

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ŞEKLİ Lİ İNCE FİLMLERİN ÜRETİLMESİ
ve
KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Yusuf Ahmet ŞENER**

Anabilim Dalı : MÜHENDİSLİKTEKİLERİ TEKNOLOJİLER

Program : MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİK

MAYIS 2005

**ŞEKLİLLİ İNCE FİLMLERİN ÜRETİLMESİ
ve
KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Yusuf Ahmet ŞENER
521031010**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Haziran 2005**

Tez Danışmanı : Yard. Doç. Dr. Kürşat KAZMANLI

Yard. Doç. Dr. Levent TRABZON

Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN

Prof. Dr. Fatma TEPEHAN

Prof. Dr. Mehmet DEMİRKOL

MAYIS 2005

ÖNSÖZ

Öncelikle lisans ve yüksek lisans öğrenim hayatımda ve tez çalışmam boyunca hem de diğer çalışmalarda büyük bir sabır ve alçakgönüllülikle öneri ve yardımlarını esirgeyen, tezim hazırlanması sırasında her türlü olanağı sağlayan, bilimsel etik ve problemlere mühendis olarak yaklaşım konusunda bana çok şey öğretmiş olan değerli hocalarımla Prof. Dr. Ali Fuat Çakır ve Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN'e teşekkürü bir görev bilirim

Tez süresince yardımlarını ve engin tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgeyen, abi olarak gördüğüm zorlandığım anlarda çözüm üretmede bana yardımları ve fikirleriyle destek veren değerli hocalarımla Yard. Doç. Dr. Kürşat Kazmanlı ve Yard. Doç. Dr. Levent Trabzon'a teşekkürlerimi iletirim

Tez çalışmam yaparken bana her daim yardımlarını esirgemiş, laboratuvardaki çalışmalarımla boyunca bana sürekli destek veren ve beni eğiten sevgili abim Ar. Gör. Ahmet Öztürk, teknisyen Sn. Hüseyin Sezer ve üniversite boyunca desteklerini hiç esirgeyen arkadaşlarım Met. Müh. Aican Ersin ve Barış Erdem'e teşekkür ederim Tezim ön hazırlık kısmında her türlü makineleri ile imalat kısmına yardımcı olan Hasan Şahin Makina Atölyesi çalışanlarına da sevgilerini iletirim

Son olarak, tüm öğrenim hayatımla boyunca beni miçin her türlü fedâkarlığı yapan, gösterdikleri destek, sabır ve özveriyle beni bugünlere getiren aileme en içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım

MAYIS 2005

Met. Müh. Yusuf A ŞENER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No:
ÖNSÖZ	ii.
TABLO LİSTESİ	v.
ŞEKİL LİSTESİ	vi.
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. ŞEKİLLİ İNCE FİLM KAPLAMANI N TEMELLERİ	3
2.1. Eğik Açılı Briktirme Yöntemi (GLAD)	3
2.2. Şekilli İnce Film Briktirme Malzemeleri	5
2.3. Büyüme Morfolojisi	5
2.3.1. İnce Filmler Büyüme Morfolojisi	5
2.3.2. Şekilli İnce Filmler Büyüme Morfolojisi	10
2.4. Şekilli İnce Film Büyütmede Önemli Faktörler	12
2.4.1. Kaynaktan Yayılan Atom Buharının Açısal Dağılımı	13
2.4.2. Eğik Atlığın ve Kaynağın Birbirine Göre Boyutu ve Şekli	14
2.4.3. Kaynaktan Atlığa Taşım Sırasında Atom Buharı Akışının Saçılması	15
2.4.4. Atom Buharının Fiziksel veya Elektrostatik Ayarlayıcılar ile Ayarlanması	15
3. ŞEKİLLİ İNCE FİMLERİ KARAKTERİZE EDEN ÖZELLİKLER	17
3.1. Atlık Açısı	17
3.2. Atlık Hareketi	19
3.3. Briktirme Hızı	21
3.4. Malzemenin Gnsi	22
3.5. Farklı Topografyalı Yüzeyler	23
4. ŞEKİLLİ İNCE FİMLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	26
4.1. Termal Buharlaştırma	27
4.1.1. Reziyans İle Buharlaştırma	27
4.1.2. Elektron De meti (e-beam) İle Buharlaştırma	28
4.2. Sıratma Yöntemi	29
5. POTANSİYEL UYGULAMA ALANLARI	32
5.1. Biyolojik: Mikro kanallarda Yüzey Alanının Geniştirilmesi	33
5.2. Termal: Termal Bariyer Kaplamalarda (TBC) Kullanımı	35
5.3. Sensör: Nem Sensörlerinde Kullanımı	36
5.4. Optik: Sıvı Kristal Düzenlenmesi	38

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
6.1. Eğik Açılı Briktirme (GLAD) Sisteminin Dizaynı	40
6.2. Şekilli İnce Filmlerin Üretimi	43
6.2.1. Numune Hazırlama	43
6.2.2. Kaplamanın Yapılması	43
6.3. Şekilli İnce Filmlerin Karakterizasyonu	45
7. DENEY SONUÇLARI ve İRDELEMELER	46
7.1. Atlık Açısı İle Kolon Açısı İlişkisinin Çkarılması	46
7.2. Dönüş Hızı ve Buharlaşma Hızının Film Kolon Morfolojisine Etkisi	48
7.2.1. Numune Dönüş Hızının Film Morfolojisine Etkisi	48
7.2.2. Buharlaşma Hızının Film Büyüme Morfolojisine Etkisi	49
7.2.3. Zigzag Şekilli Filmler	51
7.2.4. Atlık eğiklik açısının 80° ol duğu filmler	54
7.3. Üretilen Yapıların Yüzey Görüntülerinin İncelenmesi	54
8. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58
EKLER	
Ek – A: Şekiller	63
Ek – B: Tablolar	67
ÖZGEÇMİŞ	68

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Fiziksel buhar biriktirme yöntemleri	26
Tablo 5.1. Şekli İnce Filmler, öngörülen uygulama alanları	32
Tablo 6.1. Şekli İnce Filmler içi nitelem olarak kaplama parametreleri	43
Tablo 6.2. Nötr Moleküler Kaynak Parametreleri.....	44
Tablo 6.3. Üretilen filmlerin kaplama parametreleri.....	44
Tablo 7.1. Eğik açıyla üretilen kolonsal filmlerin açılarını tespiti	47
Tablo 7.2. 4 ve 5 nolu kaplamaların karşılaştırmalı kaplama parametreleri.....	48
Tablo 7.3. 8 ve 9 nolu kaplamaların karşılaştırmalı kaplama parametreleri.....	50
Tablo B.1. Literatürde çalışılan malzeme ve üretim yöntemlerinin sınıflandırılması. 67	

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Eğik açıyla ince filmbiriktirme (GLAD) yöntemi nin şematik görünümü.....	3
Şekil 2.2	GLAD yöntemi ile üretilebilen çeşitli nano boyutlu yapıların şematik gösterimi a) Düz b) Eğik Kolonlar c-d-e) Değişik çaplarda sütunlar f) Dallanmış yapılar g-h) Başlıklı kolonlar i) Sarımal yapı j) Dalgalı kolonlar k-l) Zigzag kolonlar	4
Şekil 2.3	GLAD yöntemi ile üretilmiş, farklı şekillerden (a), farklı şekil ve farklı malzemelerden (b) oluşan entegre yapılar	5
Şekil 2.4	İnce Filmlerde biriktirme kademeleri a) Çekirdeklenme b) Kristal Büyümesi c) Yakın Çekirdeklerin birleşmesi d) Bütün çekirdeklerin birleşerek sürekli filmlerin oluşması e) Oluşan filmlerin büyümesi	6
Şekil 2.5	Filmbüyüme modelleri, a) Frank Van der Merwe b) Volmer-Weber ve c) Stranski Krastanov	8
Şekil 2.6	Zone modelleri a) Movchan and Demchishin b) Thornton.....	8
Şekil 2.7.	İnce film morfolojisi için oluşturulan yeni yapı modeli.....	11
Şekil 2.8	Gölgeleme etkisinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.9	Yarı muzayda bir kaynaktan yayılan atom buharının dağılımı a) cosine dağılımı b) cosine altı c) cosine üstü dağılımı.....	13
Şekil 2.10.	Cosine tipi gördüğü yol yayılımı a) paralel b) eğik durumdaki altlıklara göre ..	13
Şekil 2.11.	Düzlemsel kaynaktan cosine tipi gördüğü yol dağılımı a) paralel b) eğik altlıklar için	14
Şekil 2.12	Atom buharını ayarlayıcı a-b) fiziksel c) elektrostatik ayarlayıcılar	15
Şekil 3.1	Açı tanımları ile biriktirme prosesi ve kolonsal oluşumun şematik gösterimi ; altlık normaline göre; atom buharının geliş açısı (α) ve oluşan kolonların altlık normaline göre eğiklik açısı (β)	17
Şekil 3.2	Aynı biriktirme koşullarında büyütülüş, a) 75° b) 85° c) 88° geliş açısında (α) oluşan S Oşekilli ince filmleri	18
Şekil 3.3	GLAD sisteminin şematik gösterimi, a) Altlık hareketi ve açı değişikliği olmadan sabit açıda biriktirme, b) Altlık dönüşü yok fakat zamanla göre altlık açısının değiştiği biriktirme ve oluşan şekiller	19
Şekil 3.4	Eğikliğe sabit olduğu, altlığın hareketini etkisiyle oluşan şekiller a) Kolonsal b) Zigzag c) Burçulu morfolojiler.....	20
Şekil 3.5	Farklı malzemelerin, atom buharı geliş açısı ile dolu kütle göre yoğunluk yüzde oranı	22
Şekil 3.6	a) GLAD yöntemi nin düz topografyaya sahip altlığa b) yükseltili altlığa uygulanması; başlangıç ve sonraki evrelerdeki şematik gösterimi	24

Şekil 3.7.	Yapay yükseltilerin oluşturduğu dişi ve yandan görünümü	25
Şekil 4.1.	Şekilli İnce filmleri üretmek için termal buharlaştırma yöntemi, şematik gösterimi	28
Şekil 4.2.	Elektron deposu yöntemi ile buharlaştırma, şematik gösterimi	29
Şekil 4.3.	Magnetron sputterma yöntemi nin şematik gösterimi	30
Şekil 5.1.	Kaplama öncesi (a) ve kaplama sonrası (b) mikro kanalın görünümü	33
Şekil 5.2.	Şekilli ince filmler ile mikro kanallar üretimi aşaması, a) Şekilli ince film b) Şekilli ince film üzerine kaplanan photoresist c) Photoresist'in istenilen kısım dağıldıktan sonraki ortaya çıkan mikro kanal	34
Şekil 5.3.	a) Boşluklu kolon sal yapının üstten görünümü b) Ara kat man olan yoğun yapının üstten görünümü c) Üretilen termal bariyer kaplamasının ara kesiti	36
Şekil 5.4.	Sensörün şematik (a) ve üretilen film in arakesit (b) görüntüsü	37
Şekil 5.5.	LC anahtarlama hücresi üretimi	39
Şekil 6.1.	GLAD sistemi için gerekli dişayının şematik gösterimi a) Pot ile altlık arasındaki mesafenin ayarlanabilmesi b-c) Buharın geliş yönüne göre altlığın eğilebilmesi	41
Şekil 6.2.	GLAD sisteminde kullanılacak adımların motorunun olası ısınmalardan korunması için gerekli soğutma önlemleri şematik gösterimi	41
Şekil 6.3.	Vakum ortamındaki kablo ve soğutma borularını dışarı çıkarmak flanşın şematik gösterimi	42
Şekil 6.4.	Adımlar motoru ve dışarıdan kontrol ünitesi	42
Şekil 6.5.	Kesikli dönüş ve biriktirme mekanizmasının şematik gösterimi	45
Şekil 7.1.	Sadece altlık açısı değiştirilerek üretilmiş 1, 2, 3 nolu kolon sal ince filmlerin arakesit ve üstten görünümeleri a) 85° b) 80° c) 70°	47
Şekil 7.2.	Altlık açısı ve Kolon açısı ilişkisi	48
Şekil 7.3.	Dönüş hızı 0,2 rpm olan 4 nolu kaplama (a) Arakesit 100.000, (b) Yüzey Görüntüsü 65.000 Büyütme	49
Şekil 7.4.	Dönüş hızı 0,1 rpm olan 5 nolu kaplama (a) Arakesit 25.000, (b) Yüzey Görüntüsü 65.000 Büyütme	49
Şekil 7.5.	180 Amper akı uygulanan 8 nolu kaplama (a) Arakesit 20.000, (b) Yüzey Görüntüsü 65.000 büyütme	50
Şekil 7.6.	160 Amper akı uygulanan 9 nolu kaplama (a) Arakesit 55.000, (b) Yüzey Görüntüsü 65.000 büyütme	50
Şekil 7.7.	Buharlaşma hızına göre şekil oluşumunun çizgisel gösterimi	51
Şekil 7.8.	Zigzag şekillerinin oluşturulduğu (a) 16 ve (b) 17 nolu kaplamalar (x15.000)	52
Şekil 7.9.	Düzgün zigzaglı 18 nolu kaplama arakesit görüntüsü (35.000 Büyütme)	53
Şekil 7.10.	Düzgün zigzaglı 19 nolu kaplama arakesit görüntüsü (35.000 Büyütme)	53
Şekil 7.11.	Zigzag şekillerinin üstten görünümü a) 19 nolu b) 17 nolu kaplamalar (x15.000) ..	54
Şekil 7.12.	Altlık eğikliğin 80° olduğu 13 nolu kaplamasının arakesit (x30.000) yüzey (x35.000) büyütme görüntüsü	55
Şekil 7.13.	Sırası ile (a) 9 ve (b) 18 nolu kaplamaların üstten görünümü	55
Şekil A.1.	Dişayın edilen GLAD sistemi nin fotoğrafları	63

Şekil A2	Adı m motoru için kontrol ünitesi	64
Şekil A3	Soğutucu borularının ve adı m motoru kablolarının dışarı çıkışı nı sağlayan flanş... 64	
Şekil A4	16 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x20.000) ve yüzey görüntüsü (x 35.000)	65
Şekil A5	A 5. 17 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x20.000) ve yüzey Görüntüsü (x 35.000)	65
Şekil A6	18 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x30.000) ve yüzey görüntüsü (x 35.000)	65
Şekil A7	19 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x30.000) ve yüzey görüntüsü (x 35.000)	65
Şekil A8	12 nolu kaplamanın arakesit ve yüzey görüntüsü (x 35.000)	66
Şekil A9	14 nolu kaplamanın arakesit ve yüzey görüntüsü (x 35.000)	66
Şekil A10	7 nolu kaplamanın arakesit (x30.000) ve yüzey görüntüsü (x 15.000)	66
Şekil A11	10 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x35.000) ve yüzey görüntüsü (x15.000)	66

ŞEKLİLLİ İNCE FİLMLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

İnce film kaplamalarda, şekilli ince film teknolojisi yeni bir dal olarak sayılabilir. Şekli ince filmler, kolonsal, zigzag sarımsal, S veya C biçiminde kolonlardan oluşan filmler olarak ifade edilebilir. Eğik açılı biriktirme sistemi (GLAD) ile istenen şekilleri kontrollü olarak üretebilmek mümkündür. Bu sistemde altlığın eğiklik açısı, altlığın dönüş hareketi ayarlanabilir ve kaplama esnasında da değiştirilebilir.

Oluşan film kolonlu bir yapıda ve % 10 ile % 90 boşluklu ve aynı zamanda kolonların kalınlığı 10 ile 300 nm mertebelerindedir. Bu durumu yüzeyde düşük atom mobilitesi ve yeterli gölgeleme sonucu olur. Şekil oluşumunu etkileyen diğer parametreler ise, altlığın eğiklik açısı, dönüş hareketi, buharlaşma hızı, altlık yüzey sıcaklığı ve kaplanacak malzemenin cinsi olarak sıralanır. Bu tür şekilli filmlerin optik, elektronik, biyo-teknoloji ve sensör alanında çok değişik potansiyel uygulama alanları vardır.

Bu çalışmada amaç, şekilli ince filmleri üretebilmek için eğik açılı biriktirme sistemini fiziksel buhar biriktirme sistemine adapte edip daha sonra termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen gümüş (Ag) filmlerin şekil morfolojilerini incelemektir.

Yapılan çalışmada öncelikle altlığı döndürmeden, üç farklı altlık açısında oluşan eğik kolonların açıları hesaplanmış ve literatürde belirtilen eşitliğe uyduğu tespit edilmiştir. Ayrıca değişik dönüş hızlarında ve biriktirme hızlarında oluşan şekil morfolojileri karşılaştırılmıştır. Daha sonra kaplama sırasında altlığın kesikli dönüş hareketi yapmasıyla, zigzag şekilli filmler üretilmiş ve optimizasyonu sağlanmıştır.

Sonuç olarak altlık sabitken yapılan kaplamalarda, altlığın açısı azaldıkça oluşan kolonlar dikleşmeye başlamıştır. Ayrıca altlık döndürüldüğü kaplamalarda, altlık dönüş hızının biriktirme hızına oranı fazla olduğu durumda (0,2 rpm) kolonsal, daha az olduğu durumda (0,1 rpm) ise film şekilli olarak büyümeye başlamıştır. Bununla birlikte, altlığın dönüş hızı sabit olup, biriktirme hızı arttığı durumda yine şekilli yapıda filmler oluşurken (eğik kolonlar), biriktirme hızı daha yavaş olduğu durumda yüzeye gelen atomların daha yüksek hareketliliğinden dolayı kolonsal filmlerin oluştuğu gözlenmiştir. Son olarak altlık belirli aralıklarda sabit tutulup, sonra hızlı şekilde 180° döndürülmesi ile, zigzag şekilli filmler üretilmiştir.

MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF SCULPTURED THIN FILMS

SUMMARY

In thin film coatings, the technology of sculptured thin films can be considered as a new branch. Sculptured thin films can be expressed as films which form from columns in vertical, zigzag, helices, S or C shapes. It is possible to be able to produce the desired shapes in control by the glancing angle deposition (GLAD) system. In this system, the tilted substrate angle and the rotation movement of the substrate can be adjusted, and it is also possible to change these parameters during coating.

The film that is formed is in a column structure and 10~90% porous, and also the thickness of those columns is about 10~300 nm. This situation is a result of both the low atomic mobility at the surface and enough shadowing. Other parameters which affect the shape formation can be mentioned as the tilted substrate angle, rotation movement, deposition rate, substrate surface temperature and the type of the coating material. This type of sculptured films have many different present applications in the areas of optics, electronics, bio-technology and sensors.

The aim of this study is to adapt the GLAD system to our Physical Vapor Deposition (PVD) system in order to manufacture thermal evaporated silver (Ag) sculptured thin films, and then, to examine the growth morphology of the manufactured films.

In this study, first of all, the angles of the tilted columns which are formed in three different substrate angles have been calculated without rotating the substrate, and it has been determined that it fits the equation defined in literature. In addition, the shape morphologies which are formed at different rotation and deposition rates have been compared. Later, zigzag shaped films have been manufactured with the substrate rotating discontinuously during the coating, and they (these films) have been optimized.

As a result, in the coatings, when the substrate is stable, the less the angle of the substrate is, the more steep the formed columns are. Moreover, in the coatings during which the substrate was rotated, when the ratio of the substrate rotation rate to the deposition rate was higher (0.2 rpm) the film began to grow in columns, and when it was lower (0.1 rpm), it grew in the sculptured form. More with this, in the situation that the rotation rate of the substrate was stable and the deposition rate increased, films in the sculptured structure were formed (tilted columns), whereas when the deposition rate was lower, it has been observed that films formed in columns depending on the higher mobility of the atoms which come to the surface. Finally, with the substrate being stable on certain intervals and then rotating quickly 180°, zigzag shaped films were manufactured.

1. GİRİŞ

Teknolojinin günümüzde zamanla gelişmesi ile birçok bilimdalındaki araştırmalar, çalışmalar da teknoloji ile paralel gelişmektedir. İnce film teknolojisi de bu gelişmelerden etkilenmekte ve yeni fiziksel buhar biriktirme dizaynları tasarlanmaktadır. Bunların sonucu olarak üretilen ince filmlerin fiziksel, kimyasal, büyüme mekanizması gibi birçok özelliği incelenmektedir.

Yeni bir fiziksel buhar biriktirme prosesi ile nano boyutta üretilen ince filmlerden birisi de, altlığa kaynağa göre eğiklik açısı verilip değişik dönme hareketleri uygulayarak üretilen “Şekilli İnce Filmler”dir. Bu filmlerin belirgin özellikleri, film morfolojisinin film biriktirme esnasında kontrol edilebilmesi, istenilen aralıklarda ve düzende boşluklu yapıya sahip filmlerin üretilmesi ve boşluklu yapısı sayesinde yüzey alanını genişletebilmesidir.

Şekilli ince filmlerin tarihçesine bakıldığında, kolonsal ince filmler 1885 yılında Kundt tarafından eğik açıyla gelen buharı altlık üzerinde biriktirmesi ile üretilmiştir. Daha sonra 1959 yılında Young ve Kowel altlığı da döndürerek şekilli ince filmleri ürettir ve 1966 yılında Neuwhuizen ve Haanstra kaplama esnasında altlığın gelen buharı açısını değiştirip ince film ürettir [1]. O yılların başından itibaren eğik açı ile biriktirme üzerine araştırmalar yapıp incelenmekte, fiziksel buhar biriktirme yöntemleri ile üretilmekte ve kolonsal ince filmler olarak adlandırılmaktadır. Şekilli ince filmlerin şimdiye kadar başlayarak yakın gelecekte de nano teknolojisinde faydalı bir alt ürün olarak hizmet vereceği aşîkardır.

Şekilli ince filmlerin üretilmesi, büyüme mekanizmasının, fiziksel özelliklerinin incelenmesi, kullanılabileceği alanların araştırılması konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Eğik açılı biriktirme yöntemi ile şekilli ince filmlerin üretilmesi mümkün olmaktadır. Messier, şekilli ince filmlerin başlangıcı, üretimi ve gelişimi hakkında çalışmalar yapmış [2], Malac, GLAD filmlerini periyodik dizgiler halinde üretirken [3], Suzuki ve Taga şekilli ince filmler ile yüzey alanı genişletilmesi üzerine araştırmışlar [4], Lakhtakiya teorik olarak optiksel özelliklerini incelemiştir [5], Karabacak yaptığı

simülasyonlar ile bu filmlerin büyüme mekanizmalarını araştırmış [6], Brett bu filmlerin kullanılabileceği biyolojik, optik, ısısal gibi değişik uygulama alanları hakkında deneyler yapmıştır. [7-10].

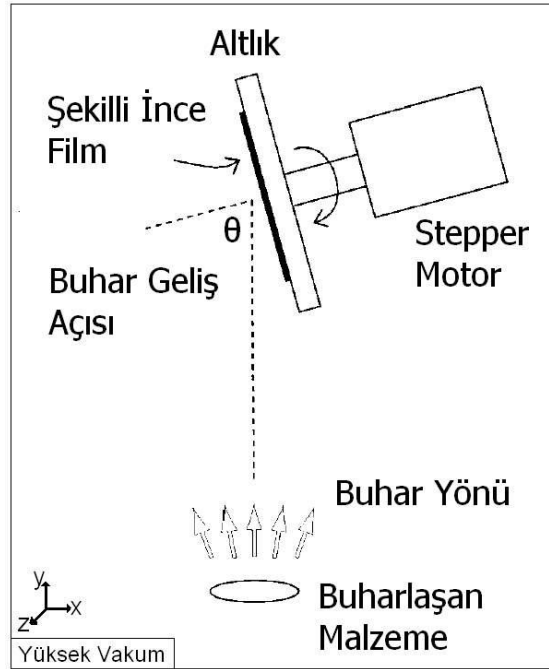
Bu çalışmanın amacı, bu konuyla ilgili yapılan araştırmaları bir araya toplamak, konularına göre gruplandırmak ve ayrıca termal buharlaştırma yöntemiyle gümüş şekilli ince filmleri üretmektir. Ayrıca bu konuyla ilgili yapılacak ileri ki çalışmalara altyapı sağlamaktır. Bu çalışmada, fiziksel buhar biriktirme cihazına eğik açılı biriktirme (GLAD) sisteminin dizayn edilip adaptasyonunun sağlanmıştır. Daha sonra da Türkiye’de ilk defa “Şekilli İnce Filmleri” üretilmiştir. Üretilen filmlerin büyüme mekanizmasını incelemek amacıyla da elektron mikroskobu ile arakesit ve yüzey görüntüleri incelenmiştir. Ayrıca karşılaşılan problemler de belirtilmiştir.

2. ŞEKLİ LÜ İNCE FİLM KAPLAMANI N TEMELLERİ

Şekilli ince filmler, malzemenin eğik açılı biriktirme yöntemi ile morfolojisinin nano düzeyde kontrollü olarak kolonsal, zigzag sarımsal, yay şeklinde ve boşluklu yapıda üretilen ince filmler olarak tanımlanabilir. Şekilli ince filmlerin üretilmesi için öncelikle vakum ortamında, kaplama esnasında biriktirmenin yapıldığı altlığın pozisyonunun, dönüş hızının, gelen atom buharına göre sahip olduğu açının değiştirilmesi sağlanacak eğik açılı biriktirme sistemine ihtiyaç vardır. Bu sistem ve özellikleri detaylı bir biçimde bir alt bölümde incelenecektir.

2.1. Eğik Açılı Biriktirme Yöntemi (GLAD)

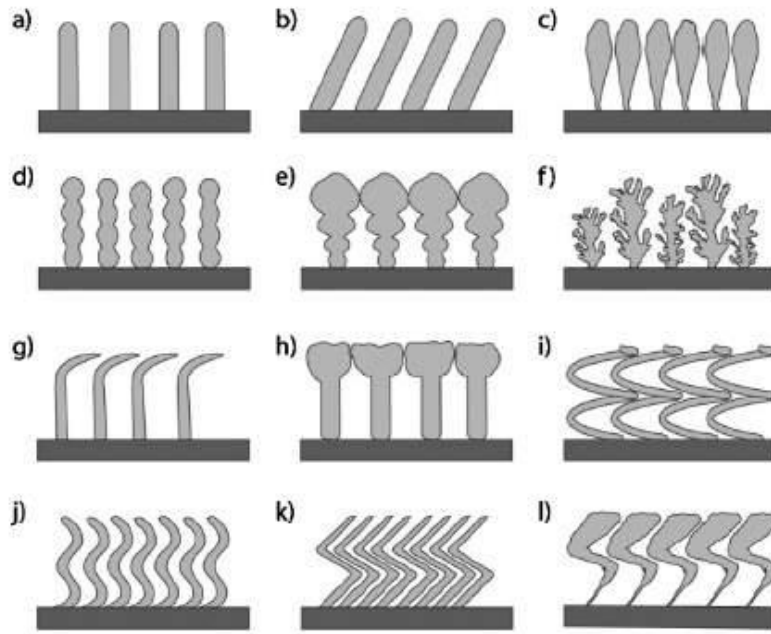
Eğik açıyla biriktirme yöntemi (Şekil 2.1) sayesinde altlığa gelen atom buharının istenilen açıyla gelmesi ve kaplama esnasında altlığın istenilen hızda hareket ettirilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca kaplama sırasında atom buharının altlığa gelme açısının değiştirilmesi de mümkün olmaktadır.



Şekil 2.1. Eğik açıyla ince film biriktirme (GLAD) yönteminin şematik görünümü [11]

Temel olarak GLAD sisteminde, kontrolü dışarıdan yapılarak sağlanan, vakum ortamına uygun adım motoru mevcuttur. Adım motoru, altlığın istenilen hızda dönmelerini sağlamaktadır. İnce filmbiriktirme esnasında, altlığın hızı, oluşturulması istenilen ince film şekline göre hızlı veya yavaş dönebilir. Bunun dışında diğer bir adım motoru kullanarak da, yine kaplama esnasında atom buharının altlığa geliş açısını değiştirerek mümkündür. Böylece kaplama esnasında oluşacak filmin şeklini, yönünü değiştirerek kontrol altında tutmak mümkün olmaktadır.

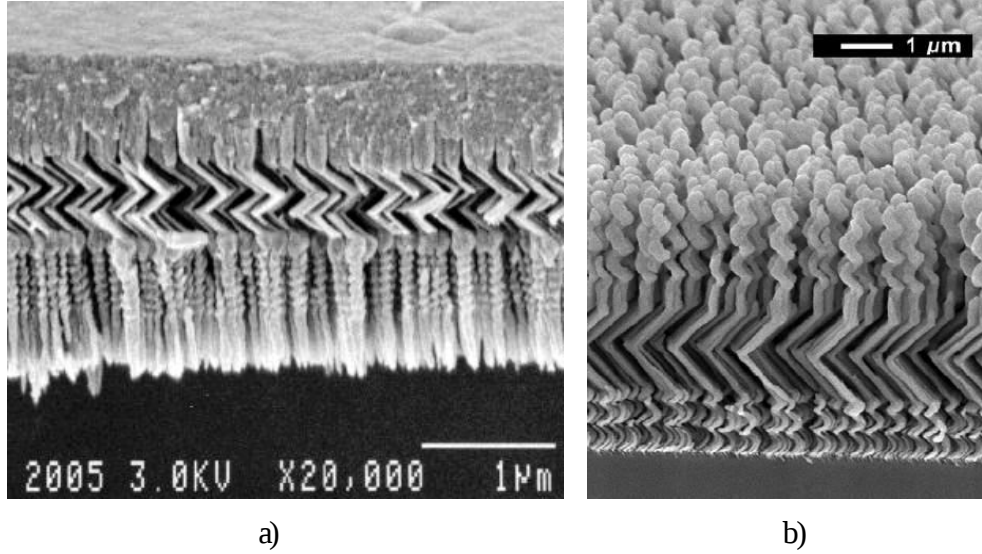
GLAD yöntemi, termal buharlaştırma, sıçratma ve e-de meti buharlaştırma veya diğer ince filmbiriktirme yöntemlerinde uygulanabilir ve istenilen yapıda kontrollü şekiller üretilebilir. Genel olarak GLAD yöntemi ile üretilen ince filmlerde altlığın dönüş hızına ve atom buharının geliş açısına bağlı olarak değişik şekillerde filmler büyütülmektedir (Şekil 2.2) [12].



Şekil 2.2 GLAD yöntemi ile üretilen çeşitli nano boyutlu yapıların şematik gösterimi a) Düz b) Eğik Kolonlar c-d-e) Değişik çaplarda sütunlar f) Dallanmış yapılar g-h) Başlıklı kolonlar i) Sarımsaklı yapı j) Dalgalı kolonlar k-l) Zıgzag kolonlar [12]

GLAD yöntemi ile, ince filmbiriktirme sırasında altlığın hızını ve atom buharının geliş açısını kaplama esnasında değiştirerek mümkündür. Ayrıca kaplama sırasında farklı şekilleri ve farklı malzemeleri tek bir altlık üzerinde entegre etmek de mümkün olabilmektedir. Şekil 2.3.(a)'da tek bir kaplama prosesinde üretilen farklı şekillere sahip Ta₂O₅ ince filmlerin kombinasyonu görülmektedir [13]. Şekil 2.3.(b)'de ise GLAD yöntemi ile üretilmiş çok katmanlı kompozit ince filmde, en alt katman

TiO₂ – sarı mal yapı, diğer katmanlar ise sırasıyla SiO₂ ve zigzag kolonsal ve sarı mal yapı da olup her farklı malzeme hemde farklı şekilleri n entegrasyonu görülmektedir [14].



Şekil 2.3. GLAD yöntemi ile üretilmiş, farklı şekillerden (a), farklı şekil ve farklı malzemelerden (b) oluşan entegre yapılar [13, 14]

2.2 Şekli İnce Fil m B r i k t i r n e M a l z e m e l e r i

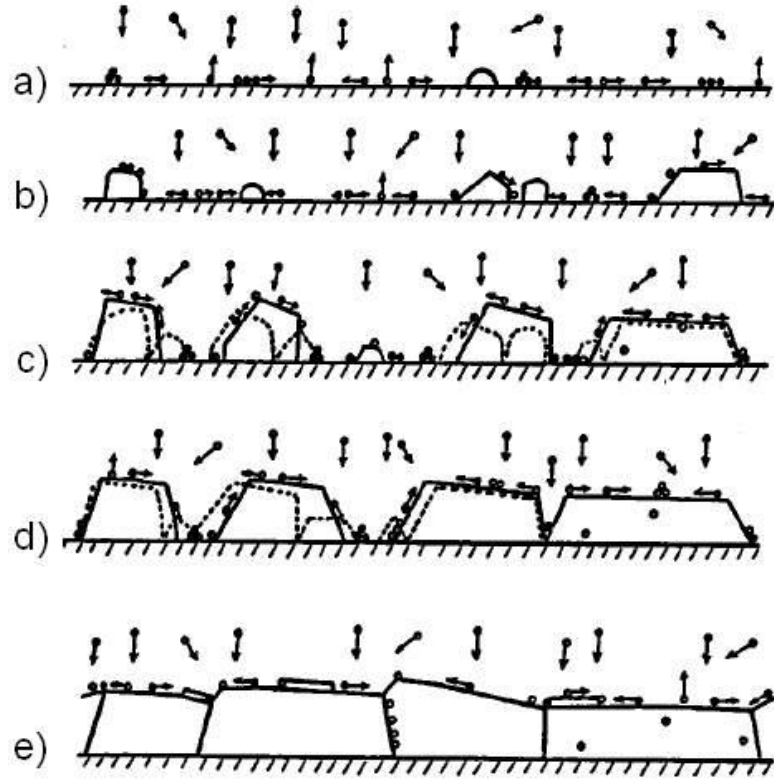
Literatürde bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak prensipleri ilerde anlatılacak termal buharlaştırma, magnetron sputratma ve e-de meti buharlaştırma yöntemleri ile şekilli ince filmler üretilmiş ve üretim yönteminin özelliklerine bağlı olarak da çok geniş bir aralıkta çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda kullanılan malzemeler, üretim yöntemleri yapılan çalışmanın referansı ile birlikte Ek B.1’de sınıflandırılmıştır.

2.3 Büyüme Morfolojisi

2.3.1 İnce Filmler Büyüme Morfolojisi

İnce filmlerin mikro yapılarını tanımlamada, morfoloji (kristal boyut ve şekilleri) ve tekstür (tercihli kristal yönelimleri) kullanılan en önemli iki özelliktir. Morfoloji, kaplama sıcaklığı, kaplama hızı, yüzeye gelen atom veya iyonların enerjileri, geliş açları gibi kaplama parametrelerine doğrudan bağlıdır. Kaplamaların bir çok özelliği de, kaplama sırasında gelişen ve proses parametrelerinden etkilenen ince film büyüme morfolojisine bağlıdır.

İnce fil moluşu mundaki evrelerin başında, atombuharından ya da plazma içerisinden gelen atomların yüzeye ulaşp, yüzeyde soğrulması (absorblanması) gelir. Absorblanan atomlara adatom adı da verilmiştir. Yüzeyde absorbe olan bu atomlar, sahip oldukları enerjilerine göre yüzeyde enerji açısından dengeli duruma gelene kadar veya bağ yapıp daha büyük kümeciklerin oluşmasına kadar yüzey üzerinde difüzyonla hareketli durumdadırlar. Daha sonra yüzeyde difüzyona uğrayıp diğer adatomların etkileşim mesafesi ne giren atomlar daha büyük grupları, adacıkları oluştururlar. Fil miçerisindeki fazlar ve bu fazları oluşturan atomların bağları oluşur ve daha sonra enerji dengesinin kurulması ile de, çekirdeklenme başlar. Çekirdeklenmeden sonra da film büyümesi bu çekirdekler etrafında gerçekleşir. (Şekil 2.4) [15, 16].



Şekil 2.4. İnce Fil mlerde birikme kademeleri a) Çekirdeklenme b) Kristal Büyümesi c) Yakın Çekirdeklerin birleşmesi d) Bütün çekirdeklerin birleşerek sürekli film oluşturmaları e) Oluşan film tabakasının büyümesi [17]

Birikme esnasında yüzeyin pürüzlülüğüne, minimum yüzey enerjisi kuralına ve atomların geliş açlarına bağlı olarak birçok bölgede çekirdekler oluşacaktır. Çekirdeklenme kristal hataları, yüzeydeki emprüteler gibi aktif yüzey bölgelerinde tercihi olarak başlar. Çünkü bu bölgelerde adatomla bağın kurulabilmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisi düşüktür.

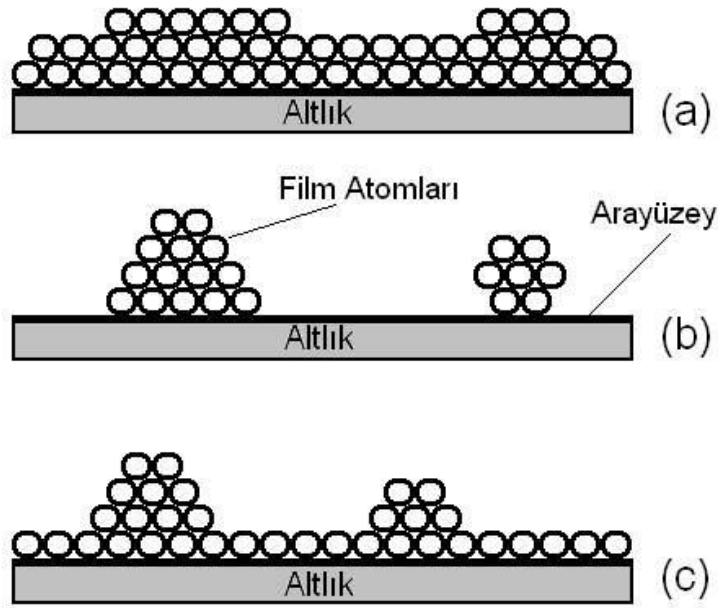
Bütün çekirdeklerin birleşmesi ile yüzeyde sürekli bir film oluşumu başlar. Artık yüzey serbest enerjisi de minimum durumdadır. Elde edilen yapı ise aralarında boşluklar bulunan bir film yapısıdır. Eğer atom mobilitesi yeteri kadar yüksek ise boşluklar yüzey difüzyonu sonucu doldurulabilir ve sürekliliği olan bir film oluşur. Eğer atom mobilitesi yeterli değil ise bu boşluklar doldurulmadan yeni atomlar yüzeye birikir ve bu boşluklar sabit hale gelir. Bu da büyümenin bu şekilde devam etmesine neden olur. [15].

Film gelişimi hakkında geliştirilmiş;

- (a) Frank- Van der Merwe (Atomik katmanlar şeklinde büyüme)
- (b) Volmer- Weber (Üç boyutlu adacık büyümesi)
- (c) Stranski- Krastanov (Karışık büyüme)

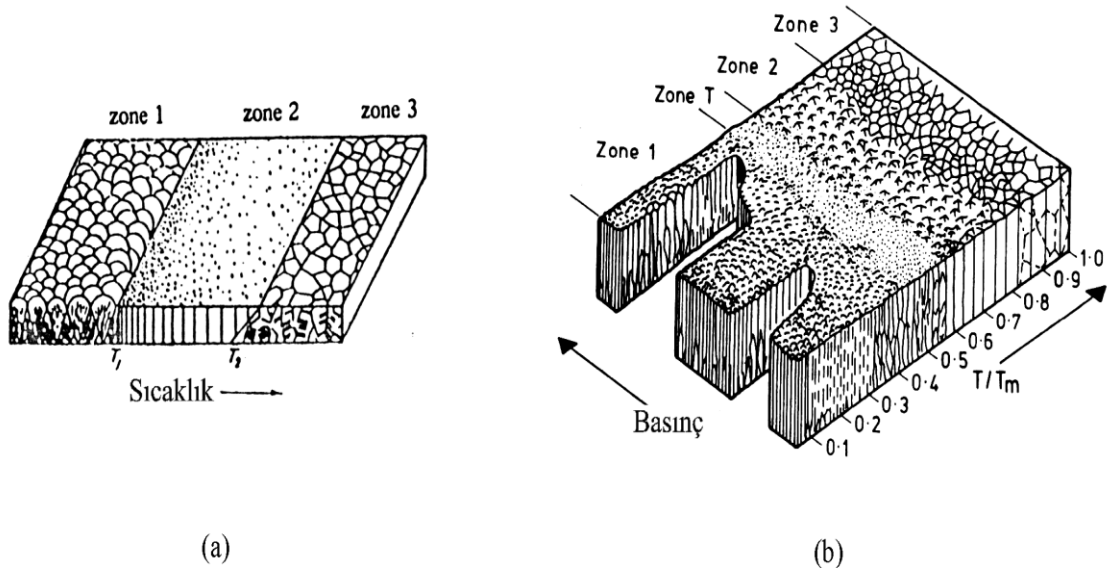
olmak üzere üç farklı büyüme modeli bulunmaktadır (Şekil 2.5). Birikme sırasında sadece taban malzemesinin yüzey serbest enerjisi değil, ara yüzey serbest enerjisi ve film yüzey serbest enerjisi de etkili olmaktadır. Film büyümesi sırasında, toplam yüzey enerjisi kaplanmamış taban malzemenin yüzey enerjisinden daha küçük olduğu zaman Şekil 2.5 (a)'daki düzgün, katmanlı Frank- Van der Merwe büyüme modeli etkin hale gelmektedir. Eğer oluşan film ile taban malzemesi arasında güçlü bir bağ varsa, film tabaka tabaka (Frank van der Merwe) gelişecektir ve ara yüzey serbest enerjisi minimuma inecektir. Bu şekilde ara yüzey enerjisi düşerek toplam yüzey enerjisi de düşürecektir.

Film ile taban malzeme arasındaki bağın zayıflaması halinde, ara yüzey serbest enerjisi film yüzey serbest enerjisi ve taban malzemenin yüzey serbest enerjisinden toplamna eşit olacağından, ara yüzey enerjisi ile birlikte toplam yüzey enerjisi de artacaktır. Bu durumda, Şekil 2.5.(b)'deki Volmer- Weber büyüme modeli söz konusu olur. Bu modelde katmanlı büyümenin yerine üç boyutlu adacıklar halinde büyüme söz konusudur. Üçüncü büyüme modeli olan Stranski- Krastanov modelinde ise alt malzeme üzerinde önce tabaka tabaka bir yada iki tek katmanın oluşumunun ardından, büyüme yüzey enerjilerinin değişimi nedeniyle büyüme katmanlı yapıdan adacık haline dönüşmektedir (Şekil 2.5.(c)) [15, 16, 18].



Şekil 2.5 Filmbüyüme modelleri, a) Frank Van der Mer ve b) Volmer-Weber ve c) Stranski Krastanov [15]

Yukarıda açıklanan modellerden de anlaşılacağı gibi, oluşacak ince filmin morfolojisi, yüzey mobilitesinin kontrolüne bağlı olup, yüzey mobilitesini etkileyen parametrelerden birisi de sıcaklıktır. Sıcaklık etkisine bağlı olarak, Movchan - Demchishin ve Thornton deneysel verileri kullanarak kaplama morfolojisinin sıcaklığa göre değişimini gösteren birer model geliştirmişlerdir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Yapısal zone modelleri a) Movchan and Demchishin b) Thornton [19]

Movchan ve Demchishin termal buharlaştırma ile elde edilen kaplamalarda morfolojinin T_s/T_m oranına göre değişimini gösteren bir model geliştirmişlerdir. T_s

(°K) kaplama sıcaklığını, T_m (°K) ise kaplanan malzemenin ergime sıcaklığını göstermektedir. Thornton ise sıçratılarak elde edilen filmler için bu modeli iletmiş ve morfolojinin Ar^+ basıncına olan bağımlılığını da dâhil ettiği yeni bir model geliştirmiştir [18].

Movchan ve Demchishin modelinde 3 ayrı bölge (zone) bulunmaktadır. Z1' den Z2' ye geçiş metaller için 0.3 oksitler için 0.22 - 0.26 T_s/T_m oranıdır. Z2' den Z3' e geçiş ise 0.45 - 0.5 T_s/T_m oranında gerçekleşmektedir. Thornton modelinde ise Z1 ile Z2 arasında ZT adı verilen bir ara geçiş zonu bulunmaktadır. T zonuna sadece sıçratma değil iyon kaplama tekniklerinin hepsi de rastlanmıştır [18].

Zone 1 yapısı çok düşük sıcaklıklarda oluşmaktadır. Bu sıcaklıklarda yüzey difüzyonu çok azdır. Düşük sıcaklık nedeniyle yüzeye gelen atomların enerjilerinin düşük olması hareket kabiliyetlerini etkileyerek atomların çarptıkları noktalara yakın bölgelerde çekirdekleneceklerdir. Bu şekilde çekirdeklenme yoğunluklarını artıracaktır. Yüksek çekirdeklenme yoğunluğu, filmin ince kolonlu Z1 modelinde büyümesine neden olacaktır. Filmin gelişimi 3 boyutlu adacıklar modeline uygundur ve büyüyen film yüzeyi pürüzlüdür. Birkaç nm'lik boşluklarla birbirlerinden ayrılan 10 – 100 nm çapında kolonsal kristaller bulunmaktadır. Kolonlar hatalı kristallerden oluşmuştur. Film kalınlıktıkça yüzey difüzyonu az olduğundan hatalar büyümekte ve kalıcı hale gelmektedirler [20].

Zone T 'deki yapı film kalınlığı boyunca homojen olmayıp, altlık yüzeyinde kristallenme vardır. V şeklindeki taneler film kalınlığı arttıkça kolonsal yapıya dönerler. Zone T 'de Zone 1 deki gibi hatalı kolon yapısı mevcuttur, fakat Zone 1' de bulunan kolonlar arasındaki boşluklar yoktur. İyon kaplamalarda bu zona (ZT) çok rastlanmaktadır. Aslında sıcaklık düşük olduğu iyon kaplamalarda Zone 1'in gözlenmesi gerekirken iyon kaplamanın sahip olduğu kinetik enerji nedeniyle film gelişimini Zone T yapısına dönüştürmektedir [20].

Zone 2' de sıcaklık yüzey difüzyonu mekanizmasının ana faktör olabileceği kadar yüksektir. Z2, birbirlerine sıkı sıkıya yapışmış tane sınırları olan kolonlara sahiptir. Kolon çapları Z1' e göre büyüktür ve çap T_s/T_m oranı arttıkça büyümektedir. Kolonlar Z1 ve ZT' ye göre daha az hatalı kristal yapısına sahiptir.

Z3' bölgesinde sıcaklığın çok yüksek olması yüzünden kütleli difüzyon hâkim mekanizmadır. Yeniden kristalleşmeler söz konusudur. Kristaller büyüktür ve rastgele yönelmiştir. Filmyüzeyi düz ve parlaktır.

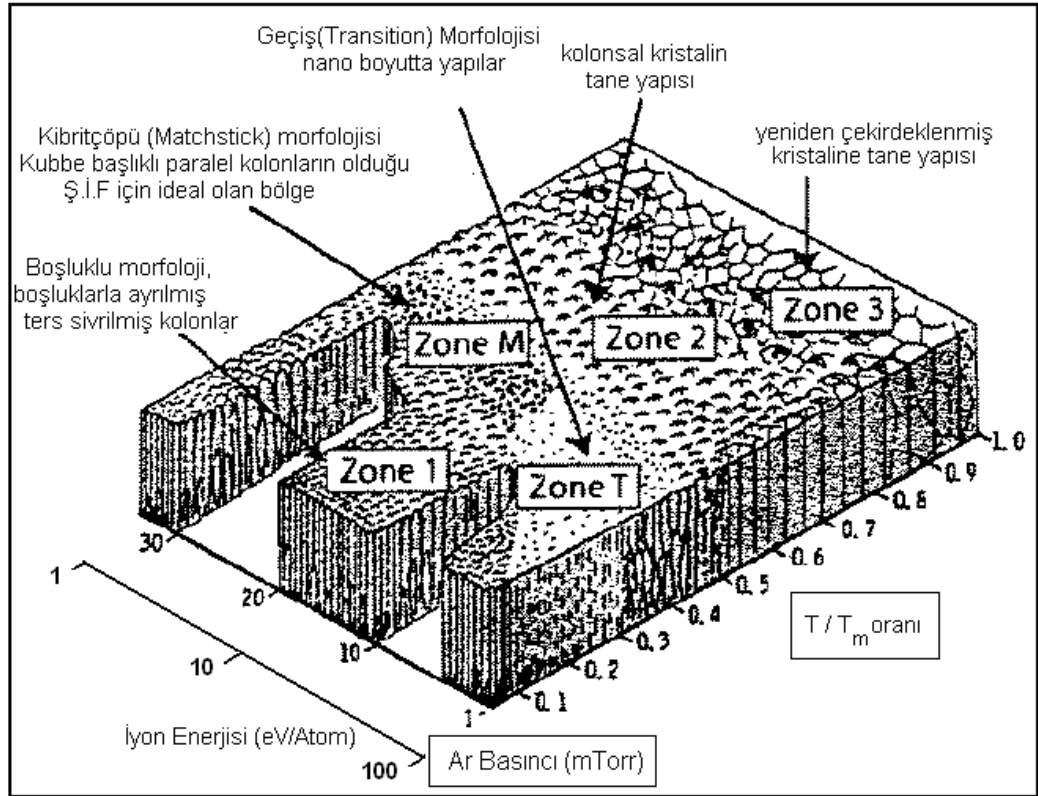
Modellerde belirtilen zonlar hakkında aşağıda sıralanmış noktalara dikkat edilmelidir:

- 1) Tanımlanan 4 zonun hepsi kaplanan her malzeme için geçerli olmayabilir. Örneğin Z3' e çoğu malzemelerde rastlanılmaktadır.
- 2) Zonlar arasında geçiş kesin bir sıcaklık oranında olmayabilir. Geçiş sıcaklık oranı kaplama koşullarına ve malzemeyle ilgili olarak değişebilir. Geçiş, film kalınlığının artması ile bazen Z3' den Z2' ye ya da ZT' den Z1' e doğru olabilir.
- 3) Zonların yüzey topografileri yüzey enerjisine ve atomların yüzeye geliş açılarına bağlı olarak değişebilir [18].

2.3.2 Şekli İnce Filmler Büyüme Morfolojisi

Thornton modeline ek olarak, Messier Zone T morfolojisinin kontrolünün sadece gaz basıncı ile değil, ayrıca sıçratma yöntemiyle biriktirmede, büyüyen film yüzeyine yapılan iyon bombardıman prosesi içinde etkili olduğunu göstermiştir. T-Bölgesinin görülebilmesi için enerjisi ~70–100 eV olan iyonik atomların yüzeye çarpması gerekmektedir. Bu enerjiye sahip iyon çarpma etkisiyle, ileri-sıçratma mekanizmasıyla, gölgelemeyle oluşan boşluklu yapının yerine daha dolgun bir yapının oluşmasını sağlamaktadır. Daha düşük enerjili iyonların çarpma etkisiyle ise Zone 1 ve Zone T arasında ki brit-çöpü bölgesi (M Bölgesi) olarak adlandırılan başka bir morfoloji oluşmaktadır (Şekil 2.7) [2, 21].

Bir önceki bölümde anlatılan morfolojilerde atom buharı ve çarpma etkisi yüzeye dik olarak gelmekte ve etki oluşturmakta, bu yüzden gölgeleme ve çapmaktan doğan dağınık x-y yüzeyinde yönden bağımsız (izotropik) olmaktadır. Oluşan sütunlar bağlantılı, dolayısıyla ince filmlerin yoğunluğu normal durumun %80 ile %100'ü civarındadır. Eğik açılı kaplamada ise, yoğunluk malzeme yoğunluğunun %10 ile %30' u arasındadır, sütunlar daha net bir şekilde birbirinden ayrıdır. Tamamen ayrı, birbirine değneksezi, yapıları mükündür. Açılı kaplama yapılmış filmler M bölgesi oluşumunu andırdığından, STF filmleri Oblik- M Bölgesi olarak tanımlanabilir [2, 21].



Şekil 2.7. İnce film morfolojisi için oluşturulan yeni yapı modeli [22]

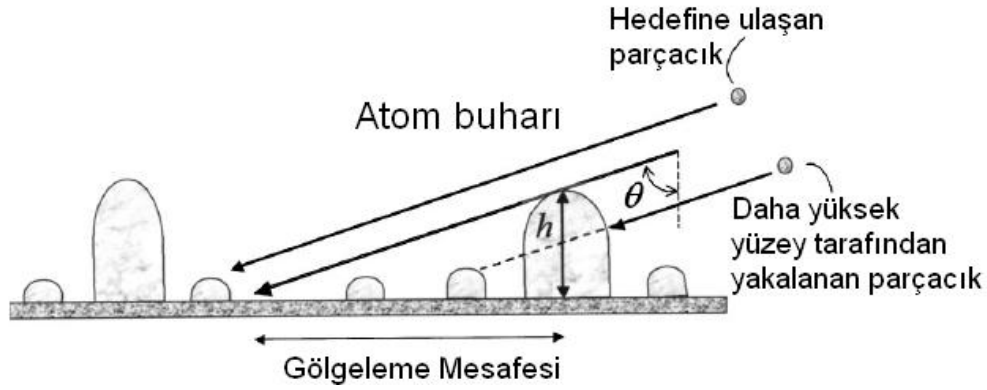
Eğik açılı ince filmleri bir rekabetin olduğu bir büyüme düşük adatom yüzey mobilitesi ile elde edilmektedir. Aynı şartlarda, yüksek yüzey mobilitesinin olduğu durumlarda, M Bölgesi benzeri bir yapı ortaya çıkma yabilir. Altığın kaplama hızına göre yavaş döndüğü durumda sütun gelişmesinin olduğu sarımsal şekiller büyür (Şekil 2.2(i)). Eğer, altığın dönme hızı 1-3 nm boyutlu partiküllerin oluşmasına imkan vermeyecek şekilde hızlı dönüyorsa, atom buharı her yönden izotropik biçimde yüzeye ulaşacağından silindirik (Şekil 2.2(a)) yapıları elde edilir. Geometrik kıstaslar ve simülasyonların gösterdiği gibi düşük yüzey mobilitesi olduğunda büyük oranda sütun genişlemesi olur. Bu durum düşük enerjili iyon bombardımanı ile, genişlemeyi oluşturan atom gruplarını ileri sıçatarak önlenebilir, sonuçta M Bölgesi benzeri morfoloji oluşturabilir [21].

Özet olarak, şekilli ince filmlerde büyümenin temelini, 1–10 nm'lik boyutlardaki kümeleneş atom seviyelerinde ve kümenin boyutunun ve şeklinin şu faktörlere bağlı olduğu söylenebilir [2];

- Düşük adatom mobilitesi, kendiliğinden göçeleme etkisi, atom buharının geliş açısı

- Yüzey sıcaklığının buharlaştırılacak malzemenin ergime sıcaklığına oranı
- Yüzey pürüzlülüğü ve tenizliği

Şekli ince filmlerin oluşumu için sadece bu temel özelliklerin dışında bir de gölgeleme etkisi ve altlık-kaynak mesafesi de önemli bir parametredir. Eğik açı ile biriktirme esnasında rekabet sonucu daha önce büyüyen kolonlar tarafından gölgeleme oluşmaktadır (Şekil 2.8). Gölgeleme etkisi ile altlık yüzeyine eğik açıyla gelen atom buharı tercihi olarak, yüksek yüzey üzerine birikmeye başlar. Bu tercihi büyüme dinamiği de birbirinden ayrılmış, boşluklu yapıya sahip kolonsal yapıların oluşumuna neden olmaktadır [23].



Şekil 2.8 Gölgeleme etkisini şematik gösterimi [23]

2.4 Şekli İnce Film Büyütmede Önemli Faktörler

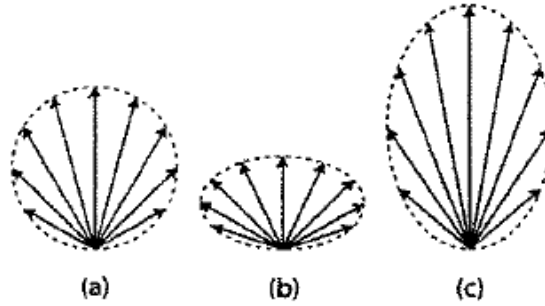
Messier ve Lakhtaki tarafından şekilli ince filmler hakkında 2005 yılında çıkarılmış ilk ve temel kitapta bahsedilen, bu filmleri büyütürken dikkat edilecek önemli parametreler elde edilen deneyimlerin ışığında ortaya çıkarılmıştır [22].

Şekli ince filmlerin en göz önünde olan uygulama alanları için gerekli olan morfoloji ki brit çöpü yapısındaki kolonlardır. Enerjili parçacıkların bombardımanı ile de kolonsal genişleme azaltılabileceği gibi, gelen atom buharının düzgün ayarlanmasıyla da kolonsal genişleme azaltılır. Şekli ince filmleri oluşturan toplu kolonların mikroyapıları kadar, tekli kolonların detaylı morfolojileri de en az onlar kadar önemlidir. Bu yüzden sadece atom buharının ayarlanması değil, ayrıca adatomların enerjileri de şekilli ince filmleri oluşturmak için önemli parametrelerden birisidir.

Doğrusal bir atom buharı akışı ve mümkünse doğrusal bir bombardıman akışı için aşağıdaki faktörler her bir üreti yöntemi için önemlidir ve düşünülmelidir [22].

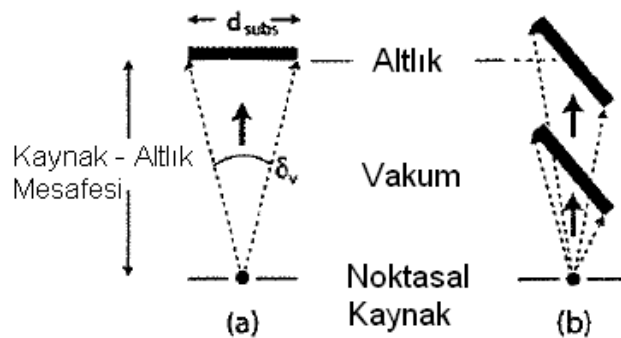
2.4.1 Kaynaktan Yayılan Atom Buharının Açısal Dağılımı

Fiziksel buhar biriktirme proseslerinde genel olarak yayılan malzeme atomları şeklindedir. Bununla birlikte bazı durumlarda, iyonik veya moleküler parçalar da yayılır. Buhar kaynağından çıkan parçacıklar üreti yöntemi ne bağlı olarak cosine, cosine altı ve cosine üstü olmak üzere üç farklı dağılıma dağılırlar (Şekil 2.9). Örneğin, e-de neri buharlaştırma yayılan atom buharı cosine üstü dağılımı (Şekil 2.9(c)) gösterirken, düşük enerjili sıçratma yönteminde ise cosine altı dağılımı görülür.



Şekil 2.9. Yarı muzayda bir kaynaktan yayılan atom buharının dağılımı a) cosine dağılımı b) cosine altı c) cosine üstü dağılımı [22]

Tam olarak düzgün olmayan vakum ortamından ya da vakum kaynağından dolayı altlık ve kaynak arasında gaz açığa çıkar. Gaz fazı çarpışmalarının olmadığı varsayıldığı ve atom buharının düşük basınçta noktasal kaynaktan ısısal olarak yayıldığı zaman, yayılan parçacıklar gördüğü yolu (line of sight) izlerler. Bu yüzden altlık ile kaynak arasındaki mesafe yeterli seviyede olduğu zaman atom buharı düzgün bir şekilde ayarlanmış olacak ve bu sayede de altlığa gelen atom buharının açısal dağılımı daha az olacaktır (Şekil 2.10).

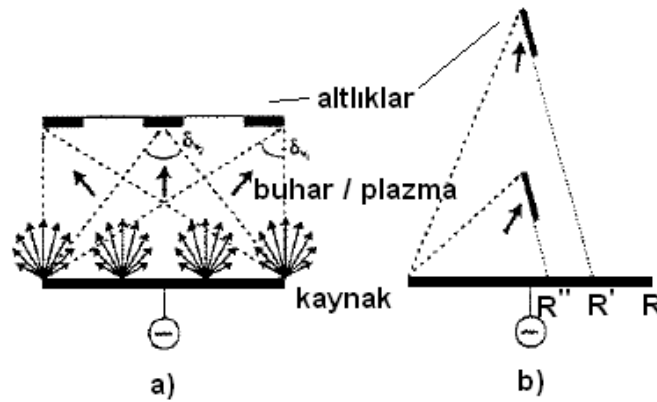


Şekil 2.10. Cosine tipi gördüğü yol yayılımı a) paralel b) eğik durumdaki altlıklara göre [22]

Düşük basınçta düzensel kaynaktan yayılan buhar da cosine tipi dağılımıdır. Ufak bir düzensel kaynak; altlık ile kaynak arasındaki mesafe fazla olduğu zaman noktasal kaynak olarak düşünülebilir. Bununla birlikte buhar kaynağının boyutları büyüdüğü zaman veya altlık ile kaynak arasındaki mesafe küçüldüğü zaman, altlığa gelen atom buharı ayarlanamaz hale gelir. Bu yüzden de atomların istenilen geliş açısındaki dağılım artar. Ayrıca, Şekil 2.11.a da görüldüğü gibi atom buharının geliş açısı altlık ile kaynak arasındaki dik aralığın dışında doğrusal olmayacak şekilde azalır, sadece düzensel kaynağın merkezi kısmının üzerinde büyüyen filmler benzer açılara ve dağılıma sahip olurlar. Bu yüzden, düzensel kaynağın çapı, altlığın kaynak düzlemi üzerindeki izdüşümü uzunluğunun yarısından daha büyük olmalıdır.

2.4.2 Eğik Altlığın ve Kaynağın Birbirine Göre Boyutu ve Şekli

Şekli ince fil müretiğinde altlık kaynağa göre eğik pozisyonundadır. Bu yüzden geliş açısı ve buharın düzgün ayarlanma derecesini iyi düşünmek gerekmektedir. Noktasal kaynak ve gaz fazı çarpışmalarının yokluğunda, geliş açısı ile altlığın eğikliği esasen benzerdir ve geliş açısının dağılımı dardır. Kaynak ile altlığın arasındaki mesafenin altlığın boyutuna oranı arttıkça da buhar daha düzgün ayarlanmaktadır (Şekil 2.10.(b)). Düzensel kaynak ve daha düşük altlık – kaynak mesafesi için ise geliş açısı dağılımı, eğik duran altlıkta (Şekil 2.11.(b)) paralel duran altlığa (Şekil 2.11.(a)) göre daha azdır. Şekil 2.11.(b)'de, kaynak ile altlık arasındaki yakın mesafelerde, R ile R' arasındaki buhar akışı, altlığın gölgelemesinden dolayı engellenmiştir. Sonuç olarak altlık ile kaynak arasındaki mesafe arttıkça altlığa gelen buhar akışı daha iyi ayarlanmış olacak ve geliş açısının dağılımı azalacaktır.



Şekil 2.11. Düzensel kaynaktan cosine tipi görüldüğü yol dağılımı a) paralel b) eğik altlıklar için [22]

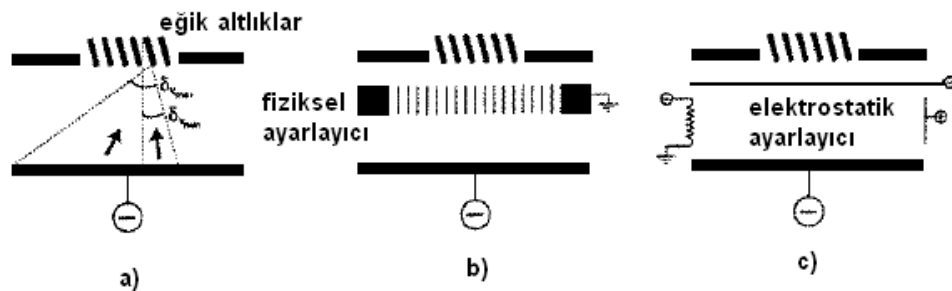
2.4.3 Kaynaktan Altlığa Taşınım Sırasında Atom Buharı Akışının Saçılması

Bundan önceki iki kısımda gaz fazı çarpışmalarının olduğu varsayılmıştır. Fakat bu çarpışmalar olduğu zaman, atom buharı; kaynak ile altlık arasındaki uzayda saçılmaktadır. Bu da, altlık eğikliği ne olursa olsun, geniş açısı dağılımını genişletir. Yüksek basınçta, saçılma güçlü olduğu zaman, buhar difüzyon taşımaına uğrar. Gaz fazı saçılmaları ile biriktirme prosesi ve film özelliklerini ilişkilendirmek için biriktirme basıncı ve altlık ile kaynak arasındaki mesafenin çarpımını kullanılır. Bu yüzden sistem sıcaklığı ve basınç kadar, yayılan parçacıkların enerjileri ve kısmi buhar basınçları ile ortalama serbest yol ilişkisini anlamak gerekmektedir. Bu enerji direkt olarak basınç ve altlık kaynak arasındaki mesafe çarpımı ile ilişkilidir. Yüksek enerjili gaz parçacıkları daha uzun ortalama yola sahiptir fakat şekilli ince film büyütme için enerjisi 100 eV nin altında olan buhar veya bombardıman akışlarının önemli olduğu düşünülmektedir.

Ortalama serbest yol; kaynak – altlık mesafesinden büyük ya da eşitse, gaz fazı çarpışmaları önemsenmez ve daha önceki iki kısımda anlatılan buhar dağılımları geçerli olur. Eğer ortalama serbest yol kaynak – altlık mesafesinden çok küçük ise buhar difüzyonla taşınır.

2.4.4 Atom Buharının Fiziksel veya Elektrostatik Ayarlayıcılar ile Ayarlanması

Şekil 2.12 (a)'da eğilmiş altlıkların oluşturduğu düzenek görülmektedir. Her bir altlık komşu altlığa gelen atomların geniş açısının açısal dağılımı azaltacak fiziksel bir ayarlayıcı olarak görev yapmaktadır. Şekli ince film büyütme için küçük geniş açıları istendiğinden, sıçratma yönteminde kullanılan hedef gibi düzensiz kaynakların üzerine bu şekilde birçok altlık yerleştirilebilir. Daha etkili bir yöntem olarak da Şekil 2.12 (b) 'deki gibi altlıklar ile kaynağın arasına fiziksel bir ayarlayıcı koymaktır.



Şekil 2.12. Atom buharını ayarlayıcı a-b) fiziksel c) elektrostatik ayarlayıcılar [22]

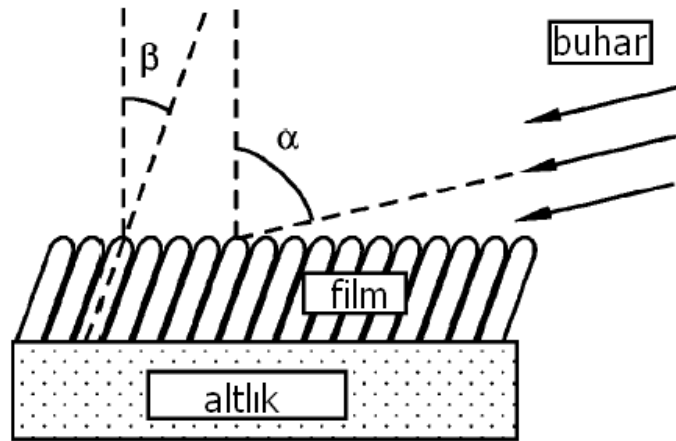
İyon enerjilerin daha iyi kontrolü ve aynı zamanda doğrusallığın ve enerjik iyonların ayarlanması sağlamak için, düzensiz, yüksek derecede saydam ön gerilim verilmiş (bias uygulanmış) ızgara elektrostatik ayarlayıcı olarak kullanılabilir (Şekil 2. 12 (c)). Bu ızgara elektrotu sıçratma yapılan malzeme ile aynı olduğu zaman da, ızgarada oluşacak herhangi bir erozyon büyüyen filmi de kirlenmeyecektir [22].

3. ŞEKLİ Lİ İNCE Fİ LMLERİ KARAKTERİ ZE EDEN ÖZELLİ KLER

Şekli li ince fil mlerin atomik boyutta oluşumları bir önceki böl ümde incelenmiştir. Bu böl ümde ise şekilli ince fil müreti mde oluşacak şekilleri etkileyecek parametreler ve oluşan şekillerin özellikleri incelenecektir. Genel olarak şekilli ince fil m oluşumunu etkileyen faktörler; altlık eğiklik açısı, altlığın dönüş hızı ve tipi, malzemenin cinsi, biriktirme hızı ve altlığın yüzeyinin topografyasıdır. Alt böl ümlerde bu faktörler ve şekilli ince fil moluşumuna etkileri incelenecektir.

3.1. Altlık Açısı

Eğik açıyla biriktirmede adından da anlaşılacağı gibi altlığın açısının önemi büyüktür. Açının değişimi oluşacak morfolojinin boşluk, yüzey alanı, boyutları gibi fiziksel özelliklerini etkileyecektir. Öncelikle altlığın dönmediği durumlarda, eğik açıyla biriktirilen kolonsal yapılar incelendiğinde, hem altlığın eğiklik açısı hem de oluşan kolonların açısından bahsetmek ve bunları ilişkilendirmek mümkündür (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Açı tanımları ile biriktirme prosesi ve kolonsal oluşumun şematik gösterimi; altlık normaline göre; atom buharının geliş açısı (α) ve oluşan kolonların altlık normaline göre eğiklik açısı (β) [24]

Kolonların altlık normaline göre oluşturdukları açı ve atom buharının altlık normaline göre geliş açıları, biriktirilen malzeme ve altlık ve film sıcaklığı, gelen

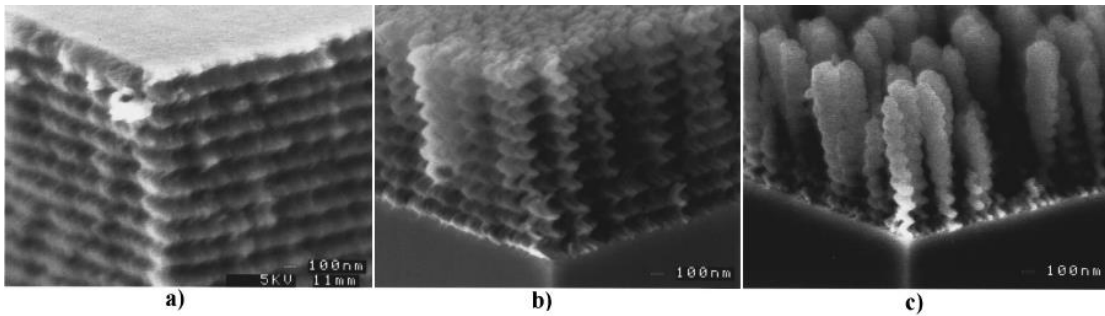
atomların açısal dağılımı, gaz basıncı ve kompozisyonu ve atom parçacıklarının enerjileri gibi birçok faktöre bağlıdır. Bununla birlikte, kolonların açısı ile biriktirme açısı arasında bir bağlantı kurulmuştur ve kolonların açısının altlık açısı tarafından belirlendiği kabul edilmiştir. Neuwenhuizen ve Haanstra tarafından deneysel olarak türetilen bu formülde; geliş açısı ile kolonların açısı arasındaki ilişki tanjant kuralı ile açıklanmıştır (Eşitlik 1.1) [25].

$$\tan(\beta) = \frac{1}{2} \tan(\alpha) \quad (1.1)$$

Bu formül deneysel gözlemlerin sonucu olup, fakat 50° üzerindeki biriktirme (α) açılarındaki düzgün sonuçlar vermemektedir. Tait [26] tarafından türetilmiş geometrik analize dayalı olan cosine eşitliği ise 50° üzerindeki biriktirme açıları için daha iyi sonuçlar vermektedir (Eşitlik 1.2) [27, 28].

$$(\beta) = (\alpha) - \arcsin\left[\frac{1 - \cos(\alpha)}{2}\right] \quad (1.2)$$

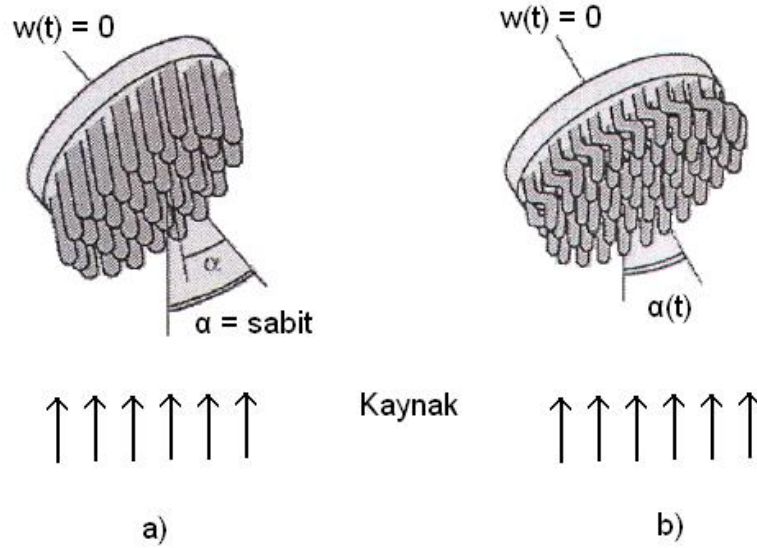
Geliş açısının tek başına şekilli ince filmlere etkisi, yukarıdaki açı bağlantılarından da anlaşılacağı gibi, kolonların eğiklik açılarını değiştirmesi yani bir bakıma film yapısının boşluklu ya da yoğun bir yapıda olmasıdır. Altlık normaline göre altlık açısı (α) arttığı (gölgeleme daha fazla) durumda, eşitliklerden altlık normaline göre kolonların eğiklik açısı (β) 'nın da artacağı diğer bir deyişle kolonların altlık düzlemine göre eğilimlerinin ($90^\circ - \beta$) artacağı bunun sonucunda da daha boşluklu yapıların oluşacağı eşitlikten çıkarılmaktadır [29]. Bunun deneysel gösterimi olarak da sabit duran altlığa aynı koşullar altında ve aynı malzeme ile yapılan biriktirmelerde, değişen geliş açlarına göre oluşan filmlerin arakesit görüntüleri Şekil 3.2' de belirtilmiştir [24].



Şekil 3.2 Aynı biriktirme koşullarında büyütülmüş, a) 75° b) 85° c) 88° geliş açısında (α) oluşan SiO₂ şekilli ince filmleri [24]

Geliş açısı (gölgeleme etkisi) arttıkça oluşan şekillerin yoğunluklarının azaldığı gözlenmiştir. Şekil 3.2 de görüldüğü üzere, üretilen şekilli filmlerde sırasıyla 75° , 85° ve 88° için toplam yığının %89, %42 ve %22 ' si olarak yoğunluk gösterdiği hesaplanmıştır [24].

Dış taraftan altlık hareket etmediği fakat altlığın eğiklik açısının zamanla değiştiği bir düzenekte ise, oluşacak şeklin yapısının değişeceği de bilinmektedir. Biriktirme esnasında altlığın hareket etmediği ve açının değişmediği zaman oluşacak şekiller kolonsal olacaktır (Şekil 3.3.(a)). Fakat biriktirme esnasında zamana bağlı olarak açı değiştiği zaman ise oluşacak morfoloji, gelen buharın yönünü takip eden bükülmiş kolonlar (Şekil 3.3.(b)) şeklinde olacaktır [29].

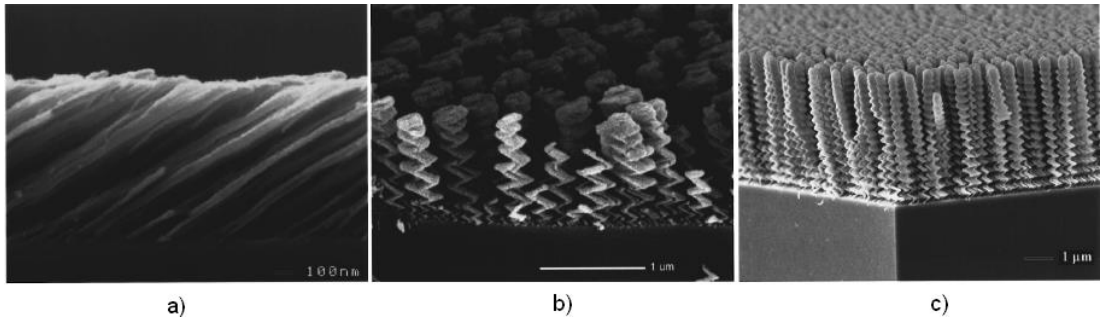


Şekil 3.3. GLAD sisteminin şematik gösterimi, a) Altlık hareketi ve açı değişimi olmadan sabit açıda biriktirme, b) Altlık dönüşü yok fakat zamana göre altlık açısının değiştiği biriktirme ve oluşan şekiller [29]

3.2 Altlık Hareketi

Altlığın dönüş hızının kontrolü ile, zigzag, C şekilli, S şekilli gibi hemen hemen her tür iki boyutlu kolonsal morfoloji elde etmek mümkündür. Altlık eğik açıda sabit tutulduğu zaman eğik kolonsal morfoloji elde edilirken, kaplama sırasında atom buharının geliş doğrultusu değiştirildiği yani altlığın hareketi gerçekleştiği zaman, kolonların büyümesi buhar kaynağının pozisyonunu takip etmektedir. Böylelikle morfolojinin istenen şekilde minimize edilmesi mümkün olmaktadır. Altlık biriktirme hızına göre sürekli olarak belirli hızda çevrildiği zaman ise, sabit aralıklı burgulu, sarıal şekiller elde edilmektedir [25, 30].

Robbie ve Brett, altlığın hareketinin etkisini göstermek için yaptıkları deneyde, öncelikle altlığın hareketsiz ayna eğik açılı ($\alpha=85^\circ$) konumunda durduğunda ince film biriktirme yapmışlar ve Şekil 3.4(a)'da görülen eğik kolonsal yapıyı elde etmişlerdir. Daha sonra yine aynı eğiklikte fakat bu sefer, altlık üzerine eşit zaman periyotlarında biriktirme yapıp daha sonra altlığı ani olarak 180° çevirerek tekrar eş zaman aralığında yapılan biriktirmede zigzag yapısı (Şekil 3.4(b)) oluşmuştur. Son olarak yine aynı eğiklikte, biriktirme hızına göre altlık sürekli olarak belirli bir hızda sürekli olarak döndürüldüğünde ise sabit aralıklı, Şekil 3.4(c)'de görülen burkulmuş şekillerin oluştuğu gözlemlenmiştir [24].



Şekil 3.4 Eğikliğin sabit olduğu, altlığın hareketinin etkisiyle oluşan şekiller, a) Kolonsal b) Zig-zag c) Burkulmuş morfolojiler [24]

Diğer bir çalışmada ise, altlığın hızının değiştirildiği zaman oluşan kolonlardaki boy / genişlik oranının değiştiği gözlemlenmiştir. Altlığın açısının 75° olduğu ve dönüş hızının 0.16 rpm (360° dönüş/daki ka) olduğu zaman kolonların genişlik boy oranının $5:1$ olduğu, aynı açıda, dönüş hızı 0.64 rpm e çıkarıldığında ise boy / genişlik oranının $8:1$ e çıktığı yani dik ve ince kolonsal yapıya geçildiği gözlemlenmiştir. Böylece altlığın dönüş hızının artırıldığı zaman boy / genişlik oranının arttığı görülmüştür [31]. Altlığın hızlı hareketi nano boyuttaki atom kümeciklerinin bir tam dönüşte oluşmalarına neden olur. Gelen atomlar altlık düzlemi boyunca dairesel olarak tek bir yönden geliyor gibidir ve hızlı dönüş ile silindirik olarak simetrik bir atom buharı akışı sağlanırken, filmin oluşumunda yöne bağıllık da ortadan kaldırılmış olur [22, 32].

Ayrıca, düşük dönüş hızlarında oluşacak film eğiklik açısı ve gölgeleme etkisi ile termodinamik olarak tercih edilen kristal yapıyı oluşturabilirken, dönüş hızı aşırı derecede arttığında ise atomlar büyümesi istenen enerji konumuna manevra edecek zamanı bulamadıklarından, dönüş hızının etkisi ile kinetik olarak oluşması istenen yapıyı oluşturması olarak açıklanabilir [33]. Biriktirme esnasında altlığı belirli süre

sabit tutma ve sonra altlığı belirli açılarda döndürerek de kompleks şekilli yapıların oluşmasına neden olur [34].

Özetle, altlığın dönüş hızındaki değişiklik şekil oluşumuna direkt etki eder, çünkü kolonsal büyüme yönündeki dönüş, sürekli olarak kaynak yönünde filament oluşumunu zorlar. Altlık yavaş döndüğü zaman, oluşan yapı sarımsı olur. Sarımsının iki dönüşü arasındaki yükseklik de biriktirme ve dönüş hızının konbinasyonu sonucu belirlenir. Daha hızlı altlık dönüşünde, sarımsı yapı engellenir ve dikey kolonlar oluşur. Sonuç olarak, dönüş hızının biriktirme hızına oranı fazla ise dikey sütunlar, bu oran az ise sarımsı yapılar ortaya çıkar [22, 35].

3.3 Biriktirme Hızı

Altlığa gelen atom buharının zamanla göre geliş miktarı belirli bir değerde sabit tutulduğu zaman şekilli filament oluşumdaki değişken parametrelerden birisi azaltılmış olur ve böylece filament kontrolü kolaylaşır. Çünkü altlığın dönüş hızına göre her bir çevrimde eşit miktarda atom buharı ile karşılaşması, istenilen şekildeki filamentin daha kontrollü oluşmasını sağlar. Kaplama sırasında, biriktirme hızının zamanla artmasından dolayı birbirinden ayrı kolonların zamanla birleştiği ve biriktirme hızı azaltıldığı zamanda aralarındaki mesafenin arttığı gözlenmiştir. Bu yüzden biriktirme esnasında biriktirme hızının örneğin kuartz kristal biriktirme hızı kontrol ünitesi gibi bir kontrol sistemiyle gözlenmesi gerekmektedir [36, 37].

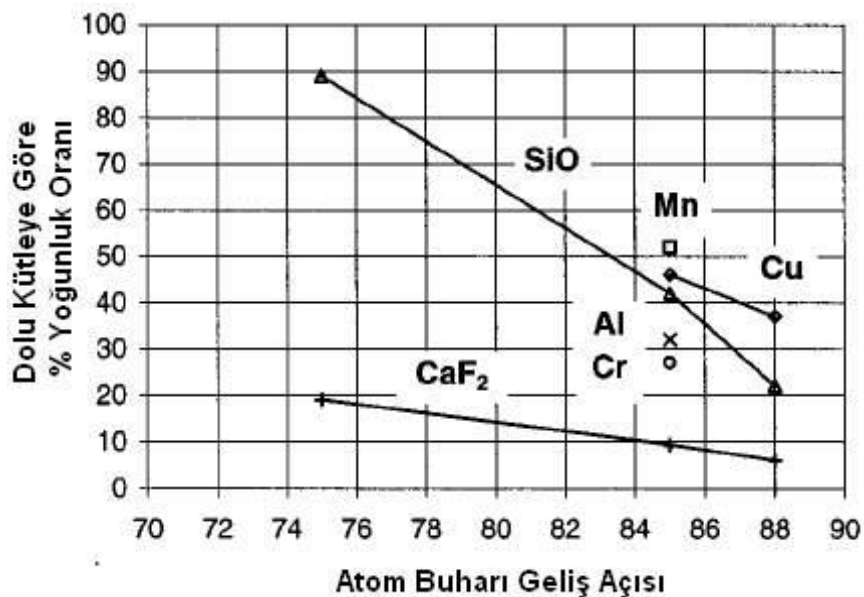
Oluşan filamentin morfolojisinde biriktirme hızının etkisi önemlidir. Biriktirme hızı ile altlığın dönüş hızı oranı oluşacak şekli etkilemektedir. Biriktirme hızı hakkında yapılan bir çalışmada, biriktirme hızı arttırıldığı zaman oluşan adacıklar arası ortalama mesafe ile, adacıklar üzerinde ikinci katmanın çekirdeklenmesi için gerekli kritik çapın azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca biriktirme miktarı arttıkça, oluşan adacıkların genişliklerinin azaldığı gözlenmiştir.

Buna bağlı olarak, adacıkların oluşumunda ve gelen atomlar ile bu atomlar üzerinde hareket etme mesafeleri arasında biriktirme hızının etkisinin olduğu ve biriktirme hızı arttıkça, birim zamanda yüzeye gelen atom sayısının fazla oluşundan atomların hareketlerinin kısıtlanacağı söylenebilir [38].

3.4 Malzemenin Cinsi

Malzemenin ergime sıcaklığı ile atom mobilitesi arasında ters bir orantı vardır. Ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin atom mobilitesi yani atomistik boyutta hareketliliği daha az olur. Düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler ise daha yüksek atom mobilitesine sahiptirler. Bu yüzden şekilli ince filmin oluşumunda seçilen malzemenin cinsi, oluşması istenilen morfolojinin kontrolü ile ilişkilidir. Çünkü farklı kristal yapıları, sahip olduğu farklı atom mobilitelerinden dolayı farklı büyüme hızı göstermektedirler [39-41].

İnce filmler düşük atom mobilite ortamında ve altlığı sıcaklığının malzemenin ergime sıcaklığına oranının düşük olduğu koşullarda, yani ergime sıcaklığı yüksek olan malzemeler ile biriktirildiği durumda, Zone 1 kolonsal yapısı elde edilmektedir. Çünkü atomik göçleme ve boşlukları dolduracak yüzey difüzyonu için atom mobilitesinin çok düşük olması nedeniyle atom buharının direkt olarak ulaşamadığı alanlar oluşmaktadır. Atom buharının altlığa eğik açıyla gelmesi nedeniyle de bu göçleme büyük oranda genişlemektedir. Bu da, buhar yönünde eğrilmiş, birbirinden ayrı, boşluklu kolonsal mikro yapıları oluşturmaktadır. Şekil 3.5 te farklı malzemelerin farklı geliş açıları ile oluşturdıkları morfolojinin dolu kütleyle göre yoğunluk oranı karşılaştırılmıştır. Cu, Mn gibi düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerde, daha fazla atom mobilitesi olduğundan daha yoğun filmler oluştuğu, daha düşük atom mobilitesine sahip CaF_2 de ise, bakır ve mangana göre aynı geliş açısında daha az yoğun, boşluklu bir yapının oluştuğu gözlenmiştir [24].



Şekil 3.5 Farklı malzemelerin atom buharı geliş açısı ile dolu kütleyle göre yoğunluk yüzde oranı [24]

Sonuç olarak yüksek mobiliteye yani düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler ile genel olarak yüksek kalitede boşluklu nano yapıların oluşturulması düşük mobiliteye sahip malzemelere göre daha zordur. Bu etki genel olarak metalik filmlerde görülmekte olup, düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerin karakterizasyonu yapıldığında istenmeyen, tam olarak kontrol edilememiş yapıların olduğu gözlenmiştir. Ayrıca kolon çapının altlıktan yüzeye doğru arttığı, ikinci çekirdeklenmenin veya çatallanmanın yaygın olduğu ve karnabahar tipi yüzey morfolojisinin belli olduğu tespit edilmiştir. Daha küçük kolonların bir araya toplanarak daha az kontrollü, daha büyük kolonlara dönüştüğü gözlenmiştir [42]. Aynı zamanda, benzer düşük difüzyon koşullarına yani düşük ergime sıcaklığına oranına sahip metal veya amorf malzemelerde ise benzer büyüme davranışları görülmüştür [35].

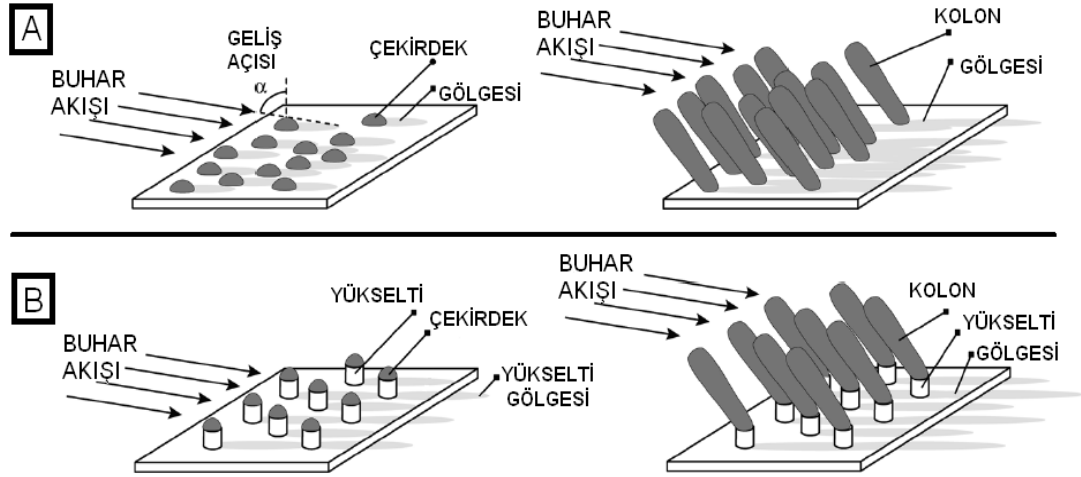
Genel olarak yapılan çalışmalarda da, gölgeleme etkisi ile filmin oluşumunun adatom difüzyonunun minimize edilerek gölgeleme etkisi altında gerçekleşebileceği, yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemeler seçilmiştir. Bunun yanında, altlık sıcaklığı ayarlanarak altlık sıcaklığının malzemenin ergime sıcaklığına oranı küçük değerlerde tutulup, düşük difüzyon koşulları sağlanmıştır [3,43].

3.5 Farklı Topografyalı Yüzeyler

Altlığın üzerinde yapılan lithografik işlemler ile altlık üzerinde belirli aralıklarla sanal çekirdeklenme merkezleri oluşturulmuştur. Bu merkezler üzerine de biriktirme yapılarak şekilli ince filmler üretilmektedir. Buradaki amaç ince filmin sadece oluşturulan bu sanal çekirdeklenme merkezleri üzerinde biriktirmesini sağlamaktır. Böylece, bu merkezlerin arasındaki boşluklarda etkin bir biçimde gölgeleme etkisini arttırıp, daha kontrollü, daha boşluklu ve daha düzenli bir morfoloji oluşması sağlanabilmektedir [44, 45].

GLAD filmlerinde düzenliliği ve periyodikliği oluşturmak için altlıklar çekirdeklenmeyi belirli bölgelerde başlatacak şekilde sahip bir topografya şeklinde hazırlanmalıdırlar. Periyodik GLAD filmlerin prensibi, düz yüzey üzerinde rasgele çekirdeklenme yerine (Şekil 3.6(a)) çekirdeklenmeyi önceden hazırlanmış yükselteli topografya üzerinde başlatmaktır (Şekil 3.6(b)).

GLAD yöntemi, önceden yükseltilerin oluşturulduğu bir yüzeye uygulandığında zaman, bu yükseltiler ve onların gölgeleri, oluşacak film periyodik çekirdeklenmeye zorlamakta ve bunun sonucu olarak Şekil 3.6 (b)'deki gibi periyodik, düzenli bir film yapısı oluşmasını sağlamaktadır [46].



Şekil 3.6 a) GLAD yönteminin düz topografyaya sahip altlığa b) yükseltili altlığa uygulanması; başlangıç ve sonraki evrelerdeki şematik gösterimi [46]

Oluşturulacak yükseltilerin de geometrik olarak belli bir düzene göre oluşturulması gerekmektedir. Yükseltiler genel olarak kare şeklinde yapılmakta ve aralarındaki boşluklar aynı olacak şekilde simetrik bir düzende üretilmektedir (Şekil 3.7).

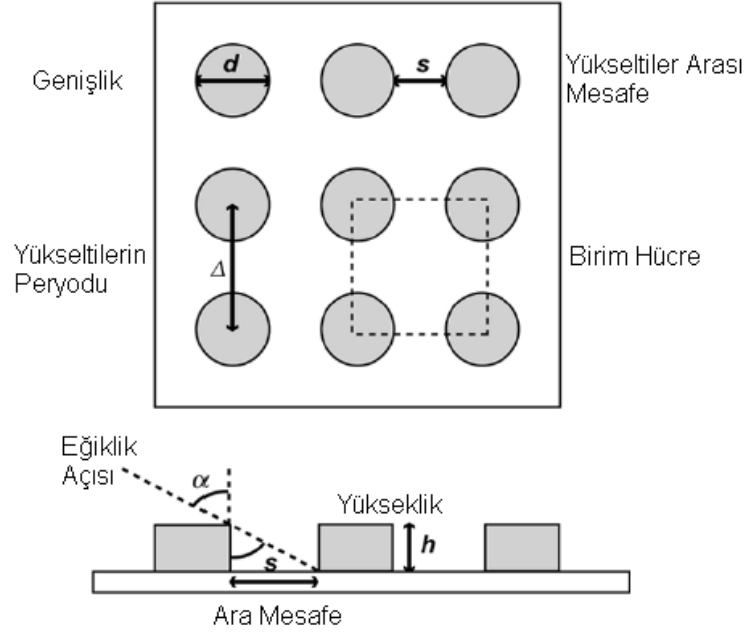
GLAD filmi'nin büyümesinin sadece yükseltiler üzerinde olmasından emin olmak için yükseltinin yüksekliği, genişliği, her bir yükseltiler arasındaki mesafe ve altlığın eğiklik açısı arasında da şu ilişkinin sağlanmasına gerek vardır (Eşitlik 1.3).

$$s \leq \tan(\alpha) \cdot h \quad (1.3)$$

Bu eşitliğe yükseltilerin genişliğini de katıp yükseltiler arasındaki periyodik mesafenin açı ile olan ilişkisi çıkarılır (Eşitlik 1.4).

$$\Delta = s + d \leq \tan(\alpha) \cdot h + d \quad (1.4)$$

Yükseltinin genişliği keyfi olarak seçilmez, bu değer, oluşturulacak GLAD filmi'nin kolonunun çapına yakın olması gerekmektedir. Bu yüzden oluşturulacak sanal çekirdeklenme merkezlerinin yukarıda belirtilen eşitliklere uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir. [46].



Şekil 3.7. Yapay yükseltilerin oluşturduğu dizi ve yandan görünümü [46]

4. ŞEKLİ LÜ İNCE FİLMLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Fiziksel buhar biriktirme tekniği, vakum altında bulundurulmuş malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ve kaplanacak olan alt malzeme yüzeyine (atomal ya da iyonik olarak) biriktirilmesi esasına dayanır. Fiziksel buhar biriktirme tekniğinin alt grupları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Fiziksel buhar biriktirme yöntemleri [47]

FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME TEKNİKLERİ		
BUHARLAŞTIRMA	SİÇRATMA	İYON KAPLAMA
- Direk Buharlaştırma - Reaktif Buharlaştırma - Aktive Edilmiş Reaktif Buharlaştırma - Bas Uygulanan, Aktive Edilmiş Reaktif Buharlaştırma - Geliştirilmiş Aktive Edilmiş Reaktif Buharlaştırma	- Planar Diode Sıçratma - Triode Sıçratma - Magnetron Sıçratma - Radyo Frekansı (RF) Sıçratma - İyon Işımı Sıçratma - Reaktif Sıçratma	- Oyuk Katod Deşarjı - Katodik Ark

Şekli ince filmlerin eğik açılı biriktirme yöntemi ile üretildiği daha önceki bölümlerde belirtildi ve eğik açılı biriktirme (GLAD) sisteminin her türlü üretim yönteminde uygulanabileceği de söylendi. Temel olarak şekilli ince filmlerin üretiminde kullanılan fiziksel buhar biriktirme yöntemleri;

- Termal buharlaştırma
- Sıçratma yöntemi

olup, bunların dışında şekilli ince filmlerin üretiminde kullanılması öngörülen bombardımanla genişletilmiş buharlaştırma, iyon deposu gibi hibrit sistemler de mevcuttur [22].

4.1 Termal Buharlaştırma

Buharlaştırma yöntemi ile yapılan fiziksel buhar biriktirme sistemleri için gerekli olan buhar fazı; rezistanslı, endüktif, elektron bombardımanlı veya katodik ark yöntemleri ile elde edilir. Sistem vakum altında olduğundan buharlaşan atomlar kaplanacak parçaya doğru enerjilerini kaybetmeden ilerleyebilirler ve parça üzerinde önce çekirdek oluşumu daha sonra çekirdeğin gelişimi şeklinde birikirler. Buhar fazındaki kaplanacak malzeme atomları 0,2 ile 0,6 eV aralığında düşük enerjiye sahiptir, bu nedenle daha az yapışma ve yoğunluk gösteren filmler elde edilir [48].

Şekilli ince filmler için kullanılan termal buharlaştırma yöntemi ise çoğunlukla rezistanslı veya elektron deposu ile buharlaştırma dır.

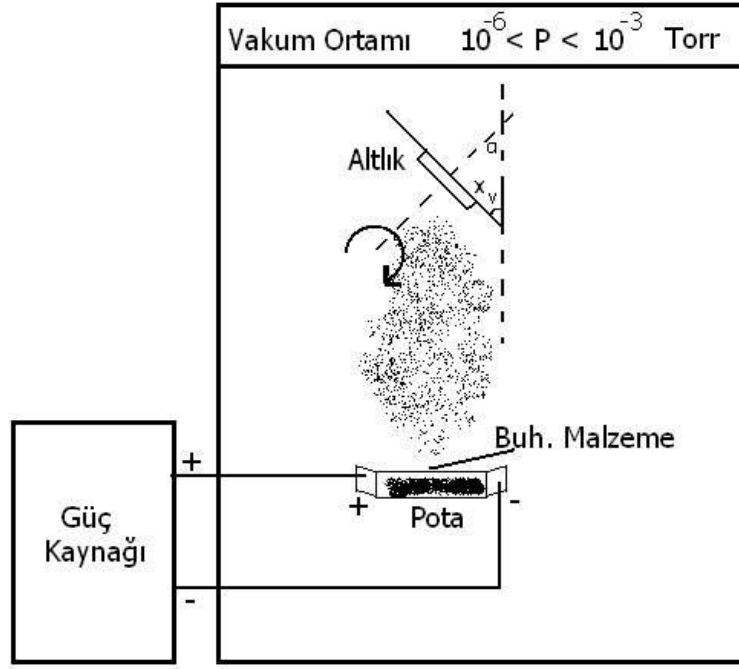
4.1.1. Rezistans İle Buharlaştırma

Buhar fazının elde edileceği kaplama malzemesi, yüksek sıcaklıklara dayanıklı potalar içersine yerleştirilir. Buharlaştırma, potanın üzerinden geçen yüksek akım sayesinde ya da potanın etrafına yerleştirilmiş rezistans telleri ile sağlanmaktadır.

Kullanılan pota malzemeleri tantal, tungsten veya molibdendir [5, 27, 36]. Sistem basıncı 10^{-3} Torr ile 10^{-5} Torr arasında değerlere sahip olduğu için potanın üzerinden akı geçirerek yapılan buharlaştırmada belirli bir süre sonra potanın sıcaklığı hızlı bir şekilde artar ve bu nedenle biriktirme hızı da artar. Biriktirme hızının sabit tutulması için potanın etrafında soğutucu sistem bulunması ve biriktirme hızının sürekli aynı oranda tutulması gerekmektedir [43].

Kaynağın sıcaklığı ile malzemenin buhar basıncı arasındaki eksponansiyel ilişki den dolayı, yüksek biriktirme hızı avantajı vardır. Bununla birlikte, düşük atom mobilitesinde (Zone 1) düşük yoğunluk, kolonsal büyüme, kolonlar arası rekabet ve mekanik olarak zayıflık da gözlenir [22].

Şekil 4.1 de eğik açılı biriktirme sistemi ile adapte olmuş termal buharlaştırma sistemi şematik olarak gösterilmiştir.

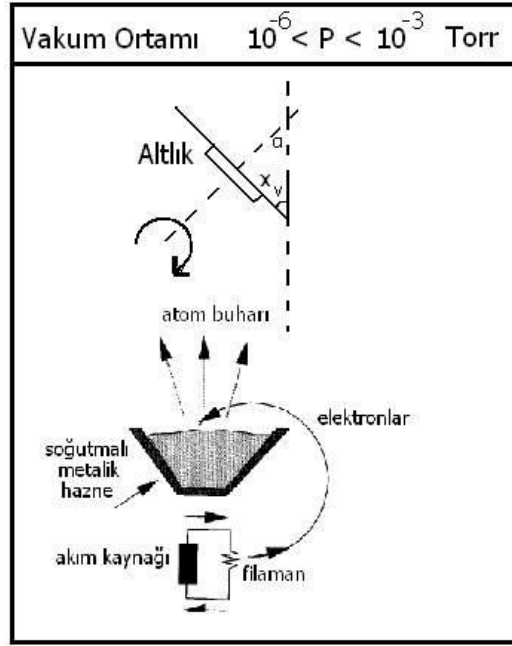


Şekil 4.1. Şekli İnce filmleri üretmek için termal buharlaştırma yöntemi, şematik gösterimi

4.1.2 Elektron Değeti (e-beam) İle Buharlaştırma

Elektron değeti ile buharlaştırmada (Şekil 4.2); ısıtılan flandan, elektronlar termiyonik olarak dağılır ve 5-20 kV'lık bir alan boyunca hızlandırılarak malzeme üzerine odaklanırlar. Bu çarpma sırasında elektronların kinetik enerjisinin birçoğu ısıya dönüşür. Elektronların yönlendirilmeleri de kolay olduğu için, yüzeyi tarayan ve homjen buharlaşma sağlayan bir bombardıman yapmak mümkündür. Elde edilen elektronlar bir manyetik alan yardımı ile hızlandırılır ve yönlendirilirler. Yönlendirme genellikle 90°, 180° veya 270°'lik açılarda yapılmaktadır. Bunun sebebi, oluşan buharın flaman üzerinde birikmesini veya flamanın buhar bulutunu gölgelemesini engellemektir [49].

Noktasal buharlaşma olduğu için, kaplama sırasında buharlaşacak malzeme ile su soğutmalı malzemenin bulunduğu hazne arasında etkileşim olmaz ve böylece sistem daha temiz bir şekilde kaplama yapabilmeye olanak sunmaktadır. Ayrıca yüksek enerjili elektronlar sayesinde ve noktasal olarak buharlaştırma yapıldığı için ısı enerjisi sıcaklığı yüksek malzemeler de kolaylıkla buharlaştırılabilir ve biriktirme hızının kontrolü ve düzenli olması da sağlanabilmektedir [50].



Şekil 4.2 Elektron deñeti yöntemi ile buharlaştırma, şematik gösterimi [51]

Çoğunlukla, şekilli ince filanların üretiminde elektron deñeti ile buharlaştırma yöntemi tercih edilmiş ve TiO_2 , Ti , SiO_2 , Cr gibi ergeñe sıcaklığı yüksek malzemeler buharlaştırılmıştır [52-55].

4.2 Sıçratma Yöntemi

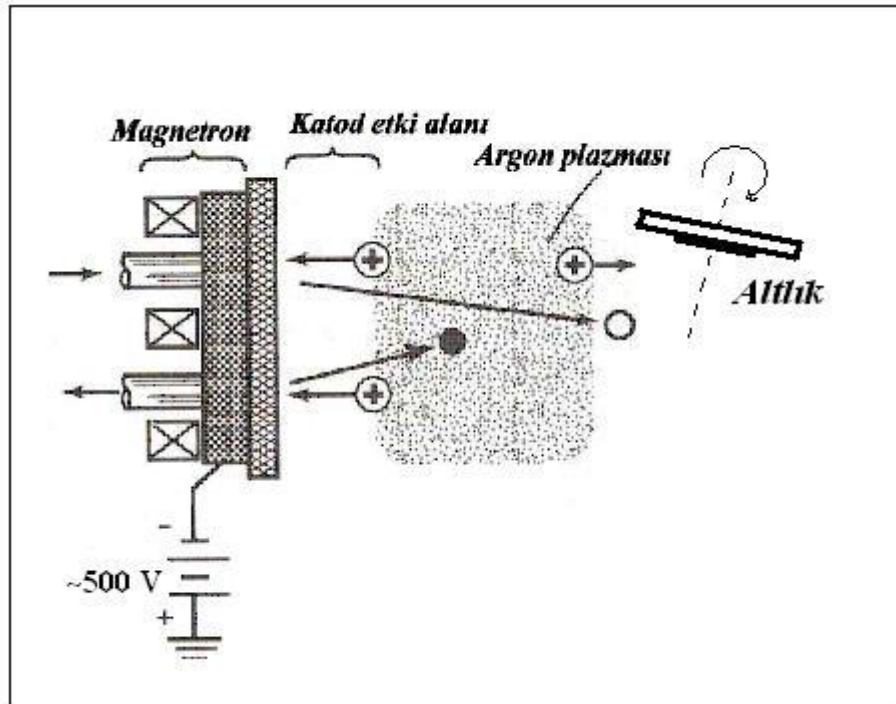
Sıçratma yöntemi, inert gaz iyonlarının, hedef malzeme yüzeyine çarparak, yüzeyden atom sıçratması ve hedeften kopan atomun, kaplanacak parça üzerine birikerek kaplamayı oluşturmaktadır. İntert gaz iyonları hedef malzemeyle çarpar, sahip oldukları enerjiyi malzemeyle verirler ve yüzeyden bir atom dışarıya fırlar. Ortamda inert gaz olarak genellikle Ar^+ kullanılır. Sıçratma aacı ile kullanılan enerjinin sadece %1'i sıçratma işine yarar, geriye kalan ise hedef malzeme üzerinde ısı olarak açığa çıkmaktadır. Bu da kaplama hızını çok düşürmektedir [48].

Sıçratma teknikleri, Planar Diode sıçratma, Triode Sıçratma, Magnetron Sıçratma, Radyo Frekansı (RF) ile Sıçratma, İyon Deñeti ile Sıçratma, Reaktif Sıçratma olarak sıralanabilir ve şekilli ince filanların üretiminde sıçratma yöntemi ile yapılan çalışmalarda genel olarak Magnetron sıçratma tekniğı kullanılmıştır [23, 56-60].

Magnetron Sıçratma yönteminde kullanılan elektrik ve manyetik alanlar hedeften çıkan elektronların düz olmayan bir yolda ilerlemelerini sağlar, bu da daha fazla Ar^+ iyonizasyonuna yol açar. Plazma kullanılarak yapılan sıçratma

yöntemlerinde temel amaç, katottan çıkan elektronların anot yüzeyine doğru yol alırlarken ortamdaki gaz atomları ile çarpışarak iyonizasyonu sağlamalarıdır. Bu iyonizasyonun katot yüzeyine yakın bölgelerde olması da sıçratma verimini arttıracaktır. Katot malzemesi arkasına yerleştirilen manyetik veya elektromanyetik alan sayesinde yaratılan manyetik alan elektronların yollarını değiştirmekte ve çarpışmaların daha çok katot yüzeyine yakın yerlerde olmasını sağlamaktadır.

Vakum odasında yaratılan manyetik alanlar sayesinde sıçrayan atomlar yönlendirilebilir. Şekilli film üretilebilir için tasarlanabilecek magnetron sıçratma yöntemi Şekil 4.3'te verilmiştir. Magnetronlarda, manyetik alanın oluşturduğu çapraz manyetik alan hedef üzerinde birleşir. Bu nedenle, ısıyan elektronlar orbitallerinde hapsolülür. Bunun sonucu olarak, elektronlar birbiri ile çarpışıp anotta toplanana kadar gitme yollarını (path length) çok yükselmiş olurlar [48].



Şekil 4.3. Magnetron sıçratma yöntemi şematik gösterimi [18]

Şekilli ince film biriktirmek için sıçratma yönteminin iki tane dezavantajı vardır. Birincisi, plazmanın sürekliliği açısından diğer buharlaştırma yöntemlerine göre daha yüksek kaplama basıncından (10^{-3} ila 10^{-1} Torr arası) dolayı, gaz fazı saçılmasını minimize etmek için altlıkla kaynak arasındaki mesafe daha küçük olmalıdır. İkinci bölümde anlatıldığı üzere, bu mesafenin kısa olması, altlığa gelen atom buharını ayarlanamaz hale getirmektedir, bu da

şekilli ince film üreti ninde bir dezavantajdır. İkinci si ise, sıçrat m; düzl e nsel kaynaktan yapıld ı için, sıçratıl mş buharın akış ının aç ısal dağılı m, daha iyi ayarlanabilen noktasal buhar kaynağı na göre daha fazladır [22].

5. POTANSİYEL UYGULAMA ALANLARI

Şeklii ince filmler boşluklu mikro yapıya sahip olmaları, değişik malzemelerden üretilebilirleri ve düzgün koşullar sağlandığında istenilen mikro hatta nano boyutta kontrollü şekillerin oluşturulabilmesi nedeniyle bu yapılar hakkında; tablo 5.1 de görülen değişik uygulama alanları öngörülebilir. Fakat Şeklii ince filmlerin optik, elektriksel, manyetik ve mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılabilir hale gelmesinden sonra geniş bir uygulama alanına sahip olacağı düşünülmektedir.

Tablo 5.1. Şeklii İnce Filmler, öngörülen uygulama alanları [61]

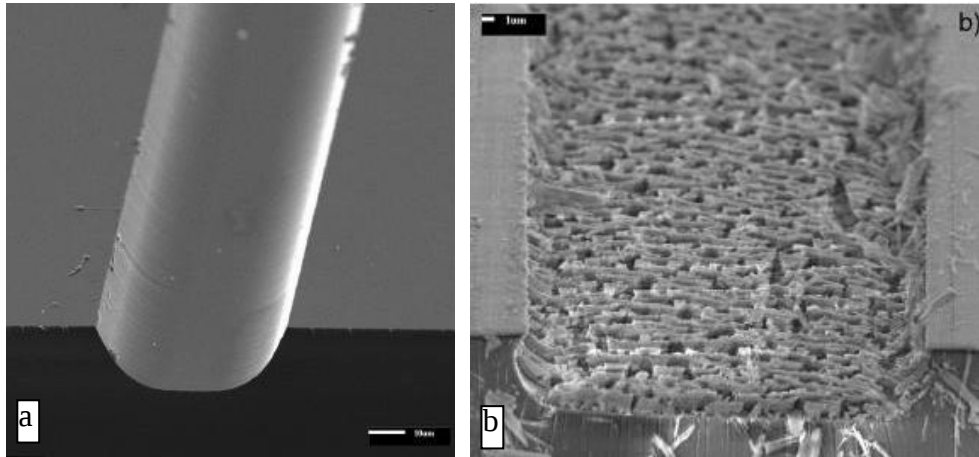
Uygulama Alanı	Önerilen kullanımlar
Kimyasal	➤ Membrane / Filtre / Elek
	➤ Tehlikeli Sıvıların Optiksel Algılanması
	➤ Katalizör
	➤ Kimyasal Sensör
Biyolojik	➤ Virüs kapama (Virüs Trap)
	➤ Kimik Onarımlar
	➤ Kuru İletim Yemaları
	➤ Doku Besleme
Optik	➤ Polarize Filtreler
	➤ Non-Linear Optik Elemanlar
Elektronik	➤ Foton Emisyonu
	➤ Elektron Salınımı Ekranlar
Mekanik	➤ Nano-kompozitler
	➤ Kendiliğinden yağlamalı kaplamalar
Termal	➤ Mini – ısıtıcılar
	➤ Anizotropik Termal İletkenler
	➤ Termal Bariyer Kaplamalar

Bununla birlikte, şekilli ince filmlerin yüzey alanını artırıcı ve boşluklu yapı özelliği göstermesinden dolayı, kimyasal ve biyolojik alanda katalizör etkinin artırılmasıyla bilineceği yerlerde kullanılabilir. İçinden geçen sıvıları optik özelliklerinden dolayı farklı ışılda malar yaparak ayırt edebilmesi, elektronik alanında sıvı kristallerin yönelimini ayarlayabilmesi, mekanik alanda boşluklu yapısının içersine farklı malzemeler biriktirilerek nano kompozit oluşturmaları ve ısısal olarak yine boşluklu yapısından faydalananak, termal bariyer kaplamalarda kullanılması mümkündür [62].

Şekilli ince filmler hakkında çalışan araştırmacılar tarafından öngörülmesi ve GLAD yöntemi ile üretimi denenmiş belli başlı uygulamaları alt başlık biçiminde detaylıca incelenmiştir.

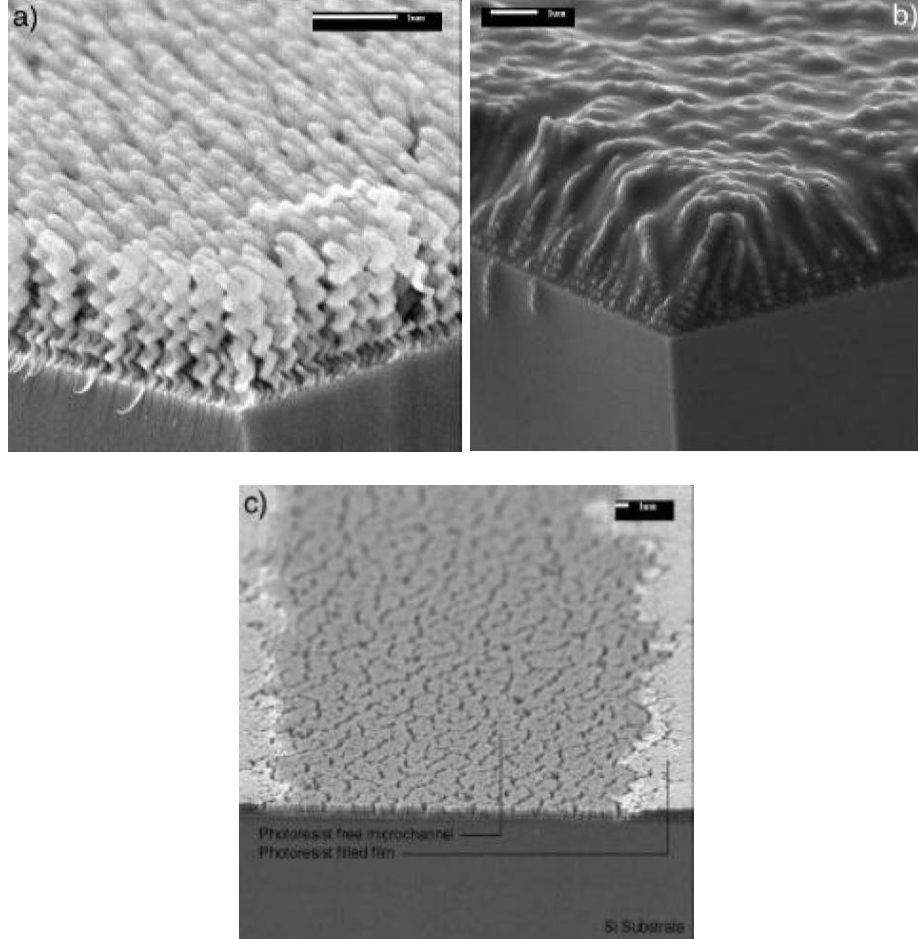
5.1. Biyolojik Mikrokanallarda Yüzey Alanının Genişletilmesi

Mikrokanallar, moleküler biyoloji alanında genetik malzemeler ve proteinlerin ayrıştırılması ve belirlenmesi amacıyla kullanılır. Mikrokanallar yalnızca içinden geçen sıvıyı iletmede değil, ayrıca onları doğru filtreleme ve birbirinden ayırma işlemleri için de kullanıldığından, yüksek yüzey alanına sahip olması daha hızlı cevap vermesi açısından avantajdır. Genel olarak yüzey alanı genişletilmesi, kompleks mikro-fabrikasyon işlemleri ve kanalların içersine partiküller doldurmak suretiyle sağlanmakta iken, Harris ve Brett bu işlemi GLAD sistemi sayesinde de mümkün olabileceğini göstermişlerdir [7]. Üretim için öncelikle Lithography yöntemi ile altlık üzerinde 4.5 μm derinliğinde ve 50 μm genişliğinde mikrokanallar oluşturulmuş. Kaplama 85° eğiklikte yapılmış ve mikrokanal üzerine SiO_2 kaplanmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Kaplama öncesi (a) ve kaplama sonrası (b) mikrokanalın görünümü [7]

Bunun dışında diğ er bir üreti myönt e ni de ş u ş ekil dedir. Öncelikle ş ekilli fil maltlık üzerinde üretilir (Ş ekil 5.2(a)). Daha sonra üretilen ş ekilli ince fil m in üzerine Ş ekil 5.2(b) ' de gör ülen ultravi ole ış ığ a maruz kalan yerleri yumuşayan bir malzeme (photoresist) ile kaplanır ve daha sonra da bu photoresistin istenilen genişlikteki kıs m maskelenip dağ landı ğ (etch) zaman photoresist sıyrılır ve geriye boşluklu yapı ya sahip, yüzey alanı geniş olan mikro kanal kalır. (Ş ekil 5.2(c)) [7,54].



Ş ekil 5.2 Ş ekilli ince fil mler ile mikro kanallar üreti mş e ması, a) Ş ekilli ince fil m b) Ş ekilli ince fil m üzerine kaplanan photoresist c) Photoresistin istenilen kıs m dağ landı kt an sonraki ortaya çı kan mikro kanal [7]

Sonuç olarak mikro kanal da yüzey alanı nın arttı ğı bariz bir ş ekilde belli ol maktadır ve nor malde kar maş ık iş lemler ile gerçekleştirilen mikro kanalın yüzey alanı nın genişletilmesi iş lemi ni n GLAD yönt e ni ile ş ekilli ince fil müreti p daha sonra üzerine birtakım basit iş lemler yaparak daha kolay bir ş ekilde gerçekleştirilebilirli ğ i gösteril miştir.

5.2 Ter mal: Ter mal Bari yer Kap la ma lar da (TBC) Kul lan ım

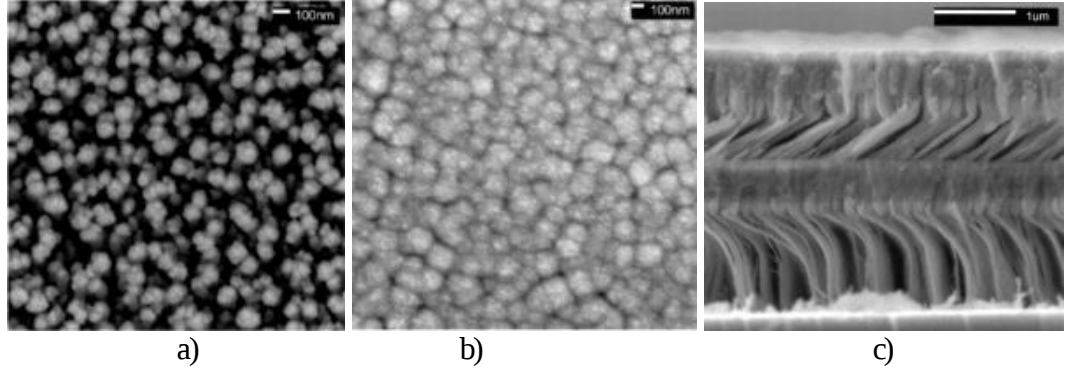
Ter mal bari yer kap la ma lar, iç ısı dan korun ma sı ge re ken yü ze yle re uy gu lan an dü şük ter mal ile t ken lik özelli ği ne sa hip ma ze ne ler kat ma nı dır. Gü nü müz de, ter mal bari yer kap la ma lar ın en yaygın kul lan ım tür bin mo tor par çalar ı nın yük sek sı cak lık tan korun ma sı içi ndir. Tür bin mo tor lar ın da art an sı cak lık, da ha yük sek ya kıt ve ri ni ni ve e ni syon da azal ma yı sa ğ la ma k ta dır. Bu yüz den de mo tor per for mans ı art tır ıl mak isten di ği nde mo tor par çalar ı nın ne re de yse er ği ne sı cak lık lar ı nın ci var lar ın da çalı şa bil me si ge rek mek te dir. Ter mal bari yer kap la ma lar, bu mo tor par çalar ı nı ol u ş an ısı dan izo le e de rek bu a şa ma da ö ne m ka zan ma k ta dı r lar [63, 64].

Literatür de, kritik yü ze ye plaz ma spre y yön te ni ile Y_2O_3 ile sta bi li ze edil mi ş ZrO_2 uy gu lan a rak ü re til en bari yer kap la ma lar me vcut tur. Bu yön te ni le yük sek boş luk lu bir ni kro ya pı el de edil mek te, iç boş luk lar da ki gaz lar ın ter mal ile t ken li ği zir ko nyam ın çev re sin de ki le r den da ha dü şük ol du ğu iç in boş luk lu ya pı boy un ca ısı di füz yon u ö ne mi şe kil de azal ma k ta dır. Bu nun la bir li kte zir ko nya kat ma nı ve on un ta ba nı fark lı ısı sal gen le ş me katsay ı lar ı na sa hip ol du ğu ndan bel li bir ısı t ma ve so ğ ut ma dö ngü sü den son ra kap la ma da ol u ş an stres, kır ıl ma la ra ne den ol ma k ta ve ya pı yı da ha az ve ri ni hale ge tir mek te dir [65].

Di ğ er bir ü re ti m pro se si, GLAD yön te ni ile ko lon sal ince fil ni ri ü re te rek ter mal bari yer ele ma nı ol a rak kul lan ma k tır. Elek tron de ne ti bu har la ş tır ma yön te ni ve GLAD tek ni ği sa ye si nde göl ge me et ki si ile bir kat bir bi ri den ay rı ko lon lar el de edil ip (Şe kil 5.3.(a)), da ha son ra alt lık da ha da eğ il e rek da ha yo ğ un bir ara kat ma n ol u ş tu ru lu mu ş tur (Şe kil 5.3.(b)). Da ha son ra da te k rar üç ü ncü kat ma n ol a rak boş luk lu ko lon lar ü re til mi ş tir. Ü re til en or ta kat ma n da sık ı pa ket len mi ş ta ne ler ol du ğu ndan, yük sek sı cak lık la ra çı k ı ld ı ğı za ma n bu ko lon lar ın bir bi ri den ay rıl a ca ğı ve ge rek li ge ri li mi ği der me yi sa ğ la ya ca ğı dü ş ü nül mü ş tür.

Da ha son ra ü re til en ter mal bari yer a ma ç lı kap la ma nı n ısı sal ile t ken li ği ni n ta yı nı iç in si mül a syon ve ger çek ölç ü mo lak ü ze re i ki adet çalı ş ma ya pıl mış tir. Si mül a syon da ya pı lan çalı ş ma son ucu, di k aç ı ile ya pı lan ve ay nı ka lı n lık ta bir i kti ri len ya pı ya gö re ısı sal ile t ken li ği n %18 azal dı ğı gö rül mü ş tür. Di ğ er ta ra ftan, ü re til en fil ni n ger çek ısı l ile t ken li ği ölç ü l dü ğün de, nor mal aç ı ile ay nı özelli k te ü re til en re fe ran s nu mu ne ye gö re %0 luk bir azal ma gö ste ri mi ş tir [8].

Sonuç olarak üretilen filmi n hem si mülasyon hem de gerçek ölçümleri yapıldı ğı nda normal açıyla üretilen filmlere göre ısısal iletkenli ği n azaldı ğı ve bunun yanı nda kontrollü bir mikro yapının sağlanabilece ği gösteril miştir. Bunun yanı nda gerili m gi der ne özelli ği direkt test edil nese de, Şekil 5.3(b) ve Şekil 5.3(c) 'de görülen yoğun yapının normal olarak yine e-de meti yöntemi ile üretilen zirkonya kaplamaları ndaki ği bi gerili m gi der ne özelli ği ne sahip olaca ğı öngörül müştür [8].



Şekil 5.3. a) Boşluklu kolonsal yapının üstten görünümü b) Ara kat nan olan yoğun yapının üstten görünümü c) Üretilen termal bariyer kaplamanın ara kesiti [8]

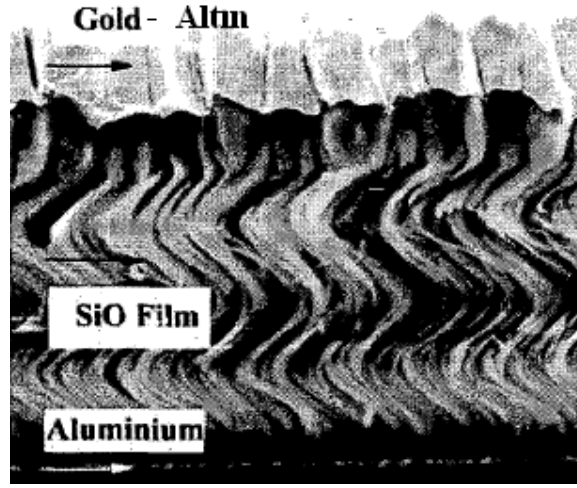
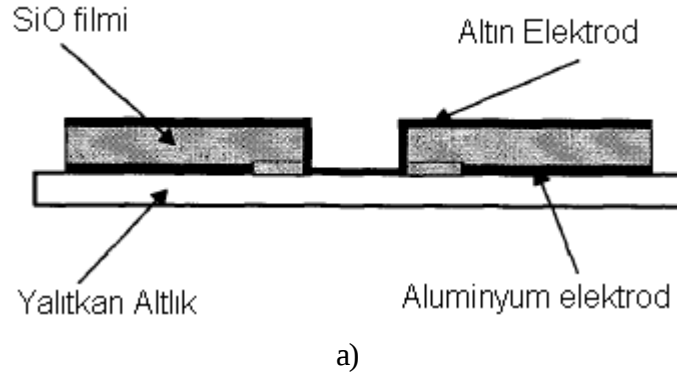
5.3 Sensör: Nem Sensörlerinde Kullanım

Genellikle ço ğu nem sensörleri için, yüksek oranda yüzey/kütle oranı istenir ve bunun sağlanması için, de ğişik mikro işleme (micromachining) prosesleri vardır. Örne ğin seramik nem sensörleri, koşulları dikkatlice seçil miş uygun sinterleme prosesi ile yapılmaktadır. Fakat bu yöntemler mikro boyutta, malzemenin yapısını kontrol edeme mektedir. GLAD tekni ği sayesinde ise 10 nmlik bir boyut aralı ğı nda hem yapı kontrol edilip düzenli bir mikro yapı sağlanabil mekte, hem de yüksek oranda yüzey/kütle oranı elde edil mektedir [24].

Yapılan çalışmada kullanılan malzeme; su ile reaksiyona gir me mesi, böylece dal dır madan sonra sensörlerin kirlen me mesi, ayrıca dielektrik (yalıtkan) özelliklerinin incelen miş olması ve dielektrik sabiti küçük oldu ğu için, de ğişimlere daha duyarlı olaca ğı ndan ve görece olarak termal yada e-de meti buharlaştırma yöntemi ile üreti mi kolay dı nasından dolayı Si O seçil miştir..

Üreti maşasında öncelikle Al elektrotlar yalıtılmı ş altlık üzerine biriktirili p daha sonra GLAD tekni ği kullanılarak, termal buharlaştırma ile saniyede 20-30 Angstrom biriktirme hızında ve 3.5×10^{-6} Torr basınçta sarmal yapıda Si O filmi, genel bir

elektrot olarak da en tepeye altın katmanı sıçratma yöntemi ile birleştirilmiştir (Sensör A) (Şekil 5.4) [9].



Şekil 5.4 Sensörün şematik (a) ve üretilen filmin arakesit (b) görüntüsü [9]

Sonuçlara göre, boşluk boyut dağılımının sensörün duyarlılık karakteristiği üzerinde kati etkileri olduğu ortaya çıkmış, bu etkiyi incelemek için kolonsal mikro yapıya sahip başka bir sensör (Sensör B) hazırlanmıştır. Sensör B'nin sensör A'dan daha fazla boşluğa sahip olduğu ve bunların daha homojen olarak dağıldığı gözlenmiş ve su molekülleri SiO filmi içine yüzeydeki delikler arasından sızdığı için, en üst katmanların mikro yapıları ile sensörlerin cevap verme zamanları ilişkilendirilip, sonuç olarak cevap verme zamanının farklılığı incelenmiştir.

En üst katmanın mikro yapısı, göreceli nemde değişiminde sensörün vereceği tepkinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır, çünkü en üst katman sensörün kapı görevini üstlenmektedir. Sonuç olarak, Sensör B'nin sensör A'dan daha fazla boşluğa sahip olduğu ve cevap zamanının sensör A'da 75 saniye iken, sensör B'de 3 saniyeden daha az olduğu gözlenmiştir [9].

5.4 Optik: Sıvı Kristal Düzenlemesi

Sıvı kristal (LC) cihazlarda optik özelliklerin optimizasyonunun sağlanması için sıvı kristal moleküllerinin uzun menzilli yönelimini kontrol edebilmek gerekmektedir. LC alletlerde hizalaştırmak için kullanılan tekniklerden birisi, hücre tabanlarına ince polimer filmler (polimer) kaplayarak yapılan yüzey işlemdir. Bu sayede LC moleküllerinin bilinen bir şekilde sıralanması sağlanmaktadır. Bu tip yönelim katman teknikleri sıvı kristal yönelimini sadece taban yüzeyinde etkilerler ve minimum enerji düzeninde istenilen özellikleri veren sıvı kristal molekülleriyle sınırlı kalan tekniklerdir. Tabandan uzaktaki önemli etkiyi sağlamaları da en önemli dezavantajlarıdır [10].

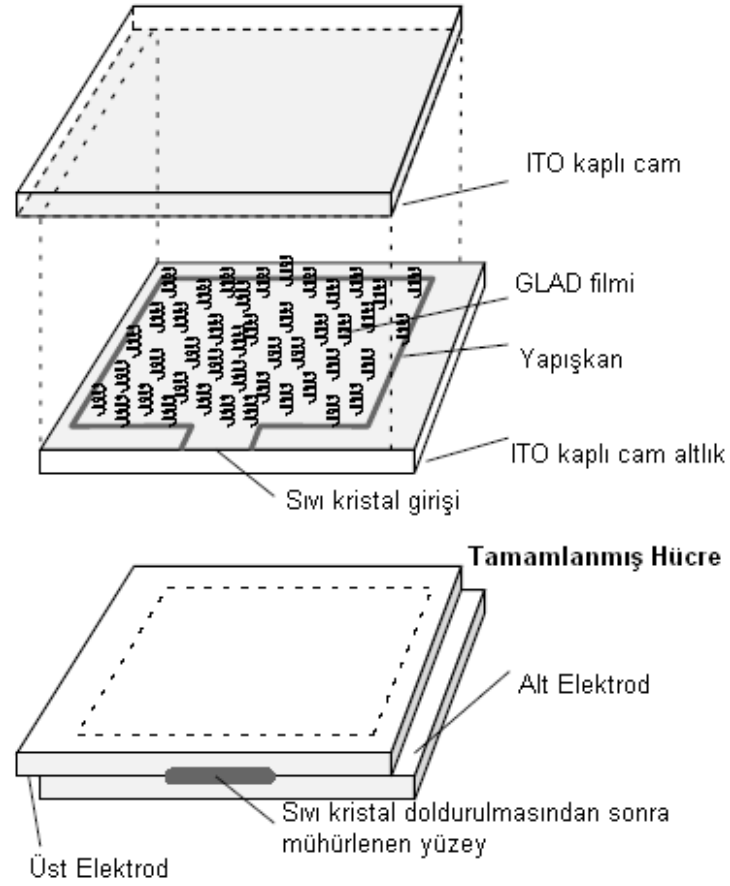
Sıvı kristal yönelimini kontrol edebilmek için diğer bir yöntem ise GLAD tekniği ile eğik açıyla biriktirilmiş ince filmleri hizaya getiren katman olarak kullanılıp sıvı kristal moleküllerinin tabanda belirli bir yönde eğiliminin sağlanmasıdır. GLAD tekniği ile sarımsal ya da chiral (aynadaki görüntüsü farklı olan yapılar, örneğin eldiven) şekilli üretilmiş filmlerin optik aktivitesinin olduğu gösterilmiştir [5].

Chiral GLAD filmlerin optik yanıtı, yapısal chirallikten ve film malzemesi ile boşluğun (havanın) indeks farkından meydana çıkar. Chiral sıvı kristalleri kullanarak istenilen yapı dokusu oluşturmak zor iken GLAD yöntemi ile şekilli ince film üreterek, filmin mikro yapı parametreleri; sarımsal yükseklik açısı ve derecesi kolaylıkla kontrol edilebilmektedir [10].

Boşluklu, chiral SiO₂ GLAD filmleri e-depoti buharlaştırma ile saydamiletken İndium Tın Oksit kaplı (ITO) camaltlık üzerine sıvı kristal anahtarlarına hücreleri üretmek üzere biriktirildi. Sıvı kristal anahtarlarına hücreleri, ikinci bir ITO kaplı camaltlık kullanarak GLAD filmi ile birlikte sandviç formu oluşturuldu. Vakum fırınında hücrenin bir kenarı LC havuzuna daldırılarak hücreler dolduruldu. Hücreler kapılar etki ile dolmakta ve daha sonra mühürlenmektedir (seal). En sonunda iki camaltlık, ITO katmanları ile az miktarda elektriksel teması müsaade edecek şekilde dengeleniyor (Şekil 5.5) [66].

Sonuç olarak, Robbie, Broer, Brett GLAD filmlerinin boşluklarını sıvı kristaller ile doldurdular ve sarımsal GLAD filmlerinin sıvı kristaller için chiral olmayan sıvı kristallerin, chiral sıvı kristaller şeklinde yönelime geçiren bir hizalama gibi davrandığını buldular. Kendi başına chiral fazını oluşturamayan sıvı kristallerde,

sarınal GLAD filmlerin chiral hizalanmayı başlattığı ve chiral optik yanıt verdiği görülmüyor. Elektrik alan uygulaması ile chiral optik yanıtın kaybolmasıyla bu tür cihazların LC parçalarını tersinir elektro-optik anahtarlamaı ispat edildi. Böylece GLAD filmlerin yeni ekran uygulamaları için tasavvur edilebilmesine olanak sağlandı [10].



Şekil 5.5. LC anahtarlama hücresi üretimi [66]

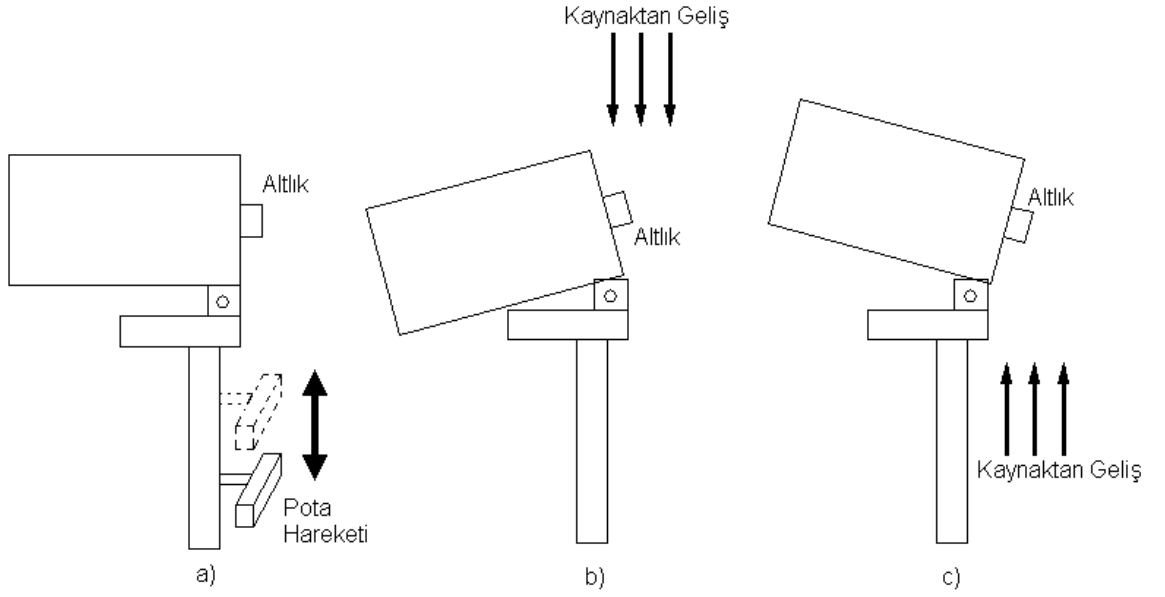
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, öncelikle İ. T. Ü. Metalurji ve Malzeme Bölümü, Yüzey Kaplama Laboratuvarı bünyesinde bulunan “Novatec-SİE Model: NVT-12 KA-FBB” ci hazına eğik açılı biriktirme (GLAD) sisteminin dizayn edilip adaptasyonunun sağlanması ve daha sonra da Türkiye’de ilk defa “Şekilli İnce Fil mheri” üretmek, onların büyüme morfolojisini incelemek amacıyla termal buharlaştırma yöntemi ile kaplamalar yapılmıştır. Sistemde karşıma çıkan hatalar tespit edilmiş, çözüm önerileri getirilmiş, üretilen fil mheri İ. T. Ü. Metalurji ve Malzeme Bölümü bünyesinde bulunan “Jeol, Model: JSM 7000F” marka alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (Field Emission SEM) ile karakterize edilmiştir. Bu bölümde, deneysel çalışmaların yürütülmesi, çalışmalar sırasında izlenilen yöntem, proses detayları ve parametreleri, kullanılan malzemeler ve karakterizasyon prosesleri üzerine bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

6.1 Eğik Açılı Biriktirme (GLAD) Sisteminin Dizaynı

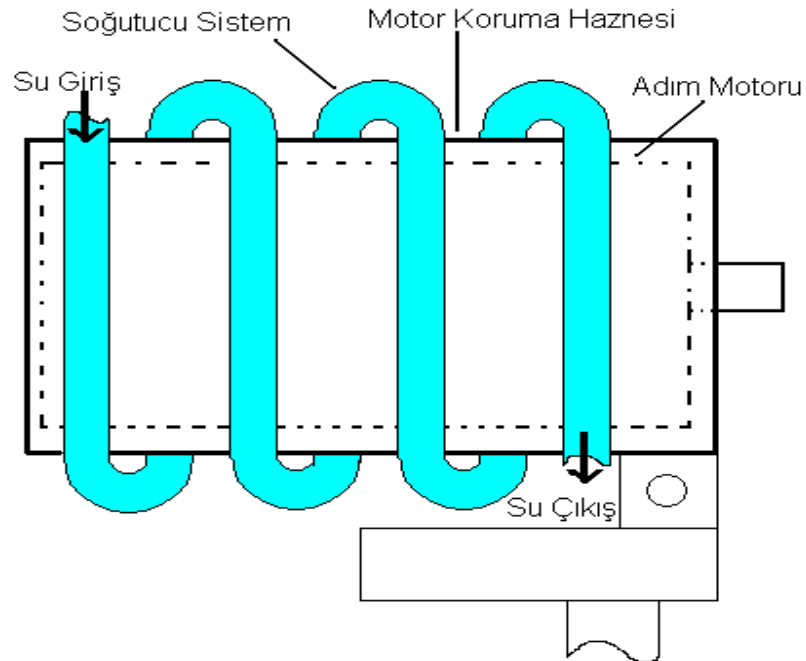
Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, şekilli ince fil mherinin oluşturulabilmesi için eğik açılı biriktirme sisteminin kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden laboratuvarımızda mevcut olan fiziksel buhar biriktirme makinesine adapte olabilecek, aynı zamanda şekilli ince fil muretebilmesi için gerekli koşulları sağlayabilecek bir sistem dizayn edildi (Ek Şekil A1-3) Oluşturulacak sistemde öncelikle düşünülmeleri gerekenler;

- Sisteme yerleştireceğimiz altlığımızın istediğimiz açılarda eğilebilmesi, açının kolaylıkla değiştirilebilmesi ve altlık ile buharlaşacak malzeme arasındaki mesafenin ayarlanabilmesi (Şekil 6.1.(a))
- Sistemin çok yönlü olması, sadece termal buharlaştırma ile değil aynı zamanda, bu konuyla ilgili ileriki çalışmalar için gerektiği takdirde magnetron sızdırma, elektron deposu ile buharlaştırma yöntemi ile şekilli ince fil mbiriktirme sağlayabilmesi (Şekil 6.1.(b) ve Şekil 6.1.(c))



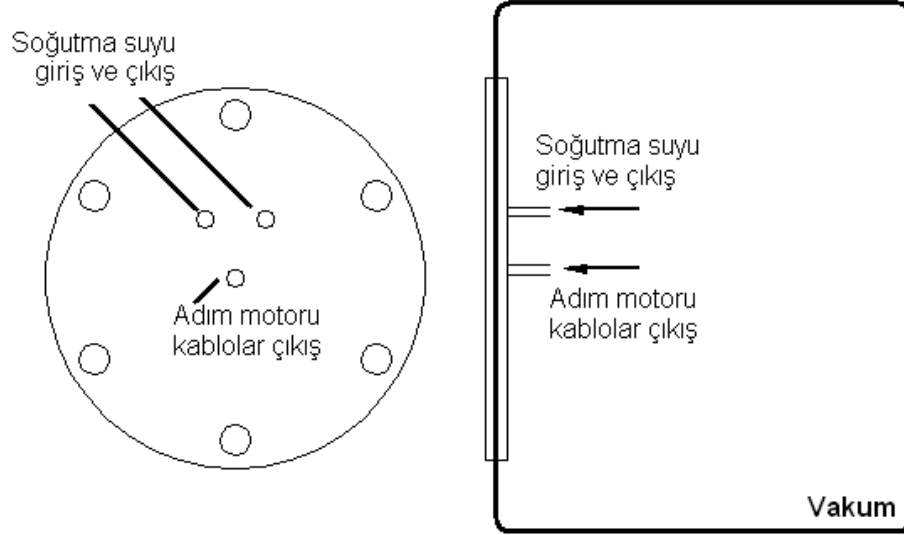
Şekil 6.1. GLAD sistemi için gerekli dizaynın şematik gösterimi a) Pota ile Altlık Arasındaki mesafenin ayarlanabilmesi b-c) Buharın geliş yönüne göre altlığın eğilebilmesi

- Sistemde altlığı döndürecek adım motorunun, kaplama sırasında oluşacak ısınlardan etkilenmemesi için korumaya alınması ve soğutma sisteminin oluşturulması (Şekil 6.2)



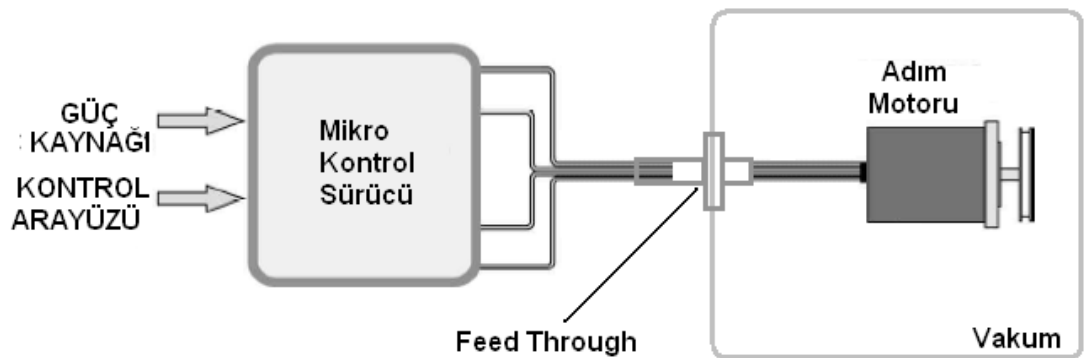
Şekil 6.2 GLAD sisteminde kullanılacak adım motorunun olası ısınlardan korunması için gerekli soğutma önlemleri şematik gösterimi

- Kullanılacak adım motorunun dışarıdan kontrolü ve soğutma sistemindeki soğuk su sirkülasyonu için atmosfere açık ortam ile vakum ortam arasında geçiş sağlanması için kaplama makinesine uygun hem kontrol ünitesini hem de soğutma sisteminin dışarıya çıkışını sağlayacak yeni bir flanş-kapak tasarımı (Şekil 6.3)



Şekil 6.3. Vakum ortamındaki kablo ve soğutma borularını dışarı çıkaracak flanşın şematik gösterimi

- Adım motorunun istenilen hızlarda veya istenilen periyotlarda dönmesinin kontrol edilmesi için gerekli elektronik devrelerin ve kontrol ünitesinin oluşturulması (Şekil 6.4)



Şekil 6.4 Adım motoru ve dışarıdan kontrol ünitesi

6.2 Şekilli İnce Filmlerin Üretilmesi

Eğik açılı biriktirme sistemi laboratuvardaki kaplamaya ci hazına adapte edildikten sonra, öncelikle numune hazırlanır daha sonra kaplamanın yapılması ile şekilli film üretimine geçilmiştir.

6.2.1. Numune Hazırlama

Kaplama tabakasının yüzeyi iyi yapışması ve özelliklerini tamolarak sergileyebilmesi açısından, kaplama işlemi öncesi yapılan yüzey temizliği büyük önem taşımaktadır. Kaplamalarda altlık malzemesi olarak Silikon Plakalar (Vüfer) kullanılmıştır. Bu plakalar 10x10 mm boyutlarında el mas uçlu kalenle kesilip, kaplama öncesi temizlik için 15 dakika aseton ile ultrasonik temizleme, daha sonra da 15 dakika alkol ile ultrasonik temizleme yapılmıştır.

6.2.2. Kaplamanın Yapılması

Hazırlanan numune dikkatli bir biçimde altlığın tutma aparatına yerleştirilip daha sonra makine vakuma alınarak kaplama için istenen vakum değerine getirilmiştir. Kaplama parametreleri;

Tablo 6.1. Şekilli İnce Filmler için temel olarak kaplama parametreleri

Kaplama Süresi	20 - 80 dk
Uygulanan Akım	160 - 220 Amper
Volt	2-3,5 Vdt
Kaplama Basıncı	$10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr
Uygulanan Açılar	75° - 85°
Dönüş Hızları	0 - 0.2 rpm
Kaynak Malzeme	Gümüş (Ag)
Ergime Sıcaklığı	961° C

Kaplama yapılmadan önce vakum değeri 10^{-6} Torr seviyelerine getirildikten sonra, tekrar yüzey temizleme işlemi için nötr moleküler kaynak (METEL) kullanılarak altlığın yüzeyinin daha temiz hale gelmesi amaçlanmıştır. Nötr moleküler kaynak ile ilgili veriler, Tablo 6.2 de verilmiştir

Tablo 6.2 Nötr Moleküler Kaynak Parametreleri

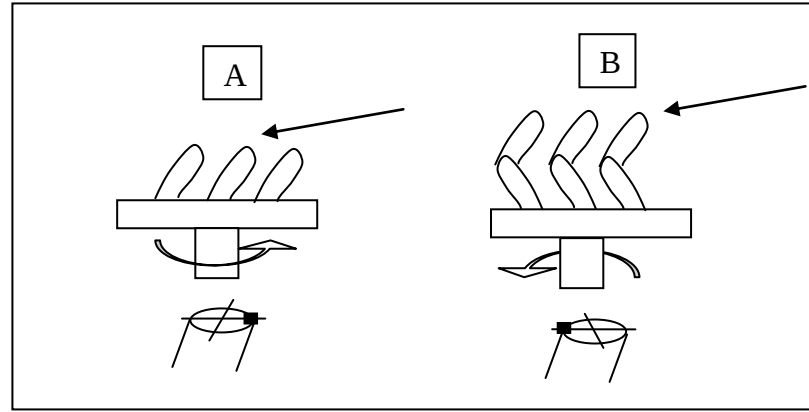
Kullanılan Gaz	Argon (Ar)
Uygulama Süresi	15 dakika
Uygulama Basıncı	7.5×10^{-3} Torr
Değer Akım	250 mA
Katod Akım	200 mA
Deşarj (Discharge) Voltajı	200 V
Hızlandırma Voltajı	200 V

Nötr moleküler kaynak ile yüzey temizleme işlemi bittikten sonra da akım kontrollü güç kaynağından potaya uygulanacak akımayarlandıktan sonra kaplama işlemine başlanmıştır, yapılacak kaplamaya göre adımlar dışardan kontrol edilerek istenilen hızlarda, zaman aralıklarında döndürülmüştür. Yapılan kaplamalar ve kullanılan parametreler tablo 6.3 de verilmiştir. Genel olarak 85 derece eğiklik ve 180 Amper akımla çalışılmıştır. Öncelikle altlık döndürülmeden eğiklik açısı değiştirilerek üç ayrı açıda kaplama yapılmıştır. Daha sonra altlık 0,1 – 0,2 rpm (tur /dakika) döndürülerek kaplama yapılmıştır.

Tablo 6.3 Üretilen filmlerin kaplama parametreleri

NO	H Z (rpm)	AÇI (°)	AKIM (A)	SÜRE (dk)
1	0	85	180	50
2	0	80	180	50
3	0	75	180	50
4	0,2	85	220	20
5	0,1	85	220	20
6	0,1	85	220	40
7	0,1	85	200	60
8	0,1	85	180	80
9	0,1	85	160	80
10	*6dk+90°	85	170	48
11	*6dk+90°	85	180	48
12	*6dk+90°	80	180	48
13	*6dk+90°	80	170	48
14	*3dk+90°	80	170	72
15	*4dk+180°	85	170	48
16	*4dk+180°	85	180	80
17	*4dk+180°	85	180	80
18	*4dk+180°	85	180	80
19	*4dk+180°	85	180	80

Son olarak da altlık belirli aralıklarla altlık döndürülerek kaplama yapılmıştır. Tablo 6.3 deki 4 dk+180 şeklindeki altlık dönüş sisteminde öncelikle altlık üzerinde Şekil 6.5 de A konumundaki gibi eğik konumda 4 dakika biriktirme yapılmıştır. Daha sonra da altlık hızlı bir şekilde (10 rpm) 180° döndürülerek B konumuna getirilmiştir. Bu çevrim kaplama süresince tekrarlanmıştır. Aynı şekilde Tablo 6.3 deki 6dk+90° ifadesi de; 6 dakika biriktirme yapıp altlığın 90° döndürülmesini temsil etmektedir.



Şekil 6.5 Kesiikli dönüş ve biriktirme mekanizmasının şematik gösterimi

6.3 Şekli İnce Filinlerin Karakterizasyonu

Kaplama bittikten sonra, üretilen filinler, üstten ve arakesit görüntüsü alınmak üzere, herhangi bir yüzey işlemi uygulanmadan altlık ortadan ikiye kırılmış, ve üretilen filinler Jed, Model: JSM 7000F marka, yüksek çözünürlüğe sahip, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (Field Emission SEM) ile kırık yüzey ve yüzey görüntüsü karakterize edilip, büyüme mekanizması bir sonraki bölümde incelenmiştir.

7. DENEY SONUÇLARI ve İRDELEMELER

Dönme hareketi yapmayan numunelerin kaplanması sırasında oluşturulan kolonlar ile altlık malzemesi arasındaki açı, kaplamaların arakesitlerinin yüksek çözünürlükteki elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri kullanılarak hesaplandı. Bu şekilde, iyon geliş açısının kolon eğikliğine olan etkisi gözlemlendi. Ayrıca, kaplama boyunca sürekli döndürülen numunelerde altlık döndürme hızının ve uygulanan akımın şekil oluşumuna etkileri karşılaştırıldı. SEM yüzey görüntülerinden kolonların genişlikleri ve boşluk oranları karşılaştırıldı.

7.1. Altlık Açısı İle Kolon Açısı İlişkisinin Geliştirilmesi

Altlığın dönüş hareketi yapmadığı, yalnızca eğiklik açısı değiştirildiği zaman oluşan kolonlar yapısındaki boşluk oranı ve kolonların eğikliği değişmektedir. Şekil 7.1 de üç farklı açıda üretilen kaplama parametreleri Tablo 6.3 de verilen 1, 2 ve 3 nolu kaplamaların arakesitleri ve yüzey görünüşleri gösterilmektedir. Yüzey görüntüleri karşılaştırıldığında, altlığın metal buharı kaynağına göre daha dik durduğu (85°) açılarda yapının daha boşluklu olduğu gözlemlenmiştir. Eğiklik arttırıldığında ise gölgelenme etkisini azaltmaktan dolayı yapısındaki boşluk oranı da azalmaktadır.

Ayrıca, altlığın açısının azaltılmasıyla kolonların dikleşmeye başladığı ve iç içe geçmeye başladığı gözlemlenmiştir. Resimler üzerinden “SeMAfore” bilgisayar programı ile eğik kolon doğrultusunda dikey ve yatayda mesafeler ölçülmüş ve açı hesaplanmıştır. Her bir film için iki ayrı yerden değer alınarak ortalama eğiklik açıları tespit edilmiştir. Bu değerler ile daha önce bölüm 3.1, eşitlik 1.2 de belirtilen

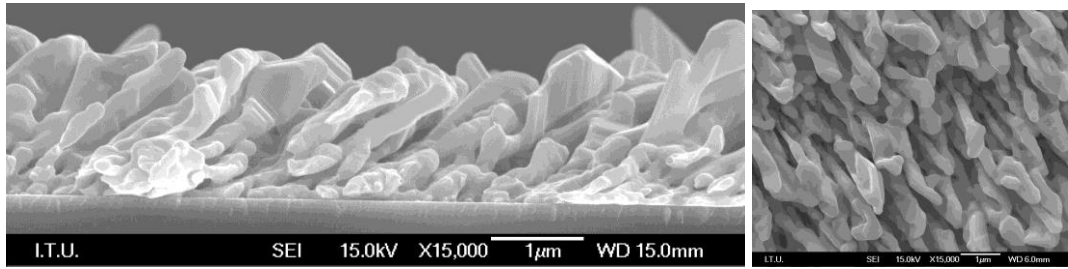
$(\beta) = (\alpha) - \arcsin\left[\frac{1 - \cos(\alpha)}{2}\right]$ eşitliğini kullanılarak hesaplanan değerler, Tablo 7.1 de karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.1 de görüldüğü üzere deneysel olarak bulunan kolon eğiklik açıları ile teorik eşitlikten hesaplanan açılar birbirini tutmaktadır. Altlık açısının 50° den büyük açılara göre uyarlanmış altlık – kolon eşitliğinin grafiği çizilmiştir. Çizilen grafik üzerinde 1, 2 ve 3 nolu kaplamalardan elde edilen deneysel değerler (noktalar

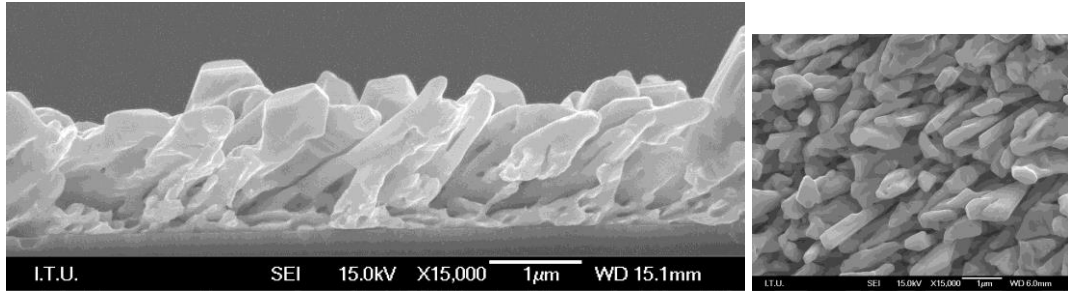
halinde) teo rik hesapla bul unan de ğerle rle beraber (kesi kli çizgi halinde) veril miştir (şekil 7.2). Sonuç ol arak, altlı kl arı n e ği kli k aı sı nı de ği ştirerek üretti ği niz fil mleri n kol on aı ları nı n bu e şitli ğe uydu ğu göz len mi ştir.

Tablo 7.1. E ği k aı yla üretilen kol onsal fil mleri n aı ları nı n tes pit i

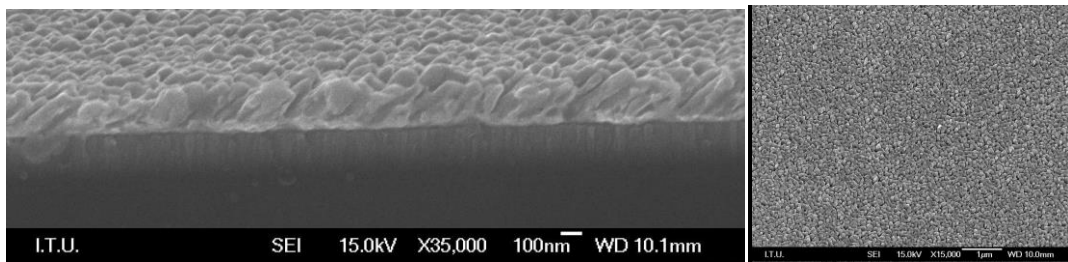
No	Altlı k Açı s (α)	Kol on Açı s (β)			For müle Gö re β
		1. Öüm	2. Öüm	Ortal ama	
1	85°	57,17°	58,27°	57,72°	57,84°
2	80°	55,62°	56,50°	56,06°	55,60°
3	75°	52,55°	53,97°	53,26°	53,25°



a) Arakesit Görüntüsü ve Yüzey Görüntüsü: 15.000 Büyütme

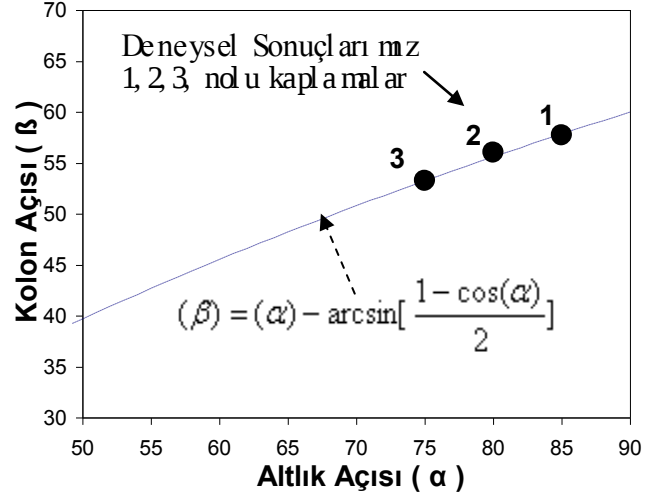


b) Arakesit Görüntüsü ve Yüzey Görüntüsü: 15.000 Büyütme



c) Arakesit Görüntüsü 35.000, Yüzey Görüntüsü: 15.000 Büyütme

şekil 7.1. Sadece altlı k aı sı de ği ştirilerek üretil miş 1, 2, 3 nolu kol onsal ince fil mleri n arakesit ve üstten görünümleri a)85° b)80° c)70°



Şekil 7.2 Altlık açısı ve Kolon açısı ilişkisi

7.2 Dönüş Hızı ve Buharlaşma Hızının Film Kolon Morfolojisine Olan Etkisi

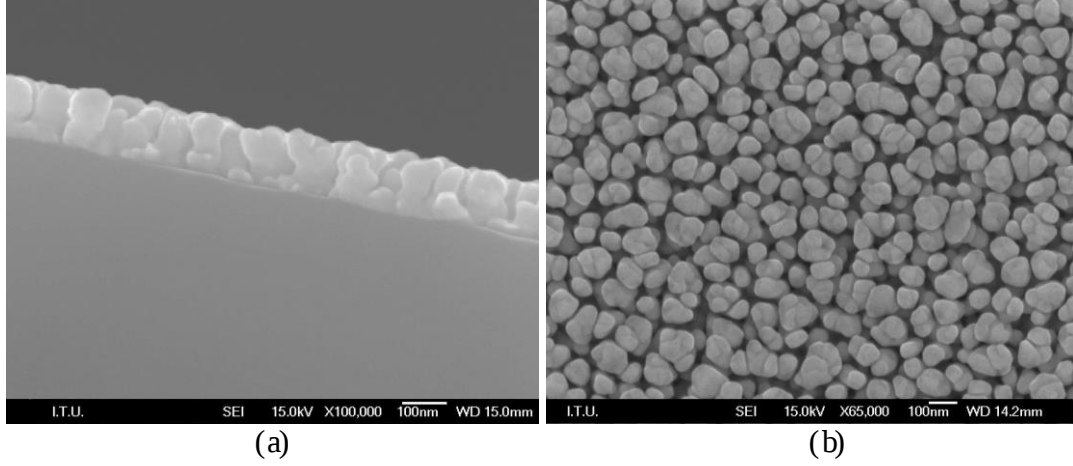
Üretilen filmlerin arakesitlerine bakılarak, film şekli ile kaplama parametreleri arasındaki ilişkiler çıkartılmaya çalışılmış ve karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

7.2.1. Numune Dönüş Hızının Film Morfolojisine Etkisi

Numune dönüş hızının film kolon yapısı üzerindeki etkisini görebilmek için 0.2 rpm ve 0.1 rpm dönme hızlarında 85° altlık açısı kullanarak kaplamalar yapılmıştır. Bu numunelerin kaplama parametreleri Tablo 7.2’de verilmiştir. Numune dönüş hızı hariç diğer kaplama parametreleri her kaplamada sabit tutulmuş ve bu şekilde dönüş hızının kaplama morfolojisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen kaplamaların kırık yüzeylerine elektron mikroskopunda bakıldığında (Şekil 7.3. a ve 7.4. a) dönüş hızının azalmasıyla eğik kolonların oluşumunun başladığı gözlenmiştir. Kaplamaların yüzey görüntülerine bakıldığında (Şekil 7.3. b ve 7.4. b) yüksek hızda yapılan kaplamaların dik kolon tepeleri görülürken, düşük hızlarda yapılan kaplamaların kolonlarının eğilmiş olduğu farkedilmektedir.

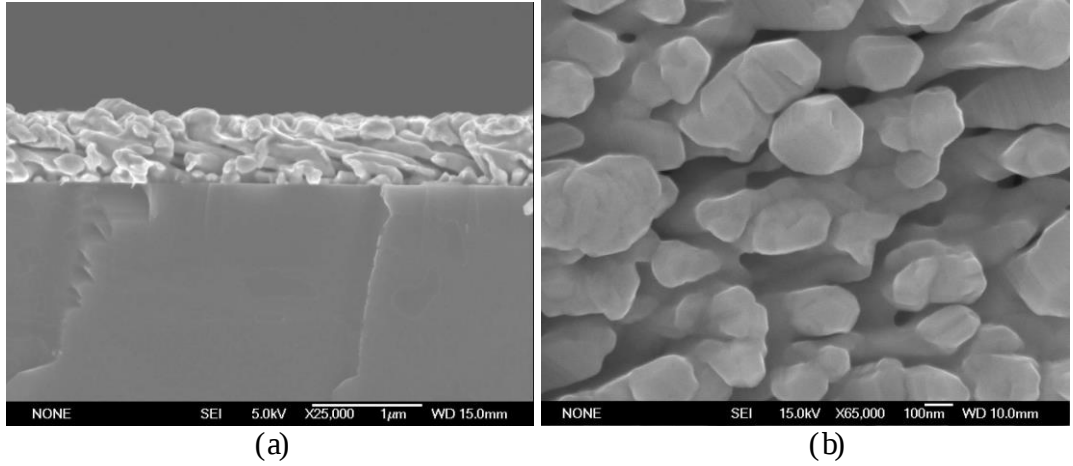
Tablo 7.2 4 ve 5 nolu kaplamaların karşılaştırmalı kaplama parametreleri

NO	H Z (rpm)	AÇ (°)	SÜRE (dk)	AKIM (A)
4	0,2	85	20	220
5	0,1	85	20	220



Şekil 7.3 Dönüş hızı 0,2 rpm olan 4 nolu kaplama (a) Arakesit 100.000, (b) Yüzey Görüntüsü 65.000 Büyütme

Altlığın dönüş hızı arttığı zaman bölüm 3.2 de anlatıldığı gibi silindirik olarak si metrik bir atombuharı akışı sağlanacaktır [22]. Böylelikle film oluşumunda yöne bağlılık da ortadan kaldırılmış olacaktır. Ayrıca dönüş hızının biriktirme hızına oranı da artacaktır. Literatürde yapılan tüm çalışmalarda bu oranın artmasından dolayı, eğik şekilli formlardan kolonsal hale geçiş gözlenmiştir [24, 25, 30].



Şekil 7.4 Dönüş hızı 0,1 rpm olan 5 nolu kaplama (a) Arakesit 25.000, (b) Yüzey Görüntüsü 65.000 Büyütme

Yavaş dönüş hızında ise, aynı miktarda gelen atombuharına karşı yöne bağlılık artacaktır. Altlık dönüşü film oluşum yönünü üzerinde etkin hale gelir ve film dönüş hızına bağlı olarak farklı yönlerde büyüme ye devam eder.

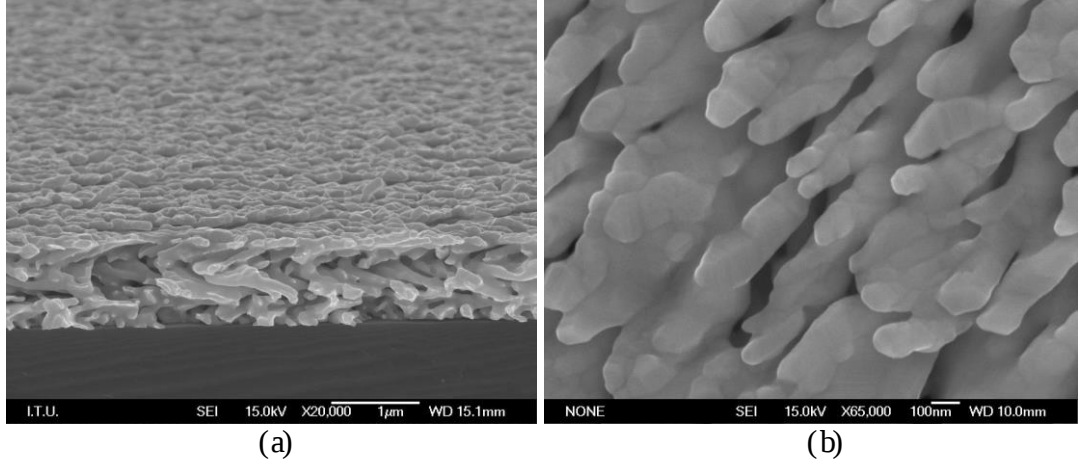
7.2.2. Buharlaşma Hızının Film Büyüme Morfolojisine Etkisi

Aynı kaplama parametrelerinde (Tablo 7.3) fakat farklı buharlaşma akımlarıyla yapılan kaplamalarda film büyüme şekillerinin buharlaşma hızından etkilendiği gözlenmiştir. Akımın fazla olduğu 8 nolu kaplamada altlığın dönüşünden dolayı

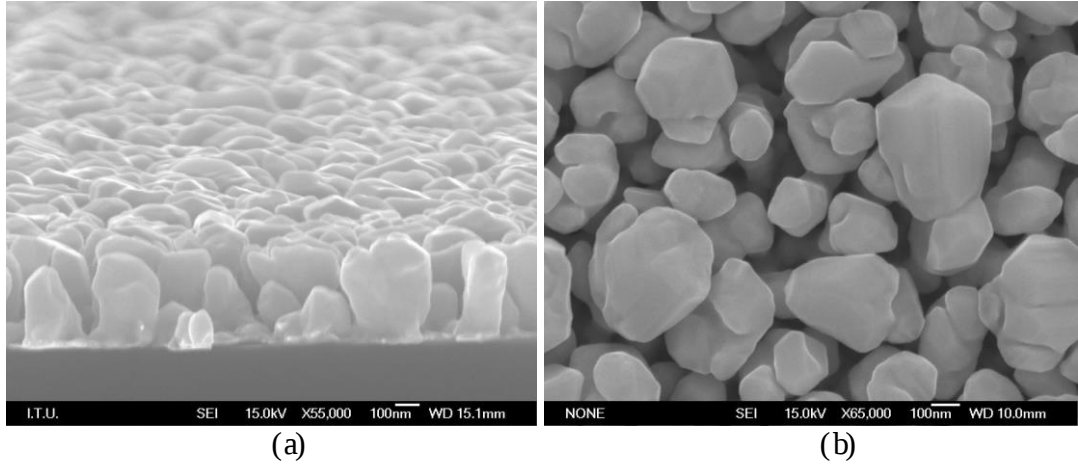
beklenen sarımsımsı şekil oluşumu kısmen gözlenmektedir (Şekil 7.5 a). Yüzey görüntüsüne bakıldığında da yapının yönlendiği gözükmektedir (Şekil 7.5 b).

Tablo 7.3 8 ve 9 nolu kaplamaların karşılaştırmalı kaplama parametreleri

NO	H Z (rpm)	AÇ	SÜRE (dk)	AKIM (A)
8	0,1	85	80	180
9	0,1	85	80	160



Şekil 7.5 180 Amper akımı uygulanan 8 nolu kaplama (a) Arakesit 20.000 , (b) Yüzey Görüntüsü 65.000 büyütme

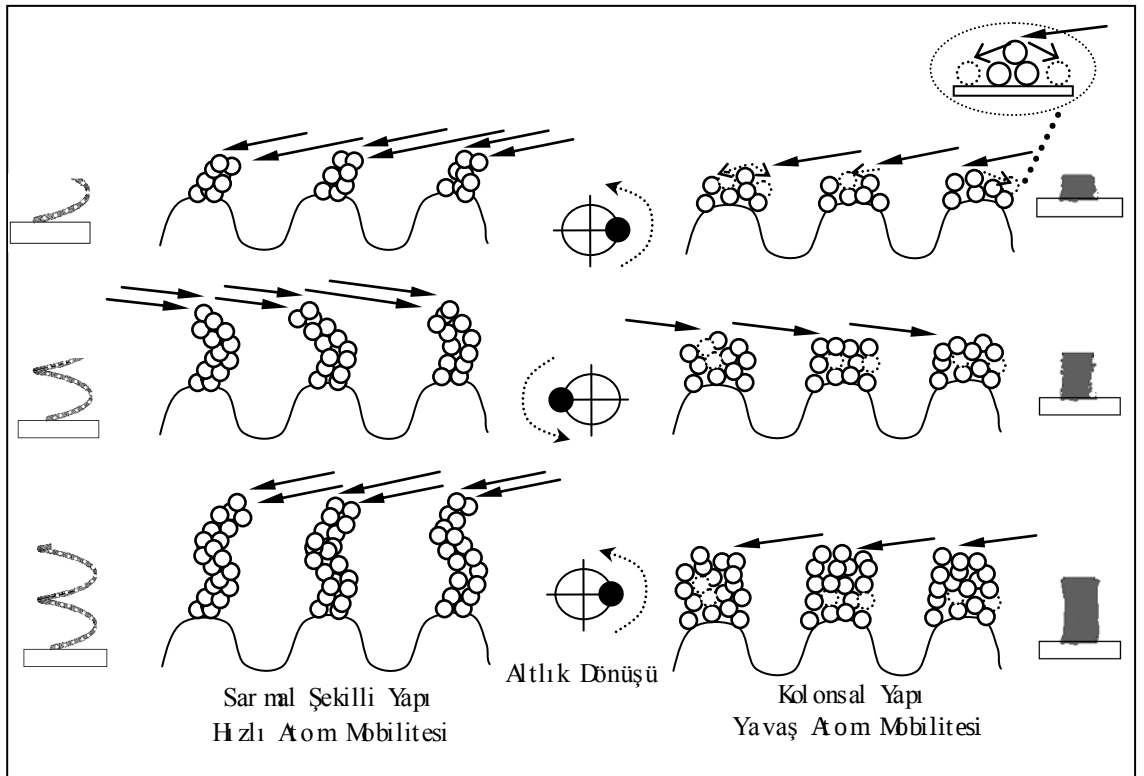


Şekil 7.6 160 Amper akımı uygulanan 9 nolu kaplama (a) Arakesit 55.000 , (b) Yüzey Görüntüsü 65.000 büyütme

Buharlaşma akımının daha az olduğu 9 numaralı kaplamada ise altılığın aynı hızda dönmesine rağmen yapının dik kolonsal olarak büyüdüğü gözlenmiştir (Şekil 7.6 a). Ayrıca, yüzey görüntüsüne bakıldığında da oluşan kolonların yönlendiği gözükmektedir (Şekil 7.6. b).

Akımın artması sonucu, potadan buharlaşan malzeme miktarı da akım artışıyla birlikte artar. Bu şekilde, birim zamanda yüzeye gelen atom sayısı artar. Bölüm 3.3'te anlatıldığı gibi birim zamanda yüzeye gelen atomun fazlalığı, yüzeydeki atomların

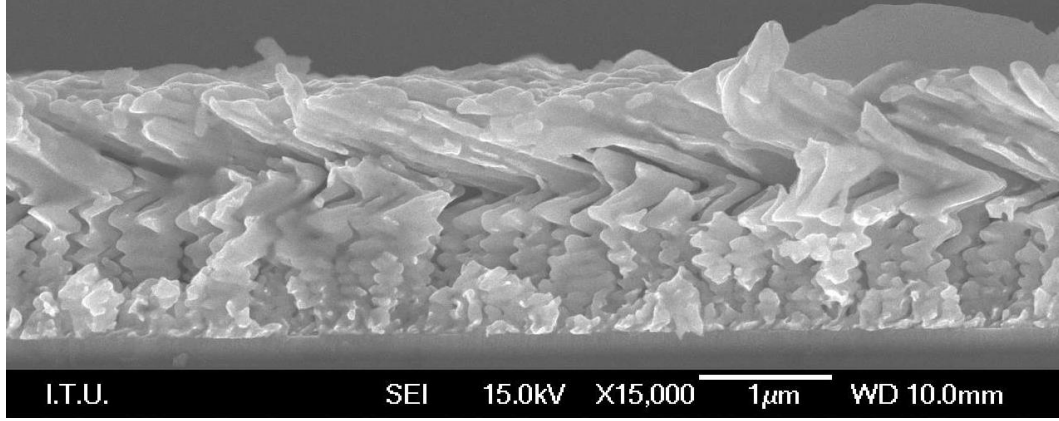
hareket mesafelerini azaltacağından atomların hareketliliikleri azalacaktır [38]. Bu durumda düşük hareketliliğe sahip atomlar, altlığın dönüş hızı ve eğiklik açısından etkilenecek yöne bağlı olarak şekilli filmbüyümesine neden olacaktır. Diğer taraftan akımda daha az olduğunda ise, birim zamanda yüzeye gelen atom sayısı daha azdır ve dolayısıyla daha uzun mesafelerde hareket edebilirler. Bu atomların yüzeydeki hareketliliğini artırır. Böylece atomlar farklı çekirdeklenme noktalarını bulacak yeterli mesafe ve zamana sahiptirler. Sonuç olarak da büyüme kolonsal olarak gerçekleşecek şekilde atomlar kendilerini düzenleyebilir. Bu ilişki şekil 7.7 de şematik olarak ifade edilmiştir.



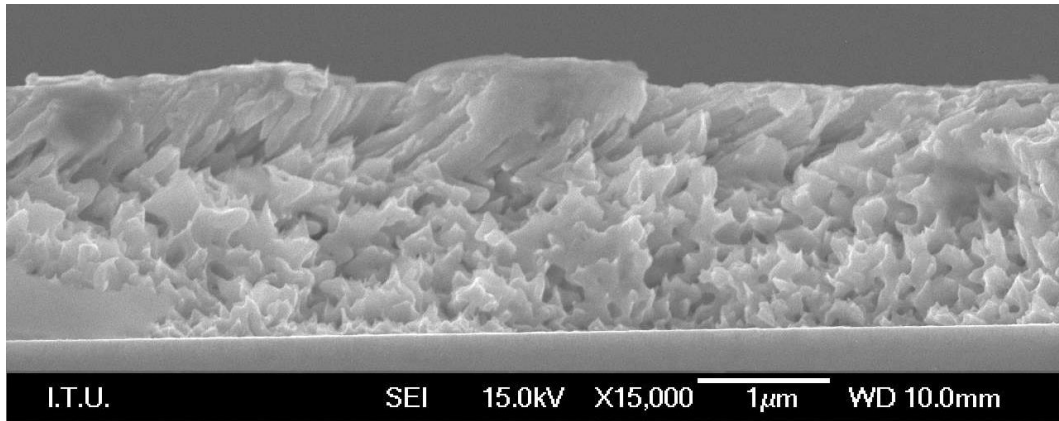
Şekil 7.7. Buharlaştırma hızına göre şekil oluşumunun çizgisel gösterimi

7.2.3 Zıgzag Şekilli Filmler

Nu muneleri belirli periyotlarda döndürerek, Bölüm 6.2.2 de şematik olarak verilen kesikli dönme hareketiyle zıgzag şekilli filmler büyütülmeye çalışılmıştır. Böylece, altlık 180° çevrilerek bir önceki atom buharı geliş yönünün tersi yönünde atom buharının gelmesi sağlanmıştır. Bu çevrimin belirli sayıda döngülerle tekrarlanmasıyla zıgzag şeklinde filmler elde edilmiştir.



(a)



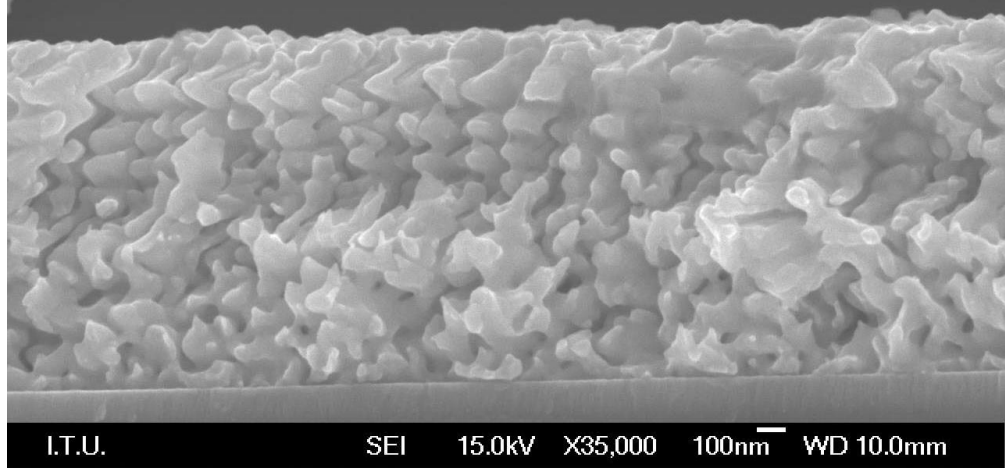
(b)

Şekil 7.8 Zigzag şekillerin oluşturulduğu (a) 16 ve (b) 17 nolu kaplamalar (x15.000)

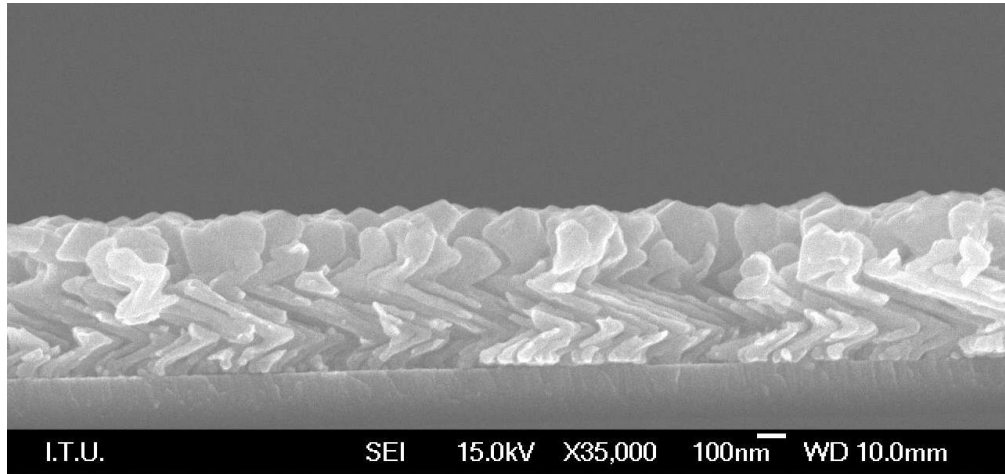
16 ve 17 numaralı kaplamalarda gümüş kaplama boyunca sabit kalacak şekilde 180 A potansiyel ile buharlaştırılmıştır. Oluşan film büyüme morfolojisi, düşünüldüğü gibi zigzag şeklindedir. (Şekil 7.8 a ve Şekil 7.8 b). Bununla beraber, arakesit görüntülerine bakıldığında zamanla biriktirme miktarının arttığı, oluşan eğik kolonların boylarının uzadığı sonuç olarak birbirlerine yapışmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise, 80 dakikalık kaplama süreci boyunca buharlaşmanın olduğu potansiyelin ısınması olarak gösterilebilir. Gözlemlenerek, potansiyelin yaklaşık kaplamanın 50. dakikası sonrasında aşırı parladığı ve bu sırada kaplama basıncının arttığı tespit edilmiştir. Potansiyelin kümülatif ısınması ve vakum ortamındaki zayıf ısı transferi neticesinde potansiyelin aşırı yükselmesi, buharlaşma miktarını arttırıcı bir etken olmuştur.

Yukarıda ortaya çıkan problemlerden sonra buharlaşma hızını sabit tutabilmek için kaplama basıncının artışıyla sabit tutulması hedeflenmiştir. Bu amaçla, kaplama basıncının artmaya başladığı zamanlarda, akımdüşürülerek basınç sabit bir değerde tutulmaya çalışılmıştır.

Sabit akımda yapılan 16-17 nolu kaplamalarda kaplama basıncı 2×10^{-5} Torr'dan başlayarak deney sonunda $\sim 3 \times 10^{-5}$ Torr'a kadar çıkmıştır. 18 ve 19 nolu kaplamalarda ise bu değişimakin kontrol edilmesi ile $2 \sim 2,5 \times 10^{-5}$ Torr aralığında tutulmaya çalışılmıştır. Bunun sonucunda akımın, diğer bir deyişle biriktirme hızının, kontrol edildiği 18 ve 19 nolu kaplamalarda düzgün zigzagların oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 7.9 ve 7.10 da görüleceği gibi zigzag şeklini oluşturan kolonların mesafelerinin aynı olduğu tespit edilmiştir.



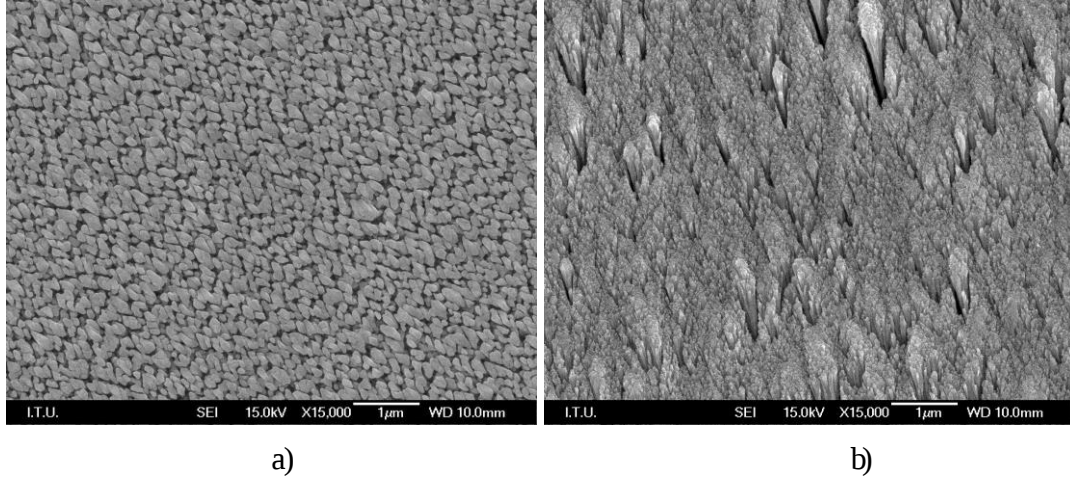
Şekil 7.9 Düzgün zigzaglı 18 nolu kaplama arakesit görüntüsü (35.000 Büyütme)



Şekil 7.10 Düzgün zigzaglı 19 nolu kaplama arakesit görüntüsü (35.000 Büyütme)

Akımın sürekli olarak sabit tutulduğu 16 ve 17 nolu kaplamalar ile, akımın buharlaşma hızını sabit tutacak şekilde ayarlandığı 18 ve 19 nolu kaplamaların yüzey görüntülerinde ise boşluk dağılımında farklılıklar gözlenmektedir. Akımın kontrol edildiği 19 nolu kaplamada daha homojen bir boşluklu yapı göze çarpmaktadır (Şekil 7.11.a). Akımın sabit tutulduğu ve bunun sonucunda zamanla biriktirme hızının arttığı 17 nolu kaplamada ise zigzag kolon boyunun uzamasından dolayı

özellikle kaplama yüzeyine yakın bölgelerde dağılımın homojen olmadığı gözlenmiştir (Şekil 7.11.b).



Şekil 7.11. Zıgzag şekillerin üstten görünümü a) 19 nolu b) 17 nolu kaplamalar (x15.000)

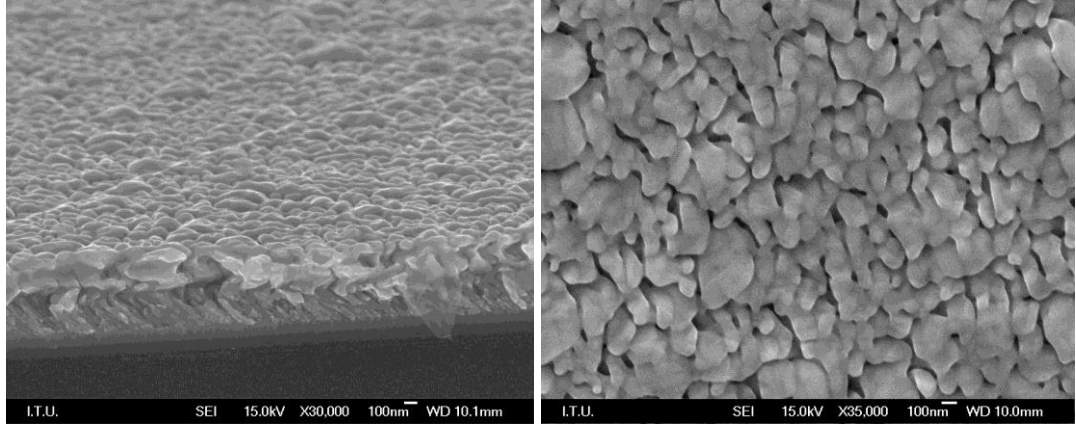
7.2.4. Altlık eğiklik açısının 80° olduğu filmler

Eğiklik açısının 80° olduğu durumda ise oluşan şekillerde genel olarak daha yoğun yapıların olduğu görülmektedir (Şekil 7.12 a). Bunun nedeni; altlığın açısının azalmasıyla beraber (daha az gölgeleme etkisi) yüzeye daha fazla atomun gelmesidir. Ayrıca oluşan şekiller arasındaki boşlukların kapanarak şekillerin birleşmesi de gözlenmiştir. Kolonların birleşmesi de, kaplama malzemesi gümüşün düşük ergime sıcaklığından dolayı yüksek adatom mobilitesine sahip olmasıyla açıklanabilir [24]. Altlık açısının 80° olduğu durumda elde edilen kolon yapısının 85° olduğunda gözlenen kolon yapısına göre daha dik ve daha az boşluklu olduğu gözlenmiştir (Şekil 7.12 b). Bölüm 7.1 ‘de daha önce bahsedildiği gibi, altlık açısının azaldığı durumlarda gölgeleme etkisi azaldığından yüzeye gelen atomlar daha dik kolonsal bir büyüme gösterir. Bu yaklaşım deneysel sonuçlarla uyum göstermektedir. Ayrıca, kolonların birleşerek daha kalın yapılar oluşturduğu da gözükmektedir. Altlığın açısının 80° olduğu diğer kaplamaların görüntüleri de Ek- A8 ve A9’da verilmiştir.

7.3. Üretilen Yapıların Yüzey Görüntülerinin İncelenmesi

Altlığın döndürülmesi ile değişik açılarda ve değişik akım değerlerinde yapılan kaplamaların kolon boyutları genel olarak 50 nanometre (nm) ile 80 nanometre arasındadır. Ayrıca yüzey morfolojileri de oluşturdukları şekle göre farklılıklar

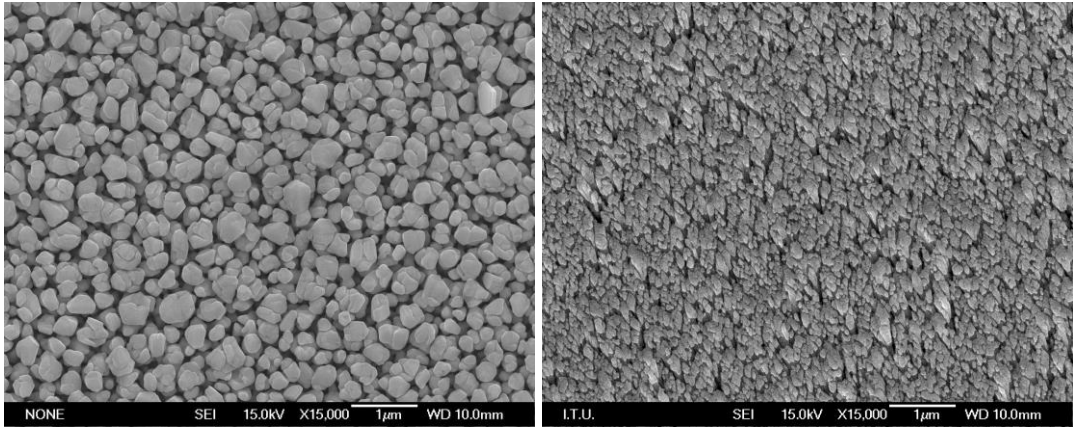
göstermektedir (Şekil 7.13). Kolonların şekilleri ve boyutları, kaplama parametrelerine bağlı olarak, atomların yüzeydeki hareketliliği ve gölgelenme etkisinin ortak bir sonucu olarak değişmektedir [2,24, 35].



(a)

(b)

Şekil 7.12 Atlık eğikliği 80° olduğu 13 nolu kaplamanın arakesit (x30.000) yüzey (x35.000) büyütme görüntüsü



(a)

(b)

Şekil 7.13 Sırası ile (a) 9 ve (b) 18 nolu kaplamaların üstten görünümü (x15.000)

Şekil 7.13 de 9 nolu kaplamada dik kolonsal büyüyen bir filmin üstten görünümü, 18 nolu kaplamada ise zigzag şeklinde büyüyen şekilli ince filmin üstten görünümü verilmiştir. Yüzey görüntüsünden anlaşılacağı üzere, 9 nolu kaplamada (Şekil 7.13. a) kolonların dik büyüdüğü ve 18 nolu kaplamada (Şekil 7.13. b) ise kolonların yönlendiği gözlenmiştir. Yapılan kaplamaların diğer ayrıntılı görüntüleri Ek A(4-11) de verilmiştir.

8. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Şekilli ince filmlerin üretilmesi için gerekli olan eğik açılı biriktirme sistemi (GLAD) laboratuvarımızdaki fiziksel buhar biriktirme sistemine adapte edilmiştir. Kaplamalar termal buharlaştırma yöntemi ile yapılmıştır. Malzeme olarak literatürde daha önce çalışılmamış olduğu için gümüş seçilerek şekilli ince filmler üretilmiştir. Üretilen filmlerin arakesit ve yüzey elektron mikroskopu görüntüleri incelenerek, şekilli ince filmlerin büyüme mekanizması incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Üretilen filmlerde oluşan kolonların kalınlıklarının 50 ile 80 nm arasında olduğu hesaplandı ve gölgeleme etkisi sayesinde boşluk yapılarının üretildiği gözlemlendi.
- Altlık döndürülmeden, altlık açısı değiştirilerek yapılan kaplamalarda sırası ile 85°, 80° ve 75° eğiklik açılarında altlık normaline göre 57.8°, 55.6° ve 53.2° kolon eğiklik açısı hesaplandı. Altlık açısının azalması ile birlikte kolonların altlık normaline yaklaştığı yani dikleşmeye başladığı gözlemlendi. Bu değerlerin, bu konuyla ilgili literatürden bulunan eşitliğe uygunluğu tespit edildi.
- Altlığın dönüş hızı 0,1 rpm iken sarımsı yapıda şekilli filmler üretilirken, aynı parametrelerde yapılan kaplamalarda dönüş hızı 0,2 rpm olan kaplamada ise dik kolonlu yapının oluştuğu gözlemlendi. Dönüş hızının biriktirme hızına oranının oluşacak şeklin yapısını belirlediği tespit edildi.
- 180 Amper akı uygulanarak yapılan buharlaştırmada sarımsı yapıda filmler oluştu. 160 Amper akı uygulanarak yapılan buharlaşmada ise dik kolonlu yapı oluştuğu gözlemlendi. Buharlaştırma akımının düşmesiyle dik kolonlu filmin büyüdüğü gözlemlendi.
- Sürekli dönüş yerine belirli aralıklara altlığın 180° döndürülerek yapıldığı kaplamalarda zigzag yapıda şekilli ince filmler üretilmiştir.

- Kaplama sırasında pota sıcaklığının kontrol edilmesi, buharlaşma hızının (dolayısıyla kaplama hızının) sabit tutulması açısından önemlidir. Bu şekilde daha düzgün ve homojen zigzag şekilleri elde edilebilir.
- Düşük ergime sıcaklığından dolayı termal olarak buharlaşmasının kolay olacağı gümüş seçilmiştir fakat bu malzemenin yüksek atom mobilitesiinden dolayı oluşan kolonların birbirine yapıştığı tespit edildi.
- Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda; biriktirme hızının değiştirilmesiyle filmbüyüme şeklinin değişimi incelenebilir. Ayrıca farklı kolon şekillerinde üretilen filmlerin boşluk oranlarının tespit edilmesi de bu filmlerin kullanım alanlarının genişletilmesi açısından önemli olacaktır. Üretilen filmlerin optik ve mekanik özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Horn, M W, Hckett, M D, Messier, R and Lakhtakia, A**, 2004. Blending of nanoscale and microscale in uniform large-area sculptured thin-film architectures, *Nanotechnology*, **15**(3), 303-310.
- [2] **Messier, R, Venugopal, V C and Sunal, P D**, 2000. Origin and evolution of sculptured thin films, *J. Vac. Sci. Technology A***18**(4), 1538-1545.
- [3] **Malac, M and Egerton, R F**, 2001. Thin-film regular-array structures with 10-100 nm repeat distance, *Nanotechnology*, **12**(1), 11-13.
- [4] **Suzuki, M and Taga, Y**, 2001. Numerical study of the effective surface area of obliquely deposited thin films, *J. Appl. Phys.*, **90**(11), 5999.
- [5] **Robbie, K, Brett, M J and Lakhtakia, A**, 1995. First thin film realization of a helicoidal bianisotropic medium, *J. Vac. Sci. Technology*, **A13**(6), 2991.
- [6] **Main, E, Karabacak, T and Lu, T M**, 2004. Continuum model for nanocolumn growth during oblique angle deposition, *J. Appl. Phys.*, **95**(8), 4346-4351.
- [7] **Harris, K D, Brett, M J, Sny, T J and Backhouse, C**, 2000. Microchannel surface area enhancement using porous thin films, *Journal of the Electrochemical Society*, **147**(5), 2002-2006.
- [8] **Harris, K D, Vick, D, Gonzales, E J, Sny, T J, Robbie, K and Brett, M J**, 2001. Porous thin films for thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, **138**(2-3), 185-191.
- [9] **Wu, A T, Brett, M J, Hizinga, A, and Seto, M**, 1999. Humidity sensing using SiO₂ films fabricated by an advanced deposition technique, *IEEE Canadian Conference*, **3**, 1662-1667.
- [10] **Sit, J C, Broer, D J and Brett, M J**, 2000. Liquid crystal alignment and switching in porous chiral thin films, *Advanced Materials*, **12**(5), 371-373.
- [11] **Robbie, K, Hnatyuk, A J P, Brett, M J, MacDonald, R I, and McMillin, J N**, 1997. Inhomogeneous thin film optical filters fabricated using glancing angle deposition, *Electronic Letters*, **33**(14), 1213-1214.
- [12] **Robbie, K, Beydaghyyan, G, Brown, T, Dean, C, Adams, J and Buzza, C**, 2004. Ultrahigh vacuum glancing angle deposition system for thin films with controlled three-dimensional nanoscale structure, *Review of Scientific Instruments*, **75**(4), 1089-1097.
- [13] **Van Popta, A C, Sit, J C and Brett, M J**, 2004. Optical properties of nanostructured porous thin films fabricated using glancing angle deposition, *Segovia, Spain- Poster*.

- [14] **Suzuki, M and Taga, Y**, 2001. Integrated sculptured thin films, *Japanese J. Appl. Phys., Part 2 Letters* **40(4A)**, L358- L359.
- [15] **Eryılmaz, O L**, 1996. Zr-B-ZrBN çok katlı kaplamaların korozyon davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ. T. Ü. Fen- Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Kazmanlı, M K**, 2000. Mo- N kaplamaların Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu, *Doktora Tezi*, İ. T. Ü. Fen- Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Petrov, I., Barna, P. B., Hultman, L and Greene, J. E**, 2003. Microstructural evolution during film growth, *J. Vac. Sci. Technology*, **A21(5)**, S117- S128.
- [18] **Smith, D L**, 1995. Thin-Film Deposition – Principles & Practice, McGraw-Hill Inc – New York, pp 119- 220, 433.
- [19] **Bunshah, R E**, 1994. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, 2nd edition, Noyes Publications, pp 684-711.
- [20] **Barna, P. B and Adanik, M**, 1997. Formation and Characterization of The Structure of Surface Coatings, *Protective Coatings and Thin Films, Synthesis, Characterization and Applications*, NATO ASI Series, 3 High Technology **(21)** Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp 279- 299.
- [21] **Trabzon, L ve Iğdil M C**, 2004. Nano boyutlu şekilli ince film kaplama fiziğinin incelenmesi, *Denizli Malzeme Konferansı*.
- [22] **Messier, R, Lakhtakia A**, 2005. Sculptured Thin Films: Nanoengineered Morphology and Optics, Press Monograph, pp 50-102.
- [23] **Karabacak, T, Wang, G C, Lu, T M**, 2003. Quasi-periodic nanostructures grown by oblique angle deposition, *J. Appl. Phys.*, **94(12)**, 7723- 7728.
- [24] **Robbie, K and Brett, M J.**, 1997. Sculptured thin films and glancing angle deposition, Growth mechanics and applications, *J. Vac. Sci. Technology*, **A15(3)**, 1460.
- [25] **Messier, R, Gehrke, T, Frankel, C, Venugopal, V C, Qano, W and Lakhtakia, A**, 1997. Engineered sculptured nematic thin films, *J. Vac. Sci. Technology*, **A15(4)**, 2148.
- [26] **Tait, R N, Smy, T and Brett, M J.**, 1993. Modelling and characterization of columnar growth in evaporated films, *Thin Solid Films*, **226(2)**, 196- 201.
- [27] **Robbie, K, Sit, J. C and Brett, M J.**, 1998. Advanced techniques for glancing angle deposition, *J. Vac. Sci. Technology*, **B16(3)**, 1115.
- [28] **Ye, D X, Zhao, Y P, Yang, G R, Zhao, Y G, Wang, G C and Lu, T M**, 2002. Manipulating the column tilt angles of nanocolumnar films by glancing-angle deposition, *Nanotechnology*, **13(5)**, 615- 618.
- [29] **Buzea, C and Robbie, K**, 2004. Nano-sculptured thin film thickness variation with incidence angle, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **6(4)**, 1263- 1268.

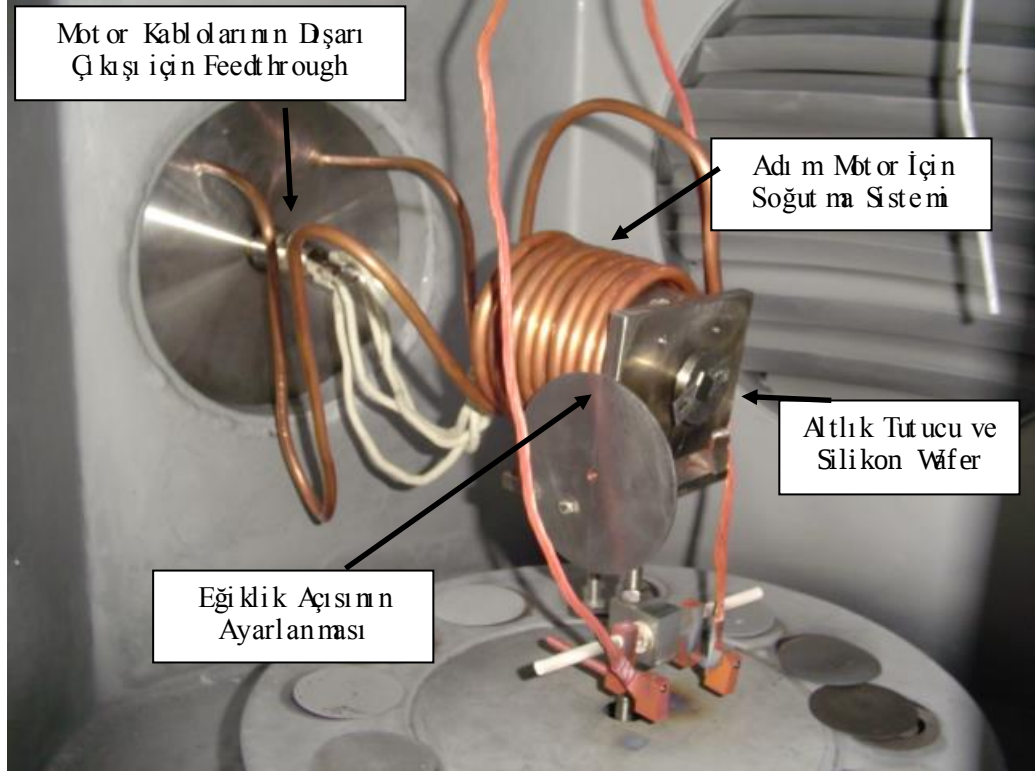
- [30] **Karabacak, T, Wang G C and Lu, T M**, 2004. Physical self-assembly and the nucleation of three-dimensional nanostructures by oblique angle deposition, *J. Vac. Sci. Technology*, **A22(4)**, 1778-1784.
- [31] **Liu, F, Unlor, MT, Shen, L, Weston, J, Eads, W, Barnard, J. A and Mankey, G J**, 1999. Growth of nanoscale structured iron films by glancing angle deposition, *J. Appl. Phys.*, **85(8)**, 5486-5488.
- [32] **Kaminska, K, Amassian, A, Martinu, L and Robbie, K**, 2005. Growth of vacuum evaporated ultraporous silicon studied with spectroscopic ellipsometry and scanning electron, *J. Appl. Phys.*, **97(1)**, 013511-1-013511-8.
- [33] **Dick, B, Brett, M.J. and Sny, T**, 2003. Investigation of substrate rotation at glancing incidence on thin-film morphology, *J. Vac. Sci. Technology*, **B21(6)**, 2569-2575.
- [34] **Zhao, Y P, Ye, D X, Wang, G C and Lu, T M**, 2002. Novel Nano-Column and Nano-Flower Arrays by Glancing Angle Deposition, *Nano Letters*, **2(4)**, 351-354.
- [35] **Malac, M and Egerton, R E**, 2001. Observations of the microscopic growth mechanism of pillars and helices formed by glancing-angle thin film deposition, *J. Vac. Sci. Technology*, **A19(1)**, 158-186.
- [36] **Vick, D, Friedrich, L J, Dew, S K, Brett, M.J, Robbie, K, Seto, M and Sny, T**, 1999. Self-shadowing and surface diffusion effects in obliquely deposited thin films, *Thin Solid Films*, **339(1-2)**, 88-94.
- [37] **Beydaghyan, G, Kaminska, K, Brown, T and Robbie, K**, 2004. Enhanced birefringence in vacuum evaporated silicon thin films, *Applied Optics*, **43(28)**, 5343-5349.
- [38] **Dumont, J, Wane, E, Ghisen, J and Sporken, R**, 2004. Growth of atomically flat Ag on mica, *Surface Science*, **572(2-3)**, 459-466.
- [39] **Karabacak, T, Millikarjunan, A, Singh, J P, Ye, D, Wang, G C and Lu, T M**, 2003. β -phase tungsten nanorod formation by oblique-angle sputter deposition, *Applied Physics Letters*, **83(15)**, 3096-3098.
- [40] **Yang, Y G, Miss, D D and Wadley, H N G**, 2005. Porosity control in zig-zag vapor-deposited films, *Thin Solid Films*, **471(1-2)**, 1-11.
- [41] **Messier, R and Lakhtakia, A**, 1999. Sculptured thin films-II. Experiments and applications, *Materials Research Innovations*, **2**, 217-222.
- [42] **Harris, K D, St, J C and Brett, M.J**, 2002. Fabrication and Optical Characterization of Template-Constructed Thin Films With Chiral Nanostructure, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, **1(3)**, 122-128.

- [43] **Robbie, K, Friedrich, L J, Dew, S K, Smy, T and Brett, M.J.**, 1995. Fabrication of thin films with highly porous microstructures, *J. Vac. Sci. Technology*, **A13(3)**, 1032.
- [44] **Dick, B, Brett, M.J, Smy, T, Belov, M and Freeman, M.R.**, 2001. Periodic submicrometer structures by sputtering, *J. Vac. Sci. Technology*, **B19(5)**, 1813-1819.
- [45] **Ye, D X, Karabacak, T, Li m B K, Wang, G C and Lu, T M.**, 2004. Growth of uniformly aligned nanorod arrays by oblique angle deposition with two-phase substrate rotation, *Nanotechnology*, **15(7)**, 817-821.
- [46] **Jensen, M O and Brett, M.J.**, 2005. Periodically structured glancing angle deposition thin films, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, **4(2)**, 269-276.
- [47] **Ürgen, M.**, 1997. Modern Yüzey İşlem Teknolojileri ve Türkiye'deki Gelişmeler, *9th Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, 333-350.
- [48] **Öztürk, A.**, 2003. Manyetik sıçratma tekniği ile üretilmiş Mb_2N ve nanokompozit $Mb-N-Cu$ kaplamaların kazımalı aşınma davranışlarının karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen-Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- [49] **Küley, U.**, 2003. Nanokompozit $Mb-N-Cu$ kaplamaların yüksek sıcaklık aşınma davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen-Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- [50] **Ohring, M.**, 2002. Materials Science of Thin Films, Second Edition, Academic Press Inc., New York, pp 118-129.
- [51] **Rossnagel, S M.**, 2003. Thin film deposition with physical vapor deposition and related technologies, *J. Vac. Sci. Technology*, **A21(5)**, 74-87.
- [52] **Hodgkinson, I., Wu, Q H and McPhun, A.**, 1998. Incremental-growth model for the deposition of spatially modulated thin film nanostructures, *J. Vac. Sci. Technology*, **B16(5)**, 2811.
- [53] **Malac, M, Egerton, R.F., Brett, M.J. and Dick, B.**, 1999. Fabrication of submicrometer regular arrays of pillars and helices, *J. Vac. Sci. Technology*, **B17**, 2671-2674.
- [54] **Harris, K D, Westra, K L and Brett, M.J.**, 2001. Fabrication of Perforated Thin Films with Helical and Chevron Pore Shapes, *Electrochemical and Solid-State Letters*, **4(6)**, 39-42.
- [55] **Seto, M W, Dick, B. and Brett, M.J.**, 2001. Microsprings and microcantilevers: Studies of mechanical response, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **11(5)**, 582-588.

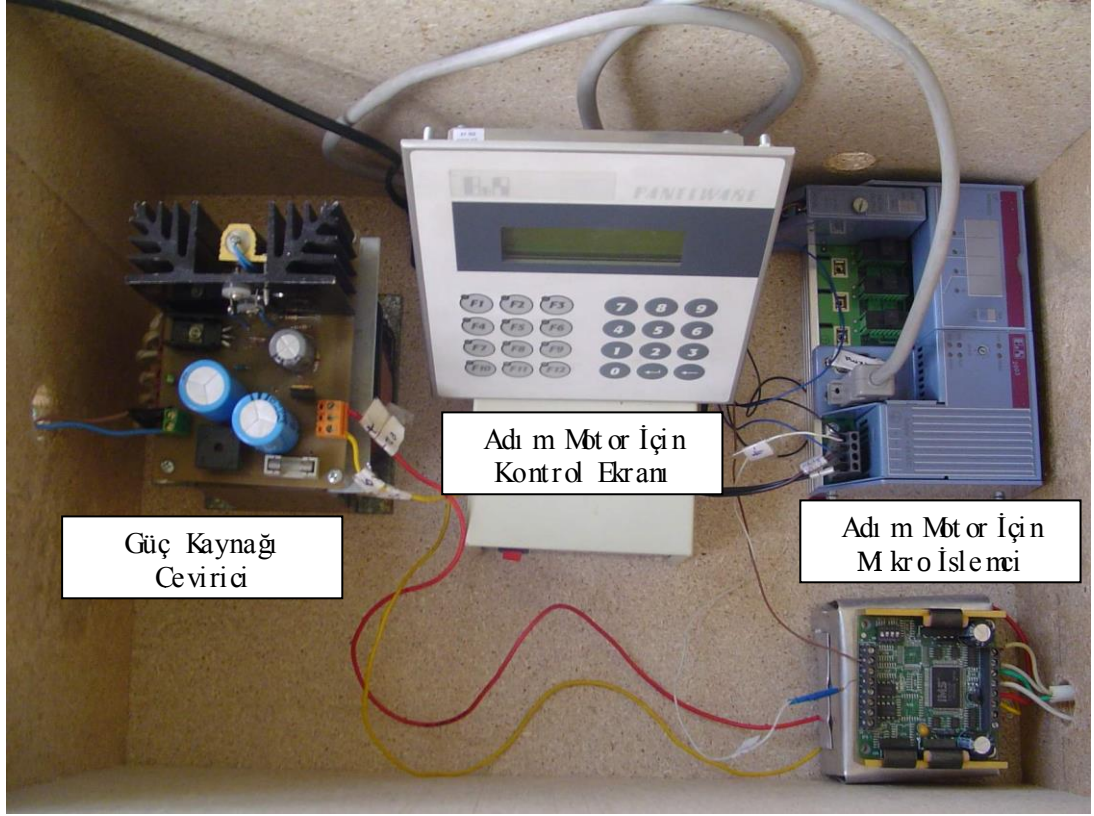
- [56] **Monteiro, O R, Vizer, A and Brown, I. G,** 1998. Multilayer thin-films with chevron-like microstructure, *Journal of Physics D Applied Physics*, **31(22)**, 3188-3196.
- [57] **Lintyner, J., Gavaille, J., Martin, N and Takadoun, J,** 2003. Glancing angle deposition to modify microstructure and properties of sputter deposited chromium thin films, *Surface and Coatings Technology*, **174-175**, 316-323.
- [58] **Dalla, T.J, Gliner, G.H, Wndt, D.L, Kalyanaraman, R, Bauman, E.H, O'Sullivan, P.L, Sapjeta, J, Diaz, R.T and Djafari, R.M,** 2003. Microstructure of thin tantalum films sputtered onto inclined substrates: Experiments and atomistic simulations, *Journal of Applied Physics*, **94(1)**, 263-271.
- [59] **Lintyner, J., Martin, N, Chappe, J. M, Delobelle, P. and Takadoun,** 2004. Nanoindentation of chromium zigzag thin films sputter deposited, *Surface and Coatings Technology*, **180-181**, 26-32.
- [60] **Karabacak, T, Hcu, C.R, Senkevich, J., Wang, G.C and Lu, T.M,** 2004. Stress Reduction in Sputter Deposited Thin Films Using Physically Self-Assembled Nanostructures as Compliant Layers, *Journal of Applied Physics*, **7(9)**, 36-38.
- [61] <http://www.esmpsu.edu/HTMLs/STF/STFApps.htm>
- [62] **Lakhtakia, A,** 2002. Sculptured thin films: accomplishments and emerging uses, *Materials Science and Engineering C*, **19(1-2)**, 427-434.
- [63] **Hass, D.D, Sifka, A.J and Wadley, H.N.G,** 2001. Low thermal conductivity vapor deposited zirconia microstructures, *Acta Materialia*, **49(6)**, 973-983.
- [64] **Janos, B.Z, Lugscheider, E and Renner, P,** 1999. Effect of thermal aging on the erosion resistance of air plasma sprayed zirconia thermal barrier coating *Surface and Coatings Technology*, **113(3)**, 278-285.
- [65] **Gell, M, Jordan, E, Vaidyanathan, K, McCarron, K, Barber, B, Sohn, Y And Tolpygo, V.K,** 1999. Bond strength, bond stress and spallation mechanisms of thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, **120-121**, 53-60.
- [66] **Sit, J.C, Broer, D.J. and Brett, M.J,** 1999. Optical devices fabricated from porous thin films embedded with liquid crystals, *Technical Digest - International Electron Devices Meeting*, 123-126.

EKLER

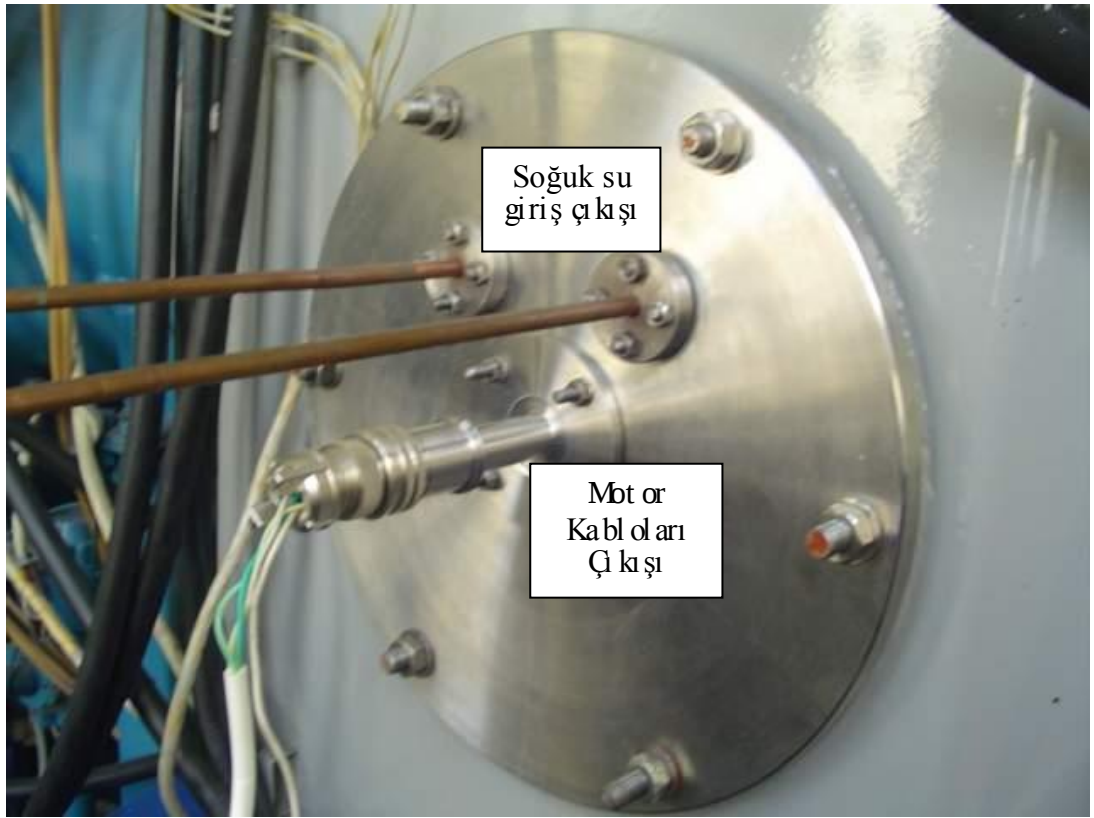
EK A: Şekiller



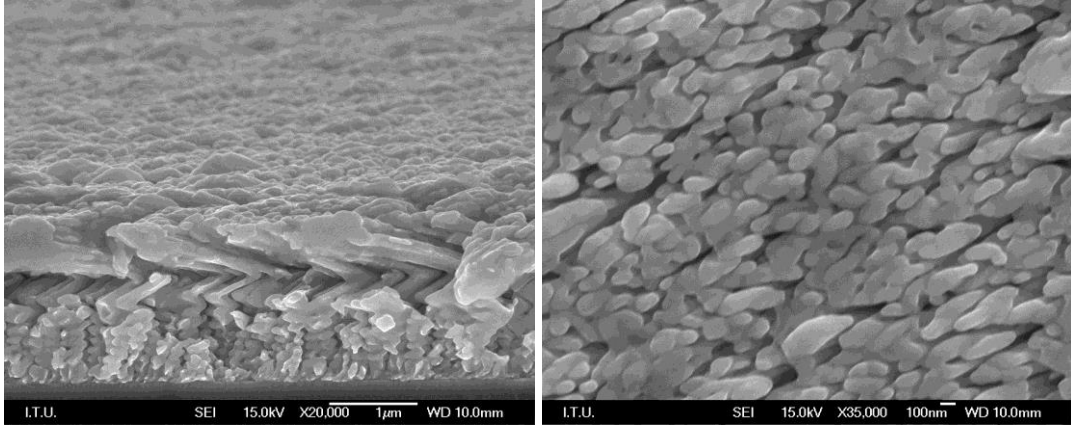
Şekil A1. Dizayn edilen GLAD sisteminin fotoğrafları



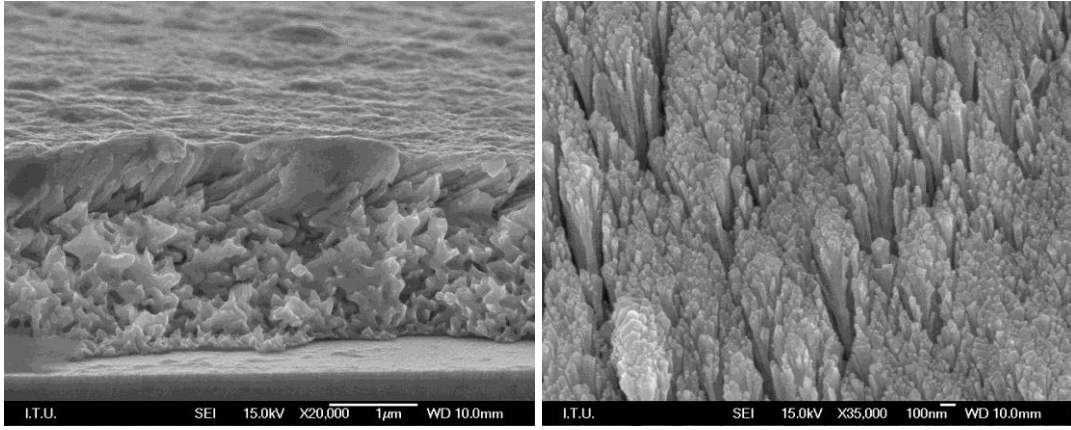
Şekil A2 Adım motoru için kontrol ünitesi



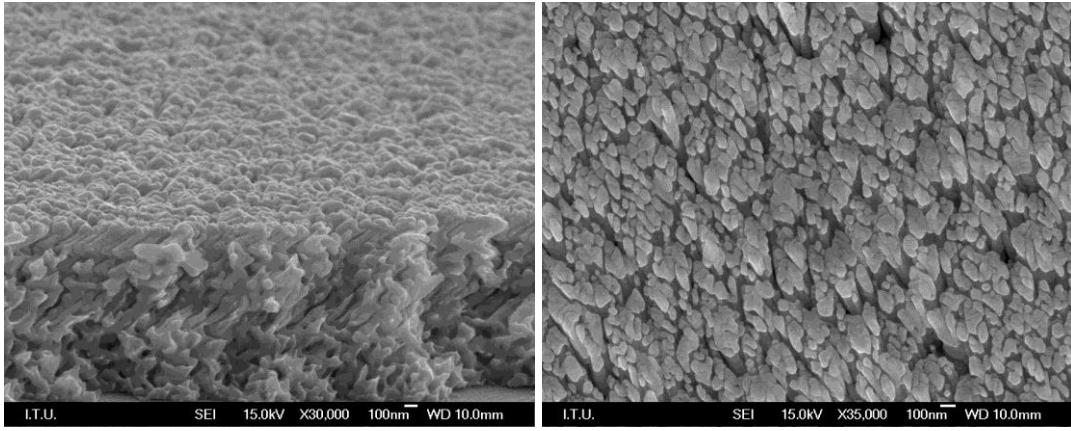
Şekil A3 Soğutucu borularının ve adım motoru kablolarının dışarı çıkışını sağlayan flaş



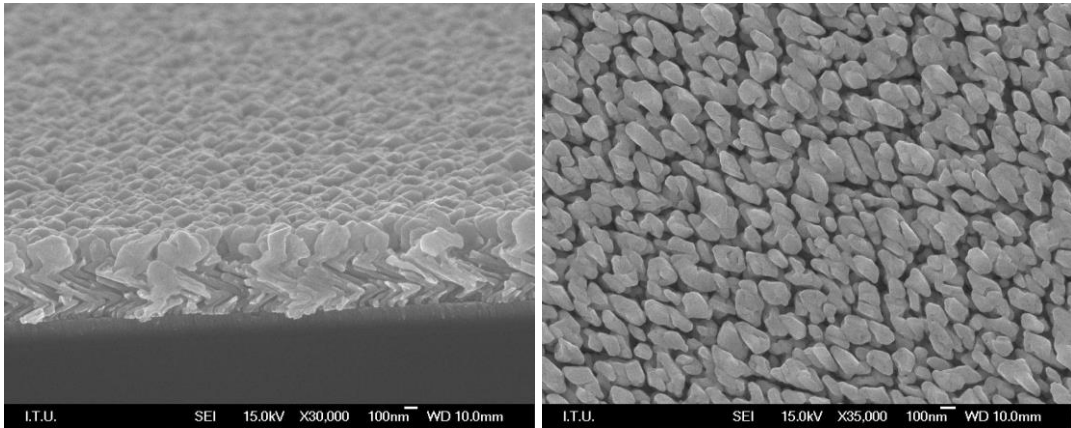
Şekil A4 16 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x20.000) ve yüzey görüntüsü (x 35.000)



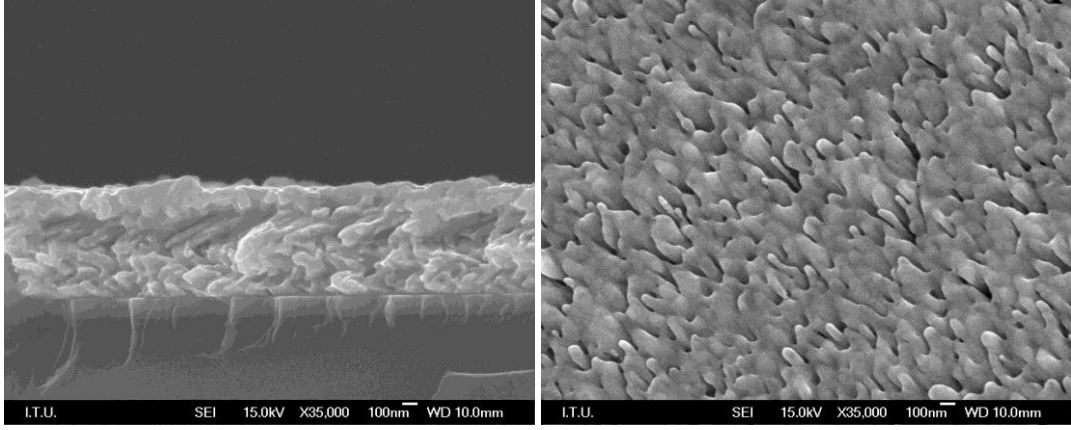
Şekil A5 17 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x20.000) ve yüzey görüntüsü (x 35.000)



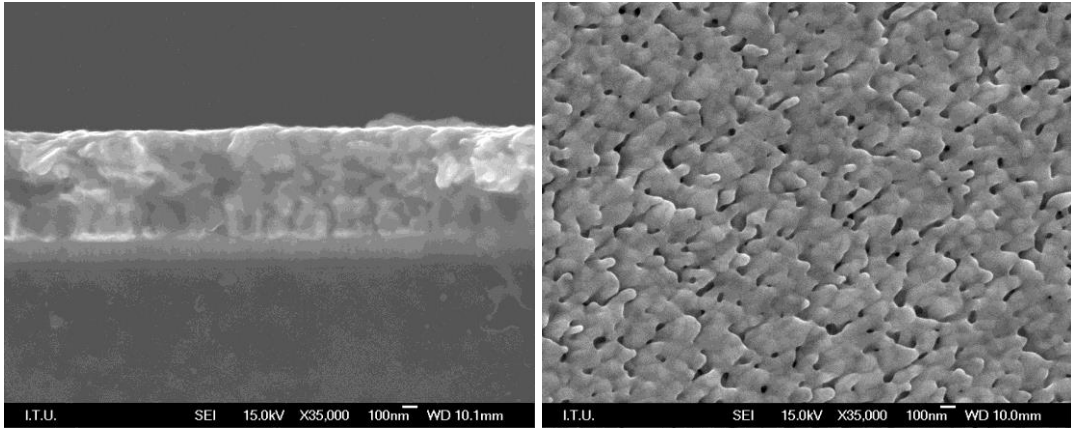
Şekil A6 18 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x30.000) ve yüzey görüntüsü (x 35.000)



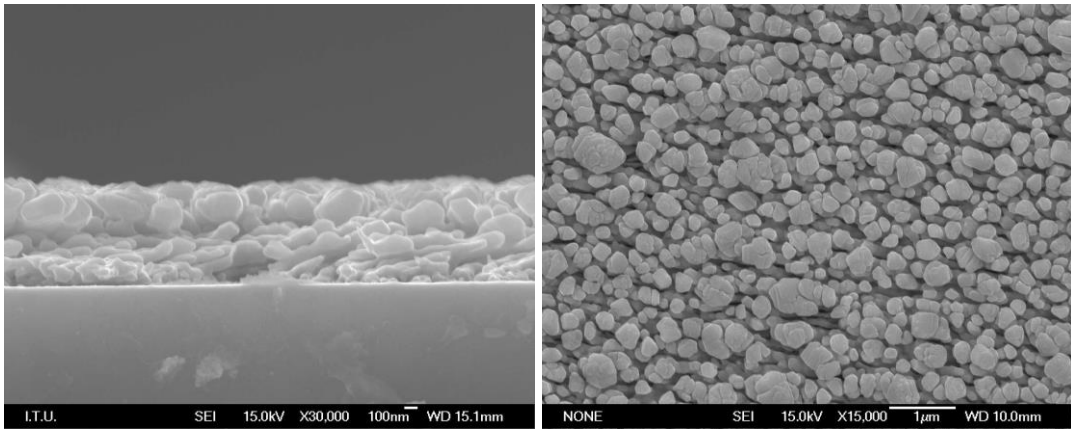
Şekil A7 19 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x30.000) ve yüzey görüntüsü (x 35.000)



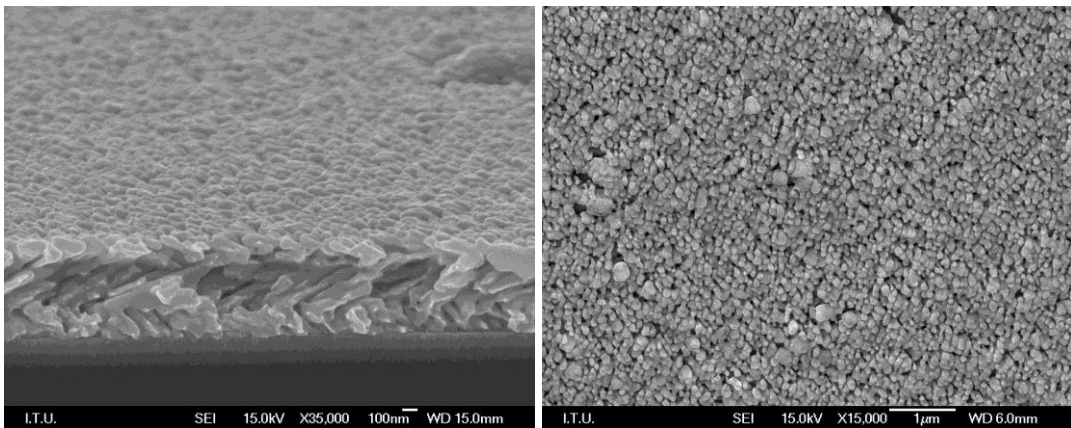
Şekil A 8 12 nolu kaplamanın arakesit ve yüzey görüntüsü (x 35.000)



Şekil A 9 14 nolu kaplamanın arakesit ve yüzey görüntüsü (x 35.000)



Şekil A 10 7 nolu kaplamanın arakesit (x30.000) ve yüzey görüntüsü (x 15.000)



Şekil A 11 10 nolu kaplamanın tilt edilmiş arakesit (x35.000) ve yüzey görüntüsü (x15.000)

Ek B: Tablolar

B 1. Literatürde çalışılan malzeme ve üretim yöntemlerinin sınıflandırılması

Malzeme	Üretim Yöntemi	Ref.
Al, Al ₂ O ₃	Magnetron Sıçratma Yönt.	56
Al, Al ₂ O ₃	Termal Buharlaştırma	56
Bi	e-de meti ile Buharlaştırma	35
CaF ₂	Termal Buharlaştırma	5
CaF ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	24
Co	Termal Buharlaştırma	28
Co	Termal Buharlaştırma	30
Co	e-de meti ile Buharlaştırma	53
Cr	e-de meti ile Buharlaştırma	24
Cr	e-de meti ile Buharlaştırma	55
Cr	Magnetron Sıçratma Yönt.	59
Cr	Magnetron Sıçratma Yönt.	57
Cr	Termal Buharlaştırma	27
Cr	Termal Buharlaştırma	43
Cu	Magnetron Sıçratma Yönt.	56
Cu	Termal Buharlaştırma	30
Cu	Termal Buharlaştırma	43
Fe	e-de meti ile Buharlaştırma	31
MgF ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	24
MgF ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	25
MgF ₂	Termal Buharlaştırma	5
MgF ₂	Termal Buharlaştırma	43
N	e-de meti ile Buharlaştırma	35
Pt	e-de meti ile Buharlaştırma	24
Si	e-de meti ile Buharlaştırma	34
Si	e-de meti ile Buharlaştırma	30
Si	e-de meti ile Buharlaştırma	6

Malzeme	Üretim Yöntemi	Ref.
Si, SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	35
Si	e-de meti ile Buharlaştırma	37
Si	e-de meti ile Buharlaştırma	45
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	9
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	55
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	1
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	3
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	7
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	10
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	13
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	35
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	54
SiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	66
Ta	Magnetron Sıçratma Yönt.	58
Ta ₂ O ₅	e-de meti ile Buharlaştırma	14
Ti	e-de meti ile Buharlaştırma	24
Ti	e-de meti ile Buharlaştırma	55
Ti	e-de meti ile Buharlaştırma	35
Ti	e-de meti ile Buharlaştırma	53
TiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	13
TiO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	52
W	Magnetron Sıçratma Yönt.	23
W	Magnetron Sıçratma Yönt.	44
W	Magnetron Sıçratma Yönt.	60
ZrO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	8
ZrO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	63
ZrO ₂	e-de meti ile Buharlaştırma	52

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf Ahmet ŞENER, 1981 yılında İstanbul – Bakırköy’de doğdu. İlköğrenimini Küçükyalı Merkez İlkokulunda; ortaokulu Kartal Anadolu Lisesinde, lise eğitimi İstanbul Atatürk Fen Lisesi’nde tamamladı. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği bölümünü birincilikle kazandı ve 2003 yılında yine birincilikle mezun olarak Metalurji ve Malzeme Mühendisi ünvanını aldı ve yüksek lisans eğitime başladı. 2003 yılında başladığı İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislikte İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Yüksek Lisans eğitime devam etmektedir.