

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MANYETİK ALANDA SIÇRATMA YÖNTEMİYLE  
ÜRETİLEN Ni-Cr ALAŞIMLARININ GERİNİM  
ÖLÇERLERDE KULLANIMI VE UYGULAMASI**

Murat DANIŞMAN

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 03.03.2011  
**Tez Danışman** : Prof.Dr.Nurhan CANSEVER (YTÜ)  
**Juri Üyeleri** : Prof.Dr.Ahmet TOPUZ (YTÜ)  
: Prof.Dr.Mustafa ÜRGEN (İTÜ)  
: Prof.Dr.Serdar SALMAN (MÜ)  
: Prof.Dr.Kubilay KUTLU (YTÜ)

**İSTANBUL, 2011**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. GERİNİM ÖLÇERLER .....	4
2.1 Gerinim Ölçme Teknikleri .....	5
2.2 Gerinim Ölçer Türleri .....	7
2.2.1 Karbon Bileşimli Gerinim Ölçerler .....	7
2.2.2 Bağlı Gerinim Ölçerler .....	8
2.2.3 Folyo tipi gerinim ölçerler .....	8
2.2.4 Yarıiletken Gerinim Ölçerler .....	9
2.2.5 Kaynak Edilebilir Gerinim Ölçerler .....	9
2.3 Gerinim Ölçerlerin Yapıları .....	10
2.3.1 İletken Tel .....	11
2.3.2 Taşıyıcı Altlık .....	11
2.4 Gerinim Ölçer Karakteristikleri .....	12
2.4.1 Gerinim Ölçer Alaşımaları ve Gerinim Hassasiyeti .....	14
2.4.2 Sıcaklık Direnç İlişkisi ve Isıl Direnç Katsayısı (TCR) .....	17
2.5 Gerinim Ölçer Devreleri .....	20
3. GERİNİM ÖLÇER ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	22
3.1 Geleneksel Yöntemlerle Gerinim Ölçer Üretimi .....	22
3.2 İnce Film Gerinim Ölçerler .....	23
3.2.1 İnce Filmler .....	23
3.2.2 İnce Filmlerin Oluşum Mekanizmaları .....	25
3.2.3 Film Büyümesine Altlığın Etkisi .....	29
3.2.3.1 Cam Altlıklar Üzerinde İnce Filmler .....	31
3.2.3.2 Polimer Altlık Üzerinde İnce Filmler .....	32
3.2.4 İnce Film Üretim Basamakları .....	33
3.2.5 İnce Film Üretim Yöntemleri .....	33
3.2.5.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) .....	34
3.2.5.2 Buharlaştırma .....	35
3.2.5.3 Sıçratma .....	36
2.2.5.4 Manyetik Alanda Sıçratma .....	38

3.2.5.5	Sıçratma Hedefleri .....	42
4.	İNCE FİLM TEKNOLOJİSİNDE ISIL İŞLEM .....	45
4.1	Hızlı Isıl İşlem (RTP) .....	46
4.4	Malzeme – Radyasyon Etkileşmesi .....	50
4.5	RTP Sistemlerinde Sıcaklık Kontrolü .....	51
5.	İNCE FİMLERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİ .....	53
5.1	Optik Litografi .....	54
5.2	Desenlerin Aktarılması .....	57
5.3	Aşındırma .....	57
5.4	NiCr’ un Islak Aşındırılması .....	59
6.	İNCE FİMLERDE ELEKTRİKSEL DİRENÇ .....	62
6.1	İnce Film ve Hacimsel Malzemelerin Elektriksel Dirençleri .....	64
6.2	İnce Filmlerde Direncin Ölçülmesi .....	65
6.3	Tabaka Direnci .....	68
7.	Ni-Cr ALAŞIMLARI .....	69
7.1	Ni-Cr Alaşımlarının Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları .....	69
7.2	Ni – Cr İnce Filmler ve Kullanım Alanları.....	71
7.3	NiCr İnce Film Altlıklarının Film Yapısı Üzerine Etkisi .....	72
7.4	Ni – Cr Faz Sistemi .....	74
7.5	NiCr İnce Filmlerin Elektriksel Özellikleri .....	76
7.5.1	Elektriksel Direnç .....	76
7.5.2	TCR değeri .....	78
8.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	81
8.1	Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Altlık Malzemeler .....	83
8.1.1	Cam Altlıklar .....	83
8.1.2	PMMA Altlıklar .....	84
8.2	Deneysel Çalışmalarda Kullanılan İnce Filmlerin Üretim Yöntemleri .....	86
8.2.1	Manyetik Alanda Sıçratma ile İnce filmlerin Biriktirilmesi.....	86
8.2.2	Hızlı Isıl İşlem (RTP) .....	89
8.3	İnce Film Numunelerin Değerlendirilmesinde Kullanılan Karakterizasyon Yöntemleri .....	90
8.3.1	XRD Analizi .....	90
8.3.2	AFM Analizi .....	91
8.3.3	Tabaka Direnci ve Elektriksel Direnç Ölçümleri .....	92
8.3.4	Nano Sertlik Ölçümü .....	92
8.3.5	FESEM ve EDS Analizleri .....	93
8.4	İnce Film Numunelerin Üretimi ve Karakterizasyonu .....	93
8.4.1	Tek Kat Ni ve Cr İnce Filmler .....	93
8.4.2	İki Katlı Ni-Cr İnce Filmlerin Biriktirilmesi .....	95
8.4.3	Nichrome Alaşım hedeften İnce Filmlerin Biriktirilmesi ve Karakterizasyonu... ..	106
8.5	İnce Filmlerin Şekillendirilmesi .....	110
8.5.1	Litografi .....	110
8.5.2	Islak Aşındırma .....	112

8.5.3	Nichrome İnce Filmlerin Gerinim Ölçer olarak Şekillendirilmesi.....	113
8.6	Gerinim Ölçerlerin Değerlendirilmesi.....	115
8.6.1	Cam Altlık Üzerindeki Gerinim Ölçerlerin Değerlendirilmesi .....	115
8.7	Genel Sonuçlar .....	119
9.	TARTIŞMA.....	122
9.1	İki Katlı Ni-Cr ince filmler.....	122
9.2	Nichrome İnce Film Gerinim Ölçerler .....	124
KAYNAKLAR.....		127

## SİMGE LİSTESİ

A	Kesit Alanı
B	pik genişliği
e	Elektronun yükü
E	Elektrik Alan
F	Dört Kontak testi için düzeltme faktörü
G	Galvanometre
J	Akım yoğunluğu
K	Debye Sabiti
L	İletken Boyu
$m_e$	Elektronun kütlesi
$n_e$	Elektron için hacimsel konsantrasyon
P	Basınç
R	Elektriksel Direnç
r	Kontak noktasından olan uzaklık
$R_{SH}$	Tabaka direnci
$S_A$	Gerinim Hassasiyeti
$S_g$	Gerinim duyarlılığı
T	Tane boyutu
$T_a$	Atom sıcaklığı
$T_s$	Altlık sıcaklığı
$T_v$	Birikme işlemindeki buhar sıcaklığı
W	Genişlik
$\alpha$	Gerinim ölçer malzemesinin ısı genleşme katsayısı
$\beta$	Taban malzemesinin ısı genleşme katsayısı
$\Delta R$	Elektriksel direnç değişimi
$\Delta T$	Sıcaklık değişimi
$\varepsilon$	Gerinim
$\lambda$	Hacimsel malzeme içerisinde elektronun ortalama serbest yolu
$\rho$	Özdirenç
$\rho_0$	$\rho_0$ ince filminki ile aynı kafes kusur yoğunluğuna sahip olan hacimsel malzemenin direnci
$\rho_{TS}$	Tane sınırları etkisi ile saçılan elektron
$\rho_{YK}$	Yüzey kabalığından saçılan elektron
$\rho_{YS}$	Film yüzeyi etkisi ile saçılan elektron
v	Elektron için ortalama hız
u	Poisson Oranı

## KISALTMA LİSTESİ

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
ASTM	Amerikan malzeme ve test topluluğu
CMOS	Tümleşik metal oksit yarıiletken
DC	Doğru akım
EDS	Enerji dağılım spektroskopisi
FBB	Fiziksel buhar biriktirme
FESEM	Alan etkili tarama elektron mikroskobu
FWHM	Pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik
GDMS	Işıltılı boşalım kütle spektrometresi
Hmk	Hacim merkezli kübik
ICP	İndüktif Eşleşmiş Plazma
IR	Kızıl ötesi (infrared)
JCPDF	Toz kırınım desenleri için birleşmiş komite
MMA	Metil meta akrilat
PDF	Toz kırınım dosyası
PMMA	Poli metil meta akrilat
Ppm	Milyonda bir tane
RF	Radyo frekansı
RTP	Hızlı ısı işlem
TCR	Isıl direnç katsayısı
UV	Morötesi (morötesi)
XRD	X ışınları kırınımı
Ymk	Yüzey merkezli kübik

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Folyo tipi gerinim ölçerin yapısı (ASTM E 251 – 92)..... 10
Şekil 2.2	Wheatstone köprüsünün şematik gösterimi. .... 21
Şekil 3.1	Film büyüme modelleri. a)Adacık tipi, Volmer-Weber modeli b)tabaka ve adacık modeli, Stranski-Krastanov modeli c)tabakalı büyüme - epitaksiyel büyüme, Frank van der Merwe (SreeHarsha, 2006) ..... 28
Şekil 3.2.	Thornton modelini göstermektedir. Şekilde $T_s/T_m$ değeri ince film büyümesi sırasında gelen atomların sıcaklığına karşı altlık sıcaklığının oranını ifade etmektedir (Arnoldussen ve Nunnelley, 1992). .... 29
Şekil 3.3.	Genel FBB mekanizması. .... 35
Şekil 3.4.	Buharlaştırma sistemi..... 36
Şekil 3.5.	Sıçratma Sisteminin yapısı (Carlson G.L. II ve Warner R., 1979) ..... 37
Şekil 3.6.	manyetik alanda sıçratma sistemi (Wasa vd., 2004)..... 39
Şekil 3.7	Günümüzde yaygın olarak kullanılan düzlem magnetronun yapısını göstermektedir (Wassa,1992) ..... 41
Şekil 3.8	Dengesiz tipteki manyetik alanda sıçratma sistemleri ..... 42
Şekil 3.9	Farklı çap ve şekillerdeki sıçratma hedefleri. (Wasa vd., 2004)..... 43
Şekil 3.10	Farklı bileşimlerde hazırlanabilecek sıçratma hedeflerinin oransal dağılımının şematik gösterimi (Wasa vd., 2004) ..... 43
Şekil 4.2	RTP sistemi ve bileşenlerinin şematik gösterimi (Doering ve Nishi, 2007)..... 49
Şekil 4.3	RTP sisteminde izotermal ısıtma çevriminde ısınma soğuma hızlarını göstermektedir(Holloway ve Mcguire, 1995)..... 50
Şekil 5.1	Fotokimyasal kaplı numunenin litografi işlemi [2]. .... 55
Şekil 5.2	Litografik desen oluşturma prosesi a) ince film biriktirilmiş numune b)fotokimyasalın uygulanması c)fotomaske üzerinden UV uygulanması d)fotokimyasal üzerindeki desenin banyo edilmesi e)ince filmin kimyasal olarak aşındırılması f) fotokimyasalın temizlenmesi (Franssila, 2004)..... 59
Şekil 6.2	Farklı kontaklarda akım dağılımı a)Tek kontak b) iki kontak c) dört kontak durumlarında sonsuz büyüklükteki numune için akımve voltaj durumları(Schroder., 2006)..... 67
Şekil 7.1	Ni-Cr ‘ a ait denge diyagramını göstermektedir. .... 75
Şekil 8.1	Cam altlığa ait EDS analiz sonucunu göstermektedir..... 84
Şekil 8.2	Cam altlığa ait yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucunu göstermektedir ..... 84
Şekil 8.3	PMMA althğa ait yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucunu göstermektedir. .... 86
Şekil 8.4	Ni-Cr ince filmlerin üretilmesinde kullanılan manyetik alanda sıçratma sistemini göstermektedir. .... 87
Şekil 8.5	Biriktirme işlemlerinde kullanılan Ni ve Cr biriktirme hedeflerini göstermektedir..... 88
Şekil 8.6	Biriktirme işlemlerinde kullanılan Nichrome alaşım hedefi göstermektedir... 89
Şekil 8.7	Isıl işlem deneylerinde kullanılan RTP sistemi. .... 89
Şekil 8.8	Dört kontak test sistemini göstermektedir. .... 92
Şekil 8.9	400 W biriktirme gücü ile üretilen Ni ince filmin XRD analizini göstermektedir..... 94
Şekil 8.10	400 W biriktirme gücü ile üretilen Cr ince filmin XRD analizini göstermektedir..... 94
Şekil 8.11	İki katlı numunelere 600 °C’ de 180 saniye boyunca uygulanan ısıl işlemi göstermektedir..... 97
Şekil 8.12	Çizelge 5.12’ de belirtilen beş farklı bileşimdeki 500 nm kalınlığa sahip numunelerin ısıl işlem öncesi XRD analizleri. .... 97

Şekil 8.13	1-5 numaralı numunelerin ısıtılma işlem öncesi tabaka dirençlerini göstermektedir.....	98
Şekil 8.14.	1 numaralı numunenin RTP ile ısıtılma işlem sonrası XRD analizini göstermektedir. 98	
Şekil 8.15.	1 numaralı örneğe ait FESEM görüntüsü.....	99
Şekil 8.16	1 numaralı örneğin ısıtılma işlem sonrası AFM analizini göstermektedir.....	100
Şekil 8.17	2 numaralı numunenin XRD analizini göstermektedir.....	100
Şekil 8.18	2 numaralı örneğe ait FESEM görüntüsü.....	101
Şekil 8.19	2 numaralı örneğe ait AFM görüntüsü.....	101
Şekil 8.20	3 numaralı numunenin XRD analizini göstermektedir.....	102
Şekil 8.21	3 numaralı örneğin $2\theta = 43.40^\circ$ deki kırınım pikinin ayrıştırılmış halini göstermektedir.....	102
Şekil 8.22	3 numaralı örneğe ait FESEM görüntüsü.....	103
Şekil 8.23	3 numaralı örneğe ait AFM analizi.....	103
Şekil 8.24	4 numaralı numunenin XRD analizini göstermektedir.....	104
Şekil 8.25	4 numaralı örneğin $2\theta = 43.40^\circ$ deki kırınım pikinin ayrıştırılmış halini göstermektedir.....	104
Şekil 8.26	4 numaralı örneğe ait FESEM görüntüsü.....	105
Şekil 8.27	4 numaralı örneğe ait AFM analizini göstermektedir.....	105
Şekil 8.28	Cam üzerine biriktirilen Nichrome ince filmin XRD analizini göstermektedir.....	107
Şekil 8.29	Cam üzerine biriktirilen 500 nm kalınlığında Nichrome filmin kırık yüzey görüntüsünü göstermektedir.....	107
Şekil 8.30	Cam altlık üzerine biriktirilen Nichrome ince filmin yüzey görüntüsünü göstermektedir.....	108
Şekil 8.31	Isıtılma işlem öncesi 100 nm Cr ve 400 nm Ni içeren iki tabakalı Ni-Cr ince film ile alaşım Nichrome hedeften sıçratılan 500 nm ince filmin XRD analizlerini göstermektedir.....	109
Şekil 8.32	Nichrome hedeften biriktirilen ve $600^\circ\text{C}$ 'de 180 sn RTP ile ısıtılma işlem gören numune ile 2 numaralı numunenin XRD analizlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.....	109
Şekil 8.33	PMMA üzerine biriktirilen Nichrome ince filmin AFM görüntüsünü göstermektedir.....	110
Şekil 8.34	Fotokimyasal kalınlığının homojen olmaması durumunda ince filmlerde oluşan çatlakları göstermektedir.....	111
Şekil 8.35	İnce filmleri şekillendirmede kullanılan pozitif ve negatif maskeleri göstermektedir.....	112
Şekil 8.36	Şekillendirme işlemi ardından alınan yüzey görüntü ve oluşturulan ince film hatların kalınlıklarını göstermektedir.....	113
Şekil 8.37	Biriktirme öncesi ve sonrasında yüzeyinde şekillendirilmiş fotokimyasal bulunduran PMMA numuneyi göstermektedir.....	114
Şekil 8.38	PMMA üzerinde şekillendirilmiş NiCr ince filmi göstermektedir.....	115
Şekil 8.39	Cam altlık üzerinde üretilen gerinim ölçeri göstermektedir.....	115
Şekil 8.40	Deneysel çalışmalarımızda üretilen ince film dirençler ile oluşturulan Wheatstone köprüsünü göstermektedir.....	117
Şekil 8.41.	Ticari gerinim ölçer ile cam üzerinde sabit yükler kullanılarak yapılan analizle elde edilen gerinim değerleri.....	118
Şekil 8.42	Cam üzerinde üretilen 500 nm Nichrome gerinim ölçerin gerinim karakteristik eğrisini göstermektedir.....	118
Şekil 8.43	Farklı Ni ve Cr oranlarına sahip numunelerin Ni ve Cr içeriklerinin film kalınlığı boyunca değişimini göstermektedir.....	120

Şekil 8.44 Farklı Ni ve Cr içeriklerine sahip numunelerin 600 °C’ de 180 sn boyunca ısıtıl işlem yapılan numunelerin işlem sonrası elektriksel dirençlerini göstermektedir..... 121

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Farklı bileşimlerdeki gerinim ölçer alaşımlarının ticari adlarını ve gerinim hassasiyetlerini göstermektedir (Window, 1992, Topuz, 1993). .... 16
Çizelge 2.2	Gerinim ölçer alaşımları ve taşıyıcı altlıklarının sıcaklık – çalışma tipi ilişkisi (Window, 1992). .... 18
Çizelge 3.1	Farklı tipteki ince filmlerin kullanım alanları (Freund ve Suresh, 2004). .... 25
Çizelge 3.2	İnce film üretim yöntemlerinin üretim yöntemine sınıflandırılmasını göstermektedir (Bach vd., 2006). .... 34
Çizelge 5.1	NiCr' un farklı atlıklar üzerinde farklı çözelti ve bileşimler kullanılarak aşındırılması ile ilgili parametreleri göstermektedir (Walker ve Tarn, 1991). .61
Çizelge 8.1	İki katlı Ni/Cr ince filmlerin biriktirme parametrelerini göstermektedir. .... 95
Çizelge 8.2	İki katlı tabakalar halinde üretilen ince filmlerde Cr ve Ni kalınlıkları. .... 96
Çizelge 8.3	Nichrome hedeften sıçratılarak biriktirilen ince filmlerin biriktirme parametrelerini göstermektedir. .... 106
Çizelge 8.4	Farklı bileşimlerdeki Ni-Cr ince filmlerin özellikleri. .... 120

## ÖNSÖZ

Bilimsel ve akademik kariyerimin en önemli basamaklarından birini tamamladığım bu çalışmamın gerçekleşmesi ve bilimsel açıdan kıymetli hale gelebilmesi, hiç şüphesiz benim çalışmam kadar, bana sabırla yol gösteren başta kıymetli ve saygı değer Hocam Prof. Dr. Nurhan Cansever, Prof. Dr. Ahmet Topuz, Prof. Dr. Mustafa Ürgen' in katkıları ile olmuştur. Kendilerine en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca deneysel çalışmalarımda gerçekleştirdiğim analizler için imkan sağlayan Sayın Prof. Dr. Sabriye Pişkin hocama, RTP sisteminin tasarlanmasında yardımcı olan ve üretimini gerçekleştiren Sayın Tarık Özdemir' e, deneysel çalışmaların bir bölümünde yardımcı olan kıymetli arkadaşlarım Burak Birol' a ve Yeliz Başaran' a çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmam süresince Araştırma Görevlisi olarak birlikte çalıştığım Yıldız Teknik Üniversite' sine, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği' nin kıymetli hocalarına teşekkür ederim.

Son olarak benden hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen ve hep yanımda olan aileme ve sevgili eşim Yrd. Doç. Öznur Danışman' a teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2011

## ÖZET

### MANYETİK ALANDA SIÇRATMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ni-Cr ALAŞIMLARININ GERİNİM ÖLÇERLERDE KULLANIMI VE UYGULAMASI

Günümüz teknolojisinin ilerlemesinde en önemli yapı taşlarından biri olan yarı iletken teknolojilerinin ve malzemelere uygulanan yüzey işlemlerinin temeli, ince film teknolojisidir. İnce film teknolojisinin teknolojik bakımdan bu kadar önemli oluşu, geçmiş ve günümüzde üzerinde çok sayıda bilimsel eser hazırlanmasına ve dolayısı ile de hızla gelişmesini ve yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Doktora çalışmamızın ana hedefi, doğrudan parça üzerinde ince film NiCr gerinim ölçerlerin üretiminin incelenmesidir. Bu hedefe ulaşırken kullanılacak yol olarak, günümüz teknolojisinde en sık kullanılan ince film üretim yöntemi olan manyetik alanda sıçratma, yarıiletken teknolojilerinde proses gereği en çok tercih edilen ısıl işlem yöntemi olan RTP ve şekillendirme yöntemi olan litografi seçilmiştir. Bu sayede elde edilen deneysel verilerin doğru olması, güncel yöntemlerle örtüşmesi, karşılaştırılabilir olması ve sonraki çalışmalara kaynak sağlayabilecek değerde olması amaçlanmıştır.

Çalışmanın deneysel bölümünde literatürde sıkça rastlananın aksine ayrı ayrı hedefler kullanılmış ve iki tabakalı ince filmler elde edilerek Ni-Cr bileşimlerinin doğrudan tabaka kalınlıkları ile arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca NiCr alaşım hedef kullanılarak üretilen ince filmler ile, tabakalı ince filmlerden bileşimi alaşım hedefinkine yakın olanlar, ısıl işlem sonrası oluşan fazlar bakımından karşılaştırılmıştır. Öte yandan, alaşım hedeften cam üzerinde üretilen ince filmler litografik olarak şekillendirilerek gerinim ölçerler üretilmiş ve doğrudan üretildikleri cam üzerinde elektriksel olarak karakterize edilmiş ve gerinim ölçer olarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** NiCr alaşımları, gerinim ölçerler, manyetik alanda sıçratma, Hızlı ısıl işlem (RTP).

## **ABSTRACT**

### **NiCr THIN STRAIN GAGE PRODUCTION USING MAGNETRON SPUTTERING AND THEIR APPLICATIONS**

Thin film technologies are one of the key processes of today's technological advances and most important production method of Semiconductor Technologies and Surfaces Science. Today and in the past, there had been vast amount of studies focused on thin film technology and as a result it developed rapidly and became wide spread.

The aim of this Doctoral study is to investigate the NiCr thin film strain gage production directly on sample itself. For reaching this goal, the production steps were chosen as magnetron sputtering, which is wide spread and very popular in semiconductor industry, the RTP method which is a favorable semi-conductor thermal treatment tool and lithography for thin film patterning. By using these methods, it was aimed to collect the experimental data which would be accurate and comparable to previous results.

In experimental studies, contrary to previous studies in the literature, Ni and Cr were deposited from individual targets to form two layer thin films. The relationship between the layer thickness and film composition was investigated. Also the phase formation after thermal treatment of thin film deposited from alloy target and two layered films with similar compositions were investigated. The thin films deposited using alloy target was also lithographically patterned to produce strain gages and their characteristics were investigated.

**Keywords:** NiCr alloys, Strain gages, Magnetron sputtering, Rapid thermal process (RTP).

## 1. GİRİŞ

Mühendislikte malzemelerin, uygulanan bir yüke veya kuvvete karşı gösterdikleri dayanıklılık gerilme terimi kullanılarak tanımlanır. Yapıların ve makinelerin ekonomik olabilmeleri için taşıma, üretim ve genel uygunluk anlamında fonksiyonel kısımlarının mümkün olduğunca küçük ve hafif tutulması istenir. Bu nedenle günümüz mühendislik ürünleri ve tasarımları, mümkün olan en ekonomik şekilde ve en yüksek yüklere dayanabilecek şekilde tasarlanır. Dolayısı ile gerek tasarımların testlerinde, gerekse üretimlerinde gerilme ve gerinimlerin göz önünde bulundurulması ve bunların ölçülmesi mühendislik anlamında son derece önemli olmuştur (Jain ve Chitale, 2010).

Gerinim ölçerlerin yaygın olarak kullanılmaya başlanması, II. Dünya Savaşı yıllarında havacılık endüstrisinde uçakların yapısal bütünlüklerinin test edilmesi amacıyla gerçekleşmiş ve bu alanda önemli başarılar kaydedilmiştir. 1943 yılında Amerikan Hava Araştırmaları Kurumu müdürü Prof. Reed yazdığı bir mektupta “Önemsiz gibi görünen bir tel topluluğu ve bir parça kâğıdın, askeri uçakların başarısına büyük katkısı olduğuna hiç şüphe yoktur” şeklindeki ifadesi ile gerinim ölçerlerin önemini vurgulamıştır. Sonraki yıllarda gerinim ölçerlerin havacılık endüstrisine katkıları devam etmiş ve zamanla diğer endüstri dallarına da yayılmıştır (Hannah ve Reed., 1992).

“Bir tel topluluğu ve bir parça kağıt” sözünden de anlaşılacağı gibi gerinim ölçerlerin fiziksel yapıları oldukça basittir. Bu basit yapılarına karşın, gerinim ölçerlerin günümüz mühendisliğinde üstlendikleri görev oldukça büyüktür. Gerinim ölçerlerin uygulamaları oldukça kolaydır ve temel yüzey gerinimlerinin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılır. Ancak zor uygulama koşulları altında yapılan ölçümler için gerinim ölçer karakteristiklerinin iyice anlaşılması gerekir.

Gerinim ölçerleri ilgilendiren özelliklerin birçoğu gerinim ölçer üretildiği malzemeye ve kullanılan gerinim ölçer tipine bağlıdır. Uygulamada basitçe birer direnç teli olan gerinim ölçerler, elektriksel direnci yüksek olan tüm malzemelerden üretilebilir gibi düşünülse de, gerçekte gerinim ölçer uygulama alanına göre bazı karakteristiklerin ortaya konulması gerekir.

Gerinim ölçer malzemelerinden Ni-Cr, en çok tercih edilen gerinim ölçer alaşımlarından bir tanesidir. Alaşımın son derece iyi yorulma davranışına (Cu-Ni alaşımından daha iyi), çok iyi kararlılığa sahiptir. Ayrıca genel performans karakteristikleri yaygın olarak kullanılan tüm diğer gerinim ölçer alaşımlarından daha iyidir. Isıl karakteristiği geniş bir sıcaklık aralığı için

uygun olup, gerinim ölçerin belki de en önemli karakteristiği olan gerinim hassasiyeti belirli sınırlar içerisinde ayarlanabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde Ni-Cr alaşımları hassas algılayıcılarda da yaygın olarak kullanılır. Daha önce de vurgulandığı üzere, gerinim ölçerler gerçekte birer direnç telidir ve direnç olarak kullanılacak bir malzemenin öz direncinin yüksek olması beklenir. Ni-Cr' un diğer alaşımlara göre yüksek elektriksel dirence sahip olması, bu malzeme ile daha küçük gerinim ölçerlerin tasarlanabilmesine de imkan verir (Window, 1992).

Yaptığımız bu çalışmada, gerinim ölçerlerde yaygın olarak uygulananın aksine, ince film gerinim ölçerler doğrudan gerinimi ölçülecek parça üzerinde ve ticari gerinim ölçerlerden çok daha ince bir yapıda üretilmiştir. Gerinim ölçerin doğrudan parça üzerinde üretilmesi, öncelikle her tür yalıtkan malzeme üzerinde ve istenilen her şekle sahip olarak üretilebilmesini mümkün kılar. Bunun yanı sıra, her hangi bir taşıyıcı altlık ve yapıştırma elemanını kullanmayışı uygulama sırasında oluşabilecek bir takım olumsuzlukları da ortadan kaldırır. Ayrıca karmaşık gerinim analizlerinde amaca uygun gerinim ölçer desenleri tasarlanabilir.

Bunlara ilave olarak, gerinim ölçerlerin üretimi amacıyla seçtiğimiz Ni-Cr alaşımının kullanımı sadece gerinim ölçerle sınır değildir. Ni-Cr mikro elektronik, MEMS gibi ince filmlerin yaygın olarak kullanıldığı alanlarda direnç malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çalışmamızda seçtiğimiz üretim yöntemi olan manyetik alanda sıçratma ve RTP, günümüz mikro elektronik ve Si teknolojilerinde örneklerine sıkça rastlanan ve bu alanda kendini kanıtlamış bir üretim yöntemleridir. Dolayısı ile çağdaş ince film üretim yöntemlerine uygun olarak Ni-Cr ince filmlerin incelenmesi bu malzemenin ince film endüstrisinin diğer uygulamalarına yönelik verilere de ışık tutmaktadır (Jaeger, 2002).

Bu amaçlara uygun olarak doktora çalışmasının teorik bölümü kapsamında, gerinim ölçerlerin türleri ve yapımında kullanılan alaşımlar, geleneksel gerinim ölçer yöntemleri ve çalışmamızda üretim yöntemi olarak seçtiğimiz ince film süreçleri incelenmiştir. Çalışmanın deneysel bölümü, yaptığımız deneysel çalışmaların ilerleyişine uygun olarak kendi içerisinde ikiye ayrılmıştır. Birinci bölüm, ayrı Ni ve Cr hedeflerden cam altlık üzerinde sıçratma yöntemi kullanılarak üretilen iki katlı Ni-Cr ince filmlerdeki RTP ile ısıl işlem sonucu oluşan fazların incelenmesine ayrılmıştır. İnce filmlerdeki Ni, Cr oranı, ince filmi oluşturan tabakaların kalınlıklarının değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu değişime uygun olarak yapısal farklılıklar elektriksel ve mekanik özelliklerle değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmanın ikinci bölümü, PMMA (poli metil meta akrilat) ve cam altlıklar üzerine manyetik alanda sıçratma yöntemi ile biriktirilen Nichrome (Ağırlıkça, %80Ni; %20Cr) ince filmlerin litografi ile şekillendirilmesi ile gerinim ölçer üretimine ayrılmıştır. Üretilen gerinim ölçerler standarda uygun olarak kurulan test düzeneği ile test edilmiş ve aynı malzeme ve alışımdan yapılmış ticari gerinim ölçerler ile karşılaştırılmıştır.

## 2. GERİNİM ÖLÇERLER

Gerinim ölçerler mühendislik ve diğer uygulamalı çalışmaların birçoğunda, gerinim adı verilen büyüklüğün ve türlerinin ölçümünde kullanılır. Gerilme ve gerinim kavramları bir malzemenin mekanik davranışının ortaya konmasında kullanılan en önemli büyüklüklerin başında gelir. Yük altındaki malzemenin yüke olan tepkisi kırılma ya da deforme olma şeklinde görülür. Deformasyon, malzemenin asıl şeklini kaybetmesi olarak tanımlanmaktadır ve şekil değişiminin kalıcı olması ya da olmamasına bağlı olarak plastik ya da elastik olarak adlandırılır. Malzemede gözlenen bu deformasyon olayının temelinde gerinim adı verilen büyüklük yatar. Herhangi bir cismin üzerine etkiyen kuvvetler, gerilme olarak malzeme üzerinde kendisini gösterir ve gerçekte gerinim olarak tanımlanan etkinin nedenini oluşturur. Söz konusu büyüklükler, mühendislik alanlarının hemen hepsinde ortak olarak kullanılmakta ve çeşitli ürünlerin geliştirilmesi ve tasarlanmasında sürekli olarak gözetilmektedir.

Günümüz mühendisliğinde bu denli büyük öneme sahip olan gerilme ve gerinim dağılımlarının tespitine yönelik farklı bir takım deneysel metotlar geliştirilmiştir. Bu deneysel metotlar, hem bir takım teorik öngörülerin doğrulanmasını sağlamakta, hem de bilinen matematiksel metotların uygun olmadığı hallerde gerilmenin değerlendirilebilmesine imkân vermektedir. Gerinim ölçümü oldukça karmaşık bir hesap sistemini içerir ve bu nedenle gerilmenin dolaylı ya da doğrudan ölçümüne yönelik birçok cihaz ve sistem geliştirilmiştir. Bu sistem ve yöntemlere örnek olarak fotoelastisite, gevrek kaplama, X ışınları sayılabilir. Bu yöntemlerin hemen hepsi gerilme konusunda bilgi verebilse de, tüm uygulamalarda ve her şartta en iyi sonuçları verebilen tek bir sistem bulmak oldukça güçtür (Robinson, 2006, Window, 1992; Hosford, 2005).

Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, gerinimin algılanmasının altında yatan prensip aslında gerinim ölçerlerin çalışma prensibi ile aynıdır. Söz konusu prensip oldukça uzun zamandır bilinmekle birlikte, gerinim ölçerlerin ticarileşmesi oldukça yakın bir geçmişte gerçekleşmiştir. Gerinim ölçerlerin çalışma prensibi ilk kez, 1856 yılında Lord Kelvin tarafından ortaya atılmıştır. Lord Kelvin araştırmalarında, üzerinde çalıştığı bir takım iletkenlerin gerilme altında elektriksel dirençlerini değiştirdiklerini tespit etmiştir. Daha sonra boyutlarında değişiklik yapılan bir iletkenin elektriksel direncindeki değişim üzerinden gerinimin hesaplanabileceği fikri olgunlaşmış ve günümüzde kullanılan gerinim ölçerlere ulaşılmıştır. Yapısal olarak bir gerinim ölçer, basitçe bir deformasyonu, çökmeyi ve gerilmeyi elektriksel sinyallere dönüştüren pasif bir algılayıcıdır. Fiziksel olarak ise, gerilme altında olmaksızın direnci bilinen ve çok hassas bir elektriksel dirençtir. Kullanımları II. Dünya

Savaşı yıllarında yaygınlaşan gerinim ölçerler, farklı metal ve alaşımlarından üretilebilmektedir. Prensipleri aynı olmakla birlikte çalışma şekilleri birbirlerinden oldukça farklı birçok gerinim ölçer tipi geliştirilmiştir. İnce film gerinim ölçerler, yarıiletken gerinim ölçerler, optik ve mekanik gerinim ölçerler gibi gerinim ölçer tipleri günümüzde yaygın olarak kullanılan gerinim ölçerlerin başında gelir (Dally ve Riley, 1978; Robinson, 2006; Window, 1992; Murray ve Miller, 1992).

Çok fark edilmese de gündelik yaşamın birçok alanında insanlar, gerinim ölçerleri doğrudan ya da dolaylı olarak sürekli kullanırlar. Sıkça rastlanılan, modern tasarımlı, ısı değişimlerinden etkilenmeyen, bağlı direnç tipindeki gerinim ölçerler basit yapılarına karşı oldukça gelişmiş ölçüm cihazlarıdır. Gerçekte yüksek elektriksel dirence sahip bu cihazlar günümüzde doğru, dayanıklı, kararlı ve kolay kullanıma sahip algılayıcılar olarak değerlendirilmektedir. Kullanımları ve uygulamaları oldukça kolay, düşük maliyetli ve farklı amaçlar için çeşitli şekillerde üretilebilen bu dirençler aynı zamanda, oldukça geniş bir sıcaklık aralığında da hizmet verebilirler. Bu üstün özellikleri gerinim ölçerleri ticari olarak sürekli geliştirilen bir ürün haline getirmiştir. Geçmiş ve günümüzde gerinim ölçerlerle ilgili yapılan çalışmaların birçoğu, metalurjik olarak daha iyi özelliklere sahip elektriksel direnç alaşımlarının incelenmesine odaklanmıştır. Bu sayede gerilme ölçümüne ihtiyaç duyulan yerlerde ve farklı birçok uygulamada gerinim ölçer kullanımı hızla artmıştır (Robinson, 2006; Window, 1992; Hosford, 2005).

## 2.1 Gerinim Ölçme Teknikleri

Yapısal bir sistemde oluşan gerilmenin deneysel olarak ölçülebilmesi ancak sistem üzerinde oluşan gerinimin birtakım eğilme ölçüm teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmesi ile sağlanır. Eğilme, doğrudan söz konusu gerinim ile ilişkilidir ve bu nedenle genel uygulamalarda gerinim ölçümlerinde kullanılırlar. Hesaplama sonucunda elde edilen ölçümler, gerilme – gerinim eğrileri yardımıyla ilişkilendirilir.

Gerinim ölçümleri için farklı metotlar geliştirilmiştir. Mekanik olarak gerinimin doğrudan ölçümü, bir metrenin belirli aralıklarla ayrılması veya bir karşıt referans bandının kullanımı ile gerçekleştirilebilir. Kısa mesafeli ölçümler için ise, mekanik ölçekler kullanılabilir. Ancak bu yöntemde sürtünme, titreşim ve yerleştirme gibi birtakım problemlerin yanı sıra ölçüm değerlerinin okunmasında da güçlüklerle karşılaşılabilir. Mekanik ölçüm tekniklerinden bir diğeri ise, çizik ölçerdir. Çizik ölçme tekniğinde gerinim miktarının hesaplanabilmesi için parlatılmış bir altlık üzerinde oluşan çiziklerden faydalanılır ve çiziklerdeki değişim gerinimin büyüklüğünün belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntemde oluşan çizikler oluş zamanından çok

oluşan olayların oluş şekline bağlı olduklarından dinamik olayların şiddetini ve şeklini belirlemede kullanılırlar. Çizilmiş altlık mikroskop altında incelenmesi ile olay başına oluşan gerinimlerin büyüklüğü bulunabileceği gibi, istendiğinde gerinimsiz halin işaretlenmesi için sıfır gerinim çizgisi de tespit edilebilir.

Gerinim ölçümlerinde kullanılabilen bir başka sistem ise optik prensiplerine dayanır. Aynalar kullanılarak sağlanabilecek optik büyütmelemlerle yapılan ölçümlerde oldukça önemli gelişmeler kaydedilebilmiş olsa da, yine de yöntemde mekanik parçalara ihtiyaç duyulduğundan birçok uygulama için yeterli olamamaktadır. Ancak laboratuvar ortamında bu tip mekanik ve optik büyütme mekanizmasına sahip sistemler başarıyla kullanılabilir. Mekanik sisteme ihtiyaç duymayan bir başka optik gerinim ölçüm sistemi ise, polarize ışık demetlerinden faydalanır. Polarize bir ışık demeti, elastik gerinim altındaki saydam izotropik bir malzeme üzerine düşürüldüğünde, asıl gerinim düzlemlerinde polarlanmış iki ışık ışınına ayrılır. Çift kırıcılık özelliğine sahip malzemelerde malzemenin kırılma indisi, malzemedeki gerinime bağlı olarak değişir. Bu nedenle oluşacak girişim deseni eksenler boyunca oluşan gerinimle ilişkilendirilebilir. Ayrıca lazerler ve/veya elektronik algılayıcı içeren optik teleskopların kullanımı, harekete bağlı oluşan izlerin incelenmesine ve uzaktan yer değiştirme miktarlarının hesaplanabilmesine olanak tanımaktadır. Bu tip algılayıcılardan iki tanesinin kullanımı yer değiştirme miktarı ile gerinimin ölçülebilmesini de sağlar. Uzaktan ölçüm yapılabilmesine imkan tanıyan bu teknik, genellikle çevresel nedenlerden dolayı tek bir noktadan gerinim ölçümü için oldukça pahalı bir yöntemdir.

Optik ve mekanik yöntemlerden başka, belli bir gerinim değerinde çatlayacak şekilde hazırlanmış yüzey kaplamaları, birçok yapısal malzemenin elastiklik sınırları içinde oluşan maksimum gerinim değerinin ve asıl gerinim yönlerinin bulunmasında kullanılabilir. Uygun kalibrasyon ve iyi kontrol edilmiş ortam koşullarında bu tip kaplamalarla kantitatif sonuçlar almak mümkündür. Ancak bu teknik, kaplama malzemesinin doğası gereği ortamlara bağlı olarak kullanılabilirliğinin sınırlı olması nedeniyle gerinim ölçümü için yaygın bir yöntem olarak kabul edilmemektedir.

Yapısal sistemlerdeki gerinimler ise genellikle direnç, sığa gibi elektriksel elemanların indüktif etkileri, optik etkilere bağlı girişim, saçılma ve kırınım olaylarının ve ısı yayılımının tespiti ile de ölçülebilmektedir. Ölçüm özellikle gerilmelerin geniş bir alanda ve uniform dağılması durumunda oldukça kolaydır. Ancak bölgesel olarak toplanmış ve durum değişikliği ile değişen gerilmelerin tespiti oldukça güçtür. Bu tip ölçümler için elektriksel

gerinim ölçerler küçük boyutları, yüksek hassasiyetleri ve yüksek kararlılıkları nedeniyle en uygun çözümdür.

Farklı şekillerdeki gerinim ölçerler elektriksel gerinim ölçerlerin gelişimi süresince elektriksel, kapasitif veya indüktif değişimlerin gerinim veya yer değiştirme miktarıyla ilişkilendirilmesi amacıyla kullanılmışlardır. Bu tip gerinim ölçerler, yapıları ve kullanım şekilleri gereği bir takım özel ekipmanlara ihtiyaç duyarlar.

Elektriksel gerinim ölçerler, boyları 25 mm ile 0.2 mm arasında değişen metal veya yarıiletken malzemelerdir. Bu malzemeler sıcaklık değişimine mümkün olan en az ve gerinime en büyük direnç değişimini gösterecek şekilde farklı alaşımlardan üretilirler. Yarıiletken gerinim ölçerler, metal gerinim ölçerler ile karşılaştırıldıklarında gerinim altında çok büyük direnç farkı göstermelerine karşı sıcaklık değişikliklerine hassasiyetleri çok yüksektir. Bu nedenle yarıiletken gerinim ölçerler daha çok ısıl değişimlerin uygun tasarım altında ihmal edilebilir düzeye indirildiği dönüştürücülerde kullanılırlar. Elektriksel direnç gerinim ölçerleri, gerinimin analizi amacıyla birçok deneysel uygulamada kullanılmaktadırlar.

Kapasitif gerinim ölçerler, elektriksel gerinim ölçerler ile karşılaştırıldıklarında hem daha büyük hem de daha ağırdırlar. Daha çok sıcaklığın çok yüksek olduğu ve bu nedenle elektriksel gerinim ölçerlerin kullanılmadığı yerlerde tercih edilmektedirler.

İndüktif gerinim ölçerler, manyetik bir devrede bulunan hava boşluğu boyutunun değişimine bağlı olarak, devre indüktansının devrenin tasarımına oranla çok büyük olması prensibine göre çalışırlar. İndüktansta oluşan büyük değişim, boşluk boyunca oluşan kuvvetin büyüklüğü ile ilişkilidir. Bu nedenle hassas indüktif gerinim ölçerler ancak çok büyük yüklemelerin söz konusu olduğu büyük yapılarda kullanılabilirler. Genellikle büyük presleme sistemlerinde herhangi bir elektrik donanımına ihtiyaç olmaksızın aşırı yüklemeye göstergesi olarak kullanılırlar (Young, 2001).

## **2.2 Gerinim Ölçer Türleri**

Gerinim ölçerlerin tarihi oldukça eskilere dayandığından birbirlerine göre farklı avantajları bulunan bir dizi gerinim ölçer tipi denenmiştir. Bu tip gerinim ölçerler üretildikleri alaşımlar ve tasarlandıkları şekil bakımından birbirlerinden oldukça farklı olabilecekleri gibi, yapısal olarak da birbirlerinden farklı olabilirler.

### **2.2.1 Karbon Bileşimli Gerinim Ölçerler**

Gerinim ölçerlerin ilk önemli kullanımı Charles Kearns tarafından 1930' ların ortasında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu gerinim ölçerler yüksek performanslı pervanelerin

tasarlanmasında ve geliştirilmesinde kullanılmıştır. Bu tip gerinim ölçerler o yıllarda elektronik devrelerdeki dirençlerden esinlenilerek karbon bileşimli dirençlerden üretilmişlerdir. Dirençler, pervane kanatlarına merkezci kuvvetlere dayanabilecek kadar sıkı yapıştırılarak kanatlarda gerinim ölçümü sağlamıştır. Ancak bu tip kullanımda söz konusu malzemenin elektriksel kararlılığının zaman ve sıcaklığa bağlı olarak çok düşük olduğu görülmüş ve zamanla çok yavaş değişen gerinim değerlerinin ölçümü mümkün olamamıştır.

Karbon dirençlerin güncel halleri, yalıtkan şeritler üzerine koloidal karbon içeren boyalar ile üretilen filmler şeklindedir. Ancak bu tip yeni türlerde de, dinamik ölçümlerdeki ölçüm belirsizlikleri tamamen aşılamamıştır.

### **2.2.2 Bağlı Gerinim Ölçerler**

İlk elektrik dirençli gerinim ölçerler, iletkenlerin düz hatlar şeklinde hareketli ve sabit birer çerçeve arasına gerilmesi ile elde edilen bağımsız ve ilkel yapılar şeklindedir. Ancak, bu tip gerinim ölçerler oldukça büyük ve keskin uçlara ihtiyaç duyduklarından kullanım alanları oldukça sınırlı olmuştur.

Direncin altlık yüzeyine bağlanması sorunu, 1930' ların ortalarında bağlı gerinim ölçerlerin bulunması ile aşılmıştır. Yöntem, 1937 ve 1938 yıllarında MIT' den Arthur Ruge ve Cal Tech' den Edward Simmons tarafından bağımsız olarak geliştirilen bir teknik olup, konstantan gibi yüksek elektriksel dirence sahip alaşımdan yapılan bir direnç telinin gerilme altındaki parça yüzeyine yapıştırılması ve yüzey gerinimlerinin ölçülebilmesi fikri ile ortaya atılmıştır. Karbon gerinim ölçerler ile karşılaştırıldıklarında çok az direnç değişimi göstermelerine karşı bu tip gerinim ölçerler, dinamik ve statik ölçümlerde son derece iyi sonuçlar verebilmektedirler. Bu olumlu adım, bağlı tel tipi gerinim ölçerlerin hızla yaygınlaşmasının asıl nedenidir.

İletkenin boyu ile ilgili problem ise, direnç telinin ızgara deseni (meyander) şeklinde üretilmesi ile çözüme kavuşmuştur. Bu tip bağlı gerinim ölçerler, 1930 ile 1950 yılları arasında yaygın olarak kullanılmış, günümüzde de halen uzun gerinim ölçere ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmaktadır. Fakat diğer uygulamalar için günümüzde bu tip gerinim ölçerler yerlerini, folyo tipindeki gerinim ölçerlere bırakmışlardır (Dally ve Riley, 1978; Hannah ve Reed, 1992).

### **2.2.3 Folyo tipi gerinim ölçerler**

1950' lerde basılı devre tekniklerinin hız kazanması ile birlikte bu teknolojiyi kullanarak üretilen folyo gerinim ölçerler, öncelikle İngiltere' de ve daha sonra ABD' de üretilmeye

başlanmış ve kullanımları zamanla yaygınlaşmıştır. Folyo tipi gerinim ölçerlerin üretimlerinde, uygun alaşıma ait ince folyo halindeki metalin kimyasal olarak aşındırılması ya da kesilmesi ile istenilen şeklin kazandırılması tekniği kullanılmaktadır. Benzer yapıları ve üretim teknikleri nedeniyle folyo gerinim ölçerler, tel halindeki gerinim ölçerlerin birçok avantajına da sahiptirler (Hannah ve Reed, 1992).

İlk ince film yapısındaki folyo gerinim ölçer Saunders ve Roe tarafından 1952 yılında İngiltere’ de üretilmiştir. Bu tip gerinim ölçerlerde ızgara deseni, litografik aşındırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Yöntem oldukça kullanışlı olduğundan, çok çeşitli boyutlarda ve şekillerde gerinim ölçer üretmek mümkündür. İnce film gerinim ölçerlerde kullanılan en kısa ve en uzun boylar sırasıyla yaklaşık 0.20 mm ve 102 mm’dir. Standart gerinim ölçerlerin elektriksel dirençleri, 120 ve 350  $\Omega$  kadardır. Ancak farklı algılama işlemleri için 500, 1000 ve 3000  $\Omega$ ’luk dirençlere sahip modeller de mevcuttur.

Folyo tipindeki ince film gerinim ölçerler oldukça kırılğan, biçimleri bozulmaya uygun ve kırışabilir yapıdadırlar. Bu nedenle bu tarz gerinim ölçerler, öncelikle ince plastik bir taşıyıcı altlığa bağlandıktan sonra litografik aşındırma işlemine tabi tutulur. Söz konusu bu plastik altlık aynı zamanda gerinim ölçer, gerinimi ölçülecek yüzeye yapıştırıldıktan sonra da, yalıtım elemanı olarak da iş görür (Dally ve Riley, 1978).

#### **2.2.4 Yarıiletken Gerinim Ölçerler**

Yarıiletken gerinim ölçerler birçok bakımdan tel ve folyo tipindeki gerinim ölçerlerden farklıdırlar. Bu farklılıkların en önemlisi gerinim hassasiyetidir. Yarıiletken gerinim ölçerler, metal tabanlı gerinim ölçerlerden yaklaşık 10 ile 50 kat daha yüksek gerinim hassasiyeti değerlerine sahiptirler. Ayrıca çok daha yüksek çıkış sinyallerine sahip olabildikleri için ilk kullanılmaya başladıklarında bu büyük avantajları nedeniyle metal tabanlı gerinim ölçerlerin yerini alacakları düşünülmüştür. Ancak günümüzde her iki tipin de birbirlerine göre vazgeçilemez avantajlara sahip oldukları bilinmektedir. Yarıiletken gerinim ölçerler daha çok algılayıcılarda kullanılmakta olup, metal tabanlı olanlar gibi genel kullanıma uygun değildir. Bu uygunsuzluğun en önemli nedeni, yarıiletken gerinim ölçerlerin pahalı, son derece kırılğan, sünek olamayan bir yapıda ve hepsinden önemlisi sıcaklık değişikliklerine aşırı duyarlı olmalarıdır (Hannah ve Reed, 1992).

#### **2.2.5 Kaynak Edilebilir Gerinim Ölçerler**

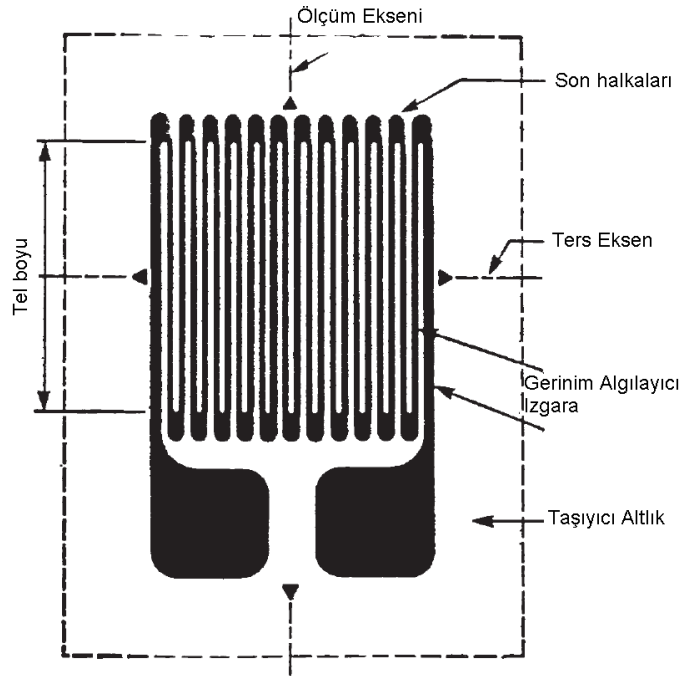
Kaynak edilebilir gerinim ölçerler günümüzde 60 ile 350  $\Omega$  dirençlerde ve 9.5 mm’ den 27.7 mm boylarda üretilebilmektedirler. Bu tip gerinim ölçerler, kriyojenik uygulamalardan(-200 °C), yüksek sıcaklık uygulamalarına (650 °C) kadar oldukça geniş bir sıcaklık

aralığındaki çalışmalar için uygun çözümlerdir. Kaynak edilebilir gerinim ölçerler, birçok farklı metal üzerine kapasitif boşalım kaynağı ile kaynak edilip kullanıma hazır hale getirilebilirler. Uygulanabilirlikteki bu kolaylık, kaynak edilebilir gerinim ölçerleri, özel yerleştirme tekniklerinin ihtiyaç duyulduğu diğer yüksek sıcaklık gerinim ölçme sistemlerine göre üstün kılar. Ayrıca bu tip gerinim ölçerler oldukça sağlam ve su geçirmeme özelliğine de sahiptirler.

Genel olarak gerinim ölçerler, üzerinde yapılan bir takım değişiklikler ile farklı uygulamalarda da kullanılabilirler. Değişik tipteki gerinim ölçerler, beton içerisinde gömülü halde kullanılarak gerinimleri sürekli takip eden algılayıcılar olarak da kullanılabilirler. Algılama ve diğer genel amaçlı uygulamalar için en uygun çözüm olarak ince film gerinim ölçerler görülür. Nadir olarak ise, bağlantısız tel, bağlı tel, kaynak edilebilir ve yarıiletken tipteki gerinim ölçerler de kullanılmaktadır (Dally ve Riley, 1978).

### 2.3 Gerinim Ölçerlerin Yapıları

Gerinim ölçerler iki ana elemandan oluşur. Bunlar, gerinim ölçeri oluşturan gerinime duyarlı direnç teli ve bu telin üzerinde üretildiği altlıktır. Şekil 2.1, folyo tipi bir gerinim ölçerin yapısını göstermektedir.



Şekil 2.1 Folyo tipi gerinim ölçerin yapısı (ASTM E 251 – 92).

Şekil 2.1’ de gösterildiği üzere gerinim ölçer üzerindeki çeşitli bölgeler, farklı işlemlere sahiptir ve bu bölgelerin her biri gerinim ölçerin yapısının anlaşılmasında önemlidir. Gerinime duyarlı direnç telinin ızgara şekline getirilmesi ile elde edilen desen algılamanın

gerçekleştiği etkinin tel boyu, terminaller ve tellerin kıvrıldıkları son halkaları sayılmaksızın ölçülen uzunluktur. Söz konusu gerinim ölçerin ölçüm eksenini, yapı üzerine işaretlenmiş tellerin uzun kısımları boyunca olan eksenidir. Yapı, bu eksen boyunca oluşan gerilmelere, diğer eksenine göre daha yüksek hassasiyet gösterir (ASTM E 251 – 92).

### 2.3.1 İletken Tel

Teorik olarak tek bir direnç telini, gerinim ölçen bir eleman olarak kullanarak ölçüm yapmak mümkün olsa da, güç kaynağının aşırı yüklenmesini engellemek amacıyla bir elektrik devresine ihtiyaç duyulur. Bunun yanı sıra, geçecek akıma bağlı olarak direnç teli tarafından üretilen ısı kontrol altında tutulabilmesi için, söz konusu telin direncinin en düşük 100  $\Omega$  olması istenir. Bu anlamda 100  $\Omega$ 'luk bir gerinim ölçer yaklaşık 100 mm boyunda olur.

Belirli bir elektriksel dirence ve boyuta sahip olmanın yanı sıra ideal bir gerinim ölçerin ihmal edilebilecek kadar küçük kütleye sahip olması gerekir. Ayrıca gerinim ölçerin kullanımı kolay ve gerinime karşı hassasiyetinin mümkün olduğunca yüksek olması da istenir. Bu özelliğe ek olarak gerinim ölçerler genellikle dinamik koşullarda kullanıldıklarından sıcaklık, nem, titreşim gibi çevresel etkilerden de en az ölçüde etkilenmelidirler (Jain ve Chitale, 2010).

### 2.3.2 Taşıyıcı Altlık

Gerinim ölçerde gerinime duyarlı direnç telini taşıyan altlık malzemeleri, oldukça farklı özelliklere sahip olabilirler. Ancak tüm altlıkların birincil görevi, gerinim ölçeri ve lehimlerin yapılacağı terminalleri sıkıca tutmak ve desteklemektir. Bunun yanı sıra, gerinin ölçer taşıyıcıları gerinimi ölçülecek malzemeye bağlanabilecek dayanıklı bir yüzey ve gerinim ölçeri elektriksel yalıtacak bir zemin de oluşturur.

Bu öncelikli fonksiyonlardan başka, en uygun değerlerin elde edilebilmesi için gerinim ölçer taşıyıcılarının, gerinimi, gerinim altındaki malzemedan direnç teline en iyi şekilde iletebilmesi gereklidir. Bu nedenle altlıkların yüksek kesme modülüne sahip, ince bir malzemedan yapılmış olması gereklidir. Ayrıca eğimli yüzeylere bağlanabilecek kadar esnek, bağlanma ve kontak alma sırasında zarar görmeyecek kadar dayanıklı bir yapıya sahip olması da altlık malzemelerden beklenen özelliklerdir. Bunlara ilave olarak taşıyıcı altlıkların hem direnç teline, hem de altlığın yüzeyine tutunabilmesine olanak sağlayacak yüzey özelliklerine, kararlılığa ve yüksek sürünme direncine sahip olması gereklidir (Window, 1992).

Başlangıçta taşıyıcı malzeme olarak çok ince kâğıt kullanılmış olsa da, günümüzde ağırlıklı olarak sert ve esnek bir malzeme olan 0.025 mm kalınlığında poliamid polimer malzeme kullanılmaktadır. Özellikle lineerliğin ve hassasiyetin çok önemli olduğu algılama

uygulamalarında yüksek elastiklik modülüne sahip epoksi altlıklar da kullanılır. Ancak epoksi, oldukça kırılğan olması ve genel uygulamalarda yerleştirilme zorluğu nedeniyle pek tercih edilmemektedir. Bunun yanı sıra gerinim ölçerin ömrü göz önünde bulundurulduğunda, çevrimsel yüklemelerin ve yorulmanın gözlenmesinin muhtemel olduğu uygulamalarda, altlık olarak sıklıkla cam fiber takviyeli epoksi ve fenolikler de tercih edilmektedir. Gerinim ölçer taşıyıcı malzemesinin kullanılacağı sıcaklık, gerinim ölçer taşıyıcı malzemesi bakımından önemli bir parametredir. 400 °C gibi sıcaklıklar için cam fiber takviyeli altlıklar uygun olmakla birlikte, daha yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere ayrılabilir altlıklı gerinim ölçerler geliştirilmiştir. Bu tip gerinim ölçerlerde taşıyıcı altlık, gerinim ölçerden ayrılarak kullanılır. Gerinim ölçen ızgaranın şeklini ve bütünlüğünü korumak ve yüzey ile gerinim ölçer arasındaki yalıtımı sağlamak için ise, seramik temelli yapıştırıcılar kullanılır. Ayrılabilir altlıklı gerinim ölçerlerden başka yüksek sıcaklık uygulamaları için tercih edilen bir başka gerinim ölçer ise, kaynak edilebilir gerinim ölçerlerdir. Halka şeklinde çok ince bir direnç teli içeren bu tip gerinim ölçerlerde, yalıtım malzemesi olarak sıkıştırılmış MgO tozları kullanılır. MgO koruma içerisindeki direnç telinin uçları, kurşun tellere bağlanmıştır. Gerinim tüpü içerisindeki tel, aşındırma prosesi ile mümkün olan küçük direnç elde edilecek şekilde inceltilerek mümkün olan en küçük çapa sahip en yüksek dirençli tek bir telden üretilmiştir (Dally ve Riley, 1978).

#### **2.4 Gerinim Ölçer Karakteristikleri**

Çok farklı tip ve amaçlarla üretilmiş gerinim ölçerler bulunması, gerinim ölçerleri etkileyen parametrelerin çokluğu farklı tipte gerinim ölçerlerin üretilmesini ve sürekli karakterize edilmesini gerekli kılar. Gerçekte birer direnç teli olan gerinim ölçerlerin, gerinim ölçer olarak tanımlanabilmesi için aşağıda sayılan özellikleri taşımaları gerekir.

1. Gerinim ölçerler, üzerlerine gelen dinamik ve statik gerinimleri hassas ve doğru bir biçimde ölçebilmelidirler.
2. Gerinim ölçerler, boyutları küçük ve hafif olmalıdır. Küçük boyutları, gerinim ölçerlerin dar ve küçük alanlı bölgelere bile uygulanabilmelerini sağlar. Yüksek gerinim değişimine sahip bölgelerde de hassas ve doğru ölçüm yapabilmelerine olanak verdiği gibi özellikle dinamik yüklemeler altında gerinim ölçerlerin atalet etkilerini ihmal edilebilecek sınırlara çeker.
3. Gerinim ölçerler farklı yerlerde, farklı amaçlarla kullanılabilen algılayıcılardır. Laboratuvar testlerindeki parçaların üzerine düşen gerinimlerin ölçülmesi gibi amaçlarla kullanılabilecekleri gibi, uzay mekiklerinde algılayıcı olarak da

kullanılabilirler. Dolayısı ile gerinim ölçerlerin tasarımları, hem çok sayıda veri alınabilmesine hem de bu verilerin uzak mesafelere taşınabilmelerine olanak tanıyabilecek şekilde yapılmalıdır.

4. Gerinim ölçerler sıcaktan mümkün olduğunca az etkilenmelidir. Bu özellik bir gerinim ölçerin en önemli özelliğidir ve gerinim ölçer üretiminde bu denli çok alaşım kullanılmasının başlıca nedenlerinden biridir. Birçok gerinim ölçer malzemesi dar sıcaklık aralıklarında sıcaklıktan bağımsızlık konusunda oldukça tatmin edici değerler sergiler. Ancak bazı uygulamalarda gerinim ölçerlerin çalışma sıcaklık aralıkları  $-240$  ile  $+ 815$  °C arasında olabilmektedir. Sıcaklık bağımsızlığını bu koşullarda yakalamak oldukça güçtür. Dolayısı ile uygun alaşımların geliştirilmesi son derece önem kazanır.
5. Gerinim ölçerlerin kullanımları kolay olmalıdır. Bir gerinim ölçer bu konuda eğitim almamış bir kişi tarafından bile kolay ve güvenilir olarak kısa sürede yerleştirilebilir olmalıdır.
6. Gerinim ölçerler çalışma aralıklarında her bakımdan son derece güvenilir ve kararlı olmalıdır.
7. Gerinim ölçerlerden, kesin olarak şart olmamakla birlikte, gerinime lineer tepki vermeleri beklenir. Ancak gerinim ölçerin birçoğu, kesin bir lineerlik sergileyemezler. Bu sapma, gerinim ölçerlerin birlikte çalıştıkları elektrik devreleri tarafından karşılanabilir sınırlar içerisine çekilir. Daha büyük sapmaların gözlemlendiği gerinim ölçerlerde ise, sapmayı karşılayabilecek özel elektrik devrelerinin tasarlanması gerekir.
8. Gerinim ölçerler ucuz olmalıdır. Gerinim ölçer maliyeti genellikle göreceli bir kavramdır ve gerinim ölçerin hizmet ettiği amaç ele alındığında, gerinim ölçer maliyetleri ihmal edilebilir düzeylerde kalmalıdır.
9. Gerinim ölçer verilerini sınırlayan koşullar bulunmamalıdır. Bir gerinim ölçerin verileri belli koşullar ile sınırlı ise, bu değerlerin farklı koşullar için güvenilirliğinden söz edilemez. Ancak günümüz gerinim ölçerlerinin genellikle belirlenen çalışma aralıklarında oldukça bağımsız çalışabildikleri söylenebilir.
10. Günümüz uygulamalarında birçok koşulda gerinim ölçerlerden, sistemlerin farklı bölgelerindeki bağımlı ya da bağımsız gerinimleri ölçebilmeleri beklenmektedir. Zira, sistem tasarımlarında ölçümlenecek büyüklükler tekil değil, çok farklı bölgelerden elde edilen gerinim değerlerinin hesaplanması ile tanımlanabilecek çoğul büyüklüklerdir. Dolayısı ile gerinim ölçerler hem tek başlarına hem de bir dizi gerinim ölçerin bir parçası olarak çalışabilmelidir.

Yukarıda özetlenen tüm karakteristikleri aynı anda karşılayabilecek bir gerinim ölçer pratik anlamda üretilmemiş olmasına karşın, folyo tipinde ince film ve yarıiletken gerinim ölçerler bu ideal koşula en çok yaklaşabilen gerinim ölçer türleridir (Murray ve Miller, 1992).

#### **2.4.1 Gerinim Ölçer Alaşımları ve Gerinim Hassasiyeti**

Gerinime duyarlı direnç malzemesinin genel özelliklerinin başında doğrusallık ve ölçüm tekrarlanabilirliği için elastiklik sınırları içerisinde lineer gerinim hassasiyeti gelir. Ölçüm kararlılığı için mümkün olan en küçük alanda elde edilebilecek en yüksek elektriksel direncin üretilmesi de son derece önemlidir. Ayrıca yine, tekrarlı ölçümlerin tutarlılığı ve doğruluğu için kullanılacak alaşımın, ölçümler sırasında düşük histerisiz göstermesi de gerinim ölçer alaşımlarından beklenen bir diğer özelliktir.

Gerinim ölçer alaşımını ve gerinim ölçeri karakterize eden en önemli parametrelerden biri gerinim hassasiyetidir. En yüksek elektriksel tepkinin algılanabilmesi için alaşım elementlerinin gerinim hassasiyetlerinin olabildiğince yüksek olması önemlidir. Bunun yanı sıra, farklı sıcaklık aralıklarında alaşımların kullanılabilmesi, gerinim ölçerlerin farklı uygulamalardaki kullanılabilirliğini de arttıran bir başka noktadır. Bu nedenle gerinim ölçer alaşımlarının çalışabilecekleri en yüksek sıcaklık son derece önemlidir. Ayrıca gerinim ölçerlerin birçoğu, dinamik yüklemeler altında ve sürekli tekrarlarla kullanılır. Dolayısı ile gerinim ölçer alaşımlarının yorulma davranışları da gerinim ölçer için malzeme seçiminde önemli bir kriterdir (Window, 1992).

Günümüzde üretilen gerinim ölçerlerin bir çoğunda, Konstantan (%55 Cu, %45 Ni) ve Evanohm (%20 Cr, %2.8 Al, %2 Cu, %1 Si, 0.90 Mn, %0.08 Zr, dengeleyecek oranda Ni) olarak bilinen alaşımlar kullanılmaktadır. Ancak çok özel uygulamalar için kıymetli metal gerinim ölçerler ve yüksek sıcaklık gerinim ölçerleri de kullanılmaktadır. Ancak bu tip gerinim ölçerlerin birçoğu yaygın kullanım için geliştirilmiş olan Konstantan ve Evanohm' un özelliklerinden yoksundur. Bu özelliklerin başında sıra dışı direnç ve sıcaklık davranışı gelir. Ayrıca kullanılacak alaşımın gerinim ölçer üretim yöntemleri ile uygunluğu da son derece önemlidir. Gerinim ölçer alaşımlarının bir milimetrenin yüzde birine kadar inceltilerek, folyo haline getirilebilecek yapısal ve mekanik özelliklere sahip olmaları gerekir. Maliyetlerin düşük, üretimin ve şekillendirilebilirliğin kolay olabilmesi için, fotokimyasal aşındırmaya uygunluk şarttır. Bu nedenle özellikle zorunlu haller dışında kıymetli metal alaşımları tercih edilmemelidir (Robinson, 2006).

Ancak tüm bu özelliklerin yanı sıra, gerinim ölçerler gerinimi elektriksel sinyalleri kullanarak gösterdiklerinden gerinime bağlı direnç değişimi olarak tanımlanabilecek gerinim hassasiyeti, gerinim ölçer alaşımları için bir diğer en önemli parametredir.

Lord Kelvin bir telin direncinin, artan gerinimle birlikte arttığını ve azalması ile azaldığını ortaya koymuştur. Kesit alanı  $A$ , boyu  $L$  ve öz direnci  $\rho$  olan üniform bir metal iletkenin direnci Denklem 2.1’ de ifade edilmektedir.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

Söz konusu ifadenin tam diferansiyelinin, toplam direnç olan  $R$ ’ ye oranı:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2.2)$$

şeklindedir. İfadenin son terimi,  $dA$ , gerinime bağlı olarak iletkenin kesit alanındaki değişimi ifade eder ve değer olarak;

$$d_f = d_0 \left( 1 - \nu \frac{dL}{L} \right) \quad (2.3)$$

ifadesine eşittir. Eşitlikte  $d_0$  aksel gerilme öncesindeki telin çapı,  $d_f$  ise gerinime uğradıktan sonra telin çapını ve  $\nu$  ise Poisson oranını ifade etmektedir. Denklem 2.2 ve 2.3’ den

$$\frac{dA}{A} = -2\nu \frac{dL}{L} + \nu^2 \left( \frac{dL}{L} \right)^2 \approx -2\nu \frac{dL}{L} \quad (2.4)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem 2.1 ve 2.3 ifadeleri kullanılarak,

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} (1 + 2\nu) \quad (2.5)$$

ve

$$S_A = \frac{dR/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

ifadesine ulaşılır. İfadede  $S_A$ , metalik alaşımın gerinim hassasiyeti olarak tanımlanmaktadır. Değer, başlangıçtaki direnç başına birim direnç değişiminin, uygulanan gerinime bölümünü ifade eder. Denklem 2.6’ da görüldüğü gibi bir alaşımın gerinim hassasiyeti, iletkenin boyutsal değişimi olan  $1+2\nu$  ‘e ve öz dirençteki değişim olan,  $(d\rho/\rho)$  terimlerine bağlıdır. Yapılan deneysel çalışmalar,  $S_A$  ifadesinin bir çok metal alaşımı için 2 ile 4 arasında

değiştğini göstermektedir. Saf metaller içinse bu değer, -12.1 (Ni) ‘ den +6.1 (Pt) ‘ e kadar değişir. Dolayısıyla öz dirençteki değişim,  $1+2v$  değeri, genellikle 1.4 – 1.7 aralığında olduğundan oldukça büyük olabilir. Özdirençteki bu değişim aynı zamanda uygulanan gerinime göre serbest elektronların sayısına ve hareketliliklerindeki değişime de bağlıdır (Hrovat vd., 2001; Dally ve Riley, 1978).

Çizelge 2.1’ de ticari olarak gerinim ölçer uygulamalarında kullanılan metaller ve bunlara karşılık gerinim hassasiyetleri verilmektedir. Hassasiyet, kullanılan metalin tipine bağlı bir özelliktir. Ancak bu hassasiyet değeri sabit bir değer olarak değerlendirilmemelidir. Aynı bileşime ait metallerin alaşımları için, iletkene uygulanmış soğuk deformasyon, alaşımdaki kirlilikler tümü elde edilecek değeri etkiler.

Çizelge 2.1. Farklı bileşimlerdeki gerinim ölçer alaşımlarının ticari adlarını ve gerinim hassasiyetlerini göstermektedir (Window, 1992, Topuz, 1993).

Malzeme Bileşimleri	Ticari Adı	Gerinim Hassasiyeti ( $S_A$ )
%55 Cu - %45Ni	Konstantan (Advance)	+2.1
%80Ni - %20 Cr	Nichrome V	+2.2
%75 Ni - % 20 Cr ve Fe,Al	Karma	+2.1
%70 Fe, %20 Cr, %10 Al	Armour D	+2.2
% 36 Ni, %8 Cr, %55.5 Fe, % 0.5 Mo	Izoelastic	+3.5
% 92 Pt, %8 W	-	+4.0
% 84 Cu, %4 Ni, % 12 Mn	Manganin	+0.6
Ni	-	-12.0
Fe	-	+4.0
Cu	-	2.6

Günümüzde üretilen elektrik dirençli gerinim ölçerlerin büyük kısmı Konstantan olarak da bilinen Cu-Ni alaşımlarıdır. Gerinim ölçerlerin değerlendirilmesinde dirençteki oransal değişime ( $\Delta R/R$ ) karşı yüzdece gerinim önemli bir ölçüttür. Söz konusu değişimin doğrusal olmasının bir takım avantajları vardır.

Konstantan tipi alaşımların diğer alaşımlara göre en önemli üstünlüğü, gerinim seviyelerine göre gerinim ölçümleme sabitinin değişmemesidir. Böylelikle, tüm gerinim değerleri için tek bir gerinim sabiti yeterlidir. Ayrıca gerinime bağlı olarak geniş bir lineer bölgeye sahip

olmaları, özellikle, yapısal malzemelerin hem elastik hem de plastik bölgedeki ölçümleri bakımından önemlidir. Bunların yanı sıra, yüksek öz dirence sahip malzemelerin kullanılması, oldukça yüksek dirence sahip olan ancak boyutları küçük, gerinim ölçerlerin üretilebilmesi bakımından önemlidir. Ayrıca seçilen alaşım ergiyüklerinin ısı karakteristikleri, istenilen bileşimde ısı karaktere sahip gerinim ölçer üretimini mümkün kılar.

İzoelastik alaşımın ticari gerinim ölçerlerde tercih edilmesinin en önemli nedeni, yüksek  $S_A$  değeri ve yorulma dayanımıdır. Yüksek hassasiyet, özellikle gerinim ölçer verilerinin kaydedilmeden önce yükseltilmesinin gerekli olduğu dinamik uygulamalarda önemli avantaj sağlar. Yorulma dayanımı ise, özellikle tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan çevrimsel döngülü sistemler için önemlidir. Ancak, izoelastik alaşımların gerinim ölçer üretiminde kullanımını sınırlayan en önemli etken, alaşımın sıcaklık değişikliklerine son derece duyarlı olmasıdır. Bu alaşımdan üretilen bir gerinim ölçerle yapılan ölçümde sıcaklığın  $1\text{ }^\circ\text{C}$  'lık değişimi gerinin gözlenen değerinde  $300 - 400\ \mu\epsilon$  (mikro gerinim; gerinim  $\times 10^{-6}$ ) fark olmasına neden olur. Bu nedenle izoelastik alaşımlar, gerinin sadece zamanla değiştiği durumlarda kullanılabilir.

Gerinim ölçer malzemesi olarak kullanılan bir diğer alaşım ise, Karma' dır. Karma alaşımının özellikleri, konstantaninkine benzemekle birlikte yorulma limiti konstantandan yüksek, izoelastikten düşüktür. Buna ilave olarak kararlılığı oldukça yüksek olan karma, uzun süreli kullanımlar için uygundur.

Diğer gerinim ölçer alaşımları olan Nichrome V, Armour D ve platin-volfram alaşımları metalurjik açıdan daha kararlı ve yüksek sıcaklık oksidasyon dirençleri daha yüksektir. Bu alaşımlar özellikle sıcaklığın  $500\text{ }^\circ\text{C}$  ' den yüksek olduğu gerinim ölçme uygulamaları için daha uygundur (Dally ve Riley, 1978).

#### **2.4.2 Sıcaklık Direnç İlişkisi ve Isıl Direnç Katsayısı (TCR)**

Gerinim ölçerler oldukça basit yapıda olmalarına rağmen, karmaşık gerilme analizlerinin yapılmasına yardımcı olan sistemlerdir. Basit yapıları, birçok avantajı beraberinde getirmesine karşın, bazı durumlarda analizlerin irdelenmesinde sorun oluşturabilir.

Gerinim ölçerler, yapıları gereği fiziksel olarak direnci değiştirebilen her etkiye açık olmaları nedeniyle, çalışmalar sırasında gerinim haricindeki tüm direnç değişikliklerinin bir şekilde engellenmesi ya da elektriksel olarak göz ardı edilmesi gerekir. Aksi halde bu etkiler, hatalı sinyal oluşumuna ve gerinim konusunda yanlış yorumların yapılmasına neden olabilir. Hatalı sinyal oluşumuna neden olan etkilerin bazıları gerinim ölçer kullanım şekline, bazıları da gerinim ölçer yapısına bağlıdır. Bu yapısal ve uygulamaya bağlı etkilerin bazıları gerinim

ölçer boyu, elektriksel direnç, deformasyon alanının durumu ve sıcaklık değişimi olarak sıralanabilir. Ancak tüm bu etkilerin en önemlisi, doğrudan gerinim ölçer malzemesinden kaynaklanan sıcaklık değişimine olan duyarlılıktır (Topuz, 1993 ve Robinson, 2006).

Sıcaklık, alaşım elementinin fonksiyonelliği, taşıyıcı altlığın ve bağlayıcının yapısının kararlılığı bakımından önemlidir. Sıcaklık ile alaşım elementinin fonksiyonelliği arasındaki ilişki, ısıl direnç katsayısı olarak bilinen büyüklük ile tanımlanır. Farklı gerinim ölçer alaşımları ve taşıyıcılarının çalışma aralıkları Çizelge 2.2' de verilmiştir (Window, 1992).

Çizelge 2.2 Gerinim ölçer alaşımları ve taşıyıcı altlıklarının sıcaklık – çalışma tipi ilişkisi (Window, 1992).

Direnç Malzemesi	Taşıyıcı Altlık Malzemesi	Statik Koşul	Dinamik Koşul
Cu – Ni	Poliamid	-75 ile + 175 °C	-195 ile +205 °C
Cu – Ni	Epoksi	-45 ile + 99 °C	-195 ile +175 °C
Izoelastic	Poliamid	-	-195 ile +205 °C
Karma	Cam takviyeli kompozit	-269 ile +290 °C	-269 ile +400 °C
Ni-Cr	Ayrılabilir altlık	-260 ile + 425 °C	

Metallerin  $\rho$  olarak bilinen öz dirençleri, iletkenin geometrisinden bağımsız bir parametredir. R ile ifade edilen direnç değerleri ise, iletken geometrisi tarafından belirlenen değişken bir büyüklüktür. Bu büyüklüklere bağlı olarak bir elektrik direncinin değeri, direncin yapıldığı malzemeye ve direncin geometrisine bağlı olarak belirlenebilir.

Ancak, tüm iletkenlerin dirençleri, sıcaklıktan da etkilenir. Metalik iletkenliklerin tümü, mutlak sıfır noktasına yakın sıcaklıklarda çok düşük elektriksel dirence (süperiletken durumuna geçtiklerinde 0) ve ergime noktalarına yakın sıcaklıklarda da ise, en yüksek elektriksel dirence sahiptir. Bu özellikler metallere has bir davranıştır ve ayırt edici bir özellik olarak değerlendirilebilir (Robinson, 2006).

Dolayısı ile bir gerinim ölçerde sıcaklığa bağlı davranışın ortaya konulabilmesi, gerinim ölçerin tanımlanabilmesi için önemlidir. Ortam sıcaklığının değişmesi ile gerinim ölçerin dört temel özelliğinde değişim gözlenir. Bunlar:

1. Metalin gerinim hassasiyeti,  $S_A$ , değişir.

2. Gerinim ölçer sıcaklık etkisi ile boyca uzar ya da kısalır ( $\Delta l/l = \alpha \Delta T$ ).
3. Gerinim ölçerin tutturulduğu taban malzeme uzar ya da kısalır. ( $\Delta l/l = \beta \Delta T$ ).
4. Gerinim ölçerin direnci sıcaklığın etkisi ile değişir. ( $\Delta R/R = \gamma \Delta T$ )

Gerinim ölçerin, değişen sıcaklıkla ilgili olarak direncini etkileyen faktörler, Denklem 2.7 ile özetlenebilir.

$$\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{\Delta T} = (\beta - \alpha) S_g \Delta T + \gamma \Delta T \quad (2.7)$$

Eşitlikte,  $\alpha$  gerinim ölçer malzemesinin ısıl genleşme katsayısını,  $\beta$  taban malzemenin ısıl genleşme katsayısını,  $\gamma$ , gerinim ölçer malzemesinin ısıl direnç katsayısını ve  $S_g$  'de gerinim duyarlılığını göstermektedir. Gerinim duyarlılığı, iletkene bir kuvvet uygulanması sonucu iletkendeki boyutsal değişime ve iletkenin özgül direncindeki değişimlerin tümüne bağlıdır (Topuz, 1993).

Taban malzemesi ve gerinim ölçer arasında sıcaklık değişiminde bir değişim olursa ( $\alpha \neq \beta$ ) bu durumda gerinim ölçer, numuneden kaynaklanmayan bir  $\varepsilon = (\beta - \alpha)\Delta T$  gerinimine maruz kalır. Bu durumda gerinim ölçer bu etkiye, tıpkı gerinim altında olduğunda verdiği gibi, direncindeki bir değişimle tepki gösterir. Bu iki tepkiyi birbirinden ayırmak mümkün değildir. Gözlenen bu istenmeyen tepki, gerinim ölçerin üretildiği alaşım ve taban malzemelerinin aynı ısıl genleşme katsayısına sahip oldukları durumda ortadan kaldırılabılır.

Bir gerinim ölçüm sisteminde ısıl etkinin ortadan kaldırılabilmesi için iki yaklaşım söz konusudur. Bu yaklaşımlardan ilki Denklem 2.7' deki 3 etkenin net etkilerini sıfır yapacak şekilde ayarlama yapmaktır. İkincisi ise, sıcaklık değişikliklerinin sinyal dönüştürücülerin doğru ayarlanması ile  $\Delta R/R$  değerinin voltaj çıktısına dönüştürülmesi ile elde edilebilir.

Sıcaktan etkilenmeyen gerinim ölçerlerin yapımı için, altlık malzemesi ile gerinim ölçer alaşımının ısıl genleşme katsayılarının birbiriyle mükemmel uyumlu olmalarını ve ısıl direnç katsayısının da sıfır olmasını sağlamak gerekir (Dally ve Riley, 1978).

Gerinim ölçer üretiminde kullanılan belli başlı alaşımların TCR değerlerinin iyileştirilebilmesi için bazı işlemler uygulanabilir. Bu işlemler özellikle soğuk haddeden geçirilerek folyo haline getirilen alaşımlar için uygulanmakta ve folyo haline getirilen alaşıma ısıl işlem uygulanması ile gerçekleştirilmektedir. En yaygın gerinim ölçer alaşımlarından olan Konstantan ve Evanohm, TCR değerleri değiştirilebilen alaşımların başında gelir. Ancak her iki alaşımın ısıl işleme gösterdikleri tepki farklıdır.

Soğuk haddelenerek folyo haline getirilen Evanohm alaşımının TCR değeri, 400 – 600 °C aralığında uygulanan ısıtma işlemi ile +10 ile -40 ppm/°C aralığında iyileştirilebilmektedir. TCR değerindeki bu iyileşmenin ardındaki mekanizma halen tam olarak açıklanamamış değildir. Ancak tam olarak anlaşılamayan bu mekanizma için yapılabilen en muhtemel açıklama, Ni-Cr alaşımlarında bu sıcaklık aralığında gözlenen kısa mesafeli düzenlenmedir. Söz konusu teoriye göre, metal ile kristal kafes içerisindeki gelişi-güzel yerleşmiş alaşım atomu ısıtma işlemi etkisi ile birkaç atomik mesafede belirli bir düzenle yerleşir. Söz konusu düzenlenmenin doğrudan bir analiz yöntemi kullanılarak belirlenmesi son derece güç olduğundan elektriksel direnç ölçümü gibi dolaylı yöntemlerle tespit edilebilmektedir (Robinson, 2006).

## 2.5 Gerinim Ölçer Devreleri

Gerinim ölçer ile direnç değişimi üzerinden gerinim değerlerinin hesaplanabilmesi için gerinim altındaki yapının elektriksel direncinin çok hassas olarak ölçülebilmesi gerekir. Söz konusu hassasiyet gerinim hassasiyeti, gerinim ölçer alaşımının kendisine ve uygulanan gerinim değerine bağlıdır. Ancak her koşulda ölçülecek direnç değişimleri çok küçük olduğundan bahsedilen direnç değişimleri de çok küçük olur ve ölçümlerin doğru yapılabilmesi için özel bir elektrik devresine ihtiyaç duyulur. Wheatstone köprüsü olarak bilinen bu özel elektrik devresi, 1843 yılında Londra' daki King's College fizik profesörü Sir Charles Wheatstone tarafından geliştirilmiştir. Wheatstone köprüsü günümüzde de elektriksel direncin ölçülmesinde kullanılan en güvenilir ve doğru yöntemlerden bir tanesidir. Yöntem kabaca iki direncin oranının, dirençlerden birinin değeri kullanılarak hesaplanabilmesi prensibine dayanmaktadır (Sarkar, 2005).

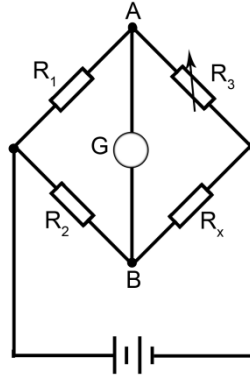
Bir DC akım köprüsü olan Wheatstone köprüsünde statik ve dinamik tipteki ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Sistemde direnç ölçümleri, voltaja ya da akıma duyarlı olarak yapılabilir. Her iki koşulda da ölçüm ekipmanı üzerinden mümkün olan en küçük akım geçirilir ve ekipmanın en az şekilde yüklenmesi sağlanır. Ölçümler ister dinamik, ister statik olarak yapılsın, köprü kullanımının en önemli avantajlarından biri sıcaklık etkisi gibi değerlerin köprünün uygun kollarına karşılayıcı ekipmanlar konulması ile ihmal edilebilir kılınmasıdır.

Wheatstone köprüleri, köprü kurulurken kullanılan dirençlerin sayısına göre çeyrek köprü, yarım köprü ya da tam köprü olarak adlandırılır. Çeyrek köprü sadece bir direnç ile kurulurken, yarım köprüde iki ve tam köprüde ise köprünün her bir koluna bir direnç şeklinde toplam dört direnç kullanılır (Gosh, 2007).

Wheatstone köprüsü şematik olarak Şekil 2.2' de gösterilmektedir. Köprü direnci, bilinen üç elektrik direnci kullanarak direnci bilinmeyen dördüncü direncin değerinin hesaplanabilmesini sağlamaktadır. Şekilde A ve B kolları arasına yerleştirilen galvanometre ile öncelikle bilinmeyen  $R_x$  ile aynı koldaki  $R_3$  ayarlanabilir direnci kullanılarak  $V_A$  ve  $V_B$  potansiyelleri birbirlerine eşitlenir. Bu koşul altında köprü denge konumuna getirilir. Denge durumunda kollardaki potansiyellerin eşit olmasından yararlanılarak;

$$R_1 R_x = R_2 R_3 \quad (2.8)$$

$R_x$  direnci hesaplanabilir (Bird, 2007).



Şekil 2.2 Wheatstone köprüsünün şematik gösterimi.

### 3. GERİNİM ÖLÇER ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Gerinim ölçerler geleneksel metalürjik üretim yöntemleri kullanılarak üretilebilecekleri gibi, ince film halinde de üretilebilirler. İnce film halindeki üretim amaca daha uygun, oldukça esnek bir üretim yöntemidir ve gerinim ölçerleri geçmişteki sınırlı kullanımlarından çıkarıp, çağımız ihtiyaçlarına uygun algılayıcıların tasarlanabilmesine öncülük etmiştir. Ayrıca üretimde ince film teknolojisinin kullanımı, farklı desenlerde gerinim ölçerleri, istenildiğinde doğrudan gerinimi ölçülecek parça üzerinde üretilebilmesinin de yolunu açmış olmaktadır.

#### 3.1 Geleneksel Yöntemlerle Gerinim Ölçer Üretimi

Folyo gerinim ölçerlerin üretimi farklı amaçlarla üretilen birçok metal malzeme gibi ergiyik fazından başlar. Ancak, alaşım bileşiminin hassas ayarlanabilmesi için gerinim ölçer alaşımlarının üretiminde temizlik son derece önemlidir. Bu nedenle ergitme işlemleri vakum altında ve yüksek saflıkta alaşım bileşenleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bileşimin özelliği ve TCR değeri gibi bazı ayarlamaların yapılabilmesi için alaşım tek seferde ya da basamaklı olarak hazırlanabilir. Genellikle gerinim ölçer alaşımlarının hazırlanmasında oksit ve diğer metal dışı katkıların mümkün olduğunca fazla ayrılabilmesi için elektro curuf ergitme yöntemi kullanılır. Ayrıca bu fazladan ergitme işlemi, folyo haline getirme işlemi sırasında oluşan boşlukların en aza indirilmesi için de faydalıdır. Ergitme ve döküm işlemlerinin ardından elde edilen ingotlar yaklaşık 350 mm çapında ve 1 tonun üzerindedir. Bileşim değerlerinin uygunluğu kontrol edilen alaşımlar, daha sonra iç yapının homojenleşmesi için yüksek sıcaklıkta uzun süreli ısıtılma işlemine tabii tutulurlar. Homojenleştirme işleminin ardından döküm ingotlar, sıcak olarak dövülerek levha haline getirilir. Sıcak dövme işlemi haddelemeye uygun levhaların üretilmesine olanak sağlamanın yanı sıra, döküm mikro yapısının da parçalanmasını sağlar. Sıcak dövme işleminin ardından levhalar yavaş olarak soğutulur, oluşan bünye yapıları ve bileşimleri kontrol edilir ve yüzeyler haddeleme öncesi taşlanarak tüm yüzey kusurlarından arındırılır.

Yapıları ve yüzey özellikleri iyileştirilen levhalar, yeniden ısıtılarak sıcak olarak haddelenir ve levhaların kalınlıkları ortalama 5 mm' ye ve genişlikleri 300 mm' e getirilir. Bu halde yarı bitmiş durumdaki malzeme ortalama 30 m ve üzerinde boya sahip olabilir. Daha sonra sıcak bant olarak adlandırılan malzeme, şekillendirilir ve asit banyosundan geçirilerek temizlenir. Soğuk olarak bir kez daha haddelenen yapıların toplam kalınlıkları %25 oranında yeniden azaltılır. Elde edilen inceltmiş şeritlerin alt ve üst yüzeyleri yeniden taşlanır ve üst tabaka bir miktar kaldırılır. Bu sayede haddeleme ve kesme işlemleri sırasında yüzeyde kalmış olabilecek düzensizlikler bir kez daha temizlenir. Taşlanan şeritler bir kez daha soğuk

haddeden geçirilir ve kalınlığı 1.5 mm' e indirilir, daha sonra yapılar tavlanaarak yumuŝatılır. Tavlama işlemi, yzeye ozelliklerinin bozulmasını engellemek ve oksitlenmeyi onlemek için koruyucu atmosfer altında yapılır (Robinson, 2006).

### 3.2 İnce Film Gerinim Ölçerler

Gerinim ölçerlerin geliştirilmesi ve yaygın olarak kullanılmasından bu yana ince film gerinim ölçerler, özellikle çok sayıda algılayıcı kullanımının gerekli olduğu uygulamalarda ve saldırgan ortamlardaki ölçümlerde tercih edilmektedir. Ayrıca büyük, değişebilir yzeye alanına sahip parçalarda yapılacak gerinim ölçümlerinde ince, yüksek esneyebilme kabiliyetine sahip algılayıcıların kullanımı son derece faydalıdır. Patenti 1951 yılında alınan ince film gerinim ölçerler, en basit anlamıyla esnek bir altlığın üzerine vakum altında fiziksel buhar biriktirme (FBB) ile biriktirilen ince filmlerden üretilirler (Lichtenwalner vd., 2007; Witt, 1974).

Birer ince film uygulaması olan ince film gerinim ölçerlerin anlaşılabilmesi ve değerlendirilebilmesi için ince filmlerle ilgili bir takım ozellikleri ve bu ozellikleri ilgilendiren parametreleri anlamak son derece önemlidir. Yaptığımız çalışmada gerinim ölçerlerin üretilmesinde,

- FBB, manyetik alanda sıçratma yöntemi
- İnce filmlerin şekillendirilmesi için optik litografi
- Gerinim ölçer desenin elde edilebilmesi için ıslak aşındırma yöntemlerine

Baş vurulmuş ve bu bölümde söz konusu başlıklar ayrıntıları ile incelenmiştir.

#### 3.2.1 İnce Filmler

Altlık malzeme yzeyinde, biriktirme ya da farklı yöntemlerle elde edilen filmler, kalın film ya da ince film olarak iki grupta incelenebilirler. Benzer teknolojiler ile üretilmelerine karşın, ince film ve kalın film teknolojileri arasındaki fark, ince film teknolojisi tekil halde atom ya da moleküllerin biriktirilmesini içerirken, kalın film teknolojisinde kaplama işlemi partiküller ile gerçekleştirilir. Ancak ince ve kalın film teknolojilerinde kullanılan yöntemler, film kalınlığı ile doğrudan ilişkilendirilmemelidir. Kalın film teknolojisinde üretim genellikle biriktirme, boyama, döndürerek kaplama ve plazma sprej gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Kalın film teknolojileri ince film teknolojileri ile karşılaştırıldığında daha ucuzdur ancak buna karşı malzeme ve film kalitesi üzerindeki kontrol oldukça sınırlıdır. İnce film biriktirme teknolojilerinden ısıl parçalanma yöntemi ile oldukça başarılı ve birkaç milimetre kalınlığa ulaşabilen filmler elde etmek mümkün olmuştur (Freund ve Suresh, 2004, Smith, 1995).

İnce film malzemeler mikro elektronik cihazlar, manyetik depolama ortamları ve yüzey kaplamaları gibi bir takım teknolojik uygulamalarda önemli roller üstlenmektedirler. Bu nedenle ince film malzemelerin yapılarının, oluşum mekanizmalarının incelenmesi ile anlaşılması hem günümüz, hem de gelecek uygulamalar açısından önemli bir konudur

Malzemelere ince film teknolojisi kullanılarak kazandırılabilen özelliklere örnek olarak, otomotiv endüstrisinde kullanılan plastik yüzeylerin üzerlerine gerçekleştirilen Cr kaplamalar gösterilebilir. Söz konusu endüstride, plastik kullanımı ile elde edilen hafifliğin ve ekonomikliğin yanında gelen bir takım dezavantajları, Cr kaplama ile giderilebilmektedir. Plastik yüzeylerin mekanik etkilere ve UV ışınına karşı dayanıklılığı, Cr kaplanarak artırılabilir. Bunun yanı sıra Cr, plastiğe görsel olarak parlak metal görünümü kazandırır ve ürünlerin daha çekici olmasını sağlar. Bir başka örnek olarak kesici takımlarda kullanılan TiN kaplamalar verilebilir. Çelik yüzeyler TiN kaplanarak, normalde çeliğin ulaşamayacağı sertliklerin elde edilmesi ve düşük sürtünme katsayısına ve kimyasal dayanıklılığa sahip olabilmesi sağlanır. Dolayısı ile ince film kaplamalar ile ana malzemenin vazgeçilmez özelliklerine, yüzeyinde kazanılan eşsiz özellikler eklenmiş olur.

Bu tip genel özelliklerin iyileştirilmesinin yanı sıra ince filmler, çok katlı olarak da üretilerek daha farklı fonksiyonel özelliklerin de geliştirilmesi sağlanabilir. Optik olarak girişimin engellenebilmesi ya da farklı optik özelliklerin ana yapıya kazandırılabilmesi amacıyla farklı altlıklar üzerine onlarca hatta yüzlerce kat farklı kırıcılık indisine sahip filmler kaplanabilmektedir. Bu sayede yüzeylerin optik özellikleri geliştirilmiş olur.

İnce filmler altlıklara mekanik ve görsel özellikler katmaktan başka, elektriksel özellikleri değiştirmek amacıyla da kullanılmaktadır. GaAs ve (AlGa)As gibi yarıiletken malzemeler, çok katlı halde süper kafes olarak adlandırılan özel şekillerde biriktirilerek, atomsal periyodikliğin getirdiği üstün elektriksel özelliklerin biriktirme işlemi ile elde edilebilmesi ve farklılaştırılması sağlanabilir. Hacimsel haldeki malzemelerden beklenmeyen bazı elektriksel özelliklerin, özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş ince filmler sayesinde elde edilebilmesi sağlanır. Ayrıca bu tip mühendislik atılımları fotolitografi ile birleştirilerek hemen hemen sınırsız çeşitlilikte yapılar oluşturulabilir. Yıllardır entegre devre endüstrisinin dayandığı bu temel günümüzde optik dalga kılavuzlarının ve mikro elektro mekanik yapıların da üretilmesine olanak vermektedir.

Dolayısı ile ister mekanik, ister elektriksel amaçlarla üretilmiş olsunlar, ince filmler günümüz teknolojisinde son derece önemli bir yere sahiptir. Farklı amaçlarla üretilen ince filmler Çizelge 3.1' de özetlenmektedir (Freund ve Suresh, 2004).

Çizelge 3.1 Farklı tipteki ince filmlerin kullanım alanları (Freund ve Suresh, 2004).

İnce film Tipi	Uygulama Alanı
Optik	Yansıtıcı ve yansıma engelleyici kaplamalar
Elektrik	Yalıtım İletim Yarıiletken Piezoelektrik
Manyetik	Hafıza Diskleri
Mekanik	Tribolojik (aşınmaya dayanıklı) Sert Yapışma Mikro mekanik
Isıl	Isıl Bariyer Sıcaklık gidericiler

### 3.2.2 İnce Filmlerin Oluşum Mekanizmaları

İnce filmler başta fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri olmak üzere birçok farklı yöntemle biriktirilebilmektedir. Yüzey üzerine buhar fazından atomların biriktirilmesi ile elde edilen filmlerin mikro yapılarında çok fazla çeşitlilik vardır. Biriktirme sonucu elde edilen ince filmler, tek kristal filmlerden kolonsal ya da eşeksensiz tanelerin oluşturduğu çok kristal filmlere ve büyük oranda amorf yapıdaki ince filmlere kadar geniş bir yelpazede toplanabilir. Bazı malzemeler, bu yapılardan birinin tercih edilerek elde edilmesi için uygun biriktirme yöntemi, malzeme ve biriktirme ortamı kontrol edilerek üretilebilir.

Buhar fazındaki atomların altlık üzerine birikmesi, atomsal bir yaklaşım altında yüzeye hedef malzeme atomlarının ulaşmasıdır. Bu aşama,  $T_s$  sıcaklığındaki, yüzeyi son derece iyi temizlenmiş altlığın,  $T_v$  sıcaklığındaki kimyasal olarak uyumlu film malzemesinin buhar fazında altlık üzerine gönderilmesi ile başlar. Tek kristal yapıda bir film üretilebilmesi, buhar fazındaki filme ait atomların altlık yüzeyine gelmesi, yüzeye tutunması ve mümkün olan en dengeli konumlara geçerek yapısal hatalara neden olmayacak şekilde yerleşmeleri ile mümkün olur. Bunun yanı sıra, amorf yapıdaki film, tek kristal yapıdaki filmin aksine buhar fazındaki atomların dengeli durumlara yerleşmelerinin engellenmesi ile mümkün olur. Ancak birbirlerinden farklı bu her iki durumda da gerçekleşen olayların, oldukça büyük altlık yüzeyinin hemen her yerinde aynı şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir.

Buhar fazındaki atomlar, altlık yüzeyi ile temas ettiklerinde altlığın yüzey atomları ile kimyasal bağ kurarlar. Bu nedenle altlık sıcaklığı buhar fazının aşırı doymuş olabilmesine imkan sağlayacak kadar düşük olmalıdır. Altlık ve film atomları arasındaki birleşme sırasında bağ oluşumu nedeniyle, enerjide bir indirgenme söz konusu olur. Bu sırada açığa çıkan enerji ile yüzeye sürekli eklenen film atomlarının bir kısmı yüzeyden yeniden buhar fazına geçebilir. Bu durum bağlanma enerjisinin ısı dalgalanma enerjisinden düşük olduğu durumlarda mümkün olabilir.

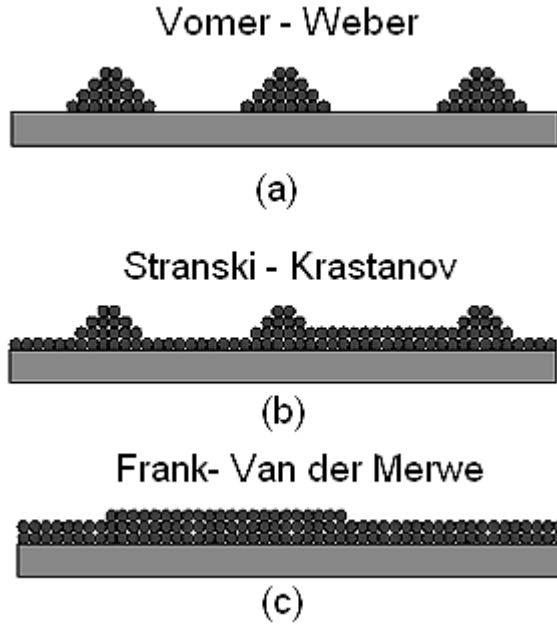
Denge buhar basıncı, herhangi bir sıcaklıkta kendi buharıyla temas halindeki kristal atomlarının, yüzeyden ayrılma oranları ile buhardan yüzeye gelen atomların oranının eşit olduğu denge hali olarak tanımlanmaktadır. Denge durumunda, entropiye bağlı buhar fazındaki atom başına serbest enerji, kristal içerisindeki atom başına serbest enerjiye eşittir. Ancak kimyasal bağ kurulurken açığa çıkan enerjiye bağlı olarak, kristal içindeki enerjinin buhar içindeki enerjiden düşük olması, kristal içerisindeki entropiyi düşürür. Altlık üzerinde net bir film oluşumu için buhar basıncının (P) denge buhar basıncından büyük olması diğer bir deyişle altlık sıcaklığında buharın aşırı doymuş durumda bulunması gerekir. Enerji durumları bakımından ise, P basıncındaki durumda atom başına entropik serbest enerjinin denge buhar basıncındaki serbest enerjiden büyük olması gerekir. Böylece sürekli eklenen yeni atomlar sayesinde ara yüzeyin kendini tekrar eden bir mekanizmayla ilerlemesine ve buhardan belli bir miktarda kütlelerin aynı miktarda kristal kütlelerine dönüşmesine olanak tanır. Her iki enerjinin birbirine eşit olduğu durumda ise ara yüzey ilerlemez ve gerilemez, film büyümesi durur (Freund ve Suresh, 2004).

Enerji bakımından incelenebilen film büyüme döngüsü altı basamakta özetlenebilir. Bu basamaklar:

1. Katottan ayrılıp altlık yüzeyine gelen atomlar çarpışma sırasında enerjilerini kaybeder ve yüzeye tutunurlar.
2. Yüzeye yüksek enerji ile gelen atomlar altlık ile ısı dengede değildir ve bu nedenle yüzeyde bir süre sürüklenerek ve birbirleri ile etkileşerek daha büyük atom kümeleri oluştururlar.
3. Oluşan kümeler ya da çekirdekler termodinamik olarak dengesiz olduklarından biriktirme sürecinin parametrelerine de bağlı olarak parçalanabilir ya da birbirleri ile birleşebilir. Çekirdekler bu etkileşme ile kritik bir büyüklüğe ulaştıklarında çekirdeklenme engeli aşılmış olur ve termodinamik denge kurulur.

4. Söz konusu kritik çekirdeklenme, çekirdek büyümesi, doyum çekirdeklenme yoğunluğuna ulaşılan dek sürer. Doyum çekirdeklenme oranı çarpan atomlara, bağlanmaya, ayrılmaya, ısıl difüzyona, altlık topografisine ve kimyasal yapıya bağlı bir olgudur. Çekirdekler çarpan atomlara bağlı olarak yüzeye dik ya da yatay doğrultuda büyüme gösterebilirler. Ancak yaygın olarak rastlanan çekirdeklerin adalar halinde ve yatay doğrultuda büyümeleridir.
5. Çekirdeklerin oluşturdukları adaların oluşmaları ile birlikte adalar birbirleri ile birleşir ve ince film kabalaşma basamağına ulaşır. Bu basamakta altlık sıcaklığı gibi unsurların etkisi ile yüzey hareketlerine de bağlı olarak adalar topaklar oluşturur.
6. Son basamakta büyüyen ve kalınlaşan adalar arasında altlığın açık bulunduğu kanallar, boşluklar söz konusudur. Bu haliyle süreksiz bir yapıda olan film boşluklu bir haldedir. Biriktirme işleminin devam etmesi ile bu boşluklar da dolar ve ince film tamamıyla sürekli bir yapı kazanır (Wasa vd., 2004).

İnce filmlerin kullanılmaya başlandıkları günden bugüne yapılarını daha iyi anlamak adına büyümeleri ile ilgili bir takım modeller üretilmiş, teoriler ortaya atılmıştır. Bu modellerden ilki 1958 yılında Bauer' in "Zeitschrift für Kristallographie" adlı çalışmasında sıkça atıf yapılan tabaka tabaka büyüme modelidir. Tabaka tabaka büyüme ya da Frank-van der Merwe tipindeki büyüme, atomların altlık yüzeyine, birbirlerine olduğundan daha kuvvetli olarak bağlanması ile oluşmaktadır. Bu yaklaşımın tam zıttı olarak atomların altlık yerine doğrudan birbirleri ile kümelenmelerinin daha fazla olduğu şekilde büyümelerini diğer bir değişle adacıklar oluşturmalarını anlatan model ise Volmer-Weber modelidir. Ancak her iki modelin arasında, filmin hem adacıklar oluşturup hem de yüzeye tutunarak büyüdüğü bir sistem Stranski-Krastanov modeli, birçok bakımdan ince film büyümesinin açıklanması için en uygun modeldir. Modelde öncelikle tabakalar oluşmaya başlar ve daha sonra tabakalı yapı kaybolur ve film, adacıkların oluşumu ile devam eder. Bu üç model, Şekil 2.1' de gösterilmiştir (Venables, 2001).



Şekil 3.1 Film büyüme modelleri.

- a) Adacık tipi, Volmer-Weber modeli b) tabaka ve adacık modeli, Stranski-Krastanov modeli  
c) tabakalı büyüme - epitaksiyel büyüme, Frank van der Merwe (SreeHarsha, 2006)

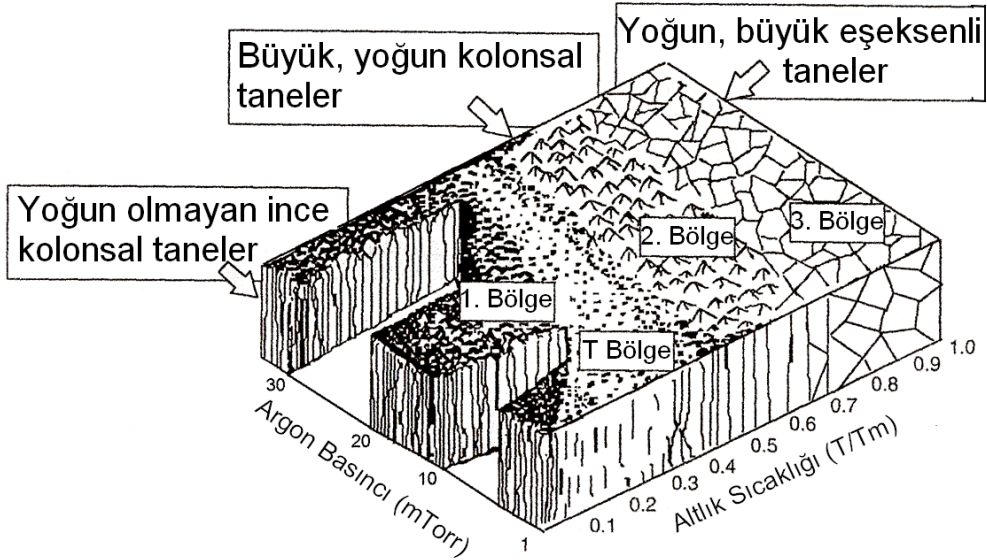
Filmin büyümesinin başlangıcında birikmenin oluşumu, yüzey salınımı, yoğunlaşma ve yüzey yayınımları baskındır. Bu mekanizmaları ilgilendiren üç modelden başka, ince film büyümesi sırasındaki yapıyı, yüzey karakterini ve özellikle FBB yönteminde film bileşimini yakından etkileyen sıcaklıkla ilişkili başka modellerde vardır. Buharlaştırma yöntemiyle üretilen ince filmlerde biriktirme sıcaklığı ile mikro yapı arasındaki ilişki, ilk kez Movchan ve Demchishin tarafından ortaya konmuştur. Yaptıkları çalışmalarda ince film mikro yapısı, sıcaklığa bağlı olarak bölge modeli ile ortaya konmuş ve söz konusu model daha sonra Thornton tarafından genişletilmiştir.

Özellikle manyetik alanda sıçratma yönteminde sıçratma gazı olarak kullanılan Ar ve ince film sıcaklığının değişimi, film yapısını yakından etkiler. Yöntemde, biriktirme malzemesi altlığa önceden belirlenmiş ve baskın bir yönden çarpar. Bu nedenle altlık pürüzlülüğüne bağlı geometrik gölgeleme etkileri (etkileşme açısı etkisi) belirginleşebilir. Özellikle manyetik alanda sıçratma yöntemiyle üretilen ve 20 – 250 µm aralığında kalınlığa sahip ince filmler için Thornton (1977) dört bölgeyi bir model ortaya atmıştır. Model, Movchan ve Demchishin (1969) modeline çok benzemekle birlikte soy gaz basıncına bağlı ek bir geçiş bölgesi içerir.

Thornton modelindeki bölgeler (Şekil 3.2) şu şekilde özetlenebilir.

- 1. Bölge: Gözenekli ve sivri, konik kristallerin oluşumu.
- Geçiş Bölgesi: Sıkı paketlenmiş geçiş bölgesi, ipliksi kristaller

- 2. Bölge: Kolonsal büyüme ve kolonsal kristaller.
- 3. Bölge: Yeniden kristallenmiş ve granüler mikroyapı (Bach vd., 2006; Freund ve Suresh, 2004).



Şekil 3.2. Thornton modelini göstermektedir. Şekilde  $T_s/T_m$  değeri ince film büyümesi sırasında gelen atomların sıcaklığına karşı altlık sıcaklığının oranını ifade etmektedir (Arnoldussen ve Nunnelley, 1992).

Thornton tarafından genişletilmiş olan modelin 1. Bölgesinde, düşük proses sıcaklığı nedeniyle yüzeye gelen atomlar geometrik gölgeleme etkilerini yenemezler. Bu nedenle bu bölgede oluşan ince filmlerin yüzeyleri açık ve gözeneklidir. Biriktirme sırasında oluşan plazmaya ek olarak altlığa negatif biyas uygulanması, düşük sıcaklığa rağmen iyon çarpmasını ve çekirdeklenme yoğunluğu artırır. Birinci bölge sınırındaki geçiş bölgesi, yoğun tane sınırları ile ayrılmıştır ve filmin dislokasyon yoğunluğu fazladır. Modelin ikinci bölgesinde kolonsal büyümedeki baskın mekanizma, yüzey difüzyonudur. Yüzey difüzyonundan hacimsel difüzyona geçiş, tane kabalaşması ve yeniden kristalleşme sonucu modelin üçüncü bölgesindeki eşeksenli tane yapısı oluşur. Genel bir yaklaşım olarak yüksek sıcaklık altında sıçratılan filmlerin yapıları buharlaşma ile biriktirilen ince filmlerle karşılaştırıldığında üçüncü bölgedeki yapıya daha yakındır (Freund ve Suresh, 2004).

### 3.2.3 Film Büyümesine Altlığın Etkisi

Altılık yüzeyinin kimyasal yapısı, morfolojisi ve mekanik özellikleri, ince filmin altlık yüzeyine tutunması, film oluşumu ve elde edilen filmlerin özellikleri gibi parametreleri

yakından etkiler. İnce filmin altındaki altlık malzemesinin özellikleri, malzemenin yüzey özelliklerini ve ince filmin malzeme üzerindeki performansını yakından etkiler. Örneğin yük altında çalışan bir sert kaplama, yumuşak bir altlık malzeme üzerinde üretildiğinde sert film, altlık malzemenin yük altında deforme olması nedeniyle parçalanır. Bunun yanı sıra yine alt malzemenin belirli özellikleri, altlık yüzeyinin hazırlanma basamaklarında da problemlere neden olabilir. Ayrıca altlık, biriktirme süresince gaz salınımı, dışa difüzyon, iç süreksizlikler gibi problemler ortaya çıkararak, biriktirmenin başarısını da etkileyebilir.

Biriktirme işlemi öncesi altlık yüzeyi, hazırlama aşamasının doğası ve kullanılan yöntemler kontrol altında tutularak istenilen özelliklere getirilebilir. Örneğin seramik, cam veya karbon gibi kırılğan yüzeylerin hazırlanmasında makine ile işleme işleminin kullanılması yüzeyin düzeltilmesinden çok hasar görmesine neden olur. Dolayısı ile doğru yüzey özelliğini elde edebilmek için seçilecek üretim yöntemi son derece önemlidir. Altlık yüzeyinde önceden var olan ya da hazırlanması sırasında oluşan kusurlar, film biriktirmesi sırasında veya sonradan oluşacak mekanik gerilmelerin toplanmasını sağlayan bölgeler oluşturur. Bu toplanma bölgelerinde filmin yüzeye yapışması son derece zayıftır. Bu tip yüzey kusurları film biriktirme öncesi kimyasal aşındırma yöntemleri kullanılarak ortadan kaldırılmalıdır. Ayrıca makine ile işleme gibi yöntemlerle yüzey hazırlanması sırasında yüzeyde deformasyon bölgeleri oluşabilir ve pürüzlü bir yüzey elde edilebilir. Buna ilave olarak, işlem sırasında yüzeyde oluşan bölgelerde yağlayıcılar birikebilir. Biriktirme öncesi yüzey bu artıklardan arındırılmayabilir. Bu etkileri engellemek için son makine ile işleme sırasında yüzeyde oluşan kesik derinlikleri son derece hassas olarak kontrol edilmelidir.

Yüzeyin kimyasının ve morfolojisinin homojenliği, yeniden üretilebilir filmlerin biriktirilebilmesi için son derece önemlidir. Yüzeyin düzgün ve homojen olamaması durumunda filmler de homojen olmayacaktır. Dolayısı ile altlıkların yüzeylerinin hazırlanmasındaki gerçek neden, homojen bir yüzey elde edilmesi sağlanarak biriktirilen atomlar için uygun büyüme ve çekirdeklenme şartlarının sağlanmasıdır.

Bir malzemenin özellikleri, malzeme geçmişi kontrol edilerek de düzenlenebilir. Örneğin polimerlerin su buharına tabi kalmaları suyu emmelerine ve biriktirme sırasında da bu suyun buhar olarak salınımına yol açar. Dolayısı ile bu salınım, film yapısında bozukluklara neden olur. Bu tip bir etkiye maruz kalan polimer altlık yüzeyinde üretilen filmlerin yapıları etkiye maruz kalmayanlarınkinden büyük ölçüde farklı olur. Malzemelerin üretim sonrasındaki geçmişlerinin kontrol edilmesi, yüzey özellikleri ile ilgili parametrelerin artışını engeller. Yeniden üretilebilir filmlerin üretilebilmesi, yeniden üretilebilir altlıkların, yüzey hazırlama

tekniklerinin, saklama koşullarının sağlanabilmesine bağlıdır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü gibi film karakterini kritik ölçüde etkileyecek parametreler biriktirme öncesinde mutlaka kontrol edilmelidir (Seshan 2002).

### 3.2.3.1 Cam Altlıklar Üzerinde İnce Filmler

Cam ve seramikler çok bileşenli katılar olup birbirlerine iyonik veya kovalent bağlarla ve serbest elektronları bulunmayacak şekilde bağlıdır. Bu nedenle, bu tip malzemelerin elektriksel ve ısı iletkenlikleri düşüktür ve mekanik olarak kırılırlar. Bu tip malzemeler genel olarak kristal durumdaysalar seramik, amorf iseler cam olarak adlandırılırlar. Ancak B, C ve Si gibi bazı elementler amorf olarak üretilebildiklerinden bu tanımlamanın yanı sıra bazı istisnaların olduğu bilinmektedir.

Cam altlıklar genellikle ergitme, döküm veya katılaştırma ile üretilir. Üretim sırasında cam, kalıplanabilir, çekilebilir ya da değişik şekiller alacak şekilde üflenebilir. Fiber optik malzemeler camın çekilmesi ve metal bir altlık üzerinde katılması ile cam halini alırken, bir şişe içine hava üflenerek son şekli verilir. Cam yüzeyleri kesme, zımparalama ve parlatma işlemleri ile düzleştirilip hazırlanabilir. Ancak biriktirme öncesi uygulanacak ısı işleme dikkat edilmelidir. Camların açık havada ısıtılmaları Na gibi hareketli parçacıkların ayrılarak yüzeye ilerlemelerine ve biriktirme öncesi temizlenmemeleri durumunda biriktirilen filmlerin boşluklu olarak büyümelerine neden olur.

Camların bileşimleri ve yüzey özellikleri, üretimlerinde kullanılan koşullara yakından bağlıdır. Camların ortamdaki su buharına ilgileri oldukça yüksektir. Su buharı cam yüzeylerde hidratların oluşumuna neden olur. Hidrat oluşumu zamana bağlı bir süreç olduğundan eski cam olarak tabir edilen camlar, güncel camlara göre daha derin hidrat tabakalarına sahiptir ve kırılma şekilleri hidrat tabakası ve derinliği nedeniyle farklıdır. Ayrıca su, cam içerisindeki alkali metalleri ve silikatları çözümler ve yine yüzeyin oluşumunu etkiler.

FBB ile metal biriktirme işlemi uygulanabilen en genel cam türü, 1963 yılında patenti alınan ve Pilkington prosesi olarak bilinen şekilde üretilen yüzdürme camdır. İşlem gereği yüzdürme camın ergimiş kalay ile temas eden yüzeyi, kimyasal olarak ayrıştırılmadığı sürece kalay oksit içerir. Yüzey hafif beyaz bir renge sahiptir ve UV ışık altında floresans oluşturur. Camın bu haliyle paketlenmesi yüzeyde kirliliklere neden olabilir. Ayrıca bazı camlarda çekirdeklenme engelleyici ya da sağlayıcı element ilavesi de bulanabilir (Seshan 2002).

### 3.2.3.2 Polimer Altlık Üzerinde İnce Filmler

Polimerler monomer adı verilen birçok küçük molekülün birleşmesi ile üretilen büyük moleküllerdir. En bilinen polimer türleri C-H içeriğine ek olarak Cl, N, O ve metal içerebilen yapılardır. Ayrıca polimerler, Si-H, B-H gibi diğer monomer birimlerinin de birleşmesi elde edilebilirler.

Bir polimerin üretimi sırasında farklı güçte, yönelimde ve uzunluktaki bağlar, atomlar ve diğer fonksiyon grupları arasında oluşur. Polimer içerisindeki bu bağlar ve kimyasal gruplar, polimerin kimyasal ortamlardaki davranışlarını IR absorplama miktarını ve foto elektron emisyon yeteneğini etkiler.

Polimerin kimyasal özellikleri, içerdiği fonksiyonel gruplar ve buhara maruz kalma gibi bir takım koşullar tarafından belirlenir. Polimer yüzeylerin özellikleri, genellikle, polimerin alt kısmının özelliklerinden oldukça farklı olup, mekanik özellikleri de genellikle polimerdeki çapraz bağların miktarına ve tipine bağlıdır. Örneğin polimerlerin yüzey özelliklerini N, Ar gibi soy atmosfer altında ya da su buharı içerisinde bulunmaları da farklı etkiler (Mattox, 2010).

Polimer üzerine biriktirilen ince metal filmlerin incelenmesi, özellikle esnek entegre devre altlıkları ve birtakım yiyecek paketlerinin bu tip malzemelerden yapılmaya başlaması ile ortaya atılmış kavramdır. Söz konusu uygulama alanlarında polimer altlık üzerindeki ince filmlerin, yapısal olarak oldukça esnek davrandıkları gözlemlenmiştir. Daha önceki çalışmalar, polimer altlık üzerinde ince filmlerin yaklaşık %1 gerinimlerde koptuklarını tespit etmiştir. 50 – 200 nm kalınlıklardaki tek kristal altın ince filmlerin %1 gerinime kadar elastik davranış gösterdikleri ve daha sonra koptukları tespit edilmiştir. Ayrıca söz konusu ince filmlerde dislokasyon davranışları ve yerel incelemeler de tespit edilmiştir. Ayrıca filmlerin plastik olarak esnedikleri ancak sertleşmedikleri de görülmüştür. Tek kristal ince filmden farklı olarak çok kristal yapıdaki ince filmlerin, elastiklik sınırının üzerinde gerinime dayanabildiği ve yine tek kristal filmden farklı olarak dislokasyonların tane sınırlarında toplanmasına bağlı sertlik artışı tespit edilmiştir. Ayrıca bu filmlerin serbest haldeki ince filmlerden farklı olarak polimer üzerindeki ince filmlerin %1 den hatta %1' in birkaç onda birinden daha az gerinimlerde bile koptuğu bilinmektedir.

Metal – polimer tabakalar büyük gerinimlere maruz bırakıldıklarında, metal film üzerinde film kalınlığından daha büyük çatlaklar ve boşluklar oluştuğu bildirilmiştir. Gerinimin daha

da arttırılması ile polimer altlık bütünlüğünü korurken, filmde çatlakların arttığı ve filmin yanal gerilmelerden dolayı yüzeyden bütünüyle sıyrıldığı da rapor edilmiştir. Ancak film-polimer ilişkisi polimer ve filmin çeşidine yakından bağlıdır. Bazı durumlarda filmlerin daha yüksek gerinimlere dayanabildiği ancak yine de filmde mikro çatlakların oluştuğu bildirilmiştir (Li, 2006).

### 3.2.4 İnce Film Üretim Basamakları

Ticari olarak ilgi uyandıran ve kullanım bakımından faydalı “tasarlanmış yüzeyler” in üretilmesinde bir takım temel PVD süreçleri kullanılır. Kullanılan PVD yöntemi hangisi olursa olsun tüm üretim, birtakım ortak üretim süreçlerinden oluşur. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Altlığın seçilmesi.
2. Altlık yüzeyi ile ilgili kritik özelliklerin tespit edilmesi ve biriktirme işlemini ne şekilde etkileyeceğinin ortaya konulması.
3. Biriktirme işlemi öncesi altlık yüzeyinin hazırlanması. Bu hazırlama işlemi temizleme, altlık yüzeyinin morfolojisinin veya kimyasının değiştirilmesi (yüzey modifikasyonu şeklinde olabilir).
4. Film altlık arasındaki yapışma gibi etkileşmeleri göz önünde bulundurarak uygun film malzemesinin seçilmesi.
5. Uzun vadede yüksek dayanıma sahip, yeniden üretilebilir biriktirme özelliklerinin belirlenmesi.
6. İstenilen ürün özelliklerinin elde edilebilmesi için uygun üretim cihazlarının tasarlanması.
7. Ürün verimini artıracak cihazların, süreç parametrelerinin, sınır şartlarının belirlenmesi, kontrol/gözlem koşullarının oluşturulması.
8. Ürünlerin özelliklerinin ve kararlılıklarının tespit edilebilmesi için uygun karakterizasyon tekniklerinin tespit edilmesi (Mattox, 2010,).

### 3.2.5 İnce Film Üretim Yöntemleri

İnce film biriktirme yöntemleri, biriktirmede kullanılan sisteme bağlı olarak buharlaşma ve ısıtılı boşalım gibi gaz fazından ya da kimyasal yöntemlerle sıvı fazdan olmak üzere iki şekilde gruplandırılabilir. Bu gruplar altında sınıflandırılacak tüm diğer biriktirme yöntemleri Çizelge 3.2 ' de sıralanmaktadır.

Çizelge 3.2 İnce film üretim yöntemlerinin üretim yöntemine sınıflandırılmasını göstermektedir (Bach vd., 2006)

<b>İnce Film Teknolojileri</b>			
<b>Fiziksel Buhar Biriktirme</b>	<b>Kimyasal Buhar Biriktirme</b>	<b>Elektrokimyasal Biriktirme</b>	<b>Kimyasal Biriktirme</b>
Buharlaştırma	Isıl	Katodik Biriktirme	Akımsız Biriktirme
Sıçratma	Plazma ile uyarılmış	Anodik Oksidasyon	Yerdeğiştirme Reaksiyonu
İyon Biriktirme	Fotonla uyarılmış		
	Lazer destekli		

Bu yöntemlerden buharlaştırma olarak bilinen ve ısı kaynağı ile vakum altında gerçekleştirilen buharlaştırma yöntemi, en eski ince film üretim yöntemlerinden biri olmasına rağmen, günümüzde halen laboratuvar ve sanayi ölçeğinde metal ve alaşımlarının biriktirilmesinde kullanılmaktadır. En basit anlamıyla buhar haline getirilen biriktirme malzemesinin istenilen bir altlık üzerine yoğunlaştırılması ve ince katı bir film halinde yüzeyi örtmesi olarak ifade edilebilecek biriktirme işlemi, vakum fiziği, malzeme bilimi, makine ve elektronik bilimlerini içeren disiplinler arası bir çalışmadır.

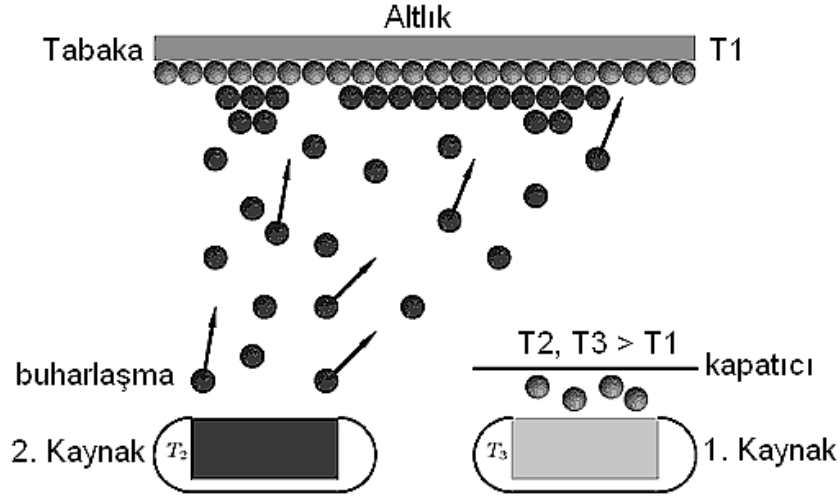
Sistemde biriktirilecek malzeme ya da kaynak malzeme çok farklı kimyasal bileşimlere ve buhar basıncına sahip olabilir. Kaynak malzemelerdeki bu çeşitlilik, biriktirme işlemlerinde kullanılacak dirençli ısıtma filamanları, elektron demetleri, rf, radyasyon ya da iletim yoluyla ısıtılan potalar, teller ve lazerler gibi donanımların da çeşitliliğini doğurmaktadır (Seshan, 2002).

### **3.2.5.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB)**

İnce film biriktirme proseslerinden fiziksel buhar biriktirme olarak bilinen ve katı ya da gaz fazından bir malzemenin atomsal biriktirilmesi, en genel biriktirme grubunu oluşturur. Yöntem, ince film üretiminde o denli yaygın olarak kullanılmaktadır ki, birçok kaynakta ince film prosesi olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemler grubunda hem nanometre mertebesinde ince filmler, hem de çok katlı ve kalın filmler üretilebilir. Aynı zamanda yöntem hem alaşım hem de saf halde malzemelerin biriktirilmesine ve hatta TiN, TiC gibi bileşik haldeki malzemelerin reaktif olarak üretilebilmesine de olanak tanımaktadır.

FBB yöntemlerinden hangisi kullanılırsa kullanılsın altlık yüzeyine biriktirilecek atomların üretilmesi gerekir. FBB' de bu üretim işlemi ya ısı olarak malzemenin buharlaştırılması ya da

katı haldeki malzemenin ağır atomlarla bombardımanı sonunda sıçratılması ile gerçekleştirilir (Mattox, 2010).



Şekil 3.3. Genel FBB mekanizması.

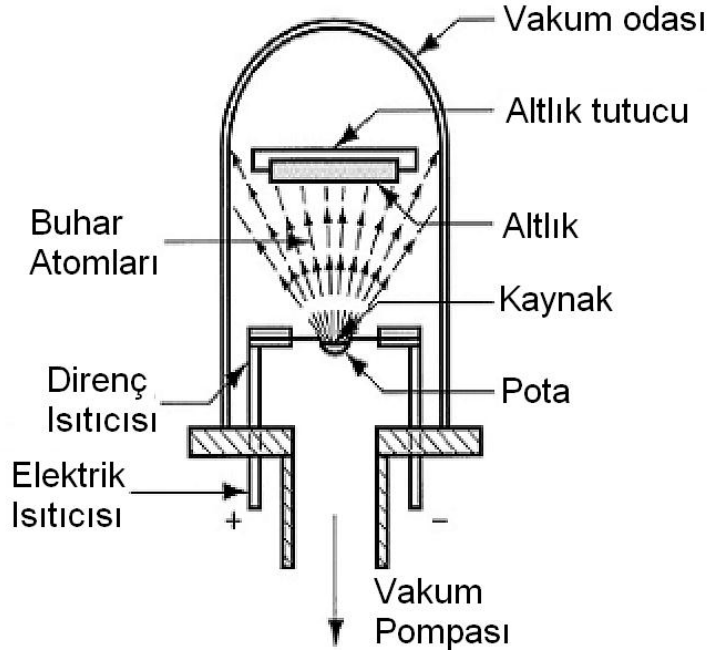
### 3.2.5.2 Buharlaştırma

Buharlaştırma işlemi, kaynak olarak seçilen bir hedeften malzemenin ısı olarak buharlaştırılması ve altlık yüzeyine ulaşması olarak ifade edilebilir. İşlem sırasında hedef atomları hemen hemen hiçbir çarpışma yaşamadan düz bir çizgi üzerinden altlığa ulaşır. Söz konusu bu serbestlik, işlemin vakum altında gerçekleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra vakum, belli teknolojilerde son derece önemli olan kirlenmenin önüne geçebilmenin başlıca yoludur. Günümüz teknolojisinde kullanılan vakum değerleri ortalama  $10^{-5}$  ile  $10^{-9}$  Torr civarlarındadır. Söz konusu aralık kirliliğe karşı gösterilebilen tolerans ile ayarlanmaktadır (Mattox, 2010).

Buharlaştırma işlemi (Şekil 3.4), alışlageldiği şekliyle bir ergitme ve katılaştırma işlemidir. Ancak vakum altında buharlaştırma işlemi, geleneksel yöntemden bir takım farklılıklar içerir. Vakum altında buharlaştırma işlemlerinin en önemli iki çeşidi, filamanla buharlaştırma ve elektron demeti ile buharlaştırmadır.

Filamanla buharlaştırma işlemi, kullanılan ilk ve en basit buharlaştırma yöntemidir. Tıpkı bir kabın su kaynatmada kullanıldığı gibi, bir pota içerisinden akım geçirilerek içindeki malzeme ertilir ve buharlaştırılır. Altlıklar, ısıtılan bölgenin görüş açısı içerisine dizilir ve buhar halindeki malzemenin altlık yüzeylerinde yoğunlaşması sağlanır. Yöntemde biriktirilen malzemelerin kalınlığı birkaç nanometreden birkaç mikrona kadar değişebilir. Ancak bu yöntemle dielektrik malzemelerin buharlaştırılmaları ertime noktalarının yüksek olması nedeniyle oldukça güçtür. Bu nedenle yöntem daha çok bakır, altın, gümüş ve kromla sınırlı

kalmıştır. Ayrıca bu yöntemle bileşik haldeki malzemeler genellikle birlikte ya da ardı ardına farklı kaynaklardan buharlaştırılarak üretilebilmektedir.



Şekil 3.4. Buharlaştırma sistemi.

Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi, filamandan buharlaştırma yöntemiyle aynı prensiple yürüse de, ısınmanın sağlanma şekli filamandan oldukça farklıdır. Termo iyonik bir filamandan (genellikle çıplak W tel) elde edilen elektron demeti, pozitif kutuplanmış bir anot yardımıyla hızlandırılarak su ile soğutulan bir pota içerisindeki kaynak metal üzerine düşürülür. Gerekli olan ısı, kaynak malzemeyi bölgesel olarak ergiterek buharlaştırmayı sağlar. Sistemin yüksek güçle çalıştırılması yüksek ergime noktasına sahip metallere ergitilebilmelerine olanak tanır (Brown, 2002; Mattox, 2010).

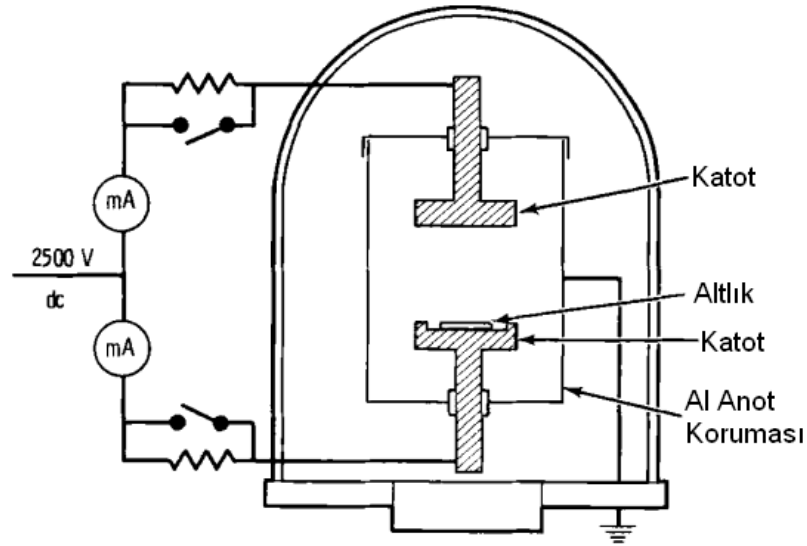
### 3.2.5.3 Sıçratma

Sıçratma birçok endüstri kolunda, yaygın olarak kullanılan vazgeçilmez bir biriktirme yöntemidir. Ancak bu endüstriler arasında sıçratmanın faydalarının tümünden en çok yararlanan yarıiletken endüstrisidir. Yarıiletken devrelerdeki metalizasyonların tamamında sıçratma yöntemi kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek binaların dışında kullanılan ayna görünümlü camların üretiminde ve daha birçok farklı alanda da ince film ürünler, sıçratma sistemleri kullanılarak üretilmektedir (Wasa vd., 2004).

Belli bir enerjiye sahip parçacıklar katı bir madde yüzeyine çarptıklarında, çarpan parçacıklardan hedef malzemeye momentum aktarırlar. Söz konusu bu momentum aktarımı, çarpan parçacıkların enerjileri ile ilişkilidir ve enerji nedeniyle hedef malzeme yüzeyinde

bağlar kopar, atomal dislokasyonlar oluşur ve uygun enerjilerde hedef malzeme yüzeyinden atomlar kopar. Sıçratma olarak tanımlanan bu olay, kopan atomların gaz fazında çarpışmalarının mümkün olduğunca az olacağı düşük basınç koşullarında gerçekleştirilebilir (John, 2005).

Sıçratma işlemi, sıçratma gazı olarak kullanılan  $Ar^+$  iyonlarının negatif yüklü hedefe çarpması ve hedef malzemenin atomlarını koparması ile sağlanır. Kopan atomların enerjileri, başta sistemde kullanılan enerjiye bağlı olmakla birlikte, diğer bir takım sistem parametrelerine de bağlıdır. Sıçratma sistemlerinde elde edilen sıçrama hızları, buharlaştırma yöntemlerine göre çok daha yüksek ve ortalama 1 – 10 nm/sn. kadardır. Söz konusu yöntemle hem iletken hem de yalıtkan özellikte filmler üretilebilmekle birlikte, iletken olmayan hedeflerin sıçratılması durumunda hedef yüzeyinde yük birikimini engellemek amacıyla RF sistemleri kullanılır. En genel özellikleri ile bir sıçratma sisteminin şematik görüntüsü Şekil 3.5' de gösterilmektedir (Franssila, 2010).



Şekil 3.5. Sıçratma Sisteminin yapısı  
(Carlson G.L. II ve Warner R., 1979)

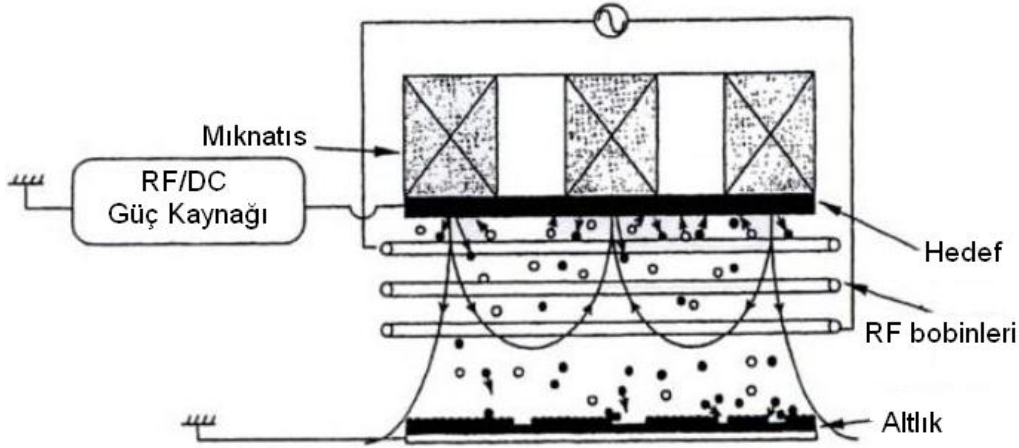
Sıçratma sistemlerinin önemli parametrelerinden bir tanesi hedef atomlarının sıçrama miktarının bir ölçütü olan sıçratma verimidir. Sıçratma verimi kabaca, sıçrama olayı sırasında hedeften ayrılan atom sayısı olarak tanımlanmakla birlikte, hedefin ve sistemin durumlarına göre farklı değerlendirilmektedir. Buna karşı toplam sıçrama verimi, sıçratmaya katılan her bir iyon karşılığında hedeften ayrılan iyon sayısını göstermektedir. Ancak hedefin birden fazla atomdan oluştuğu durumlarda sıçratmada elde edilen verim, her bir atomun miktarına göre belirlenir (Cuomo, 1989).

Sıçratma sistemleri, biriktirilecek atomların üretilmesi, birikme mekanizması ve film oluşturma tiplerine göre farklılık gösterebilmektedir. Yaptığımız çalışmada DC (Doğru akımla beslenen) manyetik alanda sıçratma yöntemi kullanıldığı için bu konu daha detaylı incelenmiştir.

#### **2.2.5.4 Manyetik Alanda Sıçratma**

Genel anlamda sıçratma olayı, yüksek enerjili iyonlar ile katot yüzeyinin bombardıman edilmesi ile gerçekleşir. Olay sırasında yüzeyden ayrılan ya da sıçratılan atomlar, enerjileri 1 – 10 eV arasında değişen ve katodu oluşturan malzemenin atomlarıdır. Atomların ulaştıkları bu yüksek enerji düzeyleri, manyetik alanda sıçratma sisteminin en önemli özelliklerinden biridir. Söz konusu enerjiler buharlaşma yöntemi ile üretilen parçalar ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Ayrıca sıçratma yönteminde oldukça farklı malzemeler kaynak malzemeyi ısıtmadan başarı ile sıçratılabilir. Günümüzde manyetik alanda sıçratma sisteminin tercih edilmesinin bir başka önemli nedeni de, basınç altında kirlilikten uzak bir biriktirme işleminin yapılabilmesine olanak vermesidir.

Manyetik alanda sıçratma sistemlerinin bir diğer üstünlüğü sıçratma verimlerinin geleneksel sıçratma sistemlerine göre yüksek olmasıdır. Geleneksel sıçratma sistemlerinde hedef yüzeyine doğru olan iyon akısının artırılması, sistemin çalışma gücünün artırılması ile sağlanır. Ancak manyetik alanda sıçratma teknolojisinin geliştirilmesi ile birlikte Şekil 3.6' da görüldüğü gibi hedef arkasına yerleştirilen mıknatıslar, iyonlaşma sırasında açığa çıkan elektronların hedef yüzeyinde oluşan manyetik alan bölgesinde hapsolmesine neden olur. Bu sayede hedefe yakın bölgedeki iyon yoğunluğu artar ve bu da iyonlaşan Ar<sup>+</sup> miktarını arttırarak sıçratma verimliliğini önemli ölçüde arttırır (Yoo, 2008).



Şekil 3.6. Manyetik alanda sıçratma sistemi (Wasa vd., 2004).

İnce filmler, tek tek atomlardan ya da atom kümelerinden sentezlenerek büyürler. İnce film üretiminde birçok farklı biriktirme yöntemi bilinmekte ve oldukça başarılı ince filmler üretilebilmektedir ancak sıçratma yöntemini eşsiz kılan, oluşan filmlerin yapısıdır. Isıl buharlaştırma ve kimyasal buhar biriktirme gibi yöntemlerle biriktirilen filmlerin tamamı termodinamik denge altında büyürler. Ancak sıçratma yönteminde, yüksek enerjili atomlar altlık yüzeyine ulaşır ulaşmaz enerjilerini kaybeder. Bu ani enerji kaybı çok farklı özelliklerde ince filmlerin üretilebilmesine ve ultra ince taneli yapıların oluşturulabilmesine imkan tanır. Literatürde sıçratma sistemi ile üretilmiş birçok farklı kristal yapı bildirilmiştir. Ayrıca sıçratılan atomların ulaştıkları yüksek enerji düzeyleri, oda sıcaklığında elmas gibi malzemelerin sentezlenebilmesine de olanak tanır (Wasa vd., 2004).

Teknoloji ve ince film dünyasında önemli yere sahip olan manyetik alanda sıçratma sistemlerinin gelişimi, vakum sistemlerinin gelişimine paralel olarak ilerlemiştir. Manyetik alanda sıçratma ilk kez yaklaşık 150 yıl önce Bunsen ve Grove tarafından gaz boşalım tüp içerisinde gözlemlenmiştir. Sistemde katot olarak bilinen elektrot, boşalım sırasında parçalanır. O yıllarda işlemin prensibi tam olarak anlaşılabilmiş olmasına karşın günümüzde sıçratma oldukça yerleşmiş bir yöntemdir. Sıçratma sistemlerinin ilk pratik uygulaması, 1935 yılında Penning' in bir DC plazma tüpü ve ters manyetik alan oluşturan bir sistem kullanarak düşük basınç altında sıçratma işlemini gerçekleştirmesidir. Bu deneysel sistem, koaksiyel silindirik yapıda elektronlar ve eksenel bir manyetik alandan ibaret olup, soğuk katot magnetron yapısı ile benzerliklere sahiptir. Çalışmalar sırasında 300 Gaussluk bir manyetik alanın, sıçratma basıncını onda bir oranında azalttığı ve birikme oranını arttırdığı tespit edilmiştir. Manyetik alanda sıçratmaya öncelik etmesine karşı bu tip sistemler günümüzde pratik anlamda kullanılmamaktadır.

Manyetik alanda sıçratma sistemlerinin en iyi bilinen elemanı “magnetron” ‘dur. Magnetron ifadesi ilk olarak radar sistemlerinde mikro dalga üreten vakum tüplerini tanımlamada kullanılmıştır. Günümüzde halen magnetron söz konusu amaçla kullanılmakla birlikte, mekanizmanın katotun sıçratılması için de son derece verimli bir sistem olduğunun anlaşılması üzerine sıçratma sistemlerine uygulanmıştır. Bugün kullanılan sıçratma sistemlerinin %95’ i magnetron teknolojisine sahiptir (Seshan, 2002)

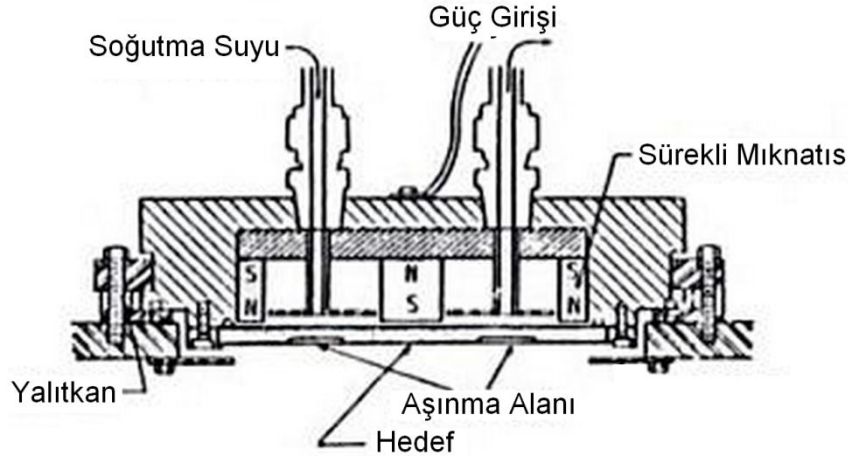
1960’ lı yıllarda manyetik alanda sıçratma, ince film üretiminde yeniden çekici bir sistem olarak görülmeye ve manyetik alanın varlığında plazma oluşumu yeniden çalışılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalar ışığında dört kutuplu manyetik alanın katottaki iyon akım yoğunluğunu kaplama oranı ile birlikte artırdığı gözlemlenmiştir. Daha sonra Gill ve Kay, ters manyetik alanda sıçratma sistemi uygulamasını gerçekleştirmiş ve sistem basıncı bilinen geleneksel manyetik alanda sıçratma sistemlerinkinden yaklaşık iki kat daha az olan ve  $10^{-5}$  Torr da çalışan bir manyetik alanda sıçratma sistemi üretmiştir. Söz konusu sistem yardımıyla süper iletken ince film üretimi gerçekleştirilmiştir. Sistemde kullanılan manyetik alan şiddeti birkaç yüz Gauss ve sıçratmada baskın olan çalışma metodu olarak kullanılmıştır.

Ancak gerçek anlamda kullanılabilir bir manyetik alanda sıçratma sisteminin üretilmesi 1970’li yılları bulmuştur. 1970’ ler Clarke S-tabancası adında silindirik magnetron sisteminin değiştirilmiş bir tipi olan yeni bir magnetron sistemi geliştirmiştir. Daha sonraları ise Chapin ilk düzlem magnetronu tanıtmıştır. Ancak günümüzde de kullanıldığı haliyle düzlem magnetronlar Thornton tarafından üretilmiştir.

Manyetik alanda sıçratma sistemleri ile ağırlıklı olarak Si teknolojisine yönelik, entegre devre üretiminin çeşitli basamaklarındaki metalizasyon işlemleri gerçekleştirilmektedir. Ancak elektronik devre üretiminin yanı sıra manyetik alanda sıçratma sistemleri halen otomotiv, mimari amaçlı cam ve sert kaplamaların üretilmesinde de tercih edilmektedir.

İnce film teknolojisinde tercih edilen magnetron tiplerinin başında silindirik ve düzlemsel magnetronlar yer alır. Teknolojide farklı magnetron tiplerinin kullanılmasının ana nedeni, biriktirme malzemesinin en verimli şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Sistemde katot olarak bulunan magnetron içerisinde yüzlerce Gaussluk manyetik alan üretebilen sürekli mıknatıslar bulunur. Sıçramanın olduğu bölgede yüksek manyetik alan dolayısı ile ısıtılı boşalma gerçekleşir ve dairesel bir parıltı gözlenir. Bu dairesel parıltı bölgesinden asıl sıçrama gerçekleştiğinden katot yüzeyi homojen olarak aşınmaz ve bu da katot olarak kullanılan hedef malzemenin ömrünü, dolayısı ile verimliliğini düşürür. Zaman içerisinde bu problemin üstesinden gelebilmek amacıyla farklı magnetron tipleri denenmiştir. Bu magnetron

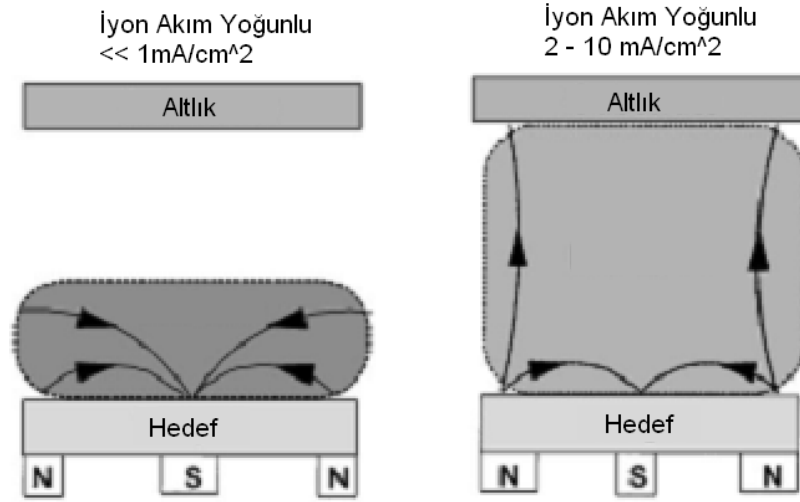
yapılarının başında aşınmayı homojen hale getirebilmek amacıyla değişen manyetik alanlı sistemler ve çok mıknatıslı yapılar denemiştir. Günümüzde kullanılan bir magnetronun şematik resmi Şekil 3.7 ' de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Günümüzde yaygın olarak kullanılan düzlem magnetronun yapısını göstermektedir (Wassa,1992)

Halen birçok uygulamada yaygın olarak kullanılan düzlemsel magnetronların geliştirilmesi, manyetik malzemelerin sıçratılması fikri ortaya atılması ile birlikte yapılan bazı tasarım değişiklikleri ile Chopra ve Vankar tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu yeni sistem, hem üniform bir aşınma sağlayarak katot ömrünü arttırmakta, hem de biriken filmlerin daha homojen olmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu tasarım, manyetik malzemelerin sıçratılmasını tıpkı manyetik olmayanlardaki kadar kolay hale getirmektedir. Söz konusu bu yeni magnetronun yapısında su soğutmalı bir bakır gövde bulunmaktadır. Gövdeye düzlemsel hedef malzemeler yine bakırdan yapılmış bir arkalık ile kolayca yerleştirilebilmektedir. Su soğutmasının gerçekleştirildiği Al gövde, teflon ile katot gövdesinden yalıtılmıştır. En dış kısımda manyetik alanı üreten mıknatıslar bulunmaktadır ve tüm gövde paslanmaz çelikten bir koruma içinde korunmaktadır. Magnetron, vakumun gerçekleştirildiği ve sıçrama ortamını oluşturan camdan kavanoz benzeri bir yapı içerisine yerleştirilmiştir.

Geleneksel düzlem magnetronlarda katot yüzeyindeki manyetik akı manyetik çekirdek tarafından kesilir. Bu tip magnetronlar dengeli magnetron olarak tanımlanmaktadır. Ancak sisteme ek bir manyetik alan uygulandığı durumda denge bozulur ve magnetron dengesiz magnetron halini alır. Dengesiz magnetron sistemleri çok farklı şekillerde üretilmiştir (Wasa vd., 2004).



Şekil 3.8 Dengesiz tipteki manyetik alanda sıçratma sistemleri

Dengeli magnetron sistemlerinde yüksek enerjili elektronlar katot yüzeyine yakın bölgelerdeki birincil manyetik tuzaktan kaçabilmektedirler. Kaçan bu elektronlar anot yüzeyinde toplanırlar. Dengesiz magnetron (Şekil 3.8) sistemlerinde ise, katot yüzeyinde oluşan fazla manyetik alan çizgileri, yüksek enerjili elektronların kaçmasına engel olur ve elektronlar bölge içerisinde çarpışmalar gerçekleştirerek sıçratma gazının iyonlaşma miktarını artırır. Bu sayede altlık yüzeyine yakın bölgelerde ikincil bir plazma oluşur. İyonize olmuş parçacık akısı dengesiz magnetron sisteminde daha yüksektir. İyonize olmuş parçacık akısı film büyümesi üzerine tıpkı iyon destekli biriktirmede olduğu gibi etki eder. Bu nedenle yöntem oksitlerin ve nitrürlerin metallere üzerinde biriktirilebilmelerine uygun olmakla birlikte, uygun biyas koşulu ile reaktif olarak biriktirme yapılabilmesi için de son derece kullanışlı bir yöntemdir. Sistemdeki yüksek iyon akım yoğunluğu, film büyümesi için gerekli kimyasal reaksiyonları olumlu yönde etkiler (Ben ve Suresh, 2004.).

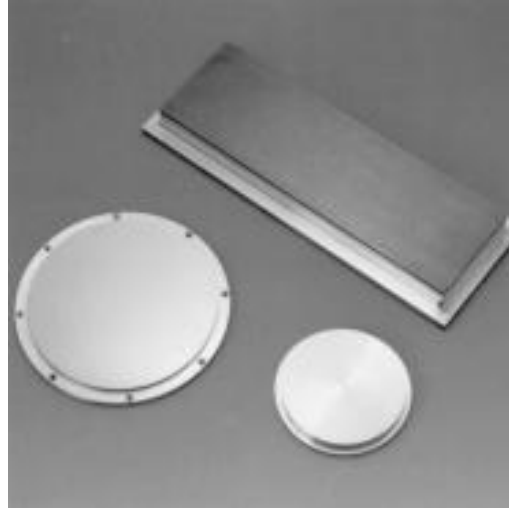
### 3.2.5.5 Sıçratma Hedefleri

En basit anlamıyla sıçratma hedefleri, biriktirilmek istenilen malzemenin kendisinden üretilmiş disklerdir. Söz konusu hedeflerin çapları araştırma amaçlı çalışmalarda 5 – 8 cm, üretim amaçlı uygulamalarda ise 15 – 30 cm. olarak değişebilmektedir (Şekil 3.9). Buna ilave olarak üretim amaçlı yapılan sıçratma işleminde dikdörtgen şeklinde hedeflerde kullanılmaktadır.

Sıçratmada kullanılan enerjinin çok büyük bölümü hedefin ısınmasına harcanır. Bu nedenle hedefler su soğutmalı bir arkalık yardımı ile yerlerine sabitlenmektedir. Yerlerine mekanik olarak sabitlenen hedeflerin çevreleri ise topraklama kalkanı ile yalıtılmıştır. Toprak kalkanı

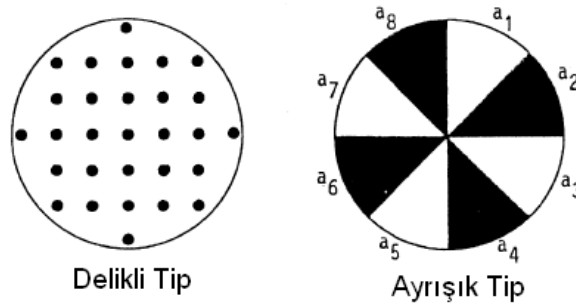
ve hedefin arası toprak kalkanına ve biriktirme işleminde kullanılan basınca bağlı olarak boşlukla kuşatılmıştır.

Hedefler, biriktirme koşullarına bağlı olarak elde edilecek filmlerin özelliklerini yakından etkiler. Bunun yanı sıra, soğutmada kullanılan suyun direnci, topraklanmış biriktirme odası ve hedefi birbirinden yalıtıma yetecek oranda yüksek olmalıdır. Söz konusu koşullara uygun olarak üretilmiş bir hedefin şematik şekli Şekil 3.10' da gösterilmektedir (Wasa ve Hayakawa, 1992;Wasa vd.2004).



Şekil 3.9 Farklı çap ve şekillerdeki sıçratma hedefleri. (Wasa vd., 2004)

Hedef malzemeler bileşik, saf ya da toz halde olabilirler. Bileşik haldeki hedeflerin kullanıldığı durumlarda biriktirilen filmin bileşimi ile hedefin bileşimi arasında tutarlılık olması gerekir. Bu tutarlılık, bileşimi oluşturan her elementin alansal oranı (Şekil 3.10) ile sağlanır. Ayrıca özellikle bileşik halde hedeflerden sıçratma yapıldığı durumlarda altlığın döndürülmesi biriken ince filmin homojenliğini artırmaktadır.



Şekil 3.10 Farklı bileşimlerde hazırlanabilecek sıçratma hedeflerinin oransal dağılımının şematik gösterimi (Wasa vd., 2004)

Bileşik haldeki hedeflerin yanı sıra metal oksitler, nitrürler, karbürler gibi doğrudan sinterlenmiş toz hedefler de sıçratarak kullanılabilir. Paslanmaz çelikten yapılmış bir arkalığın içi biriktirilecek elementlerin tozları ile doldurularak sinterlenir. Söz konusu yöntem kullanılarak oldukça geniş yelpazedeki malzemeler, bileşik halde filmler üretmek üzere kullanılabilir. Bunun yanı sıra toz haldeki numunelerin kullanılması, istenilen oranda farklı elementler ile hedefin kirletilebilmesine de olanak tanır. Toz halde hedeflerin kullanıldığı durumlarda hedef yüzeyinin önceden uzun saatler sıçratılması yüzeyi biriktirme öncesi kararlı duruma getirir. Toz haldeki hedeflerin en büyük dezavantajı, oldukça düşük sıçratma oranına sahip olmalarıdır (Wasa vd.2004).

#### 4. İNCE FİLM TEKNOLOJİSİNDE ISIL İŞLEM

İnce film teknolojisinin hizmet ettiği en önemli endüstri, hiç şüphesiz katı hal devre endüstrisidir. Son otuz yılda entegre devre üretimindeki hızlı gelişimin ana nedeni, üretim ve karakterizasyonda kullanılan yöntemlerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesidir. Özellikle günümüzde entegre devrelerinde kullanılan cihazların nanometre mertebesindeki boyutları ve dolayısıyla istenilen sığ eklem profilleri, yüksek katkı seviyeleri ve düşük hata yoğunlukları nedeniyle özel üretim sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Entegre devre üretiminde başarı, üretimde kullanılan yöntemlerin tek tek başarılarına bağlıdır ve bu yöntemler arasında ısıl işlem ayrı bir öneme sahiptir. Üretilen cihazların performansları ve güvenilirlikleri, “ısıl bütçe” olarak ifade edilen ve üretim süreci boyunca malzemenin geçirdiği tüm ısıl işlem sıcaklıklarının ve sürelerinin toplamı olarak tanımlanan büyüklük ile yakından ilişkilidir. Isıl bütçe kavramı göz önünde alındığında ince film ve yarıiletken üretiminde kısa sürede ve yüksek ısıtma hızları ile uygulanan ısıl işlemler, entegre devre teknolojisi için anahtar rol oynamaktadır. Hızlı ısıl işlemde ısıl bütçe, yarıiletken teknolojisi için son derece önemlidir. Bunun en önemli nedeni, kaynak/savak bölgelerindeki difüzyon derinliklerinin kontrolü, CMOS teknolojisindeki tabaka dirençleri, yeniden kristalleşme, katkı aktivasyonu ve iyon ekleme ile oluşturulan bölgelerdeki difüzyonun sağlanabilmesinin sıcaklık-zaman ilişkisine sıkı sıkıya bağlı olmasıdır. (Li vd., 2001, Holloway ve McGuire, 1995).

Temel olarak ince filmlere uygulanan ısıl işlemler, malzemenin işleme verdiği tepki ve işlem süresi göre üç ana grupta ele alınabilir.

- Adyabatik proses,
- Isıl akı prosesleri
- Hızlı izotermal prosesler

Bu ısıl işlem türlerinin ısı-derinlik profilleri, birbirlerinden oldukça farklıdır ve özellikle yarıiletken uygulamalarında bu özellik son derece önemlidir.

Adyabatik prosesler, genellikle yüksek enerjili lazer demetinin  $10^{-6}$  sn süresince malzeme yüzeyini taraması ile gerçekleştirilir. Bu süre, yarı iletken malzemelerin ısıl tepki sürelerinden daha kısadır ve ısıl işlem süresi tepki süresine oranla belirlenir.

Bir başka hızlı ısıl işlem türü olan ısıl akı proseslerinde ise, ısıtma işleminde genellikle elektron demeti kullanılmaktadır ve ısıl işlemler yaklaşık  $10^{-4}$  sn. mertebelerinde

gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, adyabatik proseslerde olduğu gibi, yarıiletkenlerin ısı işlemlerinde ve katkı aktifleştirmesinde tercih edilmektedir.

Hızlı İzotermal ısı işlemde ısı işlem uygulanan malzeme, yüksek hızda ısınma ve soğuma sırasında ısı olarak izole edilmiş durumdadır. İyi tasarlanmış sistemlerde malzemede hemen hemen hiç ısı gradyan görülmez. Uygulanan işlem sırasında hızlı izotermal ısı döngüleri: ısınma, yarıdengeli hale gelme ve soğuma şeklinde üç ana basamakla oluşur. Hızlı izotermal proseslerde kullanılan ısı kaynağı, genellikle uyumlu olmayan halojen volfram ve ark lambalardır ve malzemeler 1 – 100 sn gibi sürelerle ısı işleme tabi tutulur. Diğer iki gruptaki ısı kaynaklarından farklı olarak kullanılan halojen lambalar, yapıları gereği odaklanmamış aydınlatma ve ısıtma yaptıklarından ışık tüm numune üzerine düşer ve tüm yüzeyi eşit miktarda ısıca izole edilmiş bir şekilde aydınlatır. Bu nedenle iyi tasarlanmış bir izotermal ısı işlem sistemi ile, lazer gibi odaklanmış ısı kaynaklarının malzeme yüzeyinde oluşturduğu bölgesel ısı gerilmelerinin önüne geçilmiş olur. Bu sistemlerin geleneksel fırınlara göre en önemli üstünlüğü, ısı işlemin çok kısa olmasına bağlı olarak difüzyonun yalnızca yüzeyde olmasını sağlamaktır. Söz konusu prosesleri gerçekleştirebilmek için “Hızlı Isıl İşlem” olarak adlandırılan özel fırın sistemleri geliştirilmiştir.

#### 4.1 Hızlı Isıl İşlem (RTP)

Hızlı ısı işlemin tanımı ile ilgili tam bir yorum birliğine varılamamış olsa da, RTP sistemi yapısındaki farklılıkları öne çıkaracak şekilde bir takım ifadelerle tanımlanır. Bu ifadeler:

- Tek pul ısı işlem sistemidir.
- Geleneksel fırınlara göre kısa süreli ısı işlem yapabilmektedir.
- Yüksek ısıtma ve soğutma hızlarına sahiptir.
- Numune, ısı işlem odasından ısı olarak yalıtılmıştır.
- Soğuk duvarlı bir sistemdir ve ısı işlem ortamı hassas olarak kontrol edilir.
- Isıl işlemler ısı olarak kontrol edilen yüzey reaksiyonları şeklinde devam eder.

şeklinde özetlenebilmektedir (Lojek, 2001).

Bu ifadelerin tümünün ışığında RTP, ince filmleri yüksek hızla ısı işlem sıcaklığına getirebilen, hassas sıcaklık ve ortam kontrolüne sahip, modern bir ısı işlem yöntemidir. Özellikle amorf yapıdaki ince filmlerin RTP ile kristal hale getirilmesi ile ilgili olarak birçok deneysel çalışma mevcuttur (Dong ve Gooding, 1995).

Günümüzde ağırlıklı olarak RTP sistemleri, GaAs ve Si entegre devrelerin üretiminde kullanılan isotermal ısı işlemler için kullanılmaktadır. Tek pul ısı işlem sistemi olarak da değerlendirilebilen RTP sistemi, zaman ve maliyet bakımından oldukça kazançlı bir yöntemdir.

Yöntemde ısı kaynağı, ışıktır. Bu nedenle RTP sistemindeki ışık ve malzeme etkileşmesi, yöntemin başarısını önemli ölçüde etkilemektedir. Sistemde tercih edilen ana ışık kaynağı, vakum altında UV' dir. Ancak volfram halojen lambaların ısı kaynağı olarak kullanımı, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında proses süresini önemli oranda düşürmektedir. Ayrıca RTP sistemlerinde ısı işlem süresince ısı gerilmenin ölçülmesi ve ısıtma soğutma hızları ile arasındaki ilişkinin belirlenmesi, üretilen ince film sistemlerinin en az hata ile üretilmesini sağlar (Holloway ve McGuire, 1995).

RTP ile ısı işlem süreleri genellikle  $10^{-8}$  ile  $10^2$  saniye aralığındadır. Bu zaman aralığının geleneksel fırınlarla yakalanabilmesi, gerek işlem gören numunelerin ısı kütleleri, gerekse fırının ısınma – soğuma süreleri göz önüne alındığında mümkün değildir. RTP sistemlerine alternatif olarak, görünür ve kızılötesi lazerler, elektron ve iyon demeti ile ısıtma, uyumlu olmayan ışık ve bunlara ek olarak dirençli ısıtıcılardan elde edilen kara cisim ışıması gibi yöntemler ele alınabilir. Söz konusu yöntemler gerek enerjinin malzemeye transferi gerekse enerjinin üretimi konularında birbirlerinden oldukça farklıdır.

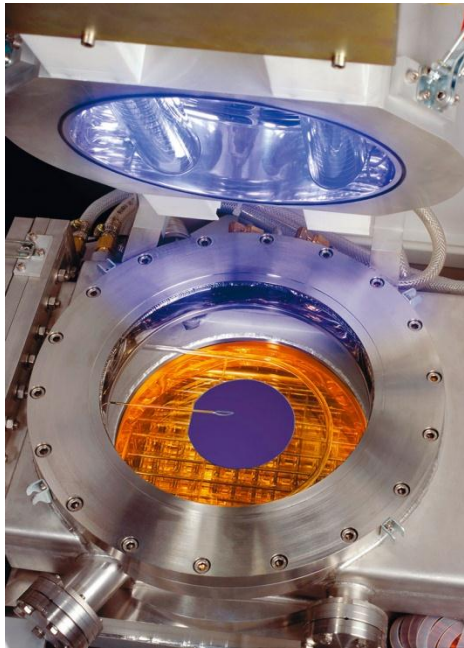
RTP sistemleri, düşük maliyet, ısı bütçe, güç tüketimi ve yüksek verimlilik nedeniyle günümüz optoelektronik ve mikroelektronik sistemlerinde, güneş hücreleri, panel elektronik cihazlar, süperiletkenler ve manyetik ince filmlerin üretiminde tercih edilen bir ısı işlem yöntemidir (Holloway ve McGuire, 1995).

#### **4.2 RTP Sistemlerinin Yapıları ve Çalışma Prensipleri**

RTP sistemi, numune çevresini saran gaz atmosferinin ısısının yüksek hızla değiştirilmesi prensibiyle çalışır. Yöntem, hem atmosferik hem de düşük basınçlarda kullanılabilir. RTP yöntemi sıklıkla, ince filmlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek elektronik özelliklerini iyileştirme amacı ile kullanılan bir yöntemdir. Isıtma işlemi iki temel prensibe uyularak gerçekleştirilir. Bunlardan ilki, numunenin sürekli ve kararlı durumda sıcak duvarlı bir oda içerisinde ısıtılması şeklinde tanımlanan yöntemdir. Bu yöntemde hızlı sıcaklık değişimi, numunenin belli bir sıcaklığa sahip sistem içerisinde mekanik olarak hareket ettirilmesi veya ısı farklı bölgeler arasında yerinin değiştirilmesi ile elde edilir. Diğer yöntemde ise soğuk duvarlı bir oda içerisindeki numune, akkor halindeki ısı elemanları ya da ark lambaları ile ısıtılır. Bu yöntemin ilk yöntemden temel farkı, numunedeki sıcaklık

değişiminin fırının farklı bölgelerinde sıcaklık farklılığından değil, ısı kaynağı olan lambaların optik çıkış güçlerinin değiştirilerek ayarlanmasıdır.

Ticari olarak satılan RTP (Şekil 4.1) sistemlerinin çoğu, numunenin kuvarz bir oda içerisinde bulunduğu ve odanın üst kısmına lineer olarak yerleştirilmiş halojen lambalarla aydınlatıldığı bir tasarıma sahiptir. Kuvarz oda hava ile soğutulur ve içerisinde bulunan numunenin lambalardan izole edilmiş olarak ısı işlem görmesini sağlar. Sistemde lambalar, ısıtma homojenliğini sağlamak için aksel simetri şeklinde yerleştirilmiştir. Numunenin ısı işlem süresince döndürülmesi de, ısı işlem homojenliğini artıran bir başka etkidir (Doering ve Nishi, 2007).

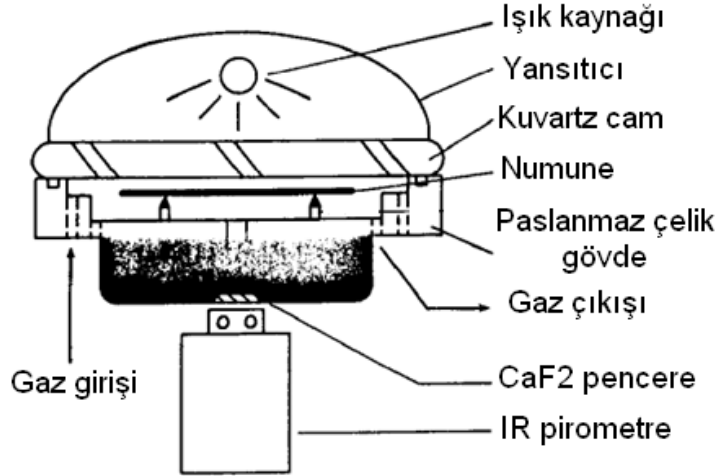


Şekil 4.1. Ticari bir RTP sistemini göstermektedir [1].

Günümüz RTP sistemlerinde ısı işlem gerçekleştirildiği oda oldukça küçüktür. Bunun en önemli nedeni numunenin yerleştirildiği bölgede aksel dönüş hariç hareket etmesine ihtiyaç olmaması ve bir defada sadece bir numunenin ısı işlem görmesidir. Küçük oda tasarımı, ısı işlemde homojenliği artırdığı gibi, işlem sırasında gazın kullanıldığı koşulda gaz sarfiyatını da önemli ölçüde azaltır. Buna ilave olarak küçük hacimden geçirilen gazların sıcaklıklarının ve akış hızlarının da kontrol edilebilmesi daha kolaydır (Li vd, 2001).

Yapısal olarak RTP' yi (Şekil 4.2) geleneksel fırınlardan ayıran birçok farklılık olmasına karşın RTP' nin en önemli farklılığı, ısıtma şeklidir. Geleneksel fırınlarda ısı işlem gören numuneler izotermal bir ortam içerisindeydir. Diğer bir deyişle, fırın duvarları ve numune aynı sıcaklıktadır. Buna karşın RTP sistemlerinde numunelerin sıcaklığı, odanın duvarlarının sıcaklığından çok daha yüksektir. Bu ısı dengesizlik, numunelerin çok yüksek hızda

ısınmasına ve soğutulmasına olanak verir. Numune ve lambaların sıcaklıklarının yüksek olmasından da anlaşılacağı gibi RTP sistemindeki ana ısı transfer metodu ışık yayınıdır. RTP sistemleri kendi aralarında sıcak ve soğuk duvarlı olmak üzere ikiye ayrılır (Doering ve Nishi, 2007)



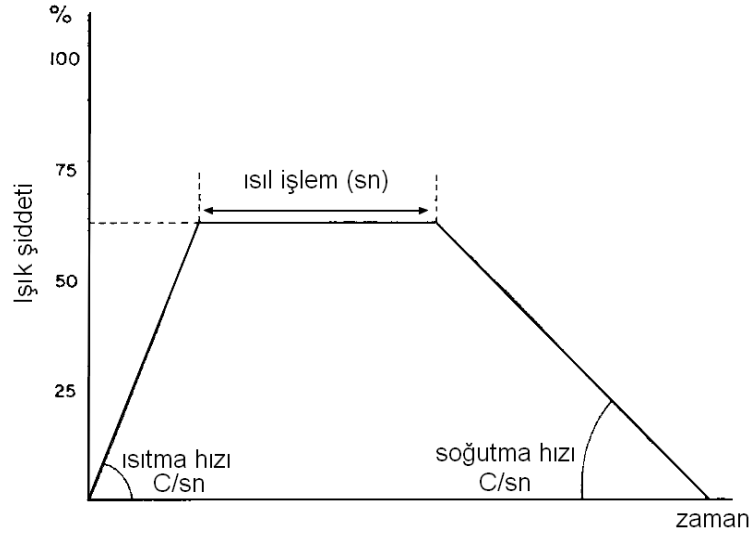
Şekil 4.2 RTP sistemi ve bileşenlerinin şematik gösterimi (Doering ve Nishi, 2007)

Soğuk duvarlı sistemlerin yapıları ile sıcak duvarlı sistemlerin yapıları birbirlerinde oldukça farklıdır. Sıcak duvarlı RTP sistemlerinde numunelerin farklı ısınma ve soğuma hızlarına ulaşabilmeleri için, numunenin kolonsal şeklindeki ısıl işlem odası içerisinde yaklaşık 100 cm' e varan mesafelerde hareket ettirilmesi sıcaklık farklılıklarının yaratılabilmesi gerekir. Bu tip sıcak duvarlı sistemlerde ve yarıiletken teknolojisi olduğu gibi büyük çaplı pulların kullanıldığı durumlarda ısıl işlem odalarının büyük tasarımları gerekir. Karşılaştırma amacıyla yaygın olarak kullanılan pul çapları olan 200 mm ve 300 mm ele alındığında pulların güvenli hareketi için sırasıyla yaklaşık 31 ve 71 lt hacme ihtiyaç duymakta ve bu da 100 cm' lik bir hareket mesafesinde yaklaşık 100 lt hacmin gerekli olduğunu göstermektedir. Ancak bu kadar büyük bir hacim için özellikle çoklu gaz rejimlerinin kullanılacağı durumlarda birbiri ardına ve hızlı gaz değişimlerinin yapılması oldukça güçtür. Ayrıca söz konusu yapılarda gaz kullanımı fazladır ve zehirli, korozif, yanıcı gazların kullanıldığı reaksiyon durumlarında yüksek sıcaklığın da etkisi ile ciddi güvenlik tehlikeleri oluşmaktadır. Dolayısı ile günümüz teknolojisinde sıcak duvarlı RTP sistemlerinin örneklerine yaygın olarak rastlanmamaktadır (Li vd, 2001).

Uygulanan bazı ısıl işlemlerde yüksek ısınma sürelerinin yanı sıra numunelerin yüksek hızda soğutulması da istenilebilir. Lambalı sistemlerde lambalar kapatılıp numunenin soğuk duvarlı odada bırakılması teorik olarak ulaşılabilecek en yüksek soğuma hızı olarak düşünülür. Fakat

gerçekte bir lambalı sistemde içeriye verilen radyasyonun tekrar yansımaları ve az da olsa ısınan yan duvarlar ve numunede belli bir ısı artışına neden olur. Ancak 500 °C' nin altındaki sıcaklıklarda iyi konvektif soğutma ile ısı kayıplarının yüksek olması sağlanarak son derece iyi soğuma hızları yakalanabilir (Doering ve Nishi, 2007).

RTP işlemi genellikle özel bir ısı işlem sıcaklığı ve süresince uygulanır. Dolayısıyla özellikle çok basamaklı uygulanan RTP işlemlerinde malzeme için tespit edilen kritik sıcaklık üzerindeki ısı işlemleri, ısı bütçe hesabı gereği birbirlerine eklenerek belirlenmelidir. Bu çok basamaklı ve ısı bütçe göz önüne alınarak yapılan ısı işlemlerinin en önemli avantajı, basamakların her birinin özellikleri göz önüne alınarak ısı geriliminin düşük tutulmasının sağlanabilmesidir (Doering ve Nishi, 2007).



Şekil 4.3 RTP sisteminde izotermal ısıtma çevriminde ısınma soğuma hızlarını göstermektedir (Holloway ve Mcguire, 1995)

#### 4.4 Malzeme – Radyasyon Etkileşmesi

RTP 'de numunenin ısınma prensibi, ışınma gücü ve numunenin ısıyı absorblayabilme yeteneğini kapsayan ayrıntılı bir teoridir. Teorideki parametreler ağırlıklı olarak RTP fırınının yapısına bağlı olmakla birlikte, numune açısından işlemi etkileyen en önemli etken yüzey özelliğidir. Çünkü aydınlatmada kullanılan ışığın dalgaboyu, numunenin yüzeyindeki desenle orantılı olarak değerlendirilmelidir.

İnce filmlerin yapıları gereği hacimsel malzemelerden farklı olmaları nedeniyle, ışığı oluşturan fotonlar ile malzeme arasındaki etkileşimin kimyasal ve fiziksel boyutta iyice anlaşılması gereklidir. Söz konusu etkileşimde oluşabilecek muhtemel mekanizmalar,

doğrudan ortam parçacıklarının uyarılması, tabakaların doğrudan uyarılması ve hacimsel altlık kaynaklı uyarılma olarak ele alınabilir.

Doğrudan ortam parçacıklarının uyarılması mekanizmasında, optik parçalanma ve ortamdaki gaz fazındaki taneciklerin optik yolla doğrudan uyarılmış seviyeye çıkarılması söz konusudur. Bu koşulda, ortamdaki parçacıkların temel düzeyin birkaç eV üzerindeki bir düzeye optik olarak uyarılmaları, bu parçacıkların altlık malzeme yüzeyinde gerekli reaksiyonları başlatabilecek enerji düzeyine ulaşabilmelerini sağlar. Ortamdaki gazların optik parçalanması gaz fazında ya da altlık yüzeyinde olabilir. Gaz fazındaki parçacıklarla enerji iletimi sağlandığı durumda, parçacıkların yüksek enerjilerini birbirleri ile çarpışarak kaybetmeden altlık yüzeyine gelebilmeleri gerekir. Bu nedenle işlemin yüksek vakum altında ya da atmosferik basınçta gerçekleştiği koşul için sonuçlar birbirlerinden tamamen farklı olacaktır.

Gaz altında yapılan işlemde yapıldığı koşulda kullanılan gazların gaz fazı emilim katsayılarının bilinmesi gereklidir. Ancak yüzeyde etkileşme gerçekleştikten sonra söz konusu değerlerde kullanılan gaza ve altlığa bağlı olarak çok çeşitli değişiklikler gözlenebilir.

Foton - altlık etkileşmesinde gözlenen bir diğer mekanizma ise, doğrudan üst tabakanın uyarılması mekanizmasıdır. İdeal şartlarda ve ortamdaki gaz ile altlığın optik ara yüzeyinin ihmal edilebilir olması durumunda altlığın üst tabakası, belli bir dalga boyunu absorbe eder. Fotonlar altlık malzeme tarafından absorbe edilir ve bu şekilde optik olarak uyarılan altlıkta reaksiyon oluşabileceği gibi, söz konusu enerji, altlığın kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik oluşmadan harcanabilir.

#### **4.5 RTP Sistemlerinde Sıcaklık Kontrolü**

RTP' lerdeki ısınma sistemi, kara cisim ışıması olarak bilinen olgu ile açıklanmaktadır. Isıl ışıma ile ısınma özellikleri, mükemmel bir yayıcı olarak bilinen kara cisminkine benzer. Gerçek malzemeler her hangi bir sıcaklıkta bir kara cismin yayacağından çok daha az ışıma yayarlar. Bir cismin ışın yayabilme yeteneği aynı sıcaklıkta cismin yaydığı ile kara cismin yaydığı miktara oranıdır. Bunun yanı sıra, bir cismin yaydığı ısı ışıma miktarı, ışımanın geliş açısına, polarizasyon durumuna, dalga boyuna ve yüzeyin optik özelliklerine yakından bağlıdır (Holloway ve McGuire, 1995).

Yapıları gereği, ince filmlerin ısı işlemlerinde sıcaklık kontrolü, hacimsel malzemelerinkine göre daha hassas yapılmalıdır. Bazı durumlarda bu hassas kontrol,  $\pm 2$  °C 'lik sapma değerleri sınır kabul edilerek gerçekleştirilir. Sıcaklık kontrolünde birincil öncelik, sistemde işlem gören altlığın yüzeyi boyunca sıcaklık dağılımının üniform ve verilen sınır değerler içerisinde olmasının sağlanmasıdır. İkincil öncelik ise, numune büyüklüğü, çapı ve film kalınlığı her ne

olursa olsun birbirinden bağımsız yapılan işlemlerin tümünün benzer olmasıdır. Bu öncelikler altında işlemler ele alındığında, gerçekte sistemdeki en büyük değişkenin işlem gören altlığın kendisi olduğu görülür. Çünkü altlığın ısınma soğuma homojenliğinin sağlanabilmesinin yanı sıra, aynı zamanda uygulanan radyasyona tepkisi de göz önüne alınması gereken önemli bir etkidir (Doering ve Nishi, 2007).

Lamba temelli bir RTP sisteminde numune sıcaklığı genellikle numunenin alt yüzeyinden ve birkaç farklı noktadan yapılan ölçümlerle takip edilir. Elde edilen sıcaklık değerleri yardımıyla fırın içerisindeki lambalar farklı süre ve sıklıklarla yakılarak sıcaklığın işlem süresince ayarlanabilmesi mümkün olur. Isıl işlem süresince numunenin içinde bulunduğu soğuk ortam ve lamba çıkış kontrollerinin düzensiz doğası, ısıl dengeden oldukça uzaktır. Bu nedenle tüm işlemler oldukça karmaşık optik ve elektronik veri işlenmesi gerekliliğini doğurmaktadır ve bu nedenle lamba temelli RTP sistemleri oldukça pahalıdır (Li vd., 2001).

RTP ile ilgili olarak sistemde kullanılan ısı kontrol mekanizmaları pirometre, doğrudan temas halindeki ısıl çift, ışık şiddeti kontrol ayarı ve sıcak yüzeydir. Kullanılacak yöntem ne olursa olsun, seçilen yöntem hem beklenen şartların tümünü sağlamalı, hem de uygulaması ve kalibrasyonu kolay, maliyeti düşük ve ardı ardına yapılacak ısıl işlemlerin yükünü kaldırabilecek dayanıklılıkta olmalıdır (Doering ve Nishi, 2007).

## 5. İNCE FİLMERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİ

İnce filmlerin şekillendirilmesi, özellikle ince film teknolojilerinin en önemli uygulamalarından olan yarıiletken entegre devre üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. İnce filmlerin şekillendirilmesi, ince filmlerin belli bir geometriye sahip olacak şekilde altlık malzeme üzerine biriktirilmesi ya da önceden biriktirilen filmin doğrudan altlık üzerinde şekillendirilmesi olarak değerlendirilebilir.

İnce filmlerin şekillendirilmesinin çok sık uygulandığı mikro elektro mekanik sistemler ve yarıiletken teknolojilerinde kullanılan en pahalı ve hassas teknoloji optik litografi teknolojisi. Hemen hemen yarıiletken devre üretim teknolojisine ayrılan paranın üçte birini kapsamaktadır ve üretilen cihazların boylarının düşürülmesi ile birlikte bu oran her geçen gün artmaktadır (Campbell, 2001).

Litografi optik prensibine dayanılarak geliştirilmiş bir ince film şekillendirme yöntemi olduğundan, ışığı ilgilendiren saçılma gibi bazı olgular, litografi yöntemi bakımından da bağlayıcıdır. Sürekli daha yüksek çözünürlüklerde desenlerin üretilme çabası, optik biliminin sınırlarını zorlamış ve alternatif litografi yöntemlerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Bu alternatif yöntemler:

- Yakınsak X-ışını litografisi
- Derin UV litografisi
- Elektron demeti litografisi
- Optik olarak doğrudan yazma
- Elektron yansıtma
- İyon yansıtma

Litografileri olarak sıralanabilir (Levinson, 2005; Helbert, 2001).

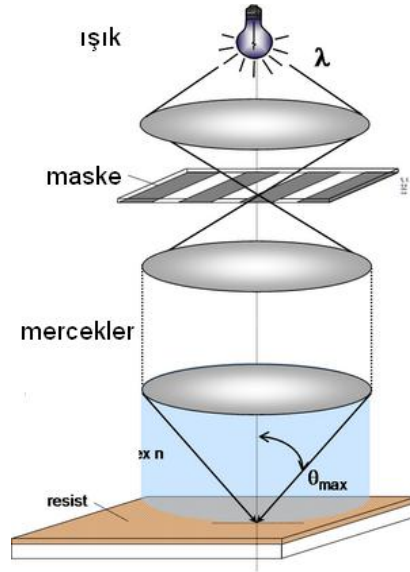
Biriktirilen ince filmin altlık yüzeyinde şekillendirilmesi, litografi ve aşındırma işlemlerini içeren son derece hassas bir süreçtir. Litografi yöntemi, ince filmin, maske üzerindeki geometrik şeklin ışığa duyarlı bir kimyasal üzerine aktarılması yolu ile şekillendirilmesidir. Aşındırma ise, maske ile belirlenmiş bölgelerdeki ince filmi altlık yüzeyinden kaldırır. Özellikle yarıiletken teknolojileri gibi çok sayıda birbirinden farklı malzemeyi içeren uygulamalarda, hem farklı malzemelerin hem de çok katlı tabakaların birbirleri ardına şekillendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İşlemdeki zorlukların başında, yanal boyutların

şekillendirilmesindeki güçlükler gelir. Yanal boyutlandırma, özellikle yarıiletken elemanların hem çalışma hızlarını hem de birbirlerine yaklaştırılabilme mesafelerini etkilemektedir. Tüm yarıiletken süreçleri göz önüne alındığında üretim teknolojisinin başarısı, doğrudan ince filmlerin şekillendirmesine bağlı olduğundan teknolojinin adı, üretilen elemanların boyutu ile adlandırılmaktadır (çeyrek mikro CMOS gibi) (Campbell, 2001; May ve Spanos, 2006; Levinson, 2005).

Çok katlı ince filmlerin şekillendirilmesi, iki basamakta ele alınmaktadır. Çok katlı bir sistemde öncelikle oluşturulacak desen tabakalar halinde ayrılır. Her bir tabaka ince filmin bir kısmını şekillendirilecek deseni taşıyacak şekilde hazırlanır. Bu desenler öncelikle maske adı verilen bir desen taşıyıcı üzerinde oluşturulur. Maske hazırlandıktan sonra ince film üzerine deseni aktarabilmek için içerisinden ışık geçirilir. Geçen ışık ince film üzerinde üretilen ince, ışığa duyarlı tabakanın belli bölgelerinde yapının değişmesine neden olur. Bu yapısal farklılık maskenin taşıdığı desenin doğrudan ince film üzerindeki ışığa duyarlı malzemede üretilebilmesine olanak tanır. Işıkla yapılan bu şekillendirme işlemi optik litografi olarak bilinmektedir ve kullanılan ışık kaynakları özellikle yapılan işleme bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yarıiletken teknolojisinde üretilen cihazlardan düşük enerji tüketimi, işlem kapasitesinin artması gibi hedefler, üretilen cihaz boylarında küçültülmesi gerekliliğini doğurmaktadır. Bu küçülme, litografik süreçlerde kullanılan ışık kaynaklarını ve dolayısı ile ışığa duyarlı malzemelerin de değişmesine neden olmaktadır. Excimer lazer ve faz kontrast maskeleme teknikleri gibi teknikler kullanılarak optik litografi son derece küçük desenler üretmek mümkündür. Ayrıca çok kısa dalga boyuna sahip ışık kullanarak ince hatlar elde edilebilmektedir. Litografi sadece ışık ışınları ile sınırlı bir şekillendirme teknolojisi değildir. Özellikle çok ince hatların üretilmesinde kullanılan litografik yöntemlerinin başında elektron demeti ve morötesi litografisi gelmektedir. Ayrıca optik litografinin sürekli gelişimi sayesinde ve sürekli daha kısa dalga boyları inilmesi ile birlikte, mono optik litografi uygulamaları da hızla yaygınlaşmaktadır. Derin morötesi uygulamaları ile günümüzde rahatlıkla 0.1 µm ve altında litografik desenler üretilebilmektedir (Campbell, 2001; May ve Spanos, 2006).

### **5.1 Optik Litografi**

Optik litografi işlemi (Şekil 5.1), maskelerin üretimi ile başlar. Günümüzde maskelerin taşıdıkları desenin karmaşıklığı ve yoğunluğu göz önüne alındığında ağırlıklı olarak bilgisayar destekli çizim programları (CAD) kullanılarak tasarlanmaktadır. Bu şekilde çalışma, karmaşık sistemleri daha küçük katmanlara ayırmasını da sağladığından, üretim ve tasarım basamaklarında kolaylık getirmektedir (Campbell, 2001).



Şekil 5.1 Fotokimyasal kaplı numunenin litografi işlemi [2].

Desenin tasarlanması ve desenin ince film üzerine aktarılması basamaklarından önce, maskelerin tasarlanması ve üretimi yapılmalıdır. Yapılacak işleme özel olarak, üretilecek katmanların sayısına göre maskeler tasarlanmaktadır. Günümüz yarıiletken teknolojisinde maske sayısı 30' lara ulaşılmıştır. Her bir maske, tek bir katman deseni taşımaktadır ve tek başına üretilmesi gerekir. Maskelerin boyutları, maskenin hizalanmasında kullanılacak yönteme bağlı olarak kullanılan altlık boyutunda ya da transfer edilecek desenin büyüklüğüne (1x) ve pozlama koşullarına bağlı olarak belli oranda küçültülmüş hali ile (5x, 10x) kullanılabilir (Campbell, 2001).

Maskelerin kendileri de maskeme işlemine benzer bir yöntemle ve genellikle ergimiş silika üzerinde üretilmektedir. Maske altlıklarından ve dolayısı ile maskelerden beklenen en önemli özellikler, kullanılan dalga boyunda yüksek optik geçirgenliktir. Bunun yanı sıra, düşük ısıl genleşme katsayısı ve maske boyunca yüksek düzgünlükler de maskelerin önemli özellikleri arasındadır. Ayrıca, kullanılan ışığın saçılmasını engellemek amacıyla, kullanılan maskenin yüzeyinin son derece iyi parlatılmış (cilalanmış) olması gerekmektedir. Maskelerde kullanılan camın bir yüzeyi opak bir tabaka ile kaplıdır. Bu tabaka camın bir yüzeyine Cr biriktirilmesi ile üretilir. Daha sonra maske üzerinde bulunması istenilen desen, lazer kullanılarak biriktirilmiş Cr katman üzerine işlenir. Cam üzerinde Cr kullanılarak yapılan biriktirme ve desen oluşturma işlemlerinin ardından, Cr tabakada istenilmeyen kalkma ve dökülme bölgeleri kontrol edilir ve gerekli olduğu durumda yeniden kaplama işlemi uygulanır. Aksi halde Cr tabaka oluşabilecek boşluklar, doğrudan ince film aktarılacak ve istenilmeyen sonuçlara neden olacaktır (Campbell, 2001).

Kullanılan maskelerin yanı sıra, optik litografinin bir diğer önemli unsuru da teknolojinin adından da anlaşılacağı gibi kullanılan ışıktır. Işık ağırlıklı olarak UV' e ait dalga boylarında olmakla birlikte, farklı şekillerde uygulanan litografi yöntemlerinde elektron ve iyon demetleri de kullanılabilir. Bunun yanı sıra bazı günümüz uygulamalarında litografi sistemlerinde X - ışınları da kullanılmaktadır. İnce film üzerine maske yerleştirildikten sonra maskenin üzeri, kullanılan ışık ile aydınlatılır, diğer bir deyişle pozlanır. Ancak maskeleme işlemleri sırasında gerçekte pozlanan ve desenin olduğu yüzey doğrudan ince film değil, önceden ince film yüzeyine uygulanan ve ışığa son derece duyarlı bir malzeme olan “fotokimyasal”dır (Campbell, 2001; Helbert, 2001).

Fotokimyasal malzemelerin özellikleri fotokimya (Grotthuss-Draper yasası) olarak bilinen bilim dalı tarafından çalışılmakta ve belirlenmektedir. Fotokimya çalışmalarında kimyasal reaksiyonlar, sadece emilen ışık yardımıyla ilerler ve ışık enerjisi nedeniyle kimyasal yapı değişir. Dolayısıyla reaksiyonun oluşabilmesinin öncelikli şartı, foto kimyasalın gönderilen dalga boyunu emmesidir. Emilim olayı makroskobik ya da mikroskobik ölçekte olabilmektedir. Makroskobik ölçekte, ışığı emen malzeme ile emilen ışığın konsantrasyonu ve uygulandığı uzaklığın çarpımı arasında lineer bir ilişki vardır. Mikroskobik ölçekte ise, ışık fotonlarının atom ya da molekül tarafından emilmesi sonucu malzeme elektronlarının daha yüksek enerjili bir duruma geçmesi ile açıklanabilir (Mack, 2007).

Fotokimyasal malzemeler, uygulanan radyasyona verdikleri tepkiye bağlı olarak pozitif ve negatif olarak sınıflandırılabilirler. Pozitif foto kimyasalların pozlanan yüzeyleri, kullanılan banyo çözeltisinde daha kolay çözülebilecek hale gelir. Dolayısıyla pozlama ardından kimyasal üzerinde oluşan desen, maskenin taşıdığı desen ile aynıdır. Pozitif kimyasallar temelde üç elemandan oluşur, bunlar: ışığa duyarlı bileşik, ana reçine ve organik çözücüdür. Pozlama öncesi ışığa duyarlı bileşik, banyo çözeltisinde çözülemeyecek haldedir. Ancak pozlama ardından bu bileşik, ışık içerisindeki radyasyonu emerek pozlanan desen bölgelerindeki yapısını değiştirir ve banyo çözeltisi içerisinde çözünür hale geçer. Bu sayede pozlama ardından yapılan banyoda pozlanan bölümlerdeki kimyasal, ince film yüzeyinden kalkar (May ve Spanos, 2006).

Negatif kimyasallarda ise durum pozitiflerde olduğunun tam tersidir. Pozlanan bölgelerde malzeme daha az çözünür bir yapıya dönüşür ve dolayısıyla negatif fotokimyasal ile uygulanan maske ve üretilen desen, maskenin taşıdığı ile tam olarak terstir. Pozlama sırasında ışığa duyarlı malzeme ışık içerisindeki enerjiyi alarak kimyasal enerjiye dönüştürür ve bu

enerji ile polimerin çapraz bağlar oluşturması sağlanır. Çapraz bağlı yapı, daha büyük moleküler ağırlığa sahiptir ve banyo çözeltisinde çözünemez.

Negatif kimyasalların pozitif olanlara göre en önemli dezavantajı, banyo çözeltisini tüm kütle tarafından emilmesi ve bu nedenle ince film yüzeyindeki kimyasalın şişmesidir. Bu şişme negatif kimyasalların yüksek çözünürlüklü kullanımını kısıtlamaktadır (May ve Spanos, 2006).

Optik litografi işleminin başarısı iki ana parçadan oluşur. Bu parçalardan bir tanesi pozlama ve maskeler, diğeri bir tanesi ise, foto kimyasalın kullanılan ışık ile kimyasal tepkimesidir. Kullanılan ışık görünür, morötesi, derin morötesi, çok derin morötesi olabilir. Dolayısıyla her bir dalga boyuna uygun da fotoresist malzeme kullanılması gerekir (Campbell, 2001).

## 5.2 Desenlerin Aktarılması

Maske üzerindeki desenlerin foto kimyasalın üzerine, dolayısı ile de ince filmlere aktarılması işlemlerinin tümü, tozsuz odada ve sarı ışık (genellikle foto kimyasal malzemelerin çok büyük bir bölümü 0.5  $\mu\text{m}$ 'den büyük dalga boylarına duyarlı değildir.) altında gerçekleştirilmelidir. Foto kimyasallar genellikle sıvı formda bulduklarından, altlık malzeme üzerine vakum altında ve döner kaplayıcılar kullanılarak kaplanır. Yarıiletken endüstrisinde kullanılan tipik bir foto kimyasal uygulamasında 1000 ile 10.000 rpm ile döndürülen bir altlık için fotoresist uygulama kalınlığı yaklaşık 0.5 – 1  $\mu\text{m}$ ' dir. Fotoresist kalınlığı genellikle fotoresistin viskozitesi ile ilişkilendirilerek değerlendirilir.

Foto kimyasallar yüzeye uygulandıktan sonra genellikle iki basamaklı bir pişirme işlemi uygulanır. Pişirme işlemi kullanılan kimyasalın tipine göre değişse de genellikle 90 – 120 °C arasında ve 60 – 120 sn dolaylarında bir süre ile gerçekleştirilir. Pişirme işlemi hem resist içerisindeki çözücünün uçmasını sağlar hem de altlığa yapışmayı artırır. Pozlama işleminin ardından resist banyo çözeltisi içerisinde uygun süre ve sıcaklıkta banyo edilir. Banyo ardından bir kez daha pişirilir. Bu pişirme işlemi, resistin daha da sertleştirerek ıslak aşındırma sürecine dayanıklılığını artırır (Campbell, 2001).

## 5.3 Aşındırma

Aşındırma işlemi, ince filmlerin şekillendirme basamaklarının sonuncusunu oluşturur. Aşındırma temel olarak ıslak ve kuru olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Bu yöntemlerden ıslak aşındırma, uygun sıcaklıkta çözelti halindeki aşındırıcı kimyasala malzemelerin belirlenen süre ile maruz bırakılması şeklinde gerçekleştirilir. Kuru aşındırma ise, tamamen ya

da kısmen iyonize olmuş gaz topluluğu olan plazma içerisinde gerçekleştirilir ve istenilen malzeme seçici olarak altlık yüzeyinden plazma kullanılarak kaldırılır (May ve Spanos, 2006).

Kuru aşındırma yönteminde aşınma, plazma içerisinde gerçekleştirilir. Plazma belli bir basınçtaki gaza yeter miktarda bir potansiyel uygulanması ve gazın parçalanarak iyonlaşması ile elde edilir. Aşındırma işlemindeki plazmanın yapısında eşit sayıda negatif ve pozitif yüklü parçacık ve bunlardan farklı sayıda iyonize olmamış parçacık bulunur. Plazma aşındırmasında ince filmin temel durumdaki ya da uyarılmış haldeki parçacıklarla kimyasal reaksiyonu söz konusudur. İşlem beş temel basamakta ilerler. Bunlar sırasıyla:

- plazmada aşındırma elemanlarının üretilmesi
- reaksiyon elemanlarının yüzeye taşınması ve yüzeyde gaz tabakası oluşturması
- reaksiyon elemanlarının yüzeye tutunması
- kimyasal reaksiyon (bu basamak iyon bombardımanı gibi fiziksel etkilerle de desteklenebilir) ile uçucu parçacıkların oluşturulması
- reaksiyon ardından bileşiklerin yüzeyden ayrılması, toplam gaza katılmaları ve vakum sistemi ile atılması

olarak sıralanabilir. Kullanılan teknolojiye göre kuru aşındırmanın reaktif aşındırma, derin reaktif, gibi türleri de vardır (May ve Spanos, 2006).

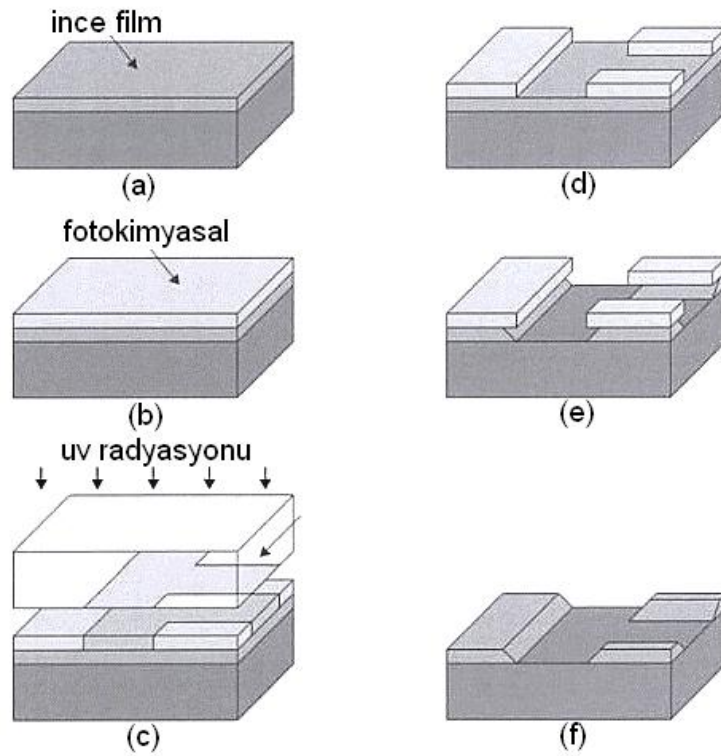
Islak aşındırma işlemi ince film üretim süreçlerinin birçoğunda yaygın olarak kullanılan bir süreçtir. Islak aşındırma işlemi gerçekte üç önemli süreç içerir. Bunlar,

- reaksiyon elemanlarının reaksiyon yüzeyine taşınması
- kimyasal reaksiyonun yüzeyde oluşması
- reaksiyon ürünlerinin yüzeyden uzaklaşması

olarak sıralanabilir. Oluşan reaksiyonun hızı birim zamanda yüzeyden ayrılan ince film miktarı ile ilişkili olmakla birlikte, çözelti sıcaklığı ve karıştırma gibi etkenlerin tümü hızı etkileyen parametrelerdir. İnce film teknolojilerindeki aşındırma işlemleri genellikle altlıkların tamamen çözelti içerisine daldırılmaları ya da çözeltinin yüzeye püskürtülmesi şeklinde gerçekleştirilir. Daldırma işleminde homojen ve tutarlı bir aşınmanın elde edilebilmesi için genellikle mekanik karıştırma uygulanır. Ancak günümüzde daldırmanın yerini yüzeye sürekli olarak taze çözelti gelmesini ve bu nedenle de aşınma homojenliğini son derece arttıran püskürtme yöntemi tercihe edilmektedir (May ve Spanos, 2006).

Islak ve kuru aşındırma arasında önemli farklılıklar vardır. Bunların en önemlisi, ıslak aşındırma genellikle izotropiktir (yanal ve dikey aşındırma oranları birbirinin aynıdır.). Bu nedenle maskenin korumadığı bölgelerdeki aşınma ile maske altındaki bölgede aşınma oranları aynıdır. Gerçekte bu yanal aşınma, ıslak aşınmanın getirdiği en büyük dezavantajdır. Beklenen izotropi değeri, uygulanan baskı çözünürlüğü ile ilgili olup genellikle istenilen desen çözünürlüğü aşınması, gereken film kalınlığından küçük ise, kuru aşındırma gibi anizotropik aşındırma yöntemleri tercih edilmelidir (May ve Spanos, 2006).

Litografi ve aşındırma işlemleri ile ince filmin şekillendirilmesi işlemi Şekil 5.2’ de özetlenmiştir.



Şekil 5.2 Litografik desen oluşturma prosesi a) ince film biriktirilmiş numune b) fotokimyasalın uygulanması c) fotomaske üzerinden UV uygulanması d) fotokimyasal üzerindeki desenin banyo edilmesi e) ince filmin kimyasal olarak aşındırılması f) fotokimyasalın temizlenmesi (Franssila, 2004)

#### 5.4 NiCr’ un Islak Aşındırılması

Islak aşındırma tamamen kimyasal bir süreç olup kuru aşındırma yöntemlerine göre önemli dezavantajlar içermesine karşın yine de yarıiletken ve ince filmlerin şekillendirilmesinde kullanılan vazgeçilmez bir süreçtir. Islak aşındırma süreçlerinin en önemli dezavantajlarının başında sürecin çok zor kontrol edilebilmesi, anizotropinin az olması ve yoğun ölçüde parçacık kirliliğine sahip olması gelmektedir. Bu dezavantajların tümü işlemin doğasının

kimyasal olarak ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Günümüzde daha az popüler bir aşındırma yöntemi olmasına karşı ıslak aşındırma halen çok hassas olmayan aşındırma işlemlerinde sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Kuru aşındırma yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü kimyasal bir süreç olması nedeniyle seçiciliğinin çok yüksek olması ve altlığa hemen hemen hiç zarar vermemesidir.

NiCr' un ıslak aşındırma işlemi de, diğer ıslak aşındırma işlemleri gibi üç temel basamakta gerçekleştirilir. Bunlardan ilki NiCr ince film ile reaksiyona girecek kimyasal ajanların ince film yüzeyine gelmesi, reaksiyon oluşturmaları ve yüzeyden kalkan film ve diğer kimyasal bileşiklerin yüzeyden ayrılmasıdır. Islak aşındırmada aşındırma hızı son derece önemlidir ve hız bu üç basamaktan en yavaş ilerleyen ile belirlenir. Aşındırma işleminden beklenen en önemli özellik hızlı, uniform ve iyi kontrol edilen bir aşındırma olduğundan aşındırma için seçilen çözeltiler işlem sırasında bir şekilde müdahale edilir. Bu müdahale genellikle mekanik olarak çözeltilerin karıştırılması ya da sıcaklığının ayarlanması şeklinde olur.

NiCr ince filmlerin ve hacimsel haldeki NiCr'un aşındırılması ya da tamamen temizlenmesi ile ilgili çözeltiler ve ıslak aşındırma ile ilgili diğer özellikler Çizelge 5.1' de gösterilmiştir (Campbell, 2001).

Çizelge 5.1 NiCr' un farklı altlıklar üzerinde farklı çözeltiler ve bileşimler kullanılarak aşındırılması ile ilgili parametreleri göstermektedir (Walker ve Tarn, 1991).

Aşındırıcı Bileşimi	Aşındırıcı Tipi	Altlık Malzemesi	Sıcaklık – Süre	Aşındırma Hızı
Ce(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> HNO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	Asidik Kaldırıcı	Yarıiletkenler	Oda sıcaklığı – 30 – 60 dakika	Bileşime bağlı
(3) HCl (1) HNO <sub>3</sub>	Asidik Kaldırıcı	(111) ve (100) Si (100) Ga Litografiye uygun	-	-
(45) HCl (5) HNO <sub>3</sub> (50) MeOH	Asidik Tercihli	-	-	-
% 10 NaOH	Alkali Kaldırıcı	(100) Si	114°C - -	100 nm/saat
(6) HClO <sub>4</sub> (35) Butil selüloz (59) MeOH	Elektrolitik Parlaticı	-	-	-
2NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> .Ce(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> .4H <sub>2</sub> O CH <sub>3</sub> COOH H <sub>2</sub> O	Asidik Kaldırıcı	(100) Si üzerinde biriktirilmiş NiCr	-	-
HCl (1)HNO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	Asidik Temizleyici	Cam,metal, seramik, bakır	-	-
20 HCl 80 H <sub>2</sub> O	Elektrolitik Kesme	Yarıiletken altlık üzerindeki ince filmler	-	-
50 HCl 50 EOH	Elektrolitik inceltme	Ni:Cr disklerin inceltmesi	-	-

## 6. İNCE FİLMLERDE ELEKTRİKSEL DİRENÇ

İnce filmlerin elektriksel davranışı hacimsel malzemelerinkinden oldukça farklıdır. İnce filmlerde elektriksel özellikler öncelikle film kalınlığına bağlıdır. Bu farklı davranışın en önemli nedeni, çok ince filmlerde iletim, elektronlarının ortalama serbest yollarının kısalması ve çarpışma sayılarının artmasıdır. Bir ince filmin kalınlığı, hacimsel bir malzemedeki elektronların ortalama serbest yolları ile orantılanabilecek ölçülere ulaştığında, elektriksel direnç ince film yüzeyinden elektron saçılma ve yansıma mekanizmalarına bağlı olarak artar. Söz konusu saçılma ve boyutsal büyüklük arasındaki ilişki Fuchs tarafından serbest elektron modeli ve Fermi yüzeyi kavramları ortaya atılarak modellenmiştir. K. Fuchs 1938 yılında yayınladığı makalesinde ince metal filmlerin elektrik direncinin azalan film kalınlığı ile artması fikrini ortaya atmıştır. Deneysel bulgularla da uyum içerisinde olan bu teoride söz konusu artışın tane sınırı saçılması ve yüzey kabalığı gibi bir takım parametrelerle ilişkilendirilebileceği düşünülmüştür (Wissmann ve Finzel, 2007, Horvath ve Bankuti, 1988).

Daha sonra teori, Price tarafından geliştirilerek elipsel şekilli Fermi yüzeyleri tanımlanmış ve Sondheimer, teoriyi Fuchs teorisi ile birleştirerek galvanomanyetik etkilerin açıklanmasında kullanmıştır.

Tüm bu çalışmaların ışığında Fuchs-Sondheimer teorisinin bazı ifadeleri, genel olarak ince filmlerin iletkenliğini açıklamakta ve uygulamaya yönelik hesaplamaların yapılabilmesini sağlamaktadır. Teorilerde açıklanan boyutsal etkiler, pratikteki tüm ince filmlere son derece uygundur. Bunun en önemli nedeni üretilen ince filmlerin hemen hepsinin yüzeyinde, yalıtkan bir oksit ya da gaz absorpsiyon tabakası bulunmasıdır. Bu sebeple yüzeyden elektronların saçılmalarının hemen hemen tamamına yakın bölümü, difüzyona bağlıdır. İnce filmlerin elektriksel dirençleri her ne kadar bir takım modeller ile açıklansa da, özellikle çok ince filmlerde süreksizliklerin, çatlakların oluşumu Fuchs modeli ile öngörülen değerlerden oldukça farklı sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir. (Wissmann ve Finzel, 2007; Horvath ve Bankuti, 1988)

İnce filmlerin elektriksel dirençlerinin açıklanmasında kullanılan serbest elektron modelinde direnç Denklem 6.1 ile ifade edilir.

$$\rho = \frac{m_e v}{ne^2 \lambda} \quad (6.1)$$

Denklemden  $m_e$  elektronun kütlesi,  $v$  ortalama hız,  $n$  hacimsel elektron konsantrasyonu,  $e$  elektronun yükü ve  $\lambda$  hacimsel malzeme içerisinde elektronun serbest yolunu ifade etmektedir. Yalıtkan bir ortamda bulunan iletken, sınırlı bir büyüklüğe sahip olduğu koşulda ince film yüzeyine yakın bölgelerde elektronların ortalama serbest yolları azalır ve bu nedenle direnç önemli miktarda artar (Horvath ve Bankuti, 1988).

İnce filmlerde direnci artıran saçılma mekanizmalarının tümü, Matthiessen Kuralı olarak bilinen ve saçılmaya neden olan etkenlerinin tümünün toplanması ile elde edilebilen bir denklem ile (Denklem 6.2) ifade edilebilir.

$$\rho = \rho_0 + \rho_{TS} + \rho_{YS} + \rho_{YK} \quad (6.2)$$

Denklemden  $\rho_0$  ince filminki ile aynı kafes kusur yoğunluğuna sahip olan hacimsel malzemenin direncini göstermektedir. Denklemden ayrıca  $\rho_{TS}$  tane sınırlarından,  $\rho_{YS}$  film yüzeyinden ve  $\rho_{YK}$  ise, yüzey kabalığına bağlı elektron saçılma etkilerini ifade etmektedir. Dolayısı ile Denklem 6.2 ile ortalama direncin hesaplanabilmesi için ince filmi karakterize eden kafes tipi, film kalınlığı gibi parametreler ile bunlarla ilişkili olan saçılma sabitleri, yüzey pürüzlülüklerinin maksimum değerinin ve elektronların ortalama serbest yollarının bilinmesi gerekir. Denklem 6.2, ince filme uygun parametreler ile geliştirildiğinde Fuchs-Sondheimer modeli ile uyum içerisinde (Wissmann ve Finzel, 2007).

İnce filmin kristal yapısının içerdiği kusurların tümü, “Matthiessen Kuralı” ile tanımlandığı şekliyle elektriksel direnci etkilese de, özellikle alaşım haldeki ince filmlerde düzensizliklerin kafes içerisinde ani soğuma ile donmuş halde bulunmaları ya da denge durumundaki düzensiz koşullarıda ele alınması gereken parametrelerdir. Alaşım haldeki malzemelerde düzensizlikler, yüksek sıcaklıklarda sitokiyometrik dengeden uzak durumlarda kafes oluşurken ya da ısıl uyarılma nedeniyle oluşabilmektedir. Seyreltik alaşımlarda katkı atomlarından oluşan saçılma hemen hemen sıcaklıktan bağımsız davranış gösterir. Ölçülen her hangi bir T sıcaklığı için toplam direnç  $\rho(T)$  bileşenlerin toplamı olarak yazılabilir.

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_h(T) \quad (6.3)$$

Dolayısı ile Matthiessen Kuralı da sıcaklığında etkisi altında Denklem 6.3 şeklinde ifade edilebilir. Denklemden  $\rho_0$  sıcaklıktan bağımsız ve yalnızca katkı atomları nedeni ile oluşan direnci ve  $\rho_h(T)$  ise sadece ev sahibi atomlardan kaynaklanan T sıcaklığındaki direnci ifade etmektedir. Sıcaklığa bağlı Matthiessen Kuralı, katkı ve fonon saçılmalarının bağımsız oldukları ve temel duruma dönüş süresinin izotropik olduğu durum için geçerlidir. Matthiessen Kuralı konsantre alaşımlara da sıklıkla uygulanmaktadır. Ancak bu uygulama Denklem 6.2’ de ifade edilen Matthiessen’ in orijinal denklemi için çok uygun bir yaklaşım

değildir. Bunun en önemli nedeni atomsal düzensizliklerden kaynaklanan (ısııl nedenli kafes düzensizlikleri hariç) tüm etkilerin  $\rho_0$  teriminden toplanması ve alaşım kafesinden kaynaklanan tüm saçılmaların  $\rho_h(T)$  teriminde toplanmasından kaynaklanmaktadır. Bunların ilki sıcaklıktan bağımsız olarak tanımlanan ifadelerdir. Ancak  $\rho_0$  terimi atomsal düzensizliğin sıcaklıkla değişmesi koşulu nedeniyle sıcaklığa bağımlıdır (Rossiter, 1987).

### 6.1 İnce Film ve Hacimsel Malzemelerin Elektriksel Dirençleri

Direncin ölçülmesi ile ilgili değerlendirmelerin başında, ince film ile hacimsel malzemeler arasındaki elektriksel direnç bakımından farklılıklar gelir. Elektriksel direncin, hacimsel malzemelerde belli geometrik özelliklere bağlı olması nedeni ile, öncelikle ince filmlerin geometrik koşullarının elektriksel direnç üzerine etkilerinin incelenmesi gerekir. Genellikle biriktirildikleri halleri ile ince filmlerin elektriksel dirençleri, hacimsel haldeki aynı malzemenin elektriksel direncinden daha yüksektir. Kalın ince filmlerde ( $>1 \mu\text{m}$ ) elektriksel dirençler genellikle ısııl işlem sonrasında hacimsel değerlerine yaklaşır. Isıl işlemle dirençteki bu farklılaşmanın ana nedeni, ısııl işlem ile biriktirme işlemi sırasında oluşan kusurların düzeltilmesidir.

Kusursuz bir kafeste atomların buldukları yerlerden farklı yerlerde bulunmaları ile oluşan kafes kusurları, çoğunlukla oda sıcaklığındaki elektriksel dirence önemli ölçüde katkısı bulunan elektron saçılmalarının ana nedenini oluşturur. Kafes kusurlarının oluşum sıklığının aynı sıcaklıktaki tek kristal atom için gerekli olan ortalama serbest yol kadar veya daha kısa olduğu durumda özellikle elektriksel dirençteki etki daha belirgin olur.

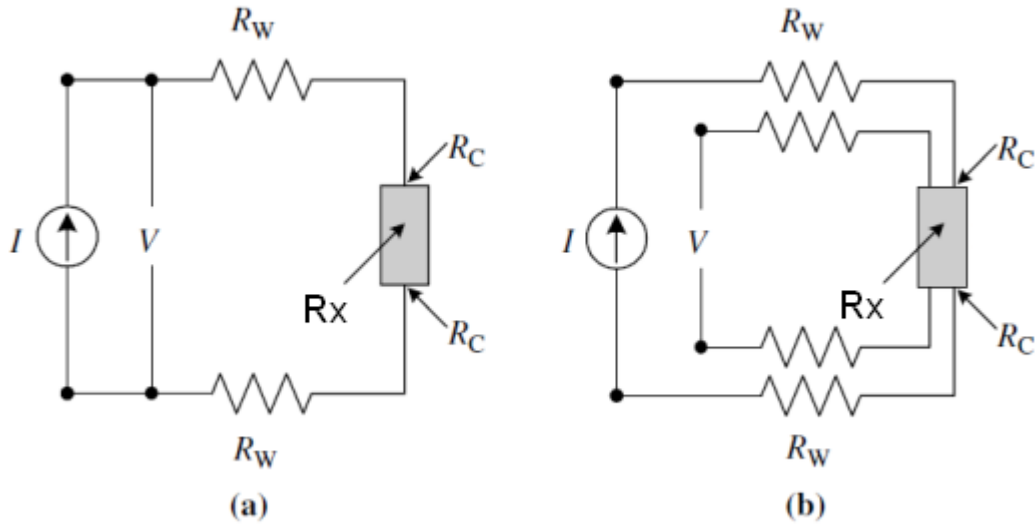
Isıl işlem ile giderilebilecek kafes kusurları noktasal hatalar, dislokasyonlar, yığın hataları, tane ya da ikiz sınırları ve çözünemeyen katkı atomlarıdır.

İnce filmlerin elektriksel direnç davranışı ve geometrik değerler ile ilişkilendirilmesi De Vries tarafından çalışılmıştır. Birçok metalik filmde yüksek elektriksel direnç, tane boyutu ve film kalınlığı ters orantılıdır. Ancak FBB ile üretilen ince filmlerde tane boyutu film kalınlığı ile orantılıdır. De Vries tane sınırları nedeniyle oluşan saçılma mekanizmaları ile yüzey saçılmalarını birbirlerinden ayırarak artık direnci sıcaklığa bağlı olarak değerlendirmiştir. İnce filmlerle yaptığı çalışmalarda sıcaklık nedeniyle oluşan artık direnç hacimsel malzemede oluşana eşit değerlere sahip olduğunu tespit etmiştir. Bunun yanı sıra ince filmlerde dislokasyonlar yüksek enerjili parçacıkların kullanıldıkları durumlarda yaklaşık on kat fazla oluşmakta ve bu artış parçacık başına düşen enerji miktarı ile artmaktadır. Dolayısı ile yapısal olarak önemli farklılıklara sahip olan hacimsel malzemeler ile ince filmlerin elektriksel dirençleri, birbirlerinden son derece farklıdır (Machlin, 2006).

## 6.2 İnce Filmlerde Direncin Ölçülmesi

İnce filmlerin dirençlerinin ölçülmesinde en yaygın kullanılan yöntem, dört kontak testidir. Dört kontak testi, ağırlıklı olarak yarıiletken malzemelerin ve Si pulların dirençlerini ölçmek için geliştirilmiştir. Yöntem uzun yıllardır kullanılagelen, kalibre edilmiş standartlarla ölçümlerin yenilenmesine ihtiyaç duyulmaksızın kesin sonuçların elde edilebildiği kararlı bir yöntemdir. Dört kontak testi sonuçları diğer direnç ölçüm yöntemleri ile alınan verilere kaynak olabilecek ve standart oluşturabilecek güvenilirlikte sonuçlar verir. Ölçümlerin doğru şekilde yapılabilmesi için ince filmlerin homojen kalınlıkta ve kontakların mümkün olduğunca küçük olmaları gereklidir. Dört kontak testinin ve ince filmlerin dirençlerinin doğru olarak değerlendirilebilmesi için, yöntemin temelini oluşturan ince filmlerde akım dağılımının ve iki kontak ile yapılan ölçümlerin anlaşılması gerekir. (Van der Pauw, 1958).

İki kontak testi, malzeme üzerinde sadece iki kontak oluşturularak ölçüm yapılabilmesine olanak verdiğinden nispeten kolay bir yöntem olarak görülebilir. Ancak elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması oldukça güçtür. Dört kontak ve iki kontak ölçüm düzenekleri Şekil 6.1' de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 İnce filmlerin dirençlerinin ölçülmesinde kullanılan yöntemlerden a) iki kontak direnç ölçüm düzeneği b) dört kontak direnç ölçüm düzeneği (Schroder., 2006).

İki kontak testi ele alındığında sistemdeki iki kontak noktasının her biri hem voltaj, hem de akım noktası olarak görev yapmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi hem kontakların direnci, hem devre direnci ve kontak noktalarındaki akım voltaj dağılımları ele alındığında,  $R_x$  direncinin söz konusu şekilde hesap edilebilmesi olanaksızdır.

Dört kontak testini iki kontak testinden ayıran en büyük üstünlük, her iki düzende de akım yollarının birbirlerinin aynısı olmasına karşı, voltaj ölçümünün fazladan sistemde bulunan iki kontak üzerinden yapılmasıdır. Tıpkı iki kontak düzeneğinde olduğu gibi devre ve kontakların her birinin direnci olmasına rağmen, voltmetrenin yüksek giriş empedansı nedeniyle voltaj yolundan akabilecek akım son derece düşüktür. Ayrıca devre direnci ve kontak dirençleri de ihmal edilebilecek ölçüde küçüktür. Dolayısı ile devrede ölçülen voltaj düşüşü sadece Rx kaynaklıdır. Buna ek olarak, iki yerine dört kontak kullanılarak parazitik voltaj düşüşleri de azaltılmış olur.

Bu tip dört kontak ölçümleri sıklıkla, düzeneği keşfeden Lord Kelvin' in ismine atfedilerek Kelvin ölçümü olarak da adlandırılmaktadır. Gerçekte ilk dört kontak testi, 1916 yılında Jeofizikçi Wenner tarafından dünyanın elektriksel direncini ölçmek için önerilmiş daha sonra 1954 yılında Valdes tarafından yarıiletkenlerin dirençlerini ölçmek için uyarlanmıştır. Yöntemde oluşturulan kontaklar genellikle düzlemsel bir düzende yapılır ve aralarındaki mesafe eşittir. Ancak farklı geometrideki düzenekler de kurulabilir.

Önceden tanımlandığı gibi yöntemde iki kontak akım göndermekte kullanırken diğer iki kontak voltaj ölçümünde kullanılır. Ancak ölçüm sonuçları kullanılan geometri ile ilişkilidir ve değerlendirme, malzeme içerisinde akım dağılımının oluşumuna bağlı bir elektrik alan problemi olarak ele alınmalıdır. Dört kontak testinde kullanılan denklemler, öncelikle yapının geometrisine (Şekil 6.2) bağlıdır.

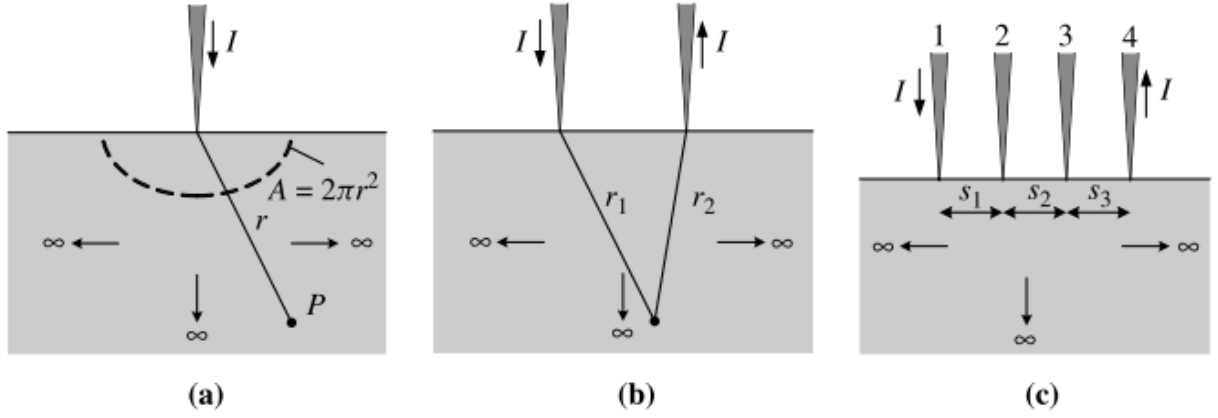
$$E = J\rho = -\frac{dV}{dr} \quad (6.4)$$

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (6.5)$$

Denklemler 6.4' de E elektrik alanı, J geçen akım yoğunluğunu ve  $\rho$  direnci göstermektedir. Denklemlerdeki diferansiyel ifade, kontakdan r mesafesindeki voltaj değeri,

$$\int_0^V dV = -\frac{I\rho}{2\pi} \int_0^r \frac{dr}{r^2} \quad (6.6)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (6.7)$$



Şekil 6.2 Farklı kontaklarda akım dağılımı a) Tek kontak b) iki kontak c) dört kontak durumlarında sonsuz büyüklükteki numune için akım ve voltaj durumları (Schroder., 2006)

Denklemler kontaklar arası mesafeleri aynı olduğu sınır şartları altında çözüldüğünde,

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (6.8)$$

Şeklinde elde edilir.

$\rho$  değeri V volt, I amper ve kontaklar arası mesafe cm olması durumunda ohm.cm birimi ile ifade edilir. Malzemenin direncini ölçmede seçilen akım değeri genellikle ölçülen V değerinin 10 mV olacak şekilde seçilir. Yapılan birçok ölçümde dört kontak arası mesafe sabit ve eşittir. Prop adı verilen ve malzemeye kontak yapılan uçların yuvarlaklık değerleri ve aralarındaki mesafeler sırasıyla 30 ile 500  $\mu\text{m}$  ve 0.5 ile 1.5 mm arasında değişir. Söz konusu değerler ölçülecek malzemenin tipi ve ölçülecek tabaka kalınlığına uygun olarak belirlenir. Matematiksel olarak  $s=0.1588$  cm şeklinde seçildiğinde  $2\pi s$  değeri 1 değerini alır ve denklem  $\rho=V/I$  şeklinde kısalır. Ölçüm yapılırken kullanılan propların durumları son derece önemlidir ve ölçüm sonuçlarını yakından etkiler. Genellikle yarıiletken ölçümlerin yapıldığı proplar metal ince film tabakaları ölçmede kullanılmaz. Ayrıca manyetik tünel eklemleri, polimer filmler, yarıiletken kusurları gibi bazı özel uygulamalarda mikroskopik ölçekli 1.5  $\mu\text{m}$  aralıklı proplar kullanılmaktadır (Schroder., 2006).

İnce filmlerin ve yarıiletken pulların yüzeyleri, yanal ve dikey olarak yarı sonsuz büyüklükte kabul edilebileceklerinden Denklem 6.8 sınırlı geometriler için düzeltilmelidir. Denklem 6.8 uygun geometrik faktörle düzeltilmiş şekli Denklem 6.9' de gösterilmiştir.

$$\rho = 2\pi s F \frac{V}{I} \quad (6.9)$$

Denklemdaki düzeltme faktörü F, ölçüm uçlarının numunenin kenarlarına yakın olmasına, numunenin çapına, kalınlığına, ölçüm uçları yerleşme şekline ve sıcaklığına bağlıdır. Genellikle denklemde sadece F gibi tek bir parametre olarak ifade edilse de, gerçekte

birbirlerinden bağımsız bir dizi düzeltmenin sonucudur. Bir numuneye göre tespit edilmiş olan F değeri numunenin kalınlığı gibi bir parametrenin değişimi ile yeniden hesaplanması gerekir. Schroder., 2006).

### 6.3 Tabaka Direnci

İletken ince tabakalar genellikle tabaka direnci olarak adlandırılan büyüklük ve  $\Omega/\square$  (ohm/kare) birimi kullanılarak tanımlanırlar. Uniform katkılı örnekler ve ince filmler için tabaka direnci  $R_{sh}$  Denklem 6.10' da gösterilmiştir.

$$R_{sh} = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{V}{I} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (6.10)$$

Denklem 6.10, ölçülen tabaka kalınlığı  $t$ ' nin proplar arası mesafe  $s$ ' nin yarısına eşit ya da küçük olduğu koşul için yazılmıştır ve ince yarıiletken, difüzyon ve iyon ekme ile elde edilmiş tabakaların, epitaksiyel büyütülmüş filmlerin, polikristal ve ince metalik iletkenlerin karakterize edilmesi için uygundur.

Tabaka direnci, numune kalınlığı üzerinden elde edilen ortalama bir direnç değeridir. Tabaka direncinin tersi ise, tabaka iletkenlik (Denklem 6.11) değerini verir.

$$R_{SH} = \frac{1}{G_{SH}} = \frac{1}{\sigma t} \quad (6.11)$$

Denklemden  $\sigma$  iletkenliği,  $t$  ise tabaka kalınlığını ifade etmektedir.

Tabaka direnci,  $\Omega/\square$  ile ifade edilen özel bir direnç birimi ile tanımlanmaktadır. En genel anlamda hacimsel halde üç boyuta sahip bir numunenin direnci Denklem 6.12 ile ifade edilir.

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{Wt} = \frac{\rho}{t} \frac{L}{W} (\Omega) \quad (6.12)$$

Denklemden boy (L) ve en (W) oranı birimsiz olmasına bağlı olarak ve R direnç  $\Omega$  ile ifade edildiğinden, tabaka direncini tanımlayan direnç/kalınlık oranının birimi de  $\Omega$  olmalıdır. Ancak bu değer, hacimsel malzeme direnci ile aynı dirence sahip olması kavramsal karışıklığa neden olur (Denklem 6.13).

$$R = R_{SH} \frac{L}{W} (\Omega) \quad (6.13)$$

Bu ayrımın yapılabilmesi için tabaka kalınlığına bağlı direnç değeri olan  $R_{SH}$ ,  $\Omega/\square$  ile ifade edilir (Schroder., 2000).

## 7. Ni-Cr ALAŞIMLARI

Ni ve Ni alaşımları teknolojiye ve sanayide önemli bir yere sahiptir. Ni alaşımlarından Ni-Cr alaşımı gerinim ölçer ve elektronik uygulamalarda ince film olarak kullanıldığı gibi ağırlıklı olarak korozyondan korunma amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır.

Ni birçok mühendislik uygulamaları için mükemmel bir yapısal malzemedir. Yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip olduğundan tok ve sünektir. Ni aynı zamanda hem çoğu ortam için iyi, yüksek ve düşük sıcaklık dayanımı hem de yüksek oksidasyon ve iyi korozyon direncine sahiptir. Ni' in en önemli dezavantajı nispeten pahalı bir metal olarak alaşımlar için ana metal olarak kullanımının oldukça sınırlandırılmış olmasıdır. Bunun yanı sıra Cr, Ni-Cr alaşımlarında korozyon ve yüksek sıcaklık direnci bakımından önemli role sahiptir.

Ni ve Ni alaşımlarının metalurjik açıdan en bilinen özellikleri, endüstriyel uygulamalarda sıkça rastlandığı gibi birçok korozif ortama dayanıklı olmalarıdır. Bu endüstriyel uygulamaların başında, petrokimya, havacılık, güç üretimi, enerji dönüşüm sistemleri, yağ ve gaz üretimi, atık kontrol sistemleri, denizcilik uygulamaları, tarım kimyasalları ve elbette elektrik – elektronik ve haberleşme mühendisliği uygulamaları sayılabilir. Bu uygulamalarda gözlenen korozyon mekanizmaları paslanmaz çelik ve süper paslanmaz çeliklerin dayanabileceğinden çok daha şiddetlidir. Ni tek başına, son derece dayanıklı bir metaldir ve teknolojinin birçok alanında kullanılmaktadır. Ayrıca Ni' in metalurjik olarak iyi alaşım yapabilme kabiliyeti, ikili, üçlü ve daha karmaşık yapılarda alaşım üretilebilmesini sağlamakta ve kullanılacağı yere özgü üstün özelliklere sahip malzemelerin tasarlanabilmesine olanak vermektedir. Bu alaşımların birçoğu, içerdikleri Ni miktarlarının yüksek olmasına bağlı olarak standart 300 serisi paslanmaz çeliklerden daha pahalı ancak kimyasal açıdan bu gruba oranla çok daha dayanıklıdır (Wessel, 2004).

### 7.1 Ni-Cr Alaşımlarının Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları

Ni-Cr alaşımları iki temel grupta ele alınarak incelenebilir. Birinci grup, % 40 - % 50 Ni ve % 50 - % 60 Cr içeren döküm alaşımlarıdır. Bu gruba giren Ni-Cr alaşımları ağırlıklı olarak ısıya dayanıklı malzemeler olup yapı elemanları, potalar, destekler, askı gereçleri gibi yüksek sıcaklık (1090 °C) korozyon uygulamalarında kullanılırlar. İkinci grup Ni-Cr alaşımları ise, dövme alaşımları olup yapılarında % 70 – 80 Ni ve % 20 – 30 Cr içeren ve ağırlıklı olarak oksitleyici atmosferlerde, (hava gibi) 1150 °C sıcaklıklarda kullanılmak üzere tasarlanmış ısıtma elemanlarının yapımında kullanılırlar.

Ni-Cr alaşımlarının incelenmesi ve üretimlerine yönelik çalışmalar 1950' li yılların ortalarında geniş kapsamlı laboratuvar testleri ile başlamış ve ağırlıklı olarak deneysel temelli ısıtıcı elemanların üretimi üzerinde odaklanılmıştır. Bu yıllarda yapılan deneylerin ve araştırmaların büyük bir bölümü, Amerikan deniz kazanları ve türbinleri laboratuvarlarında ve ulusal standart bürosu desteği ile Amerikan Deniz Kuvvetleri tarafından yürütülmüştür. Söz konusu araştırmaların ana hedefinde, soğutmasız tüp tutucularının ve petrol bazlı küllere dayanıklı gemi kazanlarının, süper ısıtıcıların üretimi ve yüksek dirençli ısıtıcı çeliklerin dökülmesidir. Elde edilen sonuçlar, döküm Ni-Cr alaşımlarının korozyon dirençlerinin 25Cr-20Ni eliklerine oranla 12 – 45 kat daha iyi olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek sıcaklık uygulamalarında Cr' ca zengin alaşımlar tavsiye edilmesine karşın, yüksek döküm kabiliyeti, işlenebilirliği ve iyi kaynak kabiliyeti nedeniyle 50Ni-50Cr içeren alaşım, özellikle enerji santrallerinde, rafineri ısıtıcılarında ve 900 °C' den düşük sıcaklıklarda gemi kazanlarında kullanılmıştır. Ayrıca %50 Ni- % 50 Cr, diğer alaşımlara göre düşük maliyete sahiptir.

Ni-Cr alaşımlarının en yaygın kullanım alanı ısıtıcılardır. Isıtıcılar, büyük endüstriyel uygulamalarda ve fırınlarda kullanılmalarının yanı sıra, küçük çapta ev aletlerinde de kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan ısıtıcılar genellikle, açık seramik bir tutucu üzerine metal telin helisel olarak sarılması ile elde edilen akım makaraları şeklinde ve metal bir çerçeveye uygun şekilde sabitlenmiş halde kullanılır. Ancak benzer şekildeki bir telin bir refrakter ile yalıtılan metal kılıf içerisine sokulması ile elde edilen direnç telleri de mevcuttur.

Isıtıcı eleman üretiminde kullanılacak malzemelerden beklenen özelliklerin başında yüksek ergime sıcaklığı, elektriksel direnç, yeniden üretilebilirlik ve uygun TCR değer ve iyi oksidasyon direnci gelir. Bunların yanı sıra, alaşımın içerisinde uçucu bileşenin bulunmaması ve kirlenmeye karşı dirençli olmaları gibi özelliklerde diğer olumlu özelliklerdir. Tüm bunların ötesinde malzemelerin mekanik olarak da iyi özellikler göstermeleri kullanım alanına uygun olarak fayda sağlar. Bu mekanik özelliklerin başında yüksek sıcaklıklarda sürünme dayancı ve yayınım, düşük termal genleşme katsayısı (ısıl yorulmayı azaltır), iyi ısıl çok dayancı ve üretim sıcaklıklarında süneklik gelmektedir.

Bu özellikler göz önüne alındığında ısıtıcı üretiminde kullanılan başlıca alaşımlar %80 Ni- %20 Cr ve %70 Ni- %30Cr alaşımlarıdır. Ancak Fe-Ni-Cr, Fe-Cr-Al gibi üçlü alaşımların yanı sıra, Pt, Mo, W gibi saf metaller ve SiC, C gibi metal dışı malzemeler de teknikte yaygın olarak kullanılan diğer direnç malzemeleridir. NiCr alaşımlarının sayılan bu malzemelerin tümünden daha yaygın olmasının ana nedeni, NiCr' un özellikle fırınlarda ihtiyaç duyulan

farklı sıcaklıklarda verimli çalışabilmeleri ve az sayıda direnç kullanımının yeterli olmasıdır. Özellikle %80 Ni - %20 Cr alaşımı en geniş çalışma sıcaklığına sahip ve oksidasyon direnci en yüksek bileşimdir. Dolayısı ile söz konusu alaşım, diğer Ni-Cr alaşımlarından ve Fe-Ni-Cr alaşımlarından daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler. Bunun yanı sıra alaşıma, az miktarda (% 0.75 – 1.75 arasında) Si ilavesi oksidasyon direncini önemli ölçüde iyileştirir.

Genel olarak Ni-Cr' un açık havada direnç malzemesi olarak kullanılabilirliğinin üst sınırı, 1150 °C kabul edilir. Bunun nedeni bu sıcaklıkta açık hava için oksidasyon hızının yüksek oluşu ayrıca metalin ergime sıcaklığına (%80 Ni - %20 Cr ergime sıcaklığı 1400 °C) yakın olmalıdır. %80 Ni - %20 Cr alaşımının dayanımı 650 °C' nin aşılması ile birlikte belirgin oranda düşer (ASM Specialty Handbook, 1997).

## 7.2 Ni – Cr İnce Filmler ve Kullanım Alanları

Geçen on yılda üstün elektriksel ve fiziksel özelliklerinden dolayı NiCr ince filmlere olan ilgi gittikçe artmaktadır. Bunun başlıca nedeni, özellikle yarıiletken ve mikroelektronik teknolojisindeki devre elemanlarındaki sürekli küçülme ve hafiflemeye olan ilginin NiCr ve oksit esaslı seramikler gibi yenilikçi bir takım malzemelerin geliştirilmesi konusunda yapılan çalışmalara hız vermesidir. NiCr' un bu teknolojideki uygulama alanlarının başında ince film dirençler, potansiyometreler, yalnız okunabilir bellekler, nem algılayıcılar ve elbette gerinim ölçerlerin üretimi sayılabilir. Bunların yanı sıra günümüzde enerji darboğazına çözüm arayışlarının sonucu olarak doğmuş alternatif yakıt ve enerji teknolojilerinden yakıt hücreleri için hafif, metalik bipolar plakaların geliştirilmesinde yine yüksek korozyon dayancı ve elektriksel özellikleri nedeniyle NiCr alaşımlarına başvurulmaktadır (Velumani vd., 2005; Kwon vd., 2005; Belic vd, 1998).

Söz konusu bu kullanım yerlerinde NiCr, yüksek elektriksel direncine, iyi enerji dağıtımına ve düşük gürültü faktörüne bağlı olarak ince film elektriksel direnç ya da elektronik çip dirençlerde ve mikro ısıtıcılarda ısıtma elemanı olarak kullanılmaktadır. Yüksek elektriksel direncinin yanı sıra NiCr, iyi bir ısıtma elemanından bekleneceği üzere iyi oksidasyon dayanımına ve korozyon özelliklerine de sahiptir. Bu özelliklerin yanı sıra NiCr, özellikle elektriksel dirençlerde ve gerinim ölçerler için önemli avantaj oluşturan düşük TCR değerine de sahiptir. Ancak Ni-Cr alaşımları için söz konusu özellikler ince filmlerin üretiminde kullanılan proseslere, biriktirme sürecinin parametrelerine ve üretim sonrası uygulanan ısıtma işleme yakından bağlıdır. Dolayısı ile kullanılan altlığa bağlı olarak NiCr filmin kimyasal oluşumu ve mekanizması doğru olarak anlaşılmalıdır (Kwon vd., 2005, Vinayak vd., 2007).

Ni-Cr alaşımlarının biriktirilmesine yönelik birçok farklı yöntem, literatürdeki konu ile ilgili çok sayıdaki çalışmada tartışılmıştır. Direnç malzemesi olarak NiCr ele alındığında, diğer geçiş metal alaşımları gibi oldukça yüksek elektriksel dirence, düşük TCR değerine ve yüksek elektriksel kararlılığa sahiptir. Ancak bu elektriksel özelliklerden bazıları NiCr filmlerdeki Ni/Cr oranına yakından bağlı olduklarından, üretimde kullanılan biriktirme yöntemi son derece önemlidir. En eski FBB yöntemlerinden bir tanesi olan ısı buharlaştırma yönteminde, farklı buhar basınçlarına sahip Ni ve Cr' un sınırlı bir kütleden buharlaştırılmasında kaynak malzeme ile biriken ince filmin bileşimleri arasında büyük farklılıklar olabilmektedir. Aynı zamanda ısı buharlaştırma yöntemi ile biriktirilen ince filmlerin bileşim bakımından tekrarlanabilirlikleri de oldukça kötüdür. Dolayısı ile NiCr ince filmlerin üretilmesinde sıçratma ya da flaş buharlaştırma gibi yöntemlerin tercih edilmesi daha uygundur. Ancak tek başına biriktirme yönteminin, NiCr ince filmlerin tüm elektriksel özellikleri üzerine etkisi sadece film bileşimi ile ilişkili değildir. Aynı zamanda katkı ve kirlilikler, kafes kusurları, kristal yapı gibi malzemenin iç yapısına da bağlı olan bir takım özellikler de, biriktirme yöntemi ile ilişkilidir. Dolayısı ile NiCr ince filmlerin davranış karakteristiklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için bu hata mekanizmalarının da anlaşılması gerekir (Rölke, 1981).

Yüksek dirençli Ni-Cr ince filmler, radyo frekansı (RF) - DC tipi güç kaynağı kullanılarak sıçratma ve birlikte sıçratma yöntemleri kullanılarak da biriktirilebilmektedir. Sıçratma yöntemi özellikle buharlaştırma ile biriktirilen NiCr ince filmlerdeki bileşim farklılıklarını ortadan kaldırmak amacıyla kullanılmaktadır. NiCr alaşımlarının biriktirilmesinde sıçratmanın kullanılmasının daha güvenilir film bileşiminin üretilmesini sağlamanın yanı sıra, alaşımın direnç malzemesi olarak uzun vadedeki kararlılığını artırdığını, biriktirme sonrası uygulanan ısı işlemlere ve daha düşük TCR değerlerinin elde edilebilmesine yardımcı olduğu da bildirilmektedir (Lee vd., 2003; Vinayak vd., 2007; Zhou vd., 2008; Phuong vd., 2006).

### **7.3 NiCr İnce Film Altlıklarının Film Yapısı Üzerine Etkisi**

NiCr ince filmler oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olduklarından, endüstriyel ihtiyaçlara bağlı olarak çok farklı altlıklar üzerine biriktirilmektedirler. Ancak altlıkların film büyümesi üzerine farklı etkileri olmasına bağlı olarak, film özellikleri de farklılık gösterebilmektedir. Film ve altlık arasındaki fiziksel ve kimyasal etkileşimler NiCr ince filmlerin elektriksel kararlılıklarını etkilemektedir. Bu nedenle özellikle üretim verimliliği, altlık homojenliği ve yüzey yapısına, topografisine, kimyasal bileşim gibi yüzeyin yeniden üretilirliğine bağlanabilir. Ayrıca söz konusu özellikler altlığın yüzey enerjisinin bir

ölçütüdür. İnce filmlerde oluşum serbest enerjinin azalması, film yapısının büyümesinin öncelikli sürücü gücüdür. Biriktirme sırasında ince film atomları ara yüzey enerjisini düşürmek amacı ile daha büyük kümeler, adacıklar halinde birleşme eğilimindedirler. NiCr ince filmler de katı çözeltili olarak Cr' un Ni içerisinde çözünürlüğünü engelleyen bir mekanizma yoktur. Dolayısı ile film yapısı doğrudan serbest enerji ile ilişkilendirilebilir. NiCr ince filmlerin düzgün yüzeyli altlıklar üzerinde adacıklı yapıda büyümeye başladığı bilinmektedir. Ayrıca ortam parametrelerine bağlı olarak adacıklar arasında krom oksit katmanı oluşarak adacıkları birbirlerinden ayırmaktadır (Campbell ve Hendry, 1965; Zhou vd., 2008).

Altlıkların ince film yapıları üzerine önemli etkileri olması nedeniyle NiCr ince filmlerin kullanımı farklı altlıklar üzerinde çalışılmıştır. İster gerinim ölçer, ister daha farklı amaçlarla olsun NiCr ince filmler ağırlıklı olarak borsilikat camı, polikristal yapıda alümina, silisyum pul ve poliamid üzerine biriktirilerek kullanılmaktadır. Her altlığın NiCr ince filmlerin genel özellikleri üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri mevcuttur (Rölke, 1981).

Borsilikat camları üzerine biriktirilen NiCr ince filmlerin kararlılıkları ve yeniden üretilebilir elektriksel dirençleri son derece iyidir. Ayrıca cam üzerinde üretilen NiCr ince filmlerin elektriksel kararlılıkları yüksek, TCR değerleri, ısı iletimleri ve mekanik dayançları oldukça düşüktür. Bunun yanı sıra, bor silika camının maliyetinin düşük olmasına ve üretimdeki basitliğe bağlı olarak üretim maliyetlerinde oldukça düşüktür.

Öte yandan % 99.5 saflıkta  $Al_2O_3$  üzerinde biriktirilerek üretilen NiCr ince filmler, altlık özelliklerine bağlı olarak oldukça yüksek mekanik mukavemete, ısı iletimine sahip olmalarına rağmen, direnç malzemesi olarak kullanımda düşük uniformluğa ve kararlılığa, yeniden üretilebilirliğe sahiptir. Ayrıca  $Al_2O_3$  altlık üzerinde üretim, yüksek maliyetleri beraberinde getirir. Lasko ve Roth farklı cam ve farklı bileşimlerdeki  $Al_2O_3$  altlıklar üzerinde inceledikleri NiCr ince filmlerde tane sınırlarına yakın bölgelerde piramide benzer geometriye sahip kusurlar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca,  $Al_2O_3$  yüzeyi cam yüzeyine göre çok daha pürüzlü olduğundan NiCr ince filmler  $Al_2O_3$  altlığa cama olduğundan çok daha kuvvetli tutunurlar. Bu olumlu bir özellik gibi görünse de,  $Al_2O_3$  ile NiCr' un ısıl genleşme katsayılarında cam ile olduğunda çok daha büyük bir farklılık olduğundan, sıcaklık farkları  $Al_2O_3$  üzerindeki NiCr ince filmlerde büyük bölgesel gerilmeler yaratır. Oluşan gerilmeler gerinim ölçer olarak kullanılacak bir malzeme için kabul edilemez olacağı gibi, ince film direnç malzemeleri içinde oldukça büyük bir kusurdur. Çünkü bölgesel gerilmeler oksitlenmeyi farklı etkileyeceğinden, bölgesel oksitlenme farkları filmdeki elektriksel direnç

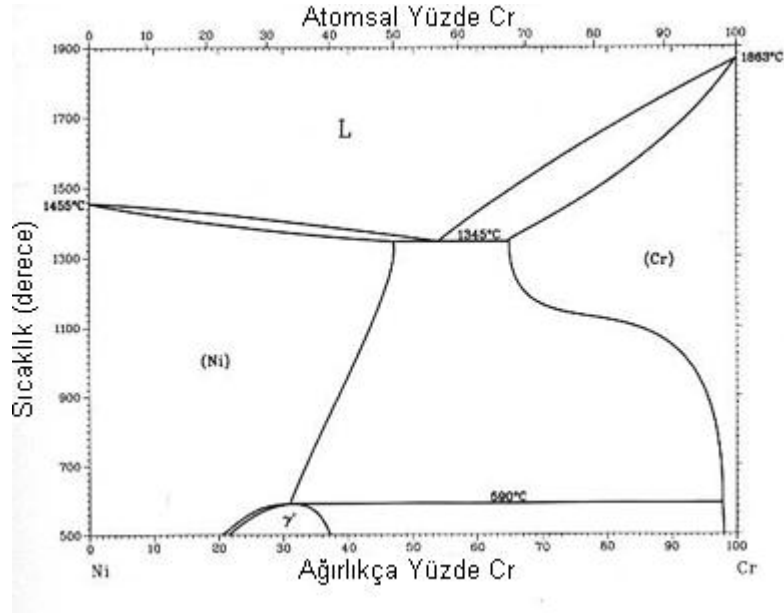
dengesini bozmaktadır. Bunların yanı sıra, pürüzlü yüzeyler üzerinde büyüyen ince filmlerin bölgesel kalınlıkları da birbirlerinden farklı olması yine filmin elektriksel direnci üzerinde olumsuz etkiler (Lasko ve Roth, 1961; Rölke, 1981).

Si pul üzerinde büyütülen  $\text{SiO}_2$  üzerinde de NiCr ince filmler üretilebilmektedir. Özellikle elektronik endüstrisi tarafından tercih edilen ve kullanımına çok sık başvuru alan  $\text{SiO}_2$  altlıklarda son derece yüksek performanslı malzemeler üretilebilmesine karşın, bu grupta sayılan altlıklar içerisinde en yüksek maliyete sahip olan altlık tipidir.

Poliamid altlıklar polimer tabanlı olmaları nedeniyle çoklu üretime son derece uygun altlıklardır ve düşük maliyetlidirler. Ayrıca düşük maliyetlerine karşı üzerlerine biriktirilen NiCr ince filmlerin performansları da son derece yüksektir.

#### **7.4 Ni – Cr Faz Sistemi**

NiCr ince filmlerin yapıları biriktirme koşulları ile yakından ilişkilidir. Şekil 7.1’ de gösterildiği gibi hacimsel haldeki sistemin faz diyagramı iki katı çözelti bölgesi arasında geniş bir karışmazlık bölgesine sahiptir ve bölgeler Ni içeren hmk  $\alpha$ -Cr ve Cr içeren ymk  $\gamma$ -Ni bileşimlerine sahiptir. Söz konusu geniş karışmazlık bölgesi, oldukça derin ötektik ve NiCr’ un metalik bileşik oluşturabilme kabiliyeti, sistemde yarı kararlı fazların üretilebilmesine olanak tanımaktadır. Ancak söz konusu yarı kararlı fazların üretilebilmeleri altlık tipi ve sıcaklığına, biriktirme hızına, film kalınlığına ve biriktirmede kullanılan gaz basıncına yakından bağlıdır. Dolayısı ile söz konusu yarı kararlı fazların pratikte gözlemlenebilmeleri oldukça güçtür. Ancak üretilebilmeleri durumunda filmlerin kararlılıklarına ve dirençlerine olan katkıları, mutlaka göz önüne alınmalıdır (Rölke, 1981).



Şekil 7.1 Ni-Cr ' a ait denge diyagramını göstermektedir.

Ni-Cr sistemi Cr ve Ni' ce zengin fazlar, içerdikleri diğer yarı kararlı yapıların incelenmesi amacıyla farklı araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır. Ni ve Cr' dan oluşan ikili faz sisteminde Ni, Cr içerisinde oldukça sınırlı çözünürlüğe sahiptir ve bu nedenle ağırlıkça % 40, % 50 Ni içeren yapılar iki fazlı malzemelerdir. Ancak Cr, Ni içerisinde oldukça yüksek bir çözünürlüğe sahiptir ve bu nedenle ağırlıkça % 80 Ni içeren yapı tek fazlı ymk kafes sisteminde kristalleşmektedir. Söz konusu sistemlerde tetragonal  $Cr_3Ni_2$  ve kübik  $\delta$ -NiCr, sistemde farklı koşullarda gözlenebilmiş yarı kararlı fazlardır (Vinayak vd., 2007).

NiCr ince filmlerin mikro yapıları, özellikle de sıcaklığın fonksiyonu olarak faz bileşimleri, oldukça karmaşıktır. Bu nedenle önceki çalışmalarda yapılan faz incelemeleri, oldukça geniş bir aralıktaki bileşim yelpazesi için değerlendirilmiştir. W.Brückner vd. tarafından yapılan çalışmada farklı araştırmacıların çalışmalarına değinilerek, Yukawa vd.'nin, ağırlıkça % 60 Cr içeren NiCr ince filmlerin hmk  $\alpha$ -Cr, ymk  $\gamma$ -Ni ve nano kristal yapıda tetragonal  $\sigma$  fazını altlık sıcaklığının 100 °C' nin altında olduğu koşullarda gözlendiğini bildirmiştir. Çalışmada ayrıca, Rönnerfarth vd. ise, buharlaştırma yöntemi kullanarak yaptıkları çalışmasında NiCr ince filmin oda sıcaklığında yarıamorf ve 300 °C ise,  $\alpha$ -Cr ve  $\gamma$ -Ni fazlarının karışımından oluştuğunu bildirmişlerdir. Bunların yanı sıra, birlikte buharlaştırma yöntemi kullanarak gerçekleştirilen bir başka çalışma da ise, Vollaro ve Potter oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklarda sadece  $\sigma$  fazını gözlemlemişlerdir (Brückner vd., 2000).

Sıçratma sistemi kullanılarak gerçekleştirilen başka çalışmalarda ise, sıçratmada kullanılan ortam basıncının ve altlık sıcaklığının NiCr ince filmlerin fazları üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Brückner vd.' nin bildiklerine göre, 4-80 Pa sıçratma basınçlarında ve altlık

sıcaklığının 20 – 300 °C arasında değiştiği koşullarda amorf ve  $\alpha$ -Cr ve  $\gamma$ -Ni fazlarının oluştuğunu bildirmişlerdir (Brückner vd., 2000).

Altlık sıcaklığı ve biriktirme sisteminden başka, NiCr sisteminde oluşan fazların özellikleri doğrudan biriktirme sonrası yapılan ısıl işleme ve biriktirilen filmin bileşimine de bağlı olduğu bilinmektedir. Pitschke ve Brückner, sıçratma sistemi ile biriktirdikleri Cr' ca zengin (ağırlıkça %37 Ni, %63 Cr) NiCr ince filmlere 200 – 700 °C arasında uyguladıkları ısıl işlemler sonucu oluşan fazları incelemişlerdir. Çalışmada, yaklaşık 400 °C' de uygulanan ısıl işlemin ardından yapının değiştiği, bu sıcaklıktan düşük sıcaklardaki ısıl işlemin fazlar üzerine büyük bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ayrıca filmin ağırlıklı olarak amorf yapıda kaldığı da bildirilmektedir. Yaklaşık 400 °C' de başlayan kristallenme basamağının, 3 aşamada ilerlediği bildirilmektedir. Kristallenmenin ilk basamağında önce amorf matris içerisinde Cr' ca zengin katı çözelti oluşmaktadır. Daha sonra sıcaklığın 600 – 700 °C artırılması ile birlikte  $\sigma$  – NiCr fazının kristallendiği bildirilmektedir. Üçüncü basamakta, 700 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda ise,  $\sigma$  – NiCr fazının ymk Ni' ce zengin faza parçalanmaktadır.

Cr bileşimi oldukça yüksek olan NiCr (Ni bileşimi %2 ile %22) ince filmlerin yapıları Naka vd. tarafından incelenmiştir. Ni bileşimi %20' e kadar olan durumda NiCr katı çözeltisinin hmk yapıda ve (100), (200), (211), (220) yönlerinde kristallendiği bildirilmiştir. Ni bileşiminin %22 olduğu halde ise, sistemin hmk yapıda çift fazlı yapıya sahip olduğu, (110) yönünde  $\gamma$  Ni-Cr fazı gözlenmiştir (Naka vd., 2006).

## 7.5 NiCr İnce Filmlerin Elektriksel Özellikleri

### 7.5.1 Elektriksel Direnç

Ni-Cr faz sistemindeki ağırlıkça %80 Ni, %20 Cr içeren NiCr ince filmler, uygun TCR davranışları ve tabaka dirençleri nedeni ile, genel amaçlı birçok ince film direnç uygulaması için uygun bir malzemedirler. Genel olarak faz sisteminde Ni:Cr oranı 40:60 ile 80:20 arasında değişen oranlardaki bileşenler tercih edilmektedir. Birçok çalışmada kullanılan ağırlıkça %80 Ni, %20 Cr içeren hacimsel NiCr' un direnci 110  $\mu\Omega$ .cm' dir. NiCr ince filmler ağırlıklı olarak sıçratma yöntemi kullanılarak biriktirilmelerine karşın, buharlaştırma yöntemi ile de biriktirilebilirler. Geniş bir tabaka direnci aralığı için sıçratma ile biriktirilme yapılması bileşim üzerinde oldukça iyi bir kontrol imkanı sağlar. Ancak buharlaştırma yönteminin kullanılması durumunda film bileşimine özellikle dikkat edilmelidir. Buharlaştırmada bileşimin ayarlanmasının güç olmasının başlıca nedeni Cr' un Ni' den daha yüksek buhar basıncına sahip olmasıdır. İki malzeme arasındaki bu fark sıcaklığın artması ile

azalır ve bu özelliği kullanarak farklı bileşimlerde hedef malzemeler kullanılarak istenilen bileşimde film elde edilmesi çalışmaları yapılmıştır. Bileşimden başka, buharlaştırma yönteminin kullanılması durumunda başarılı NiCr filmler üretebilmek için bir takım koşullarında yerine getirilmesi gerekir. Bu şartların başında altlık sıcaklığını uygun aralıkta tutarak artık gerilme miktarını azaltmak, ortamdaki artık gaz basıncını kontrol etmek ve birikme hızını belli bir değerde tutarak oksidasyonu uygun şartlara getirmek ve açık havada tavlamaaktır. Direnç, tüm bu özelliklerden hassas bir şekilde etkilenir ve uygun dirence sahip filmlerin üretilmesi için uygun koşulların sağlanması kaçınılmazdır.

NiCr dirençler genellikle 1 ile 500  $\Omega/\square$  arasında değişen tabaka dirençlerine sahiptir. Ayrıca Al ve Cu ilavesi filmlerin karakteristiklerini önemli ölçüde değiştirir. Sıçratma ile biriktirilen ince filmlerde buharlaştırma yöntemi ile üretilen filmlere göre daha büyük direnç değişimleri gözlenmektedir. Ayrıca Ni-Cr ince filmlerin özellikle nemli koşullarda kararlılıkları son derece kötü olduğundan, kararlılıklarını artırmak amacıyla yüzeyleri SiO ile kaplanmaktadır. Bu koruyucu kaplama ince filmin direncini birçok atmosfer koşulu için önemli ölçüde artırır. Aynı zamanda koruyucu kaplama olarak poliamid filmlerinde direnç kararlılığını artırdığı ve ince film pasifleştirdiği bilinmektedir (Riad ve Barlow III, 1997).

Vinayak vd.' nin ağırlıkça % 40, 50 ve 80 Ni içeren alaşım hedef kullanarak RF sıçratma sistemi ile biriktirdikleri ince filmlerde ölçülen tabaka dirençleri, Mattheisen Kuralı ile tanımlanan saçılma mekanizmaları ile ilişkilendirilmiştir. Farklı bileşimlerdeki NiCr ince filmlerin ısı işlem ardından ve biriktirildiği gibi ölçülen dirençleri arasındaki farklılık, ısı işlem sonucu tane büyüklüklerindeki değişim ile tane sınırlarının azalması ve bunun da tane sınırlarından saçılma ile oluşan direnç faktörünü azaltarak toplam direnci düşürdüğü belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, polikristal yapıdaki NiCr ince filmlerde direnci artıran en büyük etkinin tane sınırlarında oluşan elektron saçılmaları olduğu belirtilmiştir (Vinayak vd., 2007).

Başka bir çalışmada Kazi vd., ağırlıkça %80 Ni, %20 Cr içeren NiCr alaşım hedef kullanarak RF sıçratma sistemi ile biriktirdikleri NiCr ince filmlerin özelliklerini incelemiştir. Çalışmalarında 10 nm film kalınlığı için biriktirildiği gibi, 200 °C ve 300 °C' de yapılan ısı işlemler ardından tabaka dirençlerini sırasıyla 75, 64 ve 61  $\Omega/\square$  olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca söz konusu değerler elektriksel direnç olarak sırasıyla 74, 65 ve 61  $\mu\Omega\text{cm}$  değerlerine karşılık gelmektedir. Bunun yanı sıra çalışma da film kalınlığı ile elektriksel direnç arasındaki ilişki de irdelenmiş ve 400 nm film kalınlığı için aynı sıcaklık koşullarında değerler sırası ile 85, 83 ve 82  $\mu\Omega\text{cm}$  şeklinde olduğunu hesaplanmıştır. Çalışma da ayrıca sıçratma

sistemi ile üretilen filmlerin elektriksel dirençlerinin hacimsel haldeki NiCr (80:20) alaşımının elektriksel direncinden ( $108 \mu\Omega\text{cm}$ ) daha düşük olduğu da vurgulanmaktadır (Kazi vd., 2006).

### 7.5.2 TCR değeri

Ağırlıkça %80 Ni, %20 Cr içeren NiCr alaşımının TCR değeri  $100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  olarak tanımlanmaktadır. Sistemdeki TCR değeri ağırlıklı olarak Ni/Cr oranına bağlı olmakla birlikte, özel olarak biriktirme şartlarına da bağlıdır. TCR değerinin Cr oranının ve tabaka direncinin yüksek olduğu durumlarda daha negatif olduğu bilinmektedir. NiCr 80:20 bileşiminin daha yüksek TCR değerine ve tabaka direncine sahip olduğu da bilinmektedir (Riad ve Barlow III, 1997).

NiCr alaşımlarının üretim şekli ve üretim koşulların da, alaşımın TCR değerini etkilediği bilinmektedir. Biriktirme işleminde vakum sonrası ortamda kalan gazların, biriktirme sırasındaki altlık sıcaklığının, film kalınlığının ve altlık - ince film ara yüzeyinin ilişkisi, tüm ince filmlerde olduğu gibi NiCr ince filmlerin üretimi açısından önemlidir. Ortam gazlarından NiCr ince filmler için en büyük etkiye sahip olan gaz  $\text{O}_2$ ' dir.  $\text{O}_2$ ' nin bu denli önemli olması Cr' un  $\text{O}_2$ ' e olan yüksek ilgisinden kaynaklanmaktadır. Biriktirme sırasındaki ortamdaki  $\text{O}_2$ , NiCr ince filmlerin yapılarını ve TCR, kararlılık, direnç gibi elektriksel özelliklerini yakından etkilemektedir. Biriktirme sırasında ortamda bulunan  $\text{O}_2$  ve diğer algılanabilir gazların ana kaynağı vakum sonrası artakalan atmosferdir. Gaz halinde  $\text{O}_2$ , vakum sistemleri ile giderilebilse de özellikle  $\text{H}_2\text{O}$ ' nun buhar fazında parçalanması ile artık  $\text{O}_2$  biriktirme atmosferine karışır. Bu nedenle yeniden üretilebilir ve kararlı elektriksel özelliklere sahip NiCr ince filmlerin üretilebilmesi için ortam kontrolünün son derece hassas olarak yapılması gereklidir.

Ancak Cr' un ve dolayısı ile NiCr filmlerin  $\text{O}_2$ ' e olan bu büyük ilgisi, teknolojik açıdan NiCr ince filmlerin üretilmesinde avantaj olarak kullanılabilir. Sıçratma işleminin Ar/ $\text{O}_2$  gaz karışımından oluştuğu ve kısmi gaz basıncı çok hassas olarak kontrol edilebilen sistemlerle çok farklı karakterde NiCr ince filmler üretilebilmektedir. Ayrıca söz konusu filmlere biriktirme işlemi ardından uygulanan ısıl işlem ile, düşük ya da kabul edilebilir sınırlar içerisinde uygun TCR değerleri elde edilmiştir (Rölke, 1981).

NiCr ince filmlerin TCR değerlerinin kontrol altında tutulabilmesinin bir başka yolu da sisteme üçüncü bir metalin uygun oranda ilavesidir. NiCrSi ve NiCrAu gibi üçlü sistemlerin hem yüksek kararlılığa sahip oldukları hem de düşük TCR değerleri ile üretilebildikleri bilinmektedir. Bunların yanı sıra yine uygun direnç değerlerinin elde edilebilmesi ve TCR

değerinin ayarlanabilmesi için NiCr/CuNi/NiCr şeklinde üretilmiş ve ısı çift gibi uygulamalarda kullanılmıştır (Brückner vd., 2000, Rölke, 1981).

Biriktirildikleri durumda ince filmlerin birçoğu, elektriksel özelliklerini yakından ilgilendiren yapısal hatalar içerirler. Söz konusu halde filmler, termodinamik denge halinden oldukça uzak olduklarından zaman içerisinde toplam enerjilerini düşürecek şekilde bir dizi değişim gösterirler. Bu değişimler genellikle ince filmlerin direnç ve TCR değerlerinde değişikliklere de neden olur. Dolayısı ile biriktirme işleminin doğasına da bağlı olarak direnç malzemesi olarak kullanılacak ince filmlere biriktirme sonrası ısı işlem yapılması gereklidir. Çok yüksek vakum altında gerçekleştirilen ısı işlem sonunda ince filmlerin TCR değerlerinde yükselmeye karşı elektriksel dirençte azalma gözlenir. Bu etkilerin nedeni tane boyutlarının artmasına bağlı olarak tane sınırlarının azalması olarak değerlendirilebilir. Isıl işlemin  $O_2$ ' nin bulunduğu bir ortamda yapılması, TCR değerindeki artışı azalttığı tespit edilmiştir. Artıştaki bu azalmayışın nedeni, gerçekte negatif TCR değerine sahip  $Cr_2O_3$  fazının oluşumudur. Buna karşın NiCr ince filmlerin TCR değerleri üzerine ince film içerisindeki Ni – Cr oranında etkisi olduğu bilinmektedir. Ni' ce zengin fazlarda ısı işlem sırasında çökme ve yine Cr' un oksitlenmesine bağlı olarak TCR değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Alaşım elementlerinin miktarı ile elde edilen ilk çalışmalarda ağırlıkça % 20 – 30 Cr içeren ince filmlerin TCR değerlerinin +200ppm/°C değerlerine taşıdığı gözlemlenmiştir (Ronald ve Maurer, 1979, Rölke, 1981).

Bunun yanı sıra, S.Vinayak vd., ağırlıkça Ni:Cr %'leri 80:20, 50:50 ve 40:60 olan alaşımların yapılarını inceledikleri çalışmalarında 80:20 alaşımının TCR değerinin biriktirildiği halde ve ısı işlem sonrasında  $0^\circ$  a yakın değerler aldığını tespit etmişlerdir. Söz konusu bulgu diğer çalışmalarla uyum içerisinde olmakla birlikte, sıcaklığa bağlı direnç değişikliğinin değerlendirilmesi olan TCR' nin sadece yapısal farklılıklardan değil, filmin yapısından kaynaklanabilecek iç gerinimlerinde bu değeri etkileyebileceği vurgulanmıştır (Vinayak S. Vd., 2007).

Bileşimin, üretim koşullarının ve yöntemin ince filmlerde TCR değerini etkilemesinin yanı sıra, üretilen filmlerin kalınlıklarının da TCR değeri üzerine etkisi olduğu bilinmektedir. Kazi vd. yaptıkları çalışmalarında 10 nm kalınlığındaki 200 ve 300 °C' lerde ısı işlem görmüş NiCr filmlerin TCR değerlerini sırasıyla 310 ve 340 ppm/°C olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca film kalınlığının 125 nm' e ulaşması ile birlikte TCR değerinin kararlı hale geldiğini ve 100 – 150 ppm/°C değerlerine ulaştığını göstermişlerdir (Kazi vd., 2006).

Öte yandan, TCR değeri Cr bileşimine ve filmin yapısal karakterine de bağlıdır. Düzgün yüzeyli altlıklar üzerinde adacıklı bir şekilde büyüdüğü tespit edilmiştir. Yapının söz konusu büyüme şekli adacıklar arasındaki krom oksit oluşumu ile kontrol edilmektedir. %55 Cr oranına sahip filmlerde TCR değeri kalınlıktan bağımsızdır. Ancak yapının Ni' ce çok zengin olduğu koşullarda (saf Ni ya da %5 Cr içeren) kalınlığı daha az olan filmin TCR değerinin daha negatif olması beklenmesine karşın deneysel veriler bunun aksine göstermiştir. Bunun nedeni film büyümesini şekillendiren krom oksit varlığıdır. Adacıkların büyüklükleri fazla olduğu ( $> 100 \text{ \AA}$ ) film ince olsa da TCR değerleri pozitif olabilmektedir (Campbell ve Hendry, 1965).

## 8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

“Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemiyle Üretilen Ni-Cr Alaşımlarının Gerinim Ölçerlerde Kullanımı ve Uygulaması” başlıklı doktora çalışmamızda, farklı hedeflerden DC manyetik alanda sıçratma yöntemi kullanılarak biriktirilen iki katlı Cr ve Ni ince filmlerin ve NiCr alaşımından üretilen gerinim ölçerlerin özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışmamızda yaygın olarak kullanılan aksine gerinim ölçerin bir taşıyıcı altlık üzerinde üretimi yerine, doğrudan gerinim ölçülecek parça üzerinde üretilmesi amaçlanmıştır. Üzerlerinde gerinim ölçerler üretilecek olan parçalar, karakterizasyonların doğru şekilde yapılabilmesine olanak vermeleri ve üretim proseslerine uygunluklarından dolayı cam ve PMMA seçilmiştir. Üretimde kullanılacak ince film alaşımı olarak ise, en yaygın gerinim ölçer alaşımlarından biri olan, ağırlıkça %80Ni-%20Cr içeren ve ticari olarak “Nichrome” olarak bilinen alaşım belirlenmiştir. Literatürde NiCr ince filmlerin üretiminde kullanılan başlıca yöntem, Nichrome alaşım hedef kullanılarak sıçratmadır. Ancak deneysel çalışmalarımızda kullandığımız gibi tabakalı Ni-Cr ince filmlerinden ısıtma işlemi kullanılarak NiCr alaşım üretilmesi, bu filmlerin karakterizasyonu ve yine bu yöntemle yapı içerisindeki Cr oranının değiştirilerek incelenmesi ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır.

Ni-Cr alaşımı yalnızca gerinim ölçerlerin üretiminde değil, mikro elektronik, yarı iletken teknolojileri, Mikro elektro mekanik sistemler ve manyetik ince filmlerinde üretilmesinde kullanılan oldukça önemli bir malzemedir. Dolayısı ile bu malzemenin Cr/Ni oranı ile elektriksel ve yapısal olarak karakterizasyonu, teknolojik açıdan önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra, yukarıda bahsedilen NiCr’ un kullanıldığı teknolojilerde başlıca ısıtma işlemi sistemi olarak tercih edilen RTP, çalışmalarımızda tabakalı Ni-Cr ince filmlerin ısıtma işleminde kullanılmıştır. Bu sayede, literatürde farklı bileşimlerdeki Ni-Cr alaşımlarının özellikleri ile farklı Cr/Ni tabaka kalınlıklarına sahip ince filmlerin RTP ile ısıtma işlemi ile elde edilen özellikleri karşılaştırılacaktır. Çalışmamızda ayrıca, Nichrome hedef kullanılarak biriktirilen ince filmler ile tabakalı Ni-Cr ince filmin RTP ile ısıtma işlemi görmesi sonucu elde edilen yapıların karşılaştırılması, bahsedilen teknolojilere bilgi alt yapısı sağlanması bakımından önemli olacaktır.

Araştırmamızın deneysel çalışmaları, iki ana bölümde incelenmektedir. Araştırmanın birinci bölümü kapsamındaki çalışmalara, Ni-Cr ince filmlerin Ni ve Cr hedeflerden cam altlık üzerine tek katlı olarak biriktirilmesi ve karakterize edilmesi ile başlanmıştır. Bu sayede, Ni ve Cr filmlerin XRD analizlerinin incelenmesi ile ince filmlerin faz analizleri yapılmış, tane büyüklükleri hesaplanmış ve kristallenme durumlarına göre uygun koşullar belirlenerek, DC

manyetik alanda sıçratma sisteminin cihaz parametreleri belirlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında yapılan tüm biriktirme işlemleri, tespit edilen bu parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Biriktirme koşullarının belirlenmesinin ardından, gerinim ölçer alaşımı olarak seçtiğimiz ağırlıkça Nichrome alaşımının yapısal özellikleri ile farklı hedefler kullanılarak biriktirilen ve RTP ile ısıtılma işlemi gören ince filmlerin yapıları, Ni içerisindeki Cr' un Ni-Cr ince filmlerin özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarımızın ikinci bölümünde, gerinim ölçerlerin üretimi için cam ve PPMA altlıklar üzerine Nichrome ince filmlerin üretimi ve bu ince filmlerin seçilen gerinim ölçer desenine uygun olarak şekillendirilmesi yapılmıştır. İnce filmlerin üretim parametreleri olarak, birinci bölümde belirlenen biriktirme koşulları kullanılmış ve tek kat 500 nm NiCr ince filmler biriktirilmiştir. Üretimde doğrudan alaşım halde hedef kullanıldığından bu bölümde üretilen ince filmlere her hangi bir ısıtılma işlemi uygulanmamıştır. Biriktirme sonrası ince filmlerin fazları, XRD analizi ile tespit edilmiştir. Bunların yanı sıra, üretilen ince filmin bileşimi EDS analizi ile incelenmiş ve film yapısı cam altlık üzerinde büyüyen ince filmin kırık yüzeyinden alınan FESEM analiz görüntüsü ile tespit edilmiştir. Ayrıca, Nichrome ince filmlerin yüzey özellikleri AFM görüntüleri ile incelenmiş ve birinci bölümde farklı hedeften iki katlı olarak üretilip, ısıtılma işlemi tabii tutulan numunelerin özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Yine birinci bölümde uygulandığı şekli ile numunelerin elektriksel özellikleri dört kontak testi ile incelenmiş ve tabaka direnci, elektriksel dirençleri hesaplanmıştır.

Bu bölümde ayrıca, gerinim ölçerlerin test edilebilmesi ve gerinim ölçer şeklini kazanabilmesi için cam ve PMMA altlık üzerine biriktirilen ince filmler şekillendirilmiştir. Şekillendirme işleminde fotolitografik şekillendirme ve ıslak aşındırma yöntemleri kullanılmıştır. Şekillendirme sonrası gerinim ölçerlerin elektriksel dirençleri ölçülmüş, TCR değerleri belirlenmiştir.

Genel olarak üretilen gerinim ölçerler, yapıları gereği, üzerlerine düşen gerinime direnç değişimi göstererek tepki verirler. Dolayısı ile bir gerinim ölçer, gerinim-direnç değişimi ve yüzde uzama miktarı gibi büyüklüklerin ikisi kullanılarak test edilebilir. Ancak gerinim ölçerlerin gerinim altındaki dirençlerindeki değişim, doğrudan direnç ölçümü ile test edilemeyecek kadar küçüktür. Bu nedenle “Wheatstone köprüsü” olarak bilinen özel elektrik devreleri kullanılarak ölçüm yapılması gereklidir. Çalışmamızda ürettiğimiz gerinim ölçerlerin test edilebilmesi için söz konusu Wheatstone köprüsü, cam üzerinde kendi ürettiğimiz elektrik dirençleri kullanılarak kurulmuştur. Kurulan Wheatstone köprüsünün

yardımları ile cam eğme çubuğunun üzerinde üretilen gerinim ölçer,  $\Delta R/R_0 - \epsilon$  eğrisi yardımıyla karakterize edilmiştir.

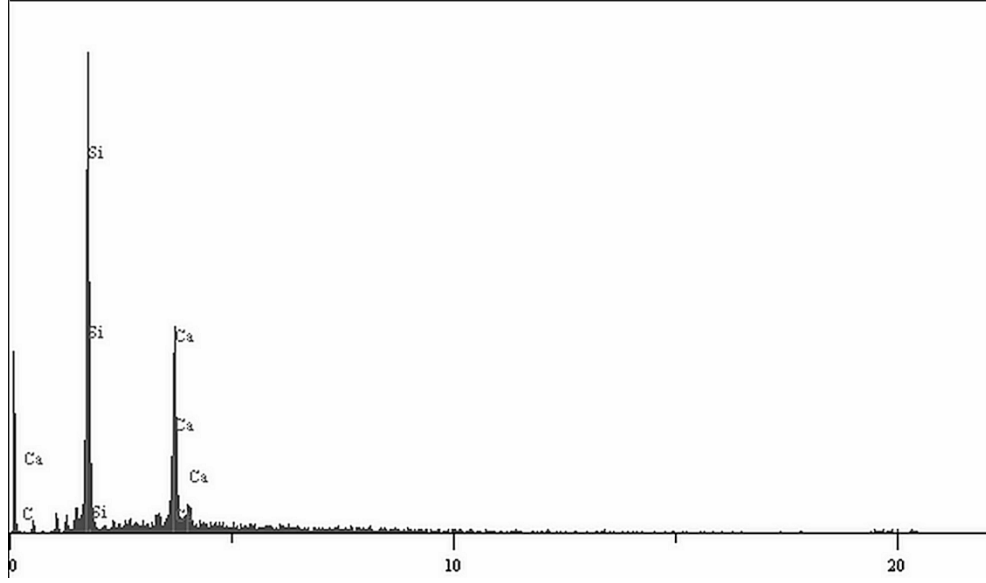
### **8.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Altlık Malzemeler**

İnce filmlerin biriktirildikleri altlık malzemelerin özellikleri, biriktirilen ince filmlerin yapılarını yakından etkiler. Özellikle seçilen altlığın yüzeyindeki çizik, oyuk gibi makro kusurların filmlerde tane boyutu değişimi, yüzeye tutunmanın azalması, tane kabalaşması gibi bir takım etkilere yol açtığı bilinir. Bu nedenle biriktirme öncesi altlık yüzeylerinin gerekli olduğu durumda metalografik olarak hazırlanması ve/veya kimyasal katkılardan temizlenmesi son derece önemlidir. Bunun yanı sıra, ince film direnç malzemelerinde altlık malzemesinin tipi, ince filmlerin elektriksel kararlılığı ve TCR değeri üzerinde önemli rol oynar. Dolayısıyla ile yapılan çalışmalarda kullanılacak altlıklar, kullanım yerine ve amaca uygun olarak seçilir (Rölke,1981, Horvath ve Bankuti, 1988).

NiCr ince filmler teknolojide çok farklı amaçlarla kullanılmalarına karşı, yaptığımız çalışmada öncelik elektriksel olarak kararlı ince filmler üretmek ve bu filmleri elektriksel olarak test ederek, gerinim ölçer olarak şekillendirmektir. Dolayısıyla ile çalışmalarımızın her basamağında üretilen ince filmler, elektriksel direnç bakımından bir ya da birkaç şekilde test edilmiştir. Söz konusu analizlerin güvenilir olarak yapılabilmesi için çalışmamızda altlık malzeme seçiminde öncelikle, altlık malzemelerin elektriksel dirençlerinin, biriktirilen filmlerin elektriksel dirençlerinden çok farklı olması gerekliliği göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle deneysel çalışmalarda, polimer esaslı PMMA ve çok iyi bir yalıtkan olarak bilinen cam kullanılmıştır. Ayrıca cam ve PMMA, gerinim ölçer karakteristiklerinin elde edilebilmesi için gerekli olan gerinim – direnç değişimi hesaplamalarının üzerlerinde yapılabilmesi için de iyi özelliklere sahip izotrop malzemelerdir.

#### **8.1.1 Cam Altlıklar**

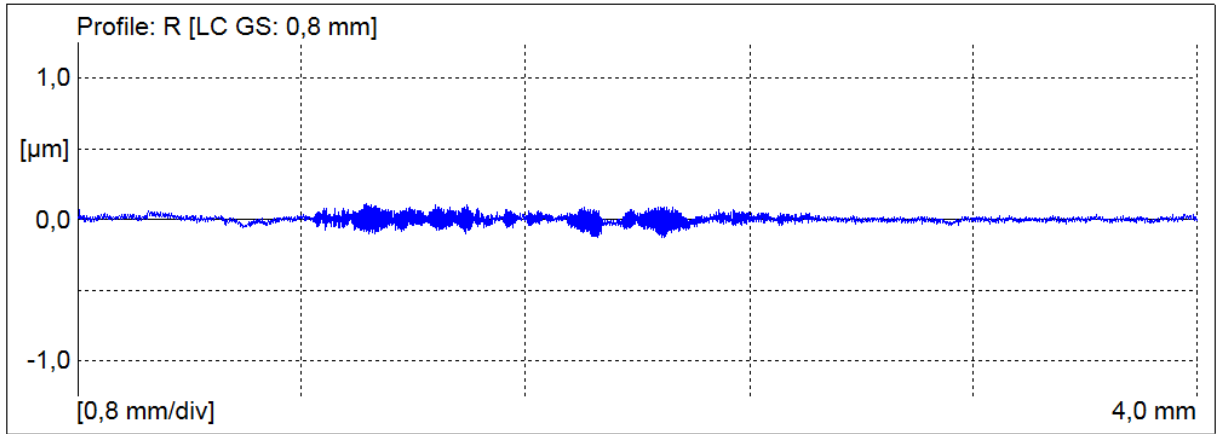
Biriktirme işlemlerinde kullanılan cam altlıklar, 26,14 mm en ve 76.27 mm boya sahip ISOLAB marka mikroskop slaytlarından elmas bıçak ile farklı ebatlarda kesilerek hazırlanmıştır. Cam numunelerin kimyasal bileşimleri, EDS ile tespit edilmiş ve Şekil 8.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 8.1 Cam altlığa ait EDS analiz sonucunu göstermektedir.

EDS analizlerinden cam altlıkların bileşimlerinin ağırlıkça % 55.170 Si ve % 44.830 Ca içerdiği tespit edilmiştir.

Biriktirme işlemlerinde kullanılan altlıkların yüzey özellikleri, biriktirilen filmlerin özelliklerini, yapılarını ve dolayısı ile biriktirme işleminin başarısını yakından etkiler. Bu nedenle cam numunelerin yüzey pürüzlülükleri, Mahr perthometer S2 ile ölçülmüş ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 0.025  $\mu\text{m}$  olarak tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne ait analiz bulguları Şekil 8.2' de gösterilmiştir.



Şekil 8.2 Cam altlığa ait yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucunu göstermektedir.

### 8.1.2 PMMA Altlıklar

Deneysel çalışmalarımızda, gerinim ölçerlerin üretiminde kullanılan ikinci altlık malzemesi, PMMA' dır. PMMA numuneler, ISO7823-1 standardına uygun döküm yoluyla üretilmiş

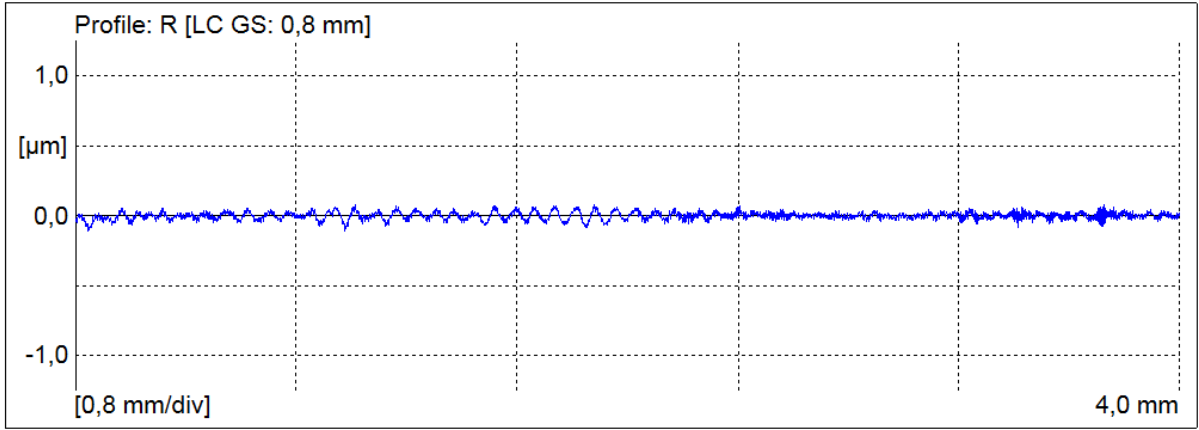
renksiz plakadan 200 mm. boyunda ve 18.57 x 4.97 mm. genişlik ve kalınlığa sahip olacak şekilde hazırlanmış çubuk şeklinde numunelerdir.

Polimetil metakrilat ya da yaygın olarak bilinen adı ile akrilik, amorf yapıda ve son derece iyi optik özelliğe sahip dış ortam kullanımına uygun bir polimer türüdür. Kimyasal olarak alkalilere, deterjanlara, yağlara ve seyreltik asitlere dayanıklı olmasına karşı, birçok çözücü ve aseton tarafından parçalanabilir (Brydson, 1999; Zhou vd., 2001).

İlgili standartta da tarif edildiği üzere, döküm yoluyla üretilen PMMA, akrilik ya da metakrilik içeren monomerlerinin ve MMA' nın homopolimerlerinden ya da kopolimelerinden hacimsel polimerleşme yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Bileşim bakımından döküm yoluyla üretilen PMMA, polimerin bir parçası olacak şekilde herhangi bir reaksiyona girmeyen ancak plastikleşmeyi sağlayan bileşenlere ek olarak, diğer monomerleri ve bir takım çapraz bağlayıcılar da içermektedir. Söz konusu bu tüm ilave bileşenlerin toplamı, polimerin toplam kütlesi %3' nü geçmemektedir. Ayrıca döküm yoluyla üretilen PMMA, renksiz her iki yüzeyi birbirlerine paralel, oldukça düşük yüzey pürüzlülüğüne değerlerine sahip olarak üretilmektedir (EN ISO 7823-1:2003).

Elektriksel bakımdan yalıtkan olan PMMA' nın elektriksel direnci  $10^{16}$   $\Omega$ m, dielektrik dayanımı 3 mm'lik numune için 140 kV/cm ve dielektrik sabitleri 60 Hz için 3.7,  $10^6$  Hz için 3.0 olduğu bilinmektedir (Brydson, 1999).

Deneysel çalışmalarda kullanılan PMMA numuneler, istenilen boyutlarda hazırlandıktan sonra yüzeylerindeki koruyucu film çıkartılmış ve saf su ile temizlenmişlerdir. Daha sonra numuneler, üretim ve hazırlama aşamalarında üzerlerinde oluşmuş olabilecek artık gerilmeler karşı, fotoelastik yöntem kullanılarak test edilmişlerdir. Ardından, PMMA çubuklar, biriktirme öncesi yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenmesi için cam numuneler ile aynı yöntem kullanılarak analiz edilmişler ve elde edilen sonuçlar Şekil 8.3' de gösterilmiştir.



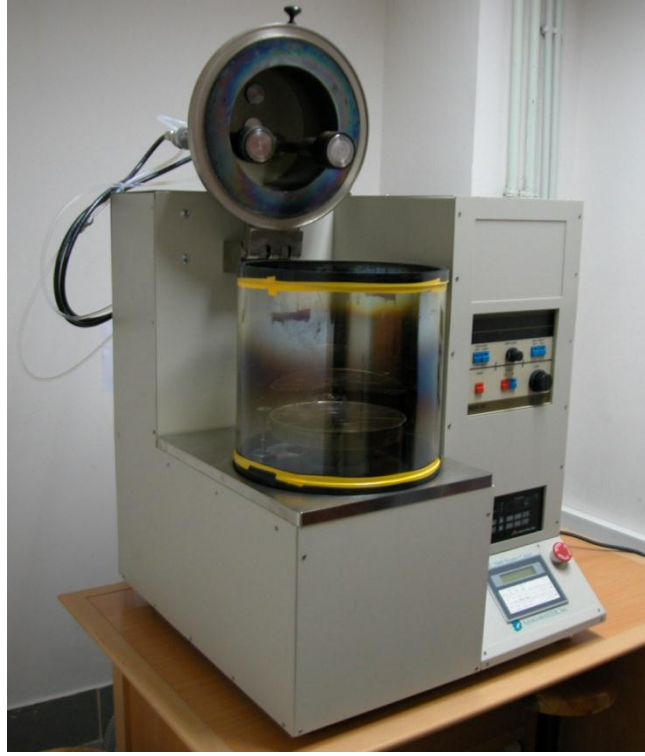
Şekil 8.3 PMMA altlığa ait yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonucunu göstermektedir.

## 8.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan İnce Filmlerin Üretim Yöntemleri

Deneysel çalışmalarda manyetik alanda sıçratma sistemi kullanılarak tek katlı Ni ve Cr, iki katlı Ni-Cr ve alaşım Nichrome hedef kullanılarak cam ve PMMA altlıklar üzerine toplam film kalınlıkları 500 nm olan ince filmler biriktirilmiştir. Bu ince filmlerden iki katlı olanlarına RTP sistemi ile 600 °C' de 180 sn. süresince ısıl işlem uygulanmıştır.

### 8.2.1 Manyetik Alanda Sıçratma ile İnce filmlerin Biriktirilmesi

Deneysel çalışmalarımızda, cam ve PMMA altlıklar üzerine farklı kalınlıklarda Ni, Cr, Ni/Cr ve Nichrome biriktirilmesi işlemlerinin tümünde DC manyetik alanda sıçratma sistemi, Nanomaster NSC 2000 sistemi kullanılmıştır. Söz konusu biriktirme sistemi Şekil 8.4' de gösterilmektedir.



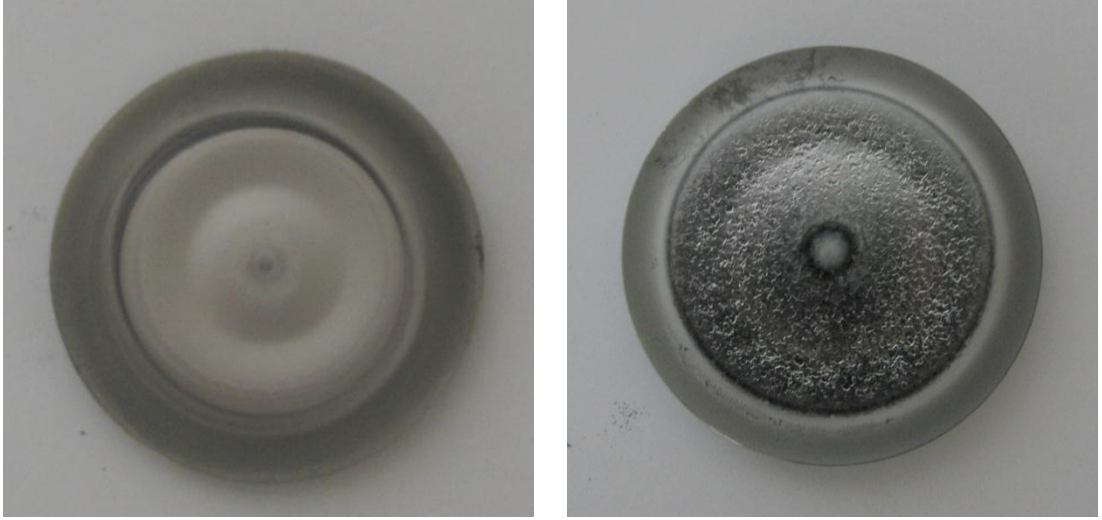
Şekil 8.4 Ni-Cr ince filmlerin üretilmesinde kullanılan manyetik alanda sıçratma sistemini göstermektedir.

Manyetik alanda sıçratma sistemi, bir adet DC güç kaynağına ve üzerlerine biriktirme işleminde kullanılan hedef malzemelerin yerleştirildiği iki adet 50 mm çapında magnetrona (katot) sahiptir. Sistemin biriktirme odası, kaba vakum pompası ve turbo moleküler pompa yardımıyla  $6 \times 10^{-5}$  Torr basınca kadar inebilmektedir. Sistemde numunelerin yerleştirildiği su soğutmalı döner altlık, vakum odasının alt kısmında bulunmaktadır. Su soğutmalı altlık tutucu, numunelerin biriktirme işlemi boyunca düşük sıcaklıkta tutulabilmesine olanak verebilmektedir. Biriktirme süresince oluşan ince film kalınlığı, cihaz üzerindeki Inficon Quartz Crystal Monitor yardımıyla son derece hassas olarak takip edilebilmektedir. Altlık tutucu aynı zamanda biriktirme işlemi boyunca sabit hızda kendi eksenini etrafında dönebilmekte ve bu sayede altlık yüzeyinde biriken filmin homojen olabilmesi sağlanabilmektedir.

Biriktirme işlemlerinde, Ni, Cr ve Nichrome olmak üzere üç farklı hedef malzeme kullanılmıştır. Ni ve Cr malzemeler, cam altlık üzerinde iki katlı üretilen ince filmlerin biriktirilmesinde ve Nichrome alaşım hedef ise, gerinim ölçerlerin üzerlerinde üretilen cam ve PMMA altlıkların biriktirilmesinde kullanılmıştır.

Ni ve Cr sıçratma hedefleri olarak, %99.99999 saflıkta Ni ve Cr' dan üretilmiş hedefler kullanılmıştır. Manyetik alanda sıçratma sistemlerinde kullanılan hedeflerin boyutları, sistemde kullanılan ve magnetron adı verilen sıçratma tabancalarının ebatlarına, güçlerine ve

sıçratılacak malzemelerin manyetik özelliklerine göre belirlenir. Kullandığımız hedeflerin kalınlıkları, metallerin manyetik yapılarına ve sıçratma sisteminin özelliklerine bağlı olarak Ni ve Cr için sırasıyla, 3.27 ve 6.42 mm, çapları ise magnetron çapına göre 50 mm olarak seçilmiştir. Ni ve Cr hedefler Şekil 8.5' de gösterilmiştir.



Şekil 8.5 Biriktirme işlemlerinde kullanılan Ni ve Cr biriktirme hedeflerini göstermektedir.

Deneysel çalışmalarımızda gerinim ölçerlerin üretilmesinde kullanılan Nichrome hedef, 50 mm çapa ve 6.72 mm kalınlığa sahiptir. Hedefin kimyasal bileşimi üretici firma tarafından GDMS/ICP/LECO analitik metotları ile tespit edilmiş ve içerisinde ağırlıkça Ni miktarı % 80.15, Cr miktarı ise % 19.85 olarak bildirilmiştir. Ayrıca hedef malzeme içerisindeki toplam metalik safsızlık miktarı 79.88 ppm' dir. Biriktirme işlemlerinde kullanılan Nichrome hedefe ait fotoğraflar Şekil 8.6' de gösterilmektedir.



Şekil 8.6 Biriktirme işlemlerinde kullanılan Nichrome alaşım hedefi göstermektedir.

### 8.2.2 Hızlı Isıl İşlem (RTP)

İki katlı olarak biriktirilen ve farklı Cr/Ni kalınlık oranlarına sahip numunelerin tamamına, RTP sistemi ile hızlı ısıl işlem uygulanmıştır. RTP, önceki bölümlerde ayrıntıları ile değinildiği gibi, geleneksel ısıl işlem sistemlerinden oldukça farklı ve üstün özelliklere sahip bir ısıl işlem sistemidir. Söz konusu sistem Şekil 8.7’ de gösterilmektedir.



Şekil 8.7 Isıl işlem deneylerinde kullanılan RTP sistemi.

Kullandığımız RTP sistemi 22kW gücünde, vakum ve N<sub>2</sub> atmosferinde yüksek sıcaklıklarda ısıl işlem yapabilen bir fırın sistemidir. Sistemde ısıtma, cihazın üst bölümünden bulunan kapak içerisine yerleştirilmiş 1000’ er W’ lık 20 halojen lamba tarafından sağlanır. Sistemin

ısıtma bölümü hariç, diğer bölümleri su soğutmalı olduğundan fırın soğuk duvarlı ve dengesiz ısıtma sağlayabilir. Sistemde ısıtma, numune üzerine düşen fotonlar yardımıyla gerçekleştiğinden vakum altında, çok hızlı olarak yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Ayrıca sisteme, ısıtma işlemi sırasında oksidasyonu engelleme için koruma amaçlı ve hızlı soğumanın istenildiği koşullarda ise, soğutma amacıyla kullanılacak 2 farklı gaz girişi yapılabilmektedir. İşlem sırasında numune sıcaklığı, numuneye alt kısımdan temas eden bir ısılıft yardımıyla takip edilebilmektedir. Bunlara ek olarak sistem, yazılımı tarafımızdan geliştirilen bir bilgisayar programı tarafından kontrol edilmektedir ve bu sayede ısıtma işlemleri arasındaki basamaklar, tam otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir.

### **8.3 İnce Film Numunelerin Değerlendirilmesinde Kullanılan Karakterizasyon**

#### **Yöntemleri**

##### **8.3.1 XRD Analizi**

Üretilen ince filmlerin fazları, ortalama tane boyutları ve kristallografik yönelimleri, XRD analizleri ile tespit edilmiştir.

İnce filmlerin XRD analizleri, Philips Panalytical marka difraktometre ve dalga boyu 1.5405980 Å olan Cu K $\alpha$  ışınım tüpü kullanılarak yapılmıştır.

XRD analizleri kullanılarak elde edilen XRD desenlerinden tane boyutları Denklem 8.1 kullanılarak tayin edilmiştir.

$$T = \frac{0.9 \lambda}{B \cos \theta_B} \quad (8.1)$$

Debye-Scherrer bağıntısı olarak bilinen matematiksel bağıntı, difraktometre ile elde edilen XRD deseni kullanılarak tane boyutlarının hesaplanabilmesine olanak vermektedir. Denklemde K, Debye sabiti (0.9),  $\lambda$ , XRD analizinde kullanılan dalga boyu, B, pik yarı yüksekliğindeki genişlik (FWHM) ve  $\theta_B$  ise analizde elde edilen radyan cinsinden pik konumlarını ifade etmektedir (Cullity, 1978).

Deneysel çalışmalarımızdan elde ettiğimiz XRD desenlerinde, bazı durumlarda gözlenen aynı  $2\theta$  derecelerinde üst üste binerek çakışan piklerin ayrıştırılması ve bu sayede oluşan piklerin tanımlanabilmesi için bir takım matematik modellere başvurulmuştur. Bu modellerin seçilmesinde, esas olarak incelenecek pikin şeklinin uygulanan modelin ifade ettiği şekle uygun olması esas alınmıştır.

Günümüzde kırınım desenlerinin incelenmesinde, fazların tanımlanmasında ve tüm desen oturtma çalışmalarında analitik fonksiyonların ve matematiksel modellerin kullanımı oldukça

yaygınlaşmıştır. XRD analizlerinde elde edilen pik profillerine uygun olarak kullanılabilir üç matematiksel fonksiyon vardır. Bu fonksiyonlar; Gauss, Lorentz (Cauchy), Pseudo Voigt fonksiyonları olarak bilinen fonksiyonlardır (Estevez-Rams vd., 2005).

Bu fonksiyonlardan Gauss fonksiyonu Denklem 8.2, Lorentz (Cauchy) fonksiyonu Denklem 8.3 ve Pseudo Voigt fonksiyonu Denklem 8.4 ile ifade edilmektedir.

$$G(r *) = \frac{2}{f} \sqrt{\frac{\log 2}{\pi}} e^{-4 \log(2) \left(\frac{l-l_0}{f}\right)} \quad (8.2)$$

$$L(r *) = \left(\frac{1}{2\pi f}\right) \frac{1}{1 + \left(\frac{l-l_0}{f}\right)^2} \quad (8.3)$$

$$pV(r *) = \eta G(r *) + (1 - \eta)L(r *) \quad (8.4)$$

Denklemlerde  $f$  pik yarı yüksekliğindeki genişliği (FWHM) ve  $I$  şiddet değerini ifade etmektedir. Denklem 8.4 ele alındığında Pseudo Voigt fonksiyonun Lorentz ve Gauss fonksiyonlarının bileşimi olduğu gözlenir. Denklem 8.4’ de ifade edilen  $\eta$  parametresi ise söz konusu bileşimin bileşim parametresini ifade etmektedir (Estevez-Rams vd., 2005).

### 8.3.2 AFM Analizi

İnce filmlerin yüzey özellikleri ile ince film analizlerinde başvurulan temel analiz yöntemlerinden bir tanesidir. Yüzey morfolojisi, ortalama yüzey pürüzlülüğü gibi büyüklüklerin belirlenmesi, ince filmin yüzeyinin bir uç yardımıyla taranması ve uç ile yüzey arasındaki etkileşimlerin yorumlanması tekniğine dayanan AFM analizleri ile gerçekleştirilir. İncelenen yüzeyin özelliklerine bağlı olarak AFM analizleri temaslı, temassız ve yarı temaslı şekilde olmak üzere üç ana şekilde incelenebilir. İnce film analizlerinde genellikle ucun belli bir titreşim aralığı altında yüzeye çok hafif vuruşlar ile dokunduğu yarı temaslı çalışma şekli tercih edilmektedir (Zhou vd. 2008).

Deneysel çalışmalarımızdaki AFM analizleri, SHIMADZU SPM – 9600 Scanning Probe Microscope kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, havada, sistem dinamik ve temassız moda kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan Nano World Innovative Technologies marka Si ucun kalınlığı 4µm, uzunluğu 125 µm ve genişliği 30 µm’ dir. Ayrıca ölçümlerde uç rezonans frekansı 320 kHz ve kuvvet sabiti 42 N/m’ olarak seçilmiştir.

Numunelerin AFM analizlerinde yüzeyler 500 x 500 nm<sup>2</sup> ‘lik bir alana sahip olacak şekilde taranmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin numune yüzeyinin tamamını yansıtabilmesi için yapılan analizlerin tümü, numune yüzeyinden seçilen beş farklı bölgeden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması olacak şekilde yapılmıştır.

### 8.3.3 Tabaka Direnci ve Elektriksel Direnç Ölçümleri

Gerinin ölçer olarak şekillendirilmek üzere üretilen ince filmlerin, kalınlığa bağlı tabaka direnci ölçümleri, Jandel Marka Multi Height Probe ve RM3 AR güç kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı dört kontak ölçüm sistemi, Şekil 8.8 ' de gösterilmektedir. Ölçümlerde lineer olarak konumlandırılmış 1 mm aralığa sahip WC uçlar kullanılmıştır. Uçların yüzey yuvarlaklık değerleri 100  $\mu\text{m}$  kadar olup, ölçüm sırasında uçlar, ince film yüzeyine 10 gr yük kullanılarak mekanik olarak kontak ettirilmiştir.

Deneysel çalışmalarımızın tüm basamaklarında gerçekleştirilen dört kontak testleri, numune yüzeylerinin en az beş farklı bölgesinden alınan tabaka direnci değerlerinin aritmetik ortalaması olacak şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 8.8 Dört kontak test sistemini göstermektedir.

### 8.3.4 Nano Sertlik Ölçümü

Farklı kalınlıklarla cam altlıklar üzerinde biriktirilen ince filmlerde, Ni içerisine yaygın Cr miktarının değişmesi ile birlikte sistemin sertliğinde oluşabilecek değişimlerin izlenebilmesi için, nanoindentasyon ölçüm sistemi kullanılmıştır.

Nanoindentasyon, sertlik ölçümünde kullanılan ve oldukça yeni olmasına karşın, sık kullanımı sayesinde olgunlaşmış ve yerleşmiş bir sertlik ölçüm tekniğidir. Yöntem, belirli bir yük altında numune üzerine bastırılan bir ucun, numune boyunca derinliğinin kaydedilmesi prensibine dayanır. Bu çalışma şekli sayesinde, klasik yöntemlerden farklı olarak, istenilen derinlikten sertlik alınabilmesini mümkün kılar. Ayrıca uç geometrisinin oluşturduğu temas alanı, ucun ilerlediği derinliğe karşı, ölçülen yük değerine bağlı olarak hesaplanır. Sertlik değerinin yanı sıra, yük – yer değiştirme eğrisi üzerinden numunenin farklı mekanik özellikleri de hesaplanabilir (Fischer-Cripps, 2006).

Deneysel çalışmalarımızdaki nanoindentasyon ölçümleri, CSM Nanohardness Tester sistemi ve Oliver Pharr istatistiği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, ince film nano sertlik analizlerine uygun üç yüzlü elmas Berkoviç ucu (üç yüzünün tepe açısı 65.27) kullanılmıştır. Ölçümler sırasında ince film sertliğinin altlık malzemenin sertliğinden etkilenmemesi için batma derinliği her bir numunenin FESEM analizleri ile elde edilen film kalınlığının % 10' u olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca ölçümlerde yükleme/boşaltma hızı ve veri toplama sıklığı sırası ile 1 mN/dak ve 10 Hz olarak seçilmiştir.

### **8.3.5 FESEM ve EDS Analizleri**

İnce filmlerin büyüme tipleri, morfolojileri, ısıtma işlemi ile alaşımlama sonrası film kalınlıklarındaki değişim gibi parametreleri belirlemek için numunelere, JEOL JSM 6335 Field Emmision SEM sistemi kullanılarak FESEM analizi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarımızda ince filmlerin kırık yüzey analizleri, cam altlığın elmas ile kesilerek uygun şekilde kırılması ile oluşturulan kırık yüzeyin incelenmesi ile yapılmıştır. Kırık yüzeylerin analizlerinde, yalıtkan altlıktan kaynaklanan görüntü alma problemlerini engellemek amacıyla kırılan yüzeyler çok ince altın ve platin ile kaplanmıştır.

Ayrıca FESEM analizleri sırasında ince filmlerin ağırlıkça içerdikleri %Ni ve %Cr oranları EDS analizleri ile tespit edilmiştir. Buna ilave olarak, ince filmlerde film yüzeyinden altlık sınırına kadar olan mesafede, diğer bir değişle, film kalınlığı boyunca film bileşimi yine yapılan EDS analizleri ile incelenmiştir.

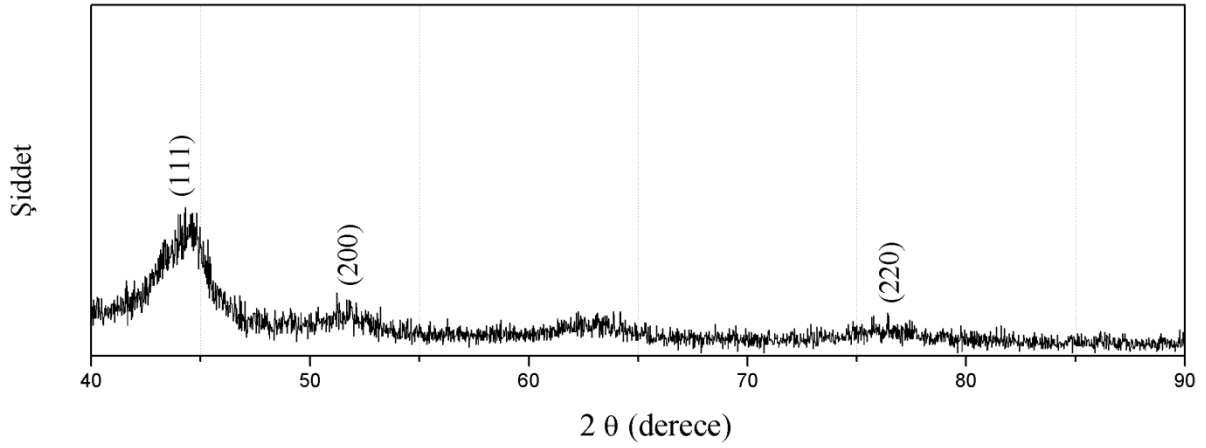
## **8.4 İnce Film Numunelerin Üretimi ve Karakterizasyonu**

Deneysel çalışmalarımızda, cam üzerinde tek kat ve farklı Cr/Ni kalınlık oranlarına sahip ayrı Ni ve Cr hedeflerden biriktirilmiş ince film numunelerin yanı sıra, Nichrome alaşım hedeften PMMA ve cam altlıklar üzerine gerinim ölçer üretimi amaçlı biriktirilmiş ince film numunelerde kullanılmıştır. Bu numuneler iki katlı ve farklı Cr/Ni kalınlık oranına sahip numunelere RTP sistemi ile ısıtma işlemi uygulanmıştır.

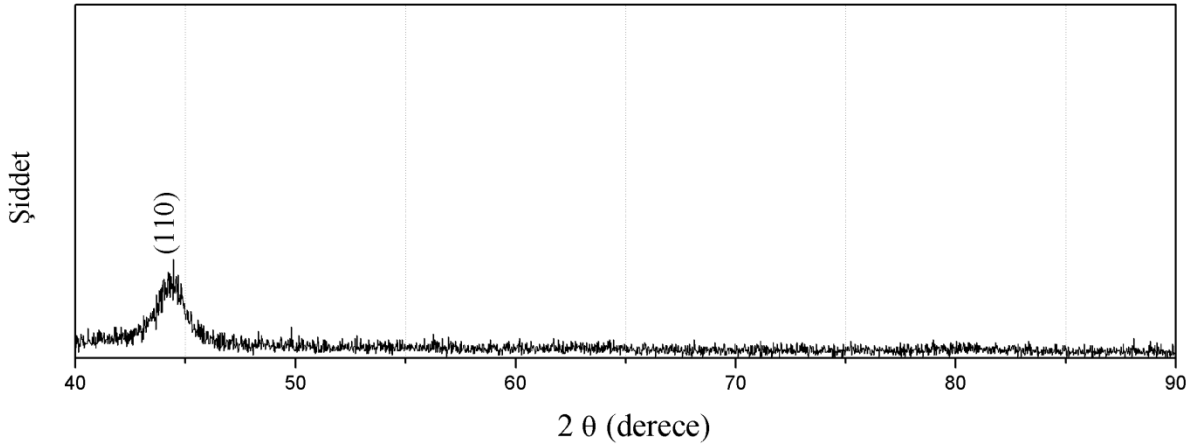
### **8.4.1 Tek Kat Ni ve Cr İnce Filmler**

Deneysel çalışmalarımızda uygun biriktirme şartlarının belirlenebilmesi için öncelikle, cam altlık üzerinde farklı biriktirme süreçlerinde tek kat 500 nm kalınlığa sahip ince filmler üretilmiştir. Biriktirme işlemlerinde 200, 300 ve 400 W biriktirme güçleri kullanılarak numuneler hazırlanmış ve XRD analizleri yardımıyla en iyi kristallenmenin olduğu biriktirme gücü tespit edilmiştir.

Tek kat Ni ve Cr ince filmlerin karakterizasyon çalışmalarına XRD analizleri ile başlanmıştır. 200 ve 300 W güçlerinde sıçratma ile üretilen ince film Cr numunelerde, yapının kristal pikleri göstermemesi nedeni ile her iki ince film numunenin ortak olarak kristallenme gösterdikleri biriktirme gücü olan 400 W, biriktirme koşulu olarak seçilmiştir. Ni ve Cr ince filmlere ait XRD desenlerindeki fazlar, JCPDF veritabanı kullanılarak Ni ve Cr için sırasıyla 87-0712 ve 85-1336 numaralı kartlar ile değerlendirilmiştir (Şekil 8.9, Şekil 8.10).



Şekil 8.9 400 W biriktirme gücü ile üretilen Ni ince filmin XRD analizi.



Şekil 8.10 400 W biriktirme gücü ile üretilen Cr ince filmin XRD analizi.

Değerlendirme sonucu, Ni numune için (111), (200) ve (220) yönlenimlerinde Ni pikleri ve Cr numune için (110) yönleniminde Cr pikleri tespit edilmiştir.

Bunların yanı sıra, XRD analizlerinden Denklem 8.1 kullanılarak Cr ve Ni ince filmler için tane boyutları sırası ile 6 nm ve 4 nm olarak hesaplanmıştır.

#### 8.4.2 İki Katlı Ni-Cr İnce Filmlerin Biriktirilmesi

İki katlı Ni ve Cr tabakalar, cam altlık üzerine, iki basamakta ve toplam film kalınlığı 500 nm olacak şekilde biriktirilmiştir. Biriktirme işlem parametreleri ve sisteme ait diğer teknik detaylar, Çizelge 8.1’ de verilmektedir. İki katlı gerçekleştirilen tüm biriktirme işlemlerinde, Cr’ un Ni’e göre cama yapışması daha iyi olduğundan Cr, cam üzerine doğrudan biriktirilen ilk tabaka olarak seçilmiştir.

Çizelge 8.1 İki katlı Ni/Cr ince filmlerin biriktirme parametrelerini göstermektedir.

	<b>Biriktirme Basamağı 1</b>	<b>Biriktirme Basamağı 2</b>
<b>Altlık - katot arası mesafe</b>	200 mm	200 mm
<b>Besleme Tipi</b>	DC	DC
<b>Akım Değeri</b>	0.538 A	0.839 A
<b>Potansiyel Değeri</b>	740 V	479 V
<b>Biriktirme Gücü</b>	399 W	400 W
<b>Sıçratılan hedef</b>	Cr	Ni
<b>Başlangıç Vakumu</b>	$6 \times 10^{-5}$ Torr	$9 \times 10^{-3}$ Torr
<b>Sıçratma Ar<sup>+</sup> basıncı</b>	$9 \times 10^{-3}$ Torr	$9 \times 10^{-3}$ Torr
<b>Birikme Hızı</b>	6.5 Å/sn	24.4 Å/sn

Toplam film kalınlığı sabit ve 500 nm olmakla birlikte, numunelerin içerdikleri Cr oranının Ni-Cr ince film sisteminde ayarlanabilmesi için, biriktirme işlemlerinde oluşturulan tabakaların Cr/Ni kalınlık oranları birbirlerinden farklıdır. Bu şekilde üretilen beş farklı örneğin tabaka kalınlık değerleri Çizelge 8.2’ de gösterilmektedir.

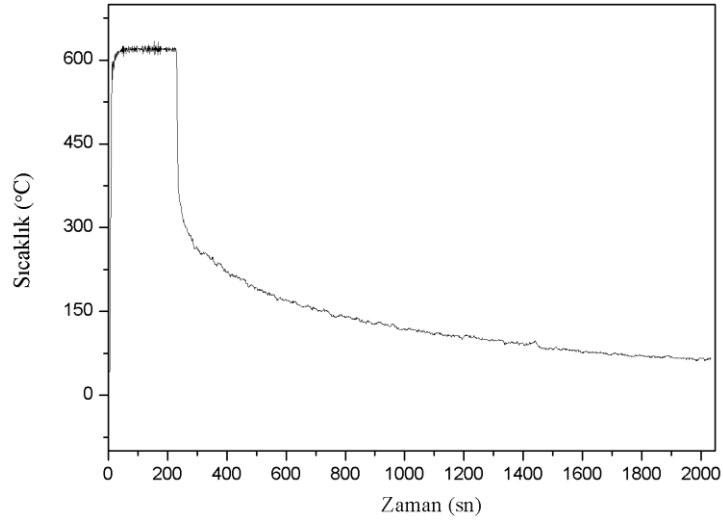
Çizelge 8.2 İki katlı tabakalar halinde üretilen ince filmlerde Cr ve Ni kalınlıkları.

Numune No	Ni Kalınlığı (nm)	Cr Kalınlığı (nm)	Cr/Ni kalınlık oranı
1	450	50	0.1
2	400	100	0.25
3	350	150	0.42
4	300	200	0.6
5	250	250	1

Manyetik alanda sıçratma yöntemi kullanılarak biriktirilen iki katlı Ni-Cr ince filmlere, RTP sistemi ile ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu sayede farklı Cr/Ni kalınlık oranlarına sahip ince filmlerin oluşturdukları fazların incelenmesi hedeflenmektedir.

Numunelere uygulanan ısıtma işlemlerinde fırın ortamı, 100 mbar' a kadar kaba pompa yardımıyla vakumlanmış ve daha sonra ortama iç basınç 500 mbar olana kadar yüksek saflıkta N<sub>2</sub> verilmiştir. Gaz basınçları dengelendikten sonra ısıtma işlemi başlanmış ve 180 sn boyunca numunelere 200, 300, 400, 500, 600 °C' lerde ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Isıtma işlem süresinin tamamlanmasının ardından numune sıcaklığı 100 °C altına düşene kadar ortama düşük debide N<sub>2</sub> verilerek numuneler soğutulmuştur.

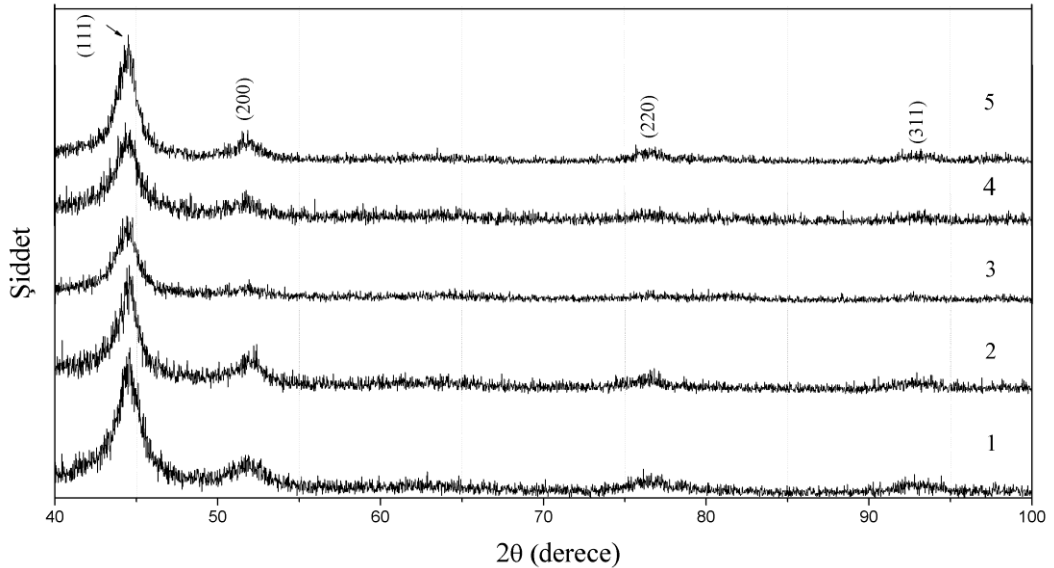
Isıtma işlem sonrasında her bir numunenin dört kontak testi ile dirençleri ölçülmüş ve direnç değişiminin gözlemlendiği 600 °C ısıtma işlem sıcaklığı olarak seçilerek sonraki deneylerin tamamı bu sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Numunelere gerçekleştirilen ısıtma işlem koşulları ve ısınma soğuma profilleri Şekil 8.11 ' de gösterilmektedir.



Şekil 8.11 İki katlı numunelere 600 °C’ de 180 saniye boyunca uygulanan ısıtma işlemi göstermektedir.

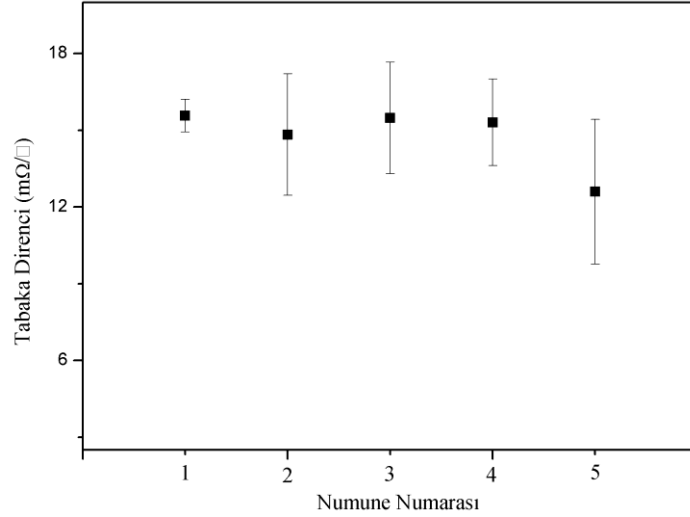
Isıl işlem sonrasında, farklı Cr/Ni kalınlık oranına sahip her bir numune, karakterize edilerek farklı kalınlık oranı ile elde edilen Ni, Cr bileşiminlerinin tespiti ve bu farklılığın numunelerin elektriksel ve yapısal özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Numunelere uygulanan XRD analizlerinden elde edilen XRD deseni, 87-0712 uyarınca incelenmiş ve tespit edilen Ni pikleri Şekil 8.12’ de gösterilmiştir. Analiz sonuçlarından farklı kalınlıklarda Ni ve Cr tabakaları içeren 5 farklı ince film numunenin aynı Ni piklerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 8.12 Çizelge 8.2’ de belirtilen beş farklı bileşimdeki 500 nm kalınlığa sahip numunelerin ısıtma işlemi öncesi XRD analizleri.

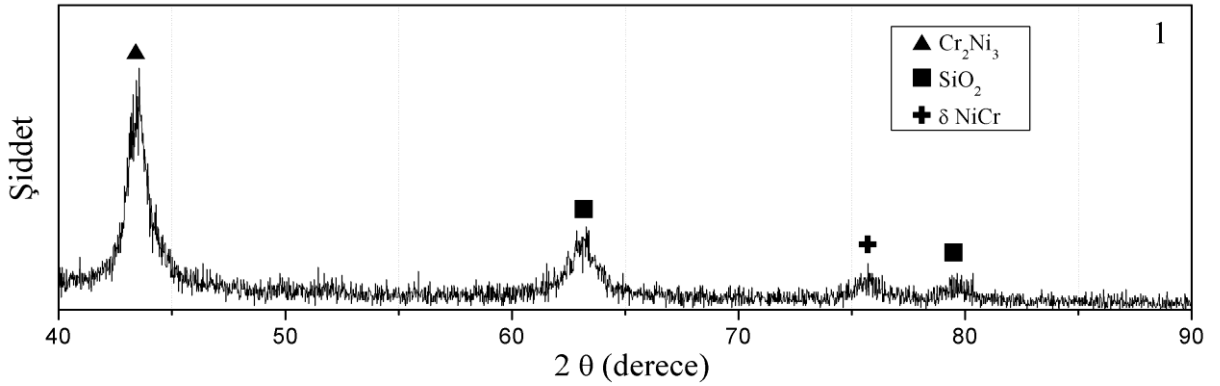
Isıl işlem öncesi, ayrıca, iki katlı olarak üretilen Ni-Cr ince filmlerin dört kontak testi kullanılarak tabaka dirençleri de ölçmüştü ve sonuçlar Şekil 8.13’ de gösterilmiştir.



Şekil 8.13 1-5 numaralı numunelerin ısı işlem öncesi tabaka dirençlerini göstermektedir.

Üst üste biriktirilen Cr ve Ni ince filmlerin elektriksel dirençleri birbirlerine yakın ve iletkenlikleri yüksek olması nedeniyle her beş numunenin de tabaka dirençleri birbirlerine yakındır.

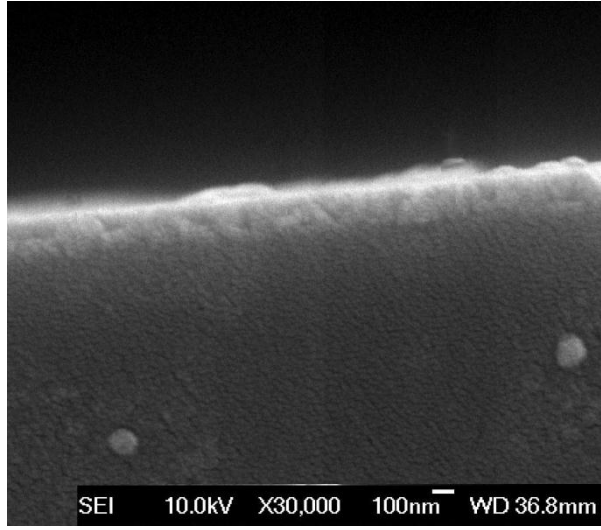
Cam üzerine, 50 nm Cr ve 450 nm Ni olacak şekilde biriktirilen (Cr/Ni kalınlık oranı 0.1) cam 500 nm kalınlığındaki 1 numaralı numuneye, RTP sistemi ile 600 °C 'de 180 sn boyunca ısı işlem uygulanmıştır. Isıl işlem sonucu elde edilen fazlar, XRD analizi ile incelenmiş ve oluşan fazlar Şekil 8.14' de gösterilmiştir.



Şekil 8.14. 1 numaralı numunenin RTP ile ısı işlem sonrası XRD analizini göstermektedir.

1 numaralı numunenin ısı işlem sonrası XRD analizleri JCPDS 65-6291, 26-0429 kartları uyarınca incelenmiş ve yapıda  $\text{Cr}_2\text{Ni}_3$  ve  $\delta$  (Ni-Cr) fazlarının bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca numunelerde ısı işlem sonrası cam altlıktan kaynaklanan  $\text{SiO}_2$  pikleri de tespit edilmiştir..

Isıl işlem sonrası  $\text{Cr}_2\text{Ni}_3$  ve  $\delta$  (Ni-Cr) fazları tespit edilen ince filmin kırık yüzey analizleri Şekil 8.15' de gösterilmektedir.

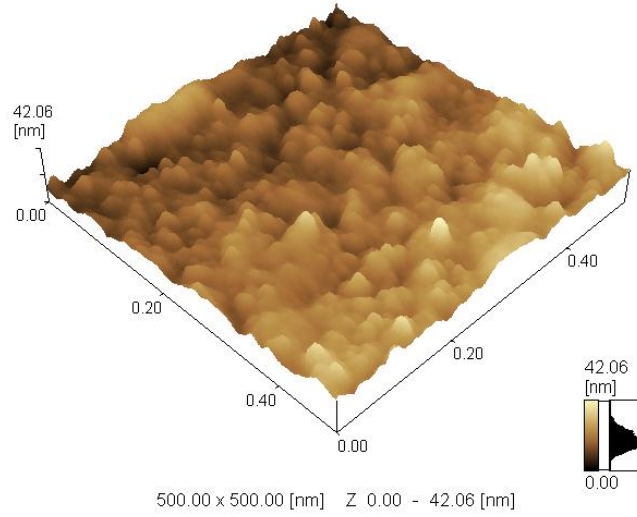


Şekil 8.15. 1 numaralı örneğe ait FESEM görüntüsü.

İkincil elektronlar kullanılarak 10 kV hızlandırma potansiyelinde alınan FESEM görüntüsünde filmin oldukça sıkı ve eş eksenli bir yapıya sahip olduğu ve ayrıca ısıl işlem sonrası filmin ortalama kalınlığının yaklaşık 167 nm' e düştüğü tespit edilmiştir.

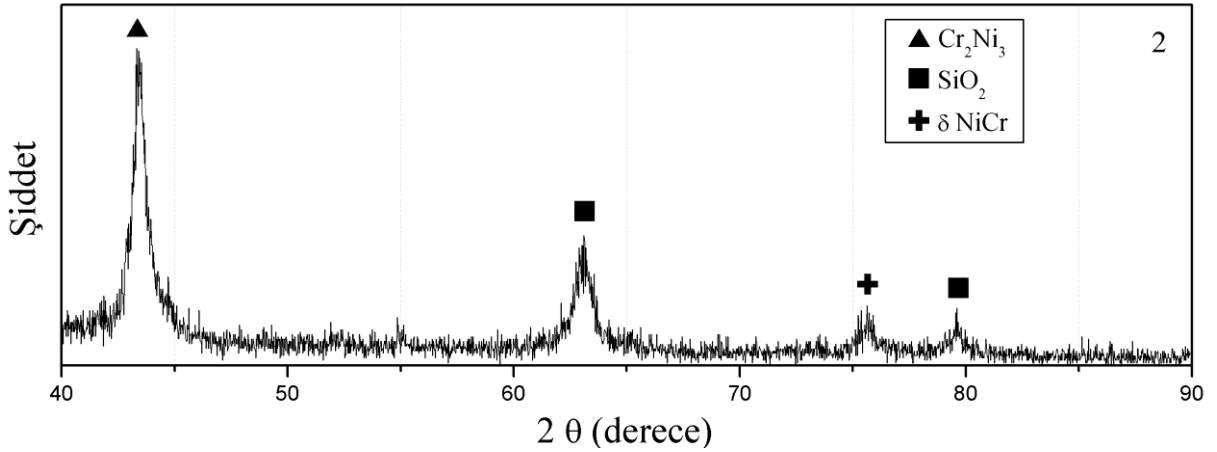
Bunun yanı sıra, numunenin içerdiği ağırlıkça % Ni ve Cr bileşimi ve film kalınlığı boyunca gözlenen %Ni-Cr değişimi Çizelge 8.4 ve Şekil 8.42' de gösterilmektedir.

Numunenin ayrıca, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve ısıl işlem sonrası yüzey özellikleri AFM analizi ile tespit edilmiştir ve numunenin yüzey görüntüsü Şekil 8.16' de gösterilmiştir. Numunenin AFM analizlerinden hesaplanan ortalama yüzey pürüzlülüğü 15 nm' dir. İnce filmin nanoindentasyon ile ölçülen sertliği de 5.3 GPa olarak bulunmuştur (Çizelge 8.4).



Şekil 8.16 1 numaralı örneğin ısı işlem sonrası AFM analizini göstermektedir.

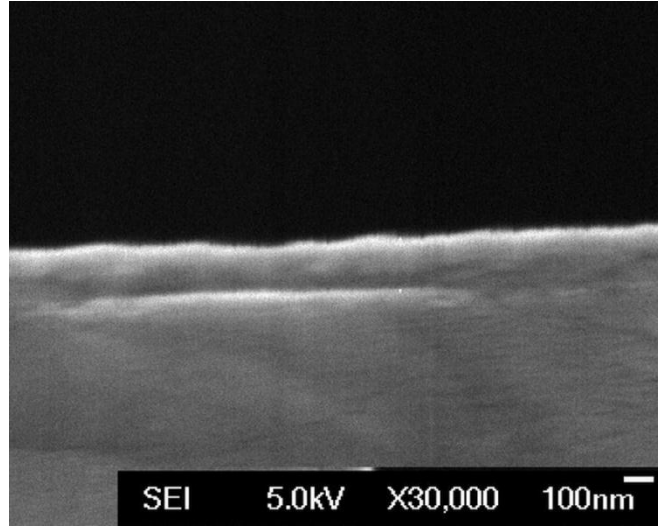
Cr/Ni kalınlık oranı 0.25 olan, 100 nm Cr, 400 nm Ni film kalınlıklarına sahip 2 numaralı numunenin ısı işlem sonrası XRD analizi Şekil 8.17’ de gösterilmiştir.



Şekil 8.17 2 numaralı numunenin XRD analizini göstermektedir.

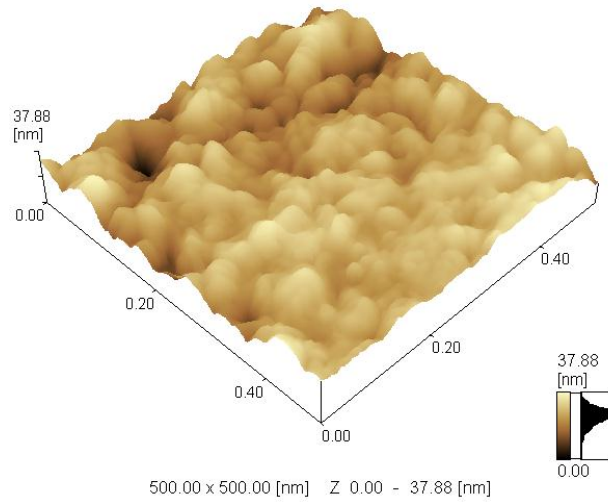
2 numaralı numuneye ait XRD analizleri JCPDS 65-6291, 26-0429 ‘ e göre değerlendirilmiş ve yapıda  $\text{Cr}_2\text{Ni}_3$  ve  $\delta$  (Ni-Cr) fazlarının bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 2 numaralı örneğin XRD analizleri kullanılarak tane büyüklüğü hesaplanmış ve Çizelge 8.4’ de gösterilmiştir.

2 numaralı numunenin FESEM kırık yüzey görüntüsü Şekil 8.18’ de gösterilmektedir. 5 kV hızlandırma potansiyeli ve ikincil elektronlarla yapılan analizde, film yapısının oldukça sıkı olduğu tespit edilmiş ve ısı işlem sonrası tabaka kalınlığı ortalama 184 nm olarak ölçülmüştür. 2 numaralı numunenin EDS analizi ile elde edilen film bileşimi Çizelge 8.4’ de ve film kalınlığı boyunca ağırlıkça % Ni-Cr değişimi Şekil 8.18’ de gösterilmektedir.



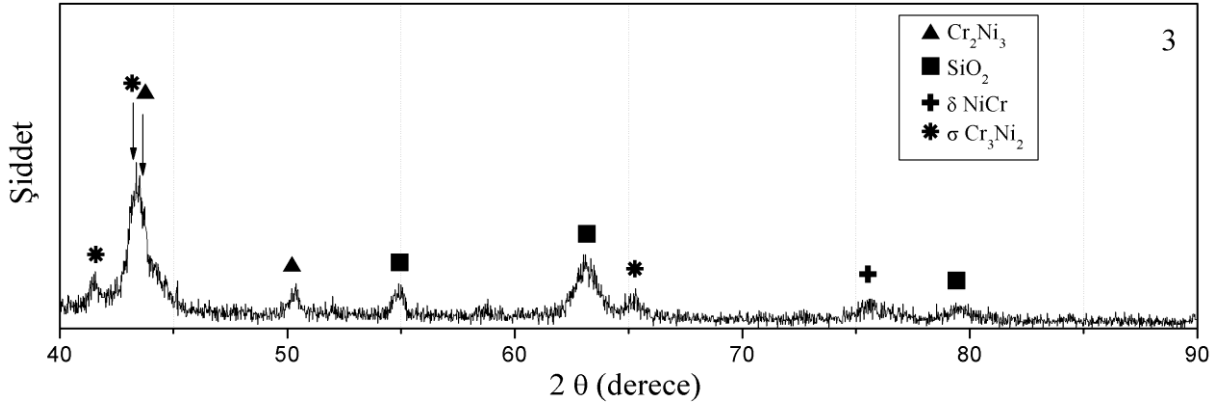
Şekil 8.18 2 numaralı örneğe ait FESEM görüntüsü.

2 numaralı numuneye ait AFM yüzey görüntüsü Şekil 8.19’ de gösterilmektedir. 2 numaralı numunenin AFM analizi ile tespit edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü 18 nm’ dir. Ayrıca 2 numaralı örneğin nano indentasyon ile ölçülen nano sertliği Çizelge 8.4’ de gösterilmektedir.



Şekil 8.19 2 numaralı örneğe ait AFM görüntüsü.

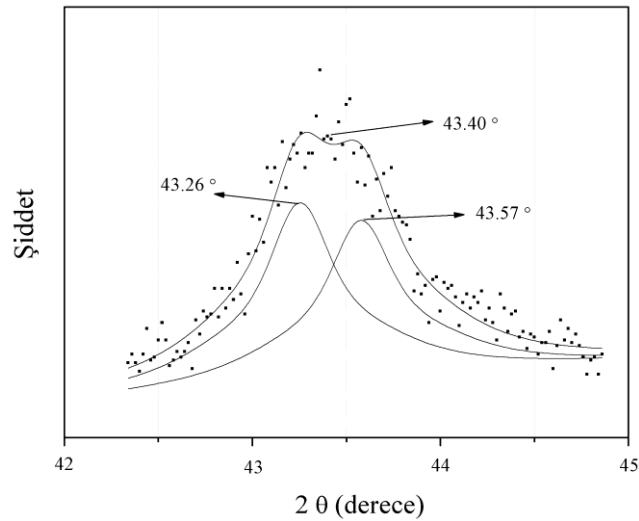
Cam altlık üzerine 150 nm Cr ve 350 nm Ni şeklinde biriktirilen 3 numaralı numunenin (Cr/Ni kalınlık oranı 0.42) ısıtma işlemi sonrası XRD analizi Şekil 8.20’ de gösterilmektedir.



Şekil 8.20 3 numaralı numunenin XRD analizini göstermektedir.

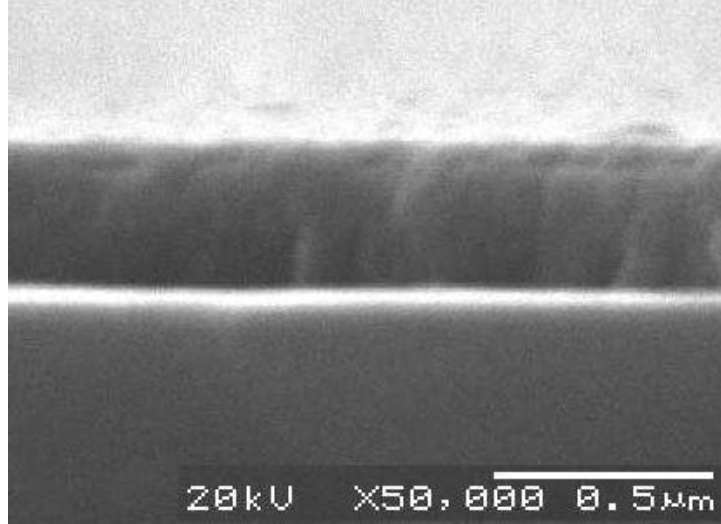
XRD analizleri JCPDS 65-6291, 26-0429 ve 65-6291' e göre değerlendirilmiş ve yapıda 1 ve 2 numaralı numunelerde gözlemlendiği gibi  $\text{Cr}_2\text{Ni}_3$  ve  $\delta$  (Ni-Cr) fazlarının yanı sıra,  $\sigma\text{-Cr}_3\text{Ni}_2$  fazının bulunduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca XRD deseninde,  $2\theta = 43.40^\circ$  deki pikin 2 ayrı pikin bileşimi olduğu da tespit edilmiştir.  $43.40^\circ$  'deki pikin tam yerini ve FWHM değerini hesaplamak amacıyla Denklem 8.4 uyarınca pikler ayrıştırılmıştır. Sonuç olarak  $2\theta = 43.40^\circ$  deki pikin  $2\theta = 43.26^\circ$  ve  $2\theta = 43.57^\circ$  'lerdeki piklerin bileşimi olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca XRD analizleri hesaplanan ortalama tane boyutu Çizelge 8.4 ' de gösterilmektedir.



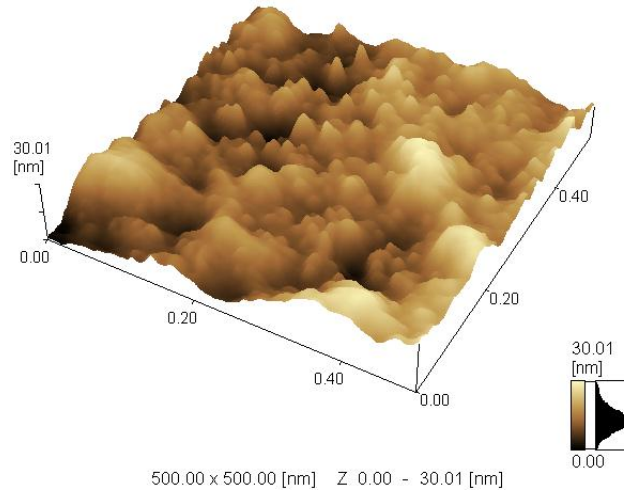
Şekil 8.21 3 numaralı örneğin  $2\theta = 43.40^\circ$  deki kırınım pikinin ayrıştırılmış halini göstermektedir.

3 numaralı numuneye ait SEM analizi Şekil 8.22' de gösterilmektedir. 3 numaralı numunenin ısıtma işlemi sonrası içerdiği ağırlıkça %Cr ve %Ni miktarları Çizelge 8.4' de ve bu değerlerin film boyunca kalınlığa bağlı değişimleri Şekil 8.22' de gösterilmektedir.



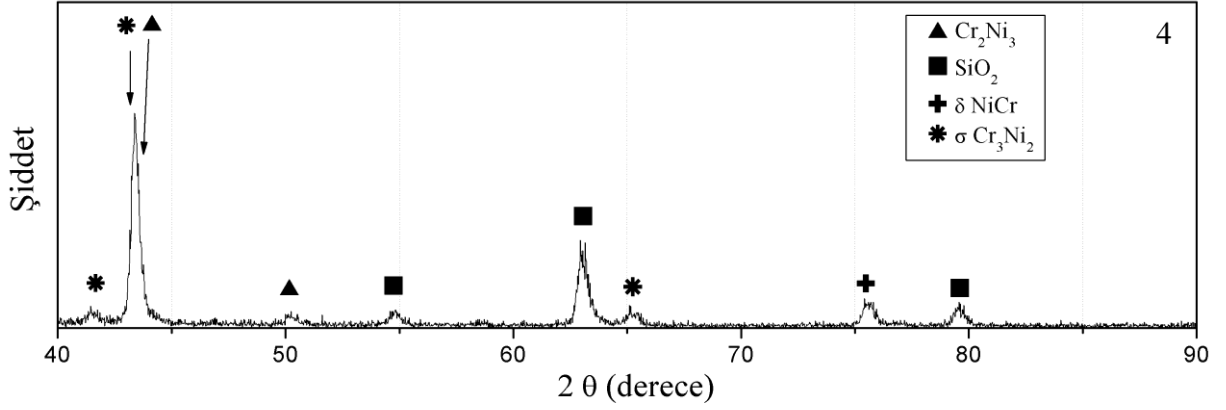
Şekil 8.22 3 numaralı örneğe ait FESEM görüntüsü.

3 numaralı örneğe ait AFM görüntüsü Şekil 8.23’de gösterilmektedir. Ölçümlerde numunenin ortalama yüzey pürüzlülüğü 14 nm olarak tespit edilmiştir. Ayrıca numunenin nano indentasyon tekniği ile hesaplanan nano sertliği Çizelge 8.4’de gösterilmektedir.

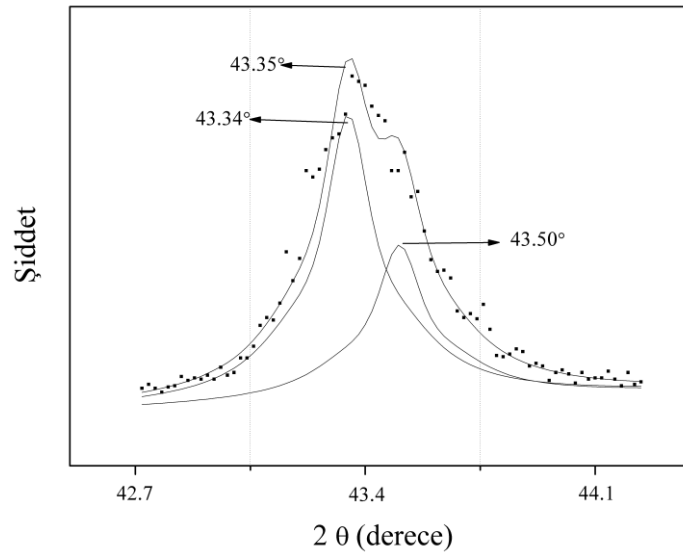


Şekil 8.23 3 numaralı örneğe ait AFM analizi.

200 nm Cr ve 300 nm Ni tabaka kalınlıklarına (Cr/Ni tabaka kalınlık oranı 0.6) sahip 4 numaralı numuneye ait XRD analizi Şekil 8.24’de gösterilmektedir. JCPDS 65-6291, 26-0429 ve 65-6291’ e göre yapılan analizlerde yapıda  $\text{Cr}_2\text{Ni}_3$ ,  $\delta$  (Ni-Cr),  $\sigma$ - $\text{Cr}_3\text{Ni}_2$  fazlarının bulunduğu ve  $\sigma$ - $\text{Cr}_3\text{Ni}_2$  fazının yapıda ağırlıklı faz olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca  $2\theta = 43.43^\circ$  ‘deki pik, 3 numaralı örnekte kullanılan parametreler ve yöntem kullanılarak ayrıştırılmıştır. Ayrıştırma sonucu  $2\theta = 43.43^\circ$  ve  $43.65^\circ$  ‘lerde iki faz olduğu görülmüştür. XRD analizi ve piklerin ayrıştırılması ile ilgili veriler Şekil 8.24 ve Şekil 8.25’de gösterilmektedir.

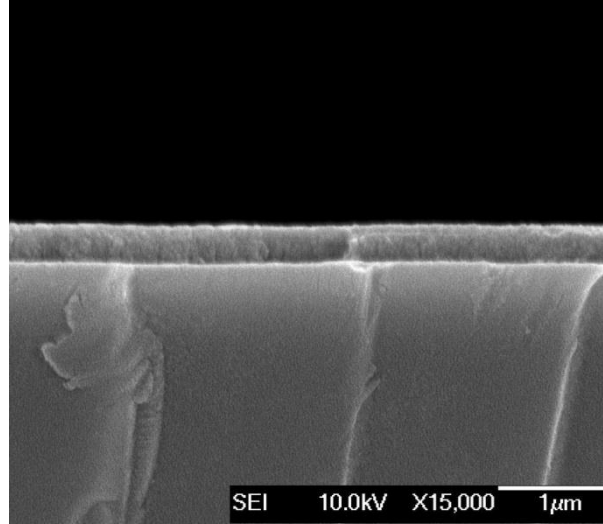


Şekil 8.24 4 numaralı numunenin XRD analizini göstermektedir.



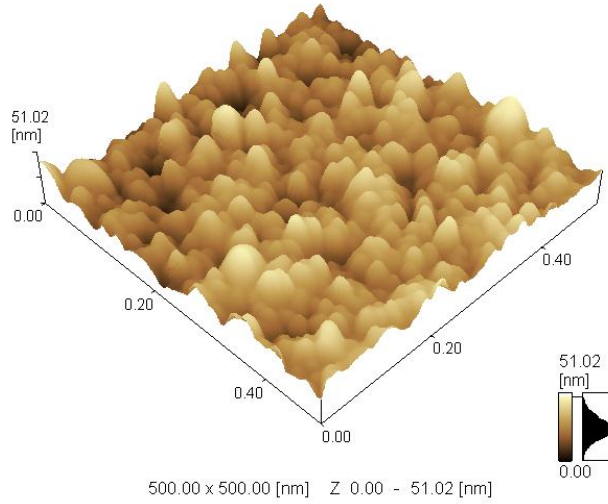
Şekil 8.25 4 numaralı örneğin  $2\theta = 43.40^\circ$  deki kırınım pikinin ayrıştırılmış halini göstermektedir.

4 Numaralı numuneye ait FESEM analizi Şekil 8.26' da gösterilmektedir. Analiz 10 kV hızlandırma potansiyeli altında ikincil elektronlar kullanılarak yapılmıştır. Görüntüde filmin kolonsal büyüme gösterdiği ve film kalınlığının yaklaşık 336 nm olduğu tespit edilmiştir. Film kalınlığı boyunca gerçekleştirilen EDS analizi Şekil 8.43' de, filmin içerdiği ağırlıkça % Ni-Cr bileşimi Çizelge 8.4' de gösterilmektedir.



Şekil 8.26 4 numaralı örneğe ait FESEM görüntüsü

4 numaralı filmin yüzey özellikleri ve ortalama yüzey pürüzlülüğü AFM analizleri ile tespit edilmiştir. Analizlerde elde edilen yüzey görüntüsü Şekil 8.27’ de gösterilmiştir. Ayrıca filmin AFM ile tespit edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü 22 nm’dir. Filmin nano indentasyon yöntemi ile tespit edilen nano sertliği Çizelge 8.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 8.27 4 numaralı örneğe ait AFM analizini göstermektedir.

Çalışmamızda 5. Numaralı örnek olarak tanımlanan, 250 nm Cr ve 250 nm Ni içeren (Cr/Ni kalınlık oranı 1) ince filmlerin biriktirme işlemi sonrası yüzeye tutunmalarının iyi olduğu gözlenmiştir. Ancak 600 °C’ de 180 sn süresince koruyucu N<sub>2</sub> atmosferinde yapılan ısıl işlemin ardından, ince filmin yüzeyden döküldüğü ve kalan kısımlarda çatlakların olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle 5 numaralı numuneye diğer 4 numuneye uygulanan analizler uygulanmamıştır.

### 8.4.3 Nichrome Alaşım hedeften İnce Filmlerin Biriktirilmesi ve Karakterizasyonu

Deneysel çalışmamızdaki gerinim ölçerlerin üretimine, cam ve PMMA altlıklar üzerinde 500 nm kalınlığa sahip NiCr ince filmlerin Nichrome alaşım kullanılarak biriktirilmesi ile başlanmıştır.

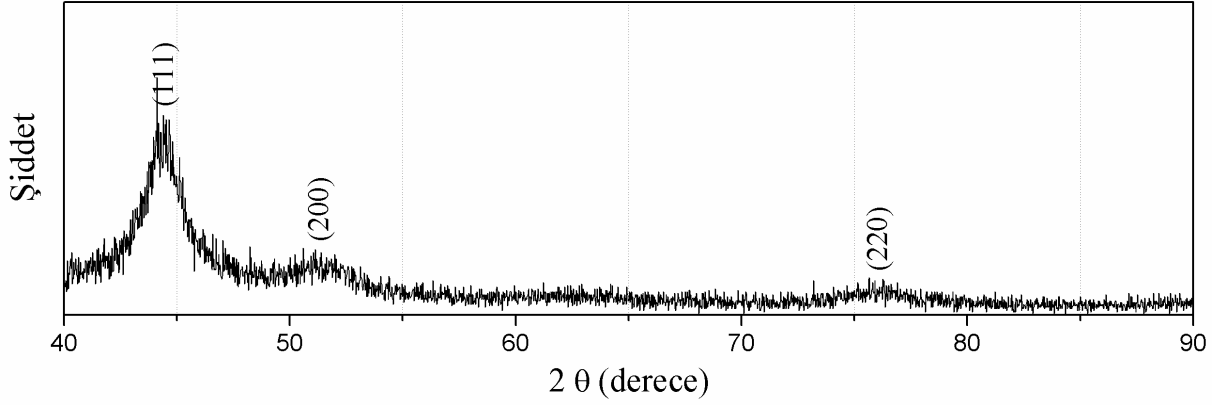
Biriktirme işleminde uygulanan işlem parametreleri cam ve PMMA için aynı olmasına karşın, biriktirme işlemi PMMA altlıklara fotokimyasal ile şekillendirme işleminin sonrasında, cam altlıklara ise şekillendirme işleminin öncesinde uygulanmıştır.

Biriktirme işlemi öncesi cam altlık yüzeyleri aseton ve etanol karışımı yıkanmış ve kurutulmuştur. PMMA altlıklara ise, yüzeylerinde daha önceden şekillendirilmiş fotokimyasal bulunduğundan herhangi bir işlem yapılmamıştır. Cam ve PMMA altlıklara uygulanan biriktirme işlemleri ile ilgili parametreler Çizelge 8.3' de gösterilmektedir.

Çizelge 8.3 Nichrome hedeften sıçratılarak biriktirilen ince filmlerin biriktirme parametrelerini göstermektedir.

	<b>Nichrome Biriktirme</b>
<b>Altlık Katot arası mesafe</b>	185 mm
<b>Güç Tipi</b>	DC
<b>Akım Değeri</b>	0.778 A
<b>Potansiyel Değeri</b>	512 V
<b>Biriktirme Gücü</b>	400 W
<b>Sıçratılan hedef</b>	Nichrome
<b>Başlangıç Vakumu</b>	$6 \times 10^{-5}$ Torr
<b>Sıçratma Ar<sup>+</sup> basıncı</b>	$9 \times 10^{-3}$ Torr
<b>Birikme Oranı</b>	8 Å/sn

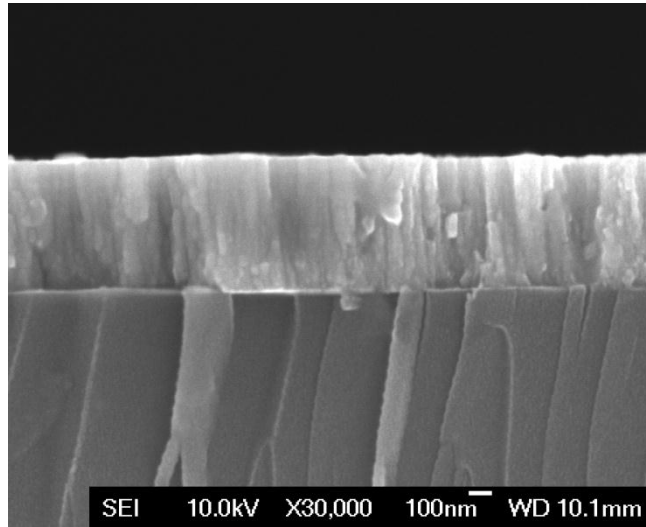
Nichrome ince filmlerin değerlendirilmesine, cam üzerine 500 nm kalınlığa sahip olarak üretilen ince filmlerin XRD analizleri ile oluşan fazların incelenmesi ile başlanmıştır. Şekil 8.28 cam altlık üzerinde üretilen Nichrome ince filmlerin XRD analizlerini göstermektedir.



Şekil 8.28 Cam üzerine biriktirilen Nichrome ince filmin XRD analizini göstermektedir.

XRD analizleri 87-0712 uyarınca incelenmiş ve yapıda (111), (200) ve (220) yönlenimine sahip piklerin bulunduğu tespit edilmiştir.

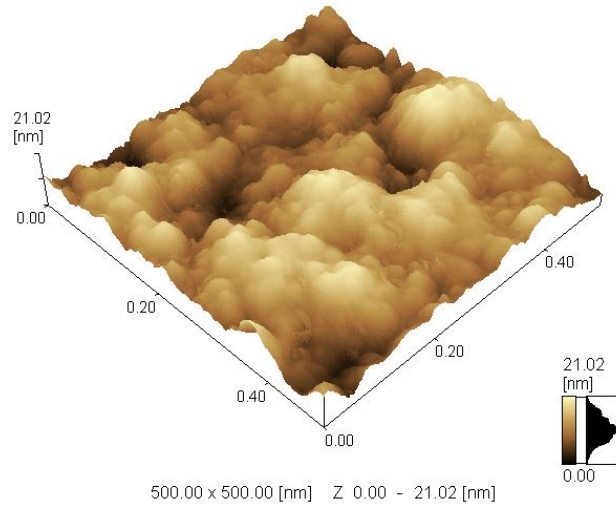
Cam üzerindeki ince filmin büyüme profili ve film yapısı 10 kV hızlandırma potansiyelinde ikincil elektronlar kullanılan FESEM görüntüleri ile elde edilmiştir. Cam numuneye ait FESEM analizleri Şekil 8.29' de gösterilmektedir.



Şekil 8.29 Cam üzerine biriktirilen 500 nm kalınlığında Nichrome filmin kırık yüzey görüntüsünü göstermektedir.

FESEM analizlerinde film yapısının son derece sıkı, kolonsal ve yönlenmiş bir büyüme gösterdiği görülmektedir. Ayrıca EDS analizleri ile yapı içerisindeki Cr/Ni oranı 0.23 olarak tespit edilmiştir.

Nichrome ince filmlerin cam altlık üzerindeki yüzey özellikleri ve ortalama yüzey pürüzlülükleri AFM analizleri ile tespit edilmiştir. Analizler sonucunda cam altlık üzerindeki Nichrome ince filmlerin ortalama yüzey pürüzlülüklerinin 10 nm olarak tespit edilmiştir. AFM analiz görüntüleri Şekil 8.30’de gösterilmektedir. AFM analizlerinde ince filmin sıkı bir yapıya sahip olduğu ve belirli bölgelerde oldukça büyük topaklanmalar gösterdiği tespit edilmiştir. Cam üzerinde üretilen Nichrome ince filmlerin tabaka dirençleri ise,  $16 \text{ m}\Omega/\square$  olarak ölçülmüştür.

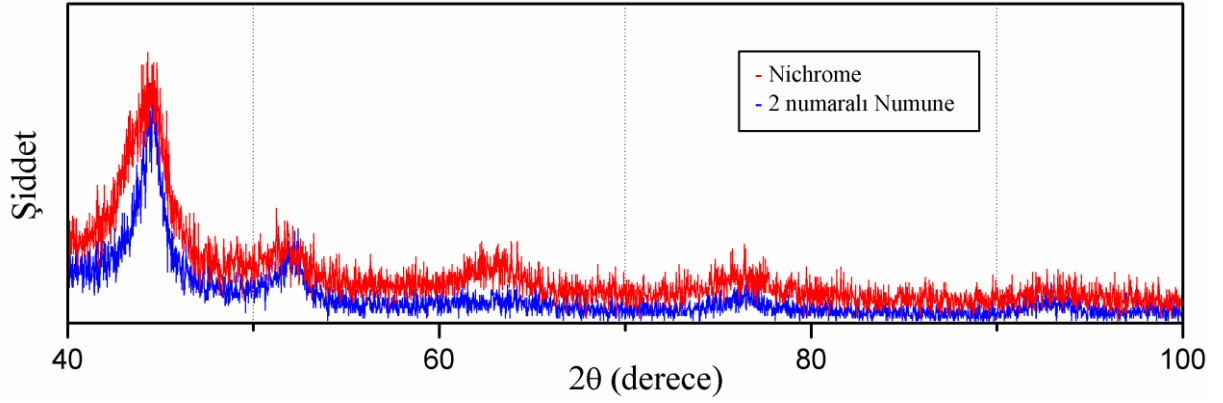


Şekil 8.30 Cam altlık üzerine biriktirilen Nichrome ince filmin yüzey görüntüsünü göstermektedir.

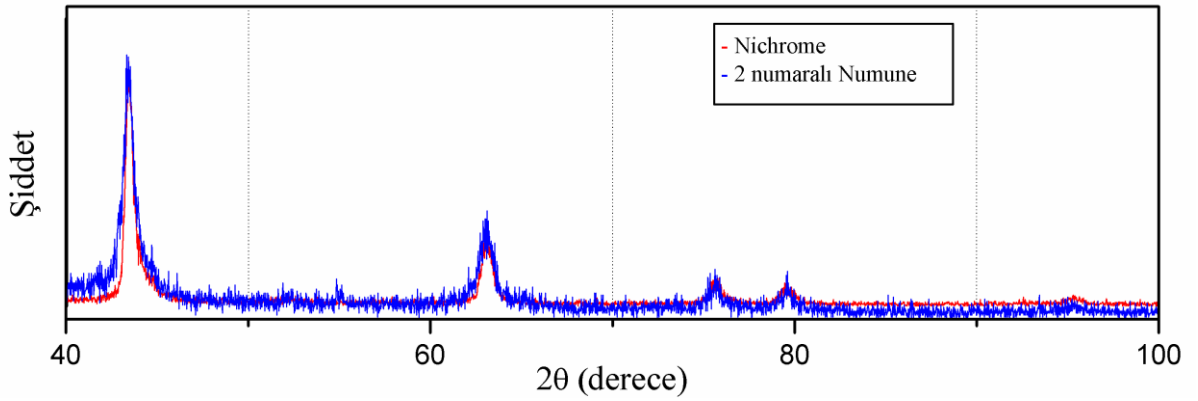
Ayrıca, biriktirilen nichrome filmler içerisindeki ağırlıkça % Ni ve Cr bileşimleri, EDS analizi ile tespit edilmiştir. Analizler sonucu film içerisindeki ağırlıkça % Cr/Ni oranı 0.21 olarak hesaplanmıştır.

Çalışmamızda ince film gerinim ölçerlerin üretim yönteminin, iki tabakalı Cr ve Ni içeren ince filmlere RTP sistemi ile ısıl işlem olması ön görülmüştür. Ancak deneysel çalışmalarda, ince filmlere altlık olarak seçilen PMMA ve cam malzemelerin, PMMA’ nın ergime noktasının çok düşük olması ve camın da ısıl işlem sonucu gevrekleştiğinin tespit edilmesi nedeni ile aynı bileşimde alaşım hedef kullanımı yoluna gidilmiştir.

Nichrome hedefin içerdiği Cr/Ni oranına (ağırlıkça Cr/Ni oranı 0.3) en yakın bileşime sahip numunenin 100 nm Cr ve 400 nm Ni tabakaları içeren 2 numaralı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle her iki numunenin 600 C’ deki fazları karşılaştırılmış ve Şekil 8.31-32’ ısıl işlem öncesi ve sonrasındaki ince filmlerdeki fazların durumu incelenmiştir.

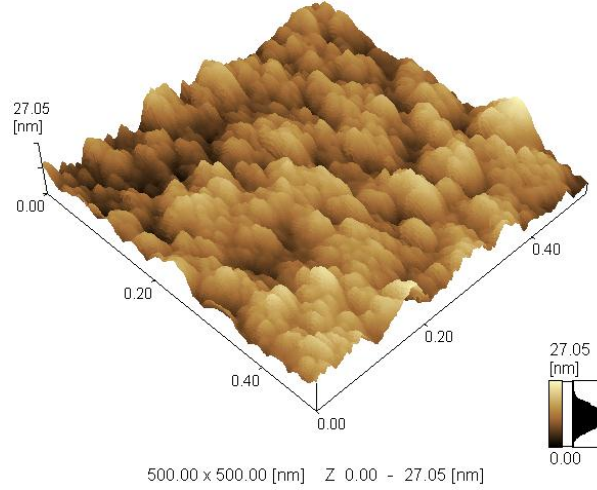


Şekil 8.31 Isıl işlem öncesi 100 nm Cr ve 400 nm Ni içeren iki tabakalı Ni-Cr ince film ile alaşım Nichrome hedeften sıçratılan 500 nm ince filmin XRD analizlerini göstermektedir.



Şekil 8.32 Nichrome hedeften biriktirilen ve 600 °C'de 180 sn RTP ile ısıl işlem gören numune ile 2 numaralı numunenin XRD analizlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

Cam altlıklar üzerine biriktirilen Nichrome ince filmler ile aynı biriktirme parametreleri kullanılarak biriktirilen PMMA altlık üzerindeki Nichrome ince filmlerin yüzey özellikleri AFM analizleri (Şekil 8.33) ile tespit edilmiştir. Yapılan AFM analizinde, PMMA üzerine biriktirilen Nichrome ince filmlerin ortalama yüzey pürüzlülüklerinin 12 nm olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca PMMA üzerindeki ince filmin daha küçük taneli olduğu ve cam üzerinde olduğu gibi büyük topaklanmalar oluşturmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 8.33 PMMA üzerine biriktirilen Nichrome ince filmin AFM görüntüsünü göstermektedir.

Daha sonra PMMA altlık üzerindeki ince filmlerin dört kontak testi kullanılarak tabaka dirençlerinin  $18 \text{ m}\Omega/\square$  olduğu tespit edilmiştir.

### 8.5 İnce Filmlerin Şekillendirilmesi

Üretilen ince filmlerin gerinim ölçer olacak desende şekillendirilmesinde litografi ve ıslak aşındırma yöntemleri kullanılmıştır. Ancak litografi işleminin yapıldığı üretim basamağı, uygulanış şekli ve ıslak aşındırma kimyasalları, kullanılan altlığın yapısına göre farklılık gösterebilmektedir.

Uygulanan litografi işlemlerinde sıraları farklı olabilmekle birlikte temelde 3 ana basamak izlenmiştir. Bu basamaklar;

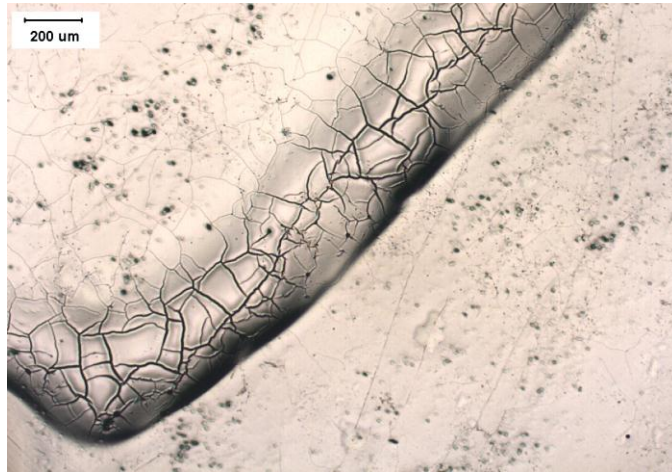
1. Fotokimyasalın uygulanması.
2. Fotokimyasalın şekillendirilmesi.
3. İnce filmin seçici olarak aşındırılması.

Şeklinde özetlenebilmektedir.

#### 8.5.1 Litografi

Çalışmalarımızda CRC Industries, Kontakt chemie tarafından üretilen 360 – 140 nm arasındaki dalga boylarına duyarlı pozitif tipteki fotokimyasal kullanılmıştır. Fotokimyasal cam altlıkların kullanıldığı çalışmalarda biriktirilen ince film üzerine, PMMA altlıkların kullanıldığı çalışmalarda ise doğrudan PMMA üzerine uygulanmıştır. Fotokimyasalın yüzeye uygulanması işleminde, uygulama süresine bağlı olarak yüzeyde oluşan ortalama film kalınlığı, 6 – 8  $\mu\text{m}$  kadardır. Fotokimyasalın çok kalın ya da çok ince olmasının, istenilen

desenin oluşmaması, pozlamanın öngörülen sürede gerçekleştirilememesi ve ıslak aşındırmada ince filmin tümüyle yüzeyden kalkması gibi problemlere neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca fotokimyasallar, gerek uygulama şekilleri, gerekse polimer yapıları gereği toz gibi kalıntı ve kirlere karşı aşırı duyarlıdır. Dolayısıyla fotokimyasal uygulanması ve uygulandıktan sonra pozlama işlemine tabi tutulana kadar, her türlü tozdan arınmış ortamlarda bulunmaları gereklidir. Aksi durumlarda oluşan kirlilikler, aşındırma sırasında işlem başarısını son derece olumsuz etkiler. Yaptığımız çalışmalarda karşılaşılan problemleri bir numunede biriktirme sonrası oluşan metal ince filmin, fotokimyasal üzerinde çatlaması ve diğer yüzey kusurları Şekil 8.34’ de görülmektedir.



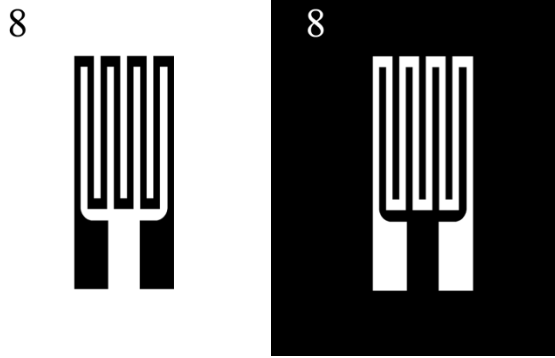
Şekil 8.34 Fotokimyasal kalınlığının homojen olmaması durumunda ince filmlerde oluşan çatlakları göstermektedir.

Fotokimyasalın altlık yüzeylerine uygulanması, oda sıcaklığında ve kimyasalın yapısının bozulmaması için kısmen karanlık ortamda gerçekleştirilmiştir. Fotokimyasal, altlık ve ince film yüzeylerine uygulandıktan sonra ortalama 2 saat 25 – 30 °C sıcaklıkta etüv içerisinde yavaş olarak kurutulmuş ve polimer yapının tam olarak sertleşebilmesi için 2 saat kadar kapalı bir ortamda dinlendirilmiştir.

Kurutma ve dinlendirme işlemleri ardından gerinim ölçer deseni, fotokimyasal üzerine pozlama işlemi ile aktarılmıştır. Deneysel çalışmalarımızda kullanılan pozlama işlemi, 200 mm mesafeden cıva buharlı lamba kullanılarak 14 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir.

Pozlama işleminde kullanılan ve üzerinde gerinim ölçer deseni taşıyan maskeler, saydam ince film asetatlar üzerine yüksek kalitede baskı yapılarak üretilmiştir. Maskelerin deseni, ASTM E251-92 (2003) standardında tarif edilen gerinim ölçer deseni örnek alınarak hazırlanmıştır. Maskelerin tasarlanması sırasında üretilecek gerinim ölçerlerin cam üzerinde kapladıkları toplam alanın, kontak terminalleri hariç karakterizasyonda kullanılan ticari gerinim ölçer ile

aynı olmasına dikkat edilmiştir. Pozlama işlemlerinde kullanılan pozitif ve negatif maskeler, Şekil 8.35 ' da gösterilmiştir.



Şekil 8.35 İnce filmleri şekillendirmede kullanılan pozitif ve negatif maskeleri göstermektedir.

Gerekli süre boyunca uygulanan pozlama işlemi ardından altlıklar, yine karanlık bir ortamda 7gr/lt bileşimde hazırlanmış 18 °C' deki NaOH çözeltisi ile 20 saniye boyunca banyo edilmiştir. Bu sayede desende ışık ile reaksiyona giren ve yapısı bozulan fotokimyasal NaOH ile reaksiyona girerek altlık yüzeyinde ayrılması sağlanmıştır. Daha sonra numuneler, yaklaşık 60 saniye boyunca saf su ile yıkanmış ve yaklaşık 60 dakika boyunca 25 °C' deki etüv de kurutulmuştur.

### 8.5.2 Islak Aşındırma

Yüzeylerin aşındırma öncesi fotokimyasalla kaplanması ve fotokimyasalın fotolitografik olarak şekillendirilmesi işlemlerinin tümü, ıslak aşındırma işlemi yardımıyla ince filmlerin seçici olarak şekillendirilmesine ön hazırlık olarak gerçekleştirilmiştir. İnce filmlerin aşındırılmasında ağırlıklı olarak asitler kullanılır ve dolayısı ile şekillendirme işleminde belirli bölgelerde filmin korunabilmesi için kullanılan fotokimyasalın, söz konusu asitlere karşı dayanıklı olması gereklidir. Deneysel çalışmalarımızda kullanılan fotokimyasal, ferrik klorür, amonyum persülfat, kromik asit, hidroflorik asit ve hidroklorik asit banyolarına karşı dayanıklıdır.

Kullanılan altlıklara bağlı olarak Nichrome ince filmlerin şekillendirme işlemleri, aşındırıcı kimyasallar bakımından birbirlerinden oldukça farklıdır. Deneysel çalışmalarımızda cam üzerinde oluşturulan Nichrome ince filmlerin aşındırılmasında, 22 °C' de % 37' lik konsantre HCl çözeltisi kullanılmıştır. Aşındırma işlemi, banyo çözeltisi ardından saf su ile yıkanan ve kurutulan numunelerin, yaklaşık 10 saniye boyunca HCl içerisine daldırılması ve ardından süratle saf su durulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Litografi ve ıslak aşındırma işlemleri

ardından oluşan gerinim ölçer desenin ışık mikroskobu ile alınan yüzey görüntü Şekil 8.36' da gösterilmiştir.



Şekil 8.36 Şekillendirme işlemi ardından alınan yüzey görüntü ve oluşturulan ince film hatların kalınlıklarını göstermektedir.

### 8.5.3 Nichrome İnce Filmlerin Gerinim Ölçer olarak Şekillendirilmesi

Nichrome ince filmlerin biriktirilmesinde cam ve PMMA olmak üzere iki farklı tipte altlık kullanılmış olduğundan, uygulanan şekillendirme işlemleri her iki altlık için birbirlerinden farklıdır. Bu farklılığın en önemli nedeni, NiCr ince filmi şekillendirmekte kullanılan HCl çözeltisi ve fotokimyasalın yüzeyden temizlenmesinde kullanılan konsantre aseton ile PMMA arasında reaksiyon oluşmasıdır.

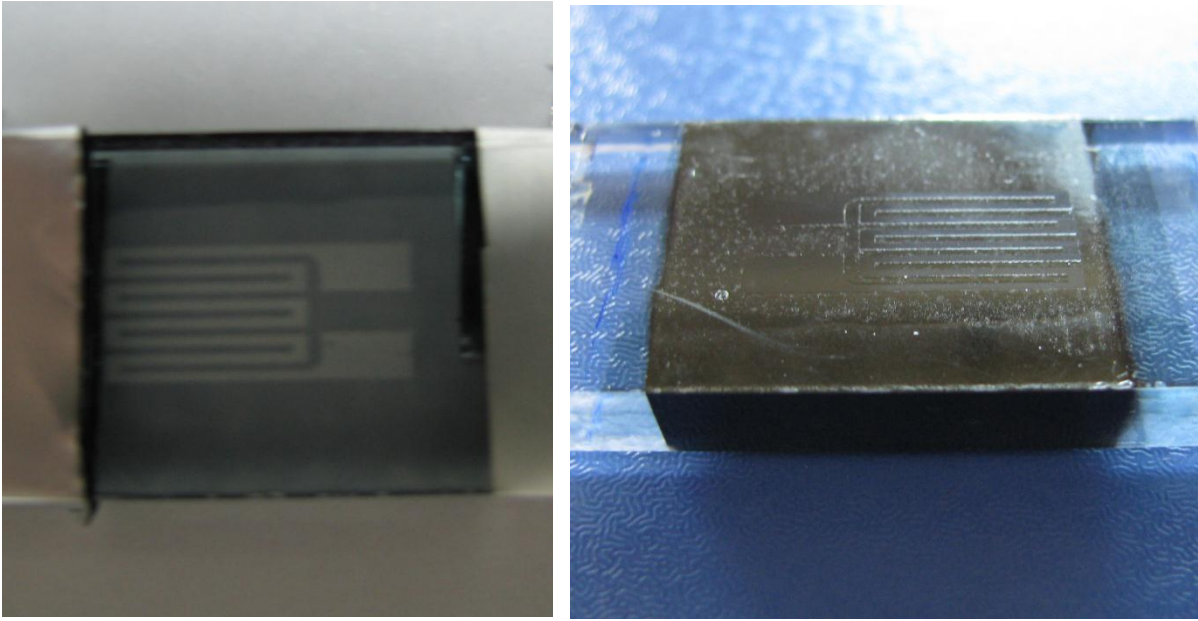
PMMA üzerinde HCl kullanılarak yapılan şekillendirme işleminde PMMA' nın yüzeyinde matlaşma, şekillendirilen filmin elektriksel direncinde ise kararsızlık ve bazı durumlarda ise direnç okuması yapılamaması gibi sonuçlarla karşılaşmıştır. Benzer şekilde asetonun fotokimyasal temizlemekte kullanıldığı durumda ise PMMA için iyi bir çözücü olan asetonun istenilenin aksine yalnızca fotokimyasal ve üzerindeki film değil, şekillendirilmiş ince filmi de tahrip ettiği veya yüzeyden tamamen kaldırdığı gözlenmiştir.

Cam altlık üzerindeki ince filmlere uygulanan şekillendirme işleminde, önceden yüzeylerinde Nichrome ince film biriktirilmiş altlıklara litografik şekillendirme uygulanmıştır. Pozitif maske kullanılarak yapılan şekillendirme işlemi ardından Nichrome ince film yüzeyinde gerinim ölçer desenine sahip ikinci bir film oluşturulmuştur.

Cam altlık üzerindeki nichrome ince filmlerin aşındırılmasında, 22 °C' de % 37' lik konsantre HCl çözeltisi kullanılmıştır. Aşındırma işlemi, banyo çözeltisinden çıkarılan ve saf su ile durulanan numunelerin, numunelerin yaklaşık 10 saniye boyunca HCl içerisine daldırılması ve ardından süratle saf su tekrar durulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Aşındırma işlemi ile cam altlıklar üzerinde maskede hazırlanmış desen elde edilmiş olur. Daha sonra numuneler, fotokimyasalın yüzeyden temizlenebilmesi için konsantre aseton ile yıkanmış ve saf su ile durulanmıştır.

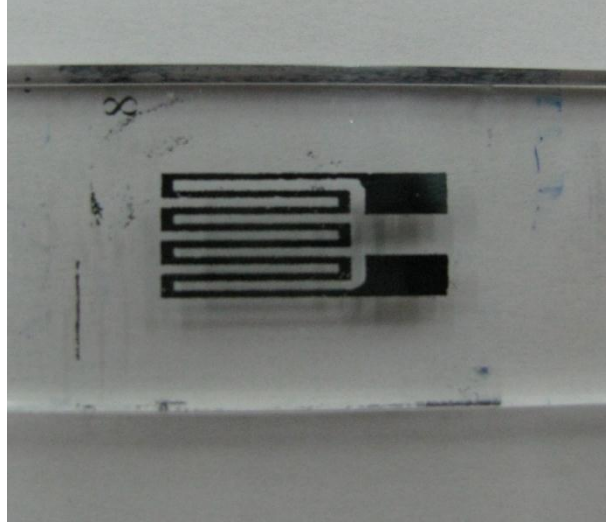
PMMA altlık üzerindeki ince filmlere ise, şekillendirme işlemi manyetik alanda sıçratma yöntemi ile nichrome ince filmlerin biriktirilmesinden önce gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ıslak aşındırmada artık metal kaldırılmasında HCl kullanımının önüne geçilmiştir. Şekil 37 biriktirme işlemi öncesi ve sonrası PMMA yüzeyinde nichrome ince filmin ve şekillendirilme aşamalarını göstermektedir.



Şekil 8.37 Biriktirme öncesi ve sonrasında yüzeyinde şekillendirilmiş fotokimyasal bulunduran PMMA numuneyi göstermektedir.

PMMA üzerinde desen elde edilmesi işlemine, doğrudan PMMA yüzeyine uygulanan fotokimyasalın negatif maske ile pozlanması ve banyo edilmesi ile başlanmıştır. Daha sonra yüzeye Nichrome biriktirilerek, yüzeyde kendiliğinden şekillendirilmiş ince film üretilmiştir.

Biriktirme işleminin ardından yüzeydeki artık fotokimyasal ve üzerindeki metal film, Isopropanol ve aseton karışımı ile 10 sn yıkanarak temizlenmiştir.



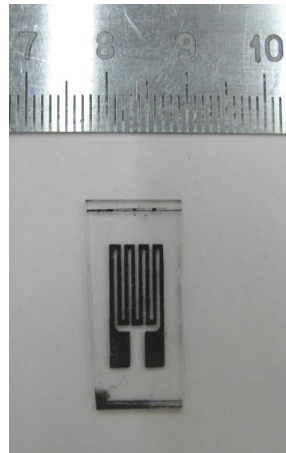
Şekil 8.38 PMMA üzerinde şekillendirilmiş NiCr ince filmi göstermektedir.

### 8.6 Gerinim Ölçerlerin Değerlendirilmesi

Cam ve PMMA altlık üzerinde şekillendirilen gerinim ölçerler, gerinim ölçer olarak karakterize edilmiş ve değerlendirilmiştir.

#### 8.6.1 Cam Altlık Üzerindeki Gerinim Ölçerlerin Değerlendirilmesi

Şekillendirme işlemi sonrası elde edilen gerinim ölçerler (Şekil 8.39), 10mm boyunda 8 adet algılama koluna sahiptir. Her kol ortalama 460µm genişlikte ve 500 nm kalınlıktadır. Üretim sonrası, gerinim ölçerlerin kontak noktalarına 60/40 Sn/Pb lehim alaşımı kullanılarak düşük dirençli ince iletken teller lehimlenmiştir. Kararlı elektriksel kontak oluşturulduktan sonra tekrarlı yapılan ölçümler sonunda, cam üzerinde üretilen gerinim ölçerlerin ortalama elektriksel dirençlerinin 9 – 14 kΩ arasında olduğu ölçülmüştür.



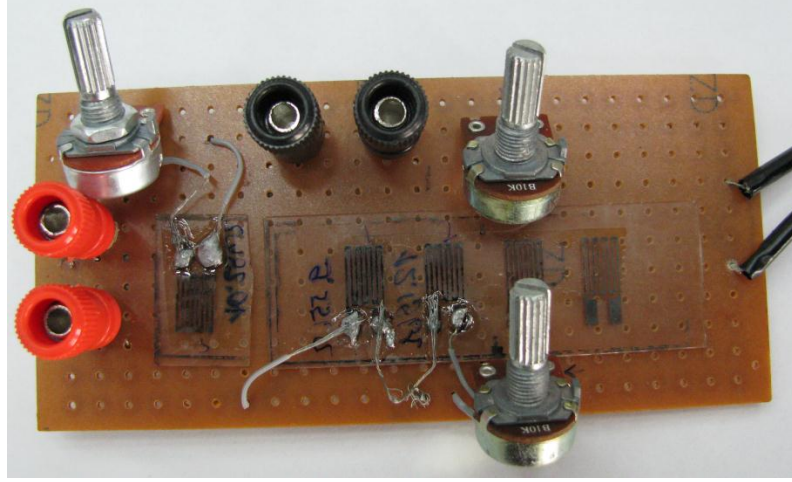
Şekil 8.39 Cam altlık üzerinde üretilen gerinim ölçeri göstermektedir.

Üretilen gerinim ölçerlerin bir başka elektriksel parametresi ise, ısı direnç katsayısı (TCR)'dir. Yaptığımız çalışmada gerinim ölçerlerin TCR katsayılarının ölçümleri için, kullanıma hazır haldeki gerinim ölçer, ısıtma hızı ve sıcaklığı kontrol edilebilir bir sıcak yüzey üzerine yapılmıştır. Gerinim ölçerlerin sıcak yüzey üzerinde sabitlenmesinin ardından, 20 °C ' den başlanarak 100 °C' e sıcaklığa kadar gerinim ölçerlerin sıcaklığı artırılmış ve sıcaklık artışı gerinim ölçerlerin üzerinde üretildiği cama doğrudan temas eden bir ısı çifti ile hassas olarak ölçülmüştür. Her 10 °C' lik artışta yaklaşık 1 dakika beklenilerek direncin sabitleşmesi sağlanmış ve elde edilen değerler Denklem 8.5 uyarınca hesaplanarak gerinim ölçerlerin TCR değeri 0.0006 /°C olarak hesaplanmıştır.

$$TCR = \left[ \left( \frac{\Delta R}{\Delta T} \right) / R \right] \quad (8.5)$$

Deneysel çalışmalarımızda ürettiğimiz gerinim ölçerlerin  $\epsilon - \Delta R/R_0$  karakteristik eğrisini elde edebilmek amacıyla Şekil 8.39' da gösterilen ince film gerinim ölçer, eni, boyu ve kalınlığı sırasıyla 26, 76, 1 mm olan cam çubuk üzerinde üretilmiştir. Daha sonra tek noktasından sabitlenen çubuk ile, ASTM E 251 – 92' de tarif edilen “sabit eğme momentli çubuk” düzeneğine uygun bir düzenek kurulmuştur. Gerinim ölçer düzeneğinin yanı sıra, ticari olarak kullanılan gerinim ölçerler ile ürettiğimiz gerinim ölçerlerin elektriksel dirençleri birbirlerinden oldukça farklı olduğundan elektriksel ölçümlerin doğru yapılabilmesi için kendi araştırmamız parametrelerine uygun bir Wheatstone köprüsüne ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.

Şekil 8.40' de gösterilen şekliyle üretilen Wheatstone köprüsü, gerinim altında bulunmayan, test altındaki gerinim ölçerle aynı özellikleri taşıyan ve deneysel çalışmalarımızda gerinim ölçerleri üretmekte kullandığımız yöntem ve prensiplerle üretilmiş özdeş dirençlerden kurulmuştur. Ayrıca köprü şeklinde bağlanmış dirençlerin her koluna takılmış dirençleri 0-10kΩ arasında değiştirilebilen 3 adet potansiyometre ile köprü, başlangıç konumunda ampermetredeki değer “0” olacak şekilde dengelenebilmektedir.



Şekil 8.40 Deneysel çalışmalarımızda üretilen ince film dirençler ile oluşturulan Wheatstone köprüsünü göstermektedir.

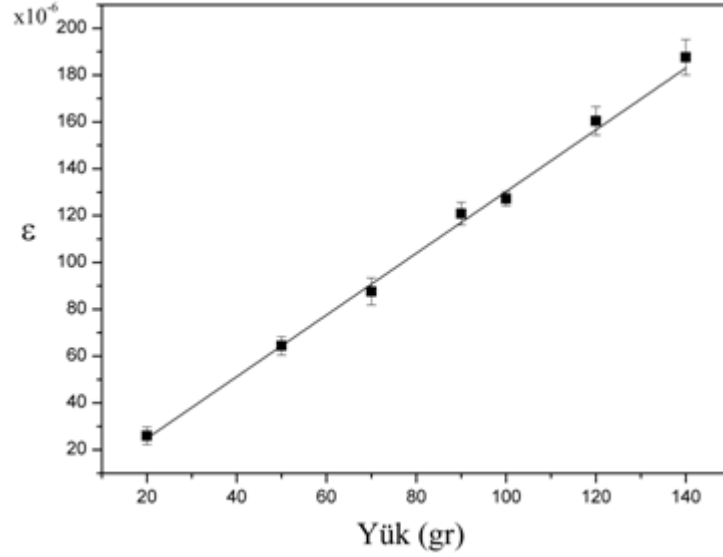
cam eğme çubuğu üzerinde doğrudan üretilen gerinim ölçer, orta noktasından 40 mm mesafeye yerleştirilen 20, 50, 70, 90, 100, 120, 140 gr'lık yüklerle test edilmiştir. Test sonucu Şekil 8.40' de gösterilen gerinim köprüsü ile sabit  $V_g$  potansiyeline karşı, gerinim ölçerde gerinimin oluşturduğu direnç farklılığı ile oluşan  $V_ç$  değerleri mV cinsinden ölçülmüştür.

Ölçümler sonucu elde edilen  $V_{giriş}$ ,  $V_{çıkış}$  ve dirençleri bilinen üç ince filmin direnç değeri kullanılarak Denklem 8.6 ile,

$$V_ç = V_g \left( \frac{R_s}{R_3 + R_s} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (8.6)$$

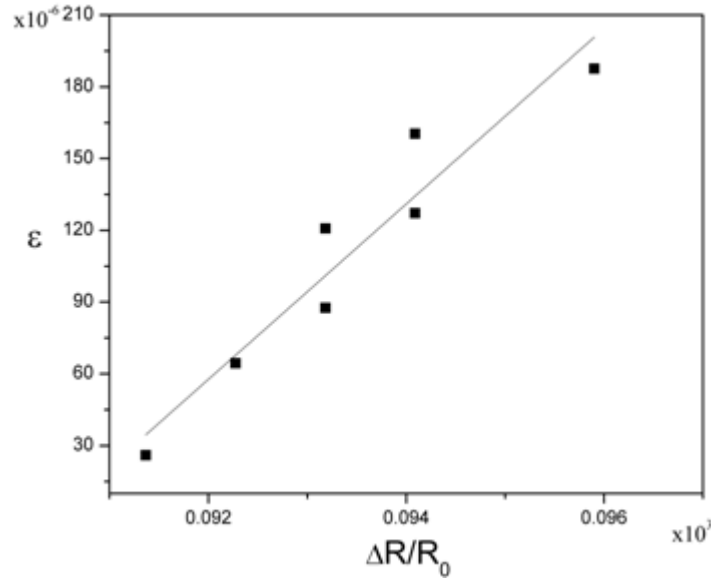
gerinim ölçerdeki direnç değişimi  $R_s$ , hesaplanmıştır.

Cam üzerinde ürettiğimiz gerinim ölçerin yük altında maruz kaldığı gerinim tespit etmek amacıyla gerinim ölçerin kapladığı alanla aynı alanı kaplayan, NiCr' dan üretilmiş, 2.11 gerinim faktörü değerine sahip ticari bir gerinim ölçer, ürettiğimiz gerinim ölçerle aynı noktaya yapıştırılmıştır. Daha sonra ticari gerinim ölçer Vishay marka gerinim köprüsüne bağlanarak kullanılan yüklere karşı elde edilen mikrogerinim değerleri tespit edilmiştir. Ticari gerinim ölçer ile elde edilen gerinim – yük değerleri Şekil 8.41' de gösterilmiştir.



Şekil 8.41. Ticari gerinim ölçer ile cam üzerinde sabit yükler kullanılarak yapılan analizle elde edilen gerinim değerleri.

Tespit edilen mikro gerinim değerleri ile ürettiğimiz gerinim ölçerin  $\Delta R/R_0$  değerleri deneysel karşılaştırılmalı olarak ele alınarak, çalışmamızda elde edilen gerinim ölçerlerin karakteristik mikro gerinim -  $\Delta R/R_0$  eğrisi (Şekil 8.42) elde edilmiştir.



Şekil 8.42 Cam üzerinde üretilen 500 nm Nichrome gerinim ölçerinin gerinim karakteristik eğrisini göstermektedir.

### 8.6.2 PMMA Altlık Üzerinde Üretilen Gerinim Ölçerler

Biriktirme işleminin ardından PMMA altlık üzerindeki Nichrome ince filmler litografi ve ıslak aşındırma yöntemleri kullanılarak şekillendirilmiş ve PMMA çubuk yüzeyinde elde edilen gerinim ölçerlerin 60/40 Sn/Pb alaşımı kullanılarak kontak terminallerine ince teller lehimlenmiştir.

Ancak lehimleme sırasında lehim alaşımının sıcaklığı ile ince film altındaki PMMA' nın bozulduğu ve buna bağlı olarak kararlı olmayan çok yüksek direnç değerleri elde edildiği tespit edilmiştir. Tekrarlı olarak yapılan denemelerde bazı durumlarda direncin kabul edilemeyecek oranda yükseldiği tespit edilmiştir.

PMMA zerindeki gerinim ölçerlerin dirençlerinin ölçülebilmesi ve gerinim ölçer olarak test edilebilmeleri için farklı lehim alaşımları denenmiştir. Bu denemelerde kimyasal çözücü içerisinde çözünmüş gümüş tanecikleri içeren lehimler ve yine 60/40 Sn/Pb bileşiminde ancak pasta şeklinde olan sıvı halde olan lehim tipleri ile denemeler yapılmıştır. Hava ortamı ya da çok düşük sıcaklıklarda kuruyan bu tip lehimlerde de kontak bölgesinde iletken tel ile ince film arasındaki mekanik temasın gerinim ölçer testlerini kaldıramayacak düzeyde zayıf olduğu grlmştir. Bu şekildeki durumlarda lehim ile ince film arasında kararlı bir kontak olmadığından, direnç okumaları da tutarlı olmamıştır.

PMMA altlık üzerinde biriktirme ve şekillendirme işlemleri başarı ile yapılabilmesine karşın, elektriksel kontakların yapacağımız testlere uygun olarak hazırlanamamasından üretilen gerinim ölçerler cam numunede olduğu gibi test edilememiştir.

### **8.7 Genel Sonuçlar**

Cam altlık üzerinde tek kat Cr, Ni tabakalarından oluşan ve 200, 300, 400 W sıçratma güçleri ile biriktirilen ince filmlerde, 400 W sıçratma gücüne karşılık gelen akım, potansiyel değerleri kullanılarak biriktirilen ince filmlerin kristal yapıda oldukları tespit edilmiştir.

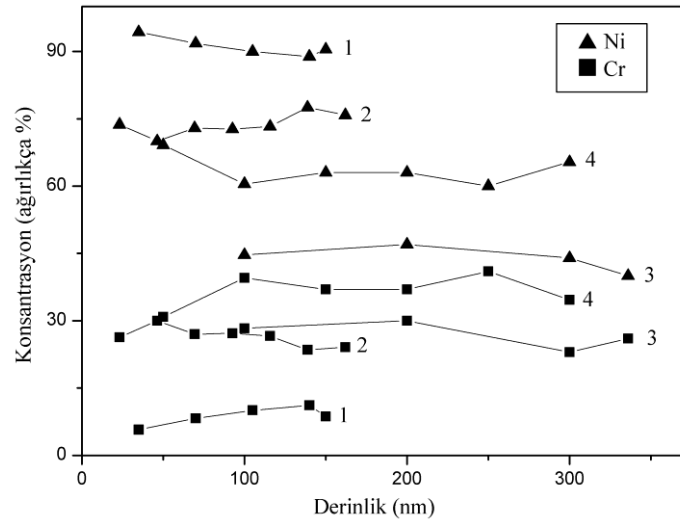
Farklı Cr/Ni kalınlık oranı ve Ni,Cr bileşimine sahip numunelerin 600 C' de 180 sn. süresince ısıl işlem görmeleri sonucu oluşan yapısal farklılıklar, izelge 8.4' de özetlenmektedir.

Çizelge 8.4 Farklı bileşimlerdeki Ni-Cr ince filmlerin özellikleri.

Numune No	Film Kalınlıkları Cr – Ni (nm)	Cr/Ni kalınlık oranı	Ağırlıkça Cr/Ni (%bileşim)	Film nano sertliği (GPa)	Ortalama Tane Boyutu (nm)
1	50 - 450	0.1	0.1	5.3	8.2
2	100 – 400	0.25	0.3	5.5	12
3	150 – 350	0.4	0.5	5.9	11,3
4	200 – 300	0.6	1.4	6.8	12.3
5	250 – 250	1	-	-	-

Bu sonuçlara göre ince filmlerdeki Cr oranının artması ile birlikte, nano sertlik ve tane boyutu değerinin de arttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, film kalınlık oranları ve EDS analizleri ile hesaplanan ağırlıkça % Cr/Ni bileşim değerleri arasında tutarlı bir ilişki söz konusudur.

Toplam kalınlığı 500 nm ve iki tabaka olarak biriktirilen Ni-Cr ince filmlerin, ısıl işlem sonrası film bileşimlerindeki değişim ve film kalınlığı boyunca elde edilen Ni, Cr dağılım profili Şekil 8.43’ de gösterilmektedir.

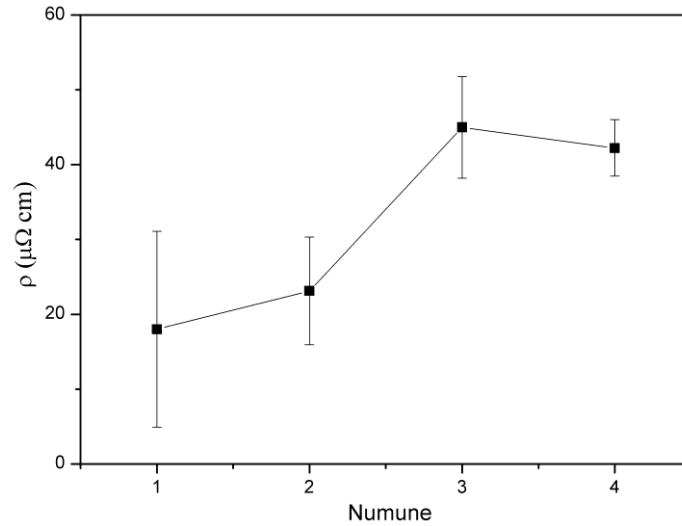


Şekil 8.43 Farklı Ni ve Cr oranlarına sahip numunelerin Ni ve Cr içeriklerinin film kalınlığı boyunca değişimini göstermektedir.

Başlangıçta farklı kalınlıklardaki Ni ve Cr’ dan oluşan tabakaların ısıl işlem sonrası bileşimleri tutarlı ve tek bir ince film haline geldiği, filmlerin içerdikleri Ni ve Cr oranlarının film kalınlığı boyunca çok az salınımlarla sabit kaldığı anlaşılmıştır. Dolayısı ile RTP sistemi

ile kısa sürede yapılan ısıtıl işlemi, iki tabakalı ince filmi birbirleri içine yaymasına ve XRD analizlerinden de anlaşıldığı üzere Ni-Cr fazlarının oluşumunu sağlayabildiği tespit edilmiştir.

Gerinim ölçer incelemelerindeki elektriksel karakterizasyon, gerinim ölçerine düşen gerinimi elektriksel direnç farklılığına bağlı olarak göstermesi nedeni ile önemlidir. 600 °C’ de 180 sn. boyunca ısıtıl işlem gören 4 farklı Cr/Ni kalınlık oranına sahip numunelerin, elektriksel direnç ölçümleri dört kontak testi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen elektriksel direnç değerleri, tabaka kalınlığına bağlı olarak  $\Omega/\square$  cinsinden hesaplanmıştır. Daha sonra bu değerler FESEM analizleri ile ölçülen son tabaka kalınlıkları ile çarpılarak her bir numunenin  $\rho$  değerleri hesaplanmıştır. Numuneler ve  $\rho$  değerleri arasındaki değişim Şekil 8.44’ de gösterilmektedir.



Şekil 8.44 Farklı Ni ve Cr içeriklerine sahip numunelerin 600 °C’ de 180 sn boyunca ısıtıl işlem yapılan numunelerin işlem sonrası elektriksel dirençlerini göstermektedir.

Tabaka direnci analizlerinden, ince film içerisindeki Cr miktarının artmasının elektriksel direncinde arttığı anlaşılmaktadır.

## 9. TARTIŞMA

Yaptığımız Doktora çalışmasının deneysel sonuçları, daha önceden bu konu ile çalışmış araştırmacıların deneysel bulguları ile karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

### 9.1 İki Katlı Ni-Cr ince filmler

Farklı Cr içeriklerine ve Cr/Ni kalınlık oranlarına sahip 500 nm kalınlıktaki iki tabakalı ince filmlere, RTP sistemi ile 600 °C 180 sn. ısıtma işlemi uygulanmasının ardından Cr/Ni kalınlık oranı 0.1 ve 0.25 olan sistemlerde, Cr<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub> ve δ(Ni-Cr) fazlarına rastlanmıştır. Sistemdeki Cr içeriğinin artırılması ile elde edilen 0.42 ve 0.6 Cr/Ni kalınlık oranlarında ise, Cr<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub> ve δ(Ni-Cr) fazlarına ek olarak, σ-Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazı da tespit edilmiştir. Farklı Cr değerleri ve aynı sıcaklıkta Ni-Cr sisteminde gözlenen σ-Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazı, yapının içerdiği Cr miktarı ile ilişkilendirilebilir.

Ni-Cr sistemiyle ilgili olarak yürütülmüş önceki çalışmalarda, σ-Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazı ve Cr miktarı arasındaki ilişki, benzer bulgularla irdelenmiştir. S.Vinayak vd., SiN<sub>x</sub> ve GaAs altlıklar üzerine RF güç kaynağına sahip manyetik alanda sıçratma sistemi ile ağırlıkça %40, 50 ve 80 Ni içeren NiCr alaşım hedeflerden biriktirilen ince filmlerin elektriksel özelliklerini incelemiştir. Söz konusu çalışmada, farklı bileşimlerdeki alaşımlarda δ(Ni-Cr) fazının oluştuğunu tespit edilmiştir. δ(Ni-Cr) fazı, bizim çalışmamızda değerlendirdiğimiz tüm Cr bileşimlerinde gözlemlendiği gibi, yazarların çalışmasında da mevcuttur. Yine benzer şekilde Cr içeriği daha yüksek olan, %40 - 50 Ni içeren filmlerde, δ(Ni-Cr) fazının yanı sıra, σ-Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazlarının hem ısıtılmış hem de ısıtılmamış numunelerde tespit edildiği bildirilmiştir.

NiCr sistemindeki fazlarla ilgili olarak bir başka çalışmada W.Brückner vd., ağırlıkça % 60 Cr içeren alaşım hedeften manyetik alanda sıçratma sistemi ile oksitlenmiş Si pul üzerine biriktirilmiş NiCr ince filmlerde de benzer bulguları tartışmışlardır. Çalışmada, Yukawa vd. söz konusu bileşimden manyetik alanda sıçratma sistemi ile biriktirdikleri ince filmlerde, altlık sıcaklığının 100 °C' nin altında olduğu durumlarda yapının hmk αCr, ymk γNi fazlarının ve nano kristal yapıda σ-Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazının karışımından oluştuğunu bildirmişlerdir.

W. Pitschke vd. tarafından incelenen bir başka çalışmada ise, sıçratma ile alaşım hedef NiCr (37:63) kullanılarak üretilen Cr' ca zengin yapılarda, 600 °C' den itibaren σ fazının, amorf yapı içerisinde oluştuğunu gösterilmektedir.

σ-Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazının Cr içeriği ile olan bu ilişkisi, farklı Cr/Ni içeren tabakaların ısıtma işlemi ile üretilen ince filmler ile Nichrome ince filmlerin bileşimlerini karşılaştırmak amacı için

önemlidir.  $\sigma$ -Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazı, gerek yaptığımız çalışmada, gerekse daha önceki çalışmalarda belli bir Cr değerinde oluştuğu anlaşılmaktadır. W. Brückner vd. yaptıkları çalışmada, söz konusu yarı dengeli fazın, Ni-Cr ikilisinin faz diyagramında 600 °C' den düşük sıcaklıklarda tanımlı olmasına karşın, deneysel çalışmalarda ısıtma işlemi olmaksızın gözlenemeyişinin, fazın oluşum kinetiklerine bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

EDS analizleri ile elde edilen veriler ışığında, çalıştığımız dört farklı alaşımdan Cr/Ni kalınlık oranı 0.25 olan 2 numaralı numunenin, Nichrome ince film bileşimine en yakın olduğu anlaşılmaktadır. Aynı sıcaklıkta her iki alaşımın da aynı fazları içerdiğini ve Cr miktarına bağlı olan  $\sigma$ -Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazının var olup olmadığını tespit etmek amacıyla, cam üzerine biriktirilen Nichrome ince filme de 600 °C 180 sn. RTP ile ısıtma işlemi uygulanmıştır. Şekil 8.31 - 32' de gösterildiği gibi, her iki numunenin XRD desenlerinin uyumlu olduğu ve ince filmlerin  $\sigma$ -Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> fazını içermediği tespit edilmiştir. Dolayısı ile her iki ince filmde benzer bileşimlere Cr ve Ni içeriklerine sahip oldukları sonucuna varılabilir.

Farklı Cr/Ni kalınlık oranına sahip dört numunenin XRD analiz verileri kullanılarak Debye-Scherrer bağıntısı ile hesaplanan tane boyutları Çizelge 8.4' de gösterilmektedir. Artan Cr miktarına paralel olarak numunelerin ortalama tane boyutları da nano sertlik değeri de artmaktadır. Naka vd. çalışmalarında Hall-Petch ilişkisi ile açıklanan ve malzemelerdeki tane boyutu azalışının sertliği artıran etkisini belirtmiş ancak kendi çalışmalarında da ağırlıkça Ni oranının % 2 ile 22 arasında değiştiği şartlar için Ni artışının tane boyutunu düşürdüğünü bildirmişlerdir. Aynı çalışmada Nieh vd. belli bir tane boyutunun altında Hall-Petch ilişkisinin geçerli olmadığını vurgulayarak beklenmeyen sertlik değerlerini, küçük tane boyutlarında kenar dislokasyonlarının hareket edememelerine bağlamışlardır.

Bunların yanı sıra, FESEM analizleri ile elde edilen ince film kırık yüzey analizlerinden, toplam 500 nm kalınlığa sahip olacak şekilde biriktirilen dört numunenin, ısıtma işlemi sonrası kalınlıklarında farklılık olduğu görülmüştür. Isıtma işlemi sonrası Cr oranı en yüksek olan numunenin ölçülen tabaka kalınlığının da en yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, ısıtma işlemi sonrası Ni içerisine yayılan Cr miktarı ile ilişkili olduğunu düşündürmektedir. S.Vinayak vd. Ni' in Cr içerisindeki sınırlı çözünürlüğüne bağlı olarak ağırlıkça % 40 – 50 Ni içeren sistemlerin ikili fazlar olduklarını ve Cr' un Ni içerisinde son derece iyi çözünürlüğe sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Numuneler elektriksel dirençleri bakımından karşılaştırıldığında ise, elektriksel direncin Cr/Ni kalınlığının 0.1' den 0.25' e yükselmesi ile hızlı bir artış gösterdiği ve artan Cr miktarı ile birlikte dirençteki artışın sürdüğü tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalarımızda ısıl işlem gören numunelerin AFM analizleri ile yüzey özellikleri de incelenmiştir. AFM analizlerinde Cr artışına bağlı olarak filmlerde orta büyüklükte topaklaşmalar olduğu görülmüştür. Zhou vd. filmlerdeki topaklaşma ve yanal tane büyümesini film kalınlığı ile ilişkilendirerek, sistematik serbest enerji azalmasının, tane büyümesinde ana etken olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, biriken filmin büyümesi sırasında serbest enerjiiyi azaltmak adına tanelerin birleşerek topaklandıklarını ve Cr' un Ni içerisindeki çözünürlüğünün yüksek olması nedeniyle Cr miktarına bağlı olarak topakların büyümesinin mümkün olduğunu vurgulamaktadır.

## 9.2 Nichrome İnce Film Gerinim Ölçerler

Deneysel çalışmalarımızın ikinci bölümü, cam ve PMMA altlıklar üzerine 500 nm kalınlıkta biriktirilen ince filmlerin karakterize edilmesi, şekillendirilmesi ve gerinim ölçer olarak değerlendirilmelerini kapsamaktadır. Bu amaçla cam ve PMMA üzerinde üretilen ince filmlerin özellikleri, gerinim ölçer için değerlendirilecektir.

Cam ve PMMA üzerinde üretilen ince filmlerin şekillendirme yöntemlerinin farklı olması nedeniyle, gerinim ölçer olarak üretimlerinde ve üretim sonrası özelliklerinde de bir takım farklılıklar tespit edilmiştir.

Gerinim ölçer olarak cam üzerinde şekillendirilen ince filmlerin, ortalama elektriksel dirençlerinin 8 – 14 k $\Omega$  arasında olduğu ölçülmüştür. Ölçülen elektriksel dirençlerin dağılımındaki farklılık, asit kullanılarak yapılan ıslak aşındırma işleminde aşındırmada kullanılan asitin fotokimyasal altından, yanal olarak hat genişliğini belli bölgelerde inceltmesi ve fotokimyasalın koruma sağlaması gereken bazı bölgelerde yeterince koruyucu davranmayarak iletken ince filmin tahrip olmasına bağlanabilir. Fotokimyasaldaki bu bozukluğun ana nedeni, çalışılan ortamlara bağlı olarak statik elektriklenmenin de etkisi ile tozların fotokimyasal yüzeyine yapışması ve NaOH banyosu sırasında bu bölgelerde yapının zayıflamasıdır.

Şekillendirme ve elektriksel dirençlerin kararlı olarak ölçülmesinin ardından, cam üzerinde üretilen gerinim ölçerlerin  $\Delta R/R_0 - \epsilon$  karakteristik eğrisi çizilmiştir. Söz konusu hesaplamalar ve  $\Delta R/R_0 - \epsilon$  eğrisinin eğiminden gerinim faktör 1.23 olarak tespit edilmiştir.

Tasarlanan gerinim ölçerlerin teorik dirençleri ve şekillendirme sonrası elde edilen direnç ve gerinim faktörü değerlerinin birbirlerinden farklı olabileceği, önceki çalışmalarda da tartışılmaktadır. Kazi vd.'nin NiCr (80:20) alaşımından ürettikleri gerinim ölçerlerle ilgili yaptıkları karakterizasyon çalışmalarında, söz konusu farklılıkların vakum ve çevresel şartlardan kaynaklanabileceğini vurgulamışlardır.

Bunun yanı sıra, ticari olarak üretilen gerinim ölçerler, yaklaşık 50µm kalınlığa sahip olabilmektedirler. Söz konusu bu kalınlık, deneysel çalışmalarımızda ürettiğimiz gerinim ölçerler ile kıyaslandığında yaklaşık 100 kat daha fazladır. Kazi vd. yine aynı çalışmalarında gerinim faktörünün aynı zamanda üretilen gerinim ölçerlerin kalınlığına bağlı olduğunu ileri sürmektedir. Ticari alışimlarda kullanılan çok daha ince Nichrome alışımı ile gerçekleştirilen bir başka araştırmada, kalınlık – gerinim faktörü arasındaki bu ilişki, benzer sonuçlarla irdelenmektedir. Angadi vd., 5 – 60 nm aralığındaki kalınlıklarda manyetik alanda sıçratma yöntemi kullanılarak biriktirilen Nichrome ince filmlerin gerinim faktörlerinin 1.5 – 2.2 aralığında olduğunu tespit etmişlerdir.

Çalışmamızda ayrıca, PMMA üzerinde üretilen gerinim ölçerle ilgili karakterizasyon çalışmaları da yapılmıştır. Ancak PMMA üzerinde üretilen gerinim ölçerlerin hem dirençlerinin cam üzerinden üretilenlerde daha yüksek, hem de denemeler sırasında üretilen farklı gerinim ölçerlerin dirençlerinin tutarsız kabul edilebilecek ölçüde birbirlerinden farklı olduğu gösterilmiştir. Bu farklılıkların ana nedeninin, AFM analizlerinde gözlemlendiği gibi, cam ve PMMA üzerinde elde edilen ince filmlerin yüzey özelliklerinin birbirlerinden oldukça farklı olmasına bağlanabilir. Bunun yanı sıra, PMMA üzerindeki ince filmlerin şekillendirme yöntemleri ile cam üzerindeki yöntem ve aşındırma sırasında kullanılan kimyasallar bakımından oldukça farklı olması da, söz konusu farklılığa yol açabilecek bir başka unsurdur.

İnce filmlerin elektriksel dirençleri, şekillendirmede karşılaşılan etkilerin yanı sıra, Matthiessen Kuralı olarak bilinen bir dizi elektron saçılma mekanizmaları uyarınca da farklılık gösterebilmektedir. Denklem 6.2 uyarınca ince filmlerin elektriksel dirençleri alışimlarda çözen atomun kafes sistemindeki düzensizliklere, atomların ısıl titreşimlerine, tane sınırlarına ve diğer bazı etkilere bağlanabilir. Tüm bu etkiler ince filmlerin elektriksel dirençlerini artırarak iletkenliklerini düşürmektedir. Bunların yanı sıra, film kalınlığının azalması ile birlikte düzlemsel filmin alt ve üst yüzeyleri ile iletim halindeki elektronların da etkileşimi daha belirgin hale gelir. Söz konusu sınır koşullardaki saçılma etkileri, elektronların ortalama serbest yolları ve film kalınlığı parametrelerine bağlı olarak Fuchs ve Sondheimer modelleri ile açıklanmaktadır. (S.Vinayak vd. 2007; Zhou vd. 2008; Witt, 1974; Lasko ve Roth, 1961).

Bunun yanı sıra, metalik ince filmler, polimer altlıklar üzerinde uygulandıkları zaman gerinim altında polimer altlığın deformasyonu sonucu, ince filmde mikro çatlakların oluştuğu bildirilmiştir. Söz konusu çatlakların elektriksel direnci olumsuz etkileyen bir başka etken olduğu da düşünülebilir (Li, 2006).

Manyetik alanda sıçratma sistemi yöntemi ile ince film NiCr gerinim ölçer üretimini hedeflediğimiz tez çalışmamızda gerinim ölçerleri, yaygın olarak kullanıldığı şekli ile, taşıyıcı bir altlık üzerinde üretip parça üzerine yapıştırmak yerine, doğrudan parça üzerinde üretmek hedeflenmiştir. Bu yöntemin kullanılması, gerinim ölçerin yerleştirilmesi ve uygulanması sırasında oluşan etkileri ortadan kaldırdığı gibi, gerinim değerinin elde edilmesi istenilen bölgeye özgü gerinim ölçer tiplerinin de tasarlanabilmesine imkan tanımaktadır. Bu amaçla seçtiğimiz NiCr alaşımı, direnç ölçümlerinin yapılabilmesine elverişli yalıtkan altlıklar olan cam ve PMMA üzerinde üretilmiştir.

Ayrıca, NiCr alaşımlarından farklı Cr içeriklerinin yapı üzerine etkilerini de incelediğimiz çalışmamızda, Cr bileşiminin değiştirilmesi tabakalı ince film üretimi ile sağlanmıştır. Ancak yapıda Ni-Cr fazlarının oluşabilmesi için gerekli olduğunu tespit ettiğimiz 600 °C' lik ısıtma işlemi, RTP sisteminde 180 sn. gibi kısa süre ile bile uygulanması, cam ve PMMA altlıkların özelliklerini bozmuş, testlerin yapılmasına olanak vermemiştir. Bu nedenle ısıtma işlemi olmaksızın doğrudan sıçratılmış ince filmler PMMA ve cam üzerinde litografi ve ıslak aşındırma işlemlerinden geçirilerek şekillendirilmiştir. Gerek altlıkların özellikleri, gerekse ıslak aşındırmada kullanılan kimyasalların farklılığına bağlı olarak, cam ve PMMA üzerinde üretilen gerinim ölçerlerin dirençleri birbirlerinden oldukça farklıdır. Bunun yanı sıra, PMMA üzerinde yapılan gerinim ölçerlerde, ölçümler sırasında gerinim altında kararlı elektriksel kontaklar yapılamamış ve bu nedenle yapılan gerinim ölçer karakterizasyonu yalnızca cam üzerinde üretilen gerinim ölçerler ile gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak iki tabaka halinde Ni-Cr ince filmlere 180 sn. gibi kısa süre ile ısıtma işlemi uygulanması, literatürde alaşım hedeflerden sıçratılan ve ısıtma işlemi gören NiCr ince filmlerde gözlenen fazların oluşumu sağladığı ve uygun Ni – Cr bileşimlerinde ince filmlerin üretilmediği görülmüştür. Aynı zamanda gerinim ölçerlerin yalıtkan olmakla birlikte istenilen şekil ve kalınlıkta altlıklar üzerinde üretilebileceği, şekillendirilebileceği sonuçlarına literatür bulguları ile de desteklenerek, varılabilir.

**KAYNAKLAR**

Angadi M.A. ve Whiting R., (1990), “Longitudinal and Transverse Strain Sensitivity of Nichrome Films”, Materials Science and Engineering, Bölüm7:L1 – L4.

Arnoldussen T.C. ve Nunnelley L. L., (1992), “Noise in Digital Magnetic Recording”, World Scientific Publishing, USA, 5:35.

ASM Specialty Handbook, (1997), Heat Resistant Materials, ASM International Materials Society, 383.

ASTM International, (2003), “Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages”, E 251 – 92 (Reapproved 2003).

Belic L.I., Pozun K. ve Remskar M., (1998), “AES, AFM, TEM Studies of NiCr Thin Films for Capacitive Humidity Sensors”, Thin Solid Films, 317:173 – 177.

Bird J., (2007), “Electrical Circuit Theory and Technology Third Edition”, Elsevier Science, Newnes Burlington, USA, Ma, 10:98,99.

Brown R., (2002), RF/Microwave Hybrids: Basics, Materials and Processes. Kluwer Academic Publishers, Bölüm 7:113-118.

Brückner W., Pitschke W. ve Thomas J., (2000), “Stress, Resistance, and Phase Transitions in NiCr(60 wt%) Thin Films”, Journal Of Applied Physics, 87:2219-2226.

Brydson J.A., (1999), Plastic Materials (Seventh Edition), Butterwoth-Heinemann, Oxford, 15:405-415.

Campbell S.A., (2001), The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication Second Edition, Oxford University Press, Bölüm 6:127-133, Bölüm 7:151-154.

Carlson G. L. II ve Robert Warner, (1979), Methods of Experimental Physics: Vacuum Physics and Technology, Vol. 14, Academic Press Inc., New York.

Cullity B.D., (1978), “Elements of X-Ray Diffraction”, Addison-Wesley Publishings Company, INC, Phillipines, 9:259-263 .

Dally J.W. ve Riley W.F., (1978) Experimental Stress Analysis, McGraw-Hill, Tokyo, Bölüm 16:430.

Doering R. ve Nishi Y., (2007), Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, CRC Press, Bölüm 9:201-287.

Dong E.K.F. ve Gooding R.J., (1995), “Theory of the Effects of Rapid Thermal Annealing on Thin Film Crystallization”, Physical Review Letters, Volume 74, No:19.

Estevez-Rams E., Penton A., Martinez-Garcia J. ve Fuess H., 2005, “The use of analytical peak profile functions to fit diffraction data of planar faulted layer crystals”, Cryst. Res. Technol, 40:166-176.

European Standart, 2003, “Plastics – Poly(methyl methacrylate) sheets - Types, dimensions and characteristics - Part 1: Cast sheets”, ISO 7823-1:2003.

- Fischer-Cripps A.C., (2006), "Critical review of analysis and interpretation of nanoindentation test data", *Surface & Coatings Technology*, 200: 4153 – 4165.
- Franssila S., (2004), *Introduction to Microfabrication*, John-Wiley, 9:99-102.
- Freund B. ve Suresh S., (2004), *Thin Films Materials Stress, Defect Formation and Surface Evolution*, Cambridge University Press, USA, New York, 1:6-27.
- Gosh A.K., (2007), *Introduction to Measurements and Instrumentation*, 2nd Edition, Prentice Hall, India, Bölüm 7, 119-128.
- Hannah R.L. ve Reed S.E., (1992), *Strain Gage Users' Handbook*, Chapman&Hall, London, Bölüm 1:1-38.
- Helbert J., (2001), *Handbook of VLSI microlithography: principles, technology, and applications*, Noyes publication, NY, 3:120-163.
- Holloway P.H. ve McGuire G.E., (1995), "Handbook of Compound Semiconductor Growth Processing Characterization and Devices", Noyes Publications, Park Ridge USA, New Jersey, Bölüm 9:442-449.
- Horvath G. ve Bankuti J., (1988), "Resistivity Increase in Thin Conducting Films Considering the Size Effect", *Phys. Stat. Sol. (A)*, 110:549 – 554.
- Hosford W.F., (2005), *Mechanical Behaviour of Materials*, Cambridge University Press, New York, Bölüm 1:1-3.
- Hrovat M., Belavic D., Samardzija Z. ve Holc J., (2001), "A Characterization of Thick Film Resistors for Strain Gauge Applications", *Journal of Materials Science*, Bölüm 36:2679-2689.
- Jaeger R.C., (2001), *Introduction to microelectronic fabrication*, Prentice Hall.
- Jain K.C. ve Chitale A.K., (2010), *Text Book of Production Engineering*, PHI Learning Private Limited, New Delhi, Bölüm 8:187-196.
- John P.I., (2005), *Plasma Sciences and the Creation of Wealth*, Tata McGraw Hill Publishing, New Delhi, Bölüm 7:183-187.
- Kazi H. I., Wild P.M., Moore T.N. ve Sayer M., (2006), "Characterization of Sputtered Nichrome (Ni-Cr 80/20 wt. %) films for Strain Gauge Applications", *Thin Solid Films*, 515:2602-2606.
- Kwon Y., Kim N. H., Choi G. P., Lee W. S., Seo Y. J. ve Park J., (2005), "Structural and Surface Properties of NiCr Thin Films prepared by DC Magnetron Sputtering Under Variation of Annealing Conditions", *Microelectronic Engineering*, 82:314 – 320.
- Lasko W.R. ve Roth H.A., (1961), "The Effect of Surface Morphology of Substrate Upon Electrical Stability of Nichrome Thin Film Resistors", *IRE Transactions on Component Parts* December, 160-162.
- Lee J.B., Park G.B., You D. H. ve Lee D.C., *Composition Control And Electrical Properties of Ni-Cr Thin Films Prepared by co-sputtering Method* 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE.

Levinson H.J., (2005), Principles of Litography: Second Edition, International Society for Optical Engineering, USA, Bölüm 1:1-7.

Li T., 2006, “Deformability of Thin Films of Electronic Materials on Polymer Substrates”, Harvard University, Doktora Tezi.

Li T., Suo Z., (2006), “Deformability of Thin Metal Films on Elastomer Substrates”, International Journal of Solid and Structures 43:2351-2363.

Li Y., Hebb J. ve Willis J., (2001), “Fast Ambient Switching for Multiple Step Rapid Thermal Processing of Wafers Using a Furnace Based RTP System”, 9th. International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductor.

Lichtenwalner D.J., Hydrick A.E. ve Kingon A.I., (2007), “Flexible Thin Film Temperature and Strain Sensor Array Utilizing A Novel Sensing Concept”, Sensors and Actuators, 135:593 – 597.

Lynch C.S., (1999), The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, CRC Press, LLC, 22.

Machlin E.S., (2006), Materials Science in Microelectronics II The Effect of Structure on Properties in Thin Films, Elsevier Publishing, 1:2.

Mack C., (2007), Fundamental Principles of Optical Litography, The Science of Microfabrication, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, Bölüm 1:2-3.

Mattox D.M., (1998), Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contaminant Control, Noyes Publication.

Mattox D.M., (2010), Handbook of Physical Vapor Deposition Second Edition, William Andrew Applied Science Publishers, New Jersey, Bölüm 1:1-5, 2:30.

May G.S., Sponos C.J., (2006), Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control, Wiley Interscience, IEEE, 1:7, 2:34-41.

McCombs D., (1999), Detecting World Capturing Physical Measurements with C++, R&D Books, Miller Freeman Inc. USA, Lawrence, Bölüm 6:296.

Murray W.M. ve Miller W.R., (1992) Bonded Electrical Strain Gages, Oxford University Press, New York, Oxford, Bölüm 1:4-32.

Naka M., Shibayanagi T., Maeda M., Mori M. ve Mori M., (2006), “Structures and Microhardness of Nanostructured Cr-Ni sputtered Alloy”, Vacuum, 80:1316-1320.

Ohring M., (1992), The Materials Science of Thin Films, Academic Press, UK.

Phoung M., Yoon N. ve Yoon, S., (2006), “Effect of Deposition Temperature on Structural and Electrical Properties of NiCr Thin-Film Resistors by Magnetron Sputtering”, Journal of Electrochemical Society, 153:G606-G608.

Pitschke W. ve Brückner W., (1998), “Phase Formation Process of Sputtered NiCr(37:63) Thin Films”, Fresenius J Anal Chem, 361:608-609.

Riad A.E. ve Barlow F.D., (1997), *Thin Film Technology Handbook*, Charles A. Harper Series and Advisor, McGraw Hill, New York.

Robinson M., (2006), “Strain Gage Materials Processing, Metallurgy and Manufacture”, Techniques.

Rölke J., (1981), “Nichrome Thin Film Technology and Its Applications” *Electrocomponent Science and Technology*, 9:51-57.

Rossiter P.L., (1987), *The Electrical Resistivity of Metals and Alloys*, Cambridge Solid State Science Series, Cambridge Press, Bölüm 5:137-212.

Sarkar D., (2005), *Physical and Chemical Methods on Soil Analysis*, New Age International Ltd. Publishers, New Delhi, Bölüm 1:10-12.

Schroder D.K., (2006), *Semiconductor Material and Device Characterization*, IEEE Press, Wiley Interscience, A John Wiley & Sons Inc. USA, New Jersey, 1:1-18.

Seshan K., (2002), *Handbook of Thin film Deposition processes and Technologies*, Materials Science and Technologies Series, Noyes Publication.

Sreeharsha K.S., (2006), “Principles of Physical Vapour Deposition of Thin Films”, Elsevier Ltd., GB, 9:722-767.

Topuz A., (1993), “Malzeme Muayenesinde Özel Konular”, Yıldız Teknik Üniversitesi, 280, İstanbul, 2:56-61.

Van der Pauw L. J., (1958), “A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape”, *Philips Research Reports*, 13:1-9.

Velumani S., Castaneda H., Pal U., Chavez J.A., Sebastian P.J. ve Ascencio J.A., (2005), “Structural and Electrochemical Characterization of Sputter-Deposited Nitrided NiCr Alloys”, *J. Solid State Electrochem.* 9:535 – 546.

Vinayak S., Vyas H.P. ve Vankar V.D., (2007), “Microstructure and Electrical Characteristics of Ni – Cr Thin Films”, *Thin Solid Films*, 515:7109-7116.

Walker P. ve Tarn W.H., (1991), *Handbook of Metal Etchants*, CRC Press, USA, 865-867.

Wasa K., Hayakawa S., (1992), *Sputter Deposition Technology, Principles, Technology and Applications*, Noyes Publications, Bölüm 2:10-19, Bölüm 3:100-115.

Wasa K., Kitabatake M., ve Adachi H., (2004), *Thin Film Materials Technology Sputtering of Compound Materials*, Springer Verlag GmbH & Co. KGaA, 2:17-35, 4:135-139.

Wessel J.K., (2004), *Handbook of Advanced Materials Enabling New Designs*, Wiley Interscience, John Wiley & Sons Inc. Publication, New Jersey, Bölüm 7:217-220.

Window A.L., (1992), *Strain Gage Technology*, Springer, Bölüm 1:4-24.

Wissman P. ve Finzel H.U., (2007), *Electrical Resistivity of Thin Metal Films*, Springer Berlin, Heidelberg, Bölüm 1:1-17.

Witt G.R., (1974), “The Electrochemical Properties of Thin Films and The Thin Film Strain Gauge”, Thin Solid Films, 22:133-156.

Yoo C.S., (2008), Semiconductor Manufacturing Technology: Advanced Series in Electrical and Computer Engineering - Vol.13. World Scientific Publishing Co.Pte. Ltd. Singapoe.

Young W.C., (2001), Roak’s Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill, NY, Bölüm 6:81.

Zhou J. ve Yan T.L. ve Jianwu Y., (2008), “Surface and Electrical Properties of NiCr Thin Films Prepared by DC Magnetron Sputtering”, Journal of Wuhan University Technology Mater. Sci. Ed.159-162.

Zhou X.D., Zhang C., Huebner W. ve Ownby P.D., (2001), “Effect of The Solvent on the Particle Morphology of Spray Dried PMMA”, Journal of Materials Science 36:3759 – 3768.

### **İnternet Kaynakları**

- [1] [http://www.saia-pcd.com/SiteCollectionImages/50\\_Machine%20Control%20-%20OEM/A21.jpg](http://www.saia-pcd.com/SiteCollectionImages/50_Machine%20Control%20-%20OEM/A21.jpg)
- [2] <http://www.almaden.ibm.com/st/chemistry/lithography/immersion/>
- [3] <http://www.feu.edu.tw/edu/mse/%E6%AA%94%E6%A1%88%E4%B8%8B%E8%BC%89/thin-film%20deposition.pdf>

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi		01.04.1977
Doğum Yeri		İstanbul
Lise	1988 – 1995	Özel Kalamış Lisesi
Lisans	1995 - 2000	İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	2001 – 2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Malzeme Programı
Doktora	2004 – 2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Malzeme Programı

**Çalıştığı Kurum**

2003 –	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Malzeme Anabilim Dalı
--------	---