

**TERMİYONİK VAKUM ARK YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLEN Fe- Co ESASLI METALİK CAM İNCE
FİMLERİN MANYETİK ÖZELLİKLERİ**

Fatih PERİNÇEK

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK

2012

T.C.
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TERMİYONİK VAKUM ARK YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Fe- Co ESASLI
METALİK CAM İNCE FİMLERİN MANYETİK ÖZELLİKLERİ

Fatih PERİNÇEK

FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK

TEKİRDAĞ – 2012

Her hakkı saklıdır.

Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK danışmanlığında, Fatih PERİNÇEK tarafından hazırlanan bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı : Yrd. Doç. Dr. Muzaffer ERDOĞAN *İmza:*

Üye: Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK *İmza:*

Üye: Doç. Dr. İlker KÜÇÜK *İmza:*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Fatih KONUKCU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMİYONİK VAKUM ARK YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Fe- Co ESASLI METALİK CAM İNCE FİLMLEİN MANYETİK ÖZELLİKLERİ

Fatih PERİNÇEK

Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK

Bu çalışmada Fe-Co esaslı metalik cam ince filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. $Fe_{36}Co_{36}B_{19,2}Si_{4,8}Mo_2W_2$ kimyasal kompozisyonuna sahip olan alaşımlar ark eritme tekniği ile homojen hale getirilmiştir. Üretilen bu alaşımlar cam alttabakalar üzerine termiyonik vakum ark yöntemi kullanılarak 200, 240, 260, 290, 425, 700 nm kalınlıklarında ince film şeklinde büyütülmüştür. Malzemelerin yapısal özelliklerinin incelenmesi için X-ışını kırınım cihazı ve atomik kuvvet mikroskobu kullanılmıştır. İnce filmlerin X-ışını kırınım analiz sonuçlarına göre, 200 nm, 240 nm, 260 nm ve 290 nm kalınlığa sahip ince filmlerin tam amorf yapıda, 425 nm ve 700 nm kalınlıktaki ince filmlerin ise parçalı amorf yapıda oldukları görülmüştür. 200 nm, 240 nm ve 260 nm kalınlıklı ince filmlerin atomik kuvvet mikroskobu analizleri sonucunda, filmlerin ortalama yüzey pürüzlülüklerinin 3.629 nm ile 6.013 nm arasında değiştiği tespit edilmiştir. İnce filmlerin manyetik özelliklerinin incelenmesi için titreşimli örnek manyetometresi kullanılmıştır. Ölçüm sonuçlarında sıfırlayıcı alan değerlerinin 5.7 kA/m ile 12 kA/m arasında değiştiği saptanmıştır. Son olarak 300 °C sıcaklığında ısı işlem uygulanarak, üretilen ince filmlerin manyetik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Bunun sonucunda sıfırlayıcı alan değerlerinin 5.7 kA/m ile 9.0 kA/m arasında olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Manyetizma, manyetik amorf alaşımlar, metalik cam ince filmler, Termiyonik vakum ark, Isıl işlem

2012, 58 Sayfa

ABSTRACT

Master of Science Thesis

MAGNETIC PROPERTIES OF Fe-Co BASED METALLIC GLASS THIN FILMS PRODUCED BY THERMIONIC VACUUM ARC

Fatih PERİNÇEK

Namık Kemal University Natural and Applied Science Institute

Department of Physics

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Kadir ERTÜRK

In this study, the structural and magnetic properties of Fe-Co based metallic glass thin films have been investigated. Alloys with chemical composition of $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ are homogenized by arc melting technique and grown on the glass substrates with thicknesses of 200, 240, 260, 290, 425 and 700 nm in the form of a thin film using TVA method. In order to examine the structural properties of materials, the X-ray diffraction device and atomic force microscope was used. According to the X-ray diffraction analysis it is obtained that structures of the thin films with the thicknesses of 200, 240, 260 and 290 nm are totally amorphous while the structures of the other films partially amorphous. The atomic force microscopy of thin films with thicknesses of 200, 240 and 260 nm showed that the average surface roughnesses of them are between the ranges of 3.629 nm and 6.013 nm. Vibrating sample magnetometer had been utilized for investigations of the magnetic properties of thin films. Measurement results showed that the values of the coercivity varied between 5.7 kA/m and 12kA/m. Finally, the change in the magnetic properties of thin films had been investigated after heat treatment of 300 °C temperature. As a result, the values of the coercivity were found to be between 5.7 kA/m and 9.0 kA /m.

Key Words: Magnetism, Magnetic amorphous alloys, metallic glass thin films, Thermionic vacuum arc, heat treatment

2012, 58 Pages

TEŞEKKÜR

Bu çalıőmamın gerçekleőmesinde bana her anlamda destek olan, birlikte çalıőmaktan onur ve mutluluk duyduğum değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK 'e gosterdiği ilgi ve yardımları için sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca, hem bilgi ve deneyimlerini hem de deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme ve teknik ekipman desteğini esirgemeyen Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakóltesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. İlker KÜÇÜK'e Őukranlarımı sunarım. Ayrıca bana göstermiş oldukları emek ve katkılardan ötürü Namık Kemal Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakóltesi, Fizik Bölümü öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Numunelerin hazırlanmasında kullanılan TVA sistemini bizlere açan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakóltesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Suat PAT'a, filmlerin AFM görüntüleme işlemleri için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakóltesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. İdris AKYÜZ'e, XRD ve VSM ölçümleri için Orta Doėu Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İleri Malzeme Geliştirme Laboratuvarı (NOVALAB) sorumlusu Prof. Dr. M. Vedat AKDENİZ ve Araő. Gör. Nagehan DUMAN'a, tez yazımında bana her türlü desteği veren sevgili ağabeyim Dr. M. Cüneyt HACİİSMAİLOğLU'na çok teşekkür ederim. Çalıőmalarımın baőlangıcından sonuna kadar yardımlarından dolayı sevgili ev arkadaőım Serdar GENÇ'e ve çalıőmalarımızda gereken maddi desteği sağlayan Namık Kemal Üniversitesi BAP baőkanlıėına, teőekkürü bir borç bilirim.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Adı
T_g	Cam geçiş sıcaklığı
T_x	Kristalleşme sıcaklığı
T_m	Erime sıcaklığı
ΔT_x	Aşırı soğutulmuş bölge
T_{rg}	İndirgenmiş cam geçiş sıcaklığı
M	Mıknatıslanma
M_s	Doyum mıknatıslanması
A	Alan
d	Kristal düzlemleri arasındaki uzaklık
H	Manyetik alan şiddeti
n	Yansıma mertebesi
Φ	Manyetik akı
θ	Bragg açısı, Anoda ve katot arasındaki açı
2θ	Kırınım açısı
λ	X-ışını dalgaboyu
B	Manyetik indüksiyon
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
B_r	Artık manyetik akı yoğunluğu
B_s	Doyum manyetik indüksiyonu
M_r	Kalıcı manyetik indüksiyon
K	Kelvin cinsinden sıcaklık
ε	İndüklenen emk
I	Akım
$m_{yörünge}$	Elektronun yörünge manyetik moment
m_{spin}	Elektronun spin manyetik momenti
$L_{yörünge}$	Elektronun yörünge açısal momentumu
L_{spin}	Elektronun spin açısal momentumu
m	Manyetik moment, Kütle

T	Periyot
e	Elektron yükü
χ	Manyetik alınganlık
T _c	Curie sıcaklığı
N	Bobin sarım sayısı
t	Kristal boyutu
H _c	Sıfırlayıcı alan
D _k	Kritik parçacık kalınlığı

Kısaltmalar Açıklama

TVA	Termiyonik vakum ark
XRD	X-ışını kırınımı
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
VSM	Titreşimli örnek manyetometresi
PLD	Puls lazer kaplama yöntemi
VE	Vakumla buharlaştırma yöntemi
DLC	Elmas yapılı karbon
KVA	Katodik Vakum Ark

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Amorf Malzemelerin Yapısı	3
2.2. Metalik Cam ve Tarihçesi.....	4
2.2.1. Camlaşma Yeteneği	8
2.3. Metalik Cam İnce Filmler	8
2.4. Metalik Camların Manyetizması.....	10
2.4.1. Manyetizmanın Temel Kavramları	10
2.4.2. Manyetik Malzemeler	12
2.4.3. Histeresis Eğrisi ve Özellikleri	15
2.4.4. Ferromanyetik Malzemelerin Sınıflandırılması ve Uygulama Alanları	17
2.4.5 Manyetik Domainler ve Nano Yapıların Manyetizması	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1. Üretim Yöntemi	19
3.1.1. Alaşımdaki Elementlerin Seçimi Ve Hazırlanışı	19
3.1.2. Alaşımların Ark Eritme Cihazı Yardımıyla Üretimi	22
3.1.3. Termiyonik Vakum Ark (TVA) Yöntemi.....	26
3.1.4. Alaşımların Termiyonik Vakum Ark (TVA) ile İnce Film Olarak Büyütülmesi	29
3.1.5. Üretilen İnce Filmlere Isıl İşlem Uygulanması.....	31
3.2. Ölçüm Sistemleri	31
3.2.1. X-Işını Difraksiyonu	31
3.2.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu	33
3.2.3. Titreşimli Örnek Manyetometresi	36

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	40
4.1. Üretilen İnce Filmlerin Yapısal ve Manyetik Analizleri	40
4.1.1. X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) Analiz Sonuçlar	40
4.1.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Analiz Sonuçları	43
4.1.3. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Analiz Sonuçları	45
4.2. Isıl İşlem Sonrası İnce Filmlerin Manyetik Analizleri	48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	52
6. KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. (a) Kristal (üstte) ve (b) Amorf (altta) yapıya sahip malzemelerin atom dizilimlerinin şematik gösterimi	3
Şekil 2.2. Keşfedilmesinden günümüze, kritik kalınlığın fonksiyonu olarak metalik camlar	6
Şekil 2.3. Camsı alaşımlar ile bazı malzemelerin dayanıklılık ve elastik limitlerinin karşılaştırılması	9
Şekil 2.4. Bir akım halkasındaki elektronun hareket	10
Şekil 2.5. Diamanyetik malzemelerde uygulanan manyetik alan ile mıknatıslanmanın değişimi	13
Şekil 2.6. Paramanyetik malzemelerde (a) uygulanan manyetik alan ile mıknatıslanmanın değişimi, (b) sıcaklık ile alınganlığın değişimi	14
Şekil 2.7. Ferromanyetik malzemelerin sıcaklık ile mıknatıslanmasının değişimi	15
Şekil 2.8. Ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanarak histeresis eğrisinin oluşum.....	16
Şekil 2.9. Ferromanyetik malzemenin histeresis eğrisi	17
Şekil 2.10. Sıfırlayıcı alan değerinin parçacık büyüklüğü ile değişimi	18
Şekil 3.1. Ark eritme sisteminin şematik olarak gösterimi	22
Şekil 3.2. Elementlerin yerleştirildiği su ile soğutulan bakır pota	23
Şekil 3.3. Elektrot ve pota arasında oluşan elektriksel ark	23
Şekil 3.4. Ark ile eritme yöntemiyle üretilmiş 3 gram $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ alaşımı ...	24
Şekil 3.5. Ark ile eritme cihazı	25
Şekil 3.6. TVA'nın elektrotlarının düzenlenişi	26
Şekil 3.7. TVA sisteminin önden görünüşü	28
Şekil 3.8. Üretim sırasında oluşturulan deney düzeneğinin şematik gösterimi	30
Şekil 3.9. X-ışını kırınımı	32
Şekil 3.10. X-ışını kırınım tekniğinin şematik gösterimi	33
Şekil 3.11. Atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi	34
Şekil 3.12. Titreşimli örnek manyetometresi (VSM) cihazının şematik gösterimi	38
Şekil 3.13. VSM cihazı	39
Şekil 4.1. 200 nm, 240 nm, 260 nm ve 290 nm kalınlığa sahip ince filmlerin XRD desenleri	41
Şekil 4.2. 425 nm ve 700 nm kalınlığa sahip ince filmlerin XRD desenleri	42

Şekil 4.3. 200 nm kalınlığa sahip $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metalik cam ince filmin AFM görüntüsü	43
Şekil 4.4. 240 nm kalınlığa sahip $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metalik cam ince filmin AFM görüntüsü	44
Şekil 4.5. 260 nm kalınlığa sahip $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metalik cam ince filmin AFM görüntüsü	44
Şekil 4.6. 200 nm, 240 nm ve 260 nm kalınlığa sahip ince filmlerin histeresis eğrileri	46
Şekil 4.7. 290 nm, 425 nm ve 700 nm kalınlığa sahip ince filmlerin histeresis eğrileri	46
Şekil 4.8. Isıl işlem sonrasında 200 nm kalınlığa sahip ince film için histeresis eğrisi	48
Şekil 4.9. Isıl işlem sonrasında 240 nm kalınlığa sahip ince film için histeresis eğrisi	48
Şekil 4.10. ısıl işlem sonrasında 260 nm kalınlığa sahip ince film için histeresis eğrisi	49
Şekil 4.11. Isıl işlem sonrasında 290 nm kalınlığa sahip ince film için histeresis eğrisi	49
Şekil 4.12. Isıl işlem sonrasında 425 nm kalınlığa sahip ince film için histeresis eğrisi	50
Şekil 4.13 Isıl işlem sonrasında 700 nm kalınlığa sahip ince film için histeresis eğrisi	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Alaşım elementlerinin bazı yapısal, fiziksel, kimyasal ve manyetik özellikleri	19
Çizelge 3.2. Alaşım elementlerinin sahip olduğu saflık kalitesi ve atomik çaplar	21
Çizelge 3.3. 3 gram $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ alaşımını hazırlamak için tartılan elementlerin kütleleri	21
Çizelge 3.4. Üretilen ince filmlerin kalınlıkları	30
Çizelge 4.1. Üretilen ince filmlerin pürüzlülük değerleri	45
Çizelge 4.2. $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ metalik cam ince filmlerin H_c değerleri	47
Çizelge 4.3. $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ metalik cam ince filmlerin ısıtılma işlem öncesi ve sonrasındaki H_c değerleri	51

1. GİRİŞ

Metaller, tarihin ilk dönemlerinden beri sağlamlığı ve kullanışlılığı yüzünden savaş, ulaşım ve günlük işler gibi alanlarda hep ilgi odağı olmuştur. Sanayi devriminin ardından bilim ve teknolojiye hızlı gelişimle birlikte fiziksel ve kimyasal olarak daha iyi özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla, metallerin eritilerek birbirine karıştırılması ile oluşturulan, hem fiziksel hem de kimyasal olarak iyi özellikler gösteren ve ulaşım olarak isimlendirilen yeni malzemeler elde edilmiştir.

Klasik tekniklerle üretilen bu metal alaşımlar genellikle kristal yapı göstermektedirler. Bir başka ifadeyle bu malzemelerde atomlar, uzun ölçekte birbirini tekrar eden, periyodik bir dizilime sahiptirler. Amorf yapıya sahip malzemelerin atomları ise kristallerin aksine uzun ölçekte birbirini tekrar eden periyodik bir dizilime sahip değildirler. Atomları gelişigüzel bir dağılıma sahip olup, kristal yapıdaki malzemelere göre farklı özellikler gösterirler.

1960 yılında Duwez ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışma (Suryanarayana ve Inoue 2011) bu alanda devrim yaratacak sonuçlar ortaya koymuştur. Duwez ve arkadaşları sentezlemiş oldukları bir metal alaşımı yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıttıktan sonra çok hızlı bir şekilde katılaştırarak yeni ve ilginç özelliklere sahip malzemeler ürettiler. Bu malzemelerin yapısal özellikleri incelendiğinde tamamen amorf yapıda oldukları görülmüştür. Böylece modern anlamda ilk defa hızlı katılaştırma tekniği kullanılarak metalik amorf malzemelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Metalik amorf malzemeler, sanayi tipi camlarda olduğu gibi yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra malzemenin kristalleşmesine izin verilmeden çok yüksek hızlarda soğutulmuş olarak elde edilmektedirler. Bu yüzden metalik amorf malzemeler literatürde kısaca metalik cam olarak adlandırılırlar. Kristal yapıya sahip metallerin aksine metalik camlar, geniş bir kompozisyon aralığında yapısal olarak izotropik, kimyasal olarak homojen yapıdadırlar (J.P. Chu ve ark. 2010).

Metalik camlar yüksek sertlik, yüksek kırılma dayanımı, yüksek elastik limit, yüksek korozyon direnci ve kolay şekillendirilebilme gibi özelliklerinin yanında, mükemmel manyetik özellikleri sayesinde son yıllarda ilgiyi üzerinde toplamayı başarmıştır.

Metalik camlar üstün, mekanik, kimyasal ve manyetik özelliklere sahip olmalarına rağmen, cam oluşumu için yüksek soğuma oranları gerektiğinden boyutları sınırlı halde kalmıştır. Bu durum onların sanayi ve teknolojik alandaki olası uygulama alanlarını kısıtlamıştır. Bu güne kadar metalik camların çubuk, şerit ve ince film gibi küçük boyutlarda üretimleri gerçekleştirilebilmiştir. Araştırmacılar bu durumun üstesinden gelmek için uzun

yıllardır hem daha yüksek camlaşma yeteneğine sahip yeni alaşımlar hem de camlaşma yeteneğini arttıracak yeni yöntemler üzerinde durmaktadırlar.

Alaşımların bir alttabaka üzerinde büyütülmesi ile elde edilen ince filmlerin kendisini oluşturan elementlerden çok farklı özellikler gösterdiği bilinmektedir. Bilim ve teknoloji açısından büyük öneme sahip olan ince filmler günümüzde bilişim, askeri, sağlık ve otomotiv gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Amorf yapıya sahip ince filmler, metalik cam ince film olarak isimlendirilirler. Metalik cam ince filmlerin üretiminde, klasik metalik camlardan farklı olarak yüksek soğuma oranlarına ihtiyaç yoktur. Bununla birlikte, daha iyi camsı yapıya sahip metalik cam ince filmler üretmek için düşük alttabaka sıcaklığı ve yüksek kaplama oranı gerekmektedir (Ohring 1992). Metalik cam ince filmler iyi manyetik ve mekaniksel özelliklere sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde sensör uygulamaları başta olmak üzere manyetik kayıt ortamları ve mikro elektromekanik sistemler (MEMS) gibi pek çok uygulama alanına sahiptirler.

Bu tez çalışması kapsamında, hızlı katılaştırma yöntemleriyle daha önceden çubuk ve şerit şeklinde üretilen $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ kimyasal kompozisyonuna sahip metal alaşımlar, termiyonik vakum ark (TVA) yöntemi ile ince film olarak üretilmiştir. Farklı kalınlıklarda üretilmiş olan Fe-Co esaslı metalik cam ince filmlerin manyetik ve yapısal özelliklerinin film kalınlığı ve ısıl işlem ile değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Tez, Giriş, Kuramsal Temeller, Materyal ve Yöntem, Araştırma Bulguları ve Tartışma ve Sonuç olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde tezin kapsamı, yapılan çalışmalar ve tezin bölümleri hakkında bilgilendirmeler yapılmıştır. İkinci bölümde Kuramsal Temeller başlığı altında, amorf malzemelerin yapısı, metalik camın tanımı ve tarihçesi, ince film teknolojisi ve metalik cam ince filmler üzerinde durulmuştur. Materyal ve Yöntem olarak adlandırılan üçüncü bölümde ise malzemelerin üretim teknikleri ve yapılan deneysel çalışmaların detayları verilmiştir. Ayrıca örneklerin yapısal ve manyetik olarak incelenmesinde kullandığımız ölçüm sistemleri olan, X-ışını kırınımı (XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve titreşimli örnek manyetometresi (VSM) teknikleri kısaca tanıtılmıştır. Dördüncü bölüm olan Araştırma Bulguları ve Tartışma'da üretilen ince filmlerin X-ışını kırınımı, atomik kuvvet mikroskobu ve titreşimli örnek manyetometresi ile incelenmesi sonucunda elde edilen veriler sunulmaktadır. Sonuç bölümünde ise elde edilen veriler yorumlanmaktadır.

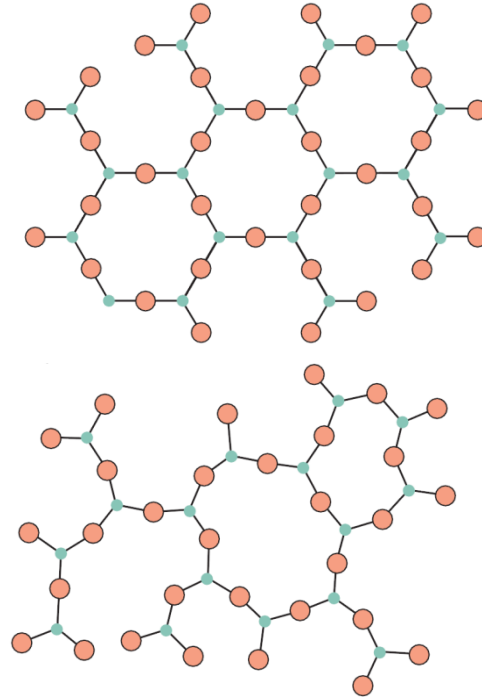
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Amorf Malzemelerin Yapısı

Atomların dizilimine bağlı olarak, maddelerin özellikleri ve mikroyapıları farklılık göstermektedir. Bu nedenle maddeleri atomlarının dizilişlerine göre 2 grupta sınıflandırabiliriz. Bu sınıflandırma şu şekildedir:

- (a) Kristal yapıya sahip maddeler
- (b) Amorf yapıya sahip maddeler

İdeal bir durumda kristal yapıya sahip malzemelerde, atomlar uzun ölçekte birbirini tekrar eden, periyodik bir dizilime sahiptirler. Maddenin üç boyutlu olduğunu düşündüğümüzde bu mükemmel dizilim tüm boyutlarda görülmektedir (Kittel 2005). Amorf yapıya sahip maddelerin atomları ise, kristallerin aksine uzun ölçekte birbirini tekrar eden periyodik bir dizilime sahip değildirler. Bu malzemeler göstermiş oldukları bu atomik yerleşim nedeniyle “şekilsiz” anlamına gelen amorf terimi ile adlandırılırlar. Şekil 2.1'de kristal ve amorf yapıya sahip malzemelerin, iki boyutta şematik atom dizilimleri verilmiştir.



Şekil 2.1. (a) Kristal (üstte) ve (b) Amorf (altta) yapıya sahip malzemelerin atom dizilimlerinin şematik gösterimi.

Amorf maddelere makro ölçekte bakıldığında, atomları gelişigüzel bir dağılımdadır. Bunun yanında bu malzemeler, atomik boyutta incelendiğinde kendi aralarında bir düzene sahiptirler. Çünkü iki atom ne tipik bir bağ mesafesinden yakın ne de birkaç en yakın komşu atom mesafesinden uzak olamaz (Miller ve Liaw 2008). Gaz halinde atomlar ve moleküller rastgele serbest halde dolaşırlar. Gazlar buldukları kabın şeklini aldıkları için atomları veya molekülleri arasında herhangi bir ilişki yoktur. Benzer şekilde sıvılar da gazlar gibi buldukları kabın şeklini alırlar. Bu yüzden sıvıların atom ve moleküllerinin kristaller gibi düzenli ve sıralı bir yapıda olduğunu söylemek mümkün değildir. Sıvılar ve gazlar, düzensiz atom dizilişleri sebebiyle amorf yapıya sahip malzemelere iyi birer örnek teşkil etmektedirler (Christman 1988). Amorf haldeki katı malzemeler dış görünüş olarak bir katı, atomik düzen olarak ise bir sıvı malzeme görünümündedirler (Turton 2005). Bununla birlikte amorf malzemeler yapısal farklılıklarından ötürü kristal yapıdaki malzemelere göre farklı özellikler gösterirler.

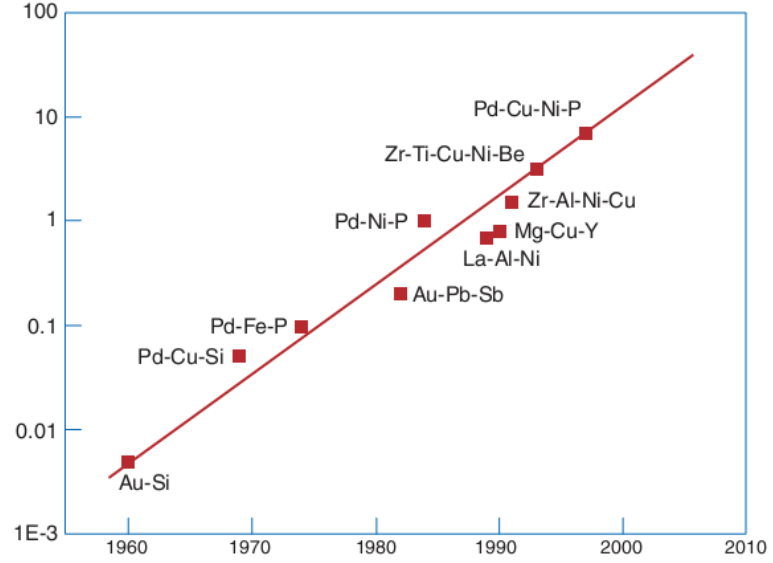
Literatürde amorf yapıya sahip katı malzemeler veya metaller, oluşum süreçlerine bağlı olarak amorf katılar, vitrifiye edilmiş sıvılar, kristal olmayan katılar, düzensiz katılar, aşırı soğutulmuş sıvılar, yarı kararlı malzemeler, metalik camlar ve camsı metaller olarak adlandırılmaktadır (Suryanarayana ve Inoue, 2011). Günümüzde malzemelerin amorf ya da kristal yapıya sahip olduğunu belirlemek için X-ışını, elektron ve nötron kırınımı gibi tekniklerden faydalanılmaktadır.

2.2 Metalik Cam ve Tarihçesi

Teknolojik ve bilimsel açıdan oldukça büyük bir ilgiye sahip olan metalik camlar amorf katıların bir sınıfını oluştururlar. Metalik cam, adını günlük yaşamımızda kullandığımız camlardan almaktadır. Cam, kristal yapıya sahip kuartz kum ya da silisyum dioksitin eritilmesiyle elde edilen eriyiğin, tekrar kristal yapıya dönüşmesine izin verilmeden soğutulmasıyla üretilen amorf yapıya sahip bir katıdır. Benzer şekilde bir alaşım yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra çok hızlı bir şekilde soğutulduğunda alaşımın atomları kendilerini düzenli bir yapıya dönüştürecek kadar zaman bulamazlar ve amorf yapıya hapsolürler. Cam yapının oluşmasında kullanılan alaşımın elementlerinin çoğunun metal olması nedeniyle bu malzemeler metalik cam olarak adlandırılırlar. Metalik camlar içerisinde bulunan temel elementlerin isimleri ile anılırlar. Örneğin alaşım içerisinde yüksek miktarda Fe bulunuyorsa Fe esaslı ya da Fe ve Co bulunuyorsa Fe-Co esaslı alaşımlar olarak isimlendirilirler. Günümüzde metalik camların üretim yöntemlerine göre, silindir şekilde çubuk, şerit, levha ve ince film olarak üretimi yapılmaktadır.

1960 yılında Duwez ve Klement bir $Au_{75}Si_{25}$ alaşımı sentezlemiş ve daha sonra bu alaşımı yaklaşık 10^6 K/s gibi yüksek bir soğuma oranıyla katılaştırmışlardır. Elde edilen bu malzemenin kristal yapısını incelediklerinde, alaşımın amorf yapıda olduğunu gözlemişlerdir. Bu çalışmadan birkaç yıl sonra Chen ve Turnbull Pd-Si-N (N= Ag-Cu ya da Au) üçlü alaşım sisteminin amorf kürelerini yapmayı başardılar. Bu çalışma yardımıyla, $Pd_{77,5}Cu_6Si_{16,5}$ alaşımın 0,5 mm çapında camsı yapıda üretilebileceğini ve cam geçişi (ΔT_x) adı verilen faz geçişinin varlığını kanıtladılar (Löffler 2003). Bunlara ek olarak, Chen 1974'te Pd-T-P alaşımları (T= Ni, Co, Fe) üzerine yapmış olduğu çalışmalarda bu alaşımların 1 mm kritik kalınlığında üretilebileceğini buldu. 1982 yılında Turnbull grubu yeniden Pd-Ni-P alaşımlar üzerine çalışmalar yaptı ve $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ alaşımının 5 mm çapında metal cam üretmeyi başardılar (Wang ve ark. 2004). 1980'lerin sonunda Japonya'da Inoue grubu nadir toprak elementleri ile hızlı katılma üzerine çalışırken La-Al-Ni ve La-Al-Cu alaşımların çok iyi camlaşma yeteneğine sahip olduğunu gördüler. Çalışmaları sırasında $La_{55}Al_{25}Ni_{20}$ alaşımının Cu kalıba dökülmesi ile tamamen camsı yapıda yarıçapı 5 mm'yi bulan silindir örnekler veya benzer kalınlıkta levhalar ürettiler. 1991'de yine aynı grup, camsı Mg-Cu-Y ve Mg-Ni-Y alaşımlarını geliştirmişlerdir. Bununla birlikte yüksek camlaşma yeteneği ve ısıl kararlılığa sahip Zr esaslı Zr-Al-Ni-Cu metalik camların 15 mm kritik kalınlıkta üretimini gerçekleştirdiler (Löffler 2003). 1993'te Peker ve Johnson $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$ beşli alaşımlarından 5 cm çubuk ve birkaç santimetrelik kritik kalınlığa sahip levha halinde üretimini başardılar (Johnson 1996). 1997'de Inoue grubu gelişen teknolojik imkanlar ile birlikte $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ alaşımları tekrar ele aldı ve kritik kalınlığı 72 mm olan yeni $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ alaşımlar geliştirildi. Pd-Cu-Ni-P alaşım sistemleri, bugüne kadar bilinen en yüksek camlaşma yeteneğine sahip metalik sistemlerdir (Inoue 2000). Şekil 2.2'de günümüze kadar üretilen metalik camlar ve kritik kalınlıkları gösterilmiştir.

Metalik camların ince film şeklinde üretimleri de oldukça ilgi çeken bir konu dur. Bu zaman kadar Pd-, La-, Co-, Zr-, Ti-, Cu- ve Fe- esaslı pek çok metalik cam ince film üretilmiştir.



Şekil 2.2. Keşfedilmesinden günümüze, kritik kalınlığın fonksiyonu olarak metalik camlar (Telford 2004)

Şekil 2.2'de de görüldüğü gibi, keşfedilmelerinden bu zamana kadar pek çok alaşım sisteminin üretimi başarılı olmuş olmasına rağmen metal cam oluşumu için gerekli olan şartlar hakkında kesin bir yargıya ulaşılamamıştır. Bununla birlikte, yapılan tüm çalışmaların değerlendirilmesiyle Inoue tarafından oluşturulmuş deneysel kurallar bulunmaktadır (Inoue ve ark. 1998). Buna göre:

- Metalik camların elde edilebilmesi için alaşım, en az üç element içermelidir,
- Alaşımı oluşturan temel elementlerin atom çapları arasında en az %12 fark olmalıdır,
- Alaşımı oluşturan temel elementlerin arasında negatif karışım entalpisi bulunmalıdır.

Alaşım sistemlerindeki bileşenlerin artışı, malzemenin daha kolay camlaşmasına neden olmaktadır. Bu şekilde eriyik haldeki alaşımın hızlı katılaştırma ile camlaşması sırasında elementler daha yüksek potansiyel enerjiye sahip olacak şekilde bir araya gelirler. Kristal yapılar amorf yapılara göre daha kararlı olduklarından bu düzen elementlerin kristal oluşturma olasılığını azaltacaktır (Inoue ve ark. 1998).

Alaşımı oluşturacak temel elementlerin atom çapları arasında en az %12 fark olacak şekilde seçilmesi ile, malzemenin daha yüksek paketleme oranına sahip olması ve cam oluşumu sırasında elementler bir araya gelirken atomlar arasındaki boşlukların azalması sağlanır (Telford 2004).

Bu durum Şu Şekilde açıklanabilir:

Temsili bir A-B-C ul alaşım sistemi düŐünelim. Sistem içerisinde A elementi, en büyük atom yarıçapına sahip element olsun. Amorf yapının oluşması için B elementi atomlarının A elementi atomları arasında bulunan boşluklar arasına girebilecek boyutta olması gerekmektedir. Bir başka deyiŐle, B elementinin atom yarıçapının A elementinin atom yarıçapından kk olması gerekmektedir. Benzer Şekilde malzemenin amorf yapısının arttırılması için, C elementi atomları A ve B elementleri arasında kalan boŐlukları doldurabilecek boyutta olmalıdır. Yani C elementi atom yarıçapının A ve B elementleri atom yarıçaplarından kk olması zorunludur. Kısaca Őunu söyleyebiliriz ki, cam oluşturmak için bir araya gelen elementler arasında belirgin bir uyum olmalıdır. Ancak bu uyumlu düzenin sağladığı durumlarda hacimli metal camları üretmek mümkün olacaktır (Kabaer 2010).

Alaşımı oluşturan temel elementlerin arasında negatif karışım entalpisi olması cam oluŐumunu termal açıdan etkilemektedir. Negatif karışım entalpisi kristal oluŐumunu engeller, malzemenin aşırı soğutulmuş sıvı bölgesinin artmasına neden olur ve atomik yayılma gücünü azaltır (Telford 2004). AŞırı soğutulmuş sıvı bölgesi, cam geçiş sıcaklığı (T_g) ile kristalleşme sıcaklığı (T_x) arasında kalan bölgedir ve bu aralıktaki malzeme kristal yapıya nazaran yarı kararlı bir durumdadır.

Inoue'nin belirlediği deneysel kurallara sahip alaşımların neden yüksek cam oluşturma yeteneğine sahip oldukları araŐtırılmıŐtır. Çok bileŐen içeren amorf alaşımlar için elde edilen deneysel verilere dayanarak, amorf alaşımların yapılarının:

- Yüksek derecede rastgele paketlenmiŐ atomik düzene,
- Kristal fazlardan farklı olan yeni bölgesel atomik dizilime,
- Uzun ölçekte çoklu bileŐenlerinin homojen bir atomik dizilime,

sahip olduğu açıklanmıŐtır (Inoue 2000).

Diğer taraftan, Lin o zamana kadar üretilen Fe esaslı ul alaşım gruplarını inceleyerek daha iyi camlaşma yeteneğine sahip M-Fe-B (M, deėiŐken element) kompozisyonundaki alaşımların elde edilebileceğini ne sürdü. Bu amaçla bazı deneysel kurallar önerdi (Lin 2005). Buna göre:

- M elementi atomik yarıçapı Fe elementi atomik yarıçapının en az % 130'u olmalıdır,
- M elementi Fe ve B'nin her ikisi ile de ötektik noktalara sahip olmalıdır.

Günümüzde, metalik camlar hakkındaki araŐtırmalar önemli ölçüde ilerlemiŐtir. Birçok araŐtırmacı yeni alaşım kompozisyonları ve bu alaşımların mekanik, yapısal, termofiziksel ve

manyetik özelliklerini araştırmaktadır. Amerika'da bulunan İleri Askeri Araştırma Projeleri Kurumu (DARPA) metalik camların mühendislikteki uygulamaları için çalışmalar yapmaktadır. Japonya ve Avrupa 'da metalik camlar üzerine benzer projeler sürdürülmektedir. Ayrıca her yıl dünyanın pek çok ülkesinde metalik camlar hakkında konferans ve sempozyumlar düzenlenmektedir. Şu anki gelişmeler yakın gelecekte metalik camların daha geniş bir uygulama alanı bulacağını göstermektedir (Suryanarayana ve Inoue 2011).

2.2.1 Camlaşma Yeteneği

Metalik camlar belirli bir cam geçiş sıcaklığına (T_g) sahiptirler. Bu sıcaklıkta malzemeler camsı bir yapıya geçiş yaparlar. Ancak cam geçiş sıcaklığının belirli bir üst sınırı bulunmaktadır. Bu sınır sıcaklık değerinde, malzeme kristal yapıya geçiş yapar. Bu sıcaklık kristalleşme sıcaklığı (T_x) olarak adlandırılır. Cam geçiş sıcaklığı ve kristalleşme sıcaklığı arasındaki aralık aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi (ΔT_x) olarak adlandırılır. Aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi,

$$\Delta T_x = T_x - T_g \quad (2.1)$$

bağıntısı ile verilmektedir. ΔT_x değerinin yüksek olması camlaşma yeteneğini arttıran bir unsurdur. Çünkü bu bölgenin genişliği alaşımın kristalleşmeye karşı gösterdiği direncin bir göstergesidir.

Camlaşma yeteneğinin tanımlanmasında kullanılan bir başka parametre ise indirgenmiş cam geçiş sıcaklığıdır (T_{rg}). Bu sıcaklık,

$$T_{rg} = \frac{T_g}{T_m} \quad (2.2)$$

formülü ile verilir. Bir alaşım için T_{rg} değerinin artması cam oluşumu için gerekli soğutma hızının düşmesi ve böylece daha düşük soğutma hızlarında, daha kalın camlar üretilebilmesi anlamına gelir.

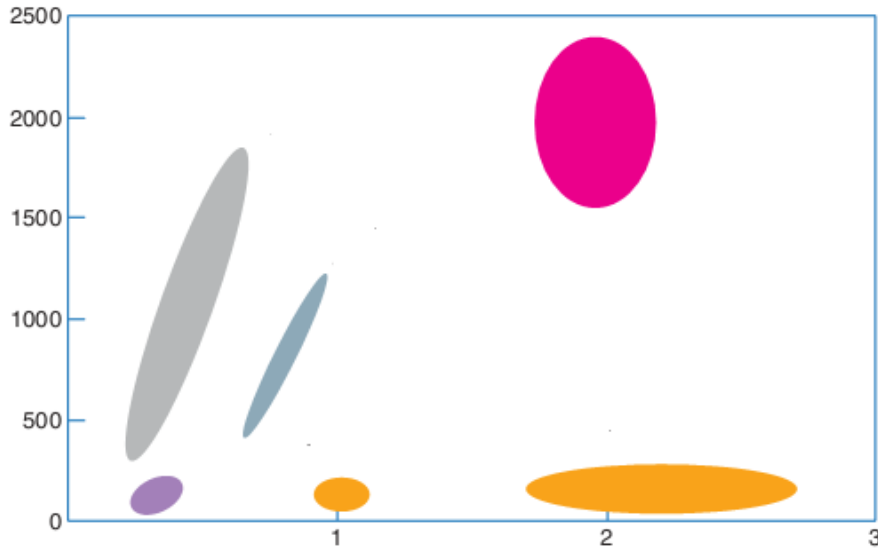
2.3 Metalik Cam İnce Filmler

Amorf yapıya sahip metal ince filmler, genellikle amorf ince film ya da metalik cam ince film olarak adlandırılırlar. Metalik cam ince filmlerin üretiminde, klasik metalik camlardan farklı olarak yüksek soğuma hızlarına ihtiyaç yoktur. Yöntem ve deney şartlarına da bağlı olmakla birlikte, bir alttabaka üzerinde nanometre mertebesinde bir ince film

büyütölmek istenildiğinde, atomlar yüzey üzerine düzenli ve sıralı bir şekilde yerleşmezler. Bu durumda büyütölen ince film belli bir kalınlığa kadar amorf yapıda büyüyecektir. Bunun yanında, yüksek camlaşma kalitesi ve kalınlığına sahip metalik cam ince filmler üretmek için düşük alttabaka sıcaklığı ve yüksek kaplama oranı gerekmektedir (Ohring 1992).

Bu zamana kadar radyo frekans (RF) püskürtme, magnetron radyo frekans (RF) püskürtme, puls lazer kaplama (PLD), vakumla buharlaştırma (VE) yöntemleri gibi pek çok ince film büyütme yöntemi kullanılarak metalik cam ince filmler üretilmiştir (Chu 2010). Metalik cam ince filmler, yüksek kimyasal homojenliğe sahip, kristal kusurları ve grain sınırlarından bağımsız, izotropik malzemelerdir (Wang 2009).

Oda sıcaklığında yüksek korozyon direnci, yüksek dayanıklılık, yüksek sertlik, kırılma dayanımı, yüksek elastik limit gibi eşsiz fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin yanında, umut verici manyetik, manyeto elastik, manyeto-optik özelliklere sahiptirler (Phan 2010, Hamidi 2008, Dobromir 2008). Metalik cam ince filmler sahip oldukları bu manyetik ve mekaniksel özellikleri sayesinde, minyatürize edilmiş gelişmiş manyetik cihazlar, otomotiv parçaları, mikrodalga cihazlar, bilgisayar hard disk sürücöleri, CD, DVD ve sensör, manivela, membran, mikroprob uçları gibi mikro elektromekaniksel sistemler (MEMS) gibi uygulama alanlarına sahiptirler (Sellmyer ve Skomski 2006, Phan 2010, Neagu 2005). Şekil 2.3'te, metalik camların mekaniksel uygulamalarda tercih edilmelerinde büyük rol oynayan dayanıklılık ve elastik limit özellikleri diğere sistemler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.3 Camlı alaşımlar ile bazı malzemelerin dayanıklılık ve elastik limitlerinin karşılaştırılması (Telford 2004)

2.4 Metalik Camların Manyetizması

Bu bölümde manyetizmanın temel kavramları ve üretilen manyetik malzemelerin bazı manyetik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

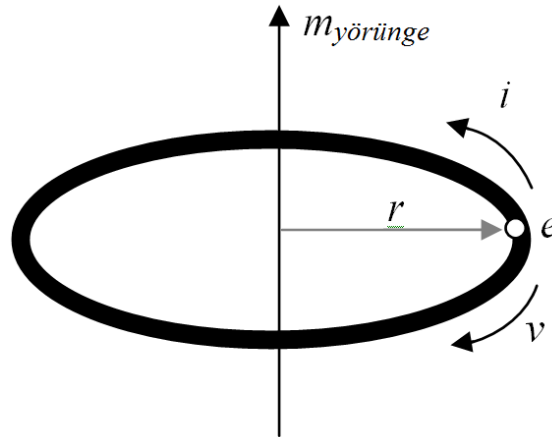
2.4.1 Manyetizmanın Temel Kavramları

Manyetik alan (H), elektronların hareketi sonucu oluşmaktadır. Bir iletken üzerindeki elektrik akımı manyetik alan kaynağıdır. Ayrıca manyetik alan sabit bir mıknatısla da oluşturulabilir. Bu durumda elektrik akımı yoktur. Fakat sabit mıknatısın içindeki elektronların yörüngesel ve spin hareketleri vardır. Manyetik alan, hem akım taşıyan bir iletkende hem de sabit bir mıknatısta bir kuvvet oluşturmaktadır (Jiles 1991).

Akımla bir ortamda manyetik alan oluşturulduğu zaman ortamın tepkisi manyetik akı yoğunluğudur (B). Uzayda nerede bir manyetik alan varsa orada manyetik akı (Φ) var demektir. 1 metrekarelik alanda 1 Weber'lik manyetik akının oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu 1 Tesla'dır. Manyetik indüksiyon ile manyetik alan arasındaki ilişki, ortamın manyetik geçirgenliği (μ) olarak isimlendirilir. Manyetik indüksiyon ile manyetik alan ilişkisi (Denklem 2.3.) ile verilebilir (Jiles 1991).

$$B = \mu H \quad (2.3.)$$

Malzemelerin manyetik özellikleri, temel olarak atomik manyetik momentlerden kaynaklanmaktadır. Atomik manyetik momentlerinin varlığı ise, elektronun çekirdek etrafında yaptığı yörüngesel hareket ve kendi eksenini etrafında dönmesinden dolayı oluşan spin hareketine dayanır. Elektronun çekirdek etrafındaki yörüngesel hareketi, Şekil 2.4'te gösterilen akım ilmeğindeki r yarıçaplı bir yörüngede v hızıyla dolanan akıma benzetilebilir.



Şekil 2.4. Bir akım halkasındaki elektronun hareketi

Bu hareket nedeniyle bir elektronun sahip olduğu manyetik moment (m) :

$$m_{yörünge} = iA \quad (2.4.)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. i akımı, A akım ilmeğinin yüzey alanını ifade eder. Çekirdek etrafında dolanan bir elektronun oluşturduğu akım ise,

$$i = \frac{e}{T} \quad (2.5.)$$

ile verilir. e elektronun yükü, T elektronun yörünge etrafındaki hareketi için periyottur. T dolanım periyodu:

$$T = \frac{ev}{2\pi r} \quad (2.6.)$$

ifadesi Denklem (2.5.)'te yerine yazılırsa oluşan akım

$$i = \frac{ev}{2\pi r} \quad (2.7.)$$

şeklini alır. Böylece yörüngesel harekete bağılı manyetik moment:

$$m_{yörünge} = iA = \frac{evr}{2} \quad (2.8.)$$

olur. Manyetik moment elektronun yörünge açısal momentumu cinsinden ifade edilebilir. Elektronun yörünge açısal momentumu:

$$L_{yörünge} = mvr \quad (2.9.)$$

olduğundan, yörüngesel manyetik moment

$$m_{yörünge} = \frac{e}{2m} L_{yörünge} \quad (2.10.)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada m elektron kütesidir. Benzer olarak spinin manyetik momenti,

$$m_{spin} = \frac{e}{m} L_{spin} \quad (2.11.)$$

olan bir elektronun toplam manyetik momenti:

$$m_T = m_{yörünge} + m_{spin} \quad (2.12.)$$

olur. Mıknatıslanma (M), malzemelerin birim hacminde sahip oldukları net manyetik momenti tanımlamak için kullanılır:

$$M = \frac{m}{V} \quad (2.13.)$$

M mıknatıslanma, m net manyetik moment, V malzemenin hacmidir. B , H ve M arasındaki ilişki,

$$B = \mu_0 (H+M) \quad (2.14.)$$

ile verilir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini temsil eder ve değeri $4\pi 10^{-7}$ H/m'dir. Bir malzemenin uygulanan manyetik alan (H) ile mıknatıslanması (M) arasındaki ilişki,

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.15.)$$

dir. Burada χ alınganlıktır ve bir manyetik malzemenin mıknatıslanma yeteneği olarak tanımlanır.

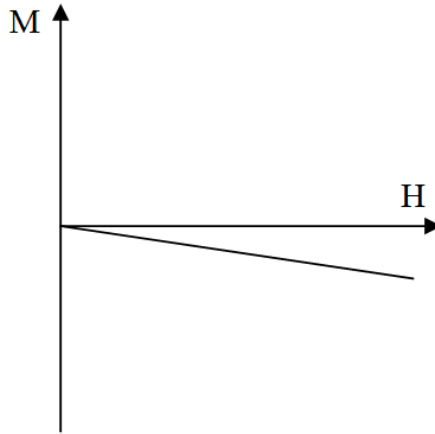
2.4.2 Manyetik Malzemeler

Manyetik alana maruz kaldıklarında az ya da çok mıknatıslanabilen malzemelere '*manyetik malzemeler*' denir. Manyetik malzemeler sahip oldukları alınganlık değerlerine göre sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırma şu şekilde oluşur:

- Diamanyetik malzemeler
- Paramanyetik malzemeler

➤ Ferromanyetik malzemeler

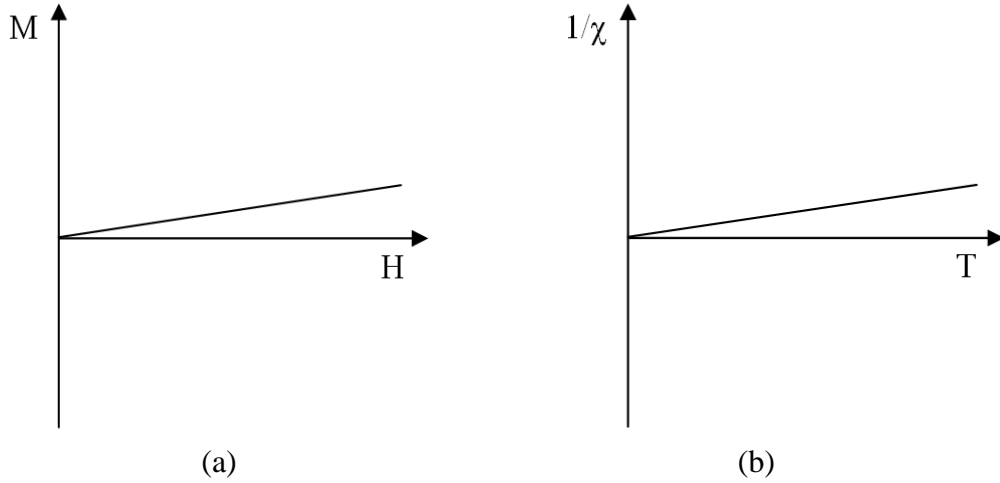
Manyetik alana konulduklarında, manyetik alanla ters yönde mıknatıslanma gösteren malzemelere diamanyetik malzemeler denir. Bu malzemelerin alınganlıkları negatif ve yaklaşık 10^{-5} büyüklüğünde olup net manyetik momentleri dış manyetik alan uygulanmadığında sıfırdır. Maddeye dış bir manyetik alan uygulandığında manyetik indüksiyon nedeniyle maddenin atomlarında ekstra akımlar üretilir. Lenz kanununa göre, indüklenen bu akımlar uygulanan manyetik alanla zıt yöndedirler. Bu yüzden diamanyetik malzemelerde manyetik momentler uygulanan manyetik alana zıt olarak yönelirler. Uygulanan manyetik alanın artırılması durumunda zıt yönde oluşan manyetik moment de artar. Ayrıca diamanyetik malzemelerin alınganlıklarının değişimi sıcaklıktan bağımsızdır. (Spaldin 2011, Gignoux ve Schlenker 2005). Diamanyetik malzemelere bakır, altın, bizmut ve berilyum örnek olarak verilebilir. Şekil 2.5'te diamanyetik malzemelerde uygulanan manyetik alanla mıknatıslanmanın değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5 . Diamanyetik malzemelerde uygulanan manyetik alan ile mıknatıslanmanın değişimi

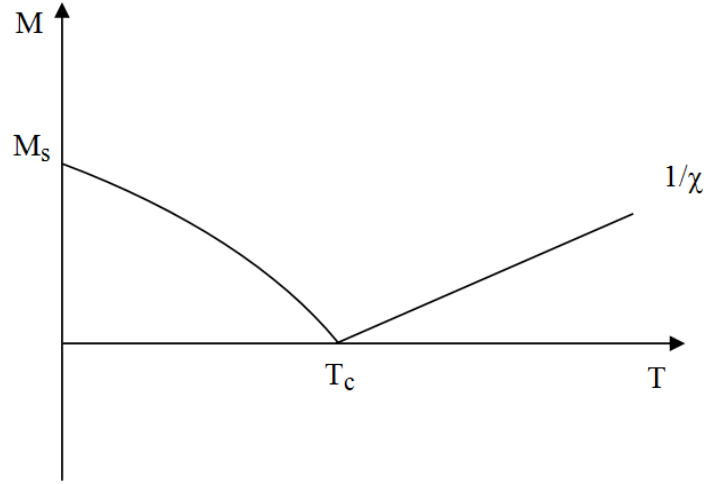
Paramanyetik malzemelerde alınganlığın büyüklüğü 10^{-2} ile 10^{-5} arasında değişmektedir. Paramanyetik malzemeler, uygulanan manyetik alan ile aynı yönde fakat zayıf bir mıknatıslanma gösterirler. Net bir manyetik momente sahip olmayan bu malzemelerde, uygulanan dış manyetik alan arttıkça, alanla aynı yönde net bir mıknatıslanma oluşur. Uygulanan manyetik alanın kaldırılması ile birlikte manyetik momentler eski hallerine dönerler. Paramanyetik malzemelerde mıknatıslanmanın sıcaklıkla değişimi Curie-Weiss yasası ile açıklanmaktadır. Bu teoriye göre paramanyetik malzemelerde alınganlık ile sıcaklık

ters orantılıdır (Spaldin 2011, Gignoux ve Schlenker 2005, Chikazumi 1997). Alüminyum, platin ve manganer paramanyetik olarak bilinen malzemelerdendir. Paramanyetik malzemelerde uygulanan manyetik alan ile mıknatıslanmanın değışimi Şekil 2.6a'da, sıcaklık ile alınganlığın değışimi ise Şekil 2.6b'de gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Paramanyetik malzemelerde (a) uygulanan manyetik alan ile mıknatıslanmanın değışimi, (b) sıcaklık ile alınganlığın değışimi

Manyetik malzemelerin bir başka çeşidi olan ferromanyetik malzemeler, güçlü manyetik özellikleri ile ön plana çıkarlar. Ferromanyetik malzemelerde alınganlığın büyüklüğü diamanyetik ve paramanyetik malzemelerin aksine sıfırdan oldukça büyüktür ve 50 -100000 arasında değışmektedir. Ferromanyetik malzemelerde domainlerin içerisindeki manyetik momentler birbirine paralel olarak yönelmiştir. Böylece komşu momentler arasında kuvvetli bir etkileşme vardır. Bu kuvvetli etkileşme, ferromanyetik malzemeyi kendiliğinden doyum mıknatıslanması değerine ulaştırır. Bu malzemelerin alınganlığının sıcaklık ile değışimi Curie-Weiss kuramı ile açıklanmaktadır. Buna göre ferromanyetik malzemelerde mıknatıslanma sıcaklık arttıkça azalır ve belli bir sıcaklık değerinde sıfır olur. Bu sıcaklığa Curie sıcaklığı (T_c) adı verilmektedir. Bu sıcaklıktan sonra mıknatıslanma tekrar artar ve madde paramanyetik özellik gösterir. Demir, nikel, kobalt ve bunların alaşımları en iyi bilinen ferromanyetik malzemelerdir (Chikazumi 1997, Küçük 2003). Şekil 2.7'de ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanmasının sıcaklık ile değışimi verilmiştir.



Şekil 2.7. Ferromanyetik malzemelerin sıcaklık ile mıknatıslanmasının değişimi

2.4.3 Histeresis Eğrisi ve Özellikleri

Ferromanyetik malzemelerde manyetik alınganlık diamanyetik ve paramanyetik maddelerde olduğu gibi doğrusal olarak değişmez. Bu yüzden ferromanyetik malzemelerin manyetik özellikleri histeresis eğrileri yardımı ile belirlenmektedir. Histeresis eğrisi, ferromanyetik bir malzemeye uygulanan dış manyetik alan ile malzemede oluşan manyetik indüksiyon (B) ya da mıknatıslanma (M) değişimini göstermektedir.

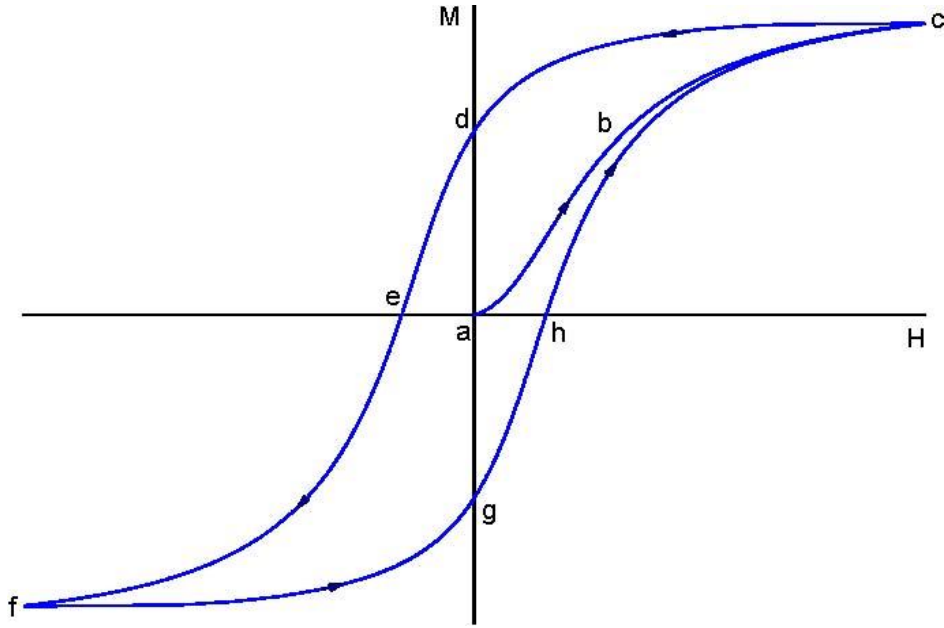
Ferromanyetik malzemeler gelişmiş manyetik özelliklerinden dolayı teknolojiye, sanayide ve elektronikte önemli uygulama alanlarına sahiptirler. Ferromanyetik maddelerin uygulama için elverişliliği, temel olarak oluşturdukları histeresis eğrisinin gösterdiği özellikten belirlenmektedir. Örneğin, transformator çekirdekleri için yüksek geçirgenlik ve düşük histeresis kaybının olması gerekir. Bu sayede elektrik enerjisinin dönüşümü daha verimli olmaktadır (Küçük 2003).

Daha önce mıknatıslanmamış veya mıknatıslanması sıfırlanmış ferromanyetik malzemeye dış bir manyetik alan uygulandığında, M mıknatıslanması (ya da B manyetik indüksiyonu) doğrusal olmayan bir şekilde yavaşça artmaya başlar ve Şekil 2.8'de gösterildiği **abc** yolunun takip eder. Bu noktadan sonra malzemeye uygulanan manyetik alan ne kadar arttırılırsa arttırılsın, malzemenin M mıknatıslanması ya da B manyetik indüksiyonu belirli bir değerde sabit kalacaktır. Bu değere “doyum mıknatıslanması” (M_s) ya da “doyum manyetik indüksiyonu” (B_s) denir. Malzeme manyetik doyum ulaştığında, malzeme içerisindeki bütün manyetik momentler uygulanan manyetik alanla aynı yönde yönelirler. Doyum mıknatıslanması atomik manyetik momentlerin (m) büyüklüğüne ve birim hacimdeki atom sayısına (N) bağlıdır (Denklem 2.16.).

$$M_s = Nm$$

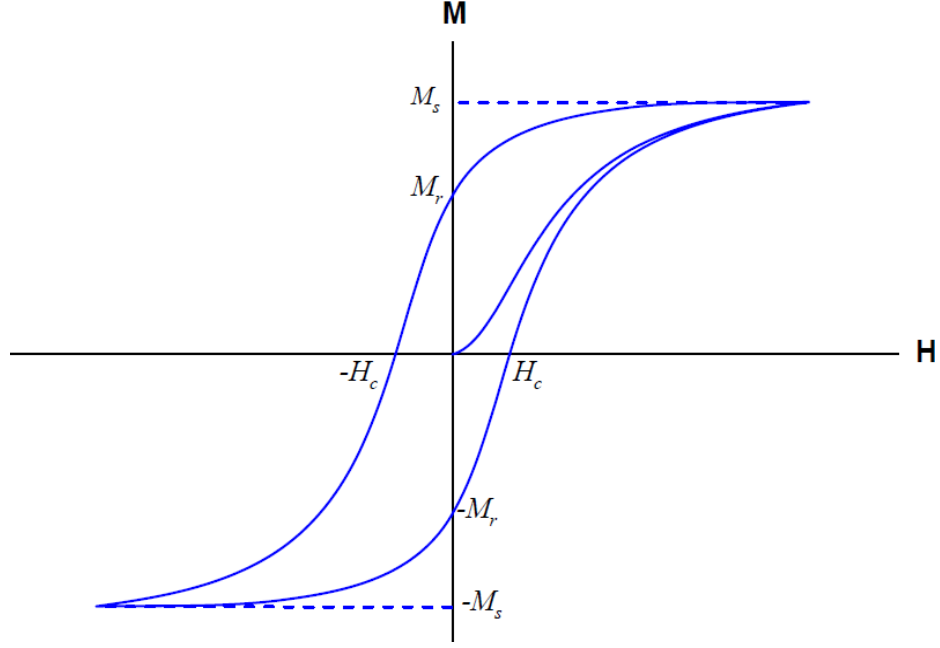
$$(2.16.)$$

Malzeme, manyetik olarak doyuma ulaşmasının ardından manyetik alan azaltılmaya başladığında, mıknatıslanma **cdef** yolunu izler ve ters yönde doyuma ulaşır. Bu noktadan sonra manyetik alan tekrar arttırılırsa mıknatıslanma **fghc** yolunu takip eder ve histeresis eğrisi tamamlanmış olur. Ferromanyetik malzemelerin histeresis eğrileri tamamıyla simetriktir (Hacıismailoğlu 2011).



Şekil 2.8. Ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanarak histeresis eğrisinin oluşumu

Şekil 2.9'da tipik bir histeresis eğrisi ve bu eğri üzerindeki özel noktalar verilmiştir. Mıknatıslanan bir ferromanyetik malzeme üzerine uygulanan manyetik alan kaldırılırsa bile manyetik momentler kısmen yönelimlerini kaybetmezler, yani üzerlerinde belli bir mıknatıslanma ya da manyetik indüksiyon değeri kalır. Bu değere “*kalıcı mıknatıslanma*” (M_r) ya da “*kalıcı manyetik indüksiyon*” (B_r) denir. Malzeme üzerinde kalan kalıcı mıknatıslanma ya da kalıcı manyetik indüksiyon değerini sıfırlamak için ters yönde bir manyetik alan uygulanması gerekmektedir. Bu manyetik alan değerine “*sıfırlayıcı alan*” (H_c) adı verilmektedir (Cullity ve Graham 2009, Torre 1999).



Şekil 2.9. Ferromanyetik malzemenin histeresis eğrisi

Ferromanyetik malzemelerin histeresis eğrilerinin çevrelediği alan, o malzemenin manyetik güç kayıplarını vermektedir. Histeresis alanının geniş olması, manyetik güç kayıplarının büyük olduğu anlamına gelmektedir.

2.4.4 Ferromanyetik Malzemelerin Sınıflandırılması ve Uygulama Alanları

Ferromanyetik malzemeler sıfırlayıcı alan değerlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekilde oluşur:

- ❖ Yumuşak manyetik malzemeler
- ❖ Sert manyetik malzemeler

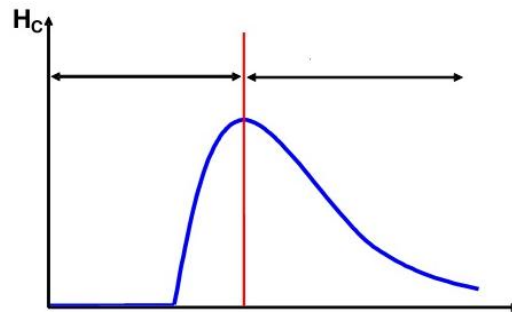
Sıfırlayıcı alan değerleri 1 kA/m (12.5 Oe) değerinin altında olan ferromanyetik malzemeler yumuşak manyetik malzeme olarak adlandırılırlar. Bu malzemeler transformatör çekirdekleri, dinamolar, jeneratörler, motorlar, sensörler, güvenlik aletleri ve mikrodalga sistemlerin parçaları gibi uygulama alanlarına sahiptirler (Gignoux ve Schlenker 2005).

İdeal bir yumuşak manyetik malzemenin, mümkün oldukça düşük sıfırlayıcı alan, yüksek doyum mıknatıslanması ve yüksek manyetik geçirgenlik değerlerine sahip olması gerekmektedir. Yumuşak manyetik malzemelerin histeresis eğrilerinin altında kalan alan küçüktür. Bu yüzden bu malzemelerin manyetik güç kayıpları da azdır (Gignoux ve Schlenker 2005). İyi bilinen yumuşak manyetik malzemelere %3 oranında Si eklenmiş Fe, nanokristal malzemeler, FeNiCo alaşımlar, (MnZnO)Fe₂O₃ ve (NiZnO)Fe₂O₃ gibi ferritler örnek olarak verilebilir (Cullity ve Graham 2009).

Sıfırlayıcı alan değerleri 1 kA/m (12.5 Oe) değerinin üzerinde olan ferromanyetik malzemelere sert manyetik malzeme ya da kalıcı mıknatıs adı verilir. Sert manyetik malzemelerin histeresis eğrilerinin altında kalan alan büyüktür. Bu yüzden bu malzemelerin manyetik güç kayıpları fazladır. Bu tür malzemeler elektrik motorları, manyetik kayıt ortamları, jeneratörler, hoparlör gibi kalıcı mıknatıslanma gerektiren yerlerde kullanılırlar (Gignoux ve Schlenker 2005).

2.4.5 Manyetik Domainler ve Nano Yapıların Manyetizması

Manyetik domainler, çok sayıda atomik manyetik momentin bir araya gelerek oluşturdukları bölgelerdir. Bu bölgeler içerisindeki manyetik momentlerin hepsi birbirine paralel olarak aynı yönde yönelmiş durumdadırlar. Bu nedenle domainler içerisindeki mıknatıslanma tek biçimli ve M_s değerine eşittir. Manyetik anizotropi ise dış bir manyetik alan yokken manyetik domainlerin tercihli bir yön boyunca yönelmesi durumudur. Mıknatıslanmanın kolay olduğu yön “kolay eksen”, zor olduğu yön ise “zor eksen” olarak adlandırılır (Cullity ve Graham 2009). Başlıca bilinen anizotropi çeşitleri magnetokristal anizotropi, magnetoelastik anizotropi ve şekil anizotropisidir. Yapılan deneysel çalışmalar, malzeme içerisinde oluşan domain sayılarının manyetik özelliklerin değişiminde etkili olduğunu göstermiştir. Nano boyutta, parçacık içerisinde belli bir kalınlığa kadar tekli domainler oluşmaktadır. Tekli domain malzeme üzerinde manyetik anizotropi oluşmasına ve sıfırlayıcı alanın artmasına neden olmaktadır. Kalınlık arttıkça domain çok fazla sayıda molekül sayısına ulaşır ve kararsız hale gelir. Domainler her zaman en az enerjiye sahip olmak ister. Bu yüzden parçacık belirli bir kalınlık sonrasında birbirine zıt yönelime sahip iki domaine ayrılır ve daha kararlı bir hale geçer. Bu kritik kalınlık (D_k) değerinde malzeme en yüksek sıfırlayıcı alan değerine sahip olmaktadır. Bu kritik kalınlık sonrasında malzemenin sıfırlayıcı alan değeri azalmaktadır. Parçacık büyüklüğü ile sıfırlayıcı alanın değişimi Şekil 2.10'da verilmiştir (Daliya 2006).



Şekil 2.10. Sıfırlayıcı alan değerinin parçacık büyüklüğü ile değişimi

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölüm genel olarak yapılan deneysel çalışmalar hakkında bilgiler vermektedir. Bu çalışmalar, üretim yöntemi ve ölçüm sistemleri başlıkları altında özetlenmiştir. Üretim yöntemi bölümünde istenen alaşımdaki elementlerin seçimi ve hazırlanışı, alaşımların ark eritme cihazı ile üretimi, ince filmlerin Termiyonik Vakum Ark (TVA) yöntemi ile oluşturulması ve üretilen metalik cam ince filmlere uygulanan ısıl işlem anlatılmıştır. Ardından ölçüm sistemleri bölümünde, üretimleri gerçekleştirilmiş olan metalik cam ince filmlerin yapısal ve manyetik olarak incelenmesinde kullanılan ölçüm sistemleri ve temel çalışma prensiplerine değinilmiştir. Üretilen malzemenin amorf yapıda olup olmadığının belirlenebilmesi için X-ışını Kırınımı (XRD) ve yapısal özellikleri atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak belirlenmiştir. Ardından manyetik özelliklerinin incelenmesinde Titreşimli Örnek Manyetometrisi (VSM) kullanılmıştır. Son olarak yapılan ısıl işlem hakkında bilgi verilmiştir.

3.1 Üretim Yöntemi

3.1.1 Alaşımdaki Elementlerin Seçimi ve Hazırlanışı

Üretimi amaçlanan ince filmler için $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ kimyasal kompozisyonuna sahip bir alaşım hazırlanmıştır. Kullanılan elementlerin bazı fiziksel ve manyetik özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Alaşım elementlerinin bazı fiziksel ve manyetik özellikleri

Alaşım elementi	Atom numarası	Atom ağırlığı (g/mol)	Yoğunluk (g/cm^3)	Manyetik özelliği
Demir (Fe)	26	55.8470	7.87	Ferromanyetik
Kobalt (Co)	27	58.9332	8.96	Ferromanyetik
Bor (B)	5	10.8110	2.08	Diamanyetik
Silisyum (Si)	14	28.0855	2.33	Diamanyetik
Molibden (Mo)	42	95.9400	10.28	Paramanyetik
Tungsten (W)	74	183.8400	19.25	Paramanyetik

Bu çalışmada, ince filmlerin yüksek manyetik özellik göstermesi istenildiğinden yüksek miktarda Demir (Fe) ve kobalt (Co) içeren bir kimyasal kompozisyon seçilmiştir. Demir ve kobalt metalleri geçiş elementleri olarak adlandırılır ve oldukça iyi manyetik özelliklere sahiptirler. Bu metaller ferromanyetik malzeme olduklarından dolayı manyetik alana konulduklarında, üzerlerinde manyetik alan yönünde net bir mıknatıslanma oluşur. Belirli oranlarda bor (B) ve silisyum (Si) katkısı ile atomlar arası bağların güçlendirilerek malzemenin kristalizasyona karşı direncinin yükseltilmesi, dolayısıyla amorflaşma yeteneğinin artırılması ve malzemenin daha yüksek paketlenme oranına sahip olması amaçlanmıştır (Shen ve ark. 2007).

Kompozisyon yüksek saflıkta metal haldeki alaşım elementleri kullanılarak hazırlanmıştır. Bu alaşımların seçiminde Bölüm 2.2'de değinilen Inoue'nin deneysel kurallarından da faydalanılmıştır. Bu kurallara uygun olarak, alaşım kompozisyonu üç ve daha fazla element kullanılarak oluşturulmuştur. Aynı zamanda alaşımı oluşturan temel elementlerin atom çapları arasındaki fark % 12'nin üzerindedir. Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.'de görüldüğü gibi demir ve kobalt elementleri fiziksel ve manyetik özellikleri bakımından benzer özelliklere sahiptirler. Deneysel olarak (Fe, Co, Ni)-B-Si-Nb amorf alaşım sistemlerinde, alaşım içerisindeki demir ile kobalt oranının, malzemenin amorflaşma yeteneğinde önemli bir değişiklik oluşturmadığı görülmüştür (Miller ve Liaw 2008). Bu deneysel sonuçtan yola çıkarak alaşım içerisindeki demir ve kobalt elementlerini yalnızca demir ya da kobalt olarak düşünebiliriz. Bu kabul yardımıyla ilgili alaşımların temel elementleri Fe-B-Si ya da Co-B-Si olarak düşünülebilir. Çizelge 3.2.'de görüldüğü gibi bu alaşım sistemleri içerisindeki elementlerin atom çapları arasındaki farklar %12'den fazladır.

Alaşım için seçilen kompozisyonun elementleri arasında negatif karışım entalpisi bulunmaktadır. Birçok üçlü alaşım sisteminin karışım entalpilerinin hesaplandığı bir çalışmada (Takeuchi ve Inoue 2000), Fe-Co-B üçlü alaşım sistemindeki elementler arasında negatif karışım entalpisi bulunduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde yukarıda yapılan kabul ile malzemenin temel elementlerinin Fe-B-Si ya da Co-B-Si olması durumunda da karışım entalpileri negatiftir (Takeuchi ve Inoue 2000).

Çizelge 3.2. Alaşım elementlerinin sahip olduğu saflık kalitesi ve atomik çaplar

Alaşım elementi	Atomik çapı (nm)	Saflığı (ağırlık %)
Demir (Fe)	0.252	99.9
Kobalt (Co)	0.250	99.8
Bor (B)	0.180	99.8
Silisyum (Si)	0.220	99.7
Molibden (Mo)	0.278	99.9
Tungsten (W)	0.278	99.8

Alaşıma hangi elementten kaç gram konacağı elementlerin alaşımdaki yüzdeleri ve mol ağırlıkları kullanılarak hesaplanmıştır. 3 gramlık $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ alaşımı için alaşıma eklenen element ağırlıkları Çizelge 3.3'te verilmektedir. Elementler hassas terazi yardımıyla tartılmış bu sayede istenilen miktarlar güvenilir bir şekilde elde edilmiştir.

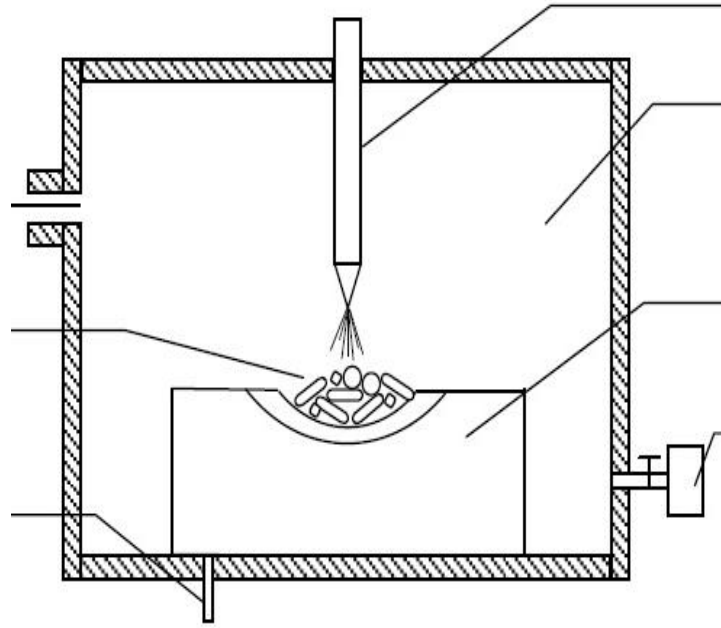
Çizelge 3.3. 3 gram $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ alaşımı hazırlamak için tartılan elementlerin kütleleri

Alaşım elementi	Alaşımdaki yüzdesi (%)	Atom ağırlığı (g/mol)	Alaşıma katılan kütle (g)
Demir (Fe)	36	55.8470	1.1981
Kobalt (Co)	36	58.9332	1.2643
Bor (B)	19.2	10.8110	0.1237
Silisyum (Si)	4.8	28.0855	0.0803
Molibden (Mo)	2	95.9400	0.1143
Tungsten (W)	2	183.8400	0.2191

3.1.2 Alaşımların Ark Eritme Cihazı Yardımıyla Üretimi

Bu aşamada, tartımı yapılmış olan elementler, ark eritme cihazı yardımıyla alaşım haline getirilmiştir. Ark eritme cihazı, vakum altında elementlerin yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak eritilmesi ve normal katılaşma ile homojen alaşımların üretimi için kullanılmaktadır. Şekil 3.1'de ark eritme sistemi ve ekipmanları şematik olarak gösterilmektedir. Ark eritme cihazı;

- ❖ Elementlerin eritildiği su soğutmalı bakır pota,
- ❖ Elementlerin erimesini sağlayan hareket kabiliyetine sahip bir elektrot,
- ❖ İşlemin gerçekleştirildiği bir vakum odası,
- ❖ Sistemin gaz tedarikini sağlayan bir tüp,
- ❖ Vakum sistemi,
- ❖ Deneyin izlenmesini sağlayan bir gözetleme penceresinden oluşmaktadır.



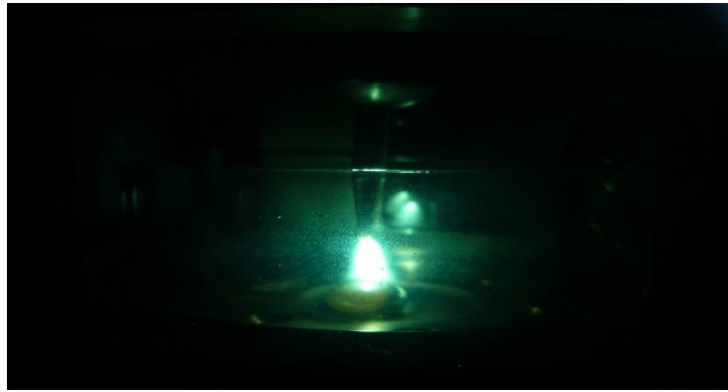
Şekil 3.1. Ark eritme sisteminin şematik olarak gösterimi

Deneye başlanılmadan önce, vakum odası ve bakır pota oksijenli su ile temizlenir. Daha sonra elementler bakır pota (Şekil 3.2.) içerisine yerleştirilir. Bakır pota, ark eritme cihazı 4000°C gibi çok yüksek sıcaklıklara kadar çıkabildiği için basınçlı su ile soğutulmaktadır.



Şekil 3.2. Elementlerin yerleştirildiği su ile soğutulan bakır pota

Elementler pota içerisine sıralı ve düzgün bir şekilde yerleştirilmelidir. Bu şekilde elementlerin, erirken bütün olarak kalması kolaylaşmaktadır. Bor elementi eritildiğinde patlayarak vakum odasının çeperlerine saçıldığı için en altta kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Ardından pota içerisindeki boş bir hazneye zirkonyum (Zr) elementi yerleştirilmiştir. Daha sonra vakum odasının kapağı kapatılarak cihaz çalışır konuma getirilmiştir. Bu işlem sonrasında elementlerin eritileceği vakum odası, vakum pompası yardımıyla vakumlanmıştır. Bu işlem birkaç kez tekrarlandıktan sonra odanın içerisine argon (Ar) gazı verilmiş ve bu sayede eritme odasının içerisinde yalnızca Ar gazının bulunması amaçlanmıştır. Argon gazı işlem sırasında malzemenin oksitlenmesini önlemek için kullanılmaktadır. Yapılan bu işlemler sonrasında vakum odasının içerisinde bulunan elektrota akım verilmiş ve elektrot ucu ile pota arasında bir ark oluşması sağlanmıştır. Ark oluşmasının ardından, öncelikle boş haznede bulunan Zr elementi eritilmiştir. Bu yolla vakumlama işlemi sırasında içeride birikmesi muhtemel olan oksijeni soğurmak için kullanılmıştır. Şekil 3.3'te elektrot ile pota arasında oluşan ark gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Elektrot ve pota arasında oluşan elektriksel ark

Elektrottan kopan yüksek enerjiye sahip elektronlar pota içerisinde bulunan elementlerin üzerine yönelirler. Elementlere çarpan elektronlar, onların önce ısınmasını ve ardından erimesini sağlar. Pota içerisindeki tüm elementlerin erime noktaları farklı olduğu için, uygun bir sıcaklık değerinde elementlerin tümü sıvı hale geçecektir. Alaşım sıvı hale geçtikten sonra cihaz kapatılmıştır. Daha sonra numune soğuması için bir süre bekletilmiştir. Alaşımın daha homojen olması için malzemeye aynı süreç birkaç kez uygulanmıştır. Tüm bu işlemlerin sonunda Şekil 3.4'te gösterilen 3 gramlık $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ alaşımı üretilmiştir.



Şekil 3.4. Ark eritme yöntemiyle üretilmiş 3 gram $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ alaşımı

Şekil 3.5'te, alaşımların hazırlanması için kullanılan ark eritme cihazı gösterilmiştir. Bu cihaz Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Manyetik Malzeme Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarında (MAGLAB) bulunmaktadır.

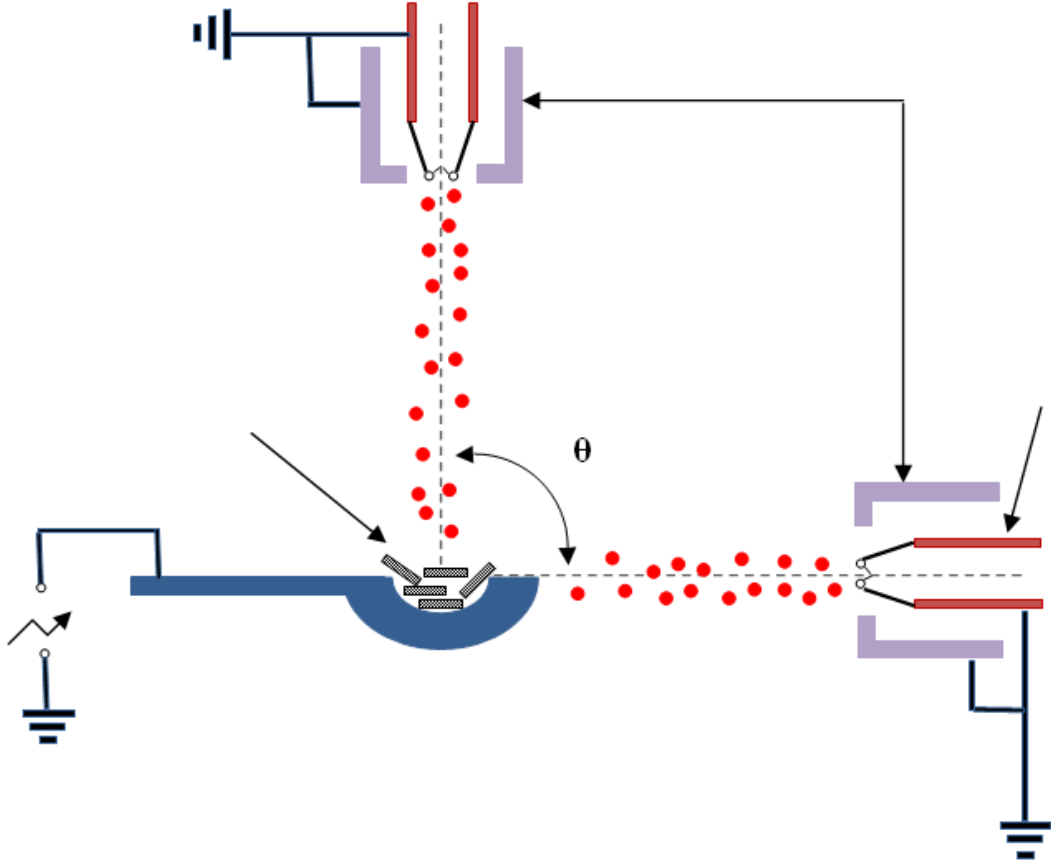


Şekil 3.5. Ark eritme cihazı

3.1.3 Termiyonik Vakum Ark (TVA) Yöntemi

Bu kısımda, ince filmlerin üretilmesinde kullanılan termiyonik vakum ark (TVA) yönteminin çalışma prensipleri, kullanım alanları ve bazı özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Termiyonik vakum ark (TVA) yöntemi, metal ya da metal olmayan malzemelerin vakum ortamında ince film olarak üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Oldukça yeni ve orijinal bir teknik olan TVA yöntemi ilk olarak 1983 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem temel olarak, ince filmi oluşturulmak istenen malzemenin plazmasının üretilmesi ve üretilen bu plazmanın istenilen bir alttabaka üzerine kaplanması prensibine göre çalışmaktadır. Şekil 3.6.'da TVA sisteminin elektrotlarının farklı iki pozisyonda ($\theta=0^0$ ve $\theta=90^0$) düzenlenişi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.6. TVA'nın elektrotlarının düzenlenişi

TVA deşarj son derece düşük basınca sahip (10^{-6} mbar) bir vakum odası içerisine yerleştirilmiş elektrotlar arasında gerçekleştirilir. Bu elektrotlar katot ve anottur. Katot, 0.4 mm çapında 1 mm uzunluğundaki çubuk üzerine 4 kez sarılarak elde edilmiş bir tungsten

filamenttir. Katot filamenti Whenelt silindiri içerisine yerleştirilmiştir. Whenelt silindiri katottan yayınlanan termiyonik elektronların anot üzerine odaklanmasını sağlar. Wehnelt silindiri yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyetine sahip, paslanmaz çelikten yapılmış bir silindiridir. Katottan yayınlanan elektronların anot üzerine odaklanması için elektromanyetik bobin yerine Wehnelt silindirinin kullanılması TVA sistemini, anot metali buharlarında deşarj üreten diğer tekniklerden ayıran önemli bir özelliktir. Anot ise içine buharlaştırılarak plazması oluşturulacak malzemenin yerleştirildiği kaşık şeklindeki tungsten potadır. Şekil 3.6.'da da görüldüğü gibi katot, anoda göre istenilen pozisyona getirilerek elektrotlar arası uzaklık ve açı değiştirilebilmektedir. Katottan elektron yayını sağlamak için katoda bir AC güç kaynağı (1 kW, 27 V), katottan yayılan elektrotların anoda hızlanmasını sağlayan bir DC yüksek gerilim güç kaynağı (10 kW, 0-5 kV) ve bir akım ayarlayıcı direnç (300 Ω) konulmuştur. Vakum odasının vakumlanması için mekanik ve difüzyon pompası olarak iki adet vakum pompası kullanılmaktadır. Vakumlama işlemi, ilk olarak mekanik pompa ile başlatılır ve basınç değeri 10^{-3} mbar oluncaya kadar devam edilir. Daha sonra difüzyon pompası yardımıyla basınç değeri istenilen değerlere düşürülür. Ayrıca doğrudan ısıtılan katodun bir ucu, düşük gerilim güç kaynağına bağlı iken diğer ucu elektrotların monte edildiği tablaya dolayısıyla vakum odasının üzerine bağlanmıştır. Böylece vakum odasının kendisi topraklayıcı olarak kullanılır (Akan 2003).

TVA deşarjın oluşma süreci şu şekilde gerçekleşir: Öncelikle deşarjın oluşturulacağı vakum odası temizlenir ve basıncı 10^{-6} mbar seviyesine düşürülür. Daha sonra katot üzerine uygulanan düşük AC gerilimi sayesinde katot filamenti ısınır ve böylece katottan elektron yayımlanması sağlanır. Katottan yayımlanan bu elektronlar anot üzerine Whenelt silindiri ile odaklanırlar. Katottan kopan elektronlar, elektrotlar arasına uygulanan yüksek gerilim DC güç kaynağı sayesinde anoda doğru hızlandırılırlar. Anoda çarpan elektronlar öncelikle anot içindeki malzemeye enerjisini aktararak ısınmasını sağlarlar. Daha sonra uygulanan gerilimin artırılmasıyla malzeme eriyerek buharlaştırılır. Elektrotlar arasına uygulanan gerilimin uygun bir değerinde, elektrotlar arasında parlak bir deşarj oluşur. Deşarjın oluşmasıyla elektrotlar arasındaki gerilim aniden yükselir akım ise aniden azalır. Deşarj oluştuğunda katot toprak potansiyelinde anot ise daha yüksek bir potansiyelde olduğundan anottan vakum çeperlerine doğru bir elektrik alan oluşur ve bu sayede plazma iyonları vakum çeperlerine doğru yayılırlar. Bu durumda elektrotların üst kısmına kaplanmak üzere bir alttabaka konursa, TVA tekniğiyle ince film kaplaması yapılabilir (Akan 2002).

TVA teknolojisiyle metaller, alaşımlar, seramikler, DLC (Diamond Like Carbon) ve dayanıklı metallerin (W, Mo, Ta, Nb, Re, B) ince film kaplamaları yapılabilir (Akan

2007). Bununla birlikte TVA teknolojisiyle elde edilen filmler yüksek saflık, yüksek adhesion, düşük sürtünme, düşük pürüzlülük gibi özelliklere sahip sıkı ve nanoyapılı filmlerdir (Balbag 2010). TVA (Şekil 3.7.) sisteminin diğer deşarj oluşturma sistemlerine göre avantajları şu şekilde sıralanabilir (Ehrich 1998);

- Bazı deşarj oluşturma tekniklerinde, deşarj oluşturmak için elektrotlar arasına bir tampon gazı uygulanır. Bu nedenle oluşan metal buharı plazması saf olmamaktadır. Ancak TVA tekniğinde tampon gazı kullanılmaz böylece saf metal buharı plazması üretilebilir.
- Katot malzemenin vakum koşullarında deşarjını oluşturan tekniklerden olan KVA (Katodik Vakum Ark) tekniğinde deşarj sonrasında büyük boyutlarda parçacıklar oluşur. TVA tekniğinde ise elektrotların birbiri ile kontağı olmadığından bu parçacıklar oluşmaz.
- TVA tekniğinde, bazı tekniklerde olduğu gibi elektrotlar sistemi bir elektromıknatıs içerisine yerleştirilmediğinden oldukça basit ve ucuz bir sistemdir.



Şekil 3.7. TVA sisteminin önden görünüşü

3.1.4 Alaşımların Termiyonik Vakum Ark (TVA) Yöntemi ile İnce Film Olarak Büyütülmesi

Çalışmanın bu aşamasında, ark eritme cihazı yardımıyla elde edilen $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ kompozisyonundaki alaşımın, Termiyonik vakum ark (TVA) yöntemi ile ince film olarak büyütülmesi anlatılmaktadır.

Camsı yapıdaki metalik ince filmlerin, hacimli metal camlar gibi çok yüksek soğuma oranlarına ihtiyaç duymaması nedeniyle hem fiziksel hem de kimyasal kaplama yöntemleri ile üretimi yapılabilmektedir. Bu zamana kadar metalik cam ince filmlerin üretiminde radyo frekans (RF) püskürtme yöntemi, magnetron radyo frekans (RF) püskürtme yöntemi, puls lazer kaplama (PLD) yöntemi, vakumla buharlaştırma (VE) yöntemi gibi birçok yöntem kullanılmıştır. Bu çalışmada ise ince filmlerin üretimi için, oldukça yeni ve orijinal bir teknik olan termiyonik vakum ark yöntemi seçilmiştir. Tez çalışması, TVA yöntemi ile ilk kez bu tür bir malzemenin üretilmesi açısından önem taşımaktadır.

TVA yöntemi oldukça basit ve ucuz bir sistemdir. Bununla birlikte, TVA yöntemi ile $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ alaşımı içerisinde bulunan B, Mo ve W gibi dayanıklı metallerin ince film kaplamaları yapılabilmektedir. Ayrıca üretilen ince filmlerin yüksek saflık ve düşük pürüzlülük gibi özelliklere sahip sıkı ve nanoyapılı filmler şeklinde oluşması, TVA yönteminin seçilmesindeki diğer nedenler olarak sıralanabilir.

TVA yönteminde alttabakanın seçimi ve hazırlanması, ince filmlerin büyütülmesinde ve özellikleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle ince filmlerin büyütülme işlemine başlanılmadan önce kullanılacak alttabakanın dikkatli ve hassas bir şekilde temizlenmesi gerekir. Temizleme işlemi sırasında alttabaka üzerinde oluşacak herhangi bir çizik, iz veya çıkıntı, film büyürken atomların alttabaka üzerine homojen olarak yerleştiği düşünüldüğünde, elde edilen ince film üzerinde de görülmesi mümkündür. Bu da istenilen bir durum değildir.

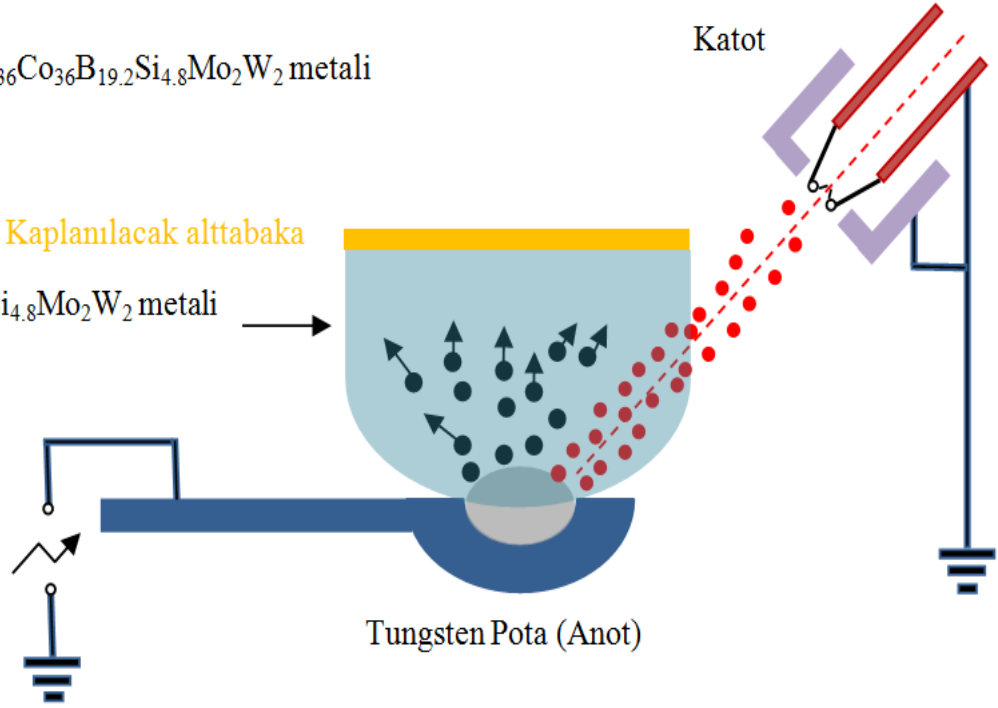
Bu tez kapsamında büyütülen numuneler için cam alttabakalar seçilmiştir. Bu alttabakalar normal ve saf su ile yıkandıktan sonra kurulama kağıdı ile iyice kurulanmıştır. Benzer şekilde ince filmlerin büyütülme işleminin yapılacağı vakum odası da temizlenmiştir. Vakum odası temizlenerek, daha önce yapılan deneylerde kalması muhtemel kirliliklerin yok edilmesi ve bu sayede ince filmlerin saf halde üretilmesi amaçlanmıştır. Ardından Şekil 3.8'de gösterilen TVA sistemindeki elektrotların (anot ve katot), birbirlerine göre konumları ayarlanmıştır. Daha sonra $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ kompozisyonuna sahip olan alaşım anot içerisine yerleştirilmiş ve vakum odasının üst kısmında bulunan kapak kapatılmıştır.

Elektron

Buharlaşan $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metali atomları

Kaplanılacak alttabaka

$\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metali plazması



Şekil 3.8. Üretim sırasında oluşturulan deney düzeneğinin şematik gösterimi

Son olarak TVA sistemi çalıştırılmış ve oluşan $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metal plazması cam alttabakalar üzerine ince film olarak büyütülmüştür. Farklı kalınlıklarda üretilen ince filmlerin kalınlıkları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Üretilen ince filmlerin kalınlıkları

Numune adı	Kalınlık (nm)
Numune 1	200
Numune 2	240
Numune 3	260
Numune 4	290
Numune 5	425
Numune 6	700

3.1.5 Üretilen İnce Filmlere Isıl İşlem Uygulanması

Termiyonik vakum ark yöntemi ile elde edilen ince filmlere, yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenmesinin ardından 300°C'de ısıl işlem uygulanmıştır. Her biri farklı kalınlıklara sahip olan numuneler, ısıl işlem öncesinde dikkatlice temizlenmiş ve daha sonra fırın içerisine yerleştirilmiştir. Örnekler, fırının ısıl ekseninin tam ortasına yerleştirilmiş ve ortamda düzgün bir ısı dağılımı elde edilmiştir. İnce filmlere, Ar gazı ortamında, 300°C sıcaklıkta yaklaşık 5 dakika süre ile ısıl işlem uygulanmıştır.

Yapılan ısıl işlem için, 1400°C ısıtma kapasitesine sahip PROTHERM PTF14/50/450 fırını kullanılmıştır.

3.2 Ölçüm Sistemleri

Bu bölümde, Termiyonik Vakum Ark yöntemi ile üretilen $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ kompozisyonuna sahip amorf ince filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenmesinde kullanılan cihazlar hakkında temel bilgiler verilmiştir.

3.2.1 X-Işını Kırınımı

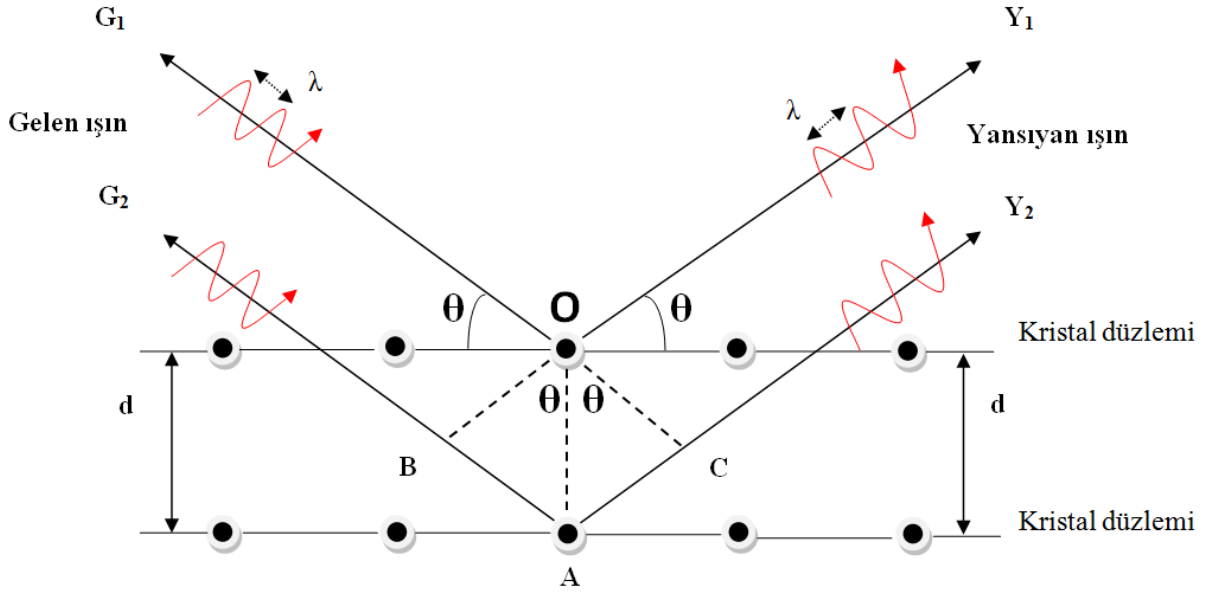
X-ışını kırınımı (XRD), malzemelerin kristal yapısı hakkında bilgi sahibi olmak için kullanılmaktadır. XRD ölçümleri sayesinde elde edilen XRD desenlerinin yorumlaması ile malzemelerin kristal yapısı bulunabilir. XRD desenlerinde görülen keskin ve belirgin pikler kristal yapı, tek ve geniş pikler ise amorf yapının kanıtı olarak yorumlanmaktadır (Kittel 2005). XRD ölçümleri sonucunda amorf yapı içerisinde çöken kristal fazların varlığı da belirlenebilir. Ayrıca bu piklerin açıl değerleri yardımıyla atomların birim hücre genişliği ve geometrisi de belirlenebilmektedir. Çünkü birim hücre içerisindeki atomların düzenlenişi bu piklerin şiddetleri ile doğrudan ilgilidir (Callister ve Rethwisch 2010).

X-ışını yüksek enerji ve kısa dalga boyuna sahip elektromanyetik bir ışınım formudur. Dalga boyları, katı malzemelerin atomları arasındaki boşluklar mertebesinde. X-ışınlarının bu özelliği, onların kristal yapı analizinde tercih edilmelerindeki önemli bir unsurdur (Kittel 2005).

X-ışını kırınımı (XRD) tekniği, bir x-ışını kaynağından numune üzerine gönderilen X-ışını demeti ile numunenin atomları arasındaki etkileşimlerin veri olarak alınması prensibine göre çalışmaktadır.

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, birbirine paralel olan iki kristal düzlemi üzerine düzlem ile θ açısı yapacak şekilde G1 ve G2 ışınları gönderilmiştir. Bu ışınlar kristal düzlemindeki atomlarda yansımaya uğrayarak Y1 ve Y2 ışınları gibi saçılırlar. Burada geçen ve yansıyan ışınlar arasındaki açı 2θ 'dir. Bu değere kırınım açısı denir ve deneylerde θ yerine 2θ ölçülür.

Geniş aralıktaki θ açıları taranarak numune için X-ışını kırınım deseni elde edilmektedir (Cullity 1956).



Şekil 3.9. X-ışını kırınımı

Numune üzerine gönderilen X-ışını demeti maddenin atomlarına çarptıktan sonra tüm yönlerde saçılacaktır. Saçılma sonrasında bazı X-ışınları birbirini yok ederek yıkıcı girişim, bazıları da birbirini kuvvetlendirerek yapıcı girişim oluştururlar. Yapıcı girişim olayı için, ardışık düzlemlerden yansıyan ışınlar arasındaki yol farklarının dalgaboyunun tam katları olması gerekir (Kittel 2005). Bu durum Bragg yasası ile verilmektedir:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de d düzlemler arası mesafe, θ düzleme gelen ve düzlemden yansıyan ışınlarla düzlem arasındaki açı, λ gelen X-ışınının dalgaboyu ve n pozitif sabit sayılar olup dalgaboyunun tam katlarını ifade etmektedir ($n=1,2,3,\dots$ gibi). n 'nin 0 olması durumunda herhangi bir yansıma olmayacağından alabileceği ilk değer 1 olmalıdır. Bragg kanunu kristal örgüde ortaya çıkan periyodikliğin bir sonucudur ve yalnızca $\lambda \leq 2d$ olması halinde gerçekleşmektedir. Düzlemler arası mesafe (d) Miller indisleri (h,k,l) ve örgü parametresi (a) cinsinden yazılabilir. Kübik yapıya sahip kristal sistemleri için kullanılan düzlemler arası mesafe (d) bağıntısı Denklem (3.2)'de verilmiştir. Bu denklem yardımıyla düzlemler arası uzaklık (d) değeri bilinen bir kristal yapının, örgü sabiti (a) ve kristal yönelimi bulunabilir:

$$d = a / (h^2 + k^2 + l^2) \quad (3.2)$$

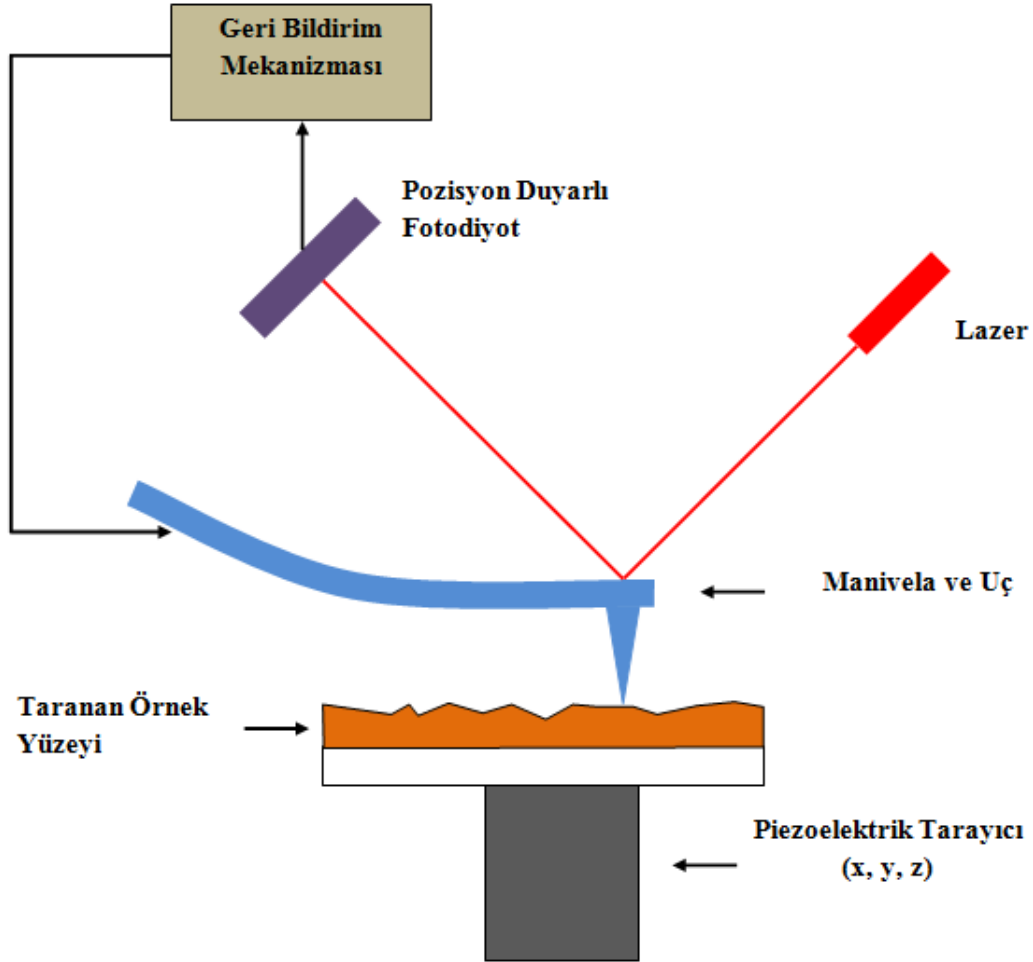
Şekil 3.10'da X-ışını kırınım tekniğinin şematik gösterimi verilmiştir. Sistem, görüldüğü gibi bir X-ışını kaynağı ve bir sayaçtan oluşmaktadır. Sayaç, sistem etrafında sabit bir açısal hızla hareket ederek örnekten yansıyan ışın şiddetini kırınım açısının (2θ) fonksiyonu olarak kaydetmektedir. Daha sonra bu veriler monitöre aktarılır ve yansımaları veren XRD desenleri çizilmiş olur.

Şekil 3.10. X-ışını kırınım tekniğinin şematik gösterimi (Hacıismailoğlu 2010)

3.2.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), bir malzemenin atomik boyutta üç boyutlu yüzey görüntüsünü elde etmek için kullanılan bir sistemdir. AFM, mikroskop olarak adlandırılmasına rağmen klasik anlamda bir mikroskop değildir. Çünkü klasik bir mikroskop ile bir cisim gerçekten görülebilir ancak AFM yardımı ile bir cismin veya yüzeyin nasıl olduğunu öğrenebileceğiniz bir görüntü elde edilebilmektedir. Cihaz 1986 yılında Binnig, Quate, ve Gerber tarafından icat edilmiştir (Rugar ve Hansma 1990).

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), çok hassas ve sivri bir ucun malzeme yüzeyini taraması sırasında, uç ve yüzey atomları arasında oluşan kuvvetler yardımıyla yüzey görüntüsünün elde edilmesi prensibine göre çalışmaktadır (Rifai 2005). Şekil 3.11'de atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.11. Atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi

Şekil 3.11'de görüldüğü gibi yüzey tarayıcı uç, yüksek hassaslığa ve esneme kapasitesine sahip manivela adı verilen bir yayın ucuna yerleştirilmiştir. Manivela ve uç tarama yapılırken sabit durumdadır. Tarama piezoelektrik tarayıcının 3 boyutta hareketi ile oluşmaktadır. Piezoelektrik tarayıcı kullanılmasının nedeni bu malzemelerin uygulanan akım değerlerine göre hacimlerinin değişkenlik göstermesidir. Tarama sırasında tarayıcı ucun atomları ile numune atomları arasında etkileşim itici ya da çekici kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu itici ya da çekici kuvvetler esnek olarak seçilen manivelanın eğilmesine yol açacaktır. Denklem (3.3)'te verilen Hooke yasası'na göre bir yayın yay sabiti ve uzama miktarı bilindiğinde o yaya uygulanan kuvvet bulunabilir. Eğer ki manivela bir yay

gibi düşünülürse, oluşan bu eğilme miktarına göre atomik kuvvetin ölçümü gerçekleştirilebilir:

$$F = -k.x \quad (3.3)$$

Manivelanın eğilme miktarının hesaplanması için bir lazer kaynağından manivela üzerine ışın demeti yollanır. Manivela yüzeyinden yansıyan demetler fotodiyot sistemine çarpar. Eğer ışın demetinin manivela üzerinde düştüğü nokta değişirse diyot bu durumu algılar geri bildirim mekanizmasına bildirir. Algılanan bu değişime göre manivelanın sapma değeri belirlenmiş olur (Fishbane 2005).

Numune ile uç arasındaki mesafelere göre mod adı verilen üç farklı AFM kullanımı mevcuttur. Bunlar :

- ❖ Temaslı mod
- ❖ Temassız mod
- ❖ Tıklamalı moddur.

Temaslı modda uç ile numune yüzeyindeki atomlar arasındaki mesafe birkaç angstrom (Å) mertebesinde. Bu yüzden manivela ucu ile numunenin birbiri ile temas halinde olduğu kabul edilir. Bu durumda numune atomları uç atomlarını iter ve bu sayede manivela eğilir. Bu modda uç ile numune arasında temas olduğu için numune yüzeyinin zarar görme ihtimali bulunmaktadır. Bu yüzden çoğunlukla sert yüzeylere sahip numuneler için bu modun kullanılmaktadır. Ayrıca temaslı mod kullanılarak gerçekleştirilen yüzey görüntüleme işlemlerinde yüksek çözünürlük elde etmek mümkündür.

Bir diğer mod tipi olan temassız modda manivela ucu ile numune yüzeyindeki atomlar arasındaki mesafe 10 Å ile 100 Å arasında değişmektedir. Temassız modda uç ile yüzey atomları arasında bir çekici kuvvet oluşur ve bu nedenle manivela numune yüzeyine doğru eğilir. Böylece numuneye dokunmadan yüzey görüntüsü elde edilir. Bu mod ile yapılan ölçümlerde ucun kırılma tehlikesi azdır ve genelde yumuşak numuneler için kullanımı uygundur. Temassız mod ile gerçekleştirilen yüzey görüntüleme işlemlerinde çözünürlük düşük kalmaktadır.

Tıklamalı mod, temaslı ve temassız modun birleşimi şeklinde olan bir mod çeşididir. Bu modda uç numune yüzeyini tararken rezonans frekansına yakın bir frekansta titreşerek

yüzeye dokundurulup çekilir. Bu sayede hem yüzeyde hasar oluşum riski azalır hem de yüksek çözünürlük elde edilmiş olur.

Uç ile numune atomları arasındaki atomik kuvvetlerin ölçümü yerine uç ve numune atomları arasındaki mesafenin ölçümüyle de yüzey görüntüleme işlemi yapılabilmektedir. Buna göre uç ile numune arasında kuvvet sabit tutulur ve manivelanın sabit kalmasını sağlayacak bir sistem oluşturulur. Uç ve numune arasındaki mesafe piezoelektrik tarayıcı yardımıyla belirlenir ve böylece yüzey görüntüsü elde edilir. Bu yöntemde manivelada eğilmeler olmayacağı için geri bildirim mekanizması kullanılmaz (Butt 2005, Blanchard 1996).

AFM ölçümleri için uygun rezonans frekansı ve yay sabiti değerlerine sahip olan silikon ya da silikon nitrür manivelalar tercih edilmektedir. AFM ile yüzey görüntüleme işlemi için örneğin özel olarak hazırlanmasına gerek yoktur ve hava, sıvı ya da vakum ortamlarında görüntüleme yapılabilir. Ayrıca AFM ile hem iletken hem de yalıtkan malzemelerin yüzey görüntüleri alınabilmektedir.

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), özellikle gıda, çevre ve tıp teknolojileri başta olmak üzere elektronik, telekomünikasyon, biyomedikal, kimyasal, otomotiv, uzay-havacılık ve enerji gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca AFM ile ince ve kalın film kaplamalar, seramikler, alaşımlar, camlar, metaller, polimerler ve yarı iletken malzemelerin pürüzlülük, aşınma, temizlik, sürtünme, parlaklık ve korozyon gibi özellikleri incelenebilmektedir (Blanchard 1996, Çınar ve ark.2005).

3.2.3 Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)

1956 yılında Foner tarafından keşfedilen Titreşken Numune Manyetometresi (VSM), malzemelerin manyetik özelliklerini ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Bu ölçümler sayesinde manyetik malzemelerin manyetik özelliklerini yansıtan histeresis eğrileri elde edilebilmektedir. VSM yardımı ile yapılan ölçümler yüksek doğruluk oranına sahiptir. Ölçüm sırasında, örnek mıknatıslanmak üzere düzgün bir manyetik alan içerisine yerleştirilir ve bu düzgün manyetik alan altında titreştirilir (Foner 1956).

VSM temel olarak, elektromanyetik indüksiyon prensibine göre çalışır. Faraday indüksiyon kanununa göre bir kapalı devredeki manyetik akı değişimi, kapalı devre içerisinde bir e.m.k. indüklenmesine sebep olur. Bu yasaya göre, bir bobinin üzerindeki manyetik akının zamanla değişmesi durumunda bobinde indüklenen e.m.k.:

$$\varepsilon = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.4)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada ε indüklenen e.m.k., N manyetik akının geçtiği bobinin sarım sayısı, t zaman ve Φ manyetik akıdır. Manyetik akı (Φ)

$$\Phi = BA \quad (3.5)$$

ifadesi Denklem (3.4)'te yerine yazılırsa indüklenen e.m.k.

$$\varepsilon = -NA \frac{dB}{dt} \quad (3.6)$$

şeklinde olur. Burada B manyetik indüksiyon, A ise bobinin kesit alanıdır. Manyetik bir malzemenin üzerinde oluşan B manyetik indüksiyonu:

$$B = \mu H \quad (3.7)$$

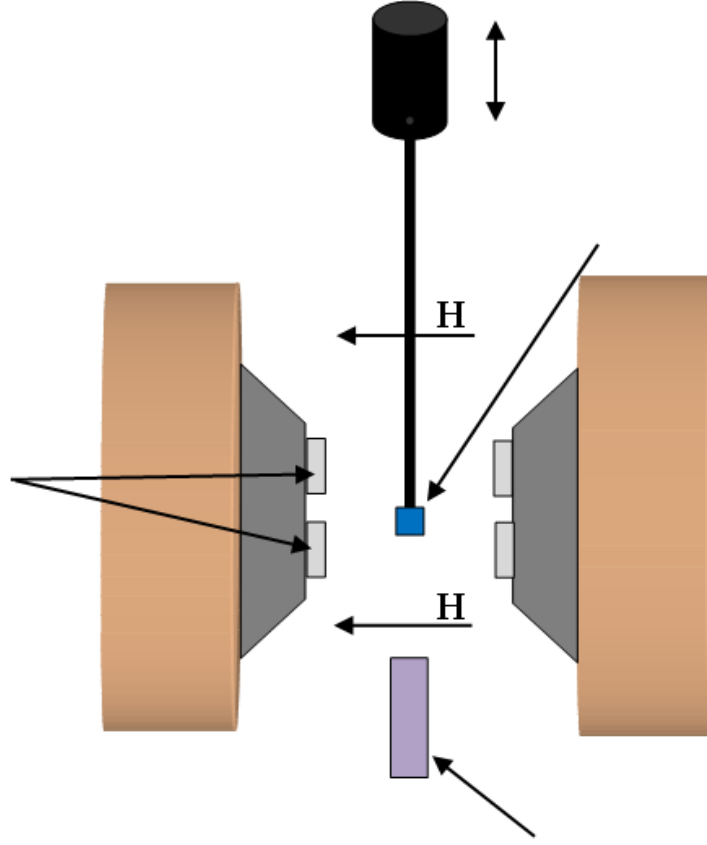
eşitliği ile verilmektedir. Bu ifade kullanılarak indüklenen e.m.k.,

$$\varepsilon = -\mu NA \frac{dH}{dt} \quad (3.8)$$

şeklini alır. Burada H manyetik alan, μ ise maddenin manyetik geçirgenliğidir. Denklem (3.8)'de görüldüğü gibi bobin üzerinde bir e.m.k. indüklenmesi için, ortama zamanla değişen bir manyetik alan uygulamak ya da örneği titreştirmek suretiyle manyetik akının geçtiği yüzey alanını değiştirmek gerekmektedir. Yani, bobin üzerinde e.m.k indüklenmesi manyetik akının zamanla değişmesiyle mümkündür.

VSM, düzgün bir manyetik alan içerisinde titreştirilen örnek yardımıyla manyetik akı değişimi oluşturulması ve zamanla değişen bu manyetik akı nedeniyle indüklenen e.m.k.'nın ölçülmesine dayanır. İndüklenen e.m.k., örneğin mıknatıslanması ile orantılı olduğu için bu yöntemle mıknatıslanma ölçülebilmektedir (Burgei ve ark. 2003).

Şekil 3.12'de VSM'in şematik gösterimi verilmiştir. Buna göre VSM sistemi, karşılıklı olarak yerleştirilen iki elektromıknatıs, örneğin yerleştirildiği bir mekaniksel titreştirici, indüklenen e.m.k.'nın ölçümü için kullanılan toplama bobinleri, ortamdaki manyetik alanı algılayan gaussmetre probu ve elde edilen verileri işleyip bilgisayara aktaran yükselteç ile gaussmetreden oluşmaktadır.



Şekil 3.12. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) cihazının şematik gösterimi

İncelenmek istenen numune, numune tutucuya takılır ve elektromıknatısların arasındaki toplama bobinlerinin tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilir. Mekaniksel titreştirici sayesinde numunenin dikey ekseninde titreşmesi sağlanır. Burada numune tutucunun manyetik olmayan bir malzeme olması gerekmektedir. Örnek titreştirilirken aynı anda karşılıklı yerleştirilen elektromıknatıslar yardımıyla ortamda manyetik alan üretilir. Üretilen manyetik alan bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Ortamdaki manyetik alan, mıknatıslar arasına yerleştirilmiş gaussmetre ile ölçülür ve bilgisayara aktarılır. Örneğin titreştirilmesi sırasında toplama bobinleri üzerinde indüklenen e.m.k., önce yükseltece oradan da bilgisayara aktarılır (Niazi ve ark. 2000, Foner 1956, Hacıismailoğlu 2010).

Histeresis eğrilerinin çizilebilmesi için malzemenin mıknatıslanma değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden indüklenen e.m.k. (ϵ) değerleri kalibrasyon işlemi yardımıyla mıknatıslanma (M) değerlerine çevrilir. Kalibrasyon işlemi mıknatıslanma eğrisi bilinen bir manyetik malzeme ile yapılmaktadır. Kalibrasyon işlemi için kullanılacak malzeme ilk olarak incelenen örnek boyutlarına getirilir. Ardından örnek numune tutucuya takılarak titreştirilir ve mıknatıslanma değeri önceden bilinen örneğin toplama bobinleri

üzerinde indüklediği e.m.k. belirlenir. Böylece Bu malzemenin indüksiyon emk'sı ve mıknatıslanması arasında bir kalibrasyon sabiti elde edilmiş olur (Cullity ve Graham 2009).

Deney sisteminin değişmemesi nedeniyle elde edilen bu kalibrasyon sabiti tüm örneklerin mıknatıslanma değerlerini bulmak için kullanılabilir. Kalibrasyon işlemi sonrasında istenilen örneğin, uygulanan manyetik alana (H) bağlı olarak mıknatıslanma (M) değerleri elde edilir.

VSM yüksek hassalık, kolay ölçüm alma ve oda sıcaklığının altı ya da üstündeki sıcaklıklarda ölçüm alabilme kabiliyeti gibi avantajlarının yanında geniş demagnetizasyon sabiti ve numunenin örnek tutucuya yerleştirilirken yaşanan zorluk gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Chikazumi 1997).

Şekil 3.13.'da deney düzeneği, güç kaynağı ve bilgisayardan oluşan VSM sisteminin bir fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 3.13. VSM cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde, üretilen numuneler üzerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler sunulmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak, TVA yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ kimyasal kompozisyonuna sahip metalik cam ince filmlerin yapısal ve manyetik ölçüm sonuçları verilmiştir. Daha sonra bu filmlerin 300 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanması sonrasında elde edilen manyetik özellikleri verilmiştir. Son olarak, üretilen ince filmlerin manyetik ve yapısal özelliklerinin film kalınlığı ile değişimi incelenmiştir.

4.1 Üretilen İnce Filmlerin Yapısal ve Manyetik Analizleri

Üretilen $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ kimyasal kompozisyonuna sahip ince filmlerin yapısal özellikleri X-ışını kırınım yöntemi (XRD) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile, manyetik özelliklerinin ölçümleri ise titreşimli örnek manyetometresi (VSM) ile incelenmiştir.

4.1.1 X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) Analiz Sonuçları

X-ışını kırınım yöntemi (XRD) ile elde edilen kırınım desenleri sayesinde malzemelerin amorf veya kristal yapılardan hangisine sahip oldukları belirlenmiştir.

Bu tez kapsamında numunelerin X-ışını kırınım desenleri, ODTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği araştırma laboratuvarında bulunan Rigaku D/MAX 2200 marka X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) cihazı ile tek renkli $CuK\alpha$ ışınması kullanılarak elde edilmiştir. Örnekler, ölçüm sırasında 20°-90° arasındaki açılarda 0,02° adımlar halinde taranmıştır. 200 nm ve 240 nm, 260 nm ve 290 nm kalınlıklarındaki filmler için XRD desenleri Şekil 4.1, 425 nm ve 700 nm kalınlığa sahip filmler için ise Şekil 4.2'te gösterilmiştir.

Şekil 4.1. 200 nm, 240 nm,260 nm ve 290 nm kalınlıĝa sahip ince filmlerin XRD desenleri

Şekil 4.2. 425 nm ve 700 nm kalınlığa sahip ince filmlerin XRD desenleri

Şekil 4.1'deki XRD desenlerine göre, 200 nm, 240 nm, 260 nm, 290 nm kalınlığa sahip ince filmlerin amorf yapıda olduğu görülmektedir. Çünkü 200 nm, 240 nm, 260 nm ve 290 nm kalınlığa sahip ince filmlere ait XRD desenleri tek geniş bir pike sahiptir. Bu durum malzemelerin amorf yapıda olduğunun bir kanıtı kabul edilmektedir. Ayrıca spektrumda belirli kristal pikleri de yoktur.

Şekil 4.2'de verilen XRD desenlerinde görüldüğü gibi, 425 nm ve 700 nm kalınlığa sahip ince filmler amorf yapısını korumakla birlikte $2\theta = 82.20^\circ$ ve $2\theta = 39.00^\circ$ civarında bazı küçük piklere sahiptir ve bu da amorf yapı içerisinde çöken bazı kristal fazların bir göstergesidir. Bu nedenle 425 nm ve 700 nm kalınlıktaki filmlerin tam amorf yapıda değil parçalı amorf yapıda olduğu söylenebilir. Çöken kristal fazların $2\theta = 82.20^\circ$ için α -(Fe-Co-Si), $2\theta = 39.00^\circ$ (Fe-Co-Mo-W)₂₃B₆ olduğu daha önce deneysel olarak belirlenmiştir (Aykol 2008). Bu kristal fazların büyüklükleri Scherrer formülü (Denklem 3.9.) yardımıyla hesaplanabilir. Scherrer formülü:

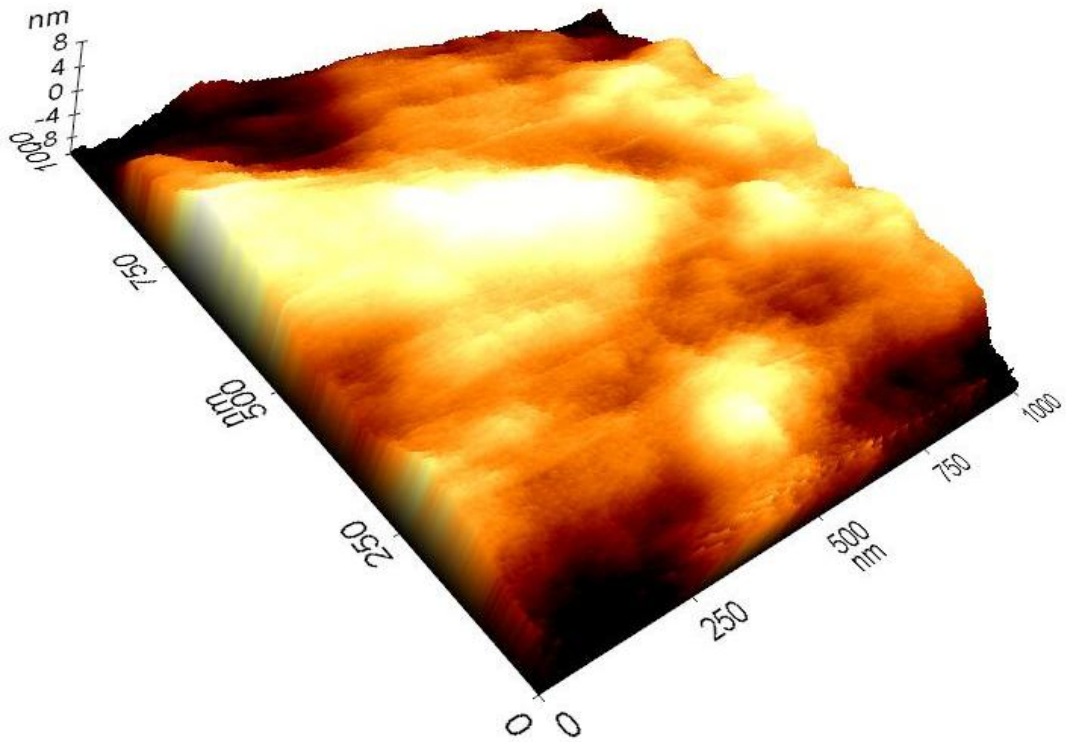
$$t = 0.9\lambda / (B \cos \theta_B) \quad (3.9)$$

ile verilir. Bu eşitlikte t kristal genişliği, B kırınım pikinin orta noktasının radyan cinsinden genişliğidir ve $B = \theta_2 - \theta_1$ ile ifade edilir. λ kullanılan difraksiyon ışınının dalga boyu, θ_B ise

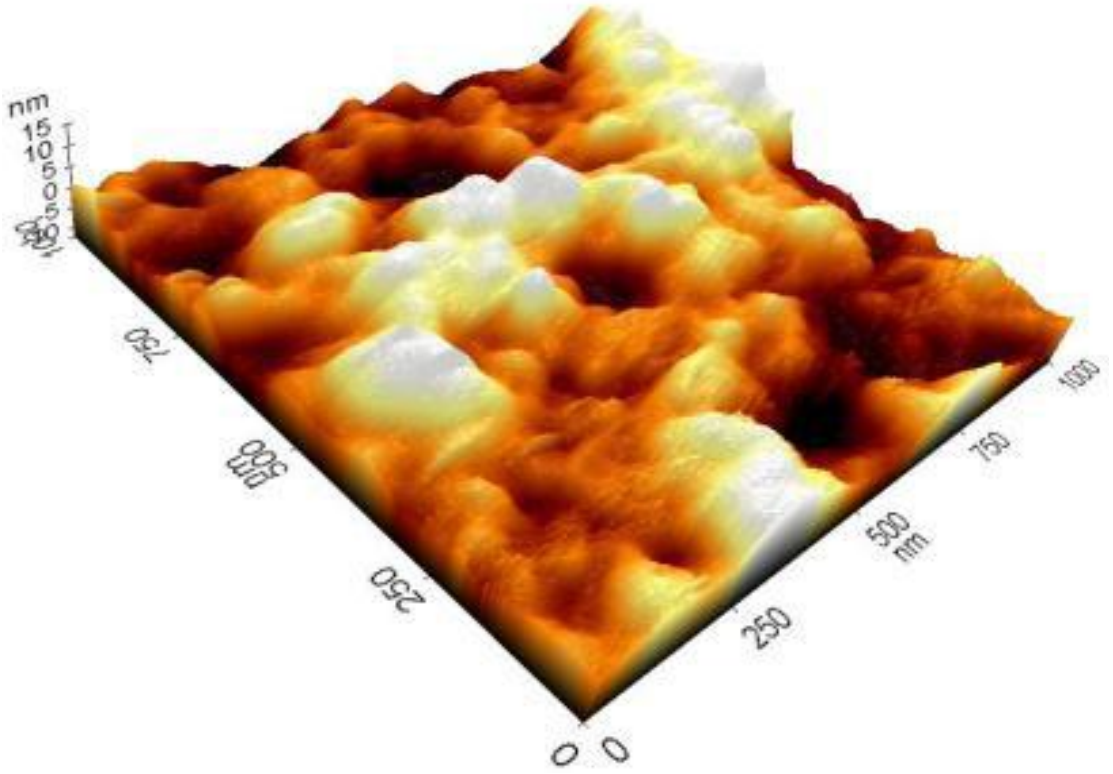
kırınımın meydana geldiği açı değeridir (Cullity 1956). Scherrer formülü yardımıyla, 425 nm kalınlıklı filmde çöken nanokristal fazlarının boyutları $2\theta = 81.94^\circ$ ve $2\theta = 38.80^\circ$ için sırasıyla 24.140 nm ve 5.502 nm olarak bulunmuştur. 700 nm kalınlığa sahip film içerisinde oluşan kristal boyutları ise $2\theta = 81.56^\circ$ ve $2\theta = 37.88^\circ$ için sırasıyla 31.510 nm ve 8.371 nm'dir. 425 nm ve 700 nm kalınlığa sahip bir malzeme içerisinde oluşan bu nanokristal büyüklükleri kalınlıklarına oranla oldukça küçüktür. Kristal fazlarının çökmesinin nedeni ise nano boyutta üretilen bir malzemede atomlar, kristal yapı için yeterli boyut bulunmadığından amorf yapıda oluşurlar. Ancak kalınlığın artmasıyla birlikte bazı elementler grupları amorf yapı içerisinde çöker ve böylece küçük de olsa bazı kristal fazlarının oluşmasına yol açar.

4.2.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Analiz Sonuçları

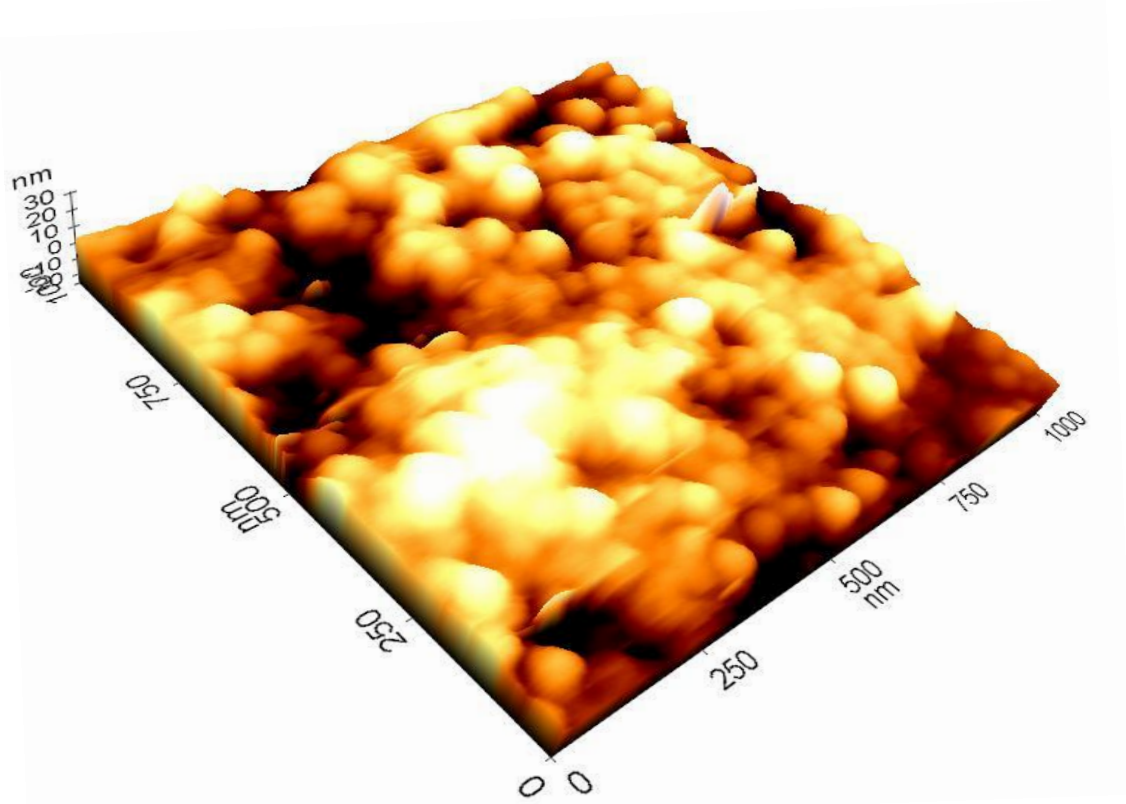
Bu çalışmada, AFM, üretilen ince filmlerin yüzey görüntüsü almak ve pürüzlülüklerini incelemek için kullanılmıştır. Üretilen ince filmlerin AFM görüntüleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü araştırma laboratuvarında bulunan Park Systems XE 70 marka AFM cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan işlemler sonunda, 200 nm, 240 nm ve 260 nm kalınlıklara sahip ince filmlerin, elde edilen AFM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.3., Şekil 4.4. ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. 200 nm kalınlığa sahip $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metalik cam ince filmin AFM görüntüsü



Şekil 4.4. 240 nm kalınlıĝa sahip $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metalik cam ince filmin AFM görüntüsü



Şekil 4.5. 260 nm kalınlıĝa sahip $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metalik cam ince filmin AFM görüntüsü

Üretilen ince filmlerin pürüzlülük ölçüm sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. İnce filmler için yapılan yüzey pürüzlülük ölçümlerinde, film yüzeylerinin son derece düşük pürüzlülük değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen bu pürüzlülük değerleri yardımı ile Termiyonik Vakum Ark (TVA) yöntemiyle üretilen ince filmlerin, düşük pürüzlülüğe sahip olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.1. Üretilen ince filmlerin pürüzlülük değerleri

Numune adı	Kalınlık (nm)	Ölçülen pürüzlülük (nm)
Numune 1	200	6.013
Numune 2	240	3.629
Numune 3	260	4.910

4.2.3 Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Analiz Sonuçları

Bu çalışmada VSM ile elde edilen histeresis eğrileri, ince filmlerin manyetik özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır.

İnce filmlerin manyetik özelliklerinin incelenmesi için ODTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, NOVALAB araştırma laboratuvarında bulunan ADE Magnetics EV9 marka Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) kullanılmıştır. Bu cihazın manyetik alanı ölçüm sırasında 1750 kA/m değerine kadar çıkabilmektedir.

VSM ölçümüne başlanılmadan önce numuneler temizlenmiştir. Daha sonra ince filmler örnek titreştirici ucuna yerleştirilmiş ve işleme geçilmiştir. Ölçüm sonuçlarından elde edilen histeresis eğrileri 200 nm, 240 nm, 260 nm kalınlıklarındaki filmler için Şekil 4.6., 290 nm, 425 nm, 700 nm kalınlığa sahip filmler için ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Şekil 4.6. 200 nm, 240 nm ve 260 nm kalınlığa sahip ince filmlerin histeresis eğrileri

Şekil 4.7. 290 nm, 425 nm ve 700 nm kalınlığa sahip ince filmlerin histeresis eğrileri

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilen histeris eğrilerine bakıldığında ince filmlerin kalınlığı arttıkça, 200 nm, 240 nm, 260 nm kalınlıktaki filmlerin sıfırlayıcı alan değerlerinin arttığı, 290 nm, 425 nm, 725 nm kalınlığa sahip filmler için ise azaldığı görülmektedir. Bu durum üretilen ince filmlerin yapısında görülen manyetik anizotropiden kaynaklanmaktadır. Manyetik anizotropi malzemenin tercihli bir yönde mıknatıslanması durumudur. Bir malzemenin mıknatıslanmasının zor olduğu bir yönde mıknatıslanabilmesi için, malzeme üzerine daha fazla manyetik alan uygulanması gerekmektedir. Bu durum malzemenin H_c değerinin artmasına neden olur. Üretilen ince filmlerin 260 nm ile 290 nm arasındaki bir kritik kalınlığa kadar oluşan manyetik anizotropinin etkisi ile H_c değerinin artış gösterdiği, bu kritik kalınlık sonrası anizotropinin etkisinin azaldığı ve böylece H_c değerinin düşüş gösterdiği söylenebilir. Görülen bu manyetik anizotropi, nano boyutta tekli domain boyutu ile oluşan manyetik anizotropidir. Buna ek olarak, 425 nm ve 700 nm kalınlıktaki ince filmlerde görülen çöken kristal fazların, soft (yumuşak) fazlar olması nedeniyle H_c değerini azalmasında etkili olduğu düşünülebilir.

Çizelge 4.2'de üretilen $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ metalik cam ince filmler için elde edilen H_c değerleri verilmektedir. İnce filmler 5.7 kA/m ile 12.0 kA/m arasında değişen yüksek H_c değerlerine sahiptirler. Bu yüzden ince filmlerin sert manyetik bir malzeme olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.2. $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ metalik cam ince filmlerin H_c değerleri

Numune adı	Kalınlık (nm)	H_c (kA/m)
Numune 1	200	7.2
Numune 2	240	9.0
Numune 3	260	12.0
Numune 4	290	7.3
Numune 5	425	6.5
Numune 6	700	5.7

4.3 Isıl İşlem Sonrası İnce Filmlerin Manyetik Analizleri

Üretilen ince filmlerin ısıtıl işlem sonrasında manyetik özelliklerinin incelenmesi için VSM kullanılmıştır. Bu ölçümler yardımı ile ısıtıl işlemin ince filmlerin manyetik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.8., Şekil4.9., Şekil 4.10., Şekil 4.11., Şekil 4.12. ve Şekil 4.13'te ölçüm sonuçlarından elde edilen histeresis eğrileri gösterilmiştir.

Şekil 4.8 ısıtıl işlem sonrasında 200 nm kalığa sahip ince film için histeresis eğrisi

Şekil 4.9 ısıtıl işlem sonrasında 240 nm kalığa sahip ince film için histeresis eğrisi

Şekil 4.10 Isıl işlem sonrasında 260 nm kalığa sahip ince film için histeresis eğrisi

Şekil 4.11 Isıl işlem sonrasında 290 nm kalığa sahip ince film için histeresis eğrisi

Şekil 4.12 Isıl işlem sonrasında 425 nm kalıĝa sahip ince film için histeresis eğrisi

Şekil 4.13 Isıl işlem sonrasında 700 nm kalıĝa sahip ince film için histeresis eğrisi

Çizelge 4.3'te $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metalik cam ince filmlere uygulanan 300°C 'de ısıtılma sonrası ve öncesinde elde edilen H_c değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.3. $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ metalik cam ince filmlerin ısıtılma öncesi ve sonrasındaki H_c değerleri

Numune adı	Kalınlık (nm)	Isıl işlem öncesi H_c (kA/m)	Isıl işlem sonrası H_c (kA/m)
Numune 1	200	7.2	8.6
Numune 2	240	9.0	9.0
Numune 3	260	12.0	9.0
Numune 4	290	7.3	6.8
Numune 5	425	6.5	5.9
Numune 6	700	5.7	5.7

Şekil 4.9 ve Şekil 4.13'te verilen histeresis eğrilerine bakıldığında, uygulanan ısıtılma işleminin, 240 nm ve 700 nm kalınlığa sahip ince filmlerin H_c değerlerinde bir değişiklik oluşturmadığı görülmektedir. Şekil 4.8'de gösterilen histeresis eğrisi incelendiğinde, ısıtılma sonrasında 200 nm kalınlıktaki ince filmin H_c değerinde yaklaşık %20'lik bir artış görülmüştür. Isıtılma işleminin, malzemelerin amorf yapısını bozarak malzemede kristal oluşumlarına neden olduğu bilinmektedir. Bu kristaller manyetik olarak yumuşak veya sert manyetik özellik gösterebilir. Bu yüzden ısıtılma sonrasında, 200 nm kalınlıktaki film içerisinde bazı sert (hard) kristal fazların çökmesi H_c değerinde artışa yol açtığı söylenebilir (Kucuk ve ark. 2011). Kristal fazlarının çökmesinin nedeni, manyetik olarak sert yapıda olan Molibden (Mo) ve Tungsten'in (W) yoğun ve ağır metaller olması nedeniyle diğer elementlerle birlikte çökmesi olarak açıklanabilir. 260 nm, 290 nm, 425 nm kalınlıktaki ince filmlerin histeresis eğrilerinden ısıtılma işleminin malzemelerin H_c değerlerinde sırasıyla yaklaşık %25, %7 ve %9'luk bir düşüşe neden olduğu görülmektedir. Bu düşüşe ısıtılma sırasında çöken bazı yumuşak (soft) kristal fazlarının neden olduğu söylenebilir (Aykol 2008).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

$\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ kimyasal kompozisyonuna sahip alaşımların daha önce 1.5 mm kritik kalınlığa sahip hacimli metal cam ve 25 μm kalınlıkta amorf şerit olarak üretimi gerçekleştirilebilmiştir (Küçük ve ark. 2011). Bu çalışmada ise $\text{Fe}_{36}\text{Co}_{36}\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Mo}_2\text{W}_2$ alaşımların, cam alttabakalar üzerine termiyonik vakum ark (TVA) yöntemi kullanılarak 200, 240, 260, 290, 425, 700 nm kalınlığa sahip ince filmleri büyütülmüştür. Üretilen bu metalik cam ince filmlerin kalınlığı ile manyetik ve yapısal özelliklerinin değişimi gözlenmiştir.

XRD analizleri sonucunda elde edilen XRD desenlerinden, 200 nm, 240 nm, 260 nm, 290 nm kalınlığa sahip ince filmlerin tam amorf yapıda 425 nm ve 700 nm kalınlıktaki ince filmlerin ise parçalı amorf yapıda oldukları görülmüştür. 425 nm ve 700 nm kalınlıklı ince filmlerde tespit edilen kristal fazların daha önce de başka çalışmalarda görülen soft fazlar olduğu belirlenmiştir. Amorf yapı içerisinde oluşan bu yumuşak (soft) kristal fazların Scherrer formülü yardımıyla büyüklükleri hesaplanmış ve filmlerin kalınlıklarına oranla oldukça küçük olduğu görülmüştür. Elde edilen bu XRD desenleri yardımıyla TVA yönteminin amorf yapıya sahip ince filmlerin üretimi için uygun olduğu görülmüştür.

Yapılan AFM analizlerinde ince filmlerin son derece düşük pürüzlülük değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuç yardımıyla, termiyonik vakum ark (TVA) yöntemiyle üretilen ince filmlerin düşük pürüzlülüğe sahip olduğu söylenebilir.

VSM ölçümleri sonucunda elde edilen histeresis eğrilerinden, ince filmlerin kalınlığı arttıkça, 200 nm, 240 nm, 260 nm kalınlıktaki filmlerin sıfırlayıcı alan değerlerinin arttığı, 290 nm, 425 nm, 725 nm kalınlığa sahip filmler için ise azaldığı belirlenmiştir. İnce filmlerin göstermiş olduğu bu manyetik davranış filmlerde görülen manyetik anizotropiden kaynaklanmaktadır. Ayrıca 425 nm ve 700 nm kalınlıktaki ince filmlerde görülen nanokristal fazların, yumuşak (soft) fazların H_c değerini azalmasında etkili olduğu düşünülebilir. Üretilen metalik cam ince filmler için elde edilen H_c değerleri incelendiğinde, filmlerin sert (hard) manyetik özellik gösterdiği görülmüştür. İnce filmler sahip oldukları H_c değerleri ile minyatürize edilmiş gelişmiş manyetik aletler, otomotiv parçaları, mikrodalga cihazlar, bilgisayar hard disk sürücüler, hoparlörler, cam silecekleri, mikrofonlar gibi uygulamalar için uygundur.

İnce filmler 300 °C sıcaklıkta ısıtılma işlemi sonrasında manyetik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen histeresis eğrilerinden, ısıtılma işleminin 240 nm ve 700 nm kalınlıklı filmlerin H_c değerinde bir değişiklik oluşturmadığı, 200 nm kalınlıktaki filmlerin H_c değerlerini arttırdığı, 200 nm, 260 nm, 290 nm kalınlığa sahip ince filmlerin H_c değerlerinde düşüşü neden olduğu görülmüştür. Isıtılma işlemi sonrasında H_c değerlerinde görülen değişimlere, ince filmler içerisinde

Çöken sert (hard) ya da yumuşak (soft) fazların neden olduğu düşünölmüştür. Ayrıca ısıı işlemin örneklerin tümünde aynı etkiyi göstermediği tespit edilmiştir.

Bu alışmada, $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ kompozisyonundaki alaşımların TVA yöntemiyle metalik cam ince film şeklinde üretilebileceği görölmüştür. İleride yapılacak çalışmalar ile farklı kompozisyonların da TVA yöntemiyle amorf ince filmleri üretilebilir. Ayrıca, daha düşük bir alttabaka sıcaklığı ve daha yüksek kaplama oranı ile $Fe_{36}Co_{36}B_{19.2}Si_{4.8}Mo_2W_2$ alaşımların daha iyi ve daha kalın amorf filmlerinin üretimi gerçekleştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Akan T., Ekem N., Pat S., Issever U.G., Balbag M.Z., Cenik M.I. (2007). Boron thin film deposition by using Thermionic Vacuum Arc (TVA) technology. *Materials Letters*, 61: 23-26.
- Akan T. (2003). Operation Parameters of The Thermionic Vacuum Arc Discharge. *Turk J Phys*, 27: 69-75.
- Akan T. (2002). Bakır Buharı Termiyonik Vakum Ark Deşarjın Karakteristikleri. *İtü dergisi/c Fen Filimleri*, 1: 65-69.
- Aykol M. (2008). Demir Bor Tabanlı Metalik Camlarda Nano Ölçekli Faz Ayrışması ve Cam Oluşturma Yeteneği. Y. Lisans, ODTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Ankara.
- Balbag M.Z., Pat S., Ozkan M., Ekem N., Musa G. (2010). Thermionic vacuum arc (TVA) technique for magnesium thin film deposition. *Physica B*, 405: 3276–3278.
- Blanchard C.R. (1996). Atomic Force Microscopy. *The Chemical Educator*, 1: 1-8.
- Burgei W., Pechan M.J., Jaeger H.(2003). A Simple Vibrating Sample Magnetometer for Use in a Materialsphysics Course. *Am. J. Phys.* 71: 825-828.
- Butt H.J., Cappella B., Kappl M. (2005). Force Measurements With The Atomic Force Microscope: Technique, Interpretation and Applications. *Surface Science Reports*, 59: 1-152.
- Callister W. D. Jr., Rethwisch D. G. (2010). *Materials Science and Engineering An Introduction Eighth*. John Wiley & Sons, Inc., 805, USA.
- Chikazumi S. (1997). *Physics Of Magnetism*. Oxford University Press Inc., 655, New York.
- Christman J.R. (1988). *Fundamentals of Solid State Physics*, John Wiley & Sons, Inc, 518, New York.
- Chu J.P., Huang J.C., Jang J.S.C., Wang Y.C., Liaw P.K. (2010). Thin Film Metallic Glasses: Preparations, Properties, and Applications. *JOM*,62: 19-24.
- Cullity B.D. (1956). *Elements of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 514, USA.
- Cullity B.D., Graham C.D. (2009). *Introduction to magnetic materials*. Wiley & Sons, 554, New Jersey.
- Çınar M.O., Ülgen Ş.D., Çubukçu E., Koçum İ.C. (2005). Design and Construction of Atomic Force Microscopy for Molecular Sensing. *National Symposium on Biomedical Engineering*, 230-234,İstanbul.

- Dobromir M., Neagu M., Pohoata V., Borza F., Meydan T., Ovari T. A., Popa G., Chiriac H. (2008). Magnetic Properties of Fe-Based Amorphous Thin Films. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 10: 410-412.
- Ehrich H., Schuhmanna J., Musab G., Popescub A., Mustata I. (1998). Adhesive metal Films obtained by thermionic vacuum arc (TVA) deposition. *Thin Solid Films*, 333: 95-102.
- Fishbane P.M., Gasiorowicz S.G., Thornton S.T. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, Third Edition. Pearson Education Inc., 1269, New Jersey.
- Foner S. (1956). Vibrating Sample Magnetometer. *Rev. Sci. Instr.*, 27: 548.
- Hacıismailoğlu M.C. (2011). Nano-Kristal Toroid Manyetik Çekirdeklerde Histeresis Eğrisinin Modellenmesi. Doktora Tezi, UÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Hacıismailoğlu M.Ş. (2010). Co/Cu Süperörgülerin Elektrokimyasal Olarak Üretilmesi ve Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, UÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Hamidi S.M., Tehranchi M.M., Ghanaatshoar M., Moradi M., Mohseni S.M. (2008). Magnetic Behaviors of Amorphous Fe₇₈Si₉B₁₃ Thin Films Prepared by pulsed laser deposition. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354: 5178-5180.
- Inoue A., Takeuchi A., Zhang T. (1998). Ferromagnetic Bulk Amorphous Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29A, July: 1779-1793.
- Inoue A. (2000). Stabilization of Metallic Supercooled liquid and Bulk Amorphous Alloys. *Acta Mater*, 48: 279-306.
- Jiles D. (1991). *Introduction to magnetism and magnetic materials*. Chapman and Hall, London. (EKSİK KAÇ SAYFA)
- Johnson W.L. (1996). Fundamental Aspects of Bulk Metallic Glass Formation in Multicomponent Alloys. *Materials Science Forum Vols.*, 225-227: 35-50.
- Kabaer M. (2010). Hacimli Metal Camların Üretimi ve Manyetik Özellikler ile Camlaşma Yeteneğinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, UÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Kittel C. (2005). *Introduction To Solid State Physics 8Th Edition*. John Wiley & Sons, Inc, 673, New York.
- Küçük İ. (2003). Çalışma frekansına ve geometrik yapıya bağlı olarak toroid çekirdeklerin manyetik özelliklerinin deneysel ve kuramsal incelenmesi. Doktora Tezi, UÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.

- Kucuk I., Aykol A., Uzun O., Yildirim M., Kabaer M., Duman N., Yilmaz F., Erturk K., Akdeniz M.V., Mekhrabov A.O. (2011). Effect of (Mo, W) Substitution for Nb on Glass Forming Ability and Magnetic Properties of Fe–Co-Based Bulk Amorphous Alloys Fabricated by Centrifugal Casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 2334-2337.
- Lacheisserie E.T., Gignoux D., Schlenker M. (2005). *Magnetism: Fundamentals*. Springer, 517, Boston.
- Lin Y.C. (2005). Soft magnetic ternary iron-boron-based bulk metallic glasses. *Applied Physics Letters* 86, 162501:1-3.
- Löffler J. F. (2003). Bulk Metallic Glasses. *Intermetallics*, 11: 529–540.
- Mathew S. D., Juang R. S. (2007). An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions. *Chemical Engineering Journal*, 129: 51–65.
- Miller M., Liaw P. (2008). *Bulk Metallic Glasses An Overview*. 237, USA.
- Neagu M., Dobromir M., Popa G., Chiriac H., Singurel G., Hison C. (2006). The surface Magnetism Investigation of FeSiB Amorphous Thin Films Obtained by Evaporation Technique. *Sensors and Actuators A*, 129: 172-175.
- Niazi A., Poddar P., Rastogi A. K. (2000). A Precision, Low-Cost Vibrating Sample Magnetometer. *Current Science*, 79: 99-109.
- Ohring M. (1992). *The Materials Science of Thin Films*. Academic Press, 704, California.
- Phan T.A., Lee S., Makino A., Okamoto H., Kuvano H. (2010). Fe-B-Nb-Nd Magnetic Metallic Glass Thin Film for Mems and Nems. *Proceedings of The 2010 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Moleculer Systems January 20-23, Xiamen, China*.
- Rifai O.M.E., Toumi K.Y. (2007). On Automating Atomic Force Microscopes: An Adaptive Control Approach. *Control Engineering Practice*, 15: 349-361.
- Rugar D., Hansma B. (1990). Atomic Force Microscopy. *Physics Today*, October: 23-30.
- Sellmyer D., Skomski R. (2006). *Advanced Magnetic Nanostructures*. Springer, 508, USA.
- Spaldin N.A. (2011). *Magnetic Materials Fundamentals and Applications Second edition*, Cambridge University Press, 274, New York.
- Shen B., Zhou Y., Chang C., Inoue A. (2007). Effect of B to Si concentration ratio on glass-forming ability and soft- magnetic properties in $(\text{Co}_{0.705}\text{Fe}_{0.045}\text{B}_{0.25-x}\text{Si}_x)_{96}\text{Nb}_4$ glassy alloys. *Journal of Applied Physics*, 09N101: 101-103.
- Suryanarayana C., Inoue A. (2011). *Bulk Metallic glasses*. CRC Press Taylor & Francis Group, 523, USA.

- Takeuchi A., Inoue A. (2000). Calculations of Mixing Enthalpy and Mismatch Entropy for Ternary Amorphous Alloys. *Materials Transactions, JIM*, 41: 1372-1378.
- Telford M. (2004). The Case for Bulk Metallic Glass. *Materials Today*, March: 36-43.
- Torre E.D. (1999). *Magnetic hysteresis*. IEEE Press, 215, New York.
- Turton R. (2005). *Katıların Fiziği, Çev. Editörü: Yahya Kemal Yoğurtçu, Aktif Yayınevi, 456, Erzurum.*
- Wang W.H. (2004). Bulk Metallic Glasses. *Materials Science and Engineering, R* 44: 45-49.
- Wang S., Sun D., Hata S., Sakurai J., Shimokohbe A. (2009). Fabrication of Thin Film Metallic Glass (TFMG) Pipe for a Cylindrical Ultrasonic Linear Micro-Actuator. *Sensors and Actuators A*, 153: 120-126.

ÖZGEÇMİŞ

Fatih PERİNÇEK 29.09.1985 yılında istanbul'da doğdu. İlköğrenimini İstanbul'da tamamlamasının ardından 2002 yılında Demirköy Lisesinden mezun oldu. 2003 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ne girmeye hak kazandı. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda, Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK danışmanlığında yüksek lisans programına başladı.