

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİLİSYUM KARBONİTRÜR İNCE FİLMLERİN REAKTİF DOĞRU AKIM
MANYETİK ALANDA SIÇRATMA YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Okan AĞIRSEVEN
(506081415)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Onuralp YÜCEL (İTÜ)
Eş Danışman : Doç. Dr. Esra Özkan ZAYİM (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Filiz Çınar ŞAHİN (İTÜ)
Doç. Dr. Nilgün Karatepe YAVUZ (İTÜ)
Yard. Doç. Dr. Cevat Bora DERİN (İTÜ)**

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Yüksek lisans teziminin danışmanlığını üstlenen, tezimi hazırlarken bilgileri ve yardımları ile bana desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Onuralp Yücel ve Doç. Dr. Esra Özkan Zayim'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana her konuda yardım eden, bilgisi ve öğretisiyle çalışmalarımda yol gösteren değerli hocam Dr. Tolga Tavşanoğlu'na çok teşekkür ederim.

Laboratuvar ve karakterizasyon çalışmalarımda bana yardım eden hocalarım Doç. Dr. Murat Baydoğan ve Yard. Doç. Dr. Saffettin Yıldırım hocalarıma çok teşekkür ederim.

Laboratuvarlarını kullanma imkanı sağlayan hocalarım Prof. Dr. Fatma Zehra Tepehan, Prof. Dr. Gültekin Göller ve Prof. Dr. Hüseyin Çimenoglu'na teşekkür ederim.

İTÜ Prof. Dr. Adnan Tekin Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki hocalarım Doç. Dr. Filiz Çınar Şahin, Yrd. Doç. Dr. Bora Derin, Yrd. Doç. Dr. Şeref Sönmez'e, tüm çalışanlara ve yardımlarıyla her zaman yanımda olan çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayatımın her anında bana her türlü desteği veren, beni bugünlere getiren, en değerli varlıklarım, annem Birsen Ağırseven'e, babam Dünder Ağırseven'e ve can dostum, ağabeyim Onur Ağırseven'e en derin minnetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

HAZİRAN 2011

Okan AĞIRSEVEN

Fizik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. SiCN KULLANIM ALANLARI VE ÖZELLİKLERİ.....	3
3. FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME	5
3.1 Vakum Pompaları.....	5
3.1.1 Döner mekanik pompa	6
3.1.2 Turbomoleküler pompa.....	7
3.2 Işımalı Deşarj ve Plazma.....	8
3.2.1 Doğru akım ışımalı deşarjı.....	9
3.2.2 Çarpışma prosesleri.....	11
3.3 Sıçratma.....	13
3.3.1 Soğuk katot doğru akım diyot sıçratması.....	14
3.3.2 Doğru akım manyetik alanda (magnetron) sıçratma.....	15
3.3.3 Reaktif sıçratma ile biriktirme	17
3.4 İyonların Yüzeyle Etkileşimi	18
3.5 Film Oluşumu.....	18
3.6 Kaplamaların Tane Yapıları.....	20
3.7 Sıçratma Verimi	23
4. İNCE FİLMLERİN OPTİK ÖZELLİKLERİ	25
4.1 Genel Yaklaşım.....	25
4.2 Optik Sabitler ve Yasak Bant Aralığının Hesaplanması	28
5. AKTİVASYON ENERJİSİ.....	33
6. SERTLİK.....	35
7. DENEYSEL ÇALIŞMA	37
7.1 Kaplama Cihazı.....	37
7.2 Taban Malzeme Hazırlanması.....	40
7.3 Vakum ve Dağlama.....	40
7.4 Kaplama Aşaması.....	41
7.5 Karakterizasyon.....	41
8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	43
8.1 Giriş.....	43
8.2 Kalınlık Ölçümü.....	44
8.3 Mikroyapı ve Kimyasal Bileşim Analizi.....	44

8.4	Optik Ölçüm ve Analizler	49
8.4.1	Yansıtma ve geçirgenlik	49
8.4.2	Kırılma indisi ve sönüm katsayısı hesabı	52
8.4.3	Optik yasak bant aralıkları	56
8.5	Aktivasyon Enerjileri	57
8.6	Sertlik Ölçümleri	60
9.	GENEL SONUÇLAR	63
10.	ÖNERİLER	65
	KAYNAKLAR.....	67
	ÖZGEÇMİŞ	71

KISALTMALAR

SiCN	: Silisyum Karbonitrür
MEMS	: Mikroelektromekanik Sistemler
CN	: Karbonitrür
KBB	: Kimyasal Buhar Biriktirme
PDKBB	: Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
FBB	: Fiziksel Buhar Biriktirme
AISI	: Amerikan Demir Çelik Enstitüsü

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 7.1 : Kapalama işlemlerine ait parametreler.....	41
Çizelge 8.1 : Profilometre ölçüm sonuçları.	44
Çizelge 8.2 : Set 1 numunelerinin EDS analiz sonuçları.....	46
Çizelge 8.3 : Set 2 numunelerinin EDS analiz sonuçları.....	46
Çizelge 8.4 : Hesaplama sonucu bulunan yasak bant aralıkları.	57
Çizelge 8.5 : Aktivasyon enerjileri.	59
Çizelge 8.6 : Sertlik ölçümleri.....	61

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Döner piston pompasının şematik gösterimi: 1. Eksantirik; 2. Piston; 3. Şaft; 4. Gaz balastı; 5. Soğutma suyu girişi; 6. Tercihi egzoz; 7. Motor; 8. Egzoz; 9. Yağ buharı ayırıcı; 10. Dikme valfi; 11. Giriş; 12. Menteşe çubuğu; 13. Kasa; 14. Soğutma suyu çıkışı.....	6
Şekil 3.2 : Turbomoleküler pompanın şematik gösterimi.	8
Şekil 3.3 : Doğru akım ısımalı deşarj sisteminin şematik gösterimi. V güç kaynağı, R dirençtir.	10
Şekil 3.4 : Doğru akım ısımalı deşarjın aydınlık ve karanlık bölgeleri.....	11
Şekil 3.5 : Doğru akım manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi.	16
Şekil 3.6 : Enerjili parçacık bombardımanının yüzey ve büyüyen film üzerindeki etkisinin şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.7 : Üç temel film oluşma mekaniği.	20
Şekil 3.8 : Demchishin tarafından sunulan yapı bölgeleri modeli.....	21
Şekil 3.9 : Thornton tarafından geliştirilen model.....	22
Şekil 3.10 : Bombardımanın ve sıcaklığın etkisiyle şekillenmiş bölge modeli.....	23
Şekil 4.1 : Lineer polarize elektromanyetik dalga.....	25
Şekil 4.2 : Sınır bölgesindeki gelen, geçen ve yansıyan EM dalga.....	27
Şekil 4.3 : Tek bir film için ışığın yansıması ve geçmesi. t ve r ile ifade edilen katsayılar yansıma ve geçirme oranlarını tayin eden Fresnel katsayılarıdır.	28
Şekil 4.4 : Malzeme tipine göre bant aralığı durumları.....	29
Şekil 4.5 : Direkt ve indirekt yasak bant aralıklarının şematik gösterimi.	30
Şekil 6.1 : Nanoindentasyon işleminin şematik gösterimi.	36
Şekil 7.1 : TSD 350 PCVD hibrid kaplama makinesinin önden şematik gösterimi...	38
Şekil 7.2 : TSD 350 PCVD hibrid kaplama makinesinin kaplama odasının üstten şematik gösterimi.....	39
Şekil 8.1 : Numune Set 1'in görünümü.	43
Şekil 8.2 : Numune Set 2'nin görünümü.	43
Şekil 8.3 : % 25 CH ₄ , %25 N ₂ gaz akışı ile üretilmiş SiCN 4 isimli numunenin SEM görüntüsü.	45
Şekil 8.4 : % 50 CH ₄ , %25 N ₂ gaz akışı ile üretilmiş SiCN 7 isimli numunenin SEM görüntüsü.	45
Şekil 8.5 : SiCN 3 numunesinin XRD grafiği.	47
Şekil 8.6 : SiCN 2 numunesinin XRD grafiği. Grafikte Si ₃ N ₄ ve SiO ₂ kristal yapılar görülmektedir.....	48
Şekil 8.7 : SiCN 4 numunesinin XRD grafiği. Grafikte Si ₃ N ₄ kristal yapı görülmektedir.....	48
Şekil 8.8 : SiCN 5 numunesinin XRD grafiği. Grafikte Si ₃ N ₄ kristal yapı görülmektedir.....	48

Şekil 8.9 : S ve P polarize dalganın şematik gösterimi. Aynı doğrultuda ilerleyen S ve P polarize dalgaların elektrik alanı salınımları birbirlerine diktir.....	49
Şekil 8.10 : Sabit %25 CH ₄ gaz akışı altında N ₂ gaz akışı değiştirilerek oluşturulan serinin (Set 1), kaplanmamış cam numune ile karşılaştırmalı olarak, p-polarize dalgayı yansıtma (R) ve geçirme (T) oranları.....	50
Şekil 8.11 : Sabit %25 N ₂ gaz akışı altında CH ₄ gaz akışı değiştirilerek oluşturulan serinin (Set 2), kaplanmamış cam numune ile karşılaştırmalı olarak, p-polarize dalgayı yansıtma (R) ve geçirme (T) oranları.....	50
Şekil 8.12 : Sabit %25 CH ₄ gaz akışı altında N ₂ gaz akışı değiştirilerek oluşturulan serinin (Set 1), kaplanmamış cam numune ile karşılaştırmalı olarak, s-polarize dalgayı yansıtma (R) ve geçirme (T) oranları.....	51
Şekil 8.13 : Sabit %25 N ₂ gaz akışı altında CH ₄ gaz akışı değiştirilerek oluşturulan serinin (Set 2), kaplanmamış cam numune ile karşılaştırmalı olarak, s-polarize dalgayı yansıtma (R) ve geçirme (T) oranları.....	51
Şekil 8.14 : Gerçekte hesaplanan değerlerle teorik olarak hesaplanan değerlerin fit etme işlemi öncesi karşılaştırılması.	53
Şekil 8.15 : Fit etme işlemi sonucunda örtüşerek uyum sağlamış gerçek ve teorik değerlerin görünümü.....	55
Şekil 8.16 : Program tarafından hesaplanan n ve k değerlerinin görünümü.....	55
Şekil 8.17 : Optik yasak bant aralıklarının hesaplanması.....	56
Şekil 8.18 : Film yüzeyine gri ile gösterilen indiyum katotlara bakır kabloların bağlanmasıyla oluşturulan devre elemanı ve boyutlarının gösterimi.	58
Şekil 8.19 : Set 1 numunelerinin gaz akış hızına bağlı aktivasyon enerjisi değişimleri.	59
Şekil 8.20 : Set 2 numunelerinin gaz akış hızına bağlı aktivasyon enerjisi değişimleri.	60
Şekil 8.21 : Set 1 numunelerinin gaz akış hızına bağlı yüzey sertliği değişimleri.	61
Şekil 8.22 : Set 2 numunelerinin gaz akış hızına bağlı yüzey sertliği değişimleri.	62

SEMBOL LİSTESİ

eV	: Elektrovolt
Pa	: Paskal
L	: Litre
e⁻	: Elektron
V	: Volt
cm³	: Santimetre Küp
dak	: Dakika
W	: Watt
A	: Amper
°C	: Derece Celsius
nm	: Nanometre

SİLİSYUM KARBONİTRÜR İNCE FİLMLERİN REAKTİF DOĞRU AKIM MANYETİK ALANDA SIÇRATMA YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada %99.999 saflıkta silisyum hedef malzeme kullanılarak, CH₄ ve N₂ reaktif gaz ortamında, mikroskop camı ve yüksek hız çeliği üzerinde, 1350±70 nm kalınlıklarında silisyum karbonitrür ince filmler biriktirilmiştir. Kaplama işlemleri 0.2 Pa çalışma basıncı altında, 500 W hedef gücü, 50 V bias gerilimi, 5-18 cm³/dak argon gaz akışı, 2-10 cm³/dak CH₄ ve N₂ gaz akışı kullanılarak 60'ar dakika süreyle yapılmıştır. Filmler benzer kalınlıklarda biriktirilmiştir. Bu sayede kalınlığın etkisi göz ardı edilerek kaplama içeriğine bağlı optik sabitler incelemeye alınmıştır.

Silisyum karbonitrür ince filmlerin optik geçirme ve yansıtma oranları 280-1000 nm dalga boylarında spektrofotometre ile ölçülmüştür. Spektrofotometre yazılımı kullanılarak, bu değerlerden kırılma indisi ve sönüm katsayıları elde edilmiştir. Buradan hesaplanan soğurma katsayıları ile uygulanan Tauc yöntemi ile üretilen ince filmlerin yasak bant aralığı değerleri gaz akış oranlarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Analiz ve hesaplama sonuçları, gaz akış oranları ile elde edilen filmlerin optik sabitleri ve yasak bant aralıkları arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur.

X-ışını difraktometresi ile yapılan faz analizleri sonucunda bazı kaplamalarda kristal yapı olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında 50°C gibi düşük sayılabilecek bir sıcaklıkta üretilen filmlerde kristal yapı oluşumu çalışmanın ilgi çeken özelliklerinden olmuştur.

Elde edilen filmlerin 20-100°C sıcaklıklardaki iletkenlikleri ölçülüp aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjileri, karbon ve azot miktarlarının artmasıyla azalma göstermişlerdir. Bunun yanında azot miktarının artmasıyla gözlenen aktivasyon enerjisi değişimi, karbon miktarı artışıyla oluşan değişime benzer özellikler göstermiştir.

Ayrıca filmlerin sertlikleri ölçülmüştür ve filmler içinde mevcut silisyum miktarındaki artış ile film sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

CHARACTERIZATION OF SILICON CARBONITRIDE THIN FILMS DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING

SUMMARY

In this study, SiCN thin films with thicknesses of 1350 ± 70 nm were deposited on microscope glass and high speed steel by sputtering a silicon target of 99.999% purity with CH₄ and N₂ reactive gases. Deposition were done with 0.2 Pa working pressure, 500 W target power, 50 V bias voltage, 5-18 cm³/min argon gas flow, 2-10 cm³/min CH₄ and N₂ gas flow for 60 minutes each. Films were deposited with similar thicknesses which allowed the effect of thickness factor on optical constants to be negligible during calculations.

The optical transmittance and reflectance values of silicon carbonitride thin films were measured by spectrophotometer on a spectral range of 280-1000 nm. Refractive indices and extinction coefficients were calculated by the spectrophotometer software. By using these values absorption coefficients are evaluated and used in Tauc method to determine the optical band with respect to the gas flow rate. The results of analyses and calculations provided the information about the relationship between the reactive gas flow rates, the optical constants and the band gap values of silicon carbide films.

Phase analysis done by x-ray diffractometer showed that there are crystalline structures present on certain specimens. Formation of these crystalline structures on a coating temperature around 50°C, which is relatively low compared to the previous studies in the literature, is one of the interesting aspects of this study.

Conductivities of the deposited thin films were measured on temperatures 20-100°C. With the collected data activation energies are calculated. Activation energies of SiCN films decreased with the increase of carbon and nitrogen. The change behavior of activation energy values by the increase in the carbon concentration is similar to the behavior by the increase in the nitrogen concentration.

Also the hardness of the films were measured and results showed that the hardness values increase by the increase of silicon concentration.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Mühendislik uygulamalarında kullanılan her malzeme, çevreleri ile yüzeyleri aracılığıyla etkileşirler. Yüzey atomlarının hareketliliği hacim atomlarından daha yüksektir ve bu yüzey atomları aşınma ve korozyon gibi durumlarla ilk karşılaşan bölgelerdir. Bu nedenle teknoloji ve mühendislik uygulamaları geliştikçe yüzey özelliklerini değiştirmenin ve geliştirmenin önemi her geçen gün artmaktadır.

Yüzey özelliklerini iyon katkılama, alaşımlama, sertleştirme, boyama ve kaplama gibi işlemlerle değiştirmek mümkündür. Kaplama sınıfına dahil olan ince film uygulaması, özellikle son yıllarda, yüzey özelliklerini değiştirmek için yapılan en önemli uygulamalardan biri haline gelmiştir. İnce film kaplama, yapıldığı tekniklere göre yüzey özelliklerini isteğe göre değiştirilebilme imkanı sunmakta ve genel olarak yüksek verim sağlamaktadır. İnce filmler, nanometre seviyelerindeki boyutları sayesinde küçük parçalı sistemlerde kullanılmaktadır ve özellikle hassas mekanik ve elektronik uygulamalar için çok önemli yere sahip olan malzemelerdir.

Endüstride kullanılan pek çok ince film kaplama yöntemi vardır. Bunlardan kimyasal redüksiyon, elektroliz, sıcak daldırma, termal sprey, kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme önemli yöntemlerden birkaçıdır. Bu yöntemlerden, katı bir kaynaktan buharlaştırılan atom veya moleküllerin bir yüzey üzerinde yoğunlaşması ile ilgili olan fiziksel buhar biriktirme (FBB), düşük biriktirme sıcaklığı ve nitrür, karbür ve alaşım gibi geniş kaplama seçenekleri ile ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada amaç, üstün optik ve mekanik özelliklere sahip SiCN ince filmlerin farklı malzemeler üzerine, fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinin en gelişmişlerinden olan reaktif doğru akım manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanması, kaplama esnasında kullanılan reaktif gaz akışı değişiminin filmlerin kompozisyonlarındaki etkisi ve bu etkilerin optik ve mekanik özelliklerine nasıl etki ettiğinin incelenmesidir. Filmlerin kompozisyonları ve özelliklerindeki değişimin incelenmesi, bu filmlerin kullanılması amaçlanan endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan özellikleri kazandırmak açısından son derece önemlidir.

2. SiCN KULLANIM ALANLARI VE ÖZELLİKLERİ

Son yıllarda silisyum karbonitrürlere olan ilgi özellikle aşınmaya dirençli kaplamalar yapma ihtiyacındaki artış ile sahip olduğu üstün mekanik, tribolojik ve optik özelliklerinden dolayı artmıştır. Silisyum karbonitrür filmler iyi mukavemet, termal kararlılık, aşınma direnci ve korozyon direnci göstermektedirler. Yüksek sıcaklıkta gösterdikleri oksidasyon direnci ile termal kararlılığa sahip olmayan taban malzemelere koruyucu olarak kullanılmaktadırlar. Silisyum karbonitrür filmler yüksek performanslı elektronik malzemelerdir. Ayrıca SiCN seramikler kimyasal inertlikleri ve yüksek sertlikleri ile yeni mikroeletromekanik (MEMS) sistemlerde kullanılması tercih edilen malzemelerdir [1,2,3].

SiCN geniş yasak bant aralığına sahip bir yarı iletkenidir [4]. SiCN filmlerin ayarlanabilir yasak bant aralığı karakteristikleri, görünür ve kızıl ötesi bölgede değiştirilebilen optik geçirgenlikleri ve yüksek termal kararlılıkları, onları mikroelettronik ve optoelettronik uygulamalar için çekici kılmaktadır [2].

SiCN filmler genel olarak silisyum nitrür (SiN), silisyum karbür (SiC) ve karbonitrür (CN) yapılarının birleşimiyle oluşturulur. Silisyum nitrür yüksek şeffaflığa ve geniş bant aralığına sahip (~5 eV) bir dielektriktir. Silisyum karbür ise daha düşük bir yasak bant aralığına sahiptir (~2.8 eV) ve üstün mekanik performansa sahiptir. CN de yüksek sertlik, kısmi elektriksel iletkenlik ve yüksek elastik geri gelmeye sahiptir. Bu üç malzeme katı çözelti oluştururlar. Bu nedenle SiCN filmler, faz içeriği ve kısa mesafe dizilimi değiştirilerek farklı uygulamalarda kullanılabilir duruma getirilebilmektedirler [2].

SiCN filmler çeşitli uygulamalarla üretilebilirler. Bunlara örnek olarak polimer ön madde pirolizi, yüksek sıcaklıkta kimyasal buhar biriktirme (KBB), bias destekli sıcak filament KBB, radyo frekanslı plazma destekli KBB (PDKBB), elektron siklotron rezonanslı KBB, mikrodalga PDKBB, darbeli lazer biriktirme, iyon ışınli sıçratma ve reaktif magnetron sıçratma yöntemleri gösterilebilir [2].

Literatür incelemesi sonucu SiCN ince filmlerin özellikle son 10 yıl içerisinde kapsamlı olarak üretilip incelendiği görülmüştür. Bu nedenle SiCN filmlerin kaplama malzemeleri arasında henüz geliştirilmekte olan ve yeni sayılabilecek malzemeler olduğu söylenebilir. Daha önce yapılan çalışmalar, SiCN ince filmlerin ilgi çekici ve değişik özellikleri hakkında bize bazı önemli bilgiler vermiştir.

Peng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, polikristal bir silisyum hedef malzeme, argon, azot ve asetilen ortamında sıçratma yoluyla n tipi Si (1 0 0) ve cam taban malzeme üstüne SiCN ince filmler biriktirilmiş ve bu filmlerin yapısal ve optik özellikleri incelenmiştir. Üretilen bu filmler üzerinde yapılan karakterizasyon çalışmaları karbon oranının, dolayısıyla karbonu sağlayan ortamdaki asetilen gazının miktarının yapı, bileşen ve optik özellikler üzerinde önemli etkisi olduğu saptanmıştır. Ortama giren asetilen gazının akış hızının $2 \text{ cm}^3/\text{dak}$ seviyesinden $6 \text{ cm}^3/\text{dak}$ seviyesine çıkarılması sonucu biriken Si ve N miktarı kademeli olarak düşmüş ve karbon miktarının artmasıyla optik yasak bant aralığını 2,9 eV seviyesinden 2,1 eV seviyesine düşürmüştür. Böylece karbon miktarının ve malzeme içinde yaptığı bağların artmasıyla optik yasak bant aralığını düşürdüğü saptanmıştır [5].

Shengli Ma ve arkadaşlarının çalışmasında, hibrid arklı manyetik sıçratma sistemiyle silisyum ve grafit hedef malzemeler ile Ar ve N_2 reaktif gazları kullanılarak sert SiCN filmler paslanmaz çelik üzerine kaplanmıştır. Üretilen kaplamalarda mevcut Si oranı %15'ten %40'a kadar değişmektedir. Filmler üzerinde yapılan analiz çalışmaları sonucunda silisyumun kaplamanın sertliği üzerinde önemli rol oynadığı ve silisyum oranındaki artışla sertliğin de artış gösterdiği saptanmıştır [6].

3. FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME

Buharlaştırma ve sıçratma, ince film biriktirme yöntemlerinin en önemlilerindendir. Bu yöntemlerde amaç, atomları bir kaynaktan hedef malzemeye kontrollü olarak taşımaktır. Taşınan bu atomlar hedef malzeme üzerinde atomik mertebede film oluşumu ve büyümesine neden olurlar [7].

Buharlaştırmada, atomlar kaynaktan termal olarak ayrılırlar. Sıçratmada ise gaz halindeki iyonların katı bir hedefe çarpmasıyla atomlar yerlerinden sökülürler. Bu iki biriktirme yönteminin ilk deneyleri 19. Yüzyıl içerisinde birbirlerine yakın zamanlarda yapılmıştır. 1852 yılında Grove ışımalı deşarj (glow discharge) katodundan sıçratılmış metal birikintileri gözlemlemiştir. Beş yıl sonra Faraday inert atmosferde fitil benzeri metal telleri patlatma deneyleriyle buharlaşmış ince filmleri üretmiştir [7].

3.1 Vakum Pompaları

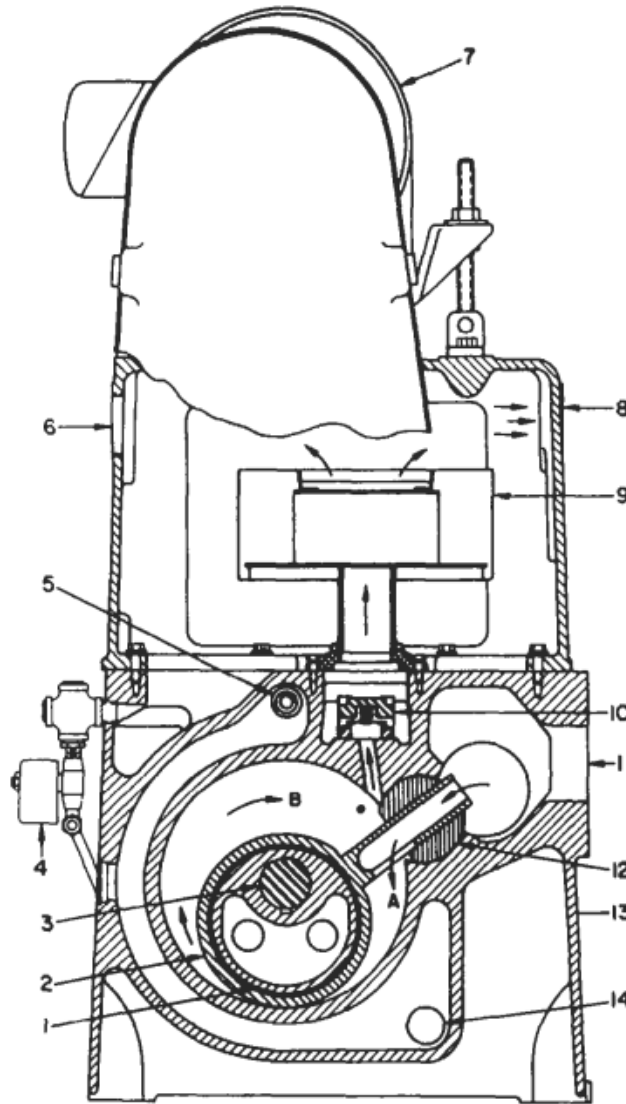
Vakuma alma işlemi, filmlerin biriktirilmesi ve karakterizasyonu için bulundukları ortamı yapılacak işleme etki edebilecek gaz moleküllerinden arındırarak uygun vakum ortamının elde edilmesidir. Bu vakum sistemleri bir seri pompa, boru sistemi, vana ve gösterge parçalarından oluşurlar. Vakum pompaları genel olarak iki ana tür altında incelenir. Bunlar gaz transfer pompaları ve hapsedme pompalarıdır. Gaz transfer pompaları gaz moleküllerini vakuma alınmak istenen bölgeden alarak bir veya birkaç kademede dış ortama aktarır. Hapsedme pompaları ise gaz moleküllerini içinde yoğunlaştırır ya da kimyasal olarak pompalanan odanın duvarlarına bağlar. Gaz pompalarını gazı ortamdan tamamen uzaklaştırırken bazı hapsedme pompaları ısınma aşamasında tutmuş olduğu gaz moleküllerini aldığı ortama geri verebilir [7].

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 turbomoleküler pompalar kinetik vakum pompalarının önde gelen örnekleridir. Hapsedme pompalarının

arasında ise tutunma, iyon saçılma ve kriyojenik pompalar sayılabilir. Pompalar birer birer veya birkaçının kombinasyonu şeklinde kullanılırlar [7].

3.1.1 Döner mekanik pompa

Döner piston ve döner kanatlı pompa düşük basınç elde etmek için en sık kullanılan iki cihazdır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi anahtarlı mil eksantirik ve pistonu hareket ettirince içerideki gaz A bölgesine geçer. Bir dönüş sonunda gazın giriş ile bağlantısı kesilir, sıkıştırılır ve daha sonraki dönüşte atılır. Piston pompaları genel olarak büyük sistemleri boşaltmak ve Root tipi pompalara destek olmak için kullanılır [7].



Şekil 3.1 : Döner piston pompasının şematik gösterimi: 1. Eksantirik; 2. Piston; 3. Şaft; 4. Gaz balastı; 5. Soğutma suyu girişi; 6. Tercihi egzoz; 7. Motor; 8. Egzoz; 9. Yağ buharı ayırıcı; 10. Dikme valfi; 11. Giriş; 12. Menteşe çubuğu; 13. Kasa; 14. Soğutma suyu çıkışı [7].

Döner kanatlı pompanın eksantirik olarak yerleştirilmiş yayla itilen kanatlı bir rotoru vardır. Dönüş sırasında kanatlar pompanın silindirik iç kısmında içeri ve dışarı kayarak belirli bir miktar gazın hapsedilmesi, sıkıştırılması ve egzoz vanasıyla dışarıya atılması işlemini gerçekleştirir. Bu pomplar sayesinde 10^6 seviyelerinde sıkıştırma oranları elde edilir. Her iki tip döner pompa içinde sistemde bulunan yağ, hem parçaları kayganlaştırmak için hem de parça aralarındaki açıkları kapatıp ortamı izole etmek için kullanılır [7].

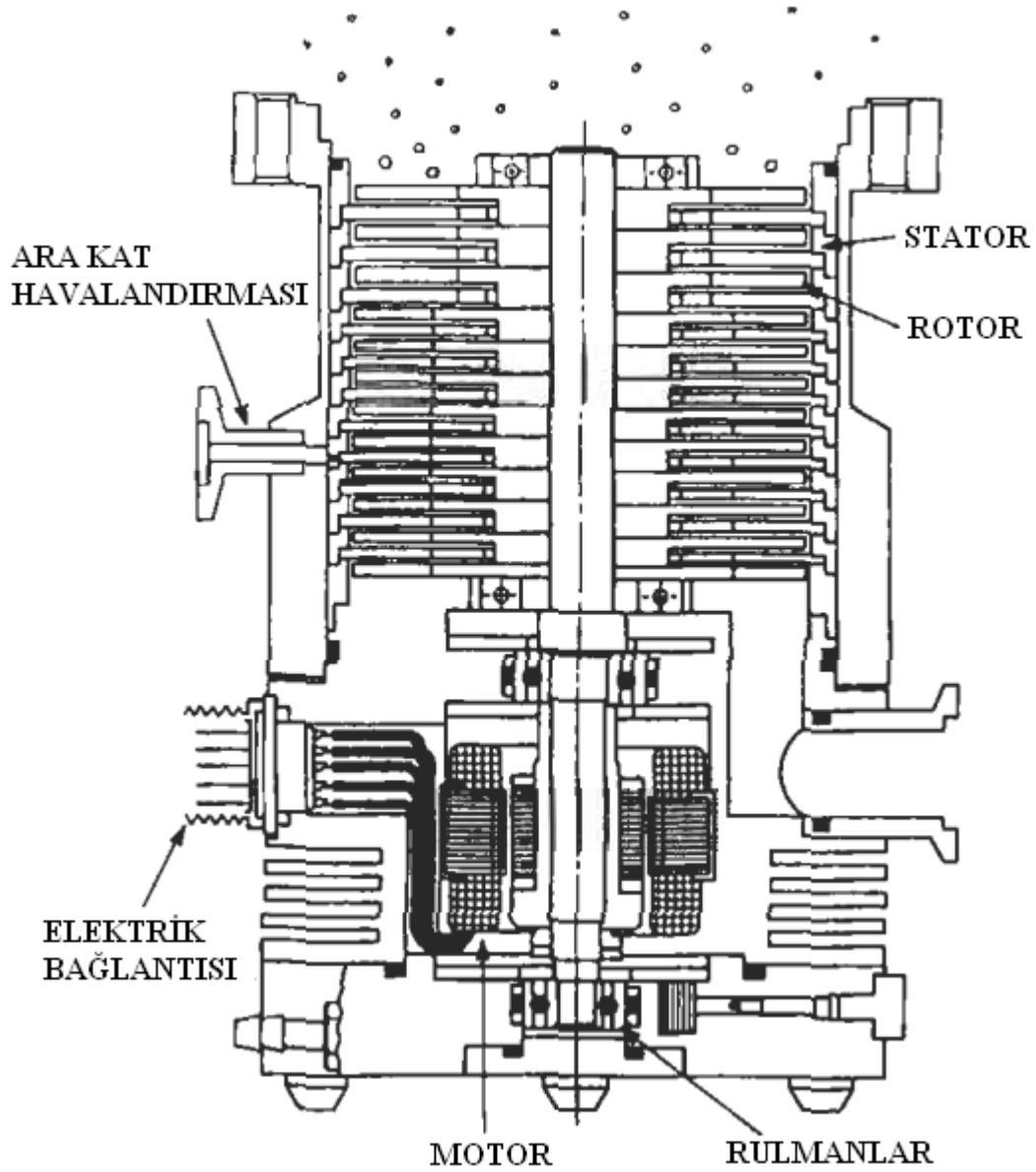
Tek kademeli pompalar yaklaşık 1 Pa basınç sağlarken iki kademeli pompaların basınç değeri 10^{-2} Pa seviyesindedir. Döner pompalar genel olarak yağ difüzyonu ve turbomoleküler pompaların çalışmaları için gereken öncü vakum değerini elde etmek için kullanılırlar [7].

3.1.2 Turbomoleküler pompa

Yağsız pompalama sistemlerinin pek çok kullanım avantajı olması turbomoleküler pompa teknolojisinin gelişmesine öncü olmuştur. Turbomoleküler pompalar dakikada 20.000 devirin üzerindeki hızlarda dönen türbin rotorları ile moleküllerin yüksek hızlarda istenen yöne aktarılmasını sağlarlar. Şekil 3.2’de kademeli rotorları olan dikey eksenel akımlı bir turbomoleküler motoru şematik olarak gösterilmektedir. Gaz molekülleri üst kademede yakalanıp alt kademelere geçirilerek vakum öncesi basınç seviyesinde sıkıştırılır. Maksimum sıkıştırma değeri rotorların dairesel hızıyla lineer, gazın moleküler ağırlığının kare kökü ile eksponansiyel olarak orantılıdır [7].

Çok yüksek sıkıştırma değerlerine ulaşmanın en önemli sonuçlarından biri pompa içinde oluşan yağ ters akımını önemsenmeyecek kadar düşük seviyelere indirilmesidir. Herhangi bir yakalama mekanizmasına ihtiyaç duymadan, turbomoleküler pompa bir döner pompa ile desteklenerek etkili yağsız pomplama sağlanabilmektedir. Turbomoleküler pompalar pahalı olmalarına rağmen ince film üretimi ve karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu pompalar genel olarak 10^3 L/saniye pompalama hızına ve 10^{-8} Pa basınç değerine sahiptirler [7].

Bu çalışmada mekanik ve turbomoleküler pompa sistemiyle çalışan bir kaplama cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.2 : Turbomoleküler pompanın şematik gösterimi [7].

3.2 Işımalı Deşarj ve Plazma

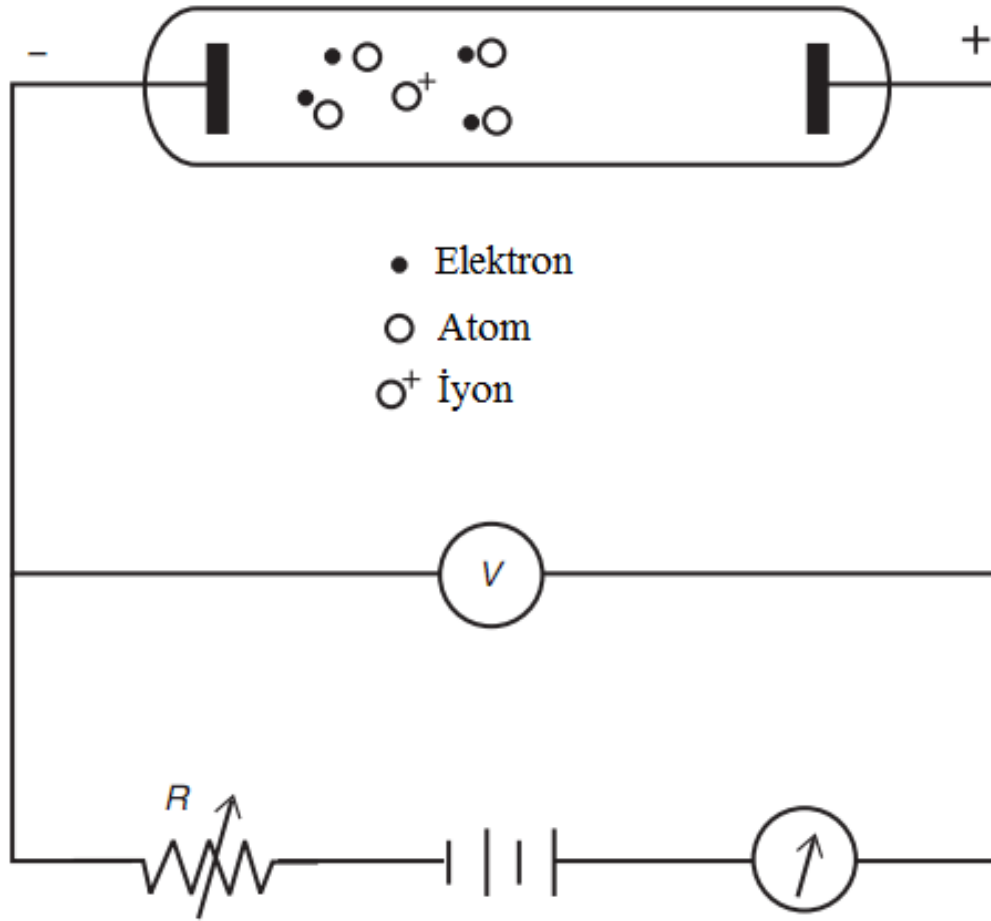
Filmin sentezlendiği malzemeye veya biriktirilecek malzemenin bulunduğu plakaya hedef malzeme adı verilir. Bu malzemeye, doğru akım veya radyo frekansı güç kaynağının negatif ucuna bağlandığı için katot da denir ve genel olarak kilovoltlarca gerilim uygulanır. Hedef malzemenin karşısına kaplanmak üzere 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 [7].

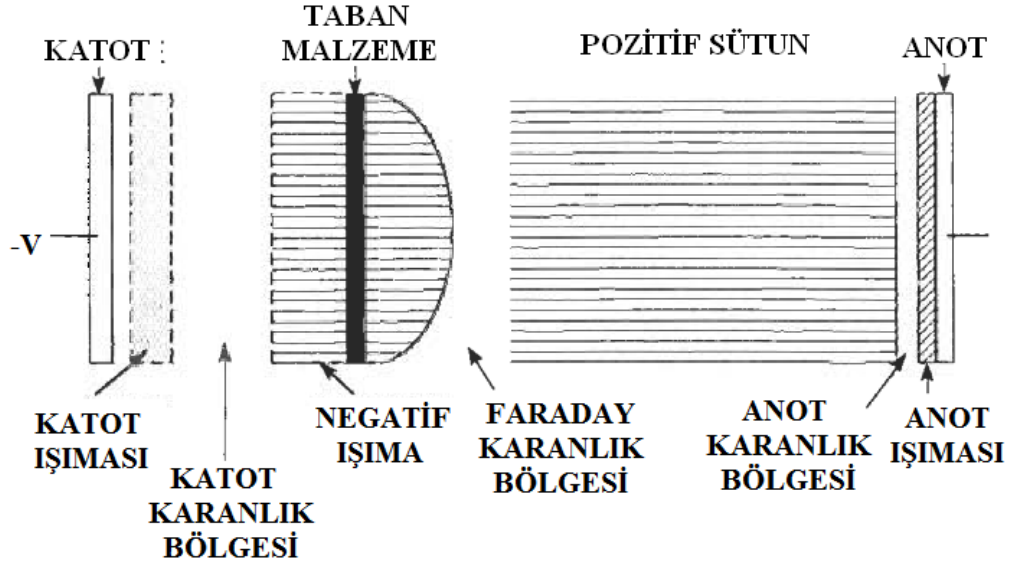
3.2.1 Doğru akım ışımalı deşarjı

İşımalı 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 ulaşınca 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 oluşturdıkları zaman deşarj kendi kendine devam eden bir duruma gelir. Ortamdaki gaz ışımaya başlar ve akım ani bir yükselmeye beraber gerilim düşer. Bu durumda normal ışıma 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 arttırılması 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. Daha yüksek akımlarda düşük gerilim arkları oluşur [7]. Doğru akım ışımalı deşarj sistemi Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmiştir.

Katodun hemen yanında yüksek aydınlığa sahip katot ışıması adı verilen tabaka oluşur. Yayılan ışık miktarı gelen iyonlarla ve katot malzemeye bağlı olarak değişir. Gelen deşarj iyonları ve pozitif katot iyonları katot ışıma bölgesinde nötrleşirler. Bu bölgede ikincil elektronlar katottan uzağa doğru hızlanırlar ve katottan biraz uzakta bulunan nötr gaz atomlarıyla çarpışırlar. Katot ışımasından sonraki ara bölgede uygulanan gerilimin tamamına yakının düştüğü karanlık bölge bulunur. Karanlık bölge içinde pozitif gaz iyonları katoda doğru hızlanırlar [7].



Şekil 3.3 : Doğru akım ışımalı deşarj sisteminin şematik gösterimi. V güç kaynağı, R dirençtir [8].



Şekil 3.4 : Doğru akım ışımalı deşarjın aydınlık ve karanlık bölgeleri [7].

Karanlık bölgeden hemen sonra negatif ışınım bölgesi gelir. Bu bölgede hızlandırılmış elektronlar nötr gaz moleküllerini iyonlaştıracak enerjiye ulaşırlar. Bu bölgenin sonrasında Faraday karanlık bölgesi ve pozitif sütun gelir. Tüm bölgelerin şematik olarak Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Taban malzeme Faraday karanlık bölgesinin önündeki negatif ışınım bölgesine yerleştirilir. Bu nedenle genelde Faraday karanlık bölgesi ve pozitif sütun bölgesi sıçratma işlemi sırasında ortaya çıkmaz [7].

3.2.2 Çarpışma prosesleri

İşımalı 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. Ağırlıkları sırasıyla M_1 ve M_2 olan, enerjileri ise sırasıyla E_1 ve E_2 olan iki parçacığın elastik ikili çarpışma eşitliği aşağıdaki gibidir [7]:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cos^2 \theta \quad (3.1)$$

Burada ikinci parçacığın sabit durduğu ve birinci parçacığın θ açısıyla (geliş doğrultusuyla parçacıkların teması anında merkezlerini birleştiren doğrultunun arasındaki açı) çarptığı varsayılmaktadır. $4M_1M_2/(M_1+M_2)^2$ değerine enerji transfer fonksiyonu adı verilir [7].

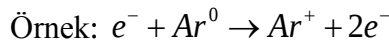
İnelastik çarpışmada ise enerjinin korunumunu sağlamak için iç enerji değişimi ΔU da eşitliğe dahil olur [7].

$$\frac{\Delta U}{\left(\frac{1}{2}\right)M_1v_1} = \frac{M_2}{M_1+M_2} \cos^2 \theta \quad (3.2)$$

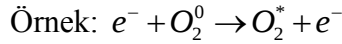
Bu denklemde v_1 birinci parçacığın başlangıç hızıdır [7].

Plazma içinde oluşan inelastik çarpışmalar ve kimyasal prosesler genel olarak film biriktirme ve dağlama işlemlerini geliştirme niteliği gösterirler. Bu olayları örnekleri ve denklemleri ile şöyle sıralayabiliriz [7]:

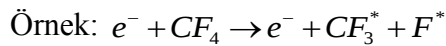
1. İyonizasyon: Deşarjın devamlılığını sağlayan en önemli süreç elektron çarpışma iyonizasyonudur.



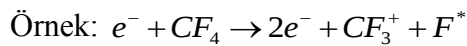
2. Uyarılma: Bu durumda elektron enerjisiyle molekülü uyarır.



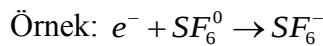
3. Çözünme: Moleküllerin daha küçük moleküler veya atomik parçalara ayrılması durumudur.



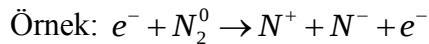
4. Çözünme İyonizasyonu: Çözünme sırasında uyarılmış bir parçacık iyonize olursa meydana gelir.



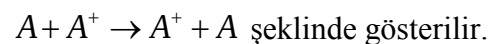
5. Elektron tutunması: Nötr moleküllerin elektron yakalayıp negatif iyonlar haline gelmesi durumudur.



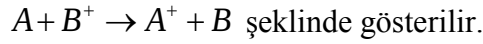
6. Çözünme tutunması: Parçacık elektron tutarak çözünür.



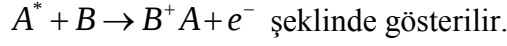
7. Simetrik yük aktarımı: Aynı parçacıklar arasındaki yük değişimidir.



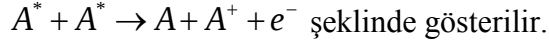
8. Asimetrik yük aktarımı: Farklı parçacıklar arasındaki yük değişimidir.



9. Yarıkararlı-nötr: Yarıkararlı bir parçacığın nötr bir parçacıkla ortama elektron veren durumdur.



10. Yarıkararlı-yarıkararlı iyonizasyon: İki yarı kararlı parçacığın etkileşimi sonucu ortama elektron bırakılarak bir nötr bir de iyon oluşması durumudur.



3.3 Sıçratma

Fiziksel sıçratma işlemi, atomik boyutlardaki yüksek enerjili parçacıkların bir yüzeye çarpması ile oluşan momentum transferiyle bombardıman altındaki yüzeyden atomların fiziksel olarak buharlaştırılmasını kapsar. Bu yüksek enerjili parçalar genel olarak elektrik alanda hızlandırılmış gaz halindeki iyonlardır [9].

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 [9].

Yeniden üretilabilir kararlı buharlaştırma kaynaklarının geliştirilmesi ve manyetik alanda sıçratma tekniğinin icadına kadar sıçratma tekniği endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmamıştır [9].

Yüzeysel manyetik alanda sıçratma tekniği günümüzde en yaygın olarak kullanılan sıçratma yöntemidir. Manyetik alan kullanarak ikincil elektronların yüzeye yakın tutulmasıyla uygulanan bu yöntem 2. Dünya Savaşı’nda mikrodalga “klystron” tübünün gelişimi, 1959’da Kesaev ve Pashkova’nın ark tutma çalışması ve 1974’te Chapin’in yüzeysel manyetik alanda sıçratma kaynağını geliştirmesinden türemiştir. [9].

Sıçratma ile biriktirme işlemine genel olarak 10^{-2} Pa vakum seviyesinde iyon ışınlı, düşük basınçlı gaz ortamında başlanılır. Hedef malzemeden taban malzemeye parça transferiyle, 0.50-6.50 Pa basınç seviyesinde, gaz fazında oluşan çarpışmalarla ortaya çıkan parçacıkların termalizasyonu ile biriktirme işlemi gerçekleştirilir [9].

Bileşik bir hedef malzemenin sıçratılmasıyla veya saf bir malzemenin kısmi basınçlı reaktif gaz ortamında sıçratılmasıyla bileşik yapıda film elde edilmektedir. Kısmi gaz basıncıyla yapılan işleme reaktif sıçratma denilmektedir [9].

Genel olarak metal ve alaşım hedefler vakum altında ya da koruyucu atmosferde ve termomekanik işleme üretilirler. Refrakter alaşım hedefler toz Metalurjisi yöntemiyle sıcak preslenirler. Saf ve metal hedefler genel olarak %99.99 saflığa sahiptirler. Metal olmayan hedefler ise genelde daha az saflıkta olup %99.9 saflık mertebesinde bulunurlar. Toz presleme ile elde edilen yoğunluk teorik yoğunluktan daha azdır [7].

En yaygın kullanılan sıçratma yöntemi plazma tabanlı sıçratmadır. Plazma tabanlı sıçratmada ortamda plazma bulunmaktadır ve hedef malzeme plazmadan daha negatif bir gerilimde bulunur. Bu sayede pozitif iyonlar hedef malzemeye doğru hareket ederler. Düşük basınçlarda bu iyonlar, oluştukları enerji alanı ile yüzey arasındaki potansiyel fark tarafından elde ettikleri enerji ile yüzeye ulaşırlar. Daha yüksek basınçlarda ise iyonlar fiziksel çarpışmalar ve yük aktarması çarpışmalarına maruz kalırlar. Bu durumda hedef malzemeyi bombardıman altına alan iyonlar ve nötr atomların sahip oldukları bir enerji spektrumu oluşur. Hedef malzemedeki güç veya akım yoğunluğu genel olarak katot devresindeki akım ile ayarlanır [9].

İyon tabanlı sıçratmada ayrı bir iyonizasyon kaynağında bir iyon veya plazma ışını oluşturulur. Bu ışınlar oluşturuldukları bölgeden daha iyi bir vakum ortamında olan bir diğer odaya doğru hızlandırılıp aktarılırlar. Bu işlemde bombardıman enerjisi plazma tabanlı bombardımandan daha yüksektir ve yüksek enerjili nötr atomlar daha enerjilidir. İyon tabanlı sıçratmanın avantajı bombardıman yapan iyonların akısının ve enerjilerinin daha kolay ayarlanabilmesidir [9].

3.3.1 Soğuk katot doğru akım diyet sıçratması

Bir doğru akım diyet 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 [9].

Doğru akım diyet deşarjında kullanılan yüzey yalıtkan olursa yüzeyde yük toplanacaktır ve iyon bombardımanına engel olacaktır. Bu yüzden yüzeyin elektriksel iletkenliğe sahip olması gerekmektedir [9].

Doğru akım diyet düzeni vakum biriktirmesinden yavaş ve pahalı olmasına rağmen basit yapıda elektriksel iletken malzemeleri sıçratmak için kullanılır. Doğru akım diyet sıçratmanın avantajı plazmanın homojen olarak geniş bir bölgede oluşturulabilmesi ve bu sayede geniş alanlı buharlaştırma kaynağı oluşturabilmesidir [9].

3.3.2 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 diyet biriktirmenin aksine, düşük basınçta yüksek hızda biriktirmeye ve düşük taban malzeme sıcaklığında yüksek kaliteli ince film elde etmeye olanak sağlar [10].

Doğru akım diyet sıçratmada katottan çıkan elektronlar katot yüzeyinden uzaklaştırmaları 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 [10]. 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 [7,10].

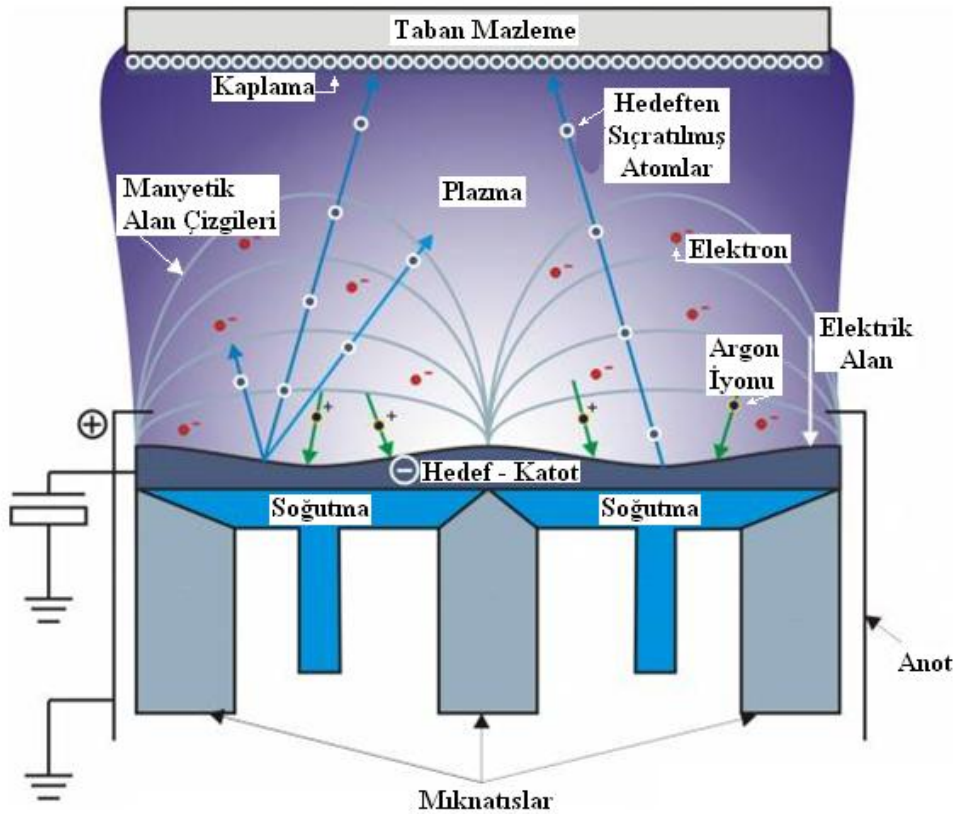
İyon ve elektronların hareketliliklerindeki farktan dolayı hedef katodun yüzeyine yakın, plazmaya göre daha negatif bir gerilimde süzülen pozitif bir iyon bölgesi oluşur. Katotta meydana gelen iyon bölgesinin etkisiyle iyonlar plazmadan çıkarılıp hedefe doğru hızlandırılırlar ve hedefe vurmak suretiyle momentum transferiyle malzemenin sıçratılmasına neden olurlar [10].

Sonuç olarak yüzeyin hemen üzerinde yoğunlaşan elektron akışı bu bölgedeki plazma yoğunluğunu da arttırarak daha verimli bir sıçratma yöntemi meydana getirir. Bu yöntem manyetik alanda sıçratma veya magnetron sıçratma adı verilir [9].

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 [10].

En yaygın kullanılan manyetik alan düz bir doğrultuda mıknatıs dizilimine sahip olan düzlemsel magnetrondur. 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 [9].

Doğru akım manyetik alanda sıçratma yöntemi Şekil 3.5'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Doğru akım manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi [11].

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 [9].

3.3.3 Reaktif sıçratma ile biriktirme

Elemental bir hedef malzemedan 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 [9].

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 [9].

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 [9].

Gaz miktarı ve kaplamadaki katkısı plazma deşarjının empedansı ile veya ortamdaki gazın kısmi basıncı ayarlanarak kontrol edilir [9].

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 [9].

3.4 İyonların Yüzeyle Etkileşimi

Sıçratma yönteminin daha iyi anlaşılması için iyonlarla yüzey arasındaki etkileşimi daha iyi anlamak gerekir. İyonların yüzeyle etkileşimleri şematik olarak Şekil 3.6'da gösterilmiştir [7].

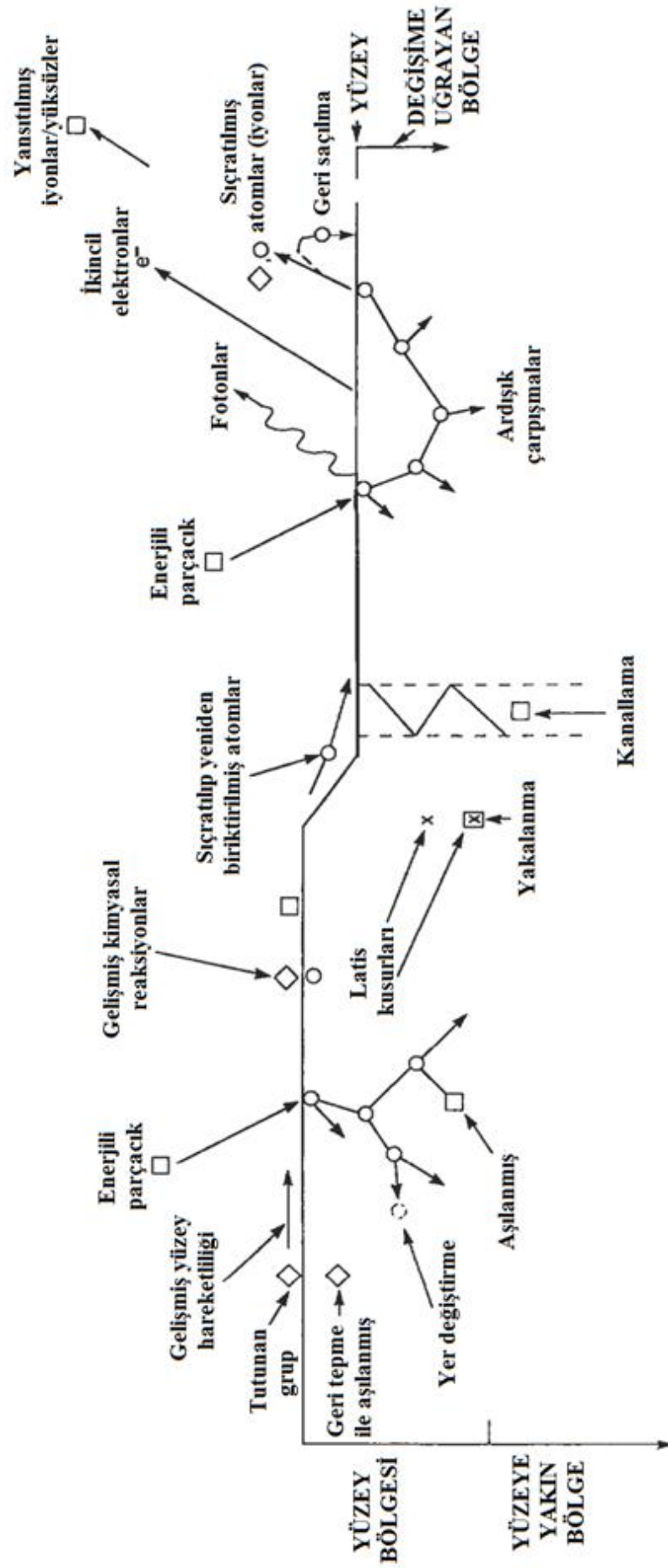
Yüzey üzerindeki tüm etkileşimler iyon ağırlığı, iyon yükü, iyon nerjisi ve etkileşime katkıda bulunan yüzey atomlarının yapısına bağlı olarak değişiklik gösterirler. Bu etkileşimlerin her biri, ince film işleme, biriktirme ve karakterizasyon teknikleri için kullanılmaktadır [7].

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 katkılanmak 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 yansıması 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 [7].

3.5 Film Oluşumu

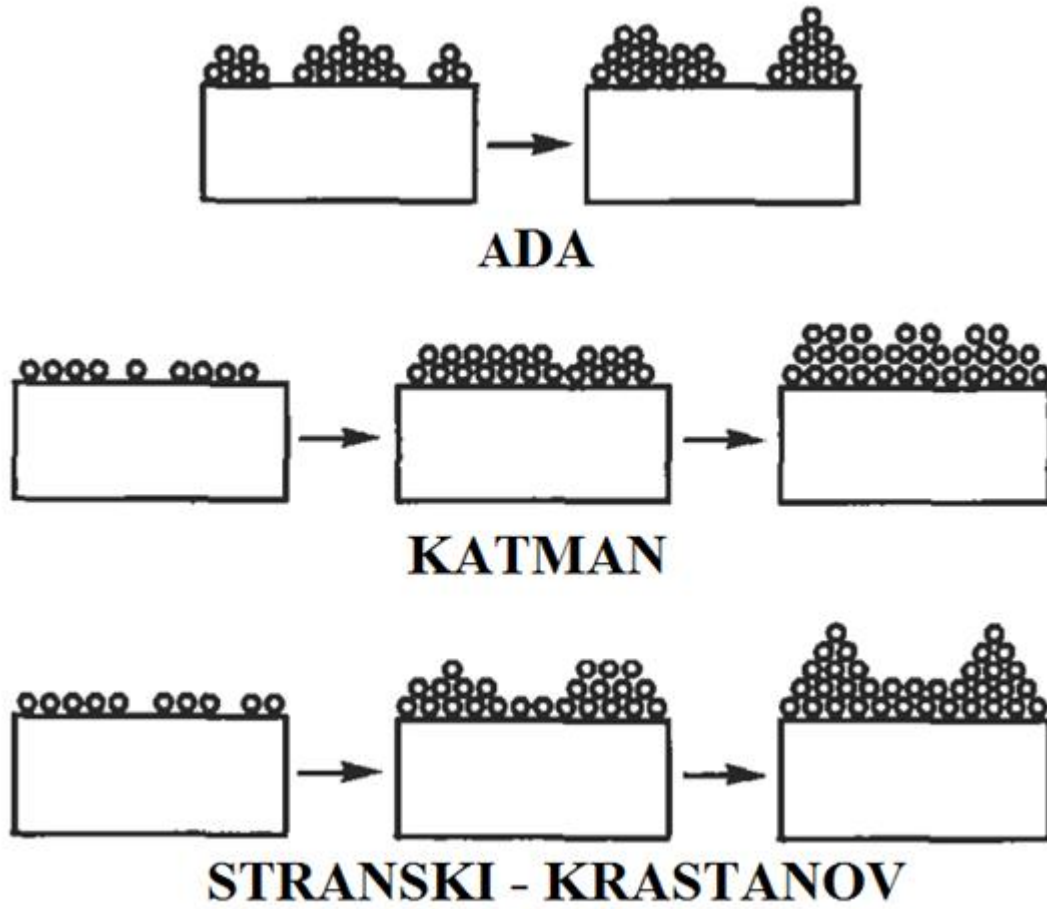
İnce film oluşumu çekirdeklenme ve büyüme olmak üzere iki aşamadan oluşur. Film oluşumunun ilk safhalarında, yeterli sayıda atomu veya molekülü bir araya gelip yoğunlaşarak taban malzeme üzerinde kalıcı bölge oluştururlar. Film oluşumları çoğunlukla bu çekirdeklenme aşamasında meydana gelir [7].

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 [7].



Şekil 3.6 : Enerjili parçacık bombardmanının yüzey ve büyüyen film üzerindeki etkisinin şematik gösterimi [7].

Film oluşumu üzerinde yapılan gözlem ve araştırmalar üç temel film oluşma modelini ön plana çıkarmıştır. Bunlar Şekil 3.7’de gösterildiği görünümüleriyle sırasıyla ada oluşumu (Volmer-Weber), katman oluşumu (Frank-van der Merwe) ve Stranski-Krastanov modelleridir. En küçük kararlı öbekler çekirdeklendiği ve üç boyutlu olarak büyüdükleri zaman ada oluşumu ve büyümesi başlamış olur. Bu durum yüzeye tutunan atom veya moleküllerin birbirlerine, yüzeye tutunduklarından daha sıkı tutunduklarında meydana gelir [7].

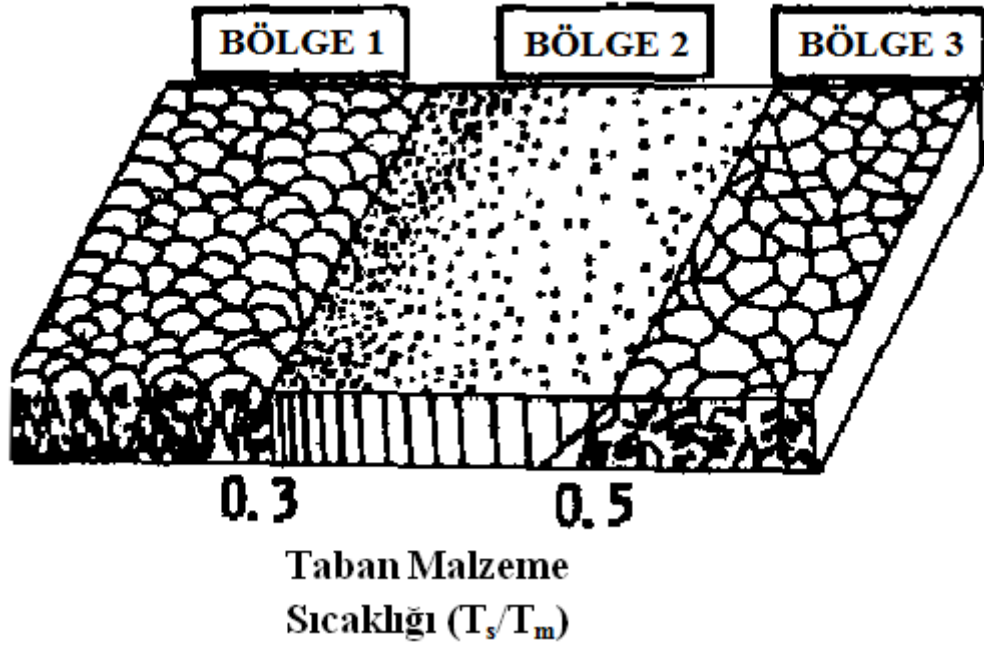


Şekil 3.7 : Üç temel film oluşma mekaniği [7].

3.6 Kaplamaların Tane Yapıları

Film yapısı ve biriktirme koşulları arasındaki ilişki üzerindeki kapsamlı araştırmalar yapısal bölge modellerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu bölge modelleri bir filmin mikroyapısı ve morfolojisini malzemesi ve adatom hareketliliğinden bağımsız olarak tahmin edilmesini sağlamaktadır. Movchan ve Demchishin ilk defa, buharlaştırmayla yapılmış Ti, Ni, W, ZrO₂ ve Al₂O₃ kaplamaların mikroyapılarının, normalize edilmiş

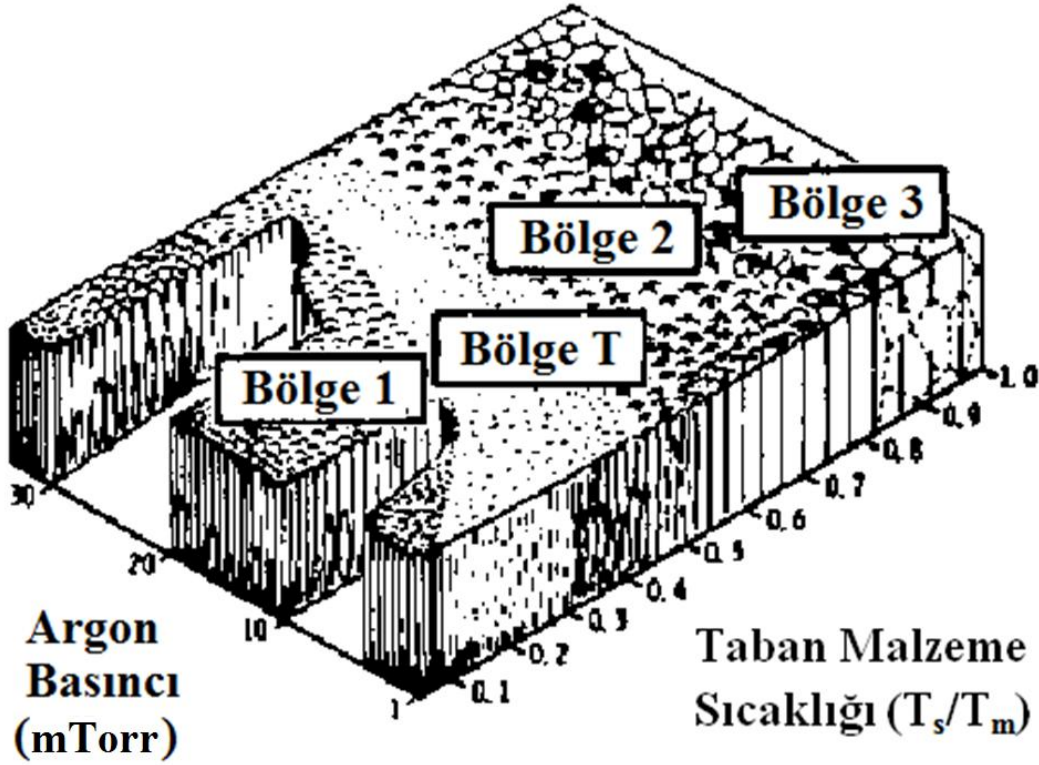
ya da düşürülmüş T_s/T_m sıcaklığı ile ilişkili olabileceğini gözlemlemişlerdir. Burada T_s biriktirme işlemi sırasındaki taban malzeme sıcaklığını, T_m ise kaplama malzemesinin ergime sıcaklığını temsil etmektedir. Bu şekilde tanımlanmış üç farklı yapı bölgesi Şekil 3.8’de gösterilmiştir [12].



Şekil 3.8 : Demchishin tarafından sunulan yapı bölgeleri modeli [12].

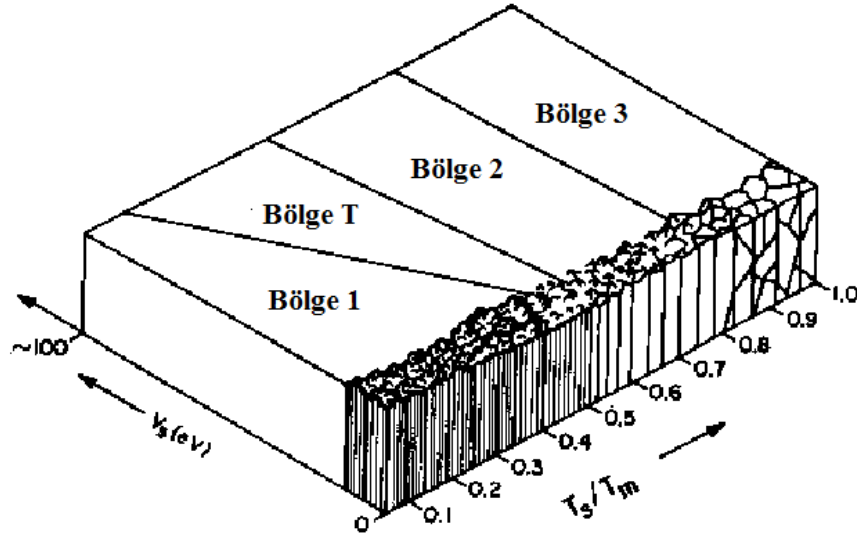
Bölge 1, $T_s/T_m < 0.3$ durumunda oluşur ve lifli yapıda kubbe tepeli taneleri olan, yüksek yoğunlukta latis süreksizliklerine ve gözenekli tane sınırlarına sahip bir yapıdır. Bu bölgedeki yapı, biriktirme işlemi sırasındaki düşük atom hareketliliği nedeniyle sürekli tane çekirdeklenmesi oluşması ve gölgelemenin etkisiyle oluşur. Bölge 1’deki taneler kaplama yönü ile aynı doğrultuda (genel olarak taban malzemeye dik) pozisyonda dizilmişlerdir. Bölge 2 yapısı, $0.3 \leq T_s/T_m < 0.5$ durumunda oluşur ve homojen dağılmış kolonsal tanelerden oluşur. Tane boyutları, T_s/T_m değeriyle beraber artar ve bu değerin yüksek olduğu durumlarda taneler film kalınlı boyunca uzayabilirler. Yüzey difüzyonunun başlamasının bu yapının oluşmasına neden olduğu öne sürülmektedir. Bölge 2’nin tanelerinin tepeleri yüzeysel yapıda olduğundan düz ve pürüzsüz ama mat bir yüzey oluştururlar. $T_s/T_m \leq 0.5$ durumunda oluşan Bölge 3’te ise kolonsal yapıya sahip taneler, yeniden kristallenme ve hacimsel difüzyon nedeniyle enine büyüme gösterirler [12].

Günümüzde kullanılan yapı bölge modeli Thornton tarafından derlenmiştir. Bu model, sıçratma gazı basınç değişkenini kullanımıyla, sıçratma bombardımanının neden olduğu hareketlilik prosesini dahil ederek bölge sınıflandırmasını geliştirmiştir. Thornton'un geliştirdiği model Şekil 3.9'da gösterilmiştir [12].



Şekil 3.9 : Thornton tarafından geliştirilen model [12].

Bu modelde Bölge 1 ve Bölge 2 arasında geçiş bölgesi olarak Bölge T eklenmiştir. Bu bölgede boşluksuz, sık yapıda dizilmiş ve tam belirgin olmayan lif şeklinde taneler oluşur. Bölge T filmleri Bölge 1 ve Bölge 2'den daha yoğundur ve daha düzgün yüzey morfolojisine sahiptir. Yoğunluktaki ve yüzeydeki bu değişim, iyon bombardımanı sırasında elastik olarak geri saçılan gaz atomlarının gaz basıncını azaltması nedeniyle meydana gelir. Messier ve arkadaşları, inceledikleri yapılarda Bölge 1 ve Bölge T sınırlarının lineer olmadığını gözlemlemişlerdir. Taban malzemeye uygulanan bias potansiyeli, gaz basıncının bir fonksiyonu olarak değişmekte ve bu sınırların değişmesine neden olmaktadır. Termal ve bombardımandan kaynaklanan etki ile geliştirilmiş bölge modeli Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bombardıman enerjisindeki artış Bölge T'nin Bölge 1'e doğru genişlemesine neden olmaktadır. Araştırmalar, Bölge 1 ve Bölge T içindeki kolonsal yapının içeriğinin polikristal veya amorf olabileceğini ortaya koymuştur [12].



Şekil 3.10 : Bombardmanın ve sıcaklığın etkisiyle şekillenmiş bölge modeli [12].

Bir ince filmin fiziksel yapısı, büyüme sırasındaki adatom hareketliliğine bağlı olabilir. Adatomların enerji kaynakları sıcaklık, akısı ve enerji dağılımı basınca bağlı olan enerjili parça bombardımanı ve kimyasal etkilenmiş hareketlilik olmak üzere üç tanedir. Kimyasal etki buhar parçacıklarının yüzeye tutunma veya yüzeyden ayrılma ve adatom bağ gücü gibi doğal karakteristikleriyle ortaya çıkar. Kimyasal etki henüz yapı bölge modelleri dahilinde incelenmemiştir [12].

3.7 Sıçratma Verimi

Sıçratma, iyon çarpmasının etkisiyle hedef malzemede seri şekilde çarpışmaların meydana gelmesiyle bu malzemeden atomların ayrılmasına verilen isimdir. Katı içerisindeki atomlar birbirlerine karmaşık atomlar arası bağlarla bağlı olmalarına rağmen sıçratma teorisi atomların ikili elastik çarpışmalarına dayanır. Sıçratma verimi S , sıçratmayı karakterize eden en temel değişkendir ve enerji transferiyle ilgilidir. Hedef malzemenin yüzeyine ulaşan her bir iyon (birincil iyon) karşılık o malzemeden ayrılan atom veya molekül sayısı sıçratma verimi olarak tanımlanır [7].

Sıçratma verimli aşağıdaki parametrelerle doğru orantılı olması beklenir [7]:

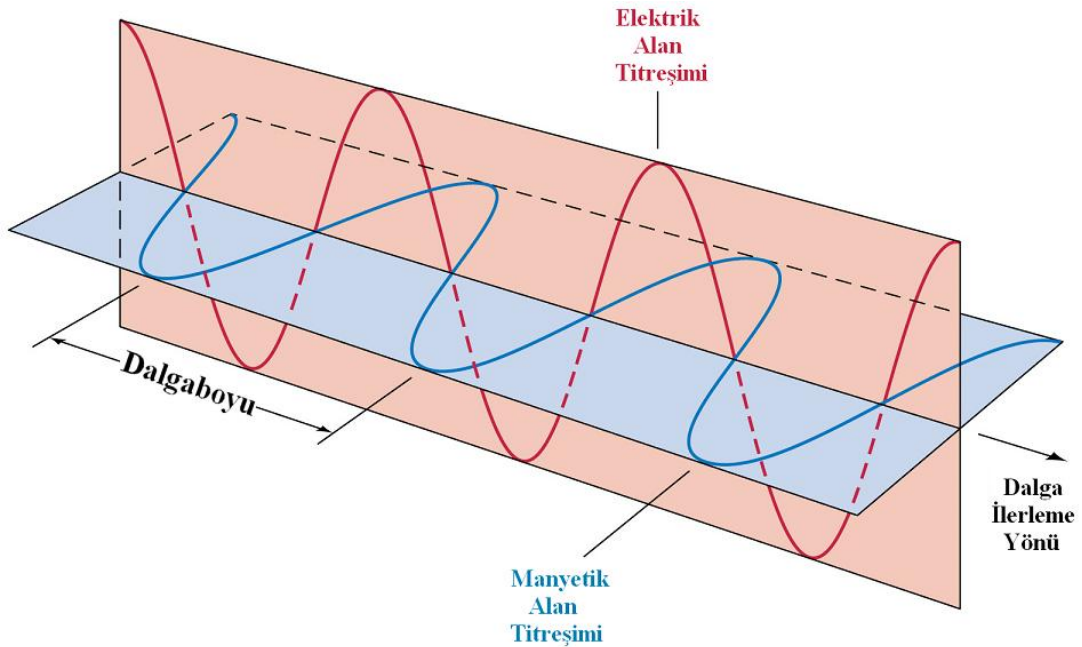
1. Birincil çarpışma başına yüzeyde yer değiştiren atom sayısı.
2. Sıçratmaya katılan bu atomları barındıran atomik katman sayısı.
3. Birim alan n_A başına düşen hedef atom sayısı.
4. Sıçratma gazının ağırlığı ve enerjisi.

4. İNCE FİMLERİN OPTİK ÖZELLİKLERİ

4.1 Genel Yaklaşım

İnce film ve ince film sistemlerinin optik davranışlarının anlaşılması için malzemelerin optik sabitlerinin, bunların nereden geldiklerinin ve büyüklüklerinin ne olduğu ve bunların filmlerin üretim şekilleriyle nasıl bağlantılı olduğunun anlaşılması gerekir. Filmlerin tüm optik özelliklerin ortak özelliği, hepsinin film üzerine gelen elektromanyetik radyasyon ile film malzemesindeki elektronların etkileşimiyle ilgili olmasıdır. Optik özellikler elektronik yapı hakkında bilinenler ve bu yapının atomik yapı, bağ yapısı, safsızlıklar ve yapı kusurlarıyla ilişkisi olarak özetlenebilir [7].

Işık bir elektromanyetik radyasyondur ve lineer polarize durumda birbirine dik elektrik ve manyetik alanların salınımından oluşur. Lineer polarize elektromanyetik dalga de gösterilmiştir [13].



Şekil 4.1 : Lineer polarize elektromanyetik dalga [13].

Tek ve çok katlı filmlerden yansıyan ve geçen ışınların şiddetleri ve genlikleri Maxwell eşitlikleri ile durumlarına uygun sınır şartları kullanılarak hesaplanır. Bu

eşitlikler karmaşık sonuçlar verir ve filmlerin konumları ve özelliklerine göre detaylı hesaplamalar gerektirir [14].

Elektromanyetik radyasyon malzeme içersinde, ortamda yükler bulunduğundan, boşlukta olduğundan farklı şekilde yayılma gösterir. Bu nedenle dalga hızında ve şiddetinde değişim olur. Bu değişim kompleks kırma indisiyle (N) gösterilir [7]:

$$N = n - ik \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte n kırılma indisidir. k ise soğurma indisidir ve “sönüm katsayısı” olarak isimlendirilir [7].

Hareket yönü x olan bir dalganın elektrik alanının uzaya bağlı olan parçası aşağıdaki gibi gösterilir [7]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{i2\pi N x}{\lambda}\right) = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{2\pi k x}{\lambda}\right) \exp\left(-\frac{i2\pi n x}{\lambda}\right) \quad (4.2)$$

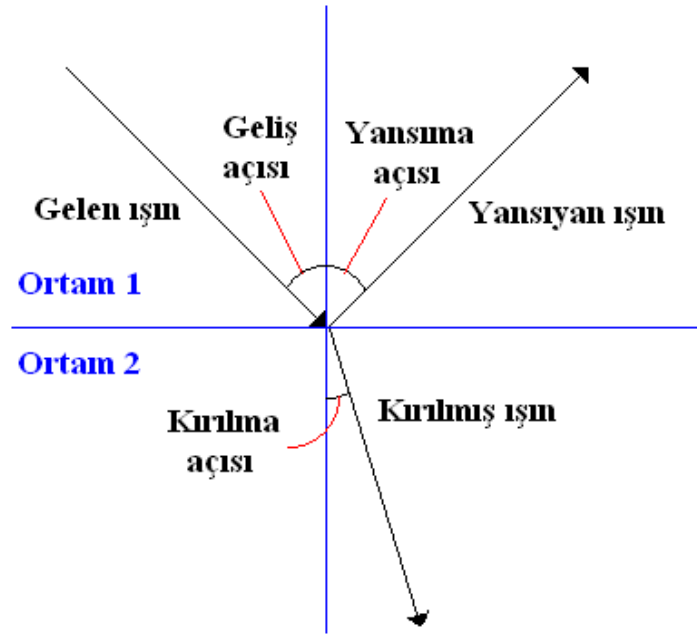
Bu denklemden ε_0 elektrik alan büyüklüğü ve λ dalgaboyudur. Serbest uzayda kırma indisi bir, dalga hızı da ışık hızı olan c 'dir. Boş olmayan ortamda ise bu değerler sırasıyla n ve c/n olarak değişir. Bu denklemin reel kısmı olan $\exp(-2\pi k x / \lambda)$ ifadesi, malzeme içindeki soğurma olayları nedeniyle meydana gelen eksponansiyel zayıflamayı ifade eder. İfadenin sanal kısmı n sayısını barındırır ve soğurma olmadan yayılımı ifade eder. N ifadesi malzemeden malzemeye farklılık gösterir. Buna örnek vermek gerekirse yüksek soğurmaya sahip malzemelerde kırılma indisi, sönüm katsayısına göre düşük olacaktır. Optik uygulamalarda kullanılmak üzere hazırlanmış dielektrik filmlerde is soğurma çok daha az olduğundan sönüm katsayısı kırılma indisine göre ihmal edilebilecek kadar küçük olacaktır. ε ifadesini kompleks eşleniği ile çarptığımız zaman şiddetin zayıflamasını ifade eden $I \propto \varepsilon_0^2 \exp(-4\pi k x / \lambda)$ eşitliği ortaya çıkacaktır. Buradan ortaya çıkan ifade şu şekildedir [7]:

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (4.3)$$

Bu ifadede I gelen radyasyonun şiddetidir ve genel olarak W/cm^2 birimiyle gösterilir. α ise soğurma katsayısıdır ve $4\pi k / \lambda$ şeklinde de ifade edilir [7].

Malzeme üzerine gelen toplam radyasyonun bir kısmı yüzeyden yansır (R), bir kısmı da alt yüzeye kadar geçer (T). Geri kalan radyasyonun bir kısmı elektronik soğurmada (A) ve yüzey ile hacimsel kusurlar nedeniyle oluşan saçılma (S)

kaybolur [7]. Elektromanyetik dalganın iki farklı ortam arasındaki davranışı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Sınır bölgesindeki gelen, geçen ve yansıyan EM dalga [14].

Yüzey pürüzlülüğü, malzeme içi sınırlar ve porozite, iğne deliği, mikro çatlak, tanecik birleşmesi ve safsızlıkların meydana getirdiği yoğunluk farklılıkları, saçılmaya sebep olan etkenlerdir. Buradan yola çıkarak şu ifade elde edilir [7]:

$$R + T + A + S = 1 \quad (4.4)$$

Boş olmayan ortamdan geçen ışık için kırılma indisine n_0 ve geçirgen filmin indisine n_1 olarak tanımlarsak yansıtma oranını aşağıdaki şekliyle ifade edebiliriz [7]:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \quad (4.5)$$

Filmin şeklinde bir soğurma indisine sahip ise bu ifade aşağıdaki gibi olur [7]:

$$R = \frac{(n_0 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2} \quad (4.6)$$

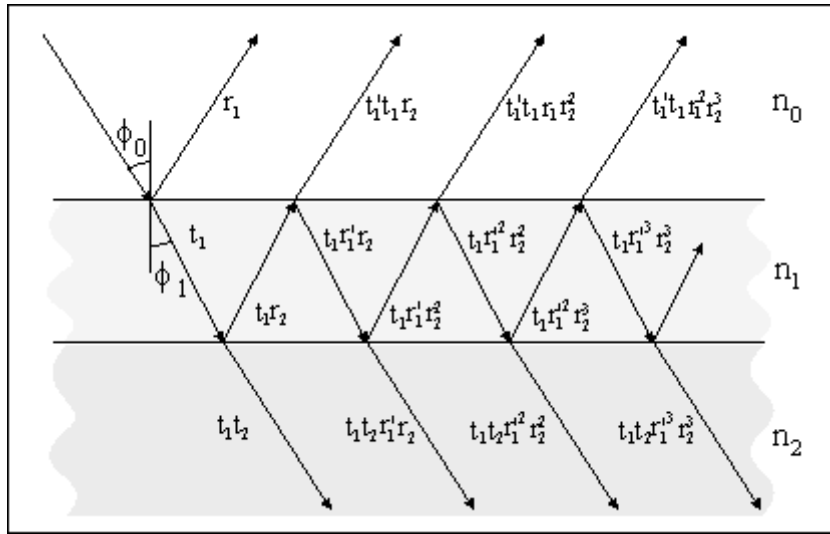
Işık filmin üzerine yüzey normali doğrultusuna belirli bir açı yapacak şekilde geldiğinde ise yansıma için tam doğru ifadeler karmaşıklaşır. Bu ifadeleri elde etmek için belirli yaklaşımlar uygulanır. Soğurucu malzemelerin pek çoğu için $n_2 + k_2 \gg 1$ olduğundan yansımalar için denklemler aşağıdaki hallerini alırlar [14]:

$$R_P = \frac{(n^2 + k^2) \cos^2 \varphi_0 - 2n \cos \varphi_0 + 1}{(n^2 + k^2) \cos^2 \varphi_0 + 2n \cos \varphi_0 + 1} \quad (4.7)$$

$$R_P = \frac{(n^2 + k^2) - 2n \cos \varphi_0 + \cos^2 \varphi_0}{(n^2 + k^2) + 2n \cos \varphi_0 + \cos^2 \varphi_0} \quad (4.8)$$

Bu denklemde φ_0 gelen ışının yüzey normali ile yaptığı açıdır.

Tek bir film için ışığın yansıması ve geçmesi Şekil 4.3’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Tek bir film için ışığın yansımaları ve geçmesi. t ve r ile ifade edilen katsayılar yansıma ve geçirme oranlarını tayin eden Fresnel katsayılarıdır [14].

Yansıyan ve geçen tüm ışınların toplamı toplam yansıma ve geçirme değerlerini verir. Bu işlemler sonucunda toplam yansıma R ve toplam geçirme T'yi ifade eden eşitlikler aşağıda gösterildikleri gibi olurlar [14],

$$R = \frac{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) - 4n_0n_1n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 + n_2^2)\cos(2\delta_1)}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) + 4n_0n_1n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 + n_2^2)\cos(2\delta_1)} \quad (4.9)$$

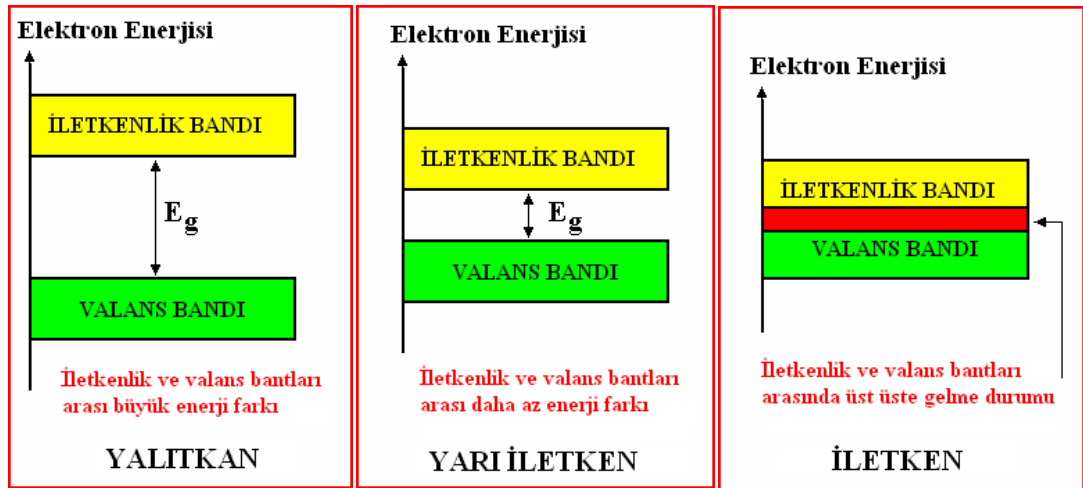
$$T = \frac{8n_0 n_1^2 n_2}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) + 4n_0 n_1^2 n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2)\cos(2\delta_1)} \quad (4.10)$$

4.2 Optik Sabitler ve Yasak Bant Aralığının Hesaplanması

Bir katı içerisinde bulunan atom ve moleküllere ait elektronların bulunduğu enerji seviyelerine bant adı verilir. Bu enerji bantları boş, dolu, kısmen dolu ve yasak

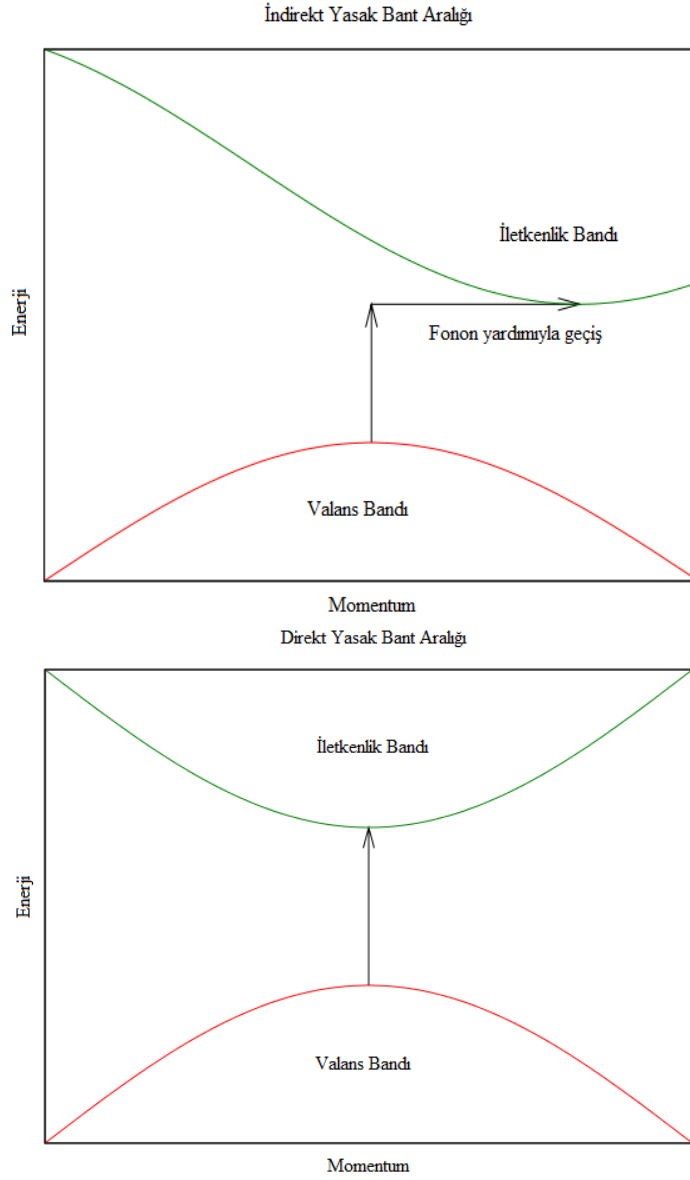
olarak sınıflandırılabilir. Enerji seviyeleri en düşük olandan başlayacak şekilde elektronlarla doludur. Yüksek enerji bantlarında buluna elektronlar iletkenliğe katkıda bulunabilirler. Elektron bulunduran en yüksek banda valans bandı adı verilir. Valans bandı dolu veya kısmen dolu olabilir. Valans bandındaki boş konumlar elektrik akımına katkıda bulunurlar. İletim (iletkenlik) bandı doldurulmamış konumlara sahip olan en düşük enerji bandıdır [15].

Yasak bant aralığı iletim bandının en düşük noktası ile valans bandının en yüksek noktası arasındaki enerji bandına verilen isimdir. Malzeme içerisindeki boş ve dolu iletim bantları, yasak bantlara karışabilir. Yasak bant aralığının genişliği malzemenin yalıtkan, yarı-iletken veya iletken olma durumunu belirler. Yarı iletkenlerde valans bandındaki elektron yeterli miktarda enerji kazanırsa iletkenlik bandına geçebilir ve malzemenin iletken davranış sergilemesini sağlar [15]. Bu malzemelerdeki enerji seviyeleri ve yasak bant aralıkları Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Malzeme tipine göre bant aralığı durumları [16].

Bir yarı-iletken direkt ve indirekt olmak üzere iki farklı tür bant aralığı yapısına sahip olabilir. Direkt bant aralığında valans bandının en yüksek noktası ile iletim bandının en düşük noktası tek bir doğrultu üzerinde hizalanmıştır. Bu tip yarı-iletkenlerde elektron valans bandından iletim bandına, momentumunda önemli bir değişiklik olmadan, yalnız foton emisyonu ile geçebilmektedir. İndirekt yasak bant aralığında ise söz konusu noktalar aynı hizada yer almadığından elektronun valans bandından iletim bandına geçmesi için foton emisyonuyla beraber fonon emisyonuna da ihtiyaç duyulmaktadır. Direkt ve indirekt yasak bant aralıklarına ait enerji bantları Şekil 4.5’te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Direkt ve indirekt yasak bant aralıklarının şematik gösterimi [17].

Yasak bant aralığı optik sabitler yardımıyla hesaplanabilir. Kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) ışığın yansıtma teorisiyle hesaplanır. Bu teoriye göre, ışığın bir ince filmde yansıtma değeri Fresnel katsayıları cinsinden ifade edilebilmektedir. Bir arayüzün yansıtma değeri R aşağıdaki eşitlikle verilir [18]:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (4.7)$$

Soğurma katsayısı (α) aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir [18]:

$$\alpha = 4\pi k / \lambda \quad (4.8)$$

Bu ifadede λ dalga boyudur.

Optik yasak bant aralığı için empirik ifadeler uzatılmış konumların ekstrapolasyonu ile tanımlanabilir. Tauc modeli, amorf yarı iletkenlerin optik yasak bant aralığını hesaplamak için sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemde iletkenlik ve valans bandı konumlarının karekök dağılımları olduğu ve amorf yarı iletkenliklerin düzensiz karakteristiklerinin momentum korunumunu rahatlattığı (öyle ki momentum matris elementinin foton enerjisinden ($h\nu$) bağımsız olduğu) varsayılır. Bu yaklaşımla Tauc, Grigorocivi ve Vancu, E_g^{Tauc} şeklinde bir optik yasak bant aralığı tanımlamış ve bu tanım ince filmlerin optik özelliklerini inceleyen kişilerce sıkça kullanılmıştır [19].

Biriktirilen ince filmlerin yasak bant aralıklarını belirlemek için Tauc yöntemi kullanılmıştır. Tauc yöntemi eşitliği [19] aşağıda gösterildiği gibidir:

$$\sqrt{\alpha(h\nu)\nu} = C_{Tauc} (h\nu - E_g^{Tauc}) \quad (4.9)$$

Burada α soğurma katsayısı, $h\nu$ foton enerjisi, C_{Tauc} bu ekstrapolasyondaki Tauc sabiti, E_g^{Tauc} bunlara karşılık gelen Tauc aralığıdır [19].

Kristal yapıda bulunan SiCN filmler 3.8 eV direkt yasak bant aralığına sahiptirler [20]. Ancak bu çalışmada kristalleşmenin başlaması beklenen 550°C sıcaklık seviyesi ile karşılaştırıldığında [21] çok düşük sayılabilecek sıcaklıklarda çalışıldığından genel olarak amorf yapılar elde edilmiştir. Genel olarak amorf yapıda bulunan ve içinde C, SiC, CN ve SiN yapıları bulunduran SiCN filmler için daha düşük olan indirekt bant aralığı yapısı ön plana çıkmaktadır [22]. Bu nedenle bu çalışmada SiCN filmlerin indirekt yasak bant aralıkları ele alınmıştır.

5. AKTİVASYON ENERJİSİ

Pek çok malzemede genel olarak yüklü veya iyonize olmuş arayer safsızlıkları bulunmaktadır. Bu arayer iyonları bir elektrik alanı altında boşluklar arasında difüzyon gibi işlemlerle hareket edebilirler. Arayerde bulunan pozitif bir iyon, bir elektrik alanı etkisine girdiğinde, üzerine etkili bir kuvvet uygulanacağından, elektrik alan yönünde komşu bir arayere hareket etmeyi tercih eder. Yüğü q_{iyon} şeklinde olan pozitif bir iyon, elektrik alan yönünde d kadar bir mesafe atlarsa, iyonun potansiyel enerjisi $q_{iyon}Ed$ kadar azalmış olacaktır. Buna karşılık eğer iyon aynı d mesafesini ters yönde gitmeye çalışırsa, elektrik alana karşı aynı $q_{iyon}Ed$ değerinde iş yapmak zorunda kalacaktır [23].

Katılar içerisinde stokiyometriden dolayı meydana gelen sapmalar, hareketli elektronlar, boşluklar ve nokta hataları oluştururlar. Bu nedenle katı ortamda iletkenliğe katkıda bulunacak pek çok elektron, boşluk ve iyon, yani yük taşıyıcılar bulunur. Bir malzemenin iletkenliği σ , tüm yük taşıyıcılarının katkısıyla meydana gelen iletkenlik mekanizmasıyla ifade edilir [23]:

$$\sigma = \sum q_i n_i \mu_i \quad (5.1)$$

Bu denklemde i tipi şarj taşıyıcılarının konsantrasyonu n_i , taşıdıkları yük q_i ve hareketlilikleri μ_i ile ifade edilmiştir. Denklem 5.1'deki baskın olan iletkenlik mekanizmasının ne olduğunu anlamak genel olarak zordur. Ayrıca baskın mekanizma, sıcaklık, bileşim ve ortam koşulları ile değişebilmektedir [23].

Doğrudan iletken olmayan katı malzemelerde, elektriksel iletkenlik, yük taşıyıcılarının sızma hareketleri teorisiyle açıklanmaktadır. Yük taşıyıcılar enerji aldıklarında malzeme üzerinden geçmeye çalışan akıma dolgu görevi görmeye başlarlar, yani bölgesel olarak akımı sızdırırlar. Belirli bir enerji seviyesinden sonra bölgesel sızmalar zincirleme olarak etkileşir ve makroskopik uzunluklarda iletim yolları meydana getirirler. Dolgu oluşturan elemanların sayısı arttıkça iletken yolların sayısı da artar ve yük taşıyıcı parçacıkların aralarındaki ortalama mesafe azalmaya başlar. Bu sayede malzemenin direnci azalır. Sıcaklık artışıyla yük

taşıyıcılar, kazandıkları enerji yardımıyla sıçramalar gerçekleştirerek iletkenliğe katkıda bulunurlar. Bu sayede sıcaklık artışıyla iletkenlik artmış olur [24].

Özellikle yalıtkan davranış gösteren katılarda iletkenliğin sıcaklığa bağlılığının çoğunlukla Arrhenius eşitliği benzeri olduğu saptanmıştır [23].

Aynı şekilde ince filmlerin elektriksel iletkenliklerinin (σ) sıcaklığa (T) bağlı olan fonksiyonları Arrhenius eşitliği ile ifade edilir ve aşağıdaki gibi gösterilir [25]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{kT}\right) \quad (5.2)$$

Bu denklemde ön eksponansiyel faktörü, iletkenliğin aktivasyon enerjisi, Boltzmann sabiti ve mutlak sıcaklıktır. İletkenliğin aktivasyon enerjisi, sıcaklığa bağlı olarak, sızma akımını (yani iletkenliği) oluşturmak için yük taşıyıcılara verilmesi gereken enerji olarak özetlenebilir [24]. Aktivasyon enerjisi $\ln(\sigma)$ değerine karşılık $1000/T$ grafiği çizilerek bulunur [25].

Çizilen bu grafiğin eğimi $1000E_\sigma/k$ değerini verecektir [23]. Buradan,

$$E_\sigma = n(0,08614) \quad (5.3)$$

denkleminde n ile gösterilen grafik eğim değeri yerine konularak aktivasyon enerjisi eV cinsinden hesaplanır [23].

6. SERTLİK

Bir malzemenin sertliği o malzemenin deformasyona karşı direncinin ölçüsüdür [12]. Sertlik, mekanik, optik ve elektronik uygulamalarda kullanılan filmlerin önemli bir malzeme özelliğidir [7]. Aşınma direncini etkiler ve yüzey filmlerinin temaslarındaki sürtünme ve kaygan hale getirme üzerinde önemli bir rol oynar [7].

Sertlik genel olarak belirli bir yük altında duruma uygun tasarlanmış bir indentörün yüzeyde meydana getirdiği kalıcı deformasyonun (indentasyon) büyüklüğü ile ölçülür. Bu ölçüm ağırlıkla ilgili olan plastik deformasyon hakkında belirleyici değildir. Bir malzemenin sertliği tane boyutu, faz dağılımı, yapı kusurları, mikroyapı, yoğunluk, sıcaklık ve deformasyon hızı gibi unsurlardan etkilenir. Filmler ve kaplamalar için taban malzemenin deformasyona olan etkisi ölçümleri etkileyebilir. Bu nedenle anlamlı sonuç alınması için kural olarak indentasyon derinliği film kalınlığının onda birini geçmemelidir [12].

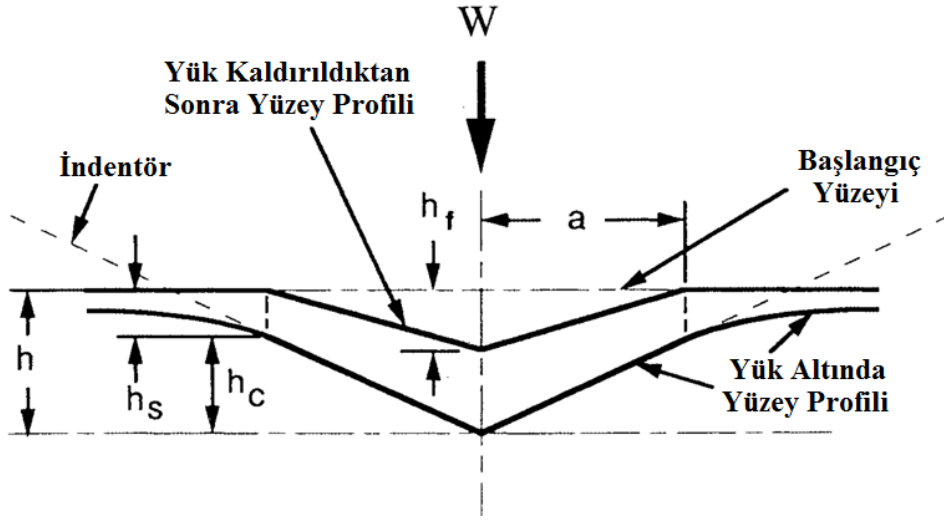
Değiştirilmiş yüzeylerin ve filmlerin mikrosertliklerinin ölçümü genel olarak mikroindentasyon teknikleriyle yapılır. Maksimum delme derinliğinin indentörün yüzeyden ayrılmasından sonra geride kalan derinliğe oranlanmasıyla malzemenin elastik özellikleri de belirlenebilir [12].

Mühendislik uygulamalarında kullanılan en önemli sertlik ölçüm yöntemleri Vickers, Knoop, Brinell ve Rockwell'dir. Bu yöntemlerden Rockwell hariç hepsinde malzemeye ait sertlik değeri, uygulanan yükün indentasyon sonucunda yüzeyde bırakılan iz boyutuna oranlanması ile elde edilir. Yüzeyde bırakılan izin boyutu optik mikroskop ile ölçülür. Oluşan izin büyüklüğü ve köşegen boyutlarının belirginliği ölçümde oluşabilecek hata oranını düşürür. Ancak ince filmlerde malzeme kalınlığının ince olması düşük kuvvetlerde hassas çalışmayı gerektirmektedir. Bu nedenle 1980 yılından sonra “derinlik algılayan indentasyon” adında yeni bir sertlik ölçme tekniği geliştirilmiştir. Bu teknikte uygulanan kuvvet ve derinlik, yükleme ve yük kaldırma boyunca ölçülmektedir. İndentörün (batıcı ucun) şekli bilindiğinden elde edilen derinlik ölçümünden yüzeyde meydana gelmiş olan izin alanı kolayca

hesaplanır. Bu işlem nanometre mertebesinde hassasiyetle yapıldığından nanoindentasyon adını almıştır [26].

Nanoindentasyon işlemi sırasında genel olarak dört kenarlı Vickers ve üç kenarlı Berkovich piramitleri gibi indentör uçlar kullanılmaktadır [27].

Nanoindentasyon işlemi sırasında oluşan yüzey değişimi Şekil 6.1’de şematik olarak gösterilmiştir .



Şekil 6.1 : Nanoindentasyon işleminin şematik gösterimi [26].

7. DENEYSEL ÇALIŞMA

7.1 Kaplama Cihazı

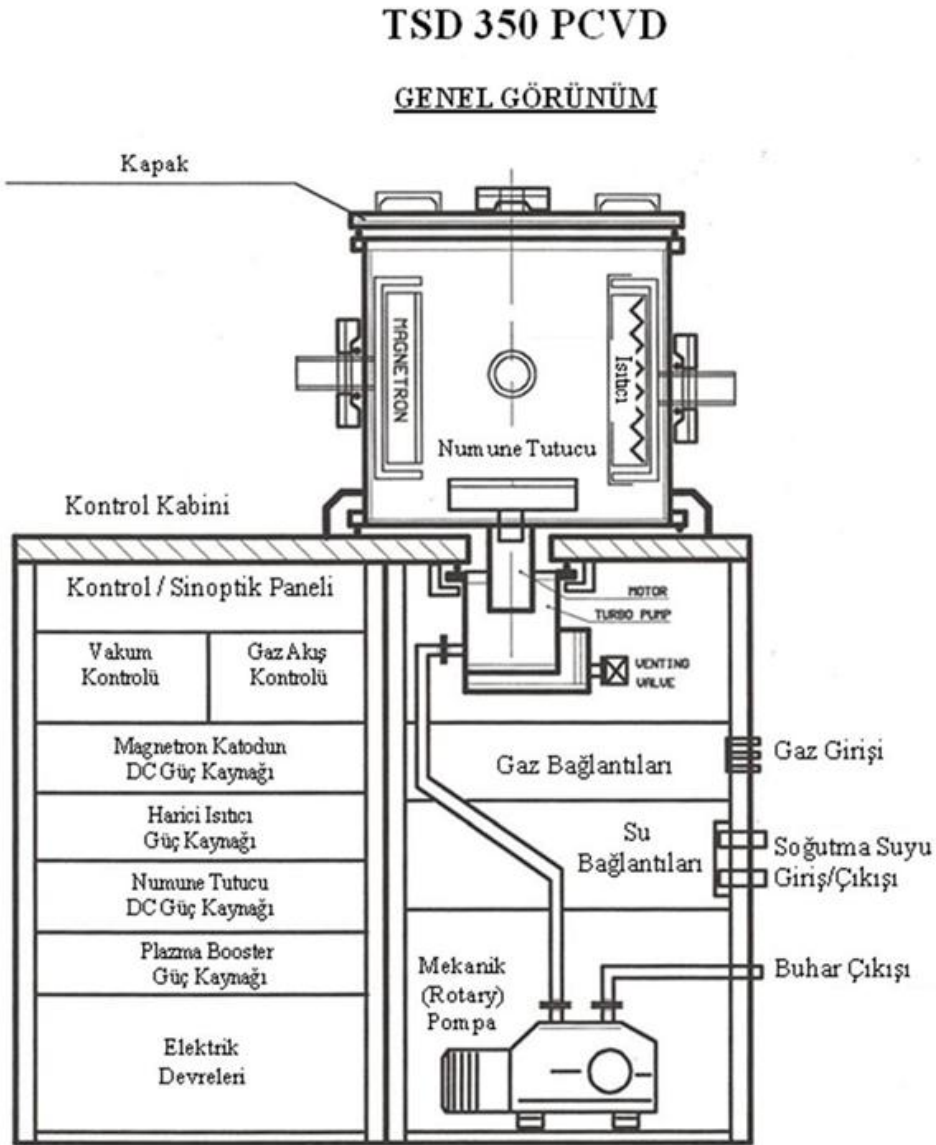
Farklı bileşenlerde silisyum karbür ve silisyum karbonitrür ince filmleri taban malzemeler üzerinde biriktirme işlemi için Fransız H.E.F. firmasının üretmiş olduğu TSD 350 PCVD model hibrid kaplama makinesi kullanılmıştır. Cihazın temel özelliklerini şöyle sıralamak mümkündür;

- i. FBB ve PDKBB modlarında çalışabilme
- ii. Üretim parametrelerinin kontrolü ile tekrarlanabilen kaplamalar
- iii. Damlacıksız ve yoğun kaplamalar elde edebilme imkanı
- iv. Düşük sıcaklıklarda kaplama yapabilme olanağı
- v. Kolaylıkla modifiye edilebilme özelliği

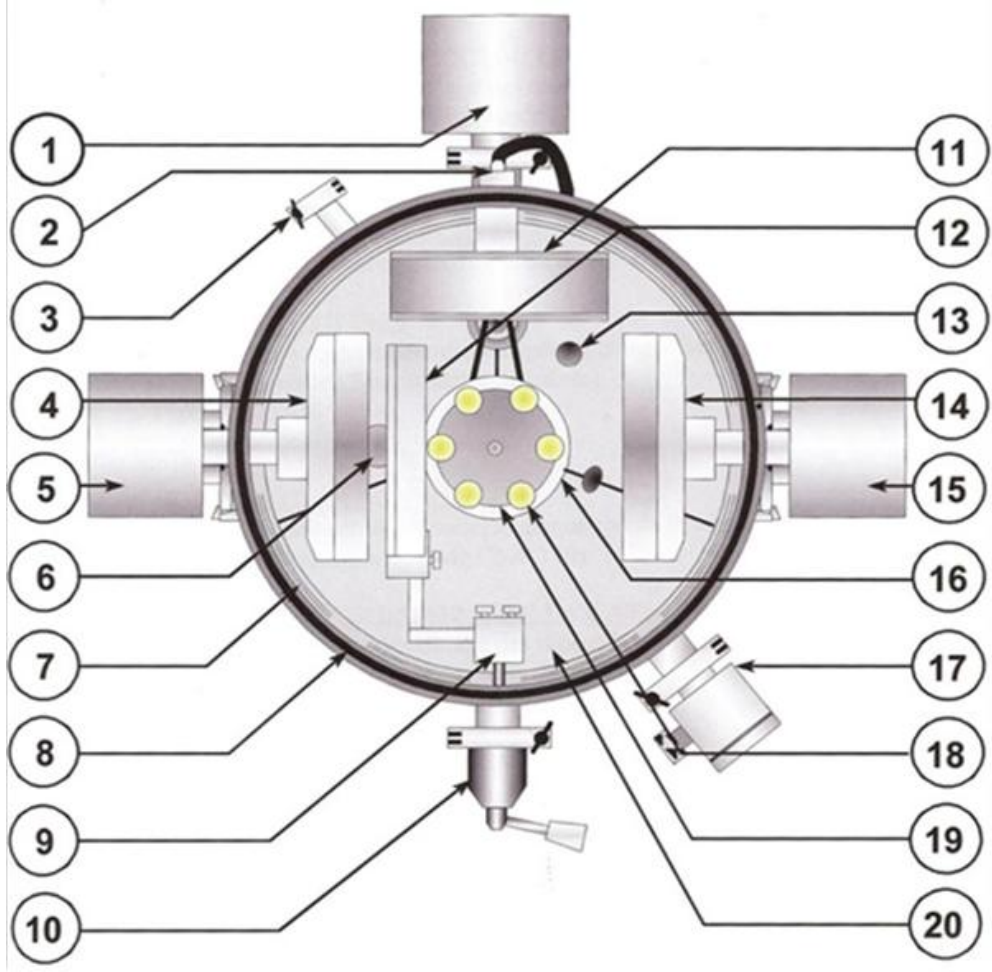
Cihazın temel bileşenlerini de şu şekilde sıralayabiliriz;

1. 350 mm çapında ve 300 mm derinliğe sahip paslanmaz çelik vakum hücresi
2. Su soğutmalı ve değiştirilebilir kılıfı olan duvarlar
3. Saatte 4 m³ vakum kapasiteli döner pompa
4. Termokupl vakum ölçer PIRANI (1000 mbar'dan 10⁻³mbar'a kadar)
5. Soğuk katot vakum ölçer PENNING (10⁻³ mba'dan 10⁻⁹mbar'a kadar hassas vakum kontrolü)
6. 125 L/sn vakuma alma kapasiteli Varian Turbomoleküler pompa
7. Plazma booster ve 2500 W DC güç kaynağı ile manyetik alanda sıçratma
8. Motora bağlı ve yalıtımlı, 1000 W DC güç kaynağı ile bias uygulanabilen, numune tutucu
9. 500 W düşük voltajlı güç kaynağı olan PID kontrollü Radyan ısıtıcı.

10. Termokupl ile sıcaklık kontrolü
11. 3 kanallı gaz akış kontrolü
12. Swagelok marka paslanmaz çelik valflar ve tüp bağlantıları
13. Plazma emisyon yoğunluğu ile reaktif gaz akışını kontrol eden optik sistem
14. 150 mm çapında ve 7 mm kalınlığında katot için su soğutmalı katot tutucu
15. Açılıp kapanabilen gözetleme sistemi
16. Sinoptik panelli kontrol kabini
17. Otomatik vakuma alma sistemi



Şekil 7.1 : TSD 350 PCVD hibrid kaplama makinesinin önden şematik gösterimi.



Şekil 7.2 : TSD 350 PCVD hibrid kaplama makinesinin kaplama odasının üstten şematik gösterimi.

1. Isıtıcı bağlantıları kutusu
2. Su girişi
3. Opsiyonel ölçüm girişleri
4. CMP-150 magnetron katot
5. Katot bağlantıları kutusu
6. Optik regülasyon penceresi
7. Vakum odası yanal koruma kalkanı
8. Conta
9. Katot kalkanı bağlantısı
10. Katot kalkanı kolu
11. Isıtıcı

12. Katot kalkanı
13. Termokupl koruyucusu
14. Plazma jeneratörü
15. Plazma jeneratörü bağlantıları kutusu
16. Numune taşıyıcı
17. Gözlem penceresi
18. Numuneler
19. Numune taşıyıcı sistemi
20. Vakum odası taban koruma kalkanı

7.2 Taban Malzeme Hazırlanması

İnce film kaplama çalışmaları için iki farklı taban malzeme kullanılmıştır. Optik çalışmalar için mikroskop camları tercih edilmiştir. Diğer çalışmalar için de taban malzeme olarak AISI standartları kodu M2 olan yüksek hız çelikleri kullanılmıştır.

Kaplama odasına konulmadan önce bütün taban malzemeler ultrasonik banyo ve etanol ile temizlenip kurutulmuştur. Deney başına ikişer cam hazırlanmıştır. Camlar numunelerin tek bir yüzlerinin kaplanması amacıyla tutucu üzerine, çiftler halinde, sırt sırta ve bitişik olarak yerleştirilmiştir. Profilometre ölçümlerinde kolaylık sağlamak amacıyla her cam üzerine keçeli kalem ile kısa çizgiler çizilmiştir. Çizgi çizilen bölgeler üzerinde oluşan kaplamalar etanol yardımıyla kolayca uzaklaştırılmıştır. Bu sayede film ve taban malzeme arasında kalınlık ölçümü almak için keskin kalınlık farkı meydana gelmiştir.

7.3 Vakum ve Dağlama

Her deneyden önce döner ve turbomoleküler pompa sistemiyle 1×10^{-5} Pa taban basınç elde edilmiştir. Vakum odasında plazma yaratmak için %99,999 saflıkta argon gazı kullanılmıştır. Bias dağlama için taban malzeme tutucunun çevresinde plazma yoğunluğunu arttırmak amaçlı olarak plazma yükseltici kullanılmıştır. Bias dağlama işlemi boyunca voltajı kademeli olarak 50 V değerinden 250 V değerine çıkarılıp ve toplam on dakika uygulanmıştır.

7.4 Kaplama Aşaması

Kaplama için hedef malzeme olarak 150 mm yarıçapında 7 mm kalınlığında %99,999 saflıkta tek kristal silisyum kullanılmıştır. Deneyler için reaktif gaz olarak CH₄ ve N₂ kullanılmıştır. Bias dağlama sonrasında plazma yükseltici kapatılıp uygun hızlarda CH₄ ve N₂ gazları odaya verilmiştir. Tüm kaplama işlemleri boyunca toplam gaz akışı 20 cm³/dak mertebesinde tutulmuştur. CH₄ ve N₂ gaz akış oranları 1-10 cm³/dak seviyeleri arasında değiştirilmiştir. Deneyler sırasında Bias voltajı sabit 50 V değerinde tutulmuştur. Biriktirme işlemi harici ısıtma olmadan gerçekleştirilmiştir. SiCN kaplama işlemi parametreleri Çizelge 7.1’de listelenmiştir.

Çizelge 7.1 : Kaplama işlemlerine ait parametreler.

	SiCN 1	SiCN 2	SiCN 3	SiCN 4	SiCN 5	SiCN 6	SiCN 7
Taban Basınç [Pa]	1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵
Çalışma Basıncı [Pa]	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ar Gaz Akışı [cm ³ /dak]	13	10	8	5	13	8	5
CH ₄ Gaz Akışı [cm ³ /dak]	5	5	5	5	2	7	10
N ₂ Gaz Akışı [cm ³ /dak]	2	5	7	10	5	5	5
Biriktirme Sıcaklığı [°C]	50±10	50±10	50±10	50±10	50±10	50±10	50±10
Hedef Gücü [W]	500	500	500	500	500	500	500
Katot Voltajı [V]	595	525	576	580	685	568	564
Katot Akımı [A]	0.9±0.1	0.9±0.1	0.9±0.1	0.9±0.1	0.9±0.1	0.9±0.1	0.9±0.1
Bias Voltajı [V]	50	50	50	50	50	50	50
Kaplama Süresi [dak]	60	60	60	60	60	60	60

7.5 Karakterizasyon

Kaplama kalınlıkları, Veeco Dektak 150 model profilometre ile ölçülmüştür. Kaplama mikroyapıları ve kimyasal bileşimleri JEOL JSM 7000F model taramalı elektron mikroskobu ve Oxford INCA EDS cihazı ile incelenmiştir. Faz analizi Philips PW1140 XRD model x-ışını difraktometresi ile yapılmıştır. İnce filmlerin optik yansıtma ve geçirgenlik değerleri Aquila NKD 7000 model spektrofotometre ile 30°'lik geliş açısıyla 280-1000 nm dalga boylarında ölçülmüştür. Kırma indisi ve sönüm katsayısı gibi sabitler spektrofotometreye ait olan Pro-Optix yazılımı ile

hesaplanmıştır. Sertlik ölçümü için CSM Instruments Nano-Hardness Tester model cihaz kullanılmıştır. Kaplamaların nano sertlik değerleri elik üzerindeki numunelere 50 mN yük uygulanarak ölçölmüştür. Her kaplama için 5 farklı noktadan ölçüm yapılmıştır.

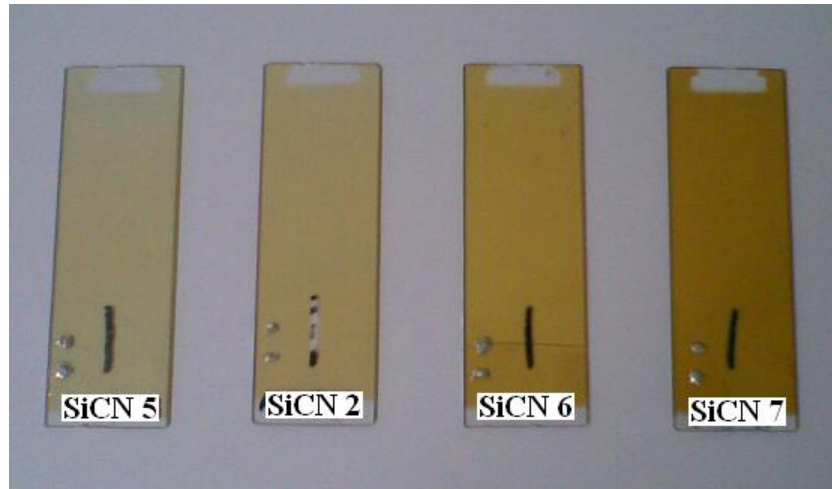
8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

8.1 Giriş

Cam yüzeyler üzerine yapılan kaplamalara çıplak gözle bakıldığında ilk göze çarpan optik geçirgenliği yüksek yapıları olmuştur. Kaplamaların renkleri sarı, koyu sarı ve açık kahverengi görünümündedir. Anlatımda kolaylık sağlamak açısından sabit %25 CH_4 gaz akışı altında N_2 gaz akışı değiştirilerek oluşturulan seriye Set 1, sabit %25 N_2 gaz akışı altında CH_4 gaz akışı değiştirilerek oluşturulan seriye Set 2 adları verilmiştir. Numune görünümleri Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’de gösterilmiştir.



Şekil 8.1 : Numune Set 1’in görünümü.



Şekil 8.2 : Numune Set 2’nin görünümü.

8.2 Kalınlık Ölçümü

Öncelikle cam numuneler profilometre ölçümüne hazırlanmıştır. Bu işlem için yumuşak uçlu plastik bir çubuk, pamuk ve etanol yardımıyla numunelerin işaretli bölgelerindeki kaplama taban malzeme üzerinden uzaklaştırılmıştır. Kaplama yalnızca boyalı bölgenin üzerinden uzaklaştığı için istendiği gibi taban malzeme ve kaplama arasında keskin kalınlık farkı oluşmuştur. Bu film sınırından profilometrenin iğne ucu ile ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin sonuçları Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1 : Profilometre ölçüm sonuçları.

	SiCN 1	SiCN 2	SiCN 3	SiCN 4	SiCN 5	SiCN 6	SiCN 7
Film Kalınlığı [nm]	1380	1420	1390	1370	1370	1320	1280

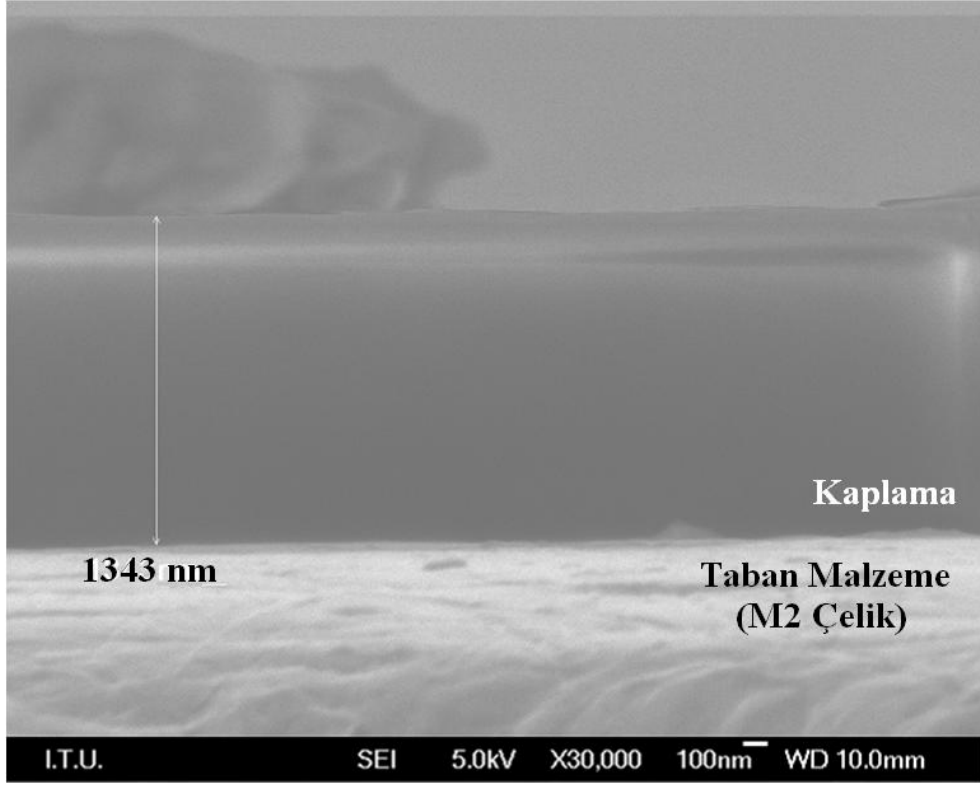
SiCN kaplama kalınlıklarının 1350 ± 70 nm mertebesinde olduğu saptanmıştır. Kaplama kalınlıkları birbirlerine rölatif olarak yakın olduğundan kalınlıkların optik sabitler ve optik yasak bant aralıkları üzerindeki etkisi göz ardı edilebilmektedir.

8.3 Mikroyapı ve Kimyasal Bileşim Analizi

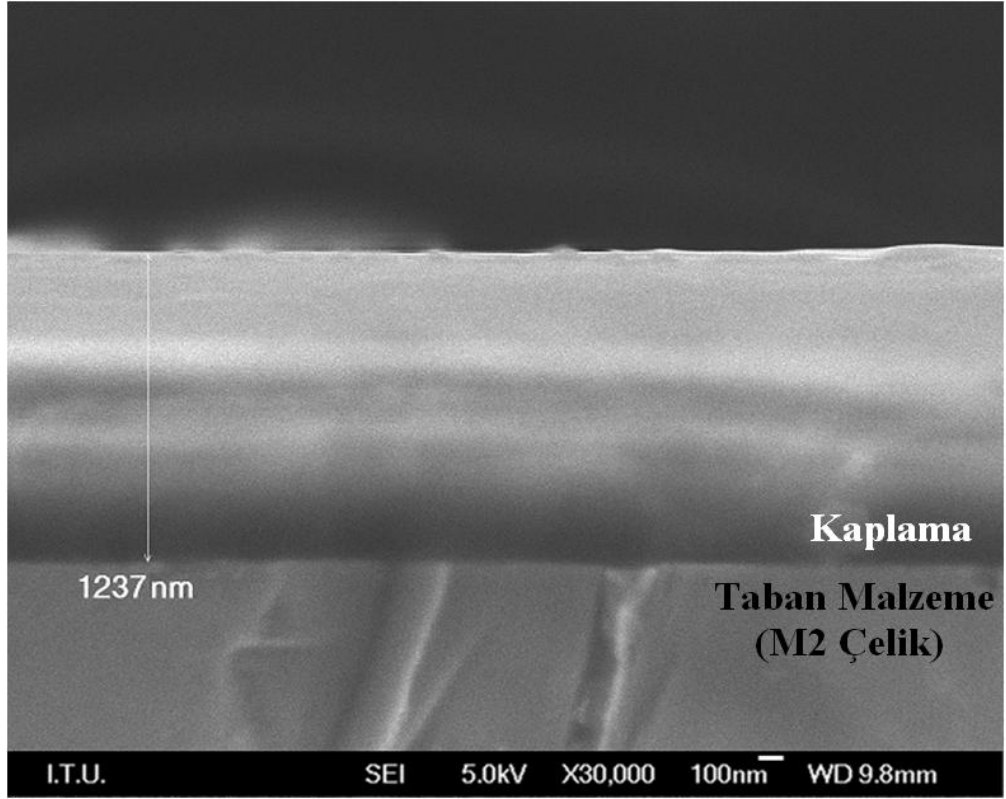
Mikroyapı özelliklerini incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla yüzeylerin topografik görüntüleri incelenmiştir. Bu görüntüler yüksek hız çekimleri üzerindeki kaplamalardan alınmıştır.

Mikroyapı incelemeleri sonucu Şekil 8.3 ve Şekil 8.4’te görüldüğü gibi kolonsal yapıda olmayan, yoğun, homojen ve taban malzemeye iyi yapışma özelliği gösteren filmlerin elde edildiği tespit edilmiştir.

Ayrıca profilometre ile yapılan kalınlık analizleri SEM ile elde edilen kalınlık değerleriyle karşılaştırılmış ve sonuçların 40 nm gibi düşük farklarla benzer olduğu görülmüştür.



Şekil 8.3 : % 25 CH₄, %25 N₂ gaz akışı ile üretilmiş SiCN 4 isimli numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 8.4 : % 50 CH₄, %25 N₂ gaz akışı ile üretilmiş SiCN 7 isimli numunenin SEM görüntüsü.

Elementel analiz enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile yapılmıştır. SiCN 5 numunesine ait kaplama, yüzey testleri sonucu dökülmeye uğradığından elementel analizi yapılamamıştır. EDS analiz sonuçları Çizelge 8.2 ve Çizelge 8.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 8.2 : Set 1 numunelerinin EDS analiz sonuçları.

AĞIRLIK %	C	N	O	Si
SiCN 1	24,88	10,67	18,5	45,95
SiCN 2	23,55	9,46	39,85	27,14
SiCN 3	23,77	4,93	29,28	42,02
SiCN 4	27,33	14,29	43,71	14,68

ATOMİK %	C	N	O	Si
SiCN 1	36,82	13,54	20,55	29,08
SiCN 2	32,18	11,09	40,87	15,86
SiCN 3	34,98	6,22	32,35	26,45
SiCN 4	34,74	15,57	41,71	7,98

Çizelge 8.3 : Set 2 numunelerinin EDS analiz sonuçları.

AĞIRLIK %	C	N	O	Si
SiCN 5	-	-	-	-
SiCN 2	23,55	9,46	39,85	27,14
SiCN 6	50,1	4,3	27,86	17,74
SiCN 7	56,26	11,24	27,23	5,27

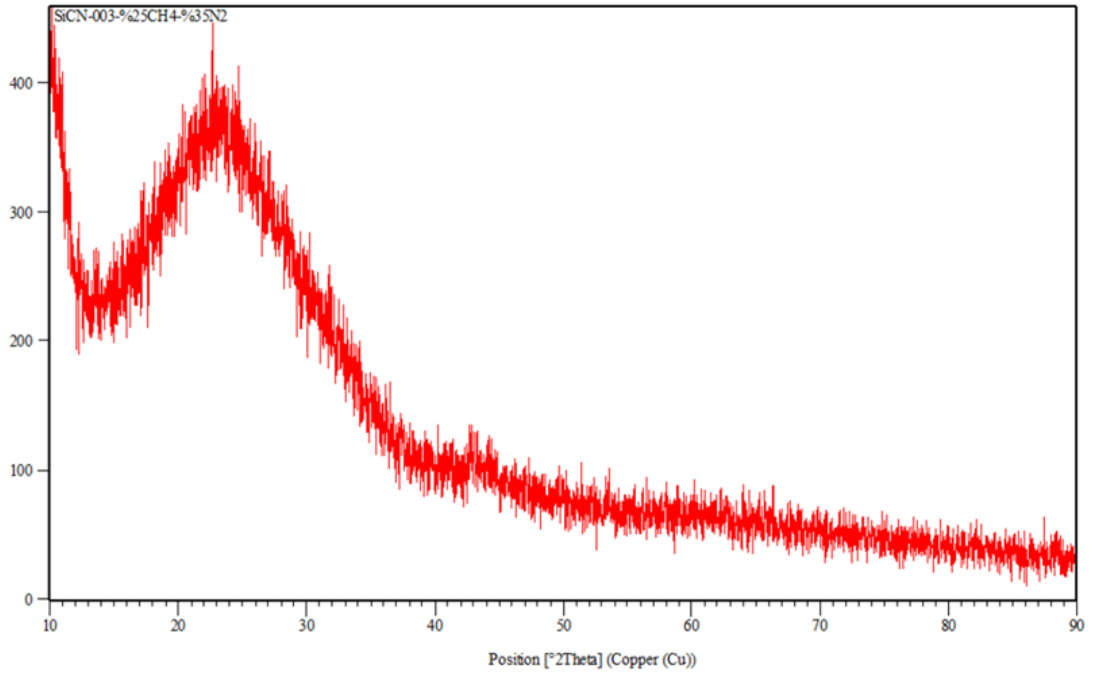
ATOMİK %	C	N	O	Si
SiCN 5	-	-	-	-
SiCN 2	32,18	11,09	40,87	15,86
SiCN 6	60,88	4,48	25,42	9,22
SiCN 7	63,51	10,88	23,07	2,55

Elementel analizler sonucunda artan reaktif gaz miktarı ile kaplamalara dahil olan silisyum oranının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Ayrıca kaplama bileşiminde yüksek miktarda oksijen atomu bulunduğu görülmüştür. Oksijenin kaplamaya bu ölçülerde dahil olmasının, kullanılan reaktif gazın safiyetinin düşük olması, yüzey çatlakları bulunan Si hedef malzemenin vakuma almadan önce çatlak aralarına

oksijen yerleşmiş olması ve numunelerin kaplama aşamasından sonra karakterizasyonları yapılana kadar geçen süre içerisinde atmosfere maruz kalmaları neticesindeki oksitlenmeleri gibi sebeplerden gerçekleşmiş olduğu düşünülmektedir.

Kaplamaların faz analizi x-ışını difraksiyon (XRD) yöntemiyle yapılmıştır.

Şekil 8.5’de SiCN 3 numunesinin XRD grafiği gösterilmiştir. Grafikte kristal yapılarda görülen pikler görülmemektedir. Buradan kaplamanın amorf yapıda olduğu anlaşılmaktadır. SiCN 1, SiCN 6 ve SiCN 7 numuneleri de benzer sonuçlar göstermiştir.

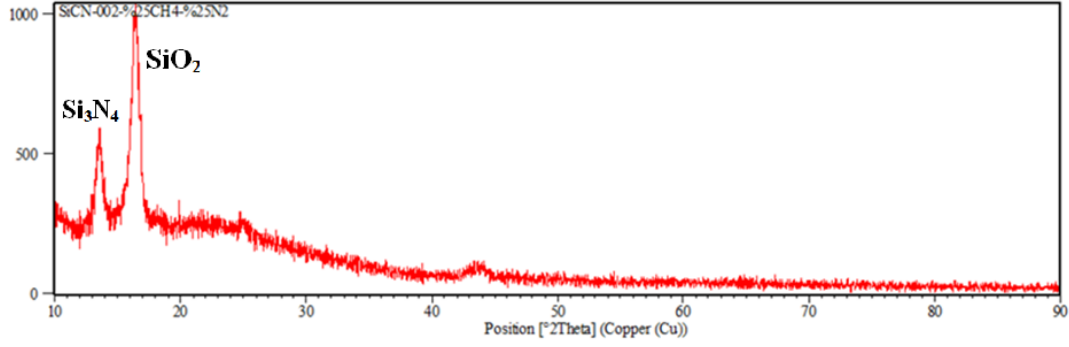


Şekil 8.5 : SiCN 3 numunesinin XRD grafiği.

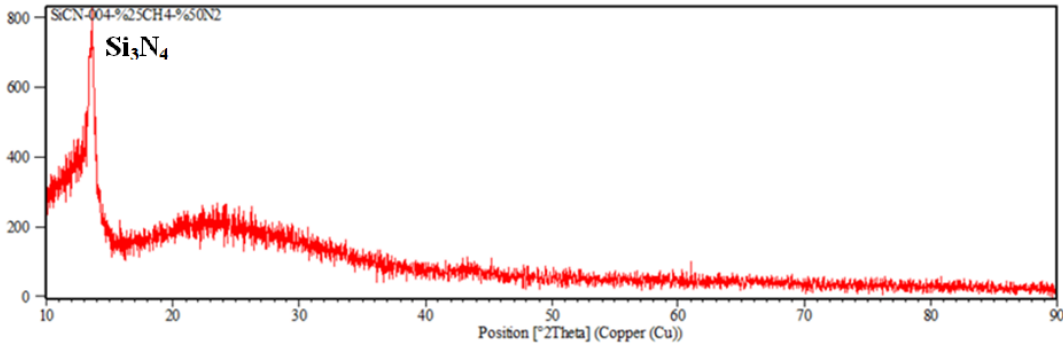
Ancak SiCN 2, SiCN 4 ve SiCN 5 numunelerinde belirgin şekilde kristal yapılar görülmüştür. SiCN 4 ve SiCN 5 numunelerinde Si_3N_4 kristal yapısı bulunurken SiCN 2 numunesinde ise hem Si_3N_4 hem de SiO_2 kristal yapısı görülmektedir. Bu numunelerdeki kristal yapıları ifade eden grafik pikleri Şekil 8.6, Şekil 8.7 ve Şekil 8.8’de görülmektedir.

Literatüre göre SiCN filmler için kristal yapının oluşmaya başlaması için 550°C ve üzeri, tamamen kristalleşme için 800°C ve üzerinde sıcaklıklara çıkılması gerekmektedir [21]. Üç ayrı kaplamada gözlenen kristal silisyum nitrür yapısının oluşmaya başladığı sıcaklık ise yine 800°C üzerindedir [28].

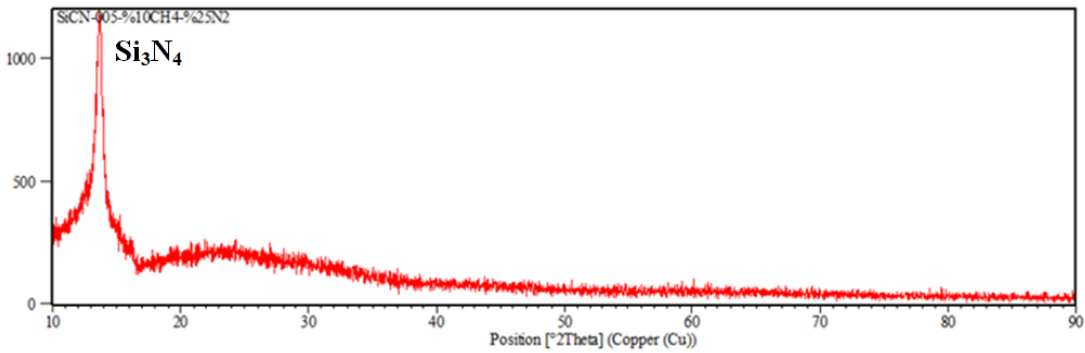
Literatür ile karşılaştırıldığında kaplamaların biriktirildiği $50\pm 10^{\circ}\text{C}$ çalışma sıcaklıkları çok düşük seviyelerde kalmaktadırlar. Bu nedenle, söz konusu sıcaklıklarda biriktirilen kaplamalarda kristal yapının gözlenmesi bu çalışmanın ilgi çeken sonuçlarından biri olmuştur.



Şekil 8.6 : SiCN 2 numunesinin XRD grafiği. Grafikte Si_3N_4 ve SiO_2 kristal yapılar görülmektedir.



Şekil 8.7 : SiCN 4 numunesinin XRD grafiği. Grafikte Si_3N_4 kristal yapı görülmektedir.

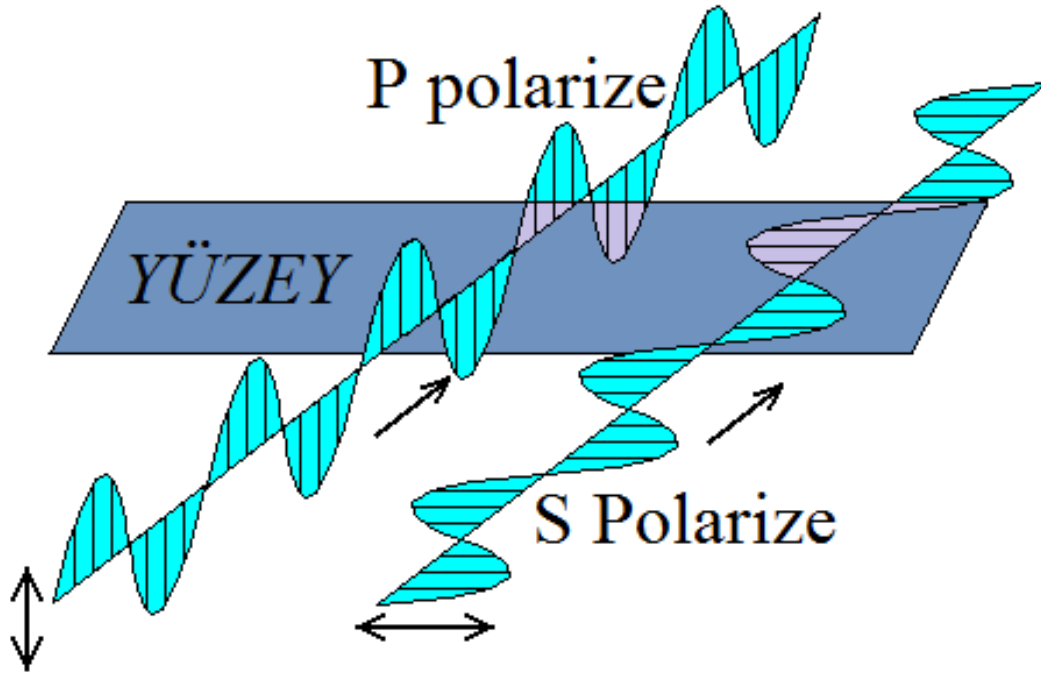


Şekil 8.8 : SiCN 5 numunesinin XRD grafiği. Grafikte Si_3N_4 kristal yapı görülmektedir.

8.4 Optik Ölçüm ve Analizler

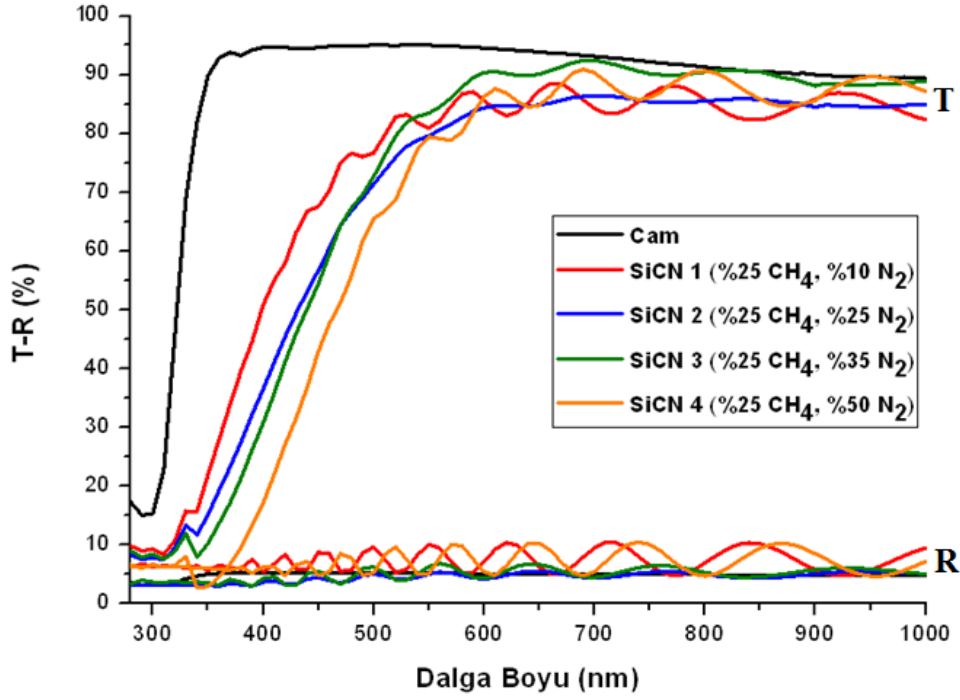
8.4.1 Yansıtma ve geçirgenlik

Cam üzerindeki kaplamaların spektrofotometre ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler 280 nm ve 1000 nm dalga boyları arasında 30°'lik geliş açısı ile yapılmıştır. Ölçümler için s ve p-polarize dalgalar kullanılmıştır. S-polarize dalganın elektrik alanı yüzey normali ile dalganın geliş doğrultusunun oluşturduğu düzleme dik doğrultuda salınım yapmaktadır. P-polarize dalganın elektrik alanı ise yüzey normali ile dalganın geliş doğrultusunun oluşturduğu düzlem ile aynı doğrultuda salınım yapmaktadır. Analizler için, spektrofotometre yazılımı ile daha uyumlu sonuçlar elde edilen s-polarize dalga sonuçları kullanılmıştır. P-polarize dalganın elektrik alan salınımı yüzey normali ile aynı doğrultuda olduğundan s-polarize dalgaya göre daha yüksek geçme ve daha düşük yansıma değerleri göstermiştir. S-polarize dalganın yapısı ve P-polarize dalga ile karşılaştırılması Şekil 8.9'da gösterilmiştir.

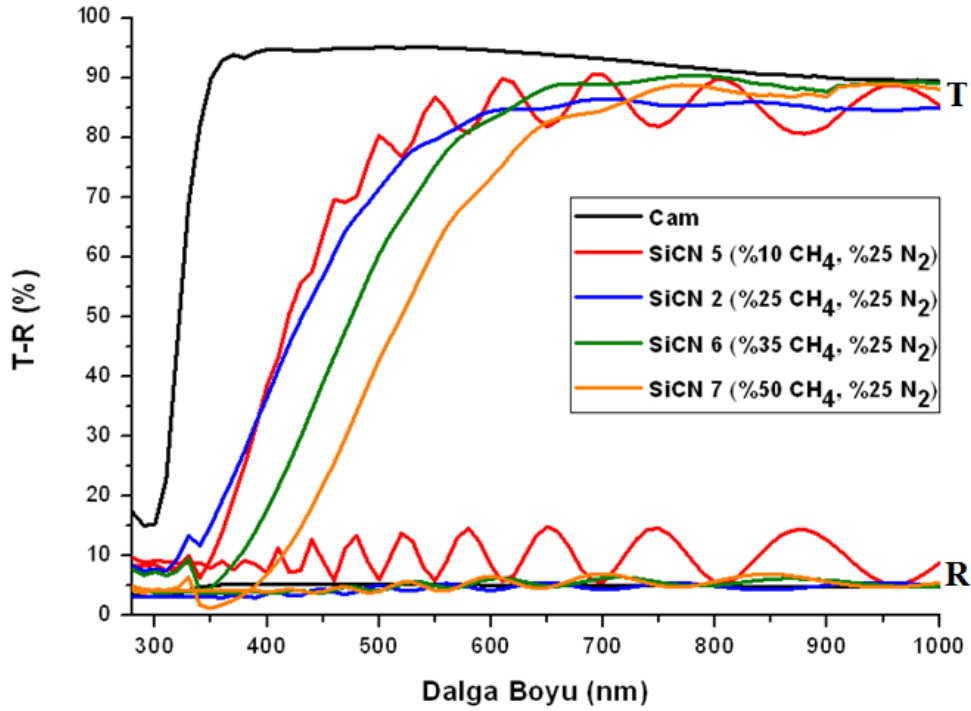


Şekil 8.9 : S ve P polarize dalganın şematik gösterimi. Aynı doğrultuda ilerleyen S ve P polarize dalgaların elektrik alanı salınımları birbirlerine diktir [29].

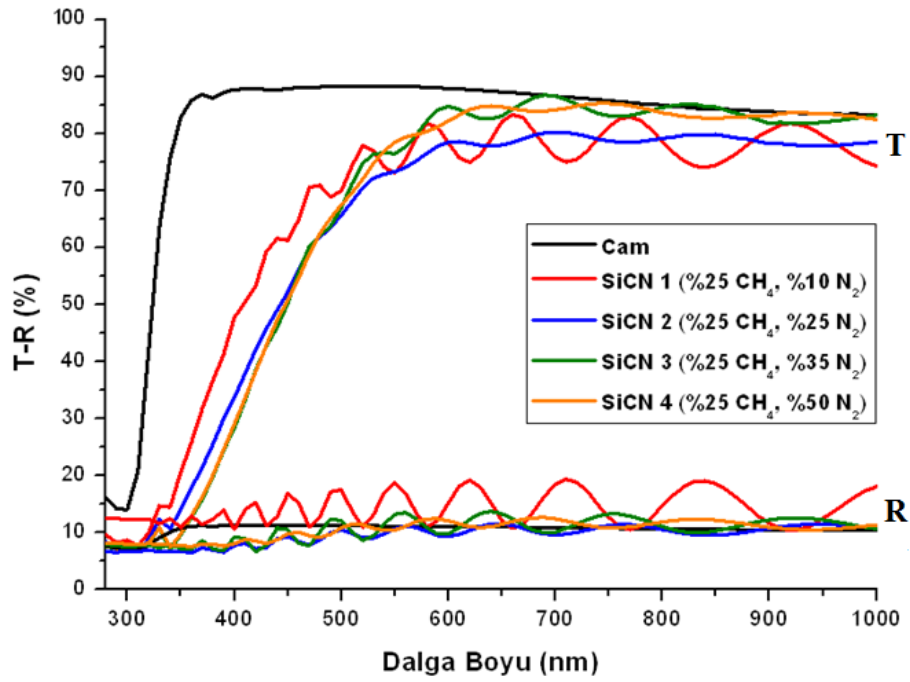
Yüzeye gelen ışınların bir kısmı yansımış ve yansıma dedektörüne, diğer kısmı da hem film hem de taban malzemedan geçerek geçirme dedektörüne ulaşmıştır. Bu ölçümler sonucunda filmlerin hesaplanan yansıtma ve geçirme oranları bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Filmlerin dalga boylarına göre yansıtma ve geçirme yüzdeleri grafik olarak Şekil 8.10, Şekil 8.11, Şekil 8.12 ve Şekil 8.13'de verilmiştir.



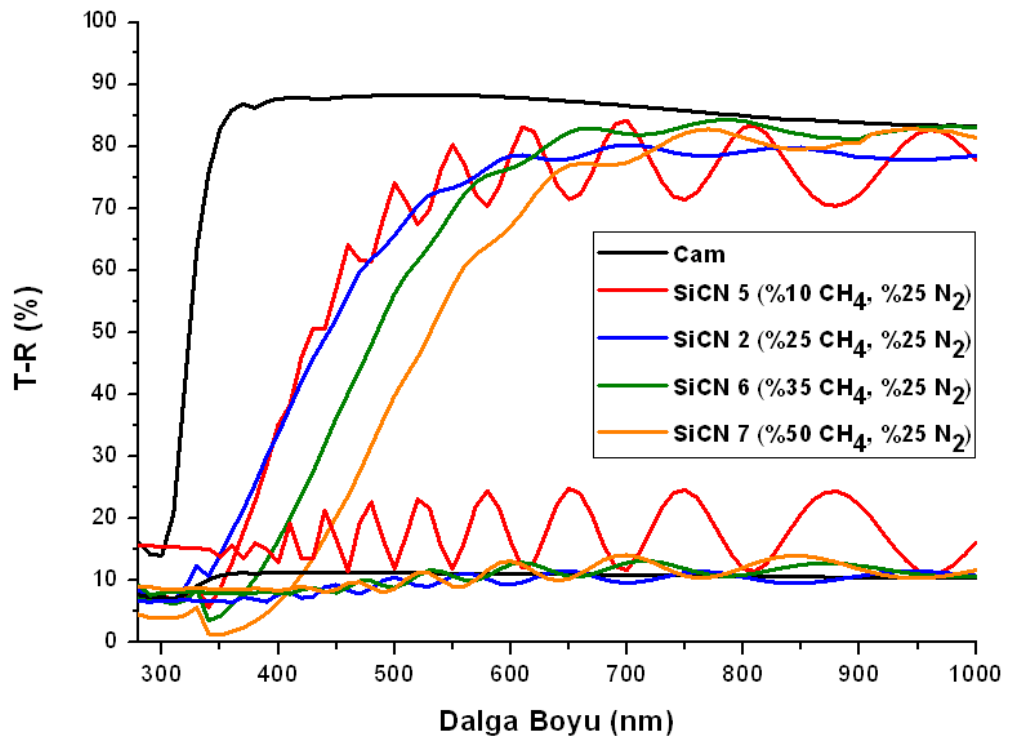
Şekil 8.10 : Sabit %25 CH_4 gaz akışı altında N_2 gaz akışı değiştirilerek oluşturulan serinin (Set 1), kaplanmamış cam numune ile karşılaştırmalı olarak, p-polarize dalgayı yansıtma (R) ve geçirme (T) oranları.



Şekil 8.11 : Sabit %25 N_2 gaz akışı altında CH_4 gaz akışı değiştirilerek oluşturulan serinin (Set 2), kaplanmamış cam numune ile karşılaştırmalı olarak, p-polarize dalgayı yansıtma (R) ve geçirme (T) oranları.



Şekil 8.12 : Sabit %25 CH_4 gaz akışı altında N_2 gaz akışı değiştirilerek oluşturulan serinin (Set 1), kaplanmamış cam numune ile karşılaştırmalı olarak, s-polarize dalgayı yansıtma (R) ve geçirme (T) oranları.



Şekil 8.13 : Sabit %25 N_2 gaz akışı altında CH_4 gaz akışı değiştirilerek oluşturulan serinin (Set 2), kaplanmamış cam numune ile karşılaştırmalı olarak, s-polarize dalgayı yansıtma (R) ve geçirme (T) oranları.

Şekil 8.10 ve Şekil 8.12’de görüldüğü üzere CH_4 gaz akışı sabit tutularak yapılan deneylerde ~550 nm altındaki dalga boylarında azot gaz akışıyla artan azot miktarı bu dalga boylarında filmlerin geçirgenliklerini düşürmüştür. Bunun yanında ~550 nm dalga boyu üzerinde azot miktarındaki artış tam tersi bir etki yaratarak geçirgenliği arttırmıştır. Geçirgenliklerin ~800 nm seviyelerinde genellikle artmadan sabitlenmelerinin en önemli sebeplerinden biri mikroskop camlarının kaplanmadan önce de bu dalga boyu ve sonrasında %85-90 arası geçirgenliğe sahip olmasıdır. Set 1’in yansıtma değerlerinde ise %10 ve %50 N_2 gazı akışıyla yapılan SiCN 1 ve SiCN 4 kodlu kaplamaların %25 ve %35 N_2 gazı akışıyla yapılan SiCN 2 ve SiCN 3 kodlu kaplamalardan genel olarak daha yansıtıcı oldukları gözlemlenmektedir.

Şekil 8.11 ve Şekil 8.13’de görüldüğü üzere N_2 gaz akışı sabit tutularak yapılan deneylerde ~400 nm altındaki dalga boylarında metan gaz akışıyla artan karbon miktarı bu dalga boylarında, %25 metan akışıyla üretilen SiCN 2 hariç, filmlerin geçirgenliklerini düşürmüştür. Bunun yanında ~650 nm dalga boyuna kadar olan bölgede karbondaki artışın filmlerin üzerinde geçirgenlik düşürücü bir etki oluşturduğu gözlemlenmektedir. ~650 nm dalga boyu üzerine çıkıldığında filmlerdeki girişimin artmasından dolayı ortalama geçirgenliğin zor okunmasına rağmen ~850 nm dalga boyu ve üzerinde karbon miktarı genel olarak geçirgenliği arttırıcı bir etki oluşturmuştur. Set 2’nin yansıtma değerlerine bakıldığında SiCN 2, 6 ve 7’inci kaplamalarda karbon artışı yansıtmayı arttırıcı etki yapmış olsa da karbon miktarının en düşük olduğu SiCN 5 numunesinin bu seri içerisinde en yüksek yansıtma oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Yansıtma ve geçirme değerlerinden arta kalan yüzde ise soğurulan ışık miktarı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bu yansıtma, geçirme ve soğurma değerleri kullanılarak Pro-Optix yazılımı ile filmlere ait kırılma indisi n ve sönüm katsayısı k hesaplanmıştır.

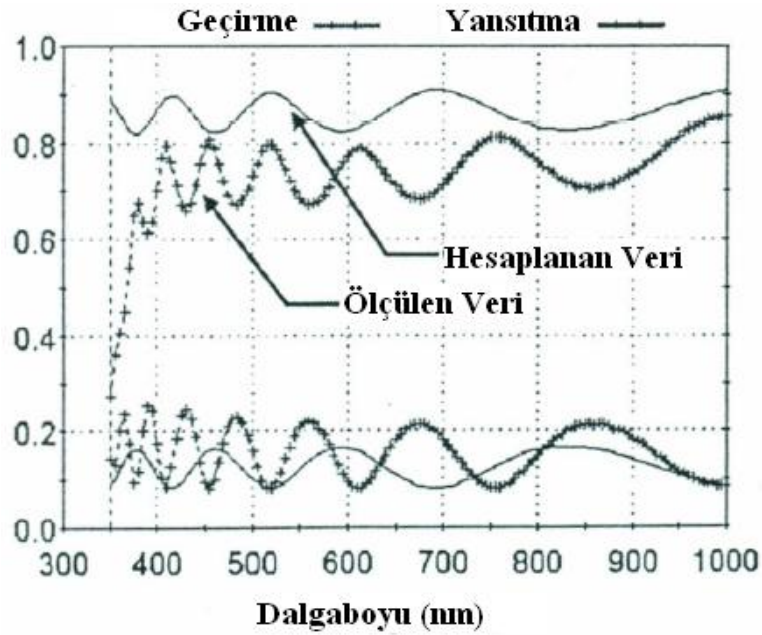
8.4.2 Kırılma indisi ve sönüm katsayısı hesabı

Pro-optix programında işlem yapmak için gerekli olan veri, üzerine gelen elektromanyetik dalganın dalga boyuna karşılık gelen, filmin yansıtma ve geçirme oranlarıdır. Gerekli veri spektrofotometreden programa aktarılır.

Yansımaya ve geçirme değerlerinden kırılma indisi n ve sönüm katsayısı k değerlerinin ölçülmesi karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir. Bu hesaplamaların her aşaması filmin kalınlığı, geçirgenliği, soğurma oranı, bulunduğu ortam ve taban malzemenin cinsi gibi etkenlere göre değişim gösterir.

Hesaplama işleminde anahtar nokta filmin teorik olarak hesaplanan yansımaya ve geçirme grafiklerini gerçek grafiğine yaklaştırmak ve yapılabiliyorsa aynı değerleri sağlamaktır. Yaklaştırmaya ve uygunlaştırmaya işlemi grafiği “gerçek değerine fit etme işlemi” şeklinde adlandırılır.

İlk aşamada kullanıcının girmiş olduğu verilerden yola çıkarak, yazılım filmin özelliklerine göre teorik yansımaya ve geçirme değerleri hesaplar. Ancak Şekil 8.14’te görüldüğü gibi malzemenin tüm özelliklerinin dahil olduğu filmin gerçek yansımaya ve geçirme değerleri genelde bu değerlerle belirli bir derecede uyumlu olsa da tam olarak örtüşmemektedir.



Şekil 8.14 : Gerçekte hesaplanan değerlerle teorik olarak hesaplanan değerlerin fit etme işlemi öncesi karşılaştırılması.

Filmin yapısına uygun hesaplama yöntemi seçilir ve bu yöntemin kullandığı fonksiyondaki katsayılar kullanıcı tarafından değiştirilerek yeni bir teorik model oluşturulur. Her teorik model oluşturulduğunda yazılım önceki hesaptan yola çıkarak iterasyon yapmaya devam eder. Burada amaç, program için tanımlanmış grafiklerin yakınlık derecelerini belirleyen “chi-squared” (χ^2) sayısının mümkün olan en düşük değere getirilmesidir.

Program dahilinde her malzeme ve ortam için ayrı bir dağılım modeli tanımlanmıştır. Saydam ortamlar için kullanılan hesaplama yöntemi Cauchy modelidir. Enerjinin n ve k değerleriyle ilişkisi,

$$n(e) = n_0 + n_1e + n_2e^2 + n_3e^3 + n_4e^4 \quad (8.1)$$

$$k(e) = k_0 + k_1e + k_2e^2 + k_3e^3 + k_4e^4 \quad (8.2)$$

şeklindedir. Burada e foton enerjisi, n_0 - n_4 ve k_0 - k_4 Cauchy modeli parametreleridir.

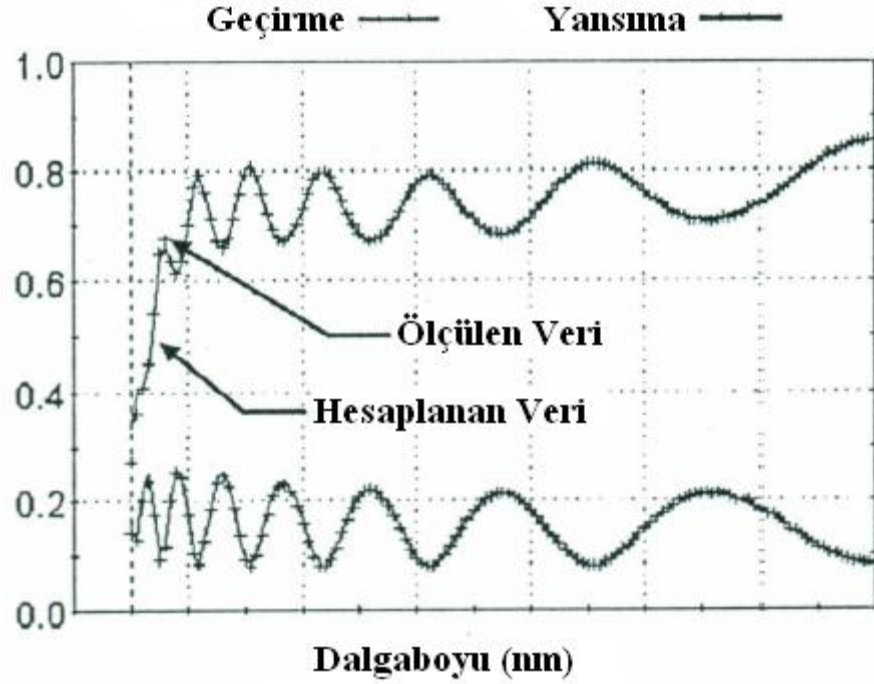
Uyumluluk faktörü, katsayılarla tanımlanmış ikinci önemli fonksiyondur. Saydam malzemeler için ışının davranışını tam olarak hesaplayabilmek için Bölüm 4'te Şekil 4.3'te gösterildiği gibi taban malzemeden meydana gelene ikincil yansımaların doğru bir şekilde hesaplamalara dahil edilmesi gerekmektedir. Bunu yapmak için uyumluluk faktörü tanımlanmıştır. Uyumluluk faktörü filmin yüzeyinden ve taban malzemeden yansıyan ışınların girişim etkilerinin ne kadar iyi görüldüğünün bir ölçüsü olarak tanımlanmıştır. Belirli bir dalga boyu için uyumluluk faktörünün eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$c = c_0 + c_1 + c_2e^*e \quad (8.3)$$

Burada c uyumluluk faktörü, c_0 - c_2 uyumluluk katsayıları, e gelen ışının enerjisidir.

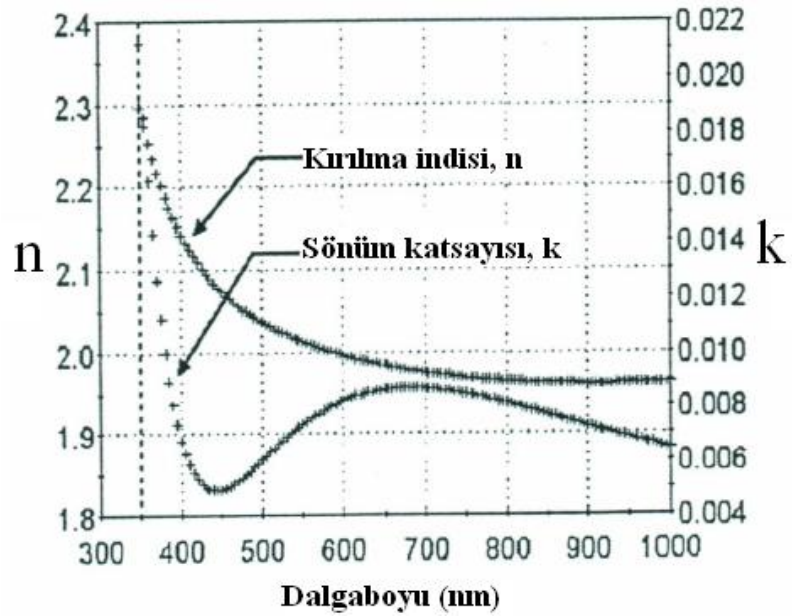
Son olarak, grafik üzerindeki yansıma ve geçirme değerlerinin her birini gerçek değerlerine fit etme işlemi için kullanılan analiz yöntemleri mevcuttur. Her bir analiz yöntemi kendi algoritmasına sahiptir ve kullanıcı, üzerinde çalıştığı modeline uygun sonuç veren analiz yöntemini bulmalı ve çalışma için bu yöntemi kullanmalıdır.

Bu çalışmada kullanılan analiz yöntemi Powell metodudur. Powell metodu, diğer mevcut yöntemlerden farklı olarak, grafiğin yakınsama ve ıraksama durumlarına odaklanmak yerine, hesaplanan noktaların yakın bölgeleri içinde tahminler oluşturup gerçek modele uyum sağlamaya yönelik tekrarlamalar yapar. Böylece serbest parametrelerin sayısının artması hesaplamanın sağlıklı bir şekilde ilerlemesini önemli ölçüde etkilememektedir. Bu analiz yöntemi bilgisayar tarafından her bir nokta için ayrı ayrı hesap yapılmasını gerektirdiğinden tanımlı diğer modellere göre daha çok zaman almaktadır. Ayrıca kullanıcı tanımlı serilerin (Denklemler 8.1, 8.2 ve 8.3) katsayılarını (n_0 - n_4 , k_0 - k_4 , c_0 - c_2) birer birer değiştirip gerçek modele tam uyumu sağlamak zorundadır.



Şekil 8.15 : Fit etme işlemi sonucunda örtüşerek uyum sağlamış gerçek ve teorik değerlerin görünümü.

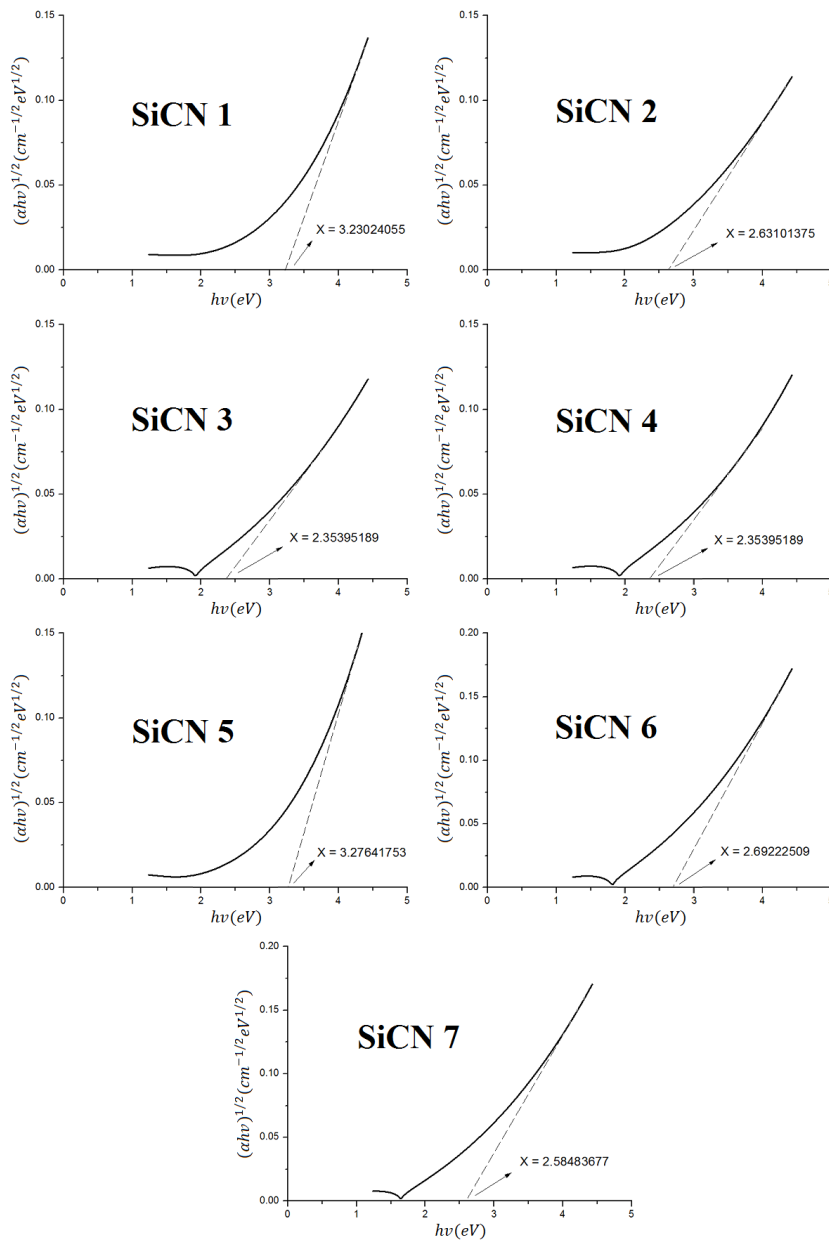
Bu şekilde yapılan detaylı bir çalışmanın sonucunda Şekil 8.15’de görüldüğü gibi teorik model gerçek model ile uyumluluk gösterecektir. Ortaya çıkan model bilgisayar tarafından fonksiyon olarak tanınır hale gelir ve Şekil 8.16’da görüldüğü gibi n ve k sayılarının gerçek değerleri hesaplanır.



Şekil 8.16 : Program tarafından hesaplanan n ve k değerlerinin görünümü.

8.4.3 Optik yasak bant aralıkları

Tauc yöntemi için gerekli olan veriler spektrofotometre yazılımı ile hesaplandıktan sonra dalga boylarına karşılık gelen k sönüm katsayıları ve dalga boyu değerleri daha önce verilen soğurma katsayısı denkleminde yerleştirilerek α soğurma katsayıları hesaplanmıştır. Ekstrapolasyon için, hesaplanmış soğurma katsayıları, Tauc denkleminde yerleştirilip, buradan indirekt yasak bant aralığı için, $(\alpha h\nu)^{1/2}$ değerinin $(h\nu)$ foton enerjisine göre grafiği elde edilmiştir. Grafiklerin lineer bölgelerinin ekstrapolasyonu ile Şekil 8.17’te görüldüğü gibi kaplamaların yasak bant aralıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların sonuçları Çizelge 8.4’te gösterilmiştir.



Şekil 8.17 : Optik yasak bant aralıklarının hesaplanması.

Çizelge 8.4 : Hesaplama sonucu bulunan yasak bant aralıkları.

		Gaz Akışı [cm^3/min]		Yasak Bant Aralığı (eV)
	Deney Adı	CH_4	N_2	
Set 1	SiCN 1	5	2	3.23
	SiCN 2	5	5	2.63
	SiCN 3	5	7	2.35
	SiCN 4	5	10	2.35
Set 2	SiCN 5	2	5	3.27
	SiCN 2	5	5	2.63
	SiCN 6	7	5	2.69
	SiCN 7	10	5	2.58

CH_4 gaz akışı sabit tutularak N_2 gaz akışının değiştirilmesiyle oluşturulan Set 1’de kaplama ortamındaki reaktif azot gazının artmasıyla yasak bant aralıklarında düşüş gözlenmiştir. Bu düşüş %35 azot gazından sonra yok sayılabilecek kadar düşük olmuştur.

Buradan yola çıkarak kaplamadaki azot miktarının yasak bant aralığı üzerinde azaltan bir etki yarattığını söylemek mümkündür. Yasak bant aralıkları ve davranışları ile ilgili sonuçlar Peng ve arkadaşlarının çalışması ile benzerlik göstermiştir [5].

N_2 gaz akışının sabit tutularak CH_4 gaz akışının değiştirilmesiyle oluşan Set 2’de kaplama ortamındaki reaktif metan gazının artmasıyla yine yasak bant aralığında genel bir düşüş gözlenmiştir. Fakat metanın özellikle %25 seviyesinden sonraki bant aralığı üzerindeki etkisi azot artan serideki kadar etkili olmamıştır.

Bu sonuçlar ışığında kaplama bileşiminde bulunan azot miktarının optik yasak bant aralığı üzerinde karbon miktarından daha etkili olduğunu söylemek mümkündür.

8.5 Aktivasyon Enerjileri

Filmlerin sahip oldukları aktivasyon enerjilerini bulmak için aynı sıcaklıktaki iletkenliklerini elde etmek gerekir. Bu işlem için öncelikle filmlerden devre elemanı oluşturmak amacıyla filmlerin üzerine aynı aralıklara sahip ikişer indiyum kontak eritip damlatılmıştır. Bu kontaklara bağlanan bakır kablolar elektrometreye bağlanmıştır. Devreye bağlanan filmler metal ısıtıcı üzerine yerleştirildiler. İletkenlik

ölçümü için cam taban malzemeler üzerlerindeki filmin yüzü yukarı bakacak şekilde metal ısıtıcı üzerine yerleştirilmiştir. Isıtıcının yardımıyla filmlerin sıcaklıkları 20°C'den 100°C'ye çıkarılmıştır. Sıcaklıklar termoçifte bağlı devre ile ölçülmüştür. Sıcaklık artışı sırasında filmlerin 40 V gerilim altında geçirdikleri akımlar ölçülmüştür. 10°C aralıklarla bu gerilim altında elde edilen akım değerleri (I) not edilmiştir. Bu değerler kullanılarak, aşağıdaki temel iletkenlik formülleri [30] yardımıyla iletkenlikler (σ) bulunmuştur:

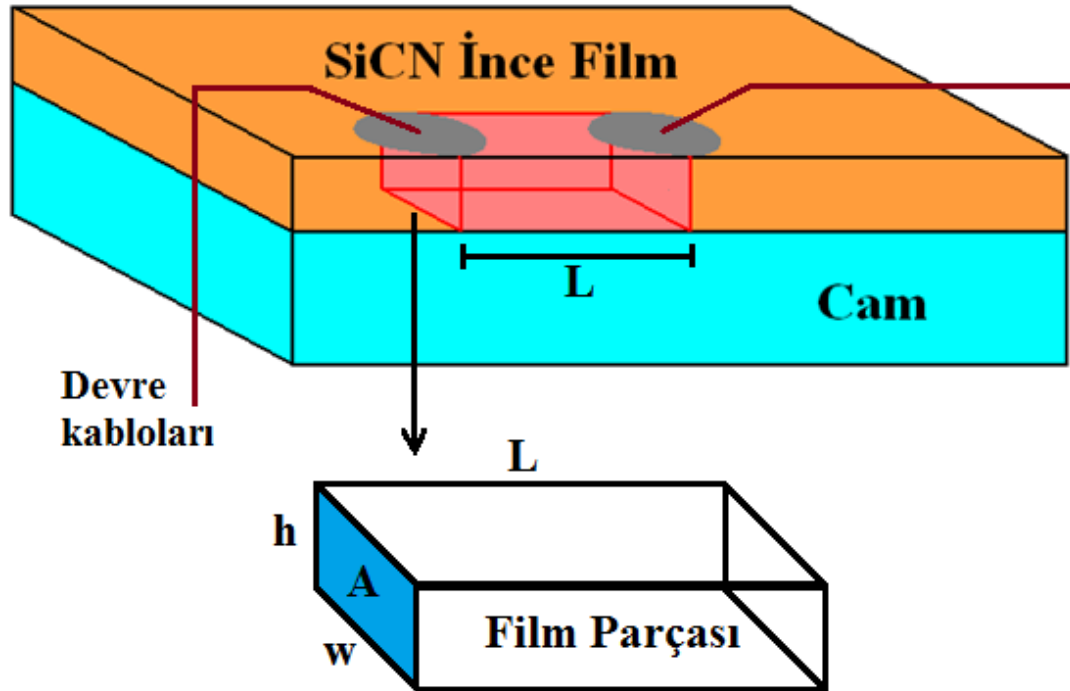
$$V = IR \quad (8.1)$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (8.2)$$

$$\rho = \frac{Vhw}{IL} \quad (8.3)$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (8.4)$$

Burada σ elektriksel iletkenlik, R direnç, ρ öz direnç, V potansiyel, I akım, h devre elemanı olan film parçasının yüksekliği, w genişliği, A kesit alanı, L de uzunluğudur. Filme ait oluşan devre eleman Şekil 8.18'da gösterilmiştir.

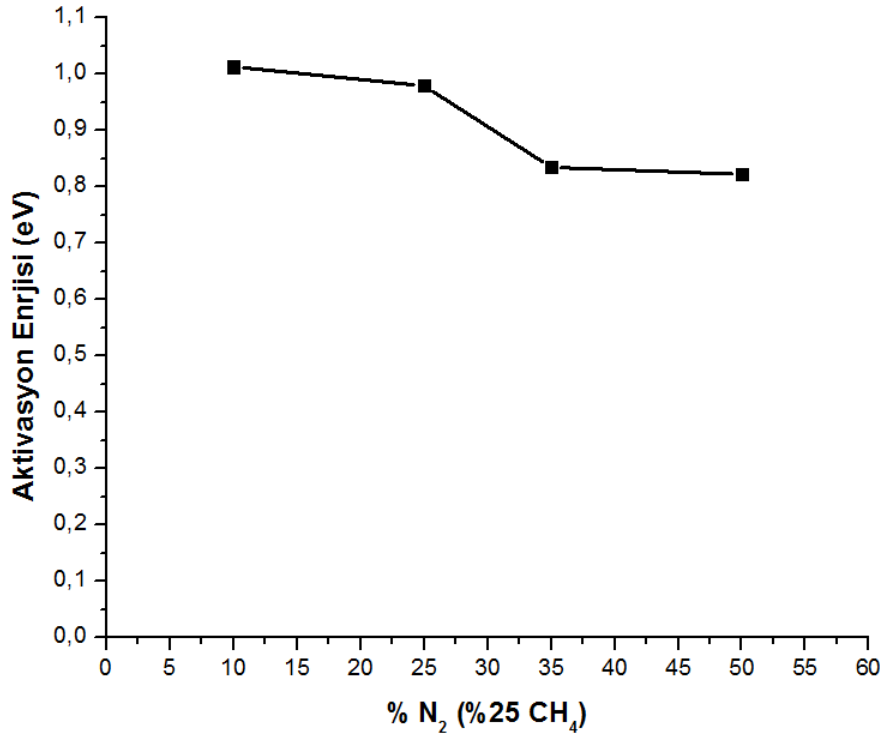


Şekil 8.18 : Film yüzeyine gri ile gösterilen indiyum katotlara bakır kabloların bağlanmasıyla oluşturulan devre elemanı ve boyutlarının gösterimi.

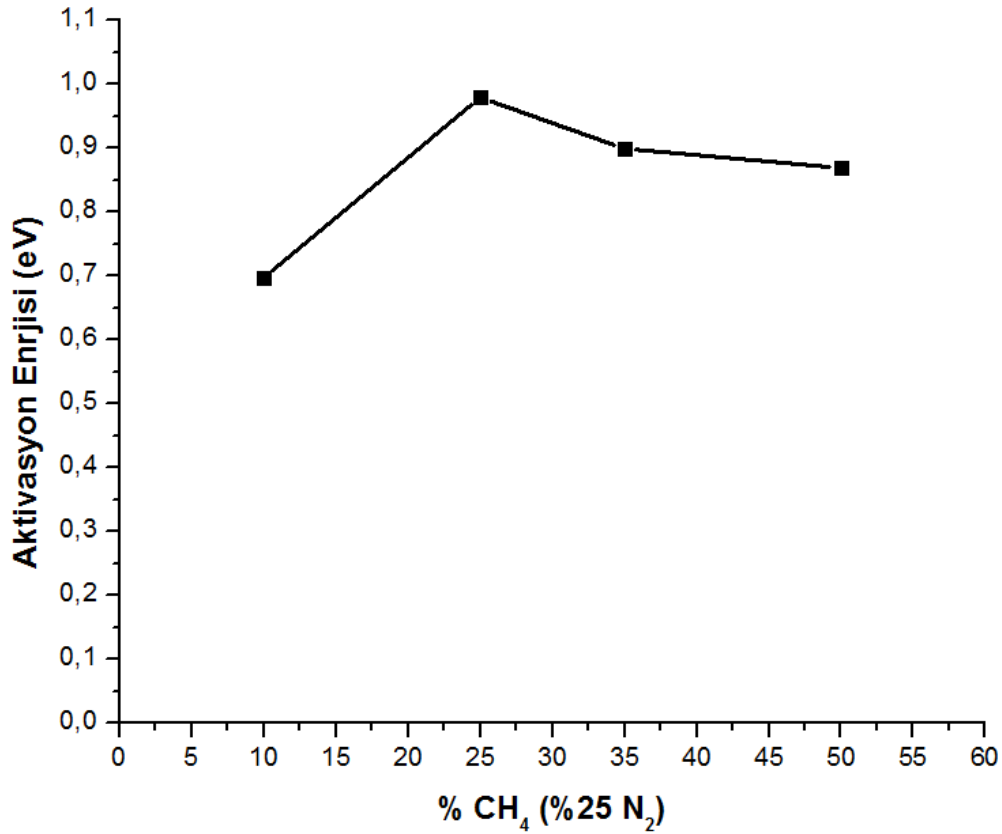
Elde edilen akım (σ) ve karşılığı olan sıcaklık (T) değerleri yardımıyla $\ln(\sigma)$ değerlerinin $1000/T$ değerlerine göre grafiği elde edilmiştir. Bu grafiklerin eğimleri dönüştürme formülünde yerlerine yerleştirilerek aktivasyon enerjileri bulunmuştur. Aktivasyon enerjileri Çizelge 8.5'te, gaz akışına göre grafik olarak gösterimleri Şekil 8.19 ve Şekil 8.20'da gösterilmiştir.

Çizelge 8.5 : Aktivasyon enerjileri.

	Deney Adı	Eğim	Aktivasyon Enerjisi (eV)
Set 1	SiCN 1	11.75	1.0134
	SiCN 2	11.36	0.9798
	SiCN 3	9.68	0.8349
	SiCN 4	9.54	0.8228
Set 2	SiCN 5	8.09	0.6977
	SiCN 2	11.36	0.9798
	SiCN 6	10.43	0.8995
	SiCN 7	10.08	0.8694



Şekil 8.19 : Set 1 numunelerinin gaz akış hızına bağlı aktivasyon enerjisi değişimleri.



Şekil 8.20 : Set 2 numunelerinin gaz akış hızına bağlı aktivasyon enerjisi değişimleri.

Aktivasyon enerjileri, karbon ve azot miktarlarının artmasına bağlı olarak sürekli bir artış veya azalış göstermemişlerdir. Bunun yanında azot miktarının artmasıyla Şekil 8.19'deki haliyle gözlenen aktivasyon enerjisi değişimi, Şekil 8.20'daki karbon miktarı artışıyla oluşan değişime benzer özellikler göstermiştir.

Hem azot hem de karbonun aktivasyon enerjileri üzerindeki bu benzer grafikleri daha detaylı araştırma yapılması için önemli birer veri olarak değerlendirilmiştir.

8.6 Sertlik Ölçümleri

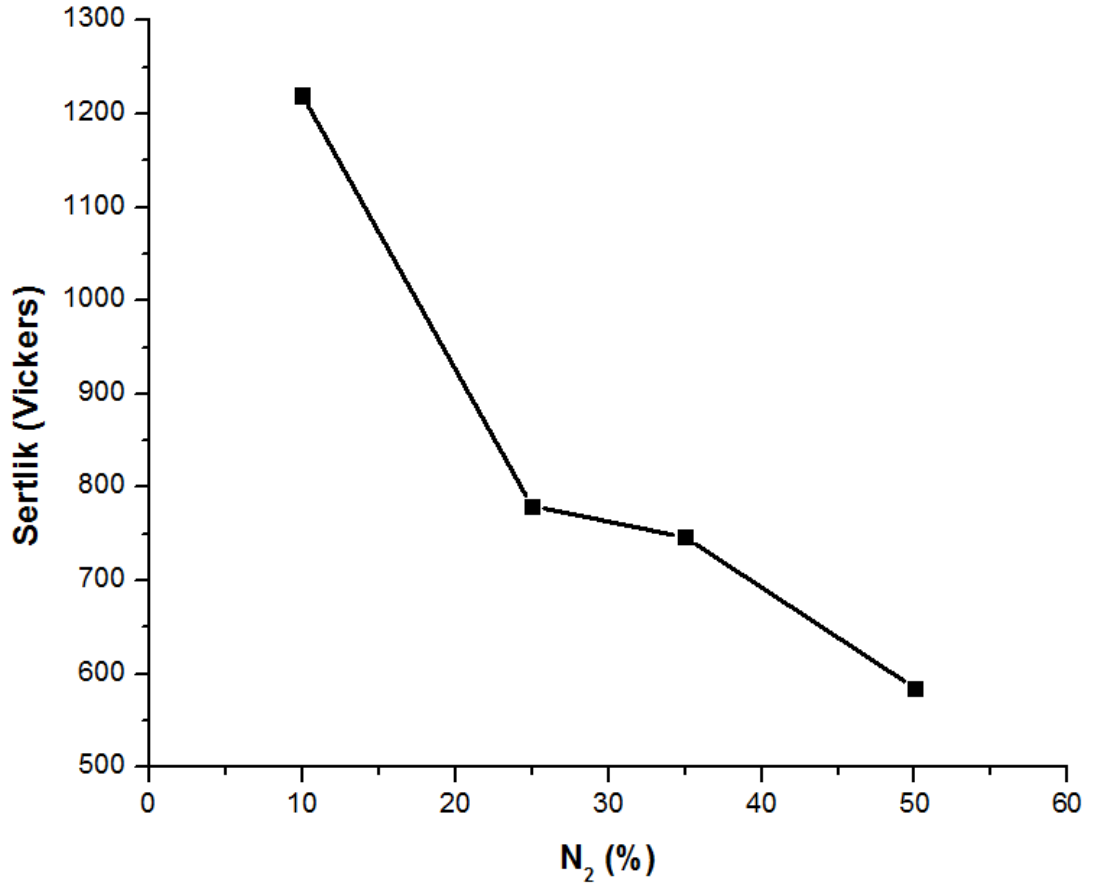
Çelik numuneler üzerindeki kaplamalara 50 mN yük uygulanarak alınmış olan ölçüm sonuçları Çizelge 8.6'da gösterilmiştir.

Sertlik ölçümleri sonucunda karbon ve azot miktarlarındaki artışın her iki numune serisi için de sertliği azaltan bir etkisi olduğu görülmüştür. Buradan, SiCN ince filmlerin içeriğindeki silisyumun kaplamalara asıl sertlik özelliklerini kazandırdığı, eklenen karbon ve azotla beraber azalan silisyum oranı nedeniyle kaplamaların

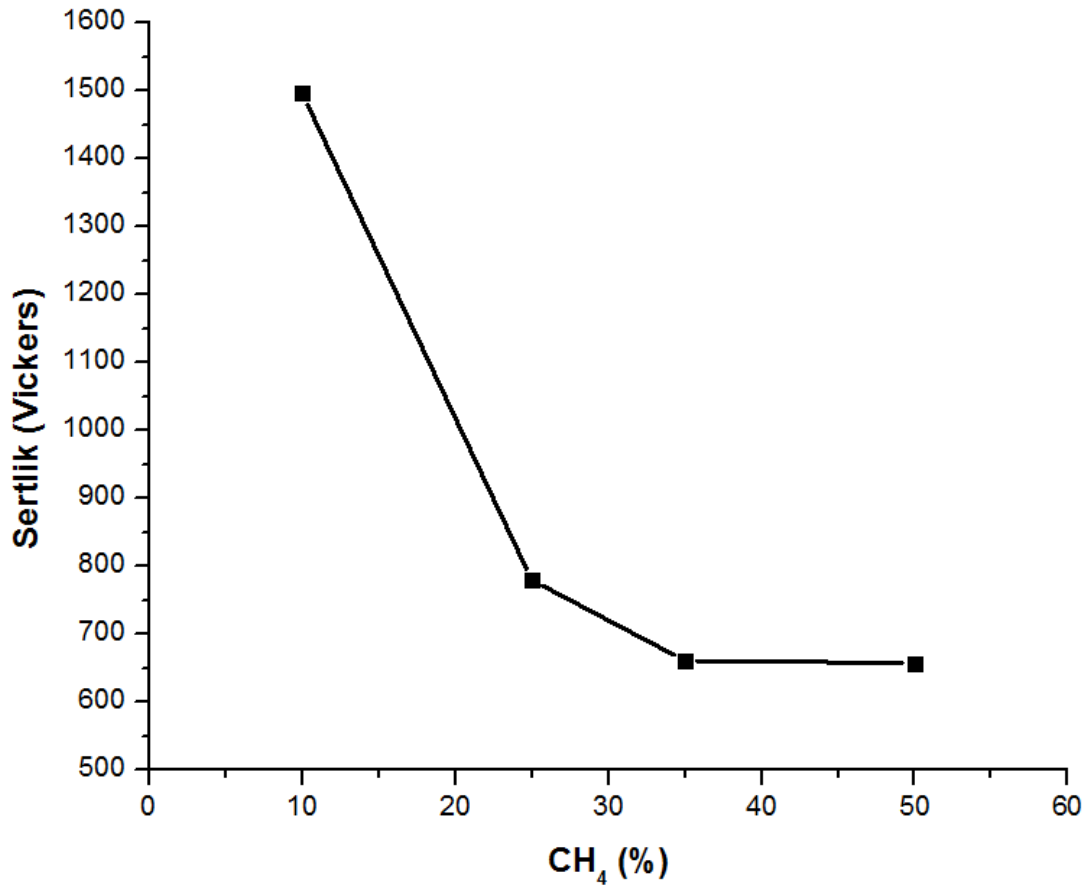
sertliklerin düşüş olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar Shengli Ma ve arkadaşlarının çalışmasıyla uyum göstermektedir [6].

Çizelge 8.6 : Sertlik ölçümleri

Gaz Akışı (cm ³ /dak)				
Deney Adı		CH ₄	N ₂	Sertlik (Vickers)
Set 1	SiCN 1	5	2	1220.1
	SiCN 2	5	5	780.1
	SiCN 3	5	7	746.48
	SiCN 4	5	10	585.3
Set 2	SiCN 5	2	5	1496.7
	SiCN 2	5	5	780.1
	SiCN 6	7	5	661.41
	SiCN 7	10	5	657.75



Şekil 8.21 : Set 1 numunelerinin gaz akış hızına bağlı yüzey sertliği değişimleri.



Şekil 8.22 : Set 2 numunelerinin gaz akış hızına bağlı yüzey sertliği değişimleri.

9. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek saflıktaki silisyum plaka hedef malzeme kullanılarak, reaktif doğru akımda sıçratma yöntemiyle SiCN ince filmler cam ve çelik malzemeler üzerine biriktirilmiştir. Reaktif gaz akışlarının değiştirilmesiyle filmlerin kompozisyonlarında bulunan Si, C ve N elementlerinin oranları değişmiştir. Bu değişimlerin incelenmesi sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Reaktif doğru akım manyetik alanda sıçratma yöntemi ile farklı kompozisyonlarda 1280-1420 nm kalınlıklarında silisyum karbonitrür ince filmler üretilmiş, yapısal, mekanik ve optik özellikleri incelenmiştir.
2. Mikroyapı incelemeleri sonucu kolonsal yapıda olmayan, yoğun, homojen ve taban malzemeye iyi yapışma özelliği gösteren filmlerin elde edildiği tespit edilmiştir.
3. Reaktif gaz akışlarının artırılmasıyla filmlerin kimyasal bileşimlerindeki C ve N miktarlarının önemli oranda arttığı ve Si miktarının önemli oranda azaldığı belirlenmiştir.
4. Üretim şartlarına bağlı olarak amorf ve kristal yapıda filmler elde edilmiştir.
5. Hesaplamalar sonucunda, filmlerin bileşiminde bulunan karbon ve azot miktarındaki artışla, optik yasak bant aralıklarında düşüş gözlemlenmiştir.
6. Aktivasyon enerjileri karbon ve azot miktarındaki artışla düşüş göstermiştir.
7. Reaktif Gaz akışlarına bağlı olarak filmlerin bileşimlerindeki C ve N artışı ve Si miktarının azalması ile sertliklerde düşüş gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, üretim sırasında kullanılan reaktif gazların akış hızları değiştirilerek, kaplamaların geçirgenlikleri, yasak bant aralıkları, aktivasyon enerjileri ve sertlikleri istenilen doğrultuda değiştirilebilmektedir. Bu özellikler kontrol edilerek filmlere, kullanılmaları amaçlanan mühendislik uygulamalarına yönelik, istenilen özellikler kazandırılabilir. Filmlerin özellikleri, uygulamalarının ideal koşullarına getirilerek bu filmler ile üretilcek cihazların çalışma verimleri kolayca artırılabilir.

10. ÖNERİLER

- Kristal yapıda filmlerin elde edilmesi çalışmanın ilgi çeken sonuçlarından biridir. Kristalleşme şartları ve mekanizmasını ortaya koymak amaçlı ek deneyler ve analizler yapılabilir.
- Hedef malzemenin kirlenmesini (target poisoning) engellemek ve kaplama yapısındaki Si oranını arttırmaya yönelik daha düşük reaktif gaz akış oranları ile çalışmalar yapılabilir.
- Oksitlenmeye neden olan baskın sebebin bulunması amaçlı, bu amaca yönelik deneyler yapılarak, hangi faktörlerin gerçekte ne kadar etkili oldukları araştırılabilir.
- SiCN filmlerin uygulama alanlarına yönelik detaylı çalışmalar yapılabilir: Schottky diyot vb.

KAYNAKLAR

- [1] **Sundaram, K. B., and Alizadeh, J.,** 2000. Deposition and optical studies of silicon carbide nitride thin films, *Thin Solid Films*, **370**, 151-154.
- [2] **Jedrzejowski, P., Cizek, J., Amassian, A., Klemberg-Sapieha, J. E., Vlcek, J., Martinu, L.,** 2004. Mechanical and optical properties of hard SiCN coatings prepared by PECVD, *Thin Solid Films*, **447-448**, 201-207.
- [3] **Xie, E., Ma, Z., Lin, H., Zhang, Z., He, D.,** 2003. Preparation and characterization of SiCN films, *Optical Materials*, **23**, 151-156.
- [4] **Chou, T., Fang, Y., Chiang, Y., Lin, C., Yang, C.,** 2008. A low cost n-SiCN/p-SiCN homojunction for high temperature and ultraviolet detecting applications, *Sensors and Actuators A*, **147**, 60-63.
- [5] **Peng, Y., Zhou, J., Zhao, B., Tan, X., Zhang, Z.,** 2011. Structural and optical properties of the SiCN thin films prepared by reactive magnetron sputtering, *Applied Surface Science*, **257**, 4010-4013.
- [6] **Ma, S., Xu, B., Wu, G., Wang, Y., Ma, F., Ma, D., Xu, K., Bell, T.,** 2008. Microstructure and mechanical properties of SiCN hard films deposited by an arc enhanced magnetic sputtering hybrid system, *Surface & Coatings Technology*, **202**, 5379-5382.
- [7] **Ohring, M.,** 1992. *The Materials Science of Thin Films*, Academic Press. San Diego, USA.
- [8] **Harsha, K. S. S.,** 2006. *Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films*, Elsevier. Oxford, UK.
- [9] **Mattox, D. M.,** 1998. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, Noyes Publications. New Jersey, USA.
- [10] **Joy, G.,** 1992. *Preparation of Thin Films*, Marcel Dekker, Inc.. New York, USA.
- [11] **Url-1** <<http://www.umms.sav.sk/index.php>>

- [12] **Bunshah, R. F.**, 2001. *Handbook of Hard Coatings*, Noyes Publications. New Jersey, USA.
- [13] **Url-2** <<http://www2.astro.psu.edu/users/cpalma/astro1h/class5.html>>
- [14] **Zayim, E. Ö.**, 2002. Tungsten Oksit ve Katkılı Tungsten Oksit İnce Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.
- [15] **Url-3** <<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/postgraduate/current/regs/mpags/ex5/bandstructure/>>
- [16] **Url-4** <<http://edgenroots.com/edgeworld/archives/semi-conductor-materials-and-their-properties/new-picture-7/>>
- [17] **Url-5** <http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_and_indirect_band_gaps>
- [18] **Khan, S.A., Zulfequar, M., Husain, M.**, 2005. Optical band gap and optical constants in a-Se₈₀Te_{20-x}Pb_x thin films, *Current Applied Physics*, **5**, 583-587.
- [19] **Kodolbas, A.O.**, 2003. Empirical calibration of the optical gap in a-Si_{1-x}C_x:H ($x < 0.20$) alloys, *Material Science and Engineering*, **B98**, 161-166.
- [20] **Chen, C.W., Huang, C.C., Lin, Y.Y., Chen, L.C., Chen, K.H., Su, W.F.**, 2005. Optical properties and photoconductivity of amorphous silicon carbon nitride thin film and its application for UV detection, *Diamond & Related Materials*, **14**, 1010-1013.
- [21] **Chen, L.C., Chen, K.H., Wei, S.L., Kichambare, P.D., Wu, J.J., Lu, T.R., Kuo, C.T.**, 1999. Crystalline SiCN: a hard material rivals to cubic BN, *Thin Solid Films*, **355-356**, 112-116.
- [22] **Afanasyev-Charkin, I.V., Nastasi, M.**, 2005. Hard Si-N-C films with tunable band gap produced by pulsed glow discharge deposition, *Surface & Coatings Technology*, **199**, 38-42.
- [23] **Kasap, S.O.**, 2002. *Principles of Electronic Materials and Devices*, McGraw-Hill. New York, USA.
- [24] **Vilcakova, J., Saha, P., Kresalek, V., Quadrat, O.**, 2000. Pre-exponential factor and activation energy of electrical conductivity in polyester resin/carbon fibre composites, *Synthetic Metals*, **113**, 83-87.

- [25] **Patidar, D., Rathore K. S., Saxena, N. S., Sharma, K., Sharma, T. P.,** 2008. Energy band gap and conductivity measurement of CdSe thin films, *Chalcogenide Letters*, **Vol. 5, No. 2**, 21-25.
- [26] **Tavşanoğlu, T.,** 2009. Deposition and Characterization of Single and Multilayered Boron Carbide and Boron Carbonitride Thin Films by Different Sputtering Configurations, Ph.D. Thesis, ITU Institute of Science and Technology, Istanbul.
- [27] **Fang, T., Wang, T. H., Wu, J.,** 2010. Mechanical Properties of Multilayered Films Using Different Nanoindenters, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **Vol. 10**, 1-5.
- [28] **Kim, C., Youn, W., Lee, D., Seol, K., Hwang, N.,** 2009. Low-temperature deposition of crystalline silicon nitride nanoparticles by hot-wire chemical vapor deposition, *Journal of Crystal Growth*, **311**, 3938-3942.
- [29] **Url-6** <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer>>
- [30] **Keller, F. J., Gettys, W. E., Skove, M. J.,** 1993. *Physics 2*, McGraw-Hill. New York, USA.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Okan Ağırseven

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul/Türkiye 21/01/1982

Adres: Bahçeşehir Boğazköy Mah. Anadolu Cad.
İktisatlılar I:18 D:10, 34538 Başakşehir/İstanbul

Lisans Üniversitesi: Fizik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

Ağırseven, O., Tavşanoğlu, T., Zayim, E. Ö., Yücel, O. 2011: Determination of the Optical Constants and Band Gaps of Silicon Carbide Thin Films Deposited by Reactive DC Magnetron Sputtering. *1st Surface Treatment Symposium*, June 15-18, 2011, Istanbul, Turkey.