler üretilmiştir. Bu çalışmamızda yedi ayrı deney düzeneği kurulmuştur. Sistem hedef malzeme ve kaplanacak malzeme arasında uzaklık 6cm ile sabit olduğundan bu değer değiştirilememiştir. Bu deneyde amacımız iletkenliği literatürlerle uyumlu olması ve direnç değerlerini minimum tutmayı amaçladığımız için direnci etkileyen parametreler sürekli değiştirilerek direnç ölçümleri alınmış ve en iyi sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.

5.1.Deney Düzeneğinin Hazırlanması ve İnce Filmlerin Oluşturulması

İlk olarak yukarıda gördüğümüz deney kazanının bir önceki deneyden kalan kaplama esnasında kazanın farklı bölgelerine yapışmış sıçratılan malzemenin zımpara yardımıyla temizlenmesi işlemi sağlanmıştır. Daha sonra alt tabanları yerleştireceğimiz bölmeye üç adet aynı boyutta aynı özellikte alt taban camlarımızı yerleştirilmiştir. Fırınlama yöntemiyle elde edilen ince filmlerin kalitesini arttırmak ve sonuçları kıyaslamak amacıyla sisteme üç tane farklı alt taban yerleştirilerek karşılaştırma yapılmış ve en iyi olan sonuç değerlendirilmiştir.

Alt tabanları yerleştirdikten sonra deney kazanını doğru bir şekilde kapatıp hava sızıntısı olmadığından emin olduktan sonra vakumlama işlemine başlatılmıştır. Vakumlama işlemi 3-4 saat sürdükten sonra istenilen basınçları elde edilmiştir. Elde edilen uygun vakumlanmış deney düzeneği alt taban ısıtılması gerekiyorsa alt taban istenilen sıcaklığa getirilip ve inert gaz salınımı yapıldıktan sonra sıçratma işlemi yapılmıştır.

Sıçratma işlemi inert gaz salımının başlamasından sonra yukarıdaki sıçratma sisteminin çalışma prensibinden bahsettiğimiz gibi, alt taban yani kullandığımız ITO hedef malzemeler üzerine belirli bir enerji ile düşer ve alt tabana enerji bırakır bırakılan enerji hedef malzemedeki elektron koparır ve bu kopan elektronun bir sonraki adresi alt camlıklar olacaktır böylelikle orda elektron birikimiyle ince bir tabaka oluşacaktır. İşte bu tabakanın özelliği bizim elde ettiğimiz ince filmlerin özelliğini yansıtmaktadır. Yani kaplama süresinin uzun olması tabakanın kalınlığını, sıcaklığı yapısını, hedef malzeme ile yakınlığı koparılan elektronun kazandığı

enerjiyi, ortamdaki oksijen yoğunluğu yine yapısını etkileyecek olan deneye göre değişen parametreler olmaktadır.

Bu çalışmamız boyunca uygulanan bütün parametrelerin sonuçları Tablo 5.1’de göstermektedir.

Tablo 5.1. Deneyde Kullanılan Parametreler ve Sonuçları

Deney düzeneği.	Dc Power (w)	Kaplama sıcaklığı	Mesafe (cm) Hedef-cam	Kaplama Süresi(dk)	Kaplama Sırasındaki Basınç(mb)	Arg Secm	Ox Secm	direnc	Kalınlık (nm)
Deney 1	70	Oda sıcaklığı	6	30	2.8x10(-2)	5	0	1.1=12.2kohm 1.2=2.550kohm 1.3=1.800kohm	-
Deney 2	100	200	6	60	3x10(-3)	5	0.5	2.1=2.33 kohm 2.2=1.6kohm 2.3=1.7 kohm	-
Deney 3	300	Oda sıcaklığı	6	3	7x10(-3)	28	1	3.1=62ohm 3.2=86>75 3.3=165>145	-
Deney 4	150	250	6	6	7x10(-3)	28	1	4.1=11 0hm 4.2=10-10 ohm 4.3=10-10 ohm	465-475
5	150	200	6	6	7x10(-3)	28	1	15ohm	465-475
6	150	150	6	6	7x10(-3)	28	1	50 ohm	465-475
7	150	200	6	4	7x10(-3)	28	1	30 ohm	300-310

Tablo 5.1’de verilen ve deney 1 düzeneğindeki parametreler kullanılarak oda sıcaklığında (1:1) ince filmleri elde edilmiştir. Elde edilen ince filmin direnci 12.2 kohm olarak ölçülmüştür. Daha sonra bu düzende üretilen (1:2) numaralı ince film 1 saat boyunca 200 °C’de fırınlanmış ve elektrik direnci 2.550 kohm olarak ölçülmüştür. (1:3) numaralı ince film ise yine aynı deney düzeneğinde üretilerek 2 saat boyunca 200 °C’de fırınlanmış ve elektrik direnci 1.800 kohm olarak ölçülmüştür.

Yine Tablo 5.1’de deney 2 olarak verilen sistem kullanılarak ince filmler oda sıcaklığında elde edilen ince filmler (2:1), bir saat 200 °C’de fırınlanarak elde edilen

ince filmler (2:2) ve 200 °C'de 2 saat boyunca fırınlanmış ince filmler elde edilmiştir. Tablodaki verilerden de anlaşılacağı gibi sırasıyla (2.1) numaralı ince filmin direnci 2.33 kohm, (2:2) numaralı ince filmin direnci 1.6 kohm ve (2:3) numaralı ince filmin direnci ise 1.7 kohm olarak ölçülmüştür.

Üçüncü deney düzeneğinde kurulan sistemde elde edilen sonuçlar ise yine Tablo 5.1 de görülmektedir. Burada da (3:1), (3:2), (3:3) örnekleri sırasıyla oda sıcaklığında bir saat 200 derecede ve 2 saat 200 derecede bekletilerek elde edilen ince filmlerdir. Tablodan görüleceği gibi oda sıcaklığında üretilen ince filmin direncinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Düzenek dördte elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında ise 200 derecede 2 saat boyunca fırınlanarak elde edilen ince filmlerin elektrik direncinin daha düşük olduğu görülmüştür. Bu da bizim istediğimiz sonuçlardan birisidir.

Kısaca magnetron DC sisteminde ince film kaplama deneyini gerçekleştirirken tecrübe ettiğimiz farklı parametreler ve verdiği sonuçlar yukarıdaki Tablo 1 de deney sürecinin başlangıcından ulaştığımız son noktaya kadar aşama aşama göstermektedir.

Şimdi bu aşamaları ve elde ettiğimiz sonuçları ele alalım;

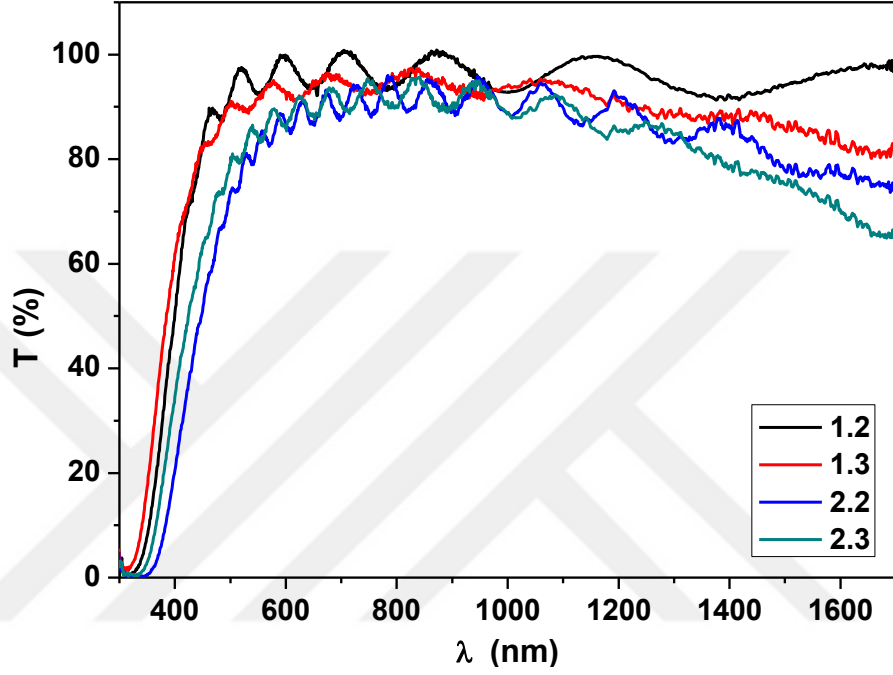
Düzenek 1 diye adlandırdığımız birinci deney düzeneğinde parametreler tamamen hiçbir referansa bağlı olmadan denediğimiz değerler olmaktadır. Fakat tabloda gördüğümüz üzere bizim için çok önemli olan iletkenlik değerlerinin yeterince yüksek olmaması dolayısı ile ilk önce 200 C de 1 saat ve 2 saatlik fırınlama yaptık ve fırınlamanın iletkenliğe olan etkisini her bir saatlik fırınlamada iletkenliğin arttığını tespit ettik daha sonrada Tablodaki Deney 2 diye adlandırılan deneyde bir parametre de değişiklik yapıp etkisini görmektense iletkenliği arttıracak kaplama sıskalığının artırılması, kaplama zamanının artırılması, kaplama için kullanılan potansiyel gücün artırılması ve 1. deneyde kullanılmayan oksijenin ortama salınımı gibi parametreler üzerinde değişiklik yapıp elde edilen ince filmlerin iletkenliklerinin arttığını saptadık. Deney düzeneği 2 de parametrik değişikliklerin farkını bariz bir şekilde gördük ve 1. Deneyde tecrübe ettiğimiz fırınlama yönteminin etkisini kullanmak için yine aynı şekilde 2. deney örneklerini de fırınlamaya tabi tuttuk ve

iletkenliğin tekrar yükseldiğini gördük. Fakat elde edilen direncin halan kohm değerlerinde olduğu için 3. deney düzeneğinde tekrar iletkenliği etkileyebilecek olan argon inert gazının, potansiyel gücün ve oksijen gazının değerlerini tabloda gözüktüğü gibi yükseltip, kaplama zamanını 3 dakikaya indirdik. Burada kaplama zamanının 3 dakikaya indirilmesi ince filmler için önemli olan ışık geçirgenliğini arttırmak için yapılmış bir değişikliktir. 3 deney düzeneğindeki ince film kaplamanın elektrik direncinin kohm değerlerinden ohm değerlerine azalması yani iletkenliğin artması pozitif bir gelişme olsa da deneyde kullandığımız yüksek potansiyel enerji gücün (300w) den dolayı yapabildiğimiz tek ölçüm yüzeysel elektrik iletkenliği olmuştur. Çünkü kaplama sonrası temizleme aşamasında kaplanan moleküllerin yüzeyden ayrıldığı görülmüştür.

Yaptığımız denemelerden sonra elde olan mevcut şartlar doğrultusunda bizim için en uygun olabileceğini düşündüğümüz parametreleri 4. deneyde tablo 1 de de deney 4 diye adlandırdığımız deney düzeneğinde denedik ve alınan iletkenlik ve daha sonraki bölümlerde grafiklerle de anlatacağımız geçirgenlik değerlerinin daha önceki yaptığımız deneylerde aldığımız sonuçlardan çok daha iyi olduğunu, elektrik direncinin 10-11 ohm gibi bir değere düştüğünü tespit ettik. Daha sonraki adım olan 5. deney düzeneğinde de bütün parametreleri sabit tutup bir önceki deneyde 250 °C olan kaplama sıcaklığını 200 °C'ye düşürdük ve elde ettiğimiz ince filmlerin iletkenlik değerlerinin 10- 11 ohm dan 15 ohm a çıktığı gözlemlenmiştir. Daha sonraki adım olan 6. deney düzeneğinde yine aynı şekilde sadece kaplama sıcaklığında bir değişiklik yapıp 200 °C olan kaplama sıcaklığını 150 ye düşürüp kaplama esnasındaki ortam sıcaklığının elde edilen ince filmler üzerindeki etkisini daha net görmekteyiz. Son deneyimiz olan 7. deneyde ise en iyi elektrik iletkenliği değerini aldığımız 4. deney parametrelerinden sadece kaplama zamanını 6 dakikadan 4 dakikaya düşürüp daha ince bir kaplama tabakasıyla daha geçirgen bir ince film oluşturmaya çalıştık.

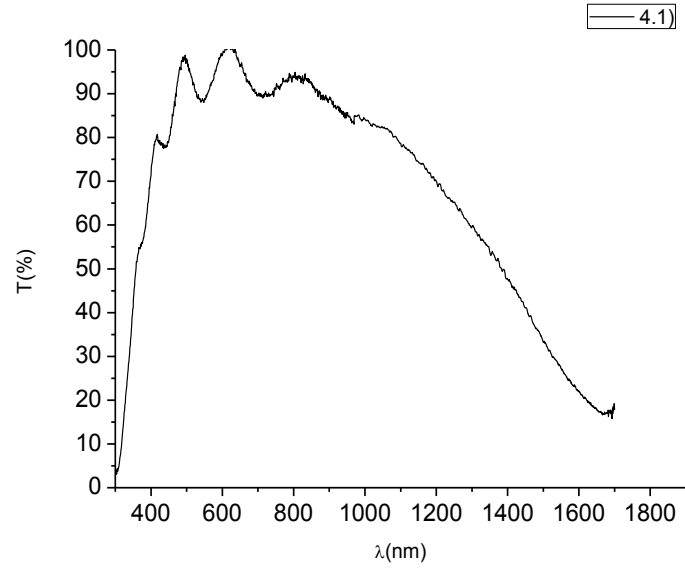
5.5.6.İnce Filmlerin Optiksel Özellikleri

Yaptığımız deneylerin temel amaçlarından bir tanesi de elde edilen ITO ince filmlerin optiksel özelliklerini saptamaktır. İnce filmlerin kullanılabilirliği ve kalitesi açısından büyük öneme sahip olan optiksel özelliği tez çalışmamızın daha önceki bölümlerinde bahsettiğimiz ve açıkladığımız UV-VIS cihazıyla saptanmıştır.



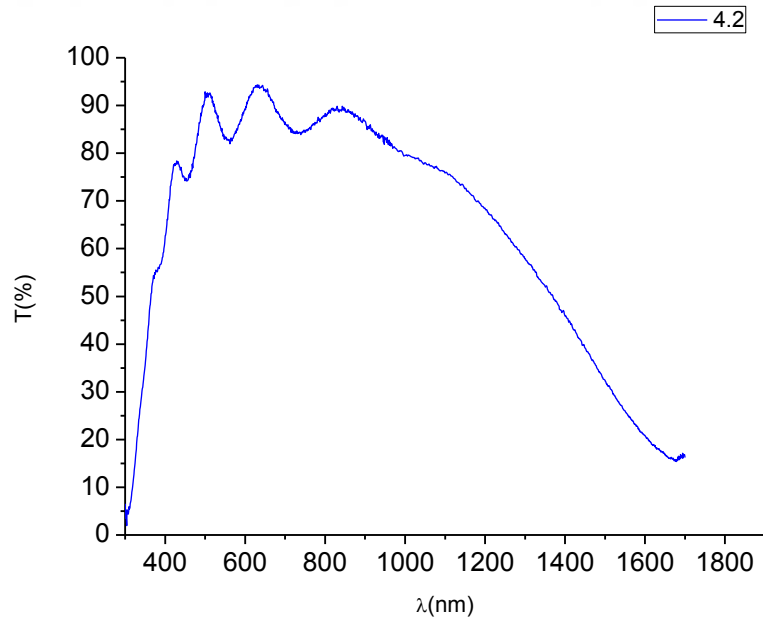
Şekil 5.1. Farklı şartlarda kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri

Şekil 5.1.'de farklı şartlarda kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenliklerini aynı grafikte gösterilmektedir. Burada 1.2: oda sıcaklığında kaplanmış ITO ince filmlerin 1 saat 200 °C'de fırınlanmış ince filmler, 1.3: oda sıcaklığında kaplanmış ITO ince filmlerin 2 saat 200 °C'de fırınlanmış ince filmler 2.2 200 °C'de kaplanmış ince filmlerin 200 C de 1 saat fırınlanması 2.3 200 °C'de kaplanmış ince filmlerin 200 °C'de 2 saat fırınlanmış ince filmler



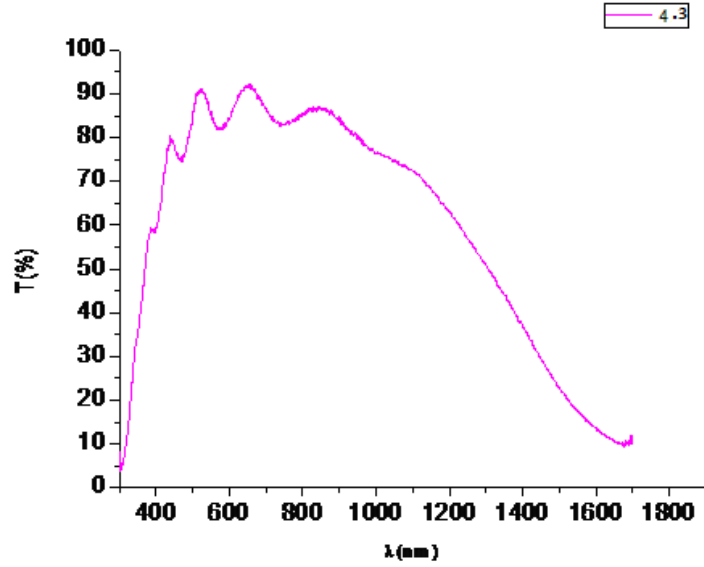
Şekil 5.2. 250 °C'de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri

Şekil 5.2, 250 °C'de kaplanmış ince filmlerin geçirgenliklerini göstermektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi geçirgenlik %90 olarak görülmektedir. Bu da bizim için beklenen bir sonuçtur. Bu iletken alt tabanlar güneş pilleri uygulama alanları için ışık geçirme durumunun yüksek olmasından dolayı kullanılabilir.



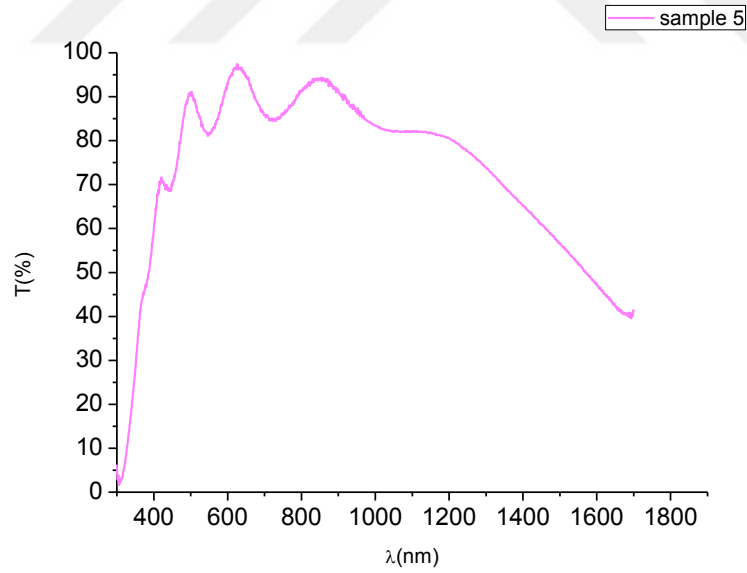
Şekil 5.3. 250 °C'de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri

Şekil 5.3. 250 °C'de kaplanmış ince filmlerin 1 saat 200 °C'de fırınlanmış ince filmler görülmektedir. Burada geçirgenlik diğer örneğimize göre daha düşüktür.



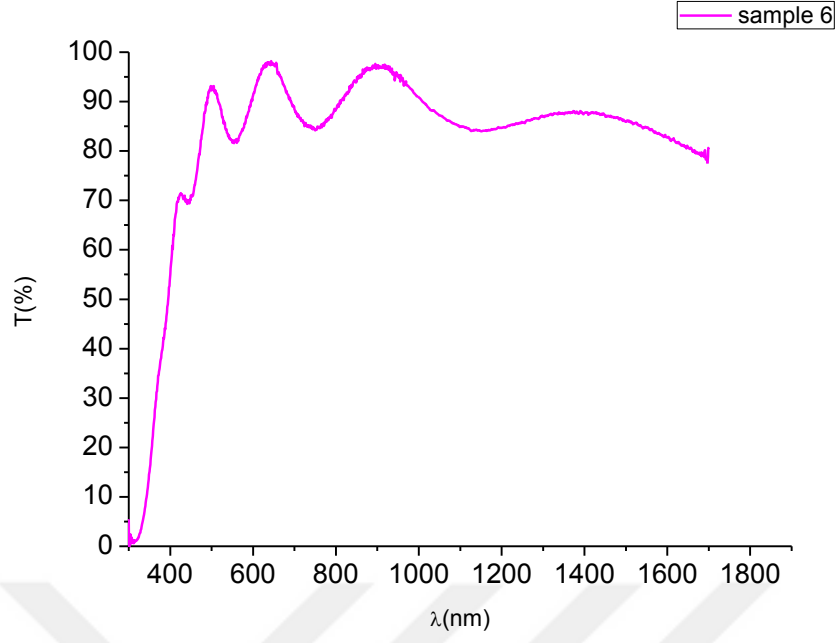
Şekil 5.4. 250 °C’de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri

250 °C’de kaplanmış 200 °C’de 2 saat fırınlanmış ince filmler görülmektedir. Geçirgenlik grafiğinden de anlaşılacağı gibi bu şartta üretilen ince filmler beklenildiği gibidir.

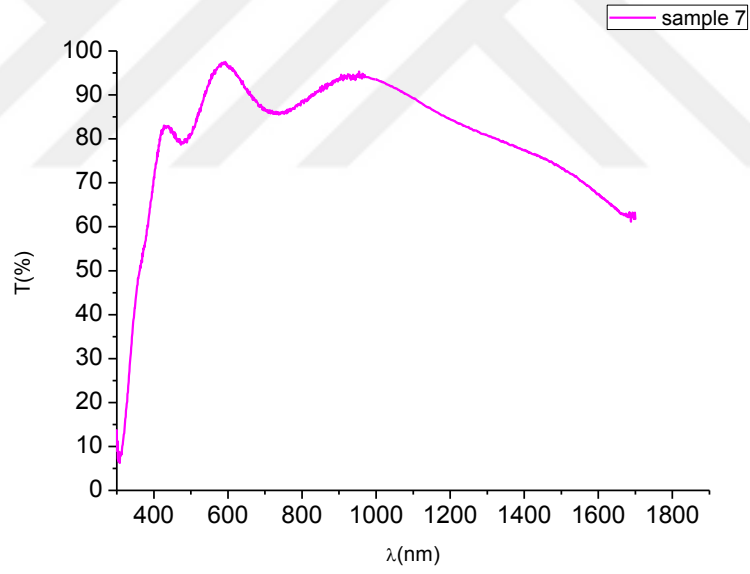


Şekil 5.5. 200 °C’de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri

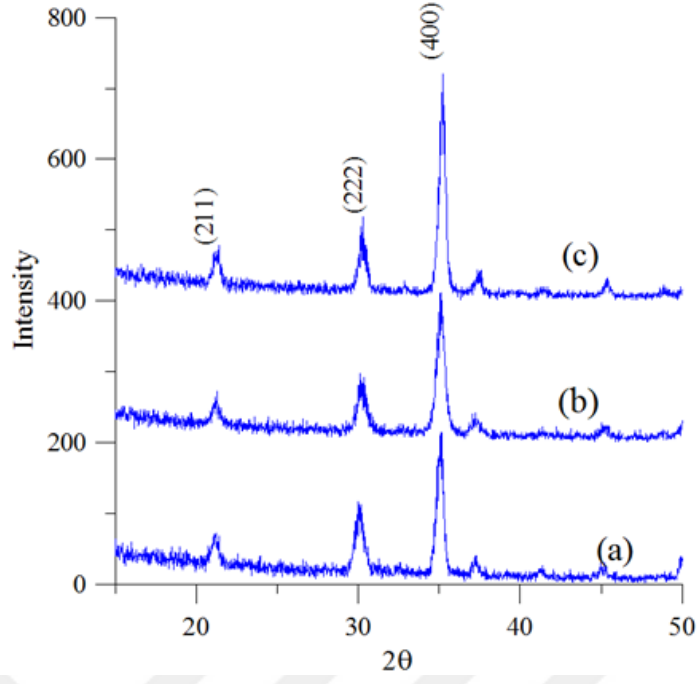
Şekil 5.5 de 200 derecede fırınlanmış ince filmler görülmektedir. Burada da geçirgenlik beklenildiği gibidir.



Şekil 5.6. 150 derecede kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri



Şekil 5.7. 200 °C'de kaplanmış ITO ince filmlerin geçirgenlikleri



Şekil 5.8. Elde edilen ince filmlerin farklı sıcaklıklardaki kristal yapısı (a) 150, (b) 200, (c) 250 °C.

Şekil 5.7 elde ettiğimiz ince filmlerin kristal özellikleri görülmektedir. Elde edilen ince filmlerin kristal özellikleri literatürle uyumludur ve beklenildiği gibidir. Şekilden de anlaşılacağı gibi sıcaklık arttıkça kristal yapı daha belirgin bir hale geçmiştir.

6. SONUÇLAR

Işık geçirgenliğine ve elektrik iletkenliğine sahip olan indiyum kalay oksit ince film kaplamalar magnetron DC sisteminde kaplanmış, elektriksel ve optiksel özellikleri en iyi derecede iletkenlik ve ince film büyütme şartlarını belirlemek için analiz edilmiştir. İne filmlerin kristal yapısı XRD sisteminde analiz edilmiş ve elektriksel iletkenlik değerleri de 4 nokta metodu ile belirlenmiştir. Yapılan deneyde en iyi ince film kaplama parametreleri: DC power 150 waat, ince film kaplama iç basıncı - 7×10^{-3} mbar , film kaplama sıcaklığı 200 °C, içerdeki gaz (ar ve oksijen) oranı 28:1 ,ince film aktif kaplama süresi 6 dakikadır. Bu parametrelerde kaplanan ince filmler görünür bölgede %85-95 optiksel geçirgenlik ve 10 ohm direnç olmuştur. Biz kaplama süresi optiksel iletkenliği azaltırken ince film kaplama sıcaklığı bir noktaya kadar ince filmlerin elektriksel iletkenliğini olumlu yönde etkilemiştir.

Bu çalışmada ince film kaplama sıcaklığının ince filmlerin elektriksel ve optiksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş, depolama sıcaklığı 250 °C iken ince film elektriksel direnci 10 ohm iken, depolama sıcaklığının 150 ile 250 °C'de ki değişimlerinde düşen kaplama sıcaklığına karşın dirençte de keskin bir yükseliş gözlemlenmiştir. Sonuç olarak söyleyebiliriz ki ne kadar sıcaklık verirsek belli bir noktaya kadar sürekli sıcaklıkla doğru orantılı olarak dirençte bir düşüş görmekteyiz. Fakat bu noktada alt tabanın sıcaklığa olan dayanıklılığı da çok önem taşımaktadır.

7. KAYNAKLAR

- Ağırseven O., (2011) Silisyum Karbonitrür İnce Filmlerin Reaktif Doğru Akım Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Bayrak Ö. (2007). Plazma ile Nitrülenmiş CoCrMo İmplant Malzemenin Yapısal ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara
- Bilgiç T, (2014), TiO₂ İle Kaplanmış İletken Camların Optik ve Yapısal Karakterizasyonları Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Bright C. I. Review of Transparent Conductive Oxides (TCO) (2007). Fall Bulletin 38-45.
- Chen A., Zhu K., Zhong H., Shao Q., Ge G., (2014). A new investigation of oxygen flow influence on ITO thin films by magnetron sputtering Solar Energy Materials & Solar Cells 120, 157–162.
- Coşkun M. İbrahim (2011), DC Manyetik Alan Sıçratma Tekniği İle Üretilen Co₉₀Fe₁₀ Nano Filmlerin Yapısal Ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kilis
- Çolak S., (2002) Reaktif DC Magnetron Sıçratma ile ITO Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çalışkan H, Kurbanoglu, Çolak O,(2010),Yüksek Güç Darbeli Magnetron Sıçratma ile Kaplama Üretimi ve Kesici Takımlar Üzerinde Uygulamaları, Electronic Journal of Machine Technologies 7(4) 4, 57-71.
- Donnella C.M, Milne D., Prietob C., Chanb H., Rostohara D., O'Connor G.M. (2015). Laser patterning of very thin indium tin oxide thin films on PET substrates Applied Surface Science 359, 567–575
- Elmas S, Korkmaz Ş, Pat S, (2013). Optical characterization of deposited ITO thin films on glass and PET substrates Applied Surface Science 276, 641– 645
- Erjing Z, Weijia Z, Jun L, Dongjie Y, Jean J. H, Jing Z (2011). Preparation of ITO thin films applied in nanocrystalline silicon solar cells Vacuum 86, 290-294
- Eshaghia A, Alireza G., (2014) Optical and electrical properties of indium tin oxide (ITO) nanostructured thin films deposited on polycarbonate substrates “thickness effect” Optik 125, 1478– 1481.
- Evcin, A., (2006). Sol-Jel Proseslerine Giriş Ders Notları. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.

- Heo K. C, Sohn Y, Gwag J.S. (2015). Effects of an additional magnetic field in ITO thin film deposition by magnetron sputtering *Ceramics International* 41,617–621.
- Heavens, O.S., *Optical Properties of Thin Solid Films*,Dover Publications,1991,261s.
- Houng B, Lin S. L, Chen S. W, Wang A, (2011). Influence of an In₂O₃ buffer layer on the properties of ITO thin films *Ceramics International* 37 3397–3403
- https://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tart%C4%B1%C5%9Fma:Fiziksel_buhar_biriktirme&action=edit&redlink=1
- <http://eyupyaylaci.com/pvdfiziksel-buhar-biriktirme-yontemi/>
- https://tr.wikipedia.org/wiki/Fiziksel_buhar_biriktirme
- Hu X-L, Liu L, Wang H, Zhang X-C, (2015). Effects of pre-annealed ITO film on the electrical characteristics of high-reflectance Ni/Ag/Ni/Au contacts to p-type GaN *Applied Surface Science* 357, 1703–1707
- Islak, S., Buytoz S., 2011. Plazma Püskürtme Yöntemiyle AISI 304 Paslanmaz Çelik Yüzeyinde Elde Edilen ZrO₂/Al₂O₃ - %13 TiO₂ Kompozit Kaplamanasının Mikroyapı Özellikleri, 6 th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 May, Elazığ, 6-12.
- Kameia M, Enomotob H, Yasuib I, (2001). Origin of the crystalline orientation dependence of the electrical properties in tin-doped indium oxide films *Thin Solid Films* 392, 265-268.
- Kaya Ö., 1998. Characterization Of TiO₂ Thin Films Prepared by Sol-Gel Processing. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 89s, Ankara.
- Kaymak E, (2010) ITO Yüzeyine Biriktirilen Kolloidal Yapıların Elektrokimyasal Karakterizasyonu.,Yüksek Lisans Tezi, Konya,
- Kırmıgül F,(2008). CdO İnce Filmlerin Püskürtme Yöntemi ile Hazırlanması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.Adana
- Köseoğlu H , Türkoğlu F, Kurt M., Yaman M. D. c, Akca F. G, Aygun G, Ozyuzer L., (2015). Improvement of optical and electrical properties of ITO thin films by electro-annealing, *Vacuum* 120, 8-13.
- Kumar K. J, Ravi N.C R, Subrahmanyam A, (2011). Thickness dependent physical and photocatalytic properties of ITO thin films prepared by reactive DC magnetron sputtering *Applied Surface Science* 257, 3075–3080
- Lin H.K., Hsu W.C. (2014). Electrode patterning of ITO thin films by high repetition rate fiber laser *Applied Surface Science* 308, 58–62.
- Lu H.C, Mao J.W, Chiang Y.C (2013). Low temperature preparation of ITO thin films by the coating solutions containing solvothermally synthesized ITO nanoparticles *Surface & Coatings Technology* 231 526–530

- Madhi I., Meddeb W., Bouzid B., Saadoun M., Bessaïs B. (2015). Effect of temperature and NO₂ surface adsorption on electrical properties of screen printed ITO thin film *Applied Surface Science* 355, 242–249
- Meshram N, Loka C, Park K.R, Lee K.S (2015). Enhanced transmittance of ITO/Ag(Cr)/ITO(IAI) multi-layered thin films by high temperature annealing *Materials Letters* 145,120–124.
- Ohring, M.,1992. *The Materials Science of Thin Films*, Academic Press. San Diego, USA.
- Park Y. S., Kim E, Hong B, Lee J, (2013). Characteristics of ITO films with oxygen plasma treatment for thin film solar cell applications *Materials Research Bulletin* 48, 5115–5120
- Sibin K.P., Swain N, Chowdhury P, Dey A, Sridhara N., Shashikala H.D., Sharma A. K, Barshilia H. (2015). Optical and electrical properties of ITO thin films sputtered on flexible FEP substrate a passive thermal control system for space applications *Solar Energy Materials & Solar Cells*
- Villar I. D, Zamarreño C.R., Hernaez, Sanchez M.,P., Arregui F.J., Matias I.R., (2015). Generation of Surface Plasmon Resonance and Lossy Mode
- Yüncü,S. (2012). Sol Jel Yöntemiyle Katkısız ve Boya katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tez Resonance by thermal treatment of ITO thin-films *Optics & Laser Technology* 69, 1–7

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aydın Kamil Erdem
Doğum Yeri ve Yılı : Manavgat, 1986
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : aydin_kamil07@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Manavgat YDA Lisesi, 2004
Lisans : SDÜ, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü
Yüksek Lisans : SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Mesleki Deneyim

İş güveni Uzmanı

Yayınları

1. Aydın Kamil Erdem, Dumitru Luca, Nalan Çiçek Bezir, “Characterization of ITO Thin Films Prepared by DC Magnetron Sputtering”, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,2014