



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



MİKROAYGIT ÜRETİMİ İÇİN İYON DEMETLİ AŞINDIRMANIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Dilara AYGÜN

Fizik Anabilim Dalı
Genel Fizik Bilim Dalı

İzmir
2024

T.C.

EGE ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

**MİKROAYGIT ÜRETİMİ İÇİN İYON DEMETLİ
AŞINDIRMANIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Dilara AYGÜN

Danışman: Doç. Dr. İlbeyi AVCI

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Tezli Yüksek Lisans Programı

İzmir

2024

Dilara AYGÜN tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan “Mikroaygıt Üretimi İçin İyon Demetli Aşındırmanın Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 04/09/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Doç. Dr. İlbeyi AVCI

Raportör Üye : Doç. Dr. Metin BİLGE

Üye : Doç. Dr. Mustafa ŞEN

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Mikroaygıt Üretimi İçin İyon Demetli Aşındırmanın Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

04/09/2024

Dilara AYGÜN

ÖZET**MİKROAYGIT ÜRETİMİ İÇİN İYON DEMETLİ AŞINDIRMANIN
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

AYGÜN, Dilara

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İlbeyi AVCI

Eylül 2024, 41 Sayfa

Bu tez çalışmasında, mikroaygıt üretimi için ince film kaplaması, fotolitografi ve iyon demetli aşındırma işlemleri (IBE) yapılmış ve elde edilen aygıtların aşındırma morfolojisi AFM ile incelenmiştir. Yapılan aşındırma çalışmaları hem direkt olarak cam altlıklara, hem de bu altlıklar üzerine kaplanmış olan ITO ince filmlere uygulanmıştır. Kalınlığı optimize edildikten sonra 200 nm kalınlığında ITO (indiyum kalay oksit) ince filmler RF magnetron püskürtme ile kaplanmış ve bu filmler üzerinde 10-100 µm aralığında değişen genişliklerde aygıt yapılarının desenlenebilmesi için standart UV fotolitografi işlemleri yapılmıştır. Hem cam hem de ince filmler üzerine aktarılan desenler Ar+ iyon demeti ile 90⁰, 60⁰ ve 45⁰ açılarla aşındırılmış, böylece istenilen kenar eğimlerine sahip yapılar (özellikle de basamaklı yapılar) elde edilmiştir. Bu yapılar çok katmanlı aygıt üretimi için önemli olup, ince filmlerin katman bütünlüğü bozulmadan daha ince yapılabilmesi, üstün kontak özelliklerine sahip olması ve dolayısıyla daha performanslı aygıtlar elde edilebilmesini sağlayacak niteliktedir. Aygıt yapılarının ince filmler üzerine desenlenmesi esnasında kullanılan ıslak veya kuru aşındırma yöntemlerine etkili bir alternatif olarak IBE yönteminin kullanımı, proses detayları, parametreleri ve elde edilen yapının özellikleri bu tez kapsamında detaylı şekilde incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: İnce filmler, İyon demetli aşındırma, Mikroaygıt, Magnetron püskürtme, Fotolitografi.

ABSTRACT**INVESTIGATION OF ION BEAM ETCHING FOR MICRODEVICE
FABRICATION**

AYGÜN, Dilara

M.Sc. in Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlbeyi AVCI

September 2024, 41 Pages

In this thesis, thin film deposition, photolithography and ion beam etching (IBE) processes were performed for the fabrication of microdevices and the etching morphologies of obtained devices were investigated by AFM. The etching studies were applied both directly on glass substrates and on ITO thin films deposited on these substrates. With the optimized thickness properties, 200 nm thick ITO (indium tin oxide) thin films were deposited on glass substrates by RF magnetron sputtering and standard UV photolithography were performed to pattern various device structures (10-100 μm wide). The patterns transferred on both glass and thin film samples were etched with Ar^+ ion beam at 90° , 60° and 45° angles to obtain step-like structures with desired sidewalls. These structures are important for the fabrication of multilayer devices, enabling the deposition of thinner layers without sidewall coating problems, having superior contact properties with the underlayer and thus enabling the higher performances. The advantages of using the IBE method as an effective alternative to wet or reactive dry etching methods during the patterning of the devices, process details, parameters and properties of the obtained structures have been explained in detail throughout the thesis.

Keywords: Thin films, Ion beam etching, Microdevice, Magnetron sputtering, Photolithography.

ÖNSÖZ

Mikroaygıtların üretimi esnasında, üretim teknolojisine bağılı olarak direkt olarak altlık üzerinde veya bu altlıklar üzerine kaplanmış olan ince film katmanları üzerinde yapılan desenleme ve aşındırma işlemlerinin etrafında bulunan diğler yapılarla zarar vermeden veya alt katmanında bulunan filmi etkilemeden kontrollü biçimde yapılması gerekmektedir. İyon demetli aşındırma parametreleri ve aşındırma yönü bakımından daha kontrollü olması ve anizotropik aşındırma yeteneğı sebebiyle aygıt üretiminde daha keskin ve hatasız şekillerin ve açılı kenarların oluşturulmasına olanak sağlar. Bu anlamıyla bu teknik mikro-nano aygıt üretim teknolojisinde yoğun şekilde kullanılmakta olup, bu tez kapsamında elde edilecek optimize parametrelerle bu alana katkı sağlamaya çalışmak ana motivasyon kaynağıdır. Bu Yüksek Lisans Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümünde bulunan Kuantum Aygıt Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların yürütülebilmesi için gerekli olan olanaklar bursiyer olarak yer aldığım 121F139 nolu TÜBİTAK proje desteğı ile sağlanmıştır.

İZMİR

04/09/2024

Dilara AYGÜN

İÇİNDEKİLERSayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	iii
EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	iii
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ	xii
İÇİNDEKİLER	xiv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
TABLolar DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ(devamı)	xxi
1. GİRİŞ	1
2. MİKRO AYGIT ÜRETİMİ	4
2.1 İnce Film Üretimi.....	6
2.1.1 Magnetron püskürtme tekniği.....	7
2.2 Fotolitografi ve Desenleme	8
.....	10
2.3 Aşındırma.....	11
2.3.1 Kimyasal yöntemle aşındırma (Islak aşındırma)	11

2.3.2 İyonlarla aşındırma (kuru aşındırma)	12
3. İYON DEMETLİ AŞINDIRMA (IBE)	16
3.1 Aşındırma Tekniği	16
3.2 Sistem Teknolojisi	16
3.3 Aşındırma Parametreleri	18
4. DENEYSEL YÖNTEMLER	22
4.1 Altlık Hazırlığı	22
4.2 İnce Film Üretimi	23
4.3 Fotolitografi ve Desenleme	24
4.4 Aşındırma	26
4.5 Morfolojik Analizler	27
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
6. SONUÇ	36
KAYNAKLAR DİZİNİ	38
TEŞEKKÜR	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

Şekil 2. 1. RF magnetron püskürtme sisteminin şematik gösterimi	8
Şekil 2. 2. Fotolitografi ve desenleme aşamalarının adımlarının şematik gösterimi	10
Şekil 2. 3. Aşındırma süreçleri olan izotropik ve anizotropik aşındırmanın olası sonuçları	11
Şekil 2. 4. Reaktif iyon aşındırma ile silikon yüzeyin aşındırma süreci.....	14
Şekil 3. 1. Kullanılan IBE sistemi ve bu sisteme takılı olan Kaufman KDC 10 gripli DC tip iyon kaynağı.....	17
Şekil 3. 2. IBE tekniği ile aşındırılan malzemenin iyon kaynağına göre 0° ve 45° aşındırma açısının gösterimi.....	21
Şekil 4. 1. Bu çalışmada kullanılan RF Magnetron püskürtme sistemi.....	23
Şekil 4. 2. Bu çalışmada kullanılan döndürerek kaplama sistemi (sol) ve hot plate (sağ)	25
Şekil 4. 3. Tez çalışmasında kullanılan optik mikroskop ve UV fotolitografi sistemleri .	26
Şekil 4. 4. NanoMagnetics Instruments'ın ezAFM sistemi.....	28
Şekil 5. 1. IBE kullanılarak aşındırılan ITO filmin optik mikroskop altındaki görüntüsü	30
Şekil 5. 2. a) 0°C eğim açısında AFM'nin tarayacağı alanın yukarıdan görüntüsü. b) 0°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın yükselti farklarını grafiksel gösterimi c) 0°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın 3 boyutlu gösterimi	31
Şekil 5. 3. a) 30°C eğim açısında AFM'nin tarayacağı alanın yukarıdan görüntüsü. b) 30°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın yükselti farklarını grafiksel gösterimi c) 30°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın 3 boyutlu gösterimi	32
Şekil 5. 4. a) 45°C eğim açısında AFM'nin tarayacağı alanın yukarıdan görüntüsü. b) 45°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın yükselti farklarını grafiksel gösterimi c) 45°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın 3 boyutlu gösterimi	33
Şekil 5. 5. IBE için ITO'nun eğim açısına göre aşınma oranları	34
Şekil 5. 6. Başarısız bir IBE sürecinin 3 boyutlu gösterimi	34
Şekil 5. 7. IBE için camın eğim açısına göre aşınma oranları.....	35



TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 5. 1. ITO ince filmlerin üretim koşulları.....	31
Tablo 5. 2. IBE için 0-30-45°C'lerde ITO aşındırma proses parametreleri	33
Tablo 5. 3. Cam için 0-30-45°C'lerde ITO aşındırma proses parametreleri	35





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
V	Voltaj
Ar ⁺	Argon iyonu
Nm	Nanometre
μm	Mikrometre
<u>Kısaltmalar</u>	
DC	Doğru Akım
RF	Radyo Frekansı
ITO	İndiyum Çinko Oksit
TFT	İnce Film Transistör
UV	Ultraviyole
DUV	Derin Ultraviyole
EUV	Aşırı Ultraviyole
RIE	Reaktif İyon Aşındırma
IBE	İyon Demetli Aşındırma
FIB	Odaklanmış İyon Demeti
MEMS	Mikro-Elektromekanik Sistemler
NEMS	Nano-Elektromekanik Sistemler

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ(devamı)

JJ	Josephson Eklemleri
LoC	Lab-on-a-Chip
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
STM	Taramalı Tünel Mikroskobu
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
LPD	Sıvı Faz Biriktirme
LPCVD	Düşük Basıncı Kimyasal Buhar Biriktirme
APCVD	Atmosferik Basıncı Kimyasal Buhar Biriktirme
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme



1. GİRİŞ

Mikroaygıt teknolojisi belirli özelliklerde kristal veya amorf yapıda altlık, bu altlıklar üzerine kaplanan çok katmanlı ince filmler ve bu filmlerin çeşitli geometrilerde şekillendirilmesi işlemlerini kapsayan mikrometre boyutlarındaki ayıtların tasarım ve üretimini kapsayan bir alandır. Bu teknoloji ile elde edilmesi planlanan aygıtlar veya mikro/nano yapılar, ya üzerinde belirli geometrik yapıların şekillendirildiği altlıklar ya da düz altlıklar üzerine çok katmanlı ince filmlerle yapılmaktadır (Acosta, 2021). Bu katmanlı film yapıları aygıtların türüne göre birçok noktada birbirinden izole edilerek üretilmektedir. Bu yapılar temel olarak “litografi ve aşındırma” süreçlerini kapsamakta olup mikro/nano aygıt üretimi başlığı altında incelenmektedir.

Altlıklar veya film katmanları üzerinde yapılacak aygıtın türüne göre önce desenleme (litografi) işlemine ardından aşındırmaya tabii tutulur (etching). Aygıtın yapısının gerektirdiği miktar ve ölçüde bu işlemler ardışık şekilde tekrarlanır. Litografi işlemleri genel olarak UV fotolitografi işlemi olup bu işin detayları ilerleyen bölümlerde verilecektir. Aşındırma işlemi ise ıslak (kimyasal) ve kuru (fiziksel) aşındırma olmak üzere iki ana başlık altında kategorize edilmektedir. Islak aşındırma belirli özelliklerde ve aşındırılacak malzemenin yapısına uygun kimyasal solüsyonlarla yapılan işlemdir. Bu işlemde çok katmanlı ince filmlerden oluşan numune belirli bir kimyasal solüsyona daldırılır ve bu solüsyon, numune yüzeyindeki katmanın fotolitografi ile belirlenen gerekli bölümlerini aşındırır. Aşındırılması istenen farklı malzemeler için uygun kimyasal solüsyonlar kullanılır. Örneğin, alüminyum için alüminyum aşındırıcı (Al etcher), ITO için belirli oranlarda $H_2O + HCl + HNO_3$ çözeltisi kullanılırken, silikon (Si) için KOH, SiO_2 için hidroflorik asit (HF) kullanılır.

Kullanılan kimyasalın türü, malzemenin yapısına ve aşındırma işlemi sırasında istenen sonuca bağlı olarak seçilir ve optimum aşındırma belirli sıcaklıklarda yapılır. Fakat bu işlemin kontrolü kolay değildir. Islak aşındırma işlemi bazı özel durumlar haricinde izotropiktir ve kontrolü de zor olduğu için birçok uygulamada tercih edilmemektedir. Bu yöntemde, kimyasal solüsyonun izotropik aşındırması sonucu malzeme her yönden aşındırıldığı için hassas ve karmaşık geometrilere sahip yapıların mikrofabrikasyonu süreçlerinde ciddi

sorunlara yol açabilir. Özellikle de çok katmanlı yapılarda, alttaki filmlerin zarar görme riski yüksektir. Dolayısıyla hassas aygıtların yapımında güvenli olduğu belirlenen spesifik bazı adımlar dışında tercih edilmemektedir.

Bu gibi hassas işlemlerin yapılabilmesi için tercih edilecek bir diğer aşındırma yöntemi de kuru aşındırma bir başka deyişle fiziksel aşındırma yöntemidir. Bu aşındırma da aşındırılacak olan malzemenin yapısına göre lazer aşındırma (lazer ablation), elektron demetli aşındırma (e-beam writing), reaktif iyon aşındırması (RIE) veya yönlendirilmiş argon iyonları kullanılan iyon demeti aşındırması (IBE) yöntemleri kullanılmaktadır. Bunların yanında hızlandırılmış iyonların çok küçük (nano boyutta) alanlara odaklanması ile yapılan aşındırma işlemi de odaklanmış iyon aşındırmasıdır (FIB) ve çok küçük şekillerin yapımı için kullanıldığından mikroaygıt yapımına uygun değildir. Mikroaygıt yapımında en yaygın aşındırma tekniği reaktif iyon aşındırmasıdır (RIE). Bu işlemde aşındırılacak olan malzemenin yapısına uygun iyonlar seçilerek (SF_6 , CF_4 , Cl_2 , CHF_3 vb.) aşındırma işlemi yapılır. Örneğin, silikon aşındırmada SF_6 , Al aşındırmada Cl_2 ve BCl_3 , Nb aşındırmasında ise CF_4 yaygın olarak kullanılır. Bu gazlar, radyo frekansıyla (RF) plazma ortamında iyonlaştırıldığında, malzemenin yüzeyi ile kimyasal reaksiyona girerek kontrollü bir aşındırma işlemi sağlamaktadır. Bu yöntem, yüksek hassasiyet ve anizotropik aşındırma yetenekleri ile mikroelektronik cihazların üretiminde önemli bir rol oynamaktadır ve oldukça etkilidir.

Ancak bazı malzemelere uygun reaktif gaz olmadığından bu yöntemle kontrollü şekilde her malzemeyi aşındıramamaktayız. Dolayısıyla bu yönteme alternatif veya tamamlayıcı olarak Ar^+ iyonlarını belirli bir alana yönlendirerek iyon demeti aşındırması da (IBE) yapılmaktadır. Bu işlemde iyonları aşındırılacak olan malzeme yüzeyine yönlendirirken, iyonların hızı, enerjisi, yoğunluğu (cm^2 başına alandaki yoğunluk), iyon demetinin malzeme yüzeyine düşme açısı, ortamdaki vakum seviyesi, malzemenin yüzey sıcaklığı gibi parametreleri ayarlayarak hemen hemen her türlü malzemeyi (seramik, cam, metal, yarıiletken, polimer vb.) aşındırmak mümkün olmaktadır. IBE anizotropik aşındırma yaptığı için malzeme yüzeyine yönlendirilen iyonların geliş açıları ayarlanarak istenilen kenar eğimine sahip mikro yapılar elde edilebilmektedir. Bu durum ilerleyen

bölümlerde açıkladığı üzere özellikle çok katmanlı aygıt üretiminde oldukça etkili performans artışı sağlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, cam altlık üzerine magnetron püskürtme yöntemi ile ITO ince filmler kaplanıp standart fotolitografi ve iyon demeti aşındırmasıyla şekillendirilmiştir. Yapılan bu aşındırma işlemlerinde elde edilen yapılar özellikle ince film transistörlerinde kullanılan (TFT) source-drain ve gate elektrotları olarak bu tezin kapsamı dışındaki başka bir çalışmada test edilmiştir. Elde edilen yapının açılı şekilde aşındırılabilmesi, üzerine kaplanan diğer ince film diğer katmanları için mükemmel bir alt geometri oluşturmaktadır. Aygıt geliştirme süreçlerinin tamamını kapsayacak şekilde, ince film üretimi, UV fotolitografi işlemleri ve Ar⁺ IBE yöntemi etkili şekilde kullanılmış olup, işlemlerin detayları tez içerisinde ilgili bölümler altında verilmiştir.

2. MİKRO AYGIT ÜRETİMİ

Mikro aygıtlar yapılarında bulunan en küçük bileşenlerin boyutları mikrometre ve daha küçük ölçeklerde olan aygıtlardır. Mikroaygıt üretimi için uygulanan üretim prosesi aygıtın yapısına, en küçük bileşenin boyutlarına ve kullanılan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Bu proses temel olarak altlık hazırlama, ince film kaplama, litografi ve aşındırma gibi ayrı aşamalardan oluşmaktadır. Altlık hazırlama işlemi ve film üretim yöntemi ince film üretim prosesinin aşamaları olduğundan bu kısım ince film üretimi başlığı altında değerlendirilir. Dolayısıyla bu işlem, film üretimi, litografi ve aşındırma olmak üzere üç ana başlıkta verilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan mikro-yapılar, laboratuvarında başka bir çalışmada yapılan ince film transistörlerde (TFT) kullanılan ITO source-drain ve gate elektrotları olarak test edilmiştir. Üretim aşamalarında kullanılan yöntemler genel hatlarıyla bu bölümde verilmektedir. Aygıtlar transparan yapıda olduğundan cam altlıklar üzerinde iletken elektrot katmanları olarak ITO ince filmler kullanılmıştır. Bu filmler üzerinde işlem sırasına göre fotolitografi işlemleri ve iyon demetli aşındırma (IBE) yapılmıştır. Bu adımların detayları bu bölümde açıklanmaktadır.

Yapılan çalışmanın ağırlıklı kısmı IBE olarak öne çıkmakta olup, genel olarak mikroaygıt üretiminde bu yöntemin önemi çok büyüktür. Öyle ki, mikro-elektromekanik sistemler (MEMS), nano-elektromekanik sistemler (NEMS), lab-on-a-chip (LoC) sistemleri, Josephson eklemleri (JJ) ve mikro-nano ölçekli akustik/optik sensörler gibi birçok aygıtın üretiminde etkili şekilde kullanılmaktadır. Örneğin, mikro aynalar, mikro dişliler, AFM/STM uçları, mikro akışkan kanalları ve mikro pompa vb. üretiminde iyon demetli aşındırma ile yüksek doğruluk ve keskinlikte geometrik yapılar elde edilir. Bu, yukarıda verilen MEMS vb. cihazların performansını artırır ve güvenilirliklerini sağlar. Aynı şekilde iyon demetli aşındırma, nano ölçekli yapıların ve cihazların yüzeyinde atomik düzeyde hassasiyet sağlayarak, karbon nanotüpler ve grafen gibi nano malzemelerin işlenmesini mümkün kılar. NEMS cihazlarının yüksek hassasiyetli sensörler, nano osilatörler ve moleküler motorlar gibi uygulamalarda kullanılabilmesi için iyon demetli aşındırma tekniği gereklidir.

Literatürde İBE yöntemiyle yapılmış olan mikro/nano aygıtlara birkaç örnek vermek gerekirse; mikro-elektromekanik sistem (MEMS) jiroskoplarının üretiminde iyon demetli aşındırma teknolojisinin kullanımını araştırılmıştır [Ge ark., 2022]. İyon demetli aşındırma, jiroskopun hareketli parçalarının ve hassas mikro yapıların üretiminde yüksek doğruluk ve yüzey kalitesi sağlamak için kullanılmıştır. NEMS cihazlarının karbon nanotüpler kullanılarak üretimi ve iyon demetli aşındırma teknolojisiyle nanometre ölçeğinde yapıların oluşturulması incelenmiştir (Li et al., 2021). İyon demetli aşındırma, yüksek hassasiyet gerektiren nano osilatörlerin ve sensörlerin üretiminde kullanılmıştır.

Lab on a Chip (LoC) sistemleri, laboratuvar işlevlerini mikro ölçekte gerçekleştiren cihazlardır. İyon demetli aşındırma, bu mikro akışkan sistemlerin kanalları, odaları ve diğer mikro yapılarının hassas bir şekilde oluşturulmasında kullanılır. Bu teknik, mikro kanalların ve valflerin doğru boyutlandırılmasını ve hizalanmasını sağlar, böylece sıvıların mikro ölçekli manipülasyonu mümkün olur. Bu, biyolojik ve kimyasal analizlerin hızlı ve etkin bir şekilde yapılmasını sağlar, tıbbi teşhis ve çevresel izleme uygulamalarında kullanılır. Bu çalışmada, mikro akışkan sistemler için kanalların ve valflerin hassas bir şekilde oluşturulmasında İBE kullanılmıştır. Bu teknik, biyolojik ve kimyasal analizlerin yapılmasını sağlayan Lab on a Chip cihazlarının üretiminde yüksek doğruluk sağlamıştır (Atkinson et al., 2023)

Josephson Eklemleri (JJ) süperiletken elektronığının temel bileşenidir. Bu aygıtların step-edge Josephson eklemi adı verilen çeşidinin üretiminde iyon demetli aşındırma önemli bir tekniktir (Kim and Lee, 2022). Bu yöntem, üzerinde süperiletken ince filmin kaplanacağı kristal altlıkların film kaplanmasından önce hassas bir şekilde aşındırılarak belirli kenar açılara ve nanometre ölçeğinde derinliklere sahip basamaklı yapıların üretilebilmesini sağlar. Böylece bu basamaklı kristal altlıklar üzerinde yüksek sıcaklık süperiletken ince filmler kaplanıp, birkaç mikron genişliğinde hatlar olarak desenlenmesiyle grain-boundary Josephson eklemleri oluşturulmuş olur (Cho et al., 2018).

Mikro/nano ölçekli akustik-optik sensörler, ses ve ışık dalgalarını algılayarak çevresel değişiklikleri ölçen cihazlardır. İyon demetli aşındırma, bu sensörlerin yüzey paternlerinin ve mikro yapılarının oluşturulmasında kullanılır. Bu işlemler,

sensörlerin hassasiyetini ve performansını artıran düzgün ve kontrollü yüzeyler sağlar. Akustik optik sensörlerin minyatürleştirilmesi ve entegre edilmesi için bu tür hassas imalat teknikleri gereklidir, bu da tıbbi görüntüleme, güvenlik ve çevresel izleme gibi çeşitli uygulamalarda kullanımlarını mümkün kılar. Mikro ve nano ölçekli akustik optik sensörlerin üretiminde iyon demetli aşındırma teknolojisinin kullanımı incelenmiştir. İyon demetli aşındırma, sensörlerin yüzey paternlerinin ve mikro yapıların oluşturulmasında yüksek hassasiyet ve performans sağlamıştır (Laszcz et al., 2014).

Bunun yanı sıra LED'ler (ışık yayan diyotlar), TFT'ler (ince film transistörler), sensörler vb. çok katmanlı çeşitli mikroelektronik aygıt üretiminde de IBE yöntemi etkili biçimde kullanılabilir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar örneğin ince film transistör (TFT) üretiminde kullanılan yalıtkan katmanın (gate dielektriği) gate elektrot katmanlarının üzerine kaplanması esnasında katmanlı yapılardaki kenar-kaplama problemine etkili bir çözüm olmaktadır (Fortunato et al., 2012). Açılı şekilde aşındırılan yapılar üzerine sputter ile film kaplanması daha efektif olmakta ve dolayısıyla çok daha ince filmler kaplanabilmektedir. Bu da aygıtların elektriksel parametrelerini etkilemektedir.

2.1 İnce Film Üretimi

İnce filmler, çeşitli üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atom veya moleküllerinin bir altlık üzerine biriktirilmesiyle oluşturulan, genellikle kalınlıkları 1 mikrometrenin altında olan kaplamalardır. İnce film üretimi, yüksek hassasiyet gerektiren aşamalardan geçmektedir. İlk aşama, ince filmin kaplanacağı altlığın hazırlanması yani temizlenmesidir. Altlığın yüzeyindeki kir, yağ ve oksit tabakaları gibi istenmeyen yabancı maddelerin giderilmesi, ince filmin kalitesi ve yapışma gücü için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, özel kimyasallarla, ultrasonik banyo ortamında ya da yüzeydeki organik ve inorganik kirleticileri temizleyen plazma ortamında gerçekleştirilen detaylı bir temizlik işlemiyle ince film üretim süreci başlar.

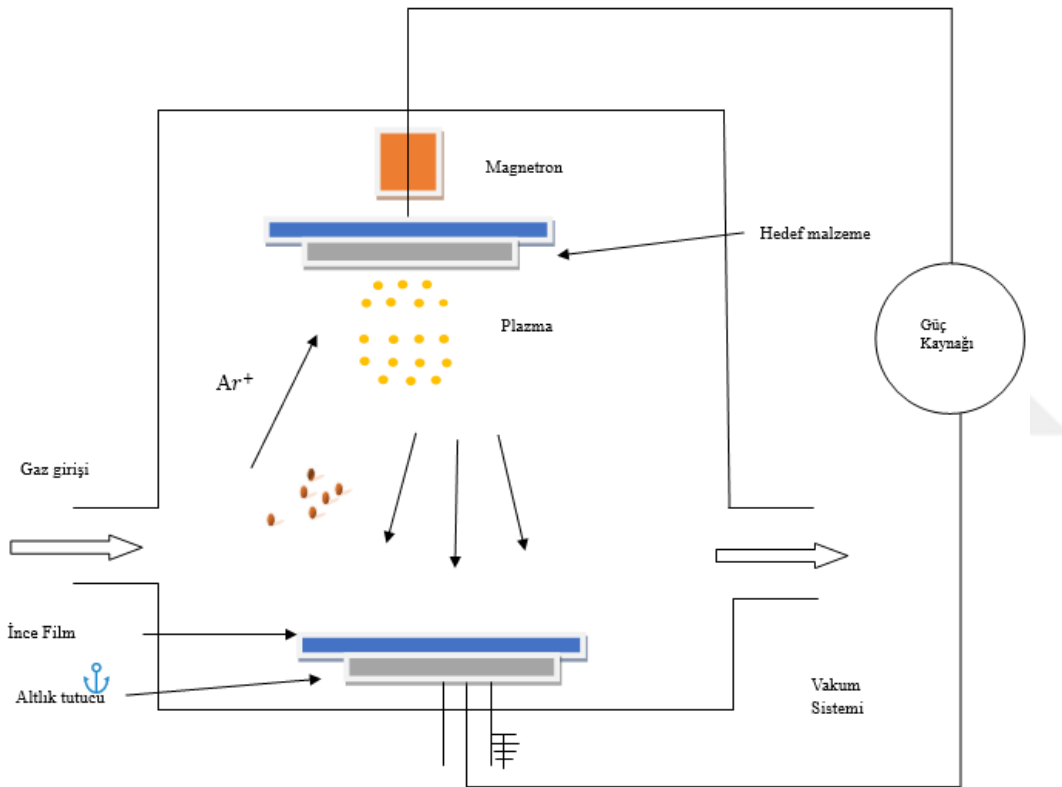
İnce film üretimi fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve sıvı faz biriktirme (LPD) olarak üç ayrı yöntemle yapılmaktadır. LPD

yöntemi, sıvı çözeltiler kullanılarak malzemenin altlık üzerine biriktirilmesidir. LPD yönteminin üretim teknikleri sol-jel ve döndürerek kaplama (spin-coat) teknikleridir. CVD yöntemi ise malzemenin gaz fazından kimyasal reaksiyonlar ile altlık üzerine biriktirilmesidir. CVD farklı üretim gereksinimlerine göre atmosferik basınç kimyasal buhar biriktirme (APCVD), düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) ve plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) gibi tekniklerle uygulanabilir (Chang et al., 2001). Son olarak PVD yöntemi ile de katı malzemelerin buharlaştırılıp bir altlık üzerinde biriktirilmesiyle ince film tabakasının oluşturulması sağlanmaktadır. Bu teknik ile yapılan filmler farklı buharlaştırma mekanizmalarına göre sınıflandırılmıştır. Termal buharlaştırma, elektron demeti buharlaşması, darbeli lazer biriktirme ve magnetron püskürtme teknikleri PVD yöntemiyle ince film üretim teknikleri arasında yer almaktadır. Bu yöntemlere göre ince filmlerin elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri değişkenlik göstermektedir. Her bir yöntem uygulama alanlarına ve hedeflenen malzemenin özelliklerine göre seçilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan ince filmler magnetron püskürtme yöntemi ile yapılmıştır.

2.1.1 Magnetron püskürtme tekniği

İnce filmlerin üretiminde kullanılan magnetron püskürtme sistemi kaplanılan malzemenin iletkenlik özelliklerine göre RF veya DC olabilmektedir. Bu tezde kullanılan ITO ince filmlerin yapımı için RF magnetron püskürtme yöntemi kullanılmıştır. Püskürtme tekniğinde kaplanması istenen malzeme bir hedef malzeme olarak katot kısmına yerleştirilir. Önceden vakuma alınmış olan ortama belirli bir basınca ulaşıncaya kadar Ar gazı gönderilir ve bu Ar atomları iyonlaştırılarak Ar⁺ iyonlarından oluşan bir plazma ortamı elde edilir. Bu plazmada yer alan iyonlar anot ile katot arasına uygulanan potansiyel farkına bağlı olarak oluşan elektrik alan tarafından hızlandırılır ve hedef malzemeye çarparak bu hedeften atomik veya moleküler boyutta parçalar kopartılması sağlanır. Bu püsküren malzeme altlık üzerinde ince film olarak birikir ve zamana bağlı olarak istenilen kalınlığa ulaşır. Planlanan film özelliklerine ve kaplama hızına göre ortamın basıncı 1-50 mtorr aralığında ve uygulanan güç ise 20-100 Watt aralığındadır.

Şekil 2.1’de magnetron püskürtme sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. DC magnetron püskürtme sisteminde iletken malzemelerin kaplaması yapılmakta ve anot-katot arasına uygulanan güç doğru akım (DC) iken, RF sisteminde yalıtkan ve iletken her türlü malzeme kaplanabilmekte olup radyo frekansında (RF) güç uygulanır. Magnetron başlığında kullanılan mıknatıs sistemi ile de püskürtme esnasında oluşan ikincil elektronlar manyetik alan tarafından hedef malzeme (katot) bölgesinde yoğunlaştırılmakta ve böylece Ar atomlarının iyonlaşması sürecinde plazma yoğunluğunun, dolayısıyla da püskürtme performansının artması sağlanmaktadır.



Şekil 2. 1. RF magnetron püskürtme sisteminin şematik gösterimi

2.2 Fotolitografi ve Desenleme

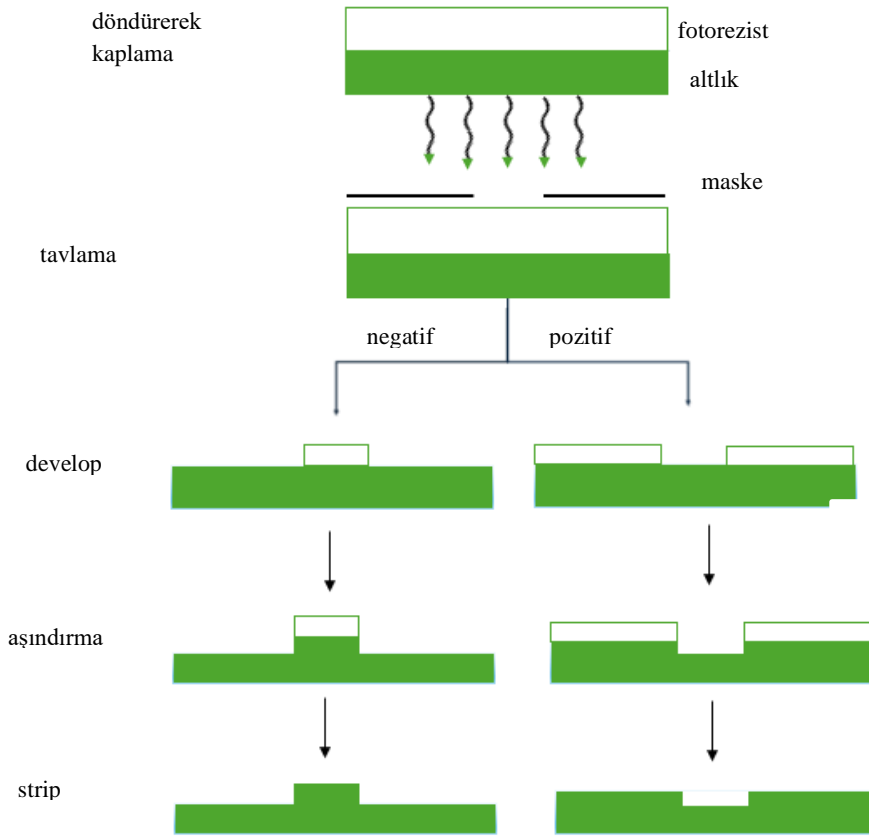
Fotolitografi, tasarlanmış olan belirli bir şeklin bir maske kullanarak fotorezist malzeme üzerine aktarılması yöntemidir. Bu işlem sırasında, öncelikle şeklin üzerine aktarılması istenen numune (ince film örneği) fotorezist malzemeyle kaplanır. Bu fotorezist malzeme (yaklaşık 1 mikrometre kalınlığında film) genel

olarak mikroelektronik teknolojisinde kullanılan ve UV ışığa duyarlı bir malzemedir. UV kaynağından gelen ışık bir krom maskeden geçerek maske üzerindeki desenleri fotorezist filmin üzerine yansıtır ve daha sonra bu fotorezist film developer adı verilen bir solüsyonla banyo ettirilerek türüne göre (pozitif veya negatif rezist) ışık gören veya ışıktan korunan bölgelerin çözünerek maske üzerindeki şeklin aynısının oluşması sağlanır. Fotolitografi işleminde kullanılan ışık kaynağı, kullanılan fotorezist malzemenin türüne bağlı olarak UV (ultraviyole), DUV (derin ultraviyole) veya EUV (aşırı ultraviyole) olarak sınıflandırılır.

Mikron boyutlu aygıt desenlenmesinde genellikle 365 nm UV ışık kaynağı kullanılır. DUV litografisi için kullanılan fotorezist standart fotorezistlerden farklı olup 192 nm'lik UV kaynağı kullanılmaktadır. Son yıllarda EUV teknolojisi geliştirilmiş olup burada kullanılan özel UV kaynağının dalga boyu ise 13.5 nm'dir. Bu dalga boyunda üretilen ışınlar, son derece küçük ve karmaşık bir desenin oluşturulması için kullanılır. Her bir ışık kaynağı dalga boyu, desen boyutlarını ve ayrıntıları doğrudan etkileyebilir. UV ışık kaynakları daha büyük desenler için uygundur, DUV ışık kaynakları ise daha küçük desenler için tercih edilir. EUV ise yon yıllarda yapılmakta olan modern çiplerin yapımında ve nanometre ölçeğindeki aygıtların üretiminde kullanılan gelişmiş bir yöntemdir.

İnce film desenleme işleminde, kaplanan filmde istenilen deseni elde edebilmek amacıyla bir bölüm aşındırılırken bir bölüm ise korunur ve istenilen desen elde edilir. Film yüzeyini aşındırma işlemleri sırasında koruyabilmek için fotorezist kullanılır. Fotorezist UV ışık kaynağına duyarlı bir malzemedir. Fotorezist spin coater (döndürerek kaplama) sistemi kullanılarak film yüzeyine kaplanır. Kullanılan fotorezistin türüne ve döndürme hızına göre kalınlık parametreleri değişiklik gösterir. Burada önemli olan kısım ise düzgün ve her alanda eşit bir kaplama yapmaktır. Spin coater ile istenilen kalınlıkta fotorezist kaplama işleminden sonra fotorezistin yüzeye yapışması için hafif tavlama (soft-bake) işlemine maruz bırakılır. Bu işlem yine kullanılan fotorezist türüne göre fakat çoğunlukla 90-120 °C ve 50-90 sn gibi belirli parametrelerde uygulanır. Hafif tavlama işleminden sonra istenilen deseni elde etmek amacıyla tüm mikro aygıt üretici süreci içinde en kritik adımlardan biri olan maske hizalayıcı kullanılarak istenilen desendeki maske belirli bir süre UV ışık kaynağına maruz

bırakılır. UV ışık kaynağı maskenin olmadığı yerdeki fotorezist yüzeyi ile etkileşime girmektedir. Burada kritik olan ise UV ışığa ne kadar maruz kaldığıdır. Az ya da çok maruz kalması kullanılan fotorezist yapısının değişmesine sebep olur. UV ışığına maruz kalan ve etkileşime giren fotorezist yapısının değişime uğramasıyla developer adı verilen solüsyon yoluyla yüzeyden ayrılması sağlanır. Developer sayesinde film yüzeyinde istenilen desende fotorezist kalmış olur. Bu fotorezist katman artık bir maske olarak kullanılacaktır.



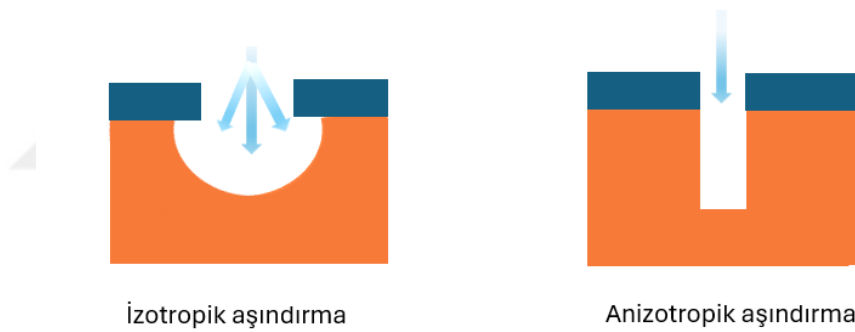
Şekil 2. 2. Fotolitografi ve desenleme aşamalarının adımlarının şematik gösterimi

Bu maske gerekli aşındırma işlemlerinde kullanılabilir, ancak çeşitli ıslak veya kuru aşındırma işlemlerinden etkilenmemesi ve daha fazla sertleşerek yapısını koruması amacıyla son bir ısıl işleme tabii tutulur. Bu işleme *hard-bake* denir ve genellikle *hot-plate* üzerinde 90-120 °C ve 90-120 sn bekletildikten sonra aşındırma işlemine hazır hale getirilir.

2.3 Aşındırma

Aşındırma, bir yüzeydeki katmanları çıkarmak için kullanılan bir yöntemdir. Hedef katmanların ortadan kaldırıldığı ve maske katmanı yardımıyla korunduğu bu aşındırma işlemi kimyasal (ıslak) veya kuru aşındırma teknikleri açısından farklılık gösterir. Bu bölümde kimyasal aşındırma, elektronlarla aşındırma ve iyonlarla aşındırma yöntemleri detaylı olarak ele alınacaktır.

Aşındırma hızı, birim zamanda aşındırılan katmanın kalınlığı olup genellikle dakikada nanometre (nm/dak) veya mikrometre ($\mu\text{m}/\text{dak}$) olarak ölçülür. Aşındırma yöntemlerinin iki olası sonucu vardır: izotropik ve anizotropik aşındırma. İzotropik aşındırma, katmanları birçok yönde kaldırırken, bu yöntemin olumsuz yanı, istenmeyen katmanların da kaldırılmasıyla amaçlanmayan boşluklara neden olabilmesidir. Anizotropik aşındırma ise malzemeyi yalnızca ek yönde kaldırır ve izotropik aşındırmaya göre daha hassas bir işlem sunar.



Şekil 2.3. Aşındırma süreçleri olan izotropik ve anizotropik aşındırmanın olası sonuçları

2.3.1 Kimyasal yöntemle aşındırma (Islak aşındırma)

Bu teknik, kimyasal solüsyonlar (asit çözeltileri) kullanılarak malzeme yüzeyinin aşındırılmasını içerir. Bu kimyasallar, malzemeyi çözen ya da önce oksitleyip sonra oksidi çözen bileşiklerden oluşabilir. Aşındırma işlemi, malzemenin kimyasal karışımın bulunduğu kaba daldırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu yöntem, yüksek derecede seçicidir çünkü işlem sırasında elle müdahale edilebilir ve aşınma gözlemlendiğinde malzeme kimyasaldan hemen çıkarılabilir. Genellikle güçlü asitler kullanılır. Bu işlemde çok katmanlı ince filmlerden oluşan

numune belirli bir kimyasal solüsyona daldırılır ve bu solüsyon, numune yüzeyindeki katmanın fotolitografi ile belirlenen gerekli bölümlerini aşındırır. Aşındırılması istenen farklı malzemeler için uygun kimyasal solüsyonlar kullanılır. Örneğin, alüminyum için alüminyum aşındırıcı (Al etcher), ITO için belirli oranlarda $H_2O + HCl + HNO_3$ çözeltisi kullanılırken, silikon (Si) için KOH, SiO_2 için hidroflorik asit (HF) kullanılır. Kullanılan kimyasalın türü, malzemenin yapısına ve aşındırma işlemi sırasında istenen sonuca bağlı olarak seçilir ve optimum aşındırma belirli sıcaklıklarda yapılır. Kimyasal aşındırma genellikle izotropiktir, bu da özellikle kalın filmler aşındırılırken fotorezist tabakasının altına sızarak alttan aşındırmaya neden olur. Ayrıca, kimyasal aşındırma sırasında hat genişliklerini sabit ve tekrarlanabilir şekilde tutmak zordur. Bu nedenlerle de kuru aşındırma yöntemleri geliştirilmiştir. İlerleyen kısımlarda bu yöntemler verilmiştir.

2.3.2 İyonlarla aşındırma (kuru aşındırma)

Kuru aşındırma teknikleri arasında elektron demeti ile malzeme üzerinde direkt olarak şeklin “yazılarak” yapılması (e-beam writing) ve lazer ile yakılarak oluşturulması (laser ablation) gibi yöntemler de devre elemanları ve mikroelektronik cihazların üretiminde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, iyonların çok küçük alanlara odaklanmasıyla yapılan focused iyon beam (FIB) aşındırması da biyoteknoloji ve malzeme bilimi gibi çeşitli alanlarda nanofabrikasyon ve yüzey modifikasyonları için tercih edilen bir yöntemdir. Literatürde, bu teknolojilerin gelişimi ve uygulamaları üzerine yapılan araştırmalar, elektron demeti, lazer aşındırması ve FIB tekniklerinin bilimsel ve endüstriyel potansiyelini sürekli olarak artırmaktadır. Spot genişliğinin hassas olarak ayarlanabilmesi, bu teknolojilerin farklı uygulamalarda geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmasını sağlamaktadır. Ancak, hem geniş yüzeylerde çok fazla geometrinin bulunduğu desenlerin oluşturulmasında hem de modern mikro-nano çiplerin yapımında efektif olarak kullanılmadığından daha çok araştırma-geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan en yaygın kuru aşındırma yöntemi iyon aşındırması olup, reaktif iyon aşındırma (RIE) veya iyon

demeti aşındırma (IBE) olarak adlandırılmaktadır. Takip eden bölüm içerisinde bu tür iyon aşındırma yöntemleri ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

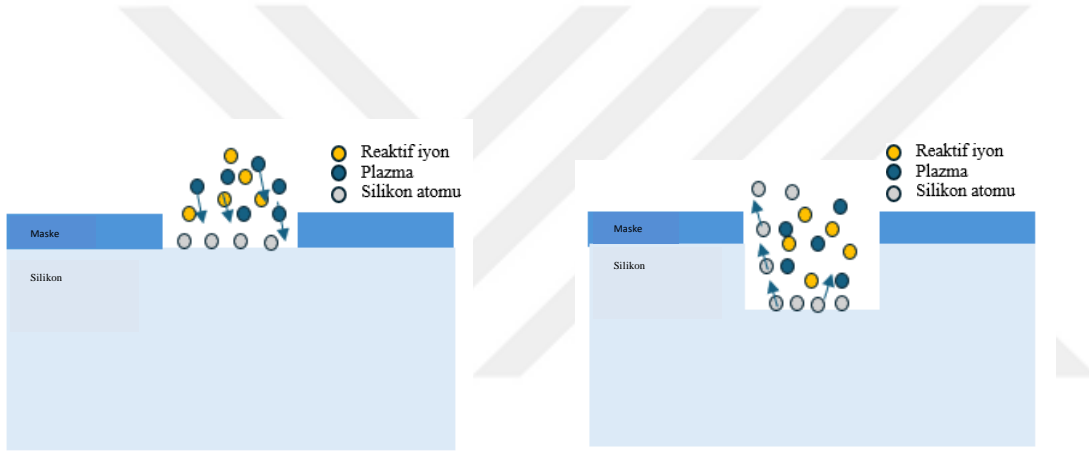
İyonlarla aşındırma, plazma veya reaktif gazlar yoluyla yüksek enerjili iyonlar kullanılarak yüzeyden malzeme kaldırma işlemidir. İyonlarla aşındırmada yüzeyler, buhar veya gaz bombardımanı yoluyla fiziksel yollarla, reaktif gazlar ile yüzey arasındaki reaksiyon yoluyla veya hem fiziksel hem de kimyasal reaksiyonun kombinasyonu yoluyla kimyasal olarak aşındırılır. İyonlar, yüksek hızla malzeme yüzeyine çarptığında, yüzeydeki atomları yerinden çıkararak malzeme aşındırma işlemini gerçekleştirir. İyonlarla aşındırmada genellikle argon (Ar) ve diğer soy gaz iyonları tercih edilir. İyonlarla aşındırma anizotropik yapısından dolayı daha az alttan aşındırmaya sebebiyet vermesiyle daha kritik boyut kontrolü sağlamaktadır. İyonlarla aşındırma, kimyasal tepkimelere ihtiyaç duymadan fiziksel bir süreç olmasıdır. Bu, malzeme yüzeyinde kimyasal kalıntı bırakmadan temiz bir aşındırma sağlar.

Yarı iletken endüstrisinde, silikon wafer yüzeylerinin pürüzsüzleştirilmesi ve desenlenmesi için iyon aşındırma yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Örneğin, 193 nm dalga boylu fotolitografi maskelerinin üretiminde, iyon aşındırma yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağlamaktadır (Rooks et al., 1999). Optik bileşenlerin üretiminde de bu teknik, yüzey pürüzsüzlüğünü ve optik kalitenin artırılmasını sağlar (Brunner, 1997).

İyon aşındırma, iki temel teknolojiye ayrılabilir: reaktif iyon aşındırma (RIE) ve iyon demetli aşındırma (IBE). Reaktif iyon aşındırma, plazma oluşturmak için radyo frekansı (RF) kaynağı kullanırken, iyon demetli aşındırma doğrudan akım (DC) kaynağı kullanır. Reaktif iyon aşındırma, kimyasal ve fiziksel aşındırma süreçlerini birleştirir, böylece iyonlar yüzeye çarparken aynı zamanda kimyasal reaksiyonlarla yüzey atomlarını yerinden çıkarır. Bu yöntem, yüksek yönlülük ve seçicilik sağlar, bu nedenle karmaşık desenlerin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılır (Lieberman and Lichtenberg, 2005). İyon demetli aşındırma ise daha saf bir fiziksel süreçtir ve yüzey modifikasyonunda yüksek doğruluk sağlar, bu nedenle optik ve yarı iletken uygulamalarında tercih edilir (Wagner, 2006).

Reaktif İyon Aşındırma

Reaktif iyon aşındırma (RIE), plazma içindeki iyonların malzeme yüzeyine çarptığı ve kimyasal reaksiyonların meydana geldiği bir aşındırma yöntemidir. RIE, radyo frekansı (RF) kaynağı kullanarak plazma oluşturur. Bu plazma içindeki iyonlar, yüzeye çarparken aynı zamanda kimyasal reaksiyonlara girerek yüzey atomlarını yerinden çıkarır. RIE hem fiziksel hem de kimyasal aşındırmayı birleştirir, bu da yüksek doğrulukla desenlerin oluşturulmasını sağlar. Bu yöntem, mikroelektronik endüstrisinde, özellikle yarı iletken üretiminde yaygın olarak kullanılır. RIE'nin yüksek yönlülük ve seçicilik özellikleri, karmaşık ve hassas mikro yapılar oluşturulmasında büyük avantaj sağlar (Kim et al., 2024).



Şekil 2. 4. Reaktif iyon aşındırma ile silikon yüzeyin aşındırma süreci

RIE sürecinde, katyonlar, altlık üzerine yüksek enerji ile hızlandırılan ve örneğin silikon ile kimyasal olarak reaksiyona giren reaktif gazlardan üretilir. Si için tipik RIE gazları CF_4 , SF_6 ve $BCl_2 + Cl_2$ 'dir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi hem fiziksel hem de kimyasal reaksiyon alıyor.

RIE, saf fiziksel iyon bombardımanından veya kendiliğinden kimyasal aşındırmadan daha hızlıdır. İyon bombardımanı yönlü olduğundan, RIE azaltılmış yanal aşındırma hızı ve dikey (veya neredeyse dikey) yan duvarlar ile anizotropik karaktere sahiptir. RIE, dar hatlara veya kanallara ihtiyaç duyulduğunda veya yüksek en/boy oranlı yapıların üretilmesi gerektiğinde gereklidir. Silikon RIE,

kristal düzlemlerden bağımsızdır ve bu nedenle, anizotropik ıslak dağlamanın aksine herhangi bir şekil üretilebilir.

İyon Demetli Aşındırma (IBE)

İyon demeti ile aşındırma (IBE), yüksek enerjili iyonların belirli bir çapta bir demet olarak hedef malzemenin yüzeyine yönlendirilerek atomik ve moleküler düzeyde aşındırma işlemini ifade eder. Bu teknik, genellikle vakum ortamında gerçekleştirilir ve iyon kaynağı olarak sıklıkla argon gibi soy gazlar kullanılır. İyonlar, elektrik alanlar yardımıyla hızlandırılarak hedef malzemenin yüzeyine çarptırılır ve bu süreç sonucunda yüzeydeki atomlar yerlerinden kopararak uzaklaştırılır. Bu kontrollü aşındırma yöntemi, malzeme yüzeyinde istenilen yapısal ve kimyasal özellikleri elde etmek için kullanılır.

İyon demetli aşındırma, yarı iletken cihaz üretimi, optoelektronik bileşenlerin imalatı ve nanoteknoloji gibi ileri teknoloji alanlarında yaygın olarak kullanılır. Özellikle MOSFET'ler, MEMS ve hassas optik cihazlar gibi yüksek teknoloji ürünlerinin üretiminde önemli bir rol oynar (Ortiz Conde et al., 2013). IBE, plazma esaslı aşındırma yöntemlerine kıyasla daha kullanışlı olup, kimyasal kirlilik yaratma olasılığı düşüktür. Ayrıca, bu yöntemle elde edilen yüksek doğruluk sayesinde, karmaşık ve ince detaylara sahip yapılar hassas bir şekilde üretilebilir.

IBE'nin diğer önemli avantajları arasında geniş bir malzeme yelpazesi üzerinde uygulanabilirliği ve yönsel aşındırma kabiliyeti bulunur. Yönsel aşındırma, belirli açılarla yüzey işlemeyi mümkün kılarak mikro ve nano ölçekte karmaşık yapıların oluşturulmasını sağlar. İyon demetli aşındırma tekniği ve sistem teknolojisi detaylarıyla bir sonraki bölümde daha ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

3. İYON DEMETLİ AŞINDIRMA (IBE)

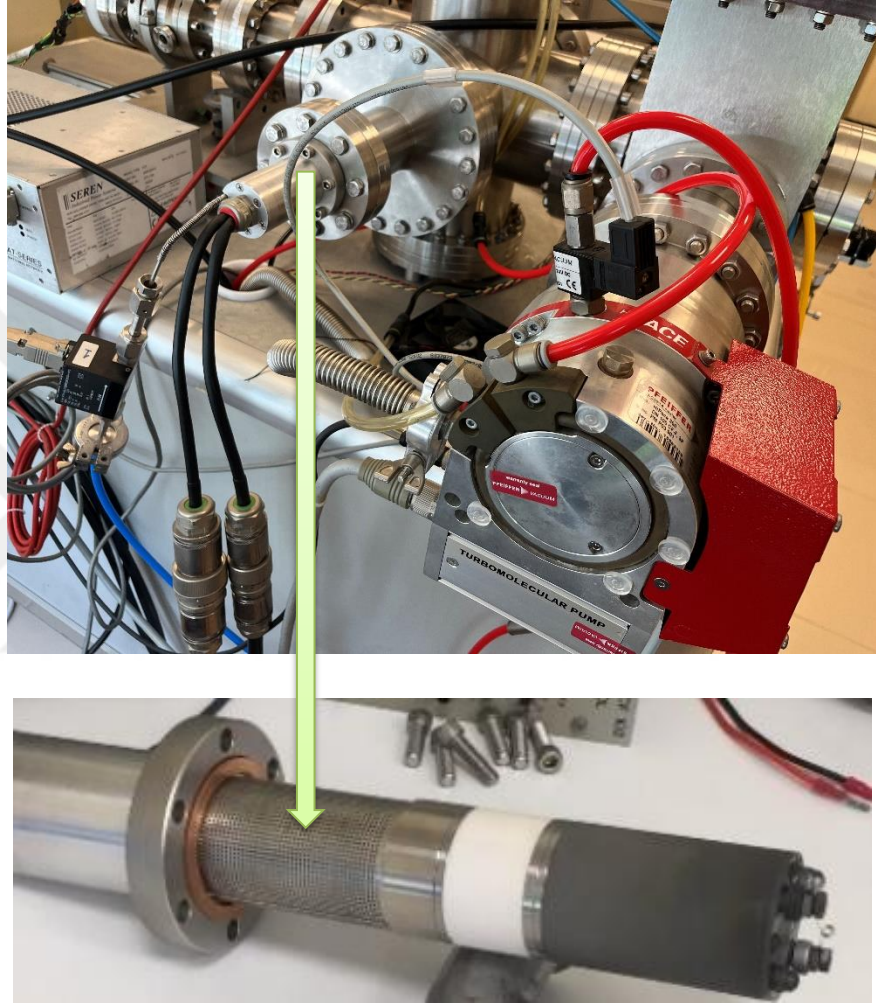
3.1 Aşındırma Tekniği

İyon demetli aşındırma (IBE), altlık yüzeyindeki atomların hızlandırılmış Argon iyonları tarafından vakum altında uzaklaştırıldığı fiziksel bir kuru aşındırma tekniğidir. Bu teknik ile etkili şekilde bir film veya altlık üzerinde bir şekil oluşturulabilir veya malzeme yüzeyleri atomik boyutta temizlenebilir. İyon demetli aşındırma işleminde, genellikle bir fotorezist katman ile oluşturulan maske kullanılır ve bu maskedeki şekiller Ar^+ iyonları ile yüzden malzeme koparılması şeklinde yapılan aşındırma ile film üzerine aktarılmış olur. Bu işlem için yüksek vakum altında bir Ar^+ iyonlarından oluşan bir plazma oluşturulur. Bu plazmadaki iyonlar, anot-katot arasına uygulanan elektrik alan ile (uygulanan güçle orantılı olarak) hızlandırılır ve belirli bir optik sistem yardımıyla demet haline getirilerek yönlendirilir ve ardından elektronlar ile nötr atomlar haline getirilir. Bu işlem sonucunda hızlanmış ve yönlendirilmiş nötr Ar atomları çarptığı yüzeyde yük birikmesi yapmadan malzeme koparabilir. Bu işlemin yapıldığı çeşitli türde iyon kaynakları mevcut olup, bu tez kapsamında kullanılan gridli yapıdaki Koufman tipi iyon kaynağı bir sonraki kısımda anlatılmıştır.

3.2 Sistem Teknolojisi

Bu tezde Kaufman KDC 10 gridli DC tip iyon kaynağı kullanılmıştır. Kullanılan iyon kaynağı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu kaynağın çalışma prensibinden bahsetmek gerekirse, ilk olarak filamentler katot termoiyonik olarak elektron yayarlar. Elektronlar pozitif önyargılı anot tarafından çekilir. Bununla birlikte, elektronların gidiş yolları düz olarak değil, sınırlı bir manyetik alan nedeniyle sikloidal bir yolda sürüklenerek ilerlerler. Elektronlar hareket ederken deşarj odasında beslenen bir çalışma gazından nötr bir atomu etkileyerek iyonlaşmaya neden olurlar. Art arda gelen iyonların oluşturduğu dizi, boşaltma odasında yüksek yoğunluklu bir plazma oluşturur. Plazma, eğimli anot tarafından toprağa göre pozitif bir potansiyele yükseltilir. Plazma çok açık ekran ızgarası

tarafından boşaltma bölgesi odası içinde tutulur. Bununla birlikte hızlandırıcı ızgaraya negatif bir öngerilim uygulandığında bir elektrik alanı oluşur ve plazma deşarjından iyonları çıkarır. Çıkarılan iyonlar, iyon demeti oluşturma yolunda ızgara açıklıklarından akar.



Şekil 3. 1. Kullanılan IBE sistemi ve bu sisteme takılı olan Kaufman KDC 10 gripli DC tip iyon kaynağı (Ok işareti sistem üzerine takılı olan alttaki resimde görülen iyon kaynağına işaret etmektedir).

Gridli DC iyon kaynağı temel olarak ortak bir açık uca sahip iç içe geçmiş iki silindirdir. Kapalı uçta bulunan Argon gazı, termoiyonik emisyonla elektron üreten bir flamanın yakınına alınır. Bu elektronlar sırayla bazı Argon gazı atomlarını iyonize ederler.

Silindirin açık ucu, dikkatle hizalanmış olarak elektriksel olarak izole edilmiş ızgaralarla donatılmıştır. İyonlar, plazma potansiyeli ile aynı olan küçük bir negatif potansiyel geliştirecek olan yüzden iç ekran ızgarasına çekilir ve içinden geçer. Bazı iyonlar ızgaraya vardıklarında geçer bazıları ise itilir. Bu iyonlar ızgaradan geçer geçmez, yüksek pozitif potansiyele sahip dış hızlandırıcı ızgaradaki hizalanmış bir delikten hemen geçerler ve böylece yüksek enerjide (örneğin 600 eV) kaynaktan uzaklaşmasını hızlandırırlar.

İyon substrat yönünde hızlandırıldıkça, öncelikle pozitif iyonlar oldukları için kendilerini iterler. Sonuç olarak ışın kaynaktan uzaklaştıkça uzaklaşır. Işın enerjisi ne kadar düşükse sapma açısı o kadar yüksek olur ve bunun tersi de geçerlidir. Sapmayı en aza indirmek için ve substratın yüklenmesini önlemek için, ışına eşit sayıda elektron eklemek için nötrleştirici filament kullanılır. Düz ızgaralı bir kaynaktan gelen tipik bir nötrleştirilmiş ışın, yaklaşık 60-70 derece sapma açısına sahiptir. Bu sapmayı telefi etmek için veya ışın odaklamak için içbükey ızgaralar kullanılır. Daha geniş sapma açısına sahip dışbükey ızgaralar kullanarak da geniş alanda tekdüzelik sağlanabilir.

Gridli RF iyon kaynağı, reaktif gazlar (örneğin O₂) için kullanılır ve birkaç dikkate değer istisna dışında DC kaynaklara benzerdir. Kaynağın içinde filament kullanmazlar ve nötrleştirici filament, reaktif gaz kullanımından filamentin yanmasını önlemek için bir tarafında inert gazla yıkanmış bir delik bulunan küçük bir kutu içinde korunur. Son olarak, gaz iyonize etmek için RF gücü kullanırlar. Reaktif gazın kullanımı, yalnızca fiziksel aşındırmaya değil, aynı zamanda reaktif gazın kendisi aracılığıyla da kimyasal aşındırmaya izin verir. Bu reaktif aşındırma önceki bölümde de bahsettiğimiz reaktif iyon aşındırma (RIE), anizotropik yapılar üretebildiği ve aşındırılmış malzemeye basit, fiziksel iyon aşındırmada olduğu gibi hazneye saçılmaya karşı buharlaştırılıp pompalanabildiği için özellikle yararlıdır.

3.3 Aşındırma Parametreleri

İyon demetli aşındırma sürecinde genellikle argon gibi inert gazlar kullanılır. İyon kaynağı, bu gazı iyonlaştırarak pozitif yüklü iyonlar üretir. Bu iyonlar, yüksek voltajlı bir elektrik alan kullanılarak hızlandırılır. Hızlandırma

işlemi, iyonların yüzeye çarpma enerjisini belirler ve genellikle 100 eV (elektron volt) ile 1000 eV arasında değişir. Hızlandırılmış iyonlar tüm malzemeleri aşındıracaktır. Bununla birlikte, aşınmayan uygun maskeleme malzemeleri bulmak zordur: eğer tüm malzemeler iyon bombardımanı ile aşınabilirse, bu durum maskeleme malzemeleri için de geçerlidir. Argon iyonları tarafından tipik iyon aşındırma hızları Si, SiO₂, SiC, Si₃N₄ ve fotorezist için yaklaşık 20 nm/dk ve metaller için 20-100 nm/dk'dır (Chekurov, N., 2009).

İyon demetli aşındırma, yüzey profilini kontrol etme yeteneği açısından oldukça hassastır. İyonlar, belirli bir açıyla yüzeye çarptığında, yönlendirilmiş aşındırma işlemi gerçekleştirilir. Bu açı, genellikle 90° ile 45° arasında değişir ve işlem boyunca yüzeyin eğimi ve açısı üzerinde hassas kontrol sağlar. Bu, özellikle mikro yapılar ve ince tabakalar üzerinde yüksek çözünürlük gerektiren uygulamalarda önemli bir özelliktir.

İstenen seçiciliği ve aşındırma profilini elde etmek için hesaba katılması gereken bir diğer faktör de plazmanın gücüdür. Plazmanın gücüne katkıda bulunan faktörler, elektronun hızı, ortalama iyon enerjisi, elektronun yoğunluğu, plazma iyonunun yoğunluğu, nötr atomların yoğunluğu ve iyon akımının yoğunluğudur. Listelenen tüm faktörler, elektrik alanın gücü ve plazmanın basınçlandırılması ile belirlenebilir. Alan ne kadar güçlü olursa, potansiyel ve kinetik enerjilerini artıran elektron ve iyonun hızı o kadar büyük olur.

İyon aşındırmanın doğası gereği, tekniği doğrudan uygularken birkaç benzersiz sorunla karşılaşılır. İlk olarak, iyon aşındırma oranı iyonların geliş açısına güçlü bir şekilde bağlıdır. Gelen ışının geliş açısı normal geliş açısından başlayarak arttırıldığında çoğu malzemenin (altın, platin vb. hariç) aşındırma oranlarının ilk başta arttığı, 30-45 derece aralığındaki açılar için maksimuma ulaştığı ve ardından bakış açılarına yaklaştıkça azaldığı çalışmalarda gözlemlenmiştir. Hızdaki ilk artış, bir atomun yüzeyinden uzağa doğru yönlendirilmiş bir momentum bileşeni kazanmasıyla sonuçlanan bir çarpışma ihtimalinin artan geliş açılarıyla artacağı gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Yüksek geliş açılarında gözlenen aşındırma hızlarındaki azalma, gelen iyon demetinin giderek daha geniş bir yüzey bölgesine yayılması nedeniyle meydana gelir (iyon akısı, geliş açısının kosinüsü olarak düşer). Ayrıca, birincil ışının tamamen elastik

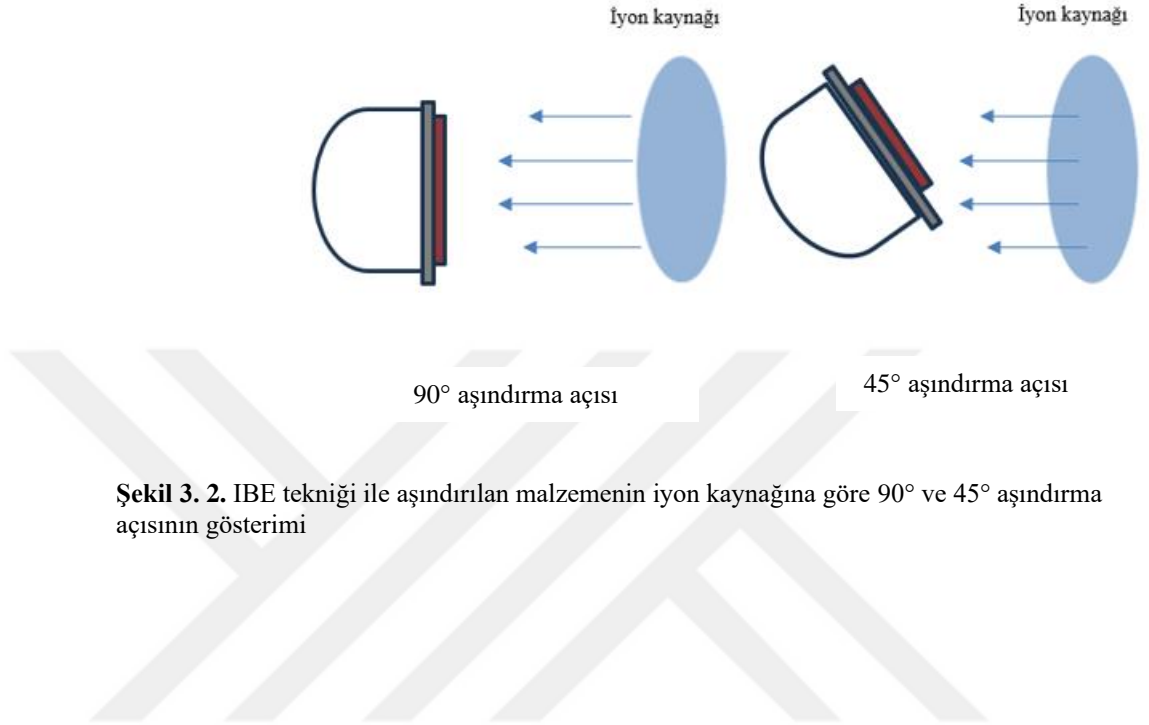
yansıma ihtimali büyük açılarda artar. Aşındırma hızının, ışın bakma açısına yaklaştıkça sıfıra düşmesi, basamaklı yüzeylerin iyon ışını ile aşındırılmasında ve yeniden biriktirme etkilerinde önemli etkilere sahiptir. Maksimum aşındırma hızı açısı önemlidir, çünkü kararlı yüzeyler oluşacak ve verilen malzeme için maksimum aşındırma hızı açısına karşılık gelen yüzey eğimi ile bir iyon ışınına maruz kalan malzemelere aktarılacaktır. İyon ışını ile aşındırmada karşılaşılan bir diğer sorun da geri püskürtülen malzemelerin dik yüzey özelliklerinin kenarlarında yeniden birikme eğiliminde olmasıdır.

Aşındırma yüzeyinin seçiciliği, aşındırılacak filmin aşındırma oranı, onu kaplayan fotorezist ve filmin alttaki tabakası arasındaki fark anlamına gelir. Bir yüzeyi aşındırırken, alttaki yüzeydeki hasarı azaltabileceği için yüksek seçicilik tercih edilir. Aşındırılacak yüzeyin altındaki yüzey veya fotorezistin aşınmaması gerekir. Fotorezist, yüzeyde aşınma meydana gelmemesi gereken kısmını kapladığı için bu önemlidir. Aşındırma tekniklerini seçerken aşındırma profili ve seçicilik faktörleri göz önüne alınır.

Örneğin, fiziksel aşındırma teknikleri anizotropik bir özellik oluşturacaktır; burada kimyasal aşındırma tekniği izotropik aşındırmaya neden olarak alttan kesmeye neden olur; ancak, fiziksel ve kimyasal dağlamanın (reaktif iyon aşındırma gibi) bir kombinasyonu, mükemmel bir izotropik özellikle sonuçlanacaktır.

ITO ince filmleri üzerinde yapılan bir çalışmada, argon iyon demetli aşındırma kullanılarak 50-100 nm/dakika arasında aşındırma oranları rapor edilmiştir. Bu oran, iyon enerjisi ve geliş açısına bağlı olarak değişmektedir. Aşındırma oranı ayrıca demet akım yoğunluğu ve iyon demeti sisteminin spesifik konfigürasyonuna göre de etkilenmektedir (Lee and Kuo, 2008). Argon iyon demeti kullanılarak SiO₂'nin aşındırılabilirdiği ve bu işlemin belirli koşullar altında 650 Å/dakika aşındırma oranlarına ulaşabildiği gösterilmiştir. Bu koşullar, 0.4 mA/cm² demet akım yoğunluğu ve 0.5-1 keV arasında değişen iyon enerjilerini içermektedir. Ayrıca, bu konfigürasyonlarda diğer malzemelere (örneğin, polikristal silisyum) göre yüksek aşındırma seçiciliği de gözlemlenmiştir (Brown et al., 1980). IGZO filmleri üzerinde yapılan araştırmalar, argon iyon demetli aşındırma kullanılarak yaklaşık 30-60 nm/dakika aşındırma oranları göstermiştir.

Aşındırma oranındaki değişkenlik, film bileşimi ve aşındırma işlemi sırasında kullanılan spesifik iyon demeti parametrelerine bağlıdır (Changyong et al., 2023).



Şekil 3. 2. IBE tekniği ile aşındırılan malzemenin iyon kaynağına göre 90° ve 45° aşındırma açısının gösterimi

4. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu tez çalışması kapsamında üretilen ince filmlerin üretim ve karakterizasyon çalışmaları Ege Üniversitesi Kuantum Aygıt Laboratuvarında yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda altlık olarak 25 mm x 25 mm boyutunda cam altlık kullanılmıştır. Bu cam üzerine sırasıyla temizleme, ince film kaplama, desenleme ve aşındırma işlemleri uygulandıktan sonra atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile aşındırma profillerinin analizleri yapılmıştır. Desenleme aşamasında laboratuvarında daha önce yapılan transistör çalışmalarında kullanılan maske kullanılmıştır. Bu çalışmada parametrelerin belirlenmesinde tek katman yeterli olacağı için transistör yapısının TFT tipine göre ilk katmanı olan source-drain veya gate katmanı desenleme aşamasında kullanılmıştır.

Bu bölümde temizlik, film üretimi, desenleme, aşındırma ve yapılan morfolojik analizler sırasıyla ayrıntılı şekilde anlatılmaktadır.

4.1 Altlık Hazırlığı

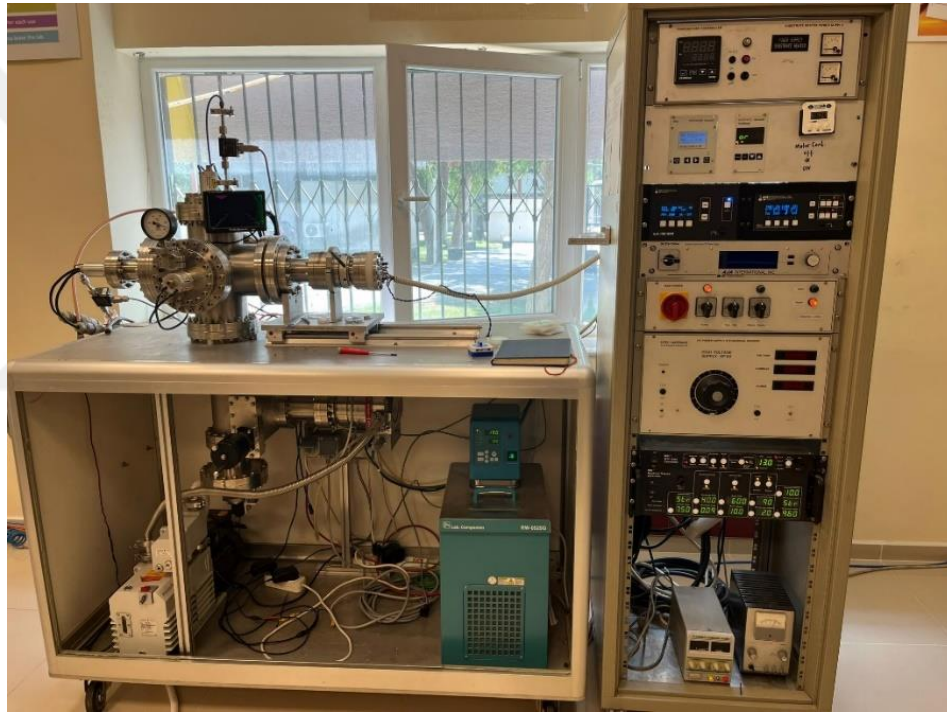
İnce film üretimine başlamadan önce, filmin yerleştirileceği taban olan altlık yüzeyinin kirlilerden arındırılması gereklidir. Bu amaçla belirli bir temizleme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde öncelikle cam altlık sabun ve su ile temizleme işlemi yapılır. Bunun ardından camların organik kalıntıların arınması için piranha adlı solüsyonla temizlenmektedir. Organik kalıntıların ardından metal kalıntıların arınması için asidik bir solüsyon olan RCA-2 yöntemi ile temizlenip ardından alkol ve aseton ile yıkayıp DI-su ile yıkama aşaması uygulanır.

Cam altlık beher içerisinde piranha solüsyonunda 15 dakika, RCA-2 solüsyonu içerisinde 10 dakika bekletildikten sonra ultrasonik temizleyici içerisinde 40°C'de sırasıyla aseton ve alkol içerisinde bekletilmiştir. DI-su ile spinner üzerinde yıkandıktan sonra son aşamada hotplate üzerinde kuruması için 2dk bekletilmiştir.

Tüm bu altlık hazırlama sürecinden sonra mikroskop altında temizlik kontrolü yapılır ve herhangi bir kalıntı gözlemlenmesi halinde tüm süreç aynı şekilde kalıntı gözlemlenmeyene kadar tekrarlanmaktadır.

4.2 İnce Film Üretimi

Bu tez kapsamında ince filmlerin üretiminde daha önce de bahsedildiği gibi RF magnetron püskürtme sistemi kullanılmıştır. Ege Üniversitesi Kuantum Aygıt Laboratuvarında bulunan bu sistem Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4. 1. Bu çalışmada kullanılan RF Magnetron püskürtme sistemi

RF magnetron püskürtme sisteminde kütle akış kontrol sistemi sayesinde istenilen akış hızında vakum odasına gaz verilmektedir. Aynı zamanda hedef malzemeye uygulanan gücü yani film püskürtme hızını ve vakum odasına gönderilen gaz basıncı ayarlanabilmektedir. Püskürtme gazı olarak Argon kullanılmıştır. Magnetron püskürtme sistemi içerisindeki altlık tutucu, dışında bulunan kol sayesinde 360°C dönebilmektedir. Sistem vakum altına alındığında istenilen açıya ayarlanması bu kol sayesinde kontrollü ve kolay olmaktadır.

Bunun yanında sistem içerisinde motorize altlık tutucu kullanılarak film kaplama sırasında dönerek kaplama yapmak olası bir işlemdir.

Cam altlığımız temizlik aşamasından sonra RF magnetron püskürtme sistemi içerisine alınmıştır. 5×10^{-5} Torr basınca seviyesine kadar vakumlandıktan sonra kullanılacak hedef malzemelerin oksitlenmesi veya kirlenmesi gibi durumlardan kaynaklı altlığımız ters konumdayken 2dk ön püskürtme işlemi uygulanmıştır. 2dk ön püskürtme işlemi uygulanırken sistem dışında bulunan kol kullanılarak altlık tutucu hedef malzemenin tam tersi yönüne çevrilir. Bunun sebebi ise hedef malzeme bahsedildiği gibi oksitlenme veya kirlenme gibi durumlar söz konusu olacağından bu oluşabilecek kirliliğinin altlık yüzeyinde birikmesini engellemek için ters yönde çevrilmektedir. 2 dk sonunda altlık tutucusu hedef malzeme yönüne çevrilerek süre başlatılmıştır.

ITO için RF gücü 30 Watt'a Argon basıncı 1.5 mTorr'a ve Argon akışı 12 sccm'e ayarlandı. Buradaki sccm dakikada santimetre küp anlamına gelir ve argon akış hızını ifade eder. Bu parametreler kullanılarak oda sıcaklığında 20 dakika biriktirme işlemi yapıldı. ITO filmler yapıldıktan sonra fotolitografi ve aşındırma işlemlerine tabi tutularak elde edilen desenlerin derinlikleri AFM ile ölçülerek hem zamana bağlı olarak iyon aşındırmasının hem de film kaplamanın hızı belirlendi. Bu aşındırma ve hız oranlarının belirlenmesi için çok sayıda deneme ve analizler yapıldı. Öncelikle film kalınlığını AFM ile belirleyip ne kadar sürede ne hızla film kaplandığı bulundu ardından yine AFM sayesinde kalınlığını bildiğimiz filmimizin IBE ile ne kadar aşındığını tespit edebildik.

4.3 Fotolitografi ve Desenleme

İnce film desenleme uygulamasında maske olarak UV ışığına duyarlı olan AZ 3007 fotorezisti kullanılmıştır. Fotorezist işleminden önce ilk olarak fotorezistin film yüzeyine daha iyi tutunmasını sağlamak amacıyla TI Prime olarak adlandırılan solüsyon döndürerek kaplama metodu ile film yüzeyine kaplanmıştır. TI Prime solüsyonunun film yüzeyine yapışması için 100 °C'de 1 dakika tavlama işlemi yapılmıştır. Döndürerek kaplama metodu kullanılarak ince film üzerine kaplanmıştır. Döndürerek kaplama sistemi ve tavlama (hot plate) cihazı Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4. 2. Bu çalışmada kullanılan döndürerek kaplama sistemi (sol) ve hot plate (sağ)

Bu işlem yapıldıktan sonra film kapladığımız altlığımız tekrar döndürerek kaplama cihazına alınıp şırınga yardımıyla bir miktar fotorezist film üzerine kontrollü şekilde dökülmüştür. Cihazın döndürme hızı 4000 rpm olarak sabitlenmiştir ve her adımda bu hızda dönmektedir. Yine aynı şekilde fotorezistin film yüzeyine iyice yapışmasını sağlamak amacıyla 100 °C’de 1 dakika pişirme işlemi yapılmıştır. Bu pişirme işlemi, film yüzeyine yapışmasını engelleyen solventlerin buharlaşmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır. Desenlenmesi planlanan şekil maske hizalama sistemi kullanılarak ince film üzerine yerleştirilmiştir. 365 nm dalga boyundaki UV ışığına fotolitografi cihazında 5 sn maruz bırakılmıştır. Kullanılan sistem Şekil 4.3’de verilmiştir. UV ışınları sadece maskenin kapatmadığı yerdeki fotorezistle etkileşime girer ve etkileşime girdiği fotorezist UV ışığı altında özelliğini kaybeder. Özelliğini kaybeden fotorezistin film yüzeyinden kalıntılarının çıkması için bir kimyasal solüsyon içerisinde daldırılır. Bu adım son aşama olan develop işlemidir. 1:1 oranda su ve AZ developer solüsyonu bir beher içerisinde alındıktan sonra UV ışınına maruz kalan filmimiz yaklaşık 1 dakika hazırlanan solüsyon içerisinde bekletilmiştir. Fotorezist ve film arasındaki temasın güçlenmesi için 115°C’de 2 dakika son tavlama işlemi yapılmıştır. Kalıntıların film yüzeyinden çıktığına emin olmak amacıyla mikroskop ile kontrol edilir. Eğer kalıntı varsa işlem tekrarlanır.



Şekil 4. 3. Tez çalışmasında kullanılan optik mikroskop ve UV fotolitografi sistemleri

Bu uygulama sürecinde tüm sıcaklık ve zaman parametreleri birçok uygulama sonucunda belirlenmiştir. En iyi ve en temiz desen elde edilene kadar çalışmalar yapılmış ve bu parametreler ile kullanılan maske üzerindeki deseni tam olarak elde edilmiştir.

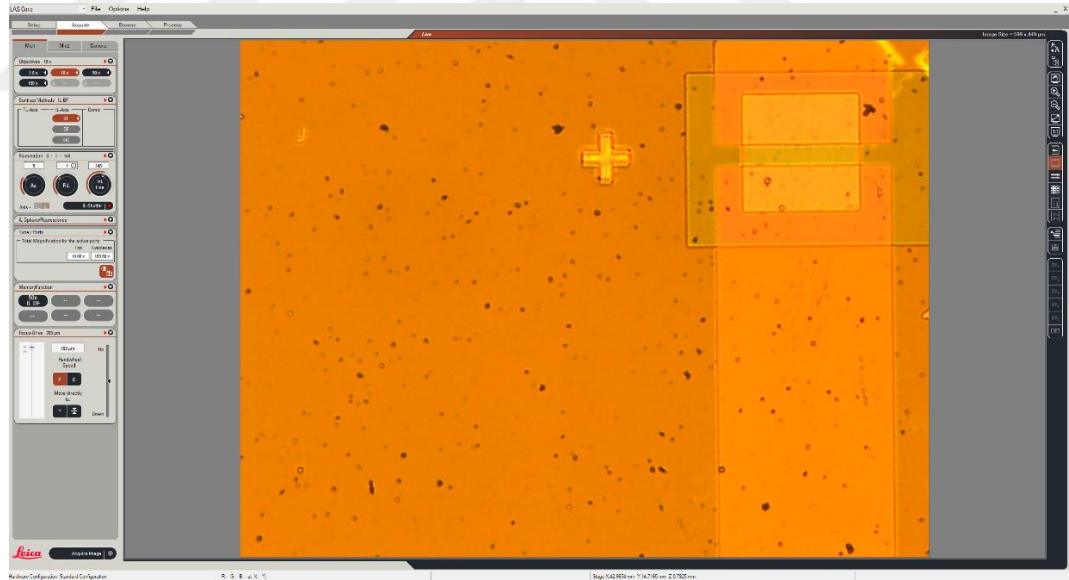
4.4 Aşındırma

Bu tez çalışmasında iyon demetli aşındırma tekniği kullanılmıştır. Bu aşındırma tekniği ince film üretiminde kullandığımız magnetron püskürtme işlemine benzemektedir. Şekil 4.1'deki magnetron püskürtme sistemi kullanılmıştır. Argon basıncı 4.4×10^{-4} Torr'a ve Argon akışı 4 sccm'e ayarlanmıştır. Bu parametreler ile iyon bombardımanına maruz kalan ince film için aşındırma işlemi tamamlanmıştır. Bu iyon demetli aşındırma işlemi ince film kaplı altlık 90°C açıyla yani tam iyon kaynağının karşısında olacak şekilde bombardıman edilmiştir. Aynı işlemler 60°C ve 45°C 'lik açılar için tekrarlanmıştır. Aşındırılan film, aşındırma esnasında iyon bombardımanına maruz kaldığı için fazla enerjiden kaynaklı ısınmasına yol açabilir. Bu ısınmadan kaynaklı filmin yapısal özelliğinin bozulma olasılığı vardır. Böyle bir olası değişikliği engellemek amacıyla ve özelliklerinde değişim olmaması için bu esnada 90°C açıyla yapılan aşındırma işlemi 2 dakika iyon bombardımanına

maruz bırakıldıktan sonra tam tersi konuma döndürülüp 2 dakika bekletilmiştir. 2 dakikanın sonunda tekrar iyon kaynağı yönüne çevrilerek iyon bombardımanına maruz bırakılarak aşındırma işlemi yapılmıştır. 60°C ve 45°C'lik açılar için de aynı şekilde bekletilerek yapılmıştır.

4.5 Morfolojik Analizler

İyon demetli aşındırma işlemi tamamlandıktan sonra numuneler ilk olarak optik mikroskop altında yüzeysel olarak incelenmiştir. Bu aşamada litografi ve aşındırma sürecinin başarısı, hatların keskinliği vb. test edilmiştir. Ardından aşındırılan kısımlar daha detaylı olarak incelenmiş ve AFM ile aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü, kenar keskinliği gibi özellikler, aşındırılan şekillerin derinliği ve açısı incelenmiştir. Bu aşamada kullanılan AFM sistemi kompakt yapıdaki ezAFM adı verilen sistemdir.



Şekil 4. 4. Optik mikroskopta kullanılan arayüz programı



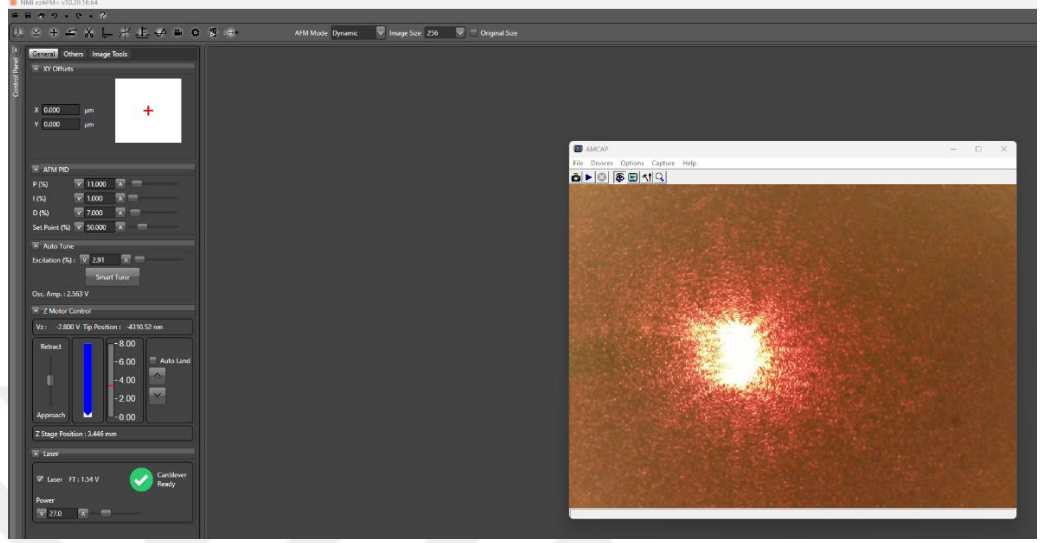
Şekil 4. 5. NanoMagnetics Instruments'ın ezAFM sistemi

AFM, yüzeydeki atomların tanımlanmasını ve belirli bir atom ile onun komşu atomları arasındaki etkileşimlerin değerlendirilmesini ve bununla birlikte atomik düzenlemelerden kaynaklanan fiziksel özelliklerin veya değişimlerin incelenmesi gibi uygulamaları kapsamaktadır. AFM ucunda çok sivriltilmiş bir uca sahip bir iğne (tip) bulunmaktadır ve bu iğnenin kalınlığı genelde 0.2-10 nm arasındadır. İğnenin ucu birkaç atom kalınlığında olup incelenen yüzeye yeterince yaklaştırdırca yüzeyde iğne ucuna (tip) en yakın atom ile uçtaki atom arasında atomik kuvvetler etki etmeye başlamaktadır. Bu kuvvetler Van Der Waals, coulomb gibi kuvvetlerdir. AFM mekanizması bu küçük kuvvetleri ölçebilmektedir. Bu ölçüm sayesinde de yüzey algılanabilmektedir.

Lazer ışını yardımıyla yüzeye doğru veya yüzeyden uzağa sapmalar tespit edilir. Lazer ışını tip üzerinden yansımaktadır. Çubuk hareket ettikçe yansıyan ışının açısında da değişiklikler meydana gelir bu değişiklikleri tespit etmek için ise konuma duyarlı fotodiyotlar kullanılmaktadır. Lazer ışınındaki sapmalar ile incelenen nano ölçekteki yüzey girinti ve çıkıntıları tespit edilmektedir. Görüntü elde edebilmek için lazer ve fotodedektör sisteminin olması gerekmektedir.

Şekil 4.6'da verilen arayüz programında görüldüğü gibi AFM'de PID (Proportional Integral Derivative) olarak adlandırılan ve tipin örneğe yaklaşıp uzaklaşmasını hassas biçimde ayarlayan kontrol mekanizması bulunmaktadır. Elde edilen görüntü kalitesi için bu değerlerin hassas biçimde ayarlanması oldukça önemlidir. Bizim kullandığımız sistemdeki PID değerleri; P değeri %70, I

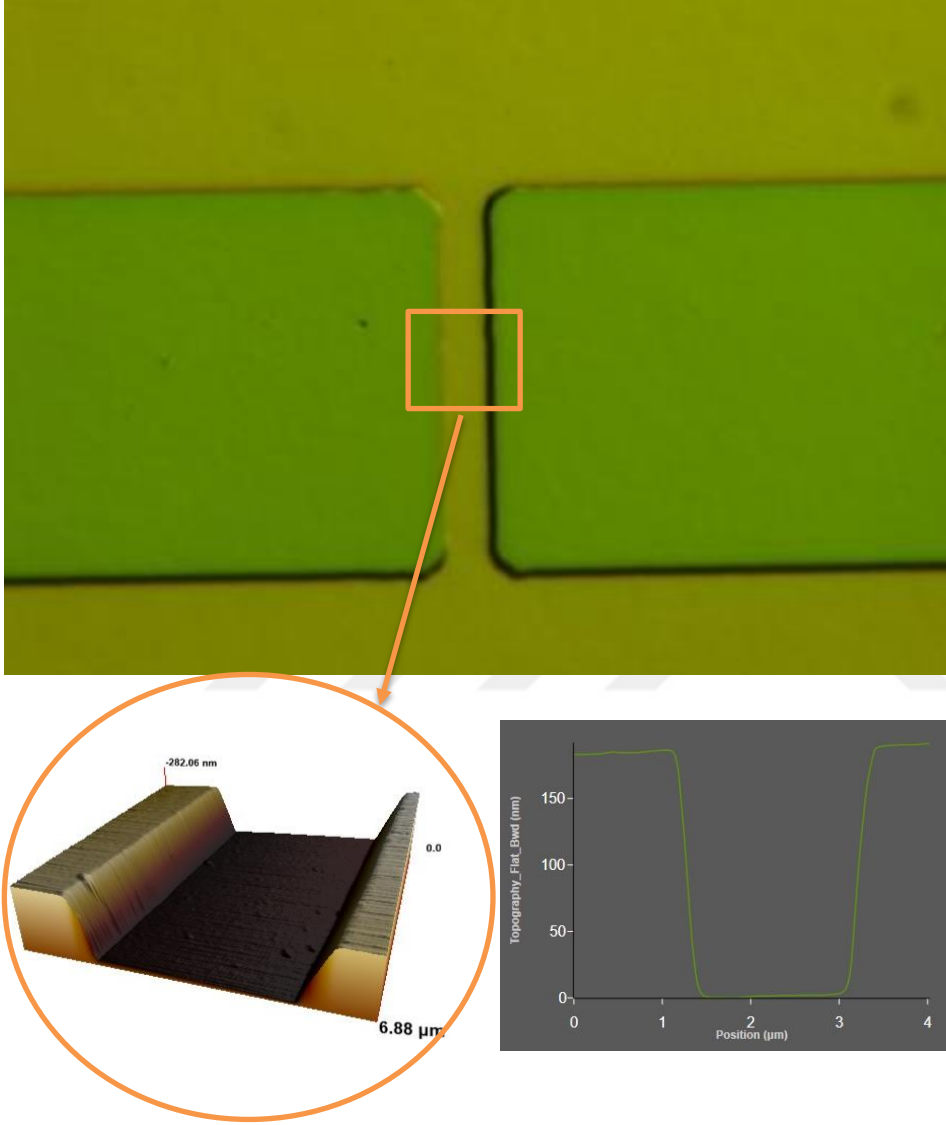
değeri %1 ve D değeri %40 olarak ayarlanmıştır. Tarama hızı ise tarama alanının yarsına ayarlanmıştır.



Şekil 4. 6. AFM arayüz yazılımından bir görünüm

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde magnetron püskürtme sistemi kullanılarak aygıt üretimi aşamasında kullandığımız parametreler ve sonucunda elde edilen veriler verilmektedir.



Şekil 5. 1. IBE kullanılarak source-drain olarak aşındırılan ITO filmin optik mikroskop ve AFM altındaki görüntüleri

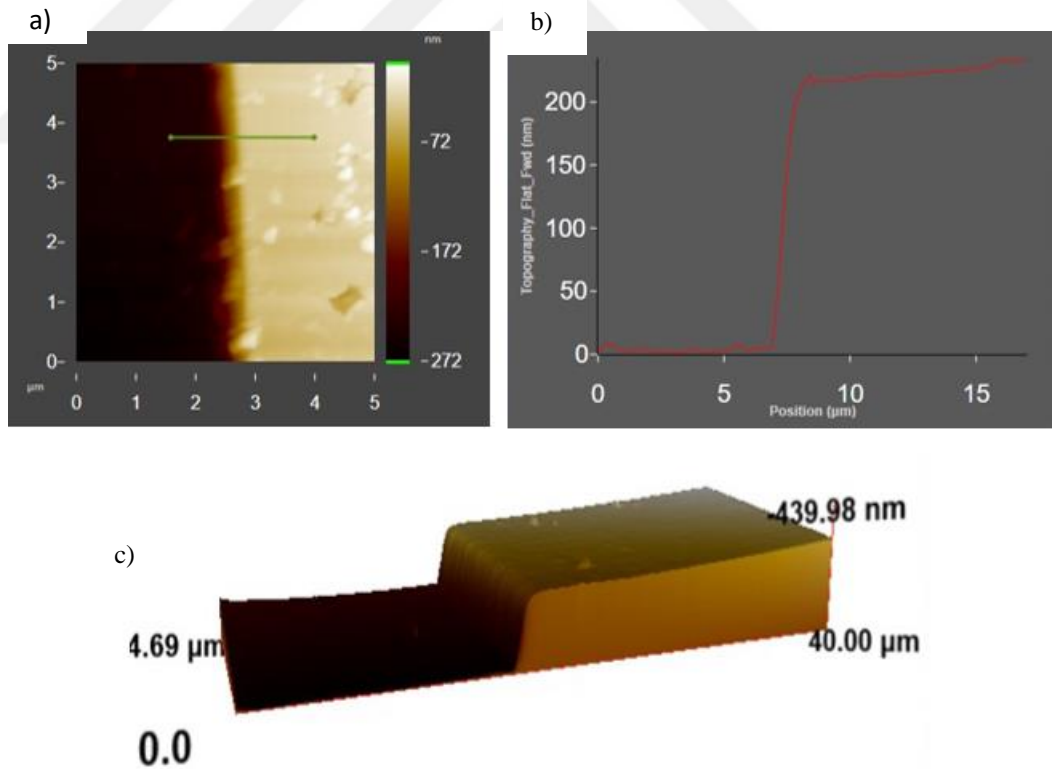
İnce film üretim aşamasında hedefe uygulanan RF gücü, gaz basıncı, hedef ve altlık arasındaki mesafe gibi değişkenler filmin yapısını etkilemektedir. Bu yüzden farklı Ar basıncında birçok deneme yapılarak ITO ince film için kullanılan optimum değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5. 1. ITO ince filmlerin üretim koşulları

RF Gücü (Watt)	Ar Basıncı (mTorr)	Kaplama süresi (dak.)	Altık Sıcaklığı (°C)	Kaplama hızı (nm/dak)	Kalınlık (nm)	Kaplama açısı	Döndürme
30	1.5	20	Oda sıcaklığı	10	200	90 ⁰	yok

ITO film kaplama aşamasından sonra tezin deneysel çalışmalar kısmında anlatıldığı üzere fotolitografi, desenleme ve aşındırma süreçleri uygulanış olup elde ettiğimiz şeklin optik mikroskop altındaki görüntüsü Şekil 5.1’de verilmiştir.

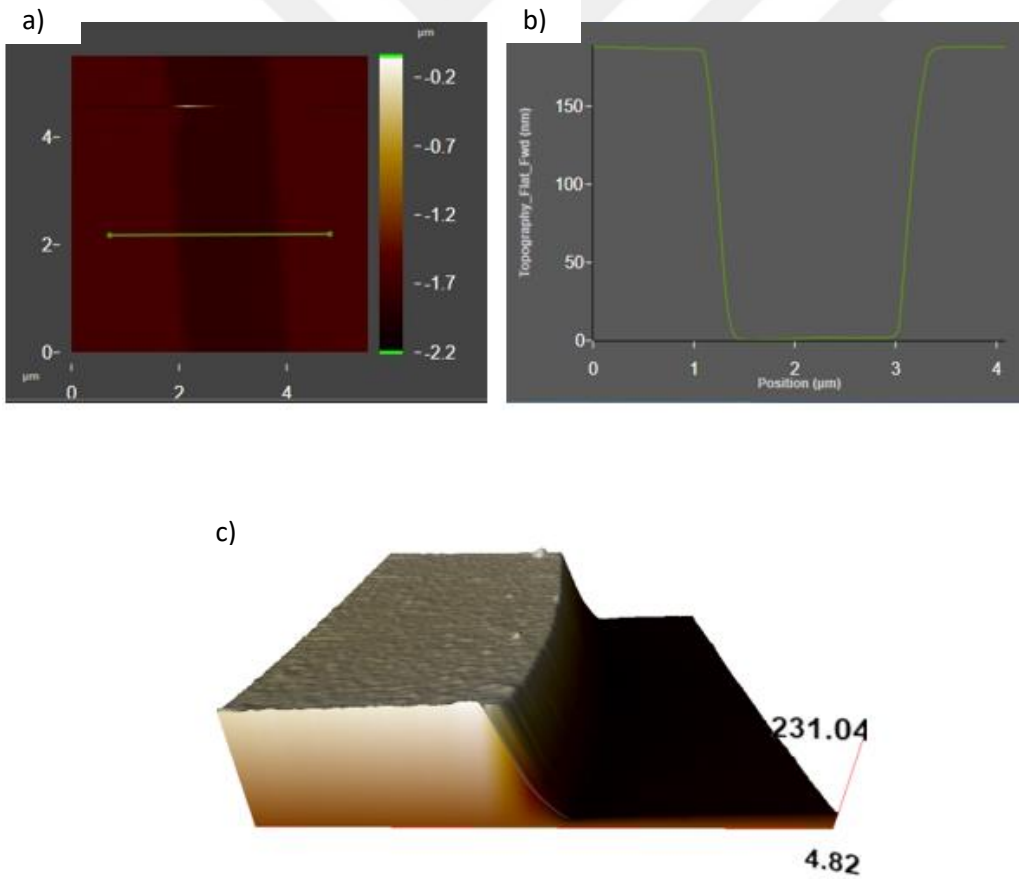
Optik mikroskop altında yapılan incelemeler ile elde ettiğimiz görüntüler sadece film temizliğini ve kenar keskinliğini anlamakta bize olanak sağlamaktadır. IBE sayesinde verdiğimiz açılar gözlemlemek, film kalınlıklarını ve aşındırma oranlarını bulabilmek için AFM kullanılmıştır. AFM ile elde ettiğimiz görüntüler ilgili şekillerde verilmiştir.



Şekil 5. 2. a) 90°C eğim açısında AFM’nin tarayacağı alanın yukarıdan görüntüsü. b) 90°C eğim açısında AFM’nin taradığı alanın yükselti farklarını grafiksel gösterimi c) 90°C eğim açısında AFM’nin taradığı alanın 3 boyutlu gösterimi

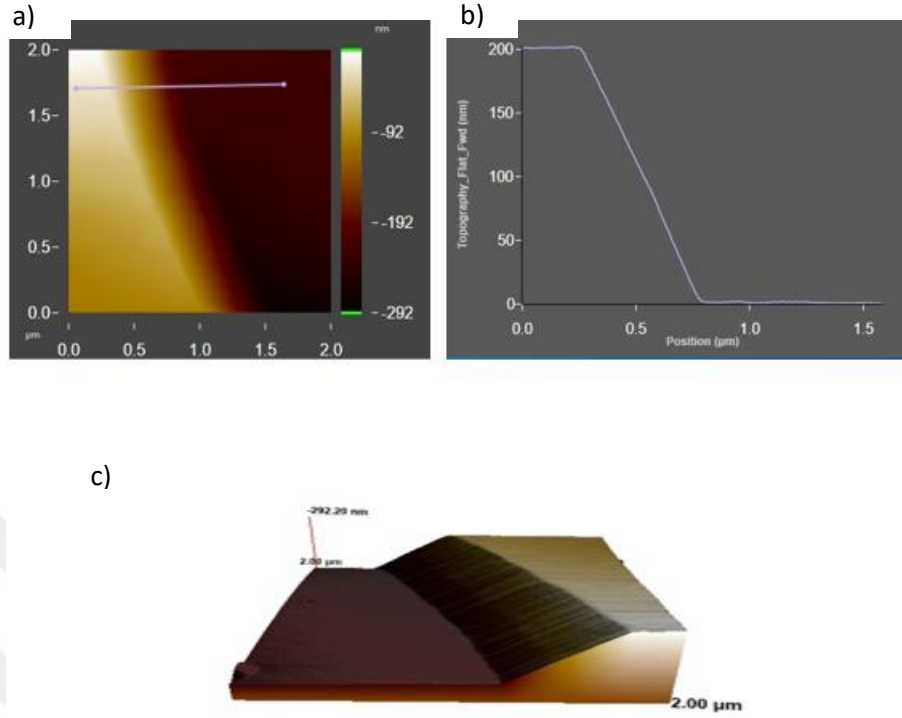
Film yüzeyinde istenilen alanın taranması için AFM ile ilgili alan bulunarak belirli bir konumdan ölçüm almasını sağlayabiliriz. Genel olarak desen üzerindeki aşındırılmamış ITO film ile aşındırma yapılan kenar özellikle seçilmektedir. Böylece kalınlık ve yükselti net olarak anlaşılacaktır. Şekil 5.1a'da verilen görsel AFM'nin seçtiğimiz alanı taraması için yönlendirdiğimiz konumun kamera görüntüsünü göstermektedir. Şekil 5.1b'de verilen görsel seçilen konumun görselini grafik olarak göstererek kalınlığı anlamamıza yaramaktadır. Taranan alanının 3 boyutlu gösterimi ise Şekil 5.1c'de verilmiştir. 90 °C eğim açısıyla (yani ITO kaplı altlık ile iyon kaynağının karşılıklı olduğu konum) aşındırılan ITO filmin AFM görüntüleri Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

60°C eğim açısıyla aşındırılan ITO filmin AFM görüntüleri Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5. 3. a) 60°C eğim açısında AFM'nin tarayacağı alanın yukarıdan görüntüsü. **b)** 60°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın yükselti farklarını grafiksel gösterimi **c)** 60°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın 3 boyutlu gösterimi

45°C eğim açısıyla aşındırılan ITO filmin AFM görüntüleri Şekil 5.4'te gösterilmektedir.

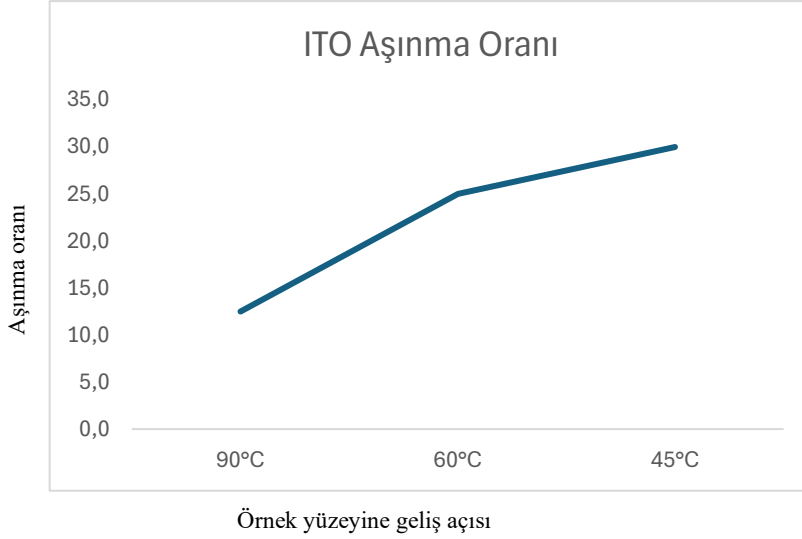


Şekil 5. 4. a) 45°C eğim açısında AFM'nin tarayacağı alanın yukarıdan görüntüsü. b) 45°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın yükselti farklarını grafiksel gösterimi c) 45°C eğim açısında AFM'nin taradığı alanın 3 boyutlu gösterimi

AFM'den elde edilen görüntü ve ölçüm sonuçları sonucunda 90°C, 60°C ve 45°C için aşındırma oranları elde edilmiştir. Bu oran, aşındırma kalınlığının(nm) aşındırılan zamana(dk) oranı ile bulunmaktadır ve Tablo 5.2'de proses parametreleri detaylarıyla verilmektedir. Aşınma açısı arttıkça aşınma oranının da arttığını gösteren grafik ise Şekil 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5. 2. IBE için 90-60-45°C'lerde ITO aşındırma proses parametreleri

Aşındırma Açısı (°C)	Aşındırma Kalınlığı (nm)	Aşındırma Zamani (dk)	Aşındırma Oranı (nm/dk)	Argon Akış Hızı (sccm)	Deşarj Voltajı (V)	İyon Voltajı (V)	Nötralizasyon Voltajı (V)	Katot Voltajı (V)
90	200	8	25	4	40	600	5.7	2.7
60	200	6	33.3	4	40	600	5.7	2.7
45	200	4	50	4	40	600	5.7	2.7



Şekil 5. 5. IBE için ITO'nun eğim açısına göre aşınma oranları

IBE ile bu oranların belirlenmesi mikro aygıt üretimi ve gelişimi için oldukça önemlidir. Çok katmanlı yapılarda en alt katmanın yüzey pürüzsüzlüğü ve kenar keskinliği herhangi bir elektriksel kontağı engelleyeceği için üzerine gelecek olan diğer katmanların da aynı oranda iyi bir yüzeye sahip olmasını sağlar. Eğer bu pürüzsüzlük ve keskinliği sağlayamazsak; çok katmanlı yapılarda herhangi bir kirlilik ve çıkıntının oluşması, katmanlar arasında sızıntıya yol açabileceğinden aygıt üretimi için kritik süreçtir ve bu teknik sadece IBE ile elde edilmektedir. Yukarıda elde edilen veriler ve yapılan prosesler sonucunda başarılı bir çalışma yürütülmüştür. Bu parametrelere ulaşabilmek ve düzgün yapılar elde edilebilmesi için birçok deneysel işlem yapılmıştır. Bu süreçte başarısız aşındırma işlemi AFM ile görüntülenmiştir. Bu başarısız IBE süreçlerinden biri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

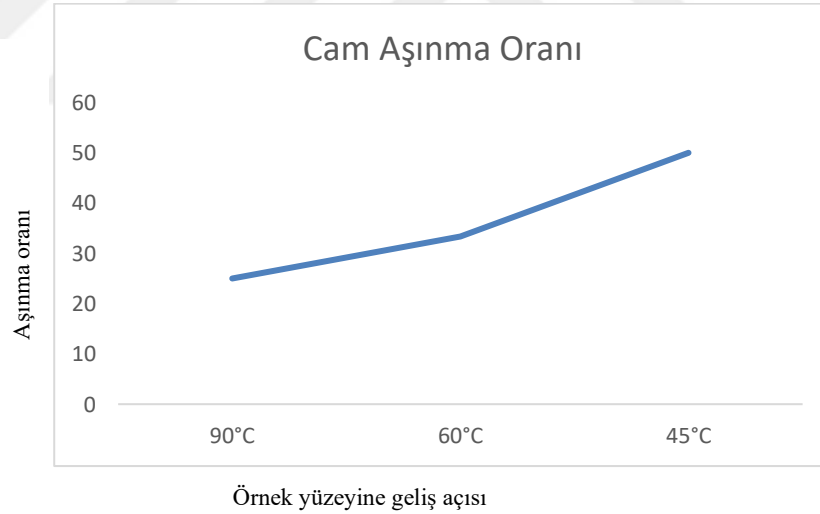


Şekil 5. 6. Başarısız bir IBE sürecinin 3 boyutlu gösterimi

IBE ile seramik, cam, metal, yarıiletken gibi hemen hemen her türlü malzemeyi aşındırmak mümkündür. Yapılan ITO aşındırma çalışmalarımıza ek olarak aynı süreç ve adımları tekrarlayarak altlık olarak kullandığımız cam malzememizin 90°C, 60°C ve 45°C eğim açısıyla IBE ile aşındırma oranları elde edilip Tablo 5.3'te verilmiştir. Aşınma açısı arttıkça aşınma oranının da arttığını gösteren grafik ise Şekil 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5. 3. Cam için 90-60-45°C'lerde ITO aşındırma proses parametreleri

Aşındırma Açısı(°C)	Aşın dırma Kalınlığı (nm)	Aşın dırma Zamani (dk)	Aşındırma Oranı(nm/dk)	Argon Akış Hızı (sccm)	Deşarj Voltajı(V)	İyon Voltajı (V)	Nötrali zasyon Voltajı (V)	Katot Voltajı (V)
90	50	4	12.5	4	40	600	5.7	2.7
60	100	4	25	4	40	600	5.7	2.7
45	150	5	30	4	40	600	5.7	2.7



Şekil 5. 7. IBE için camın eğim açısına göre aşınma oranları

6. SONUÇ

Mikroelektronik teknolojisinde yeni nesil entegre devreler çok daha küçük geometriye sahip olarak üretilmektedir. Bu aygıtlar, çok katmanlı ince filmlerle yapılmakta olup, belirli kısımları üst üste binecek şekilde desenlenip belirli kısımları da birbirinden izole edilecek şekilde üretilmektedir. Bu yapıların üretimi esnasında, üretim teknolojisine bağlı olarak altlık veya ince film katmanları üzerinde yapılan desenleme ve aşındırma işlemlerinin etrafında bulunan diğer yapılara zarar vermeden veya alt katmanında bulunan filmi etkilemeden kontrollü biçimde yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda bazı spesifik aygıtların üretiminde kenar keskinliği ve eğimli yüzeyler üzerine yapıma zorunlulukları vardır. Bunun sebebi özellikle en alt katmanın ne kadar pürüzsüz ve ne kadar kenar keskinliği olursa üstüne gelecek diğer katmanları da bu yönde etkileyerek aygıt performansını arttırmaktadır. Çok katmanlı aygıt üretiminde eğimli yüzeyler elde ederek biriktirme ve aşındırma işlemleri sırasında olası kontak ihtimali ortadan kaldırılabılır. Böylece çok daha ince filmler elde edilebilmektedir. Bu ise sadece iyon demetli aşındırma ile sağlanabilmekte ve aygıt gelişimi için kritik öneme sahiptir.

Bu motivasyonla bu tez çalışmasında iyon demetli aşındırma işlemlerini kapsayan mikroaygıt üretimi çalışmaları yapılmıştır. Bununla ilgili olarak deneysel çalışmalarda mikroaygıt üretimi için 25 mm x 25 mm boyutunda cam altlık kullanılarak RF magnetron püskürtme sistemi ile ITO ince film kaplaması yapılmıştır. Ardından aygıt yapılarının desenlenebilmesi için ince film transistörlerde kullanılacak olan source-drain ve gate elektrotlarının tasarımını barındıran krom maskeler kullanılmıştır. Litografi işlemleri için maske hizalama sistemi 365 nm UV kaynağı, AZ3007 fotorezisti ve buna uygun developer kullanılmıştır. Litografi işleminden sonra aşındırılma işlemine geçilmiştir. Bu işlem için iyon demetli aşındırma sisteminin (IBE) Argon basıncı 4.4×10^{-4} Torr'a ve Argon akışı 4 sccm'e ayarlanarak aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen aygıt yapıları önce optik mikroskop altında incelenmiş litografi işlemlerinin ve aygıt yapısının geometrisi test edilmiş ardından yapının derinliği, açısı ve keskinliği AFM ile analiz edilmiştir.

İyon demetli aşındırma tekniği ile yapılan çalışmalar sonucunda aşındırma açısına ve aşındırma suresine bağlı olduğu kanıtlanmıştır. ITO için RF magnetron puskurtme tekniği ile belirtilen parametrelerde biriktirme oranı 20 nm/dk bulunmuştur. IBE ile 90°C, 60°C ve 45°C için ITO aşındırma oranları ise 90°C için 25 nm/dk, 60°C için 33.3 nm/dk ve 45°C için 50 nm/dk olarak bulunmuştur. Bu yapılan çalışmalara ek olarak IBE ile 90°C, 60°C ve 45°C için cam aşındırma oranları ise 90°C için 12.5 nm/dk, 60°C için 25 nm/dk ve 45°C için 30 nm/dk olarak bulunmuştur. Bu yapılan çalışmalar sonucunda başta belirlemiş olduğumuz ve çok katmanlı aygıt yapısı için büyük öneme sahip keskin kenarlı ve belirli eğim açısına sahip basamaklı yapılar elde edilmiştir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

Acosta, E., 2021, Thin Films Properties and Applications, Thin Films, IntechOpen, 137–144pp.

Atkinson, N., Morhart, T. A., Wells, G., Flaman, G. T., Petro, E., Read, S., Rosendahl, S. M., Burgess, I. J., & Achenbach, S. (2023). Microfabrication Process Development for a Polymer-Based Lab-on-Chip Concept Applied in Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroelectrochemistry. *Sensors*, 23(14).

Brunner, T. A. (1997) "Impact of Optical Lithography on the Semiconductor Industry," IBM Journal of Research and Development, vol. 41, no. 1.2, pp. 57-68.

Chang, J. P., Lin, Y. S. and Chu, K. (2001). Rapid thermal chemical vapor deposition of zirconium oxide for metal-oxide-semiconductor field effect transistor application. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, Vol. 19(5), pp. 1782-1787.

Chekurov, N., Grigoras, K., Peltonen, A., Franssila, S. and Tittonen, I. (2009). The fabrication of silicon nanostructures by local gallium implantation and cryogenic deep reactive ion etching. *Nanotechnology*, Vol. 20(6), p. 065307.

Cho, E. Y., Zhou, Y. W., Cho, J. Y., & Cybart, S. A. (2018). Superconducting nano Josephson junctions patterned with a focused helium ion beam. *Applied Physics Letters*, 113(2).

Fortunato, E., Barquinha, P., and Martins, R., 2012, Oxide semiconductor thin-film transistors: A review of recent advances, *Advanced Materials*, 24(22):2945–86pp.

Kim, T., & Lee, J. (2022). Optimization of deep reactive ion etching for microscale silicon hole arrays with high aspect ratio. *Micro and Nano Systems Letters*, 10(1), 12.

Krishna-Seshan, 2012, Handbook of Thin Film Deposition, Elsevier B.V.

Łaszcz,A.,Nogala,W.,Czerwinski,A.,Ratajczak,J. & Kącki,J. (2014). Fabrication of Electrochemical Nanoelectrode for Sensor Application Using Focused Ion Beam Technology. *Polish Journal of Chemical Technology*,16(3) 40-44.

Li, P., Chen, S., Dai, H., Yang, Z., Chen, Z., Wang, Y., Chen, Y., Peng, W., Shan, W., & Duan, H. (2021). Recent advances in focused ion beam nanofabrication for nanostructures and devices: Fundamentals and applications [Royal Society of Chemistry]. In *Nanoscale* (Vol. 13, Issue 3).

Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J. (2005), *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, 2nd ed., Wiley-Interscience.

Ortiz-Conde, A., García-Sánchez, F. J., Muci, J., Terán Barrios, A., Liou, J. J., and Ho, C. S., (2013), Revisiting MOSFET threshold voltage extraction methods, *Microelectronics Reliability*, 53(1):90–104pp.

Rooks, M. J. (1999) "Fabrication of 20 nm Silicon MOSFETs Using 193 nm Optical Lithography," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 17, no. 6, pp. 3052-3056.

Sarkar, J., 2014, *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*, Vol. 2.

Wagner, C. (2006) "Ion Beam Etching and Milling," *Materials Science Forum*, vol. 532-533, pp. 249-252.

TEŐEKKÖR

Bu tez çalıőması sűresince engin bilgi ve tecrűbelerinden faydalandığım ve çalıőmamın her aőamasında sağladığı bilimsel katkılarından dolayı danıőman hocam Doç. Dr. İbeyi AVCI' ya ve her fırsatta desteğini esirgemeyen Őzkur KURAN'a teőekkűrlerimi sunarım. Tez çalıőmamın baőlangıcından itibaren, titizlikle yaptđınız geri bildirimler ve Őneriler, çalıőmamı geliőtirmemde kritik bir rol oynadı.

Son olarak, tűm eđitim ve Őđretim hayatımda olduđu gibi yűksek lisans eđitimim sűresince de her tűrlű manevi ve maddi desteklerini esirgemeyen annem ve babama; zorlandıđım her an yanımda olan arkadaőlarıma sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

04/09/2024

Dilara AYGŪN

ÖZGEÇMİŞ

Dilara AYGÜN, Türkiye Cumhuriyeti vatandaşıdır ve eğitim hayatının ilkokul, ortaokul ve lise bölümünü Muğla ili, Bodrum ilçesinde tamamlamıştır. 2021 yılında Ege Üniversitesi Fizik Bölümü'nden mezun olmuş ve aynı yıl yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Yüksek lisans çalışmaları süresince TÜBİTAK 1001 araştırma projesinde bursiyer olarak görev yapmıştır.



