

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SPİNTRONİK UYGULAMALAR İÇİN $(Py)_x Cu_{1-x}$ MANYETİK İNCE FİLM
SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ



YASİN AKBAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2020

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SPİNTRONİK UYGULAMALAR İÇİN $(Py)_xCu_{1-x}$
MANYETİK İNCE FİLM SİSTEMLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

YASİN AKBAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. FİKRET YILDIZ

GEBZE
2020

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF $(\text{Py})_x\text{Cu}_{1-x}$
MAGNETIC THIN FILM SYSTEM FOR SPINTRONIC
APPLICATION

YASİN AKBAŞ

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. FİKRET YILDIZ

GEBZE
2020

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09/01/2020 tarih ve 2020/3 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 06/02/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Yasin Akbaş'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. FİKRET YILDIZ



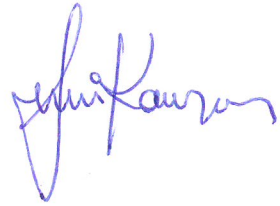
ÜYE

: Prof. Dr. SEVDA AVCI



ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi SİNAN KAZAN



ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, $\text{Py}_x\text{Cu}_{1-x}$ alaşım ince filmlerin spintronik sistemlerde kullanılmak üzere yapısal ve manyetik özelliklerinin detaylı olarak araştırılması amaçlanmıştır. Alaşım ince film sistemleri MgO (100) alttaşı üzerine farklı kimyasal konsantrasyon oranlarında hazırlanarak, kimyasal konsantrasyon oranlarının yapısal ve manyetik özellikler üzerinde etkileri incelenmiştir. Geliştirilen ince film sistemlerinin kristal yapı özellikleri XRD tekniği kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizlerde örneklerin latis sabitleri Bragg Yasası ve Vegard İkili Bileşik yasası ile hesaplanarak konsantrasyon oranına göre değiştiği görülmüştür. Yüzey morfolojileri incelendiğinde örneklerin homojen bir ve ortalama eşit tane boyutlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Örneklerin manyetik özellikleri FMR ve VSM sistemleri kullanılarak incelenmiştir. FMR ölçümleri sonucunda permalloy-bakır alaşım filmlerinin oda sıcaklığında ferromanyetik özelliklere sahip olduğu gösterilmiş ve alaşım filmlerin iki farklı manyetik anizotropi varlığı tespit edilmiştir. Manyetik anizotropi özelliklerinin kimyasal konsantrasyon oranlarına bağlı olarak değişmesinin yanında örneklerin manyetik momentlerinin yönelimi ise düzlem içi ve düzlem dışı geometrilerden farklı olduğu belirlenmiştir. Titreşimli örnek manyeto metrisi ölçümlerinde ise örneklerin konsantrasyon oranına bağlı olarak ferromanyetik davranıştan süperparamanyetik davranışa yöneldiği gözlemlenmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak yapılan analizlerde ise örneklerin belirli sıcaklıklarda faz geçişlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda NiFe-Cu alaşımlarının konsantrasyon oranına bağlı olarak oda sıcaklığında ferromanyetik özelliklere sahip olduğu ve bu özelliklerin kimyasal konsantrasyon oranına göre değiştirilebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Spintronik Sistemler, Ferromanyetik Rezonans, Manyetik Alaşım İnce Filmler, Magnetron Saçtırma Yöntemi.

SUMMARY

In this thesis, it is aimed to investigate the structural and magnetic properties of $\text{Py}_x\text{Cu}_{1-x}$ alloy thin films for use in spintronic systems. Alloy thin film systems were prepared on MgO (100) substrates at different chemical concentration ratios and the effects of chemical concentration ratios on structural and magnetic properties were investigated. The crystal structure properties of the thin film systems were developed by using XRD technique. According the analyzes, the lattice constants of the samples were calculated by Bragg Law and Vegard Law and it was observed that the mesh constants changed according to the concentration ratio. When the surface morphology was examined, it was seen that the samples had a homogenous and average equal grain size. The magnetic properties of the samples were investigated using FMR and VSM systems. As a result of FMR measurements, permalloy-copper alloy films have been shown to have ferromagnetic properties at room temperature and the presence of two different magnetic anisotropy of alloy films has been determined. Magnetic anisotropy properties vary depending on the chemical concentration ratio, as well as the orientation of the magnetic moments of the samples were found to be different from in-plane and out-of-plane geometries. In the vibratory sample magnetometry measurements, it was observed that the samples were shifted from ferromagnetic behavior to superparamagnetic behavior depending on the concentration ratio. It was determined that the samples have phase transitions at certain temperatures. According to these results, it is understood that NiFe-Cu alloys have ferromagnetic properties at room temperature depending on concentration ratio and these properties can be changed according to chemical concentration ratio.

Key Words: Spintronic Systems, Ferromagnetic Resonance, Magnetic Alloy Thin Films, Magnetron Sputtering Method.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında bilgilerini, tecrübelerini, emeğini, zamanını ve sabrını esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Fikret YILDIZ'a, tecrübeleri doğrultusunda bana olan katkılarından ve emeğinden dolayı sayın Dr. Perihan AKSU'ya, uzun çalışma mesailerimde sürekli yanımda olan ve her zaman yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşlarım Can DAVUT ve Yasin ÇETİNKAYA'ya,

Beni bu günlere kadar yetiştiren desteklerini ve sabırlarını hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman başarılarım için emek veren ve inançlarını kaybetmeyen değerli Aileme,

Tanıştığım günden bu zamana kadar her ihtiyacım olduğunda yanımda olan desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen her zaman yanımda olan Aslıhan Aktepe'ye

Her ihtiyacım olduğunda yanımda olan ve hayatımda her zorluğu aşmamda yardımcı olan öz kardeşim kadar yakın Can Dostum Özgün Şenalp 'e

Öğrencilik hayatım boyunca derslerini aldığım, ufkumu açarak kendimi geliştirmemi sağlayan ve bilgilerini bizden esirgemeyen bütün değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma,

Son olarak ise, ben ve benim gibi insanlara modern eğitim anlayışı doğrultusunda bilim ve teknoloji ile uğraşabilme imkânı verdiği için çağdaş Türkiye'nin kurucusu Ulu Önder Mustafa Kemal ATATÜRK'e sonsuz minnettarlığımı belirtir ve teşekkürü bir borç bilirim.

“Yerinde duran toplumlar daima geriye gidiyor demektir”

Mustafa Kemal ATATÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. TEMEL KAVRAMLAR VE BİLGİLER	8
2.1. Manyetizma ve Manyetizmanın Teorik Kuramı	8
2.2. Manyetik Davranış ve Etkileşme Türleri	15
2.3. Manyetik Özellikler ve Ölçme Esasları	25
2.4. İnce Film Teknolojisi, Üretim ve Analiz Yöntemleri	29
3. DENEYSEL TEKNİKLER	35
3.1. İnce Filmlerin Büyütme Tekniği (Sputter Yöntemi)	35
3.2. İnce Film Karakterizasyon Yöntemleri	37
3.2.1. X-Işını Kırınımı (XRD)	37
3.2.2. X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	40
3.2.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	42
3.2.4. Ferromanyetik Rezonans (FMR)	44
3.2.5. Titreşimli Örnek Manyetometrisi (VSM)	46
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	48
4.1. Alttaşların Temizliği ve Örneklerin Hazırlanması	48
4.2. Yapısal Analizlerin Sonuçları	53
4.3. Manyetik Analizlerin Sonuçları	59

5. SONUÇLAR ve YORUMLAR	74
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	80



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve

Kısaltmalar:

Açıklamalar:

$\text{\AA}$	: Angstrom
S	: Dell Operatörü
E	: Elektrik Alan Vektörü
∇	: Elektriksel Yük Yoğunluğu
ϵ_0	: Serbest Uzayın elektriksel geçirgenliği
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu Vektörü
μ_0	: Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
J	: Akım Vektörü
F	: Kuvvet Vektörü
q	: Elektriksel Yük
p	: Elektriksel Kutup Şiddeti
r	: Mesafe
k	: Boltzman Sabiti
H	: Manyetik Alan Şiddet Vektörü
τ	: Tork Vektörü
Θ	: Açı
l	: İki kutup arasındaki mesafe
E_p	: Dipol Elektrik Alan Büyüklüğü
m	: Manyetik Moment Vektörü
V	: Hacim
M	: Mıknatıslanma (Manyetizasyon)
I	: Akım Şiddeti
μ_L	: Yörünge manyetik moment büyüklüğü, vektörü
v	: Hız vektörü
L	: Açısal momentum vektörü
p	: Çizgisel Momentum Vektörü
m_e	: Elektron kütlesi

H	: Planck Sabiti
c	: Serbest uzayda ışık hızı
e	: Elektron yükü
γ_L	: Yörünge manyetik moment için jiromanyetik oran
g_L	: Yörünge manyetik moment için yarılma çarpanı
m_s	: Spin manyetik kuantum sayısı
μ_s	: Spin manyetik moment vektörü
g_s	: Spin manyetik moment için spektroskopik yarılma çarpanı
γ_s	: Spin manyetik moment için jiromanyetik oran
$\mathbf{S}$	: Spin vektörü
μ_B	: Bohr Magnetronu
$\mathbf{J}$	: Toplam Açısal Momentum Operatörü
g_J	: Toplam Açısal Momentum için yarılma çarpanı
γ_J	: Toplam Açısal Momentum için jiromanyetik oran
χ	: Hacimce Manyetik Duygunluk
μ	: Manyetik geçirgenlik
χ_m	: Kütlece manyetik doygunluk
C	: Curie Sabiti
T	: Sıcaklık
H_m	: Moleküler Alanın Manyetik Alan Şiddeti
γ_m	: Moleküler Alan sabiti
Θ	: Curie Sabiti
T_c	: Curie Sıcaklığı
J_{ex}	: Değiş tokuş sabiti
E_{ex}	: Değiş tokuş enerjisi
$\emptyset$	: Açı
Λ	: Dalga boyu
$\mathbf{k}$	: Gelen dalga vektörü
$\mathbf{k}'$	: Yansıyan dalga vektörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: GMR etkisi şematik gösterimi a)spinler antiparalel b) spinler paralel.	2
1.2: Spintornik sistemler için kullanılan malzemelerin gruplandırılması.	4
2.1: Dış manyetik alan etkisi altında manyetik kutuplara etkiyen kuvvetler.	10
2.2: Stern-Gerlach Deney Düzeneği.	13
2.3: Diamanyetik bir malzemedeki manyetik momentlerinin dış manyetik alan etkisi altında yönelimi.	16
2.4: Diamanyetik bir malzemenin dış manyetik alan ve sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluğunun değişimi.	17
2.5: Paramanyetik bir malzemedeki manyetik momentlerinin dış manyetik alan etkisi altında yönelimi.	18
2.6: Paramanyetik bir malzemenin dış manyetik alan ve sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluğunun değişimi.	19
2.7: Ferromanyetik bir malzemedeki manyetik momentlerinin dış manyetik alan etkisi altında yönelimi.	20
2.8: Ferromanyetik bir malzemenin sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluk değişimi.	20
2.9: Harici alan altında manyetik domainlerin alan yönünde hizalanması.	21
2.10: Antiferromanyetik bir malzemedeki manyetik momentlerinin dış manyetik alan etkisi altında yönelimi.	22
2.11: Anti-ferromanyetik bir malzemenin sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluk değişimi.	22
2.12: Değiş-tokuş enerjisine göre malzemelerin davranışı.	23
2.13: Ferrimanyetik bir malzemenin sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluk değişimi.	24
2.14: Soft ve Hard manyetik malzemelerin histerisiz çevrimleri.	26
2.15: İnce Film Üretim Sistemleri.	30

2.16:	İnce film büyüme modlarının şematik gösterimi.	32
3.1:	Magnetron sputter sistemi çalışma prensibi.	35
3.2:	Bragg yasası şematik gösterimi.	37
3.3:	XPS sistemi çalışma prensibi.	39
3.4:	TiO ₂ XPS survey spektrumu. Elektron demeti ve örnek arasında üretilen çeşitli sinyaller ve bu sinyallerin alındığı bölgeler.	40
3.5:	Elektron demeti ve örnek arasında üretilen çeşitli sinyaller ve bu sinyallerin alındığı bölgeler.	41
3.6:	Ferromanyetik Rezonans tekniği şematik gösterimi.	43
3.7:	VSM sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi.	44
4.1:	MgO alttaş üzerine hazırlanan filmlerin XPS spektrumları.	49
4.2:	MgO alttaş üzerine hazırlanan filmlerin EDS spektrumları.	50
4.3:	Py-Cu alaşım ince filmlerin x-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri NiFe-Cu (200) düzlemi.	52
4.4:	Py-Cu alaşım ince filmlerin x-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri Cu (111) düzlemi.	53
4.5:	Örgü sabitleri değişimi.	54
4.6:	Oda sıcaklığında hazırlanan bazı Py-Cu alaşım ince filmlerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) ölçümleri.	55
4.7:	320 C° Py-Cu alaşım ince filmlerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri.	56
4.8:	FMR ölçüm geometrilerinin şematik gösterimi.	58
4.9:	Py-Cu alaşım ince filmlerin In-Plane FMR spekturumları.	59
4.10:	Py-Cu alaşım ince filmlerin Out-Of-Plane FMR spekturumları.	60
4.11:	Py-Cu alaşım ince filmlerin Out-Of-Plane rezonans alanları.	61
4.12:	Py-Cu alaşım ince filmlerin out-of-plane (90° dön.)) rezonans alanları.	61
4.13:	Py-Cu alaşım ince filmlerin In-Plane rezonans alanları.	62
4.14:	Oda sıcaklığında farklı konsantrasyon oranlarında M-H eğrileri.	63
4.15:	Farklı sıcaklar için In-plane histerisz eğrileri.	66
4.16:	Farklı sıcaklar için Out-of-plane histerisz eğrileri.	67

4.17: In-plane M-T ölçümleri.

68

4.18: TB geçiş sıcaklıkları.

69



TABLolar DİZİNİ

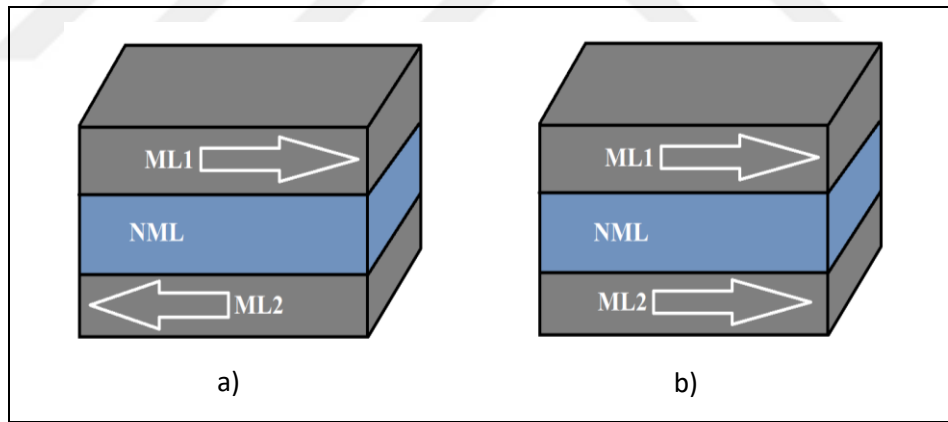
<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Vakum bölgelerinin isimlendirilmesi.	33
3.1: Kristal yapılaraya göre düzlemler arası mesafe formülleri.	37
4.1: Büyütme parametreleri ve hesaplanan yüzde NiFe oranları.	47
4.2: XPS ve EDS analizleri sonuçların göre % NiFe oranları.	48
4.3: NiFe-Cu alaşımların filmlerin örgü sabitleri.	53
4.4: NiFe-Cu alaşımların filmlerin manyetik özellikleri.	65
4.5: Engelleme sıcaklığının konsantrasyon oranlarına göre değişimi.	69

1. GİRİŞ

19. ve 20. yüzyılları mikro elektronik çağı olarak adlandırmak yanlış olmaz. İlk üretilen transistörden günümüzde kullanılan bilgisayarlarda bulunan hızlı mikro işlemciler kadar hızlı bir gelişim ve teknolojik bir ilerleme söz konusu olmuştur. Bu elektronik cihazların sistemlerinde kullanılan devrelerde, veriler elektrik akımının varlığı ya da yokluğu ile oluşturulan ikili mantık sistemine (0 veya 1 değerini alan bit'ler) göre saklanarak iletilir ve işlenir [1]. Temelinde bu kadar basit bir sistemin olduğu teknoloji günümüzde yüzlerce milyon dolar ile ölçülen bir elektronik pazarın oluşumuna neden olmuştur ve değerini artırmaya devam etmektedir. Ancak her ilerlemenin bir sınırı olduğu gibi burada da kullanılan yarı-iletken teknolojisinde tümleşik devrelerin boyutlarının 100 nm'nin altına düşmesi ve boyutlarının belirli bir sınıra dayanması; yüksek güç tüketimleri, veri işleme hızlarının artırılmasındaki gelişmelerde duraklamaların olmasına neden olmuştur. Bu da bilim insanlarının teknolojik alanda farklı arayışlara girmelerine ve yeni malzemelere yönelmelerine sebep olmuştur. Bu kapsamda araştırmacılar hızlı veri işleme kapasitesine sahip, düşük güç tüketimi olan ve aynı zamanda hem işlem yapabilme hem de depolayabilme özelliklerine sahip olabilen üretim maliyeti düşük ve kolay entegrasyon özelliğine sahip manyetik yarı-iletken malzemeler ışığında yeni bir çalışma geliştirmek istemişlerdir [2].

1922 yılında manyetizma kuramının temelleri araştırılırken yapılan bir deney, atomlar için spin kuramı ortaya atılmıştır ve elektronların manyetik momentlerinin yöneliminin yukarı ya da aşağı yönde (spin-up, spin-down) olmak üzere iki temel durumundan bahsedilmiştir. Spin kuramı ile ilgili gelişmelerden sonra ve bir malzemenin manyetik momentlerinin yönelimi ve harici bir dış manyetik alana karşı verdiği tepkilerin analiz edilmesinden sonra manyetik malzemelerde manyetik davranış çeşitlilikleri olduğu örneğin; ferromanyetik malzemelerin manyetik momentlerinin, harici bir manyetik alan ile yönlendirmenin mümkün olduğu ve manyetik alanın ortadan kaldırılması ile yönelimin bozulmadığı gözlemlenmiştir (kalıcı mıknatıslanma) [3]. Bu aşama ile yukarıda tanımlanmış olan malzeme konsepti bir

bakıma ilk ihtiyacı karşılamıştır. Araştırmacıların spin etkisi üzerine yaptığı çalışmalarda ise; malzemelerin spin etkilerinin tıpkı elektronların yükü ve kütlesi gibi temel bir niceliği olduğunu anlamışlardır. Buradan hareketle spin ve elektronik bilgilerini birleştirerek spin elektroniği (spintornik) kavramını oluşturmuşlardır. Bu kapsamda mikro elektronik ve bilgi iletimi konusunda yeni bir alternatif ortaya çıkmıştır. Elektronların yük kimliklerinin yanı sıra spin kimliklerinin de kullanılması, yeni bir bilgi iletim kanalı sunmaktadır. Yıllar içerisinde malzeme üretim yöntemlerinin gelişmesi, spintronik cihazların; MRAM (magnetoresistive random access memory) kalıcı belleklerde, yüksek hassasiyete sahip sensör teknolojilerinde ve manyetik veri depolama disklerinin okuma/yazma kafaları gibi önemli alanlarda kullanılmasını sağlamıştır [4-5]. Spin tabanlı cihazların alışılmış yük temelli cihazlar üzerinde birçok avantajı sağladığı gibi; düşük güç tüketimi, güncel sistemlere entegrasyon kolaylığı, hızlı veri işleme gücü ve entegre devlerin daha kompakt (küçük) hale getirilebilmesi gibi önemli özelliklerinden dolayı spintronik cihazlar mikro elektronik endüstrisinde de önemli bir yer oynamaktadır.



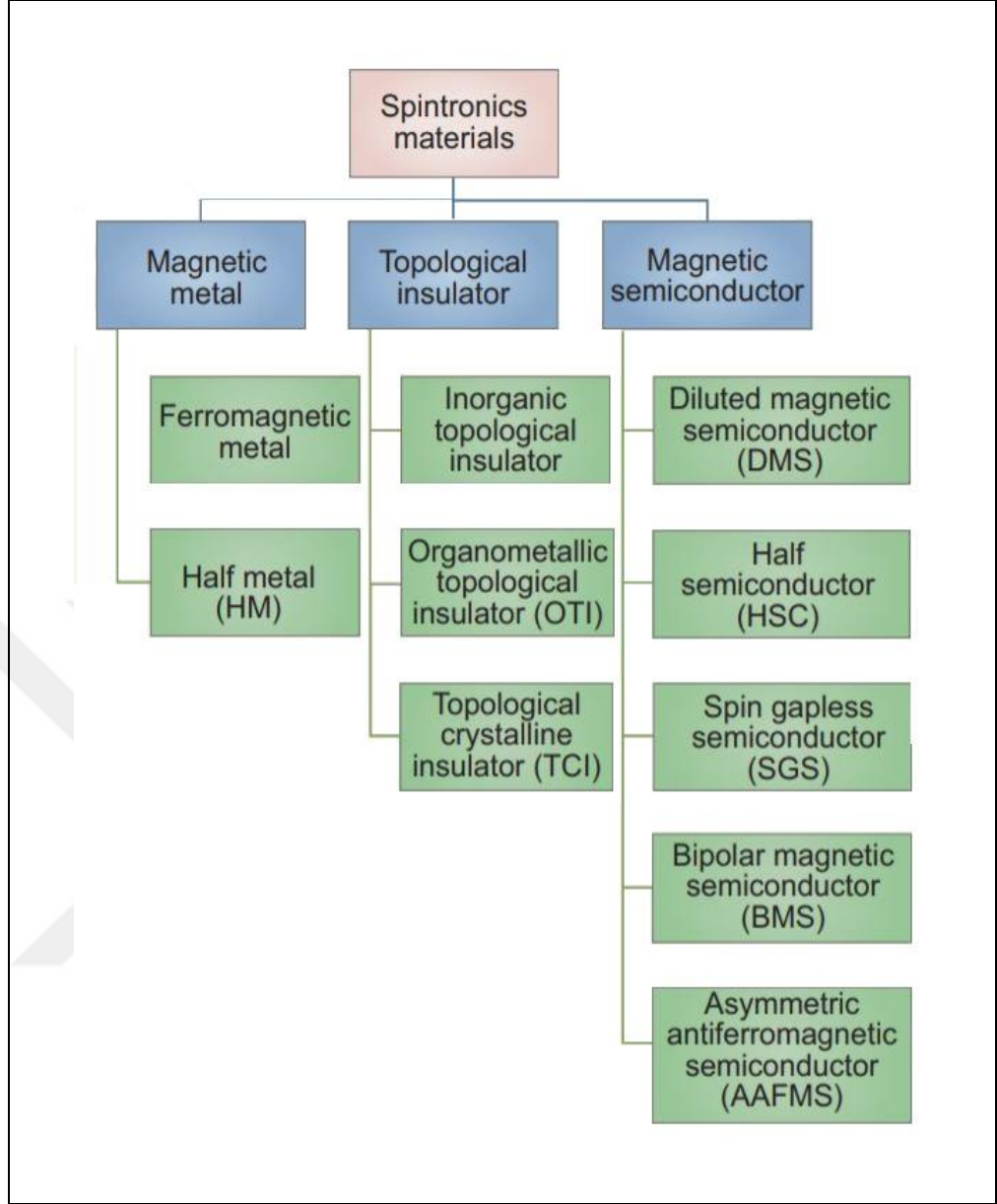
Şekil 1.1: GMR etkisi şematik gösterimi a) spinler antiparalel b) spinler paralel.

Spintronik teknolojisinin ilk uygulaması 1988 yılında keşfedilen 'Dev Manyetodirenç Etkisi (Gaint Magneto Resistance \ GMR)' dir. Bu çalışma, ince film ferromanyetik malzemelerin ve spin tabanlı sistemlerin kullanımında başlangıç olarak ele alınabilir. GMR etkisi; iki ferromanyetik tabaka arasında birkaç nanometre kalınlığında manyetik olmayan bir katman (ince filmlerdeki sandviç yapı) ile ayrılması

sonucunda malzemenin direncinde ferromanyetik tabakaların spin yönelimlerine göre bir değişim oluşturur [6]. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi ferromanyetik tabakaların mıknatıslanmaları paralel ise direnç düşük, anti-paralel ise direnç büyük olmaktadır. Atomların spin özelliklerinin kullanılmasıyla yapılan bu çalışmada, elektriksel direnç değerlerini değiştirebilmek gelecekteki başka uygulamalar için de bir ışık niteliğindedir.

Spin tabanlı sistemler için, daha önce bahsedilen GMR etkisinin keşfi ile başlayan yolculuk güncel teknolojilere bu sistemlerin entegrasyonu ve yeni teknolojilerin üretilmesi ile devam etmektedir. Örneğin; hard disk teknolojilerinde kullanılmasının yanı sıra, Magnetoresistive Random Access Memories (MRAM), spin-FET, spin transistör, spin kuantum bilgisayar, manyetik yarı-iletken cihazlar gibi benzer cihazların üretilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca maddelerin spin özelliklerinin manyetizma ile birebir ilişkili olduğu ve bu tür sistemlerin sensor teknolojilerinde bir hayli kullanıldığı bilinmektedir. Spin temelli teknolojilerin hayatımızda yoğun olarak yer alması için birtakım sorunların (uzun mesafede spinlerin taşınması, polarize spin taşıyıcıların oluşturulması, spin dönüşlerinin manipülasyonu gibi) çözülmesi ve bu sorunların çözümlerine yönelik uygun malzeme konseptlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple spintronik teknolojilerde kullanılmak üzere farklı konseptte malzemelerin geliştirilmesi önemli bir başka konu olmuştur. Spintronik sistemler için kullanılan malzemeleri Şekil 1.2’den görülebileceği gibi (i) manyetik metaller (ii) yalıtkan malzemelerin özel bir durumu olan topolojik yalıtkanlar (iii) manyetik yarı iletkenler olmak üzere üç grupta toplayabiliriz [7].

Şekil 1.2 incelendiğinde spintronik sistemler için birçok farklı konseptin ortaya konduğu görülmektedir. Ancak bu malzemelerde aranan ilk önemli özellik oda sıcaklığında düzgün bir manyetik düzene sahip olmasıdır (Curie sıcaklıklarının oda sıcaklığından yüksek olması). Araştırmacıların bu konuda yeni malzeme arayışları devam ederken ilgi manyetik metaller ve manyetik yarı-iletkenler üzerinde toplanmaktadır.



Şekil 1.2: Spintornik sistemler için kullanılan malzemelerin gruplandırılması.

Manyetik yarı-iletken malzemeler, bir malzemenin manyetik ve yarı-iletken özelliklerini birleştirerek spintronik sistemlerde kullanılabilir malzemelerin oluşturulmasını hedeflemektedir. Diğer spintronik malzemeler ile karşılaştırıldığında manyetik yarı-iletkenler günümüzde gelişmiş olan yarı-iletken teknolojisini kullanarak cihazlara kolayca entegre edilebilmektedir. Ancak birçok manyetik yarı-iletken malzemelerin pratik olarak uygulanmasını engelleyen bir sorun mevcuttur: Manyetik yarı-iletken malzemelerin manyetik özellikleri düşük sıcaklıklarda ortaya çıkmaktadır.

Bu sebepten dolayı manyetik yarı-iletkenler ile oda sıcaklığında çalışabilecek cihazların geliştirilebilmesi mümkün değildir. Ortaya çıkan bu sorunun çözülebilmesi için, çoğunlukla seyreltilmiş manyetik yarı-iletkenler (DMS) malzemeler ile ve farklı grupta malzemeler ile çalışmalar devam etmektedir.

Manyetik metal malzemeler ise, ferromanyetik metaller (FM) ve yarı-metalik ferromanyetik (HFM) malzemeler olarak iki grupta incelenir. Ferromanyetik metaller (Fe, Co, Ni ve farklı alaşımları gibi) spintronik sistemlerde kullanılan en eski malzemeler olarak bilinir, yüksek Curie sıcaklıklarının yanı sıra üretim teknolojilerindeki yerleri ve buradaki teorileri iyi bilinmektedir. Ancak spin polarizasyon dereceleri diğer malzemelere göre daha düşük seviyede olduğundan kısmen kullanılabilirler. Yarı metalik ferromanyetikler (HFM) ise spin polarizasyonu FM'lere göre daha yüksek malzemelerdir. Yüksek ferromanyetik Curie sıcaklığı ve manyetik anizotropi enerjilerinin yüksek olması bu tür malzemeleri daha kullanışlı hale getirebilir [7-9].

Spintronik sistemlerin, yarı-iletken sistemlere göre avantajları ve birleştirile bilindiklerinde ortaya çıkabilecek olan yeni özelliklerin çok yönlülüğü oldukça açık olarak bilinmektedir. Burada düşük güç tüketimi, nano boyutlarda malzemelerin üretilmesi ve hızlı veri işleme özellikleri gelecek teknolojilerde kullanılabilecek önemli özelliklerdendir. Spintronik malzemeler üzerinde gelinen bu noktada üç önemli özellik olduğu anlaşılmıştır:

- Oda sıcaklığında yüksek manyetik özellikler,
- Güncel teknolojilere entegre edilebilirlik,
- Maliyeti düşük malzeme ve üretim yöntemi.

Spintronik sistemlerin malzemelerin manyetik özellikleri ile direk bağlantılı olması araştırmacıları manyetik özellikleri kolay değiştirilebilen (yumuşak manyetik malzemeler\soft manyetik malzemeler) malzemelere yöneltmiştir. Yüksek ferromanyetik özellik gösteren elementler ve bunların alaşımları önemli bir çalışma konusudur. Demir'e göre çok daha yüksek başlangıç manyetik geçirgenliğe sahip olan

demir-nikel alaşımları belirtilen alanlarda çalışılan en önemli malzemelerden biridir. Mikro elektronik, sensor teknolojileri gibi birçok alanda kullanılan bu alaşımlar olağanüstü yumuşak manyetik özelliklere sahiptir. Demir-nikel alaşımları farklı kimyasal konsantrasyonlarda üretilerek bu alaşımlar üzerinde çeşitli özelliklerin elde edilmesi başarılmıştır. Demir-nikel alaşımlarında nikel oranlarının fazla olduğu alaşımlar Permalloy olarak adlandırılır ve bu alaşımlar için 3 önemli kimyasal konsantrasyon oranı belirlenmiştir [10]. Permalloy alaşımları içerisindeki nikel konsantrasyon oranına bağlı olarak diğer ferromanyetik malzemelerden daha yüksek manyetik geçirgenlik, daha yüksek manyetik anizotropi, daha yüksek mıknatıslanma değerleri ve daha yüksek stabilite sergileyebilir. Bu sebeple gelişmiş manyetik özelliklerinden dolayı spin tabanlı sistemlerde en çok kullanılan malzemeler arasındadır.

Permalloy alaşımlarının bu eşsiz manyetik özelliklerini daha efektif kullanabilmek ve geliştirmek adına birçok çalışmada çok katmanlı ince film sistemleri ve alaşım ince film sistemleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. İnce film sistemlerinin yapısal, manyetik, elektronik özellikleri büyütme sıcaklığına, alttaş çeşidine, film kalınlığına bağlı olarak farklı özellikler sergilemesi bilinen bir fenomendir. Bu bağlamda yapılan alışmalar NiFe alaşımlarının yapısal ve manyetik özelliklerini geliştirerek yeni özelliklerin elde edilmesi ve yeni malzemelerin üretimine odaklıdır. Daha önce yapılan çalışmalarda NiFe/Cu/NiFe gibi katmanlı yapılarda Cu katmanının sayısına ve katman kalınlığına bağlı olarak yapısal ve manyetik özelliklerin değiştiği gözlemlenmiştir [11-13]. Aynı zamanda NiFe alaşımları farklı malzemeler ile katkılanarak elde edilen ince filmlerin manyetik özelliklerinin etkilendiği gözlemlenmiştir [14-16].

Bu bilgiler doğrultusunda bu tez çalışmasında demir, nikel gibi düşük maliyetler ile üretilebilen ve yüksek manyetik özellik gösteren ferromanyetik malzemelerin alaşımlı yapıları çalışılarak spin tabanlı sistemlerde kullanılmak üzere yeni malzemelerin üretilmesine odaklanılmıştır. Permalloy (NiFe alaşımı) ve bakır malzemeleri kullanılarak oluşturulan alaşım ince film sistemleri, MgO alttaşlar üzerine hazırlanmıştır ve alaşım içerisindeki Permalloy 'un kimyasal kompozisyon oranına

göre manyetik ve yapısal analizler yapılmıştır. Çalışma kapsamında amacımız farklı kimyasal konsantrasyon oranlarında NiFe/Cu alaşım ince filmlerin üretilmesini sağlayarak, spin temelli sistemler için kolay üretilebilir, maliyeti düşük malzemelerin geliştirilmesini sağlamaktır.



2. TEMEL KAVRAMLAR VE BİLGİLER

Bu bölümde, çalışmanın daha iyi anlaşılabilmesi için manyetizma ve ince film teknolojisi konularında gerekli olan temel bilgilere yer verilecektir. Bölüm içeriğinde,

- Manyetizma ve manyetizmanın teorik kuramı,
- Manyetik davranış ve etkileşme türleri,
- Manyetik özellikler ve ölçme esasları,
- İnce film teknolojisi, üretim ve analiz yöntemleri,

hakkında bilgiler verilerek gerekli teorik alt yapının oluşturulması hedeflenmektedir.

2.1. Manyetizma ve Manyetizmanın Teorik Kuramı

Keşfi M.Ö. 7. yüzyıla kadar uzanan manyetizma ve manyetik malzemeler, geçmişten beri birçok çalışmaya konu olmuştur ve günlük hayatımızda yer etmiştir. Örneğin günlük hayatımızda yaygın olarak yer alan pusulanın manyetizma ve manyetik malzemelerin etkilerinden faydalananarak yapılan ilk malzeme olduğu bilinmektedir. Böylece dünyanın manyetik alanının kullanılmasıyla yön bulma amaçlı kullanılan pusula, manyetik malzemeler adına ilk keşif olarak adlandırılabilir. Manyetizmanın tarihi oldukça eskiye dayansa da sistematik olarak araştırılması ve ilişkilendirilmesi adına çalışmalar 17. yüzyılda başlamıştır [41].

1600 yılında yayınladığı ‘De Magnete’ kitabı ile William Gilbert (1544-1603), manyetizma üzerine sistematik ve bilimsel çalışmaların başlamasına öncülük etmiştir; öyleki ‘De Magnete’ kitabı gelecek 200 yıl boyunca manyetizma konusunda en önemli tez olarak yerini korumuştur. Gilbert, 17 yıl boyunca manyetizma ve pusula fenomeninin anlaşılabilmesi için sayısız deneyler yaparak manyetik bir pusulanın çalışmalarını anlatan ilk kişi olmuştur ve “manyetik kutup”, “elektrik gücü” ve “elektrik çekimi” terimlerini ortaya atmıştır.

Manyetizma konusunda gelecek araştırmalara yön verecek bir diğer etki ise 1820 yılında Christian Hans Oersted (1777-1851) tarafından gözlemlendi. Oersted, üzerinde elektrik akımı olan bir telin pusulaya yaklaştırılması sonucunda pusula iğnesinde bir sapma olduğunu gördü ve iki ayrı konu olarak ele alınan elektrik ve manyetizmanın birbirleri üzerindeki etkilerini incelemeye başladı. Elektrik ve manyetik alanın birbirleri üzerindeki etkiler incelenirken Andre Marie Ampere (1775-1836) tüm manyetik olayların ve etkilerin hareketli elektrik yüklerinden kaynaklandığını keşfetmiş [3]; Michael Faraday (1791-1869) ise hareket eden mıknatısın elektrik alan ürettiğini keşfetmiştir. Birbirlerinin paralelinde yürüyen bu çalışmalar, manyetizma ve manyetik malzemelerin temel kuramını öğrenme adına en önemli çalışmalardır [3]. Devam eden deneyler ve çalışmalar sonucunda, James Clerk Maxwell (1831-1879) bugün elektromanyetizmanın temelini oluşturan 4 denklem ile (*Maxwell Denklemleri*) literatüre güçlü bir temel yerleştirmiştir:

$$\text{div}\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.1)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\text{rot}\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{J} + \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.4)$$

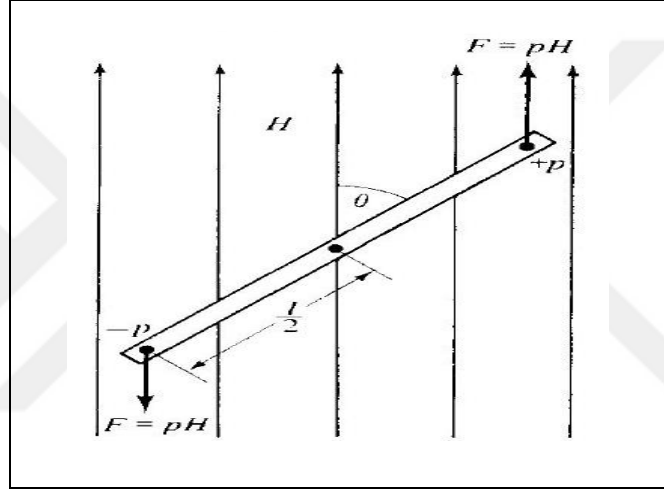
Bu denklemler bazı özel durumlar dışında elektromanyetizmanın temel kuramını özetler [17]. Maxwell denklemleri ile ortaya çıkan elektromanyetizma kuramının yanı sıra manyetizmanın doğasını ve kaynağını anlamak için iki önemli tanım daha yapılması gerekmektedir. Bunlardan ilki ters yasa kuramı olarak adlandırılır ve John Mitchell ve Charles Coulomb tarafından mıknatıs kutuplarının birbirleri üzerinde uyguladığı kuvvet bu kuram ile açıklanmıştır. Coulomb yaptığı akım terazisi deneyi ile;

$$\mathbf{F} = \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad (2.5)$$

kutupların birbirleri üzerinde uyguladığı F kuvvetinin, kutupların p şiddeti ile doğru, aralarındaki r uzaklığının karesi ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Burada manyetik bir kutup etrafında manyetik alan yaratarak kendisine en yakın olan kutbu etkileyecek olan kuvveti:

$$F = kpH \quad (2.6)$$

olarak oluşmaktadır. Bu durum manyetik kutba etki eden kuvvetin, p kutup şiddeti ve manyetik alan şiddeti H ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.1: Dış manyetik alan etkisi altında manyetik kutuplara etkiyen kuvvetler.

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi manyetik kutup şiddeti p olan, l uzunluğunda bir çubuk mıknatıs, düzgün bir H birim manyetik alanı içerisine alan vektörü ile θ açısı yapacak şekilde yerleştirilirse, manyetik çubuk üzerine etkiyen kuvvetler sebebi ile çubuk üzerinde tork meydana gelir. Çubuk mıknatısa etki eden bu tork:

$$\sum \tau = \left(pH \sin \theta \frac{l}{2} \right) + \left(pH \sin \theta \frac{l}{2} \right) = pH \sin \theta l \quad (2.7)$$

- $H=1$ [Oe] ve $\theta=90^\circ$ olması durumunda

$$\sum \tau = mH \sin \theta l, \quad m = pl \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 1.8 verilen ifade de m , çubuk mıknatısın ‘manyetik momenti’ olarak tanımlanır.

Önemli tanımların ikincisi ise “mıknatıslanma” olarak verilebilir. Örneğin; bir demir parçası manyetik alana maruz kaldığında mıknatıslanır ve oluşan manyetizmasının seviyesi alanın şiddetine bağlı hale gelir. Burada mıknatıslanma yoğunluğunun şiddetini tanımlamak için, mıknatıslanma yoğunluğu ya da pratik olarak mıknatıslanma tanımının bilinmesi gerekir. Basit olarak mıknatıslanma (M); birim hacim oranında bulunan manyetik momentlerin yoğunluğudur ve

$$M = \frac{m}{v} \quad (2.9)$$

olarak ifade edilir. Birim mıknatıslanma olarak tanımlanan büyüklüğün birimi [emu/cm^2] olarak verilir. Mıknatıslanma niceliği yukarıda hacme bağlı olarak verilmiş olsa bile bazı durumlarda (termal genleşme vb. gibi) bu ifade yanıltıcı olur. Bu sebeple mıknatıslanma niceliğinin birim kütleye oranlanarak verilmesi daha doğru bir ifade olur (*spesifik mıknatıslanma* σ):

$$\sigma = \frac{M}{\rho}, \quad [emu / g] \quad (2.10)$$

Bazı malzemelerin gösterdiği eşsiz bir özellik olan manyetizma mikroskobik olarak incelendiğinde, manyetizmanın atomların çevresinde bulunan elektronların hareketinden kaynaklandığını gözlemlenmiştir [17]. Atomların etrafında bulunan elektronların iki temel hareketi söz konusudur:

- Atom çevresinde belirli bir yörüngede dolanması (Yörünge Hareketi)
- Kendi etrafında dönmesi (Spin Hareketi)

Bu iki temel hareketin sayesinde elektronlar küçük bir manyetik alan kaynağı olarak düşünülebilir ve bu iki dönme hareketinin ayrı ayrı incelenmesiyle toplam manyetik moment değeri elde edilebilir. Burada elektronların yörüngesel hareketi, dirençsiz bir kapalı telin içerisindeki akım hareketi kullanılarak belirlenebilir. Sabit bir akım olan $\mathbf{I}$ 'nın halka etrafında dönmesi sonucu oluşan manyetik dipol moment (m ya da μ)

$$m = \mathbf{I} \int d_a \quad (2.11)$$

olarak verilir. Burada d_a alan integralidir ve yapılan benzetmeye göre yörünge etrafında dönen elektronun toplam manyetik momenti aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{yörünge}} &= \text{Halkanın Alanı} \times \text{Akım} \\ &= \pi r^2 \frac{e}{2\pi r} \frac{v}{v} \end{aligned} \quad (2.12)$$

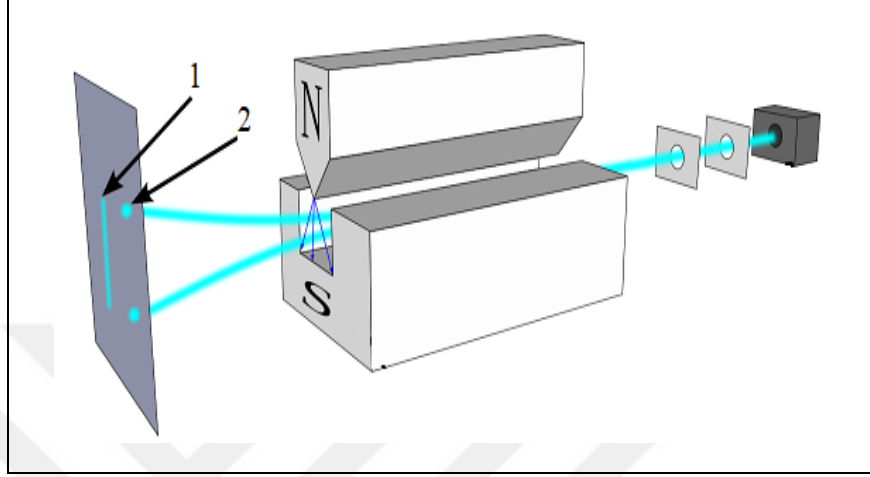
$$\mu_{\text{yörünge}} = \frac{evr}{2} \quad (2.13)$$

r halkanın yarıçapı, v elektronun hızı ve e elektronun yükü olmak üzere; denklem 2.13'te elektronun hızı yerine; $v = \frac{nh}{m_e 2\pi r}$ ifadesi kullanıldığında da yörünge etkisinden kaynaklanan toplam dipol manyetik moment:

$$\mu_{\text{yörünge}} = \frac{eh}{4\pi m_e} \quad (2.14)$$

ile hesaplanabilir. Burada h Planck sabitini ve m_e elektronun kütlesini belirtir. Elektronların spin hareketi ise 1922 yılında Stern-Gerlach deneyi ile keşfedilmiştir [44]. Bu deneyde Bohr atom modeline göre elektronların belirli seviyelerde bulunabileceği ve kesikli açısal momentum değerlerini alabilecekleri savunulmuştur.

Bu teorinin ispatlanması için yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar ne klasik fizik ne de Bohr atom modeline uygun olmayarak yeni bir çalışma konusuna neden olmuş ve yeterince karmaşık olan Kuantum Teorisi'ni daha da karmaşık hale getirmiştir.



Şekil 2.2: Stern-Gerlach Deney Düzenegi.

Bu deneyin sonucunda, klasik fizik yaklaşımı gereği elektronların kesikli açısal momentum değerleri alabilmesi olanaksız olduğu için perde üzerinde Şekil 2.2'de 1 numaralı kısımda görüldüğü gibi sürekli bir çizgi oluşması beklenirdi ya da Bohr atom modeline göre açısal momentumun kesikli değerleri alabildiğini söyleyen teoriye göre perde üzerinde 3 ayrı nokta ($L=1$ durumu için, $2L+1$ açısal momentum durumu) olması beklenirdi. Ancak deney sonucunda beklenenden farklı olarak perde üzerinde Şekil 2.2'de 2 numaralı kısımda görüldüğü gibi 2 ayrı nokta ortaya çıktı. Bu sonuç ile 1925 yılında Goudsmit ve Uhlenbeck spin fikrini ortaya attı. Bu teori, herhangi bir elektronun $L=0$ durumunda bile, spin açısal momentumu sayesinde açısal momentuma sahip olabileceğini ve bu değerlerin 2 farklı değerden (spin-up, spin-down) oluşabileceğini söylemektedir. Elektronların spin etkisinden dolayı oluşan açısal momentumu için bir ifade türetilmek istendiğinde, klasik fizikte spin kavramının karşılığı olmaması sebebi ile sorunlar yaşanır. Ancak tek elektrona sahip atomlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda;

$$\mu_s = -g_s \frac{e}{2m_e} S \quad (2.15)$$

ifadesi elde edilmiştir. Bir atomun toplam manyetik momentine baktığımızda ise

$$\mu = \frac{\mu_B}{2\pi} (L + 2S) \quad (2.16)$$

her elektronun spin ve yörünge manyetik momentlerinin vektör toplamı ile belirlendiği denklem 1.16'dan görülebilir. Burada μ_B Bohr Magnetonu olarak bilinir ve ölçülebilen en küçük açısal momentum değeridir.

Manyetizmanın temel kaynağı olan ve yukarıda detaylı olarak incelenen iki etki sonucunda; bir malzemenin toplam manyetik dipol momentlerinin iki olası durum oluşturduğu görülür. Bu durumlar ise malzemelerin manyetik davranışlarını belirler [17].

- 1.Durum: Elektronların manyetik momentlerinin vektörel toplam sıfır olduğu durumdur ve net bir manyetik moment oluşmaz. Bu durumda maddeler diamanyetik veya paramanyetik davranış gösterir.
- 2.Durum: Elektronların manyetik momentleri birbirlerini kısmi olarak yok ederek ya da güçlendirerek net bir manyetik moment oluşmasını sağlarlar. Bu durumda maddeler ortaya çıkan manyetik moment etkisinin türüne göre ferromanyetik, anti-ferromanyetik veya ferrimanyetik davranış sergilerler.

2.2. Manyetik Davranış ve Etkileşme Türleri

Bölüm 2.1'de anlatılan elektronların yörünge ve spin durumlarında kaynaklanan manyetizma etkisinde, manyetik dipol momentlerin oluşumuna göre manyetik maddeler farklı davranışlar ve etkileşimler ortaya çıkartarak diamanyetik, paramanyetik, ferromanyetik, anti ferromanyetik ya da ferrimanyetik davranış gibi

davranışlar gösterebilirler. Bu sınıflandırmalar sonucunda manyetik malzemelerin dış bir manyetik alana göre gösterdiği özelliklerde de farklılıklar ortaya çıkar. Bu konuda ise manyetik malzemelerin önemli özelliklerinden olan manyetik doygunluk ve manyetik geçirgenlik tanımları ele alınır:

- **Manyetik Doygunluk:** Manyetik doygunluk bir malzemenin harici bir manyetik alana verdiği tepkinin bir ölçüsüdür. Bir manyetik malzemenin, m mıknatıslanmasının $\mathbf{H}$ dış manyetik alanına oranı olarak ifade edilir ve

$$\chi = \frac{m}{\mathbf{H}} \left[\frac{emu}{cm^3 Oe} \right] \quad (2.17)$$

denklemleri ile hesaplanır.

- **Manyetik Geçirgenlik:** Bir malzemenin, kendisine uygulanan bir elektromanyetik alan içerisinde kendi içinden geçmesi için, ne kadar elektromanyetik akıyı destekleyebildiğinin ölçüsü olarak bilinir. Diğer bir deyişle, bir malzemenin manyetik geçirgenliği, manyetizasyon kapasitesinin derecesidir. Harici olarak uygulanan dış bir manyetik alanın madde üzerinde oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu da maddelerin karakteristik bir özelliği olarak bilinir.

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.18)$$

Denklem 1.16'da verilen $\mathbf{B}$ manyetik akı yoğunluğu ve μ_0 ise boş uzayın manyetik geçirgenliğidir. Bu durumda manyetik geçirgenlik

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \left[\frac{gauss}{Oe} \right] \quad (2.19)$$

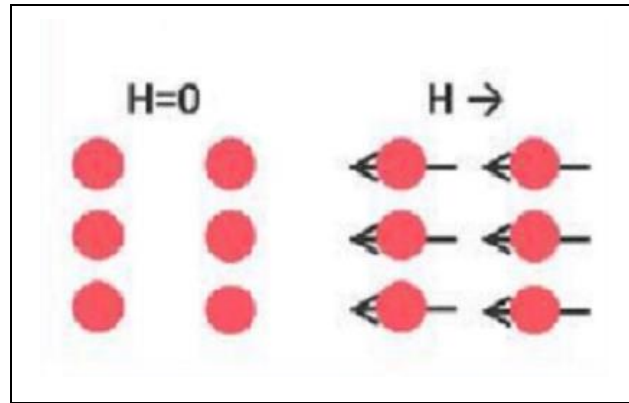
olarak verilir. Yukarıda tanımları yapılan nitelikler bir maddenin manyetik alan içerisinde nasıl davranacağını ve özelliklerini tanımlar. Maddelerin temel olarak

manyetik özellikleri bu nitelikler ile belirlenebilir, ancak daha detaylı bilgiler için daha karmaşık sistemlerin kullanılması gerekir.

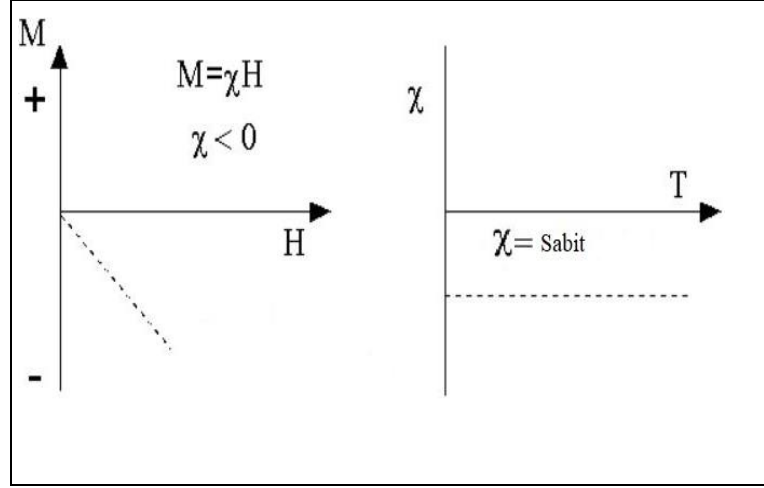
2.2.1 Diamanyetizma

Diamanyetizma temel olarak, malzemelerin net bir manyetik momente sahip olmamasına rağmen manyetik alan altında negatif bir mıknatıslanma oluşturmasıdır. Malzemelerin diamanyetik özellik göstermesinin temel sebebi atomların yörüngesindeki elektronların hareketidir. Diamanyetik malzemelerde Pauli dışarlama ilkesine göre; çiftlenmemiş elektronlar bulunmadığı için elektron, spin etkisinden dolayı net bir manyetik momente sahip olamaz. Ancak yörünge etrafında hareket eden elektronlar dış bir manyetik alan etkisinde, elektromanyetik indüksiyon sebebiyle, daha da hızlanır. İndüklenen elektronlar, manyetik momentler uygulanan manyetik alana zıt bir mıknatıslanma oluşturur [45]. Fakat diamanyetik malzemeler kalıcı olarak mıknatıslanamazlar ve uygulanan harici manyetik alan etkisi giderildiğinde mıknatıslanma özellikleri kaybolur.

Diamanyetik malzemelerde iki önemli karakteristik özellik vardır. Bunlar; (i) mıknatıslanma değerinin ve manyetik doygunluğun negatif olması (uygulanan harici manyetik alana ters yönde mıknatıslanma) ve (ii) manyetik doygunluğun sıcaklıktan bağımsız ve negatif olmasıdır. Bu iki özellik Şekil 2.3 ve 2.4'te gösterilmiştir.



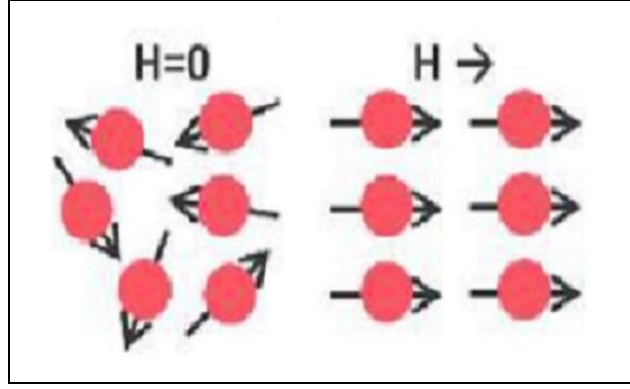
Şekil 2.3: Diamanyetik bir malzemedeki manyetik momentlerinin dış manyetik alan etkisi altında yönelimi.



Şekil 2.4: Diamanyetik bir malzemenin dış manyetik alan ve sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluğunun değişimi.

2.2.2 Paramanyetizma

Paramanyetizma ya da paramanyetik davranış, bir ya da daha fazla eşleşmemiş elektronlara sahip, dolayısı ile net bir manyetik momente sahip olan atom veya moleküllerden oluşan, ancak net bir manyetik momenti olmayan malzemelerde gözlemlenir. Bireysel olarak manyetik momentlerin etkileşime girmemesi sebebi ile malzeme içerisinde manyetik momentlerin rastgele bir düzeni mevcuttur. Bu sebep ile malzeme içerisindeki net mıknatıslanma sıfırdır fakat harici bir manyetik alan etkisi ile manyetik momentler alan yönünde hizalanarak pozitif bir mıknatıslanmayı ortaya çıkartabilirler [46]. Ortaya çıkan bu mıknatıslanma etkisi aynı diamanyetik malzemelerde olduğu gibi kalıcı değildir ve uygulanan harici manyetik alan etkisi giderildiğinde mıknatıslanma özellikleri kaybolur.



Şekil 2.5: Paramanyetik bir malzemedeki manyetik momentlerinin dış manyetik alan etkisi altında yönelimi.

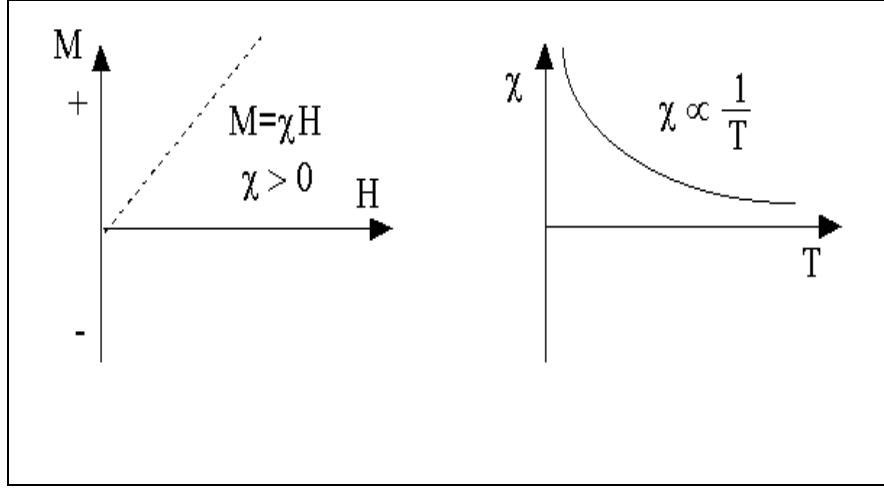
Paramanyetizma, diamanyetik davranışın aksine sıcaklıktan bağımsız olarak incelenemez. Bir paramanyetik malzemenin kütlece doygunluğu ilk olarak Pierre Curie tarafından deneysel olarak aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (2.20)$$

Burada C Curie sabitidir ve T sıcaklıktır. Ancak daha sonra yapılan çalışmalarda Curie yasasının çok daha genel bir durumun parçası olduğu keşfedildi. Weiss tarafından yapılan çalışmalarda; paramanyetik davranış, manyetik momentlerin birbirleri üzerindeki etkileşimleri (moleküler alan teorisi) dikkate alınarak incelendiğinde:

$$\chi_m = \frac{C}{T - \theta} \quad (2.21)$$

olarak hesaplandı. Burada θ terimi moleküler alan sabiti ve sıcaklık ile ilgili bir terimdir. Curie yasasına uyan malzemeler için sıfırdır.



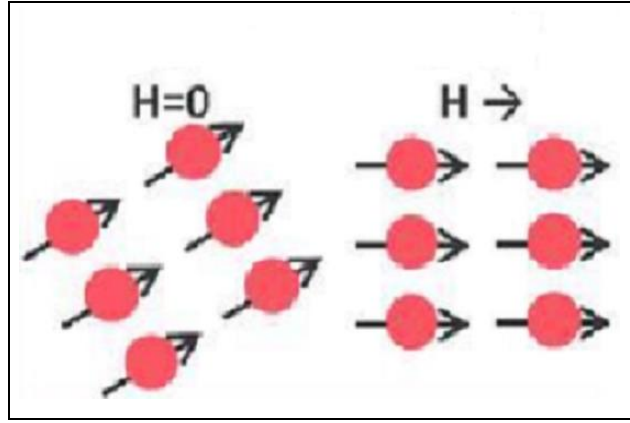
Şekil 2.6: Paramanyetik bir malzemenin dış manyetik alan ve sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluğunun değişimi.

2.2.3 Ferromanyetizma

Ferromanyetizma daha önce incelediğimiz iki davranış türünden oldukça farklı özellikler gösterir. Ferromanyetik davranış gösteren bir malzeme içerisindeki manyetik momentler, kendiliğinden mıknatıslanma özelliği gösterirler belirli bir sıcaklığın (Curie Sıcaklığı) altında bu düzen devam ederken, bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında manyetik momentlerin yönelimi rastgele (düzensiz) olur. Burada ferromanyetik malzemeler için üç önemli özellikten bahsedilebilir:

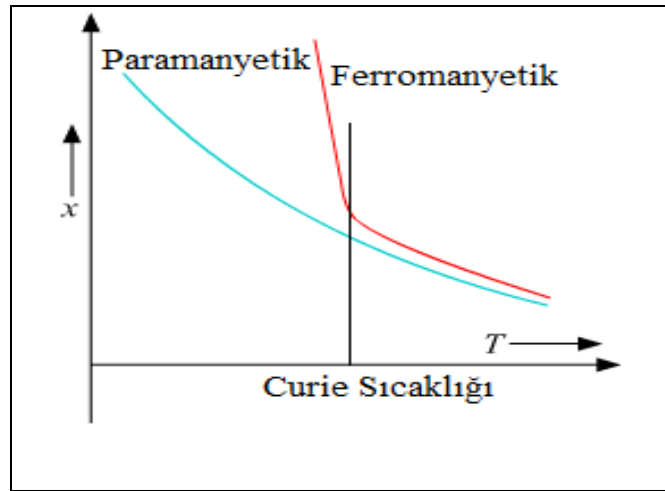
- Kendiliğinden mıknatıslanma
- Manyetik düzen sıcaklığı (Curie sıcaklığı)
- Kalıcı mıknatıslanma

Özellikle Weiss'in ortaya koyduğu moleküler alan teorisi, ferromanyetik davranışın anlaşılmasında oldukça önemli bir rol oynamıştır. Malzeme içerisindeki manyetik momentlerin birbirleri ile etkileşiminin oldukça yüksek olması; manyetik momentlerin belirli bir düzen içerisinde olmasını sağlayarak, kendiliğinden mıknatıslanma özelliği göstermesine sebep olmuştur.



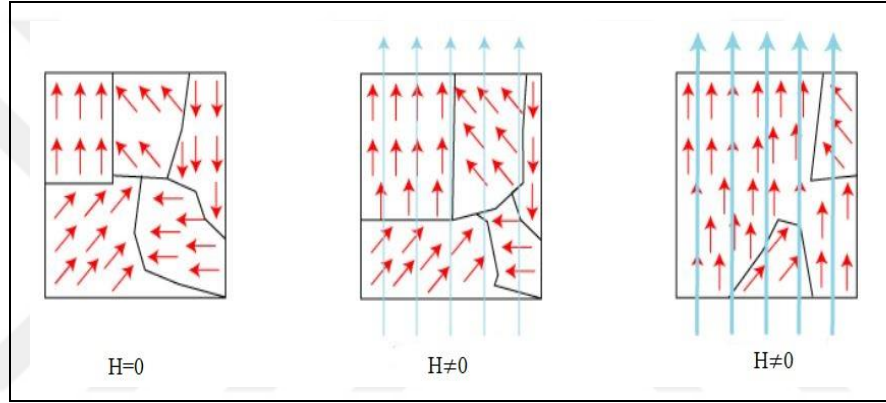
Şekil 2.7: Ferromanyetik bir malzemedeki manyetik momentlerinin dış manyetik alan etkisi altında yönelimi.

Bir diğer yandan ferromanyetik malzemelerde manyetik momentlerin etkileşmesi çok kuvvetli olsa bile, termal düzensizlik ve değişim bu etkinin üstesinden gelebilir. Kritik bir sıcaklık üzerinde manyetik momentlerin yönelimi kendiliğinden yani spontane olarak değişir ve ferromanyetik davranış yerini paramanyetik davranışa bırakır.



Şekil 2.8: Ferromanyetik bir malzemenin sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluk değişimi.

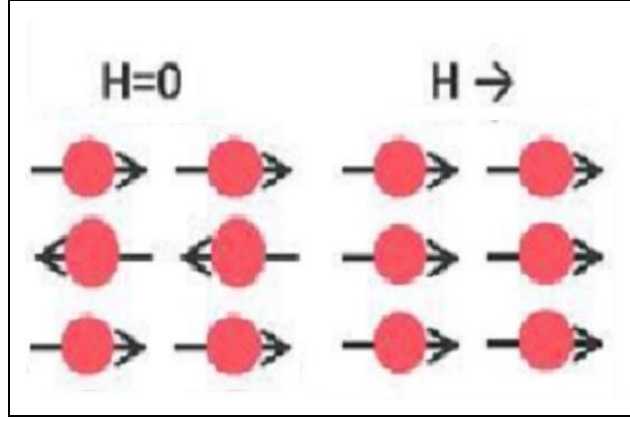
Ferromanyetik malzemeler H_m moleküler alanın oldukça yüksek olmasından dolayı kendiliğinden mıknatıslanma özelliği gösterirler. Fakat başlangıçta mıknatıslanma özelliği gösterebilmeleri için küçükte olsa bir harici manyetik alana ihtiyaç duyarlar. Bu paradoks manyetik bölgeler (manyetik domeinler) kavramı ile açıklanmıştır. Bu kavrama göre; ferromanyetik malzemeler kendi içlerinde farklı yönde mıknatıslanan bölgelere (domeinlere) ayrılarak ferromanyetik malzemenin demanyetize olmasına sebep olurlar. Uygulanan küçük bir harici manyetik alan sayesinde Şekil 2.9'dan görülebileceği gibi manyetik bölgelerin manyetik momentlerin yönü, alan yönünde hizalanarak net bir mıknatıslanma özelliği gösterir [45].



Şekil 2.9: Harici manyetik alan altında, manyetik domainlerin harici uygulanan alan yönünde hizalanması.

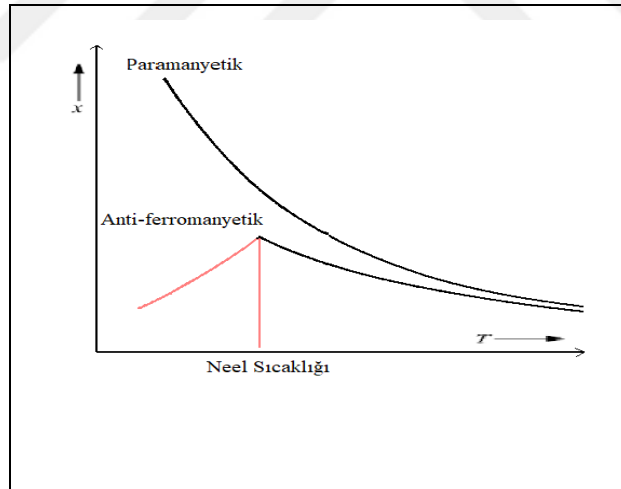
2.2.4 Anti-Ferromanyetizma

Anti-ferromanyetik davranış incelediğimiz paramanyetik ve ferromanyetik davranışa benzer diğer bir davranıştır. Anti-ferromanyetik malzemelerde atomlar net bir manyetik momente sahiptir ve komşu atomların manyetik momentleri birbirlerine zıt yönelmiştir.



Şekil 2.10: Anti-ferromanyetik bir malzemedeki manyetik momentlerinin dış manyetik alan etkisi altında yönelim.

Anti-ferromanyetizma diğer davranışlarda olduğu gibi moleküler alan teorisine bağlı olarak anlaşılabilir. Ayrıca ferromanyetizma da olduğu gibi bir kritik sıcaklık söz konusudur. Neel sıcaklığı olarak adlandırılan bu kritik sıcaklık üzerinde, manyetik momentler termal etkiler sebebi ile düzensiz olarak yönelim gösterirler. Bu sıcaklığın altında ise anti-ferromanyetik davranış söz konusu olur.



Şekil 2.11: Anti-ferromanyetik bir malzemenin sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluk değişimi.

Ferromanyetizma ve anti-ferromanyetizma davranışlarının açıklanabildiği moleküler alan teorisi bu alanın fiziksel kaynağı hakkında hiçbir açıklamaya sahip değildir. Sadece moleküler alanın, malzeme üzerine mıknatıslanmaya sebep

olduğunu ve bir bölgedeki spin yöneliminin, o bölgedeki spin yönelimine daha fazla kuvvet uygulayacağını söylemektedir. Moleküler alanın fiziksel kaynağı 1928 yılında Heisenberg'in kuantum yaklaşımı ve değiş-tokuş (exchange) kuvveti olarak tanımlanmıştır. Değiş-tokuş (exchange) etkisi, birbirlerine komşu atomların elektronlarının farklı seviyelerde olma ihtimali olarak düşünülebilir. Komşu atomların elektronları birbirlerine çok yakın olduğundan hangi seviyelerde dolaştığı belirlenemez. Örneğin; hidrojen molekülünde bu değiş-tokuş saniyede yaklaşık olarak 10^{18} defa gerçekleşmektedir dolayısı ile bir atomun toplam enerjisi hesaplanırken değiş-tokuş ihtimalide göz önüne alınmalıdır. Bu değiş-tokuş enerjisi ise;

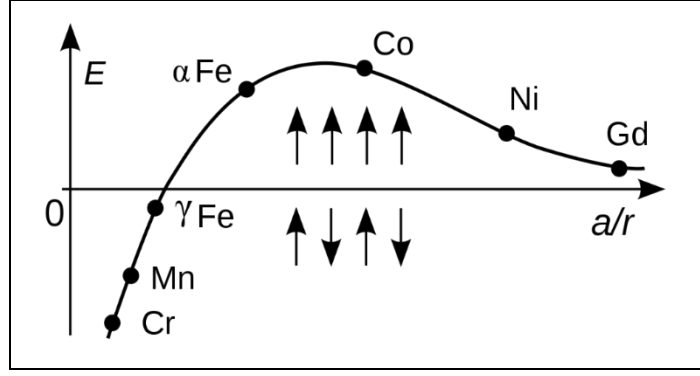
$$\begin{aligned} E_x &= -2J_{ex} S_i S_j \\ &= -2J_{ex} S_i S_j \cos \theta \end{aligned} \quad (2.22)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada J_{ex} değiş-tokuş integrali olarak adlandırılır. Burada:

- $J_{ex} > 0$: Spinler paralel olduğunda ($\theta = 0$) enerji minimum, anti-paralel olduğunda ise ($\theta = 180$) enerji maksimum olur.
- $J_{ex} < 0$: Spinler paralel olduğunda ($\theta = 0$) enerji maksimum, anti-paralel olduğunda ise ($\theta = 180$) enerji minimum olur.

Bir madde içerisinde toplam enerji her zaman minimum olma eğilimindedir. Bu sebeple değiş-tokuş integrali malzemelerin manyetik davranışı konusunda etkilidir.

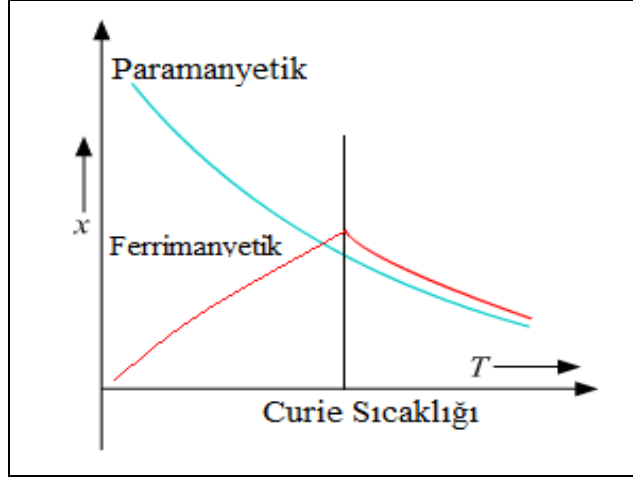
J_{ex} pozitif olduğunda spinler paralel olma eğiliminde olacağından ferromanyetik davranış, J_{ex} negatif olduğunda ise spinler anti-ferromanyetik davranış gösterme eğilimi olacaktır.



Şekil 2.12: Değiş-tokuş enerjisine göre malzemelerin davranışı.

2.2.5 Ferrimanyetizma

Ferrimanyetik davranış, ferromanyetizma ve anti-ferromanyetizma davranışlarının bir kombinasyonu olarak düşünülebilir. İki manyetik davranışa benzer özellikler gösterse bile aralarında önemli farklar vardır. Ferrimanyetler, ferromanyetik malzemeler gibi kendiliğinden mıknatıslanma özelliklerine sahiptir ve Curie sıcaklığının üzerinde paramanyetik davranış sergilerler. Manyetik momentlerinin yönelimi anti-ferromanyetik malzemeler gibi birbirlerine zıt olarak yönelmiştir. Ancak temel fark anti-ferromanyetizma da olduğu gibi net manyetik moment sıfır değildir. Ferrimanyetik malzemelerin manyetik özelliklerinin sıcaklık bağımlılığı ferromanyetik malzemelere benzemektedir. Belirli bir kritik sıcaklık (Curie Sıcaklığı) üzerinde paramanyetik malzemeler gibi davranmaktadır. Ferrimanyetik malzemeler, metal olarak bilinen ferromanyetik malzemelerin aksine seramik (özellikle seramik oksit) malzemelerdir ve geleneksel seramik işleme teknikleri ile elde edilebilir.



Şekil 2.13: Ferrimanyetik bir malzemenin sıcaklık etkisiyle mıknatıslanma ve duygunluk değişimi.

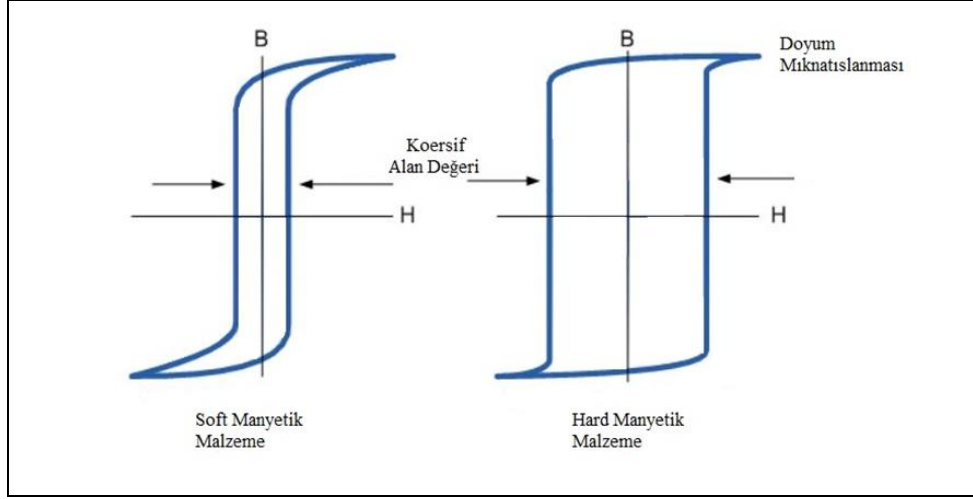
2.3. Manyetik Özellikler ve Ölçme Esasları

Manyetik özelliklerin temel olarak anlaşılıp, manyetizma hakkında güçlü bilgilerin edinebilmesi için, manyetik özellikleri ölçülebilecek sistemler ve analiz metotları gereklidir. Bir malzeme üzerinde manyetik özellikleri belirlemenin iki temel aşaması vardır; birincisi, incelenecek olan malzemenin mıknatıslanmasını sağlayacak harici bir manyetik alanın üretilmesi ikinci aşama ise, üretilen manyetik alanın, incelenecek örnek üzerinde oluşturduğu etkilerin analiz edilmesi. Manyetik malzemelerin temel özelliklerinden bahsederken temel terminolojiye hâkim olmak gerekmektedir. Manyetik malzemelerin temel özelliği olarak beş adet büyüklükten bahsedebiliriz. Bunlar:

- Doyum mıknatıslanması (M_s): Belirli bir sıcaklıkta madde içerisindeki tüm manyetik momentlerin yönelimlerinin alan yönünde olduğu manyetik moment değeri olarak tanımlanır. Bu değerden itibaren madde mıknatıslanma değerini daha fazla artıramaz.
- Anizotropi Sabiti (K): Madde içerisinde mıknatıslanmanın belirli bir yönde olmasının veya tercihinin yönüdür. Bu etkiye yol açabilecek bazı fiziksel durumlar bulunur ve bunlar daha sonra anlatılacaktır.

- Curie Sıcaklığı (T_c): Manyetik davranış çeşitleri anlatılırken bu nicelikten bahsedilmiştir. Tanım olarak ise; atomik manyetik momentlerin termal etki sebebi ile belirli bir düzenden rastgele yönelime geçtiği sıcaklık olarak tanımlanabilir. Manyetik uygulamalarda önemli bir niceliktir.
- Değiş-tokuş Sabiti (A): Değişim sabiti atomik manyetik momentlerin birbirlerine paralel ya da anti-paralel bir denge yönünde hizalanma tercihini belirler. Manyetik momentler tam olarak hizalanmadığında sistemin toplam enerjisi artar. Atomik manyetik momentlerin bu hizalanmasına genel olarak değiş-tokuş sabiti denir.

Yukarıda kısa olarak tanımları yapılan bu beş nicelik bir manyetik malzemenin temel özellikleri olarak adlandırılır. Her bir özelliğin deneysel olarak ölçülmesi ya da hesaplanması mümkündür. Ancak değişim sabitinin ölçümü basit değildir. Uygulanan manyetik alana karşı mıknatıslanma (H-M) özellikleri histerisiz adı verilen bir çevrim ile incelenir. Histerisiz eğrileri, manyetik bir malzemeye sırası ile ters yönlerde manyetik alanlar uygulayarak doyum noktası (M_s), zorlayıcı alan (Ch), yumuşak veya sert manyetik malzeme gibi tipik özelliklerini belirlemekte iyi bir analiz yöntemidir. Deneysel ve teknolojik olarak manyetik özelliklerin belirlenmesi için birçok sistem geliştirilmiştir. Ancak günümüzde Elektro Spin Rezonans Sistemi, Manyeto- Optik Kerr Efekti ve Titreşimli Örnek Manyetometresi gibi sistemlerin kullanımı kullanım kolaylığı ve analiz hassasiyeti gibi sebepler ile oldukça gelişmiştir. Buna bağlı olarak birçok analiz yöntemlerinin de beraberinde gelişmesi manyetik malzemelerin karakterizasyonu adına önemli bir noktadır.



Şekil 2.14: Soft ve Hard manyetik malzemelerin histerisiz çevrimleri.

Bölüm 2.2. 'de anlatılan manyetik davranış türleri ve manyetik malzemelerin analizinde temel olarak ele alınan histerisiz eğrilerinde malzemenin doyum mıknatıslanması değerine nasıl gittiği çeşitli etkilere (soft-hard) bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu farklı davranış türlerinin ortaya çıkmasını en fazla tetikleyen etki ise manyetik anizotropi çeşidi ve değeridir. Manyetik anizotropi bir malzemenin manyetik özelliklerinin ölçüm yönüne olan bağımlılığı olarak ifade eder. Ticari öneme sahip çoğu manyetik malzemede kullanıldığı için bu konu oldukça önemli ve pratiktir. Manyetik bir malzeme üzerinde mıknatıslanma düzenleri, toplam enerji gibi terimlerin manyetik anizotropi ile direkt olarak ilgisi vardır. Manyetik anizotropinin oluşmasındaki temel sebep spin-orbit etkileşmesidir. Literatürde tanımlanmış farklı manyetik anizotropi çeşitleri vardır. Bunlar:

- Manyeto kristal (magneto-crystalline) anizotropisi,
- Şekil (Shape) anizotropisi,
- Yüzey ve arayüzey anizotropisi (surface and interface),
- Gerilme (Stress) anizotropisi,
- Tavlama, plastik deformasyon ve ısıtılma ile oluşturulan anizotropi (induced),
- Tek yönlü anizotropi (unidirectional),
- Değiş tokuş (Exchange) anizotropisi,

Yukarıda verilen anizotropi çeşitlerinin farklı uygulamaları mevcuttur. Örneğin, kalıcı mıknatıslar yapmak için şekil anizotropisine ihtiyaç duyulurken; manyetik kayıt cihazları için yüzey ve manyeto kristal anizotropiye ihtiyaç vardır.

Bahsedilen anizotropi çeşitlerinde sadece manyeto kristal anizotropi (MCA) malzemeye özgü bir özelliktir. İlgilenilen sistemler ince film malzemeler ise karşılaşılmaması en muhtemel anizotropi çeşidi manyeto-kristal anizotropi (MCA) olacaktır. Manyeto-kristal anizotropi bir malzemenin manyetik özelliklerinin kristal yapılarına bağlı olması olarak tanımlanabilir. MCA'nın fiziksel kaynağı ise daha önceden de bahsedildiği gibi spin-orbit etkileşmesidir. Kübik yapıda tek kristal bir malzeme incelendiğini düşünürsek; bu tür bir sistemde manyetik özellikler farklı kristal yönlerine göre ölçüldüğünde malzemenin doyum mıknatıslanmasına nasıl ulaştığı görülecektir. Bu sayede incelenen tek kristal malzeme için hangi yönlerin kolay hangi yönlerin zor eksen olduğu belirlenebilir. Buna göre farklı kristal düzlemleri için farklı mıknatıslanma değerleri elde edilebilir. Bahsedilen bu örnekteki malzemenin yüzey merkezli kübik (FCC) yapıda bir Ni olduğunu düşünürsek $\langle 111 \rangle$ yönü kolay eksen olarak tanımlanacaktır [17]. Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin manyetik momentleri genellikle harici manyetik alan dışında kristalografik yönde (minimum serbest enerji yönü) yönelir ve bu yöne kolay eksen denir. Manyetik anizotropi özelliklerini kristalografik yönde veya uygulanan manyetik alanın fonksiyonu şeklinde deneysel olarak hesaplamak ve analiz etmek mümkündür. Eğer manyetik malzemenin tek bir kristal yönelimi mevcutsa, bir tork manyeto metrisi ile anizotropi özellikleri ve anizotropi sabitini hesaplamak mümkündür. Açığa bağlı olarak yapılan Manyeto Optik Kerr Efekt (MOKE), Titreşimli Örnek Manyetometrisi (VSM) veya Ferromanyetik Rezonans (FMR) teknikleri manyetik malzemenin anizotropi özellikleri hakkında detaylı ve doğru bilgilerin elde edilmesini sağlayabilir.

2.4. İnce Film Teknolojisi, Üretim ve Analiz Yöntemleri

Tarihsel olarak yarım asırdan uzun süredir kullanılan ince film teknolojisi; elektronik cihazlar, optik kaplamalar ve dekoratif kaplama sistemleri gibi birçok

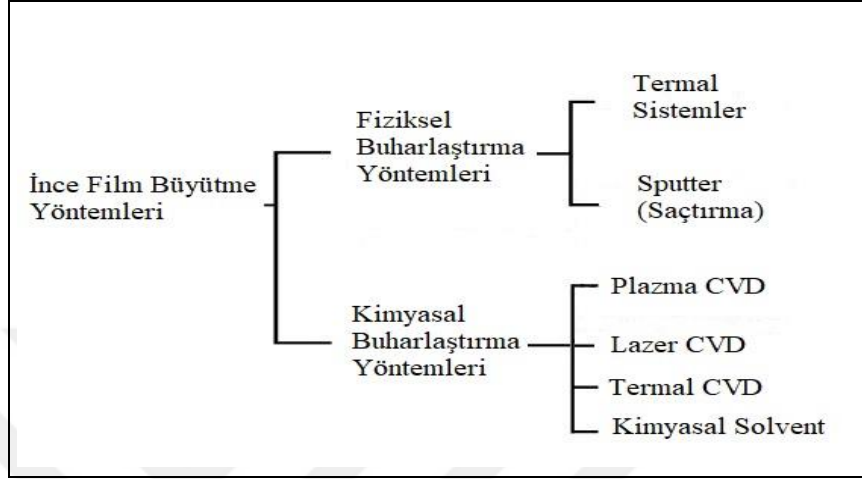
alanda kullanılmış ve halen günümüzde kullanılmaya devam eden köklü bir malzeme teknolojisidir. Nanometre mertebelerinde kalınlığa sahip malzemeler veya bir diğer adıyla kaplamalar, günümüz teknolojisine elektronik ve medikal alanda yön verdiği yapılan çalışmalarda görülmektedir. Bu da atomik boyutlarda malzeme üretimi imkânı sunan ince film sistemlerinin araştırılmasını ve çalışılmasını oldukça artırmıştır. İnce film malzemelerinin ya da sistemlerinin bütün bu özellikleri göstermesini sağlayan iki temel özellik vardır. Bunlar:

- Atomik büyüme işleminden kaynaklanan benzersiz malzeme özellikleri,
- Kalınlık, kristal yönelim ve çok katmanlı yönleriyle karakterize edilen kuantum büyüklüğü efektleri de dahil olmak üzere boyut efektleri olarak verilebilir [18].

İnce film malzemelerde, bir malzemenin yüzey/hacim oranı büyüdükçe (düşük kalınlıklar elde edilmesi için) yeni fiziksel, manyetik özellikler ve/veya elektriksel özellikler elde etmesi, yüzey analizi kolaylığı, çeşitli geometrilerde tek veya çok katmanlı yapıların oluşturulması, kontrollü alaşım yapıların oluşturulması gibi avantajları ortaya çıkarmaktadır. Elde edilen bu avantajları kullanarak ince filmler; ısı, optik, manyetik ya da elektronik özelliklerden birini ya da birkaçını öne çıkarmak ve bu özelliklerden teknolojik olarak faydalanılmak üzere hazırlanır. Güncel teknoloji için yüksek derecede önem taşıyan nano boyutta malzemeleri (ince film sistemlerini) sayısal olarak tanımlamak istersek; 1 nanometre kalınlığı yaklaşık olarak 10 Å (atomik tabaka) ya da 10^{-7} cm olarak tanımlayabiliriz ($1 \text{ nm} = 10 \text{ Å} = 10^{-7} \text{ cm}$). Nano malzemeler ise kendi aralarında üç sınıfta değerlendirilir:

- Sıfır Boyutta nano malzemeler (Zero-dimensional): Örneğin: Kuantum noktaları
- Bir Boyutlu nano malzemeler (One-dimensional): Örneğin: Kuantum telleri
- İki Boyutlu nano malzemeler (Two-dimensional): Örneğin: İnce film sistemleri

İnce film sistemlerinin güncel teknolojiye kullanılan ve eşsiz olarak bahsedilen bu özelliklerin tamamı ince film büyütme tekniklerine bağlı olarak değişmektedir [19]. İnce film üretim yöntemleri ihtiyaç duyduğu gereksinimlere göre Şekil 2.15'te gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.15: İnce Film Üretim Sistemleri

Günümüz teknolojisinde ince film malzemelerin üretilmesi için kullanılan yöntemler iki temel yaklaşım olarak gruplandırılır:

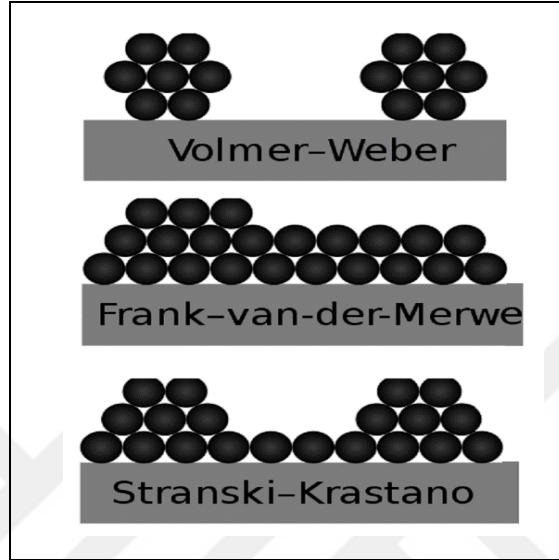
- Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD): Genel olarak ince film sistemlerini oluşturmak için buharlaştırma, hedef malzeme üzerine iyon çarptırılması ve süblimasyon gibi fiziksel işlemlerin kullanıldığı yöntemdir. PVD işlemlerini gerçekleştirmek için yüksek vakum ortamlarına ihtiyaç vardır. Ciddi bir dezavantaj olarak görülen yüksek vakum odaları ise ince film üretim sistemlerinde atomik boyutta kaplamalar ve kaliteli morfolojiye sahip filmlerin üretilmesini sağlamaktadır. Fiziksel buhar biriktirme işlemleri üç adımda gerçekleşmektedir: (i) Birinci adım buharlaşma olarak adlandırılabilir. Bu adımda büyütülecek olan hedef malzeme dirençli ısıtma veya elektron demeti gibi yüksek enerji kaynağı ile buharlaştırılır. (ii) İkinci adım transfer olarak isimlendirilir. Burada buharlaştırılan hedef malzemeden kopartılan atomların biriktirme yapılacak yüzeye (alttaş) ulaşmasıdır.

(iii) Son olarak ise biriktirme işlemi gerçekleşir. Alttaş yüzeyine ulaşan hedef malzeme atomları, alttaş üzerinde belirli şartlara göre inşa edilir.

- Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD): Genel anlamda ince filmin büyütüleceği alttaş yüzeyinde veya çevresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara dayalı yapılan bir ince film büyütme tekniğidir. CVD sistemleri, fiziksel buharlaştırma teknikleri gibi yüksek vakum sistemleri gerektirmez. Bu sebeple mikro elektronik, fotovoltaiik güneş hücreleri gibi endüstriyel uygulamalarda düşük maliyetlerinde dolayı tercih edilebilir yöntemlerdir. Ancak CVD sistemlerinin çalışma prensibi reaktif gazlara ve kimyasal reaksiyonlara muhtaç olduğundan aşırı derece toksik ve patlayıcı olabilir. Bu sebeple yüksek güvenlik önlemlerinin alınması gereklidir. Ayrıca film yüzeylerinde difüzyon, kimyasal reaksiyonların korozyon etkileri ve alttaşların maskeleme işlemleri oldukça zordur [20].

İnce film sistemlerinin üretilmesinde ele alınan iki yaklaşımda Şekil 2.16'den görülebileceği gibi kendi aralarında farklı çeşitlere ayrılırlar. Her iki yaklaşımında benzer ve farklı yönleri mevcuttur. PVD ve CVD sistemlerinin her ikisi de vakum ortamına ihtiyaç duyarken PVD sistemleri daha yüksek vakumlara (ultra yüksek vakum) ihtiyaç duymaktadır. En dikkat çekici farklılık ise hedef malzemenin biriktirilme yöntemidir. CVD sistemlerinde hedef malzeme alttaş üzerine gaz halde birikirken, PVD sistemlerinde ise katı halde birikir. Gaz molekülleri alttaş üzerinde reaksiyona girerken PVD sistemlerinde bu durum söz konusu değildir. Sonuç olarak ise yukarıda anlatılan benzerlikler, farklılıklar, avantajlar ve dezavantajlar göz önüne alınarak, kullanılacak malzemenin türü ve yapılacak olan çalışmanın amacına göre ince film büyütme tekniklerinden biri seçilir ve uygun sistem üzerinde çalışmalar yapılır. İnce film üretimi esnasında, büyütme ortamının termodinamik koşullarına ve alttaş yüzeyine bağlı olarak ilk katmanın oluşturulması 3 farklı şekilde gerçekleştirilebilir bu yöntemler [21];

- Volmer-Weber Tipi
- Frank-van der Merwe Tipi
- Stranski-Krastanow Tipi



Şekil 2.16: İnce film büyüme modlarının şematik gösterimi.

Frank von der Merwe (FV) büyüme modunda yüzey üzerinde oluşan film sıralı katmanlar şeklinde oluşurken (layer by layer), Volmer-Weber (VW) modunda yüzey üzerinde yalnızca adalar (islands) şeklinde oluşur. Stranski-Krastanov (SK) modu ise FV ve VW modlarının özelliklerini barındırarak önce sıralı katmanlar oluştururken ardından ada veya adalar oluşturarak devam eder. İnce film üretim sistemleri, özellikle fiziksel buharlaştırma teknikleri, genel olarak yüksek vakum seviyelerinde çalışmaktadır.

Büyütme süreçleri gerçekleştirileceği ortamlar harici vakum sistemleri kullanılarak dış ortamdan arındırılmaya çalışılır. Bir buharlaştırma işlemi sırasında sürecin gerçekleştiği ortam dış ortamdan arındırılmaz ise hedef malzemeden kopan atomlar, ortam içerisinde bulunan diğer atom ve moleküller ile çarpışacak; buna nazaran ortalama yol mesafelerini azaltacak ve alttaş üzerine yabancı atom ve moleküller ile yapışarak film kalitesini ve özelliklerini etkileyecektir. Bu sebeple

büyütme yapılacak ortam içerisinde sadece hedef malzemelerden kopan atomların bulunması önemlidir.

Tablo 2.1: Vakum bölgelerinin isimlendirilmesi.

	Basınç Oranı (torr)
Düşük Seviyede Vakum	$\sim 10^3$ -1
Orta Seviyede Vakum	1- 10^{-3}
Yüksek Seviyede Vakum	10^{-3} - 10^{-6}
Çok Yüksek Seviyede Vakum	10^{-6} - 10^{-9}
Ultra Yüksek Vakum	10^{-9} - 10^{-12}
Ekstra Yüksek Vakum	$<10^{-12}$

Tablo 2.1’de gösterilen vakum seviyelerini oluşturabilmek için farklı vakum sistemlerinin birlikte kullanılması gerekir. Yukarıdaki tablo incelendiğinde mekanik, turbo moleküler ve iyon pompaları birlikte kullanıldığında 10^{-10} – 10^{-11} mbar seviyelerinde oldukça düşük vakum ortamları sağlanabilir [22].

İnce film sistemleri; elektronik, mekanik, optik ve manyetik farklı özellikleri elde etmek ve bu özellikleri, teknolojik entegrasyon yapmak üzere çeşitli sistemler ve teknolojiler ile üretilen malzemelerdir. Bu sebeple ince filmlerin üretimi kadar karakterizasyon teknolojileri de önem kazanmıştır. Vakum sistemlerinin ve lazer, x-ışını sistemlerinin gelişmesi farklı karakterizasyon sistemleri ve metotların gelişmesine imkân sağlamıştır. Güncel teknolojilerin ihtiyaçları doğrultusunda ince film sistemleri üzerinde manyetik ve optik çalışmalar yoğunlaşmıştır ve bu doğrultuda bu özellikleri karakterize etmek üzere analiz sistemleri bir hayli gelişmiştir. Bu tez

alışması kapsamında kullanılan ince film üretim sistemleri ve karakterizasyon metotları Bölüm 3’te Deneysel Teknikler adı altında verilmiştir [23].



3. DENEYSEL TEKNİKLER

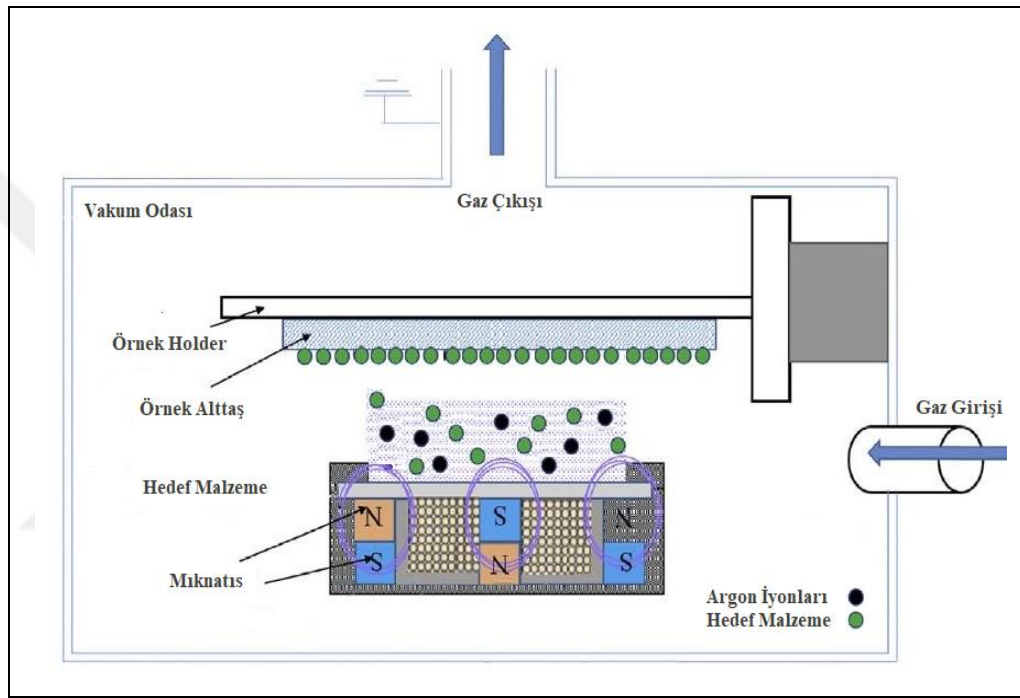
Bu bölümde tez çalışmamız süresince kullanılan deneysel sistemler anlatılmış ve çalışma prensipleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Deneysel çalışmalara geçmeden önce kullandığımız cihazların temel çalışma prensipleri hakkında ve kullanılan yöntemlerin daha iyi anlaşılabilmesi için bir teorik alt yapı oluşturması hedeflenmiştir.

3.1. İnce Filmlerin Büyütme Tekniği (Sputter Yöntemi)

İnce film uygulamalarında birçok ince film hazırlama teknikleri mevcuttur. Ancak fiziksel biriktirme yöntemleri (PVD) arasında en yaygın olarak kullanılan yöntem Magnetron Sputter başka bir deyişle Magnetron Saçtırma yöntemidir. Temel bazda saçtırma metodu yüksek enerjili iyonları kullanarak hedef malzeme (target) üzerinden atomların koparılarak başka bir yüzeyde (alt taş) biriktirilmesi temeline dayanır [24]. Saçtırma yönteminin çalışma prensibini bu şekilde özetleyebilirsek bile aslında çalışma prensibi daha komplekstir ve Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Yüksek vakum seviyelerinde bir vakum odası içerisinde kontrollü olarak gönderilen argon atomları, anot ile katot arasında oluşturulan potansiyel fark sayesinde elektronlar ile çarpışarak argon atomları iyonize olur. Yüksek kinetik enerjili argon iyonları hedef malzeme yüzeyinden atomları kopartarak örnek büyütülecek yüzeye yani alt taşa yönlendirilir. Bu sayede yüzey üzerinde hedef malzemelerin birikmesi sağlanır [24]. Burada önemli nokta argon atomları ile çarpmadan sonra ayrılan ikincil elektronların büyütme kalitesine ve hızına etki etmesini önlemektir. Bu sebeple belirtilen bu parametreleri belirli bir bölgede sınırlandırmak için hedef malzemenin altına yerleştirilen bir magnetron kullanılır. Üzerine Lorentz kuvveti etki eden elektronlar belirli bir bölgede (plazma oluşumu) hapsedilmiş olur. Bu bölge içerisinde sınırlı kalan elektronlar daha fazla argon atomunu iyonize ederek sadece hedef malzemeden kopan atomların biriktirme yüzeyine ulaşmasını sağlar. Böylece homojen bir kaplama yapılmış olur [25]. Magnetron saçtırma yönteminde hedef

malzemenin türüne göre uygulanan voltaj değiştirilebilir. Yalıtkan hedef malzemeler DC voltaj uygulandığında kutuplaşma gerçekleşeceği için argon iyonları ile çarpışma olmayacaktır ve biriktirme işlemi için hedef malzeme yüzeyinden atom koparmak mümkün değildir. Bu sebeple AC ve DC voltajın birleştirilerek kullanılması hedef malzemeyi negatif (katot), alttaşı ise pozitif (anot) gibi davranmasına sebep olacaktır. Hedef malzeme negatif olduğunda pozitif yüklü argon iyonları yüzeye çarparak hedef malzemedan atom kopartır ve büyütme işlemi gerçekleşir (RF Saçtırma Metodu) [25].



Şekil 3.1: Magnetron sputter sistemi çalışma prensibi.

Magnetron saçtırma yönteminde sağlıklı bir kaplama yapılabilmesi için temel olarak iki kriterin karşılanması gerekir:

- Hedef malzeme yüzeyinden atomları koparmak için yeterli enerjide iyonları oluşturmak,
- Hedef malzeme üzerinden koparılan atomların serbest bir şekilde hareket edebilmesi.

Saçtırma yönteminin yüksek vakum seviyelerinde yapılması bu iki gereksinimi karşılamaktadır. Düşük basınç altında yüksek enerjili iyonlar enerjilerini koruyabilirken, kopan atomlar ise fazla atom-gaz çarpışması yaşamadan altta  üzerine ulaşır [24].

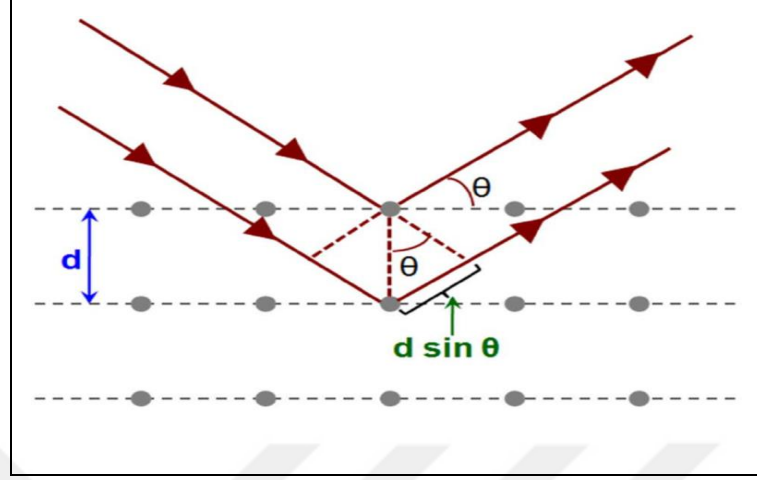
3.2. İnce Filmlerin Analiz Yöntemleri

İnce film sistemlerinin karakterizasyon çalışmalarını yapısal ve manyetik karakterizasyonlar olmak üzere iki temel başlık altında toplayabiliriz. Tez çalışmamız kapsamında hazırlanan örneklerin kimyasal alaşım oranı, yapısal ve mikro yapı özelliklerini sırası ile X-ışını Fotoelektron Spektrometresi (XPS), X-ışını Kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) teknikleri ile yapıldı. Yapısal analizlerin yanında örneklerin manyetik analizleri ise Ferromanyetik Rezonans Tekniği (FMR) ve Titreşimli  rnek Manyetometresi (VSM) sistemleri kullanılarak yapılmıştır. Bu bölüm içerisinde, bu sistem ve tekniklerin çalışma prensipleri ve teorik alt yapıları detaylı olarak verilmiştir.

3.2.1. X-ışını Kırınımı (XRD)

X-ışınlarının 1895 yılında Wilhelm Röntgen tarafından ke fedilmesinin ardında ba layan bilimsel çalışmalar yeni medikal ve teknik uygulamaların geliştirilmesini sağladı [48]. Bu kapsamda Laue, Friedrich ve Knipping'in 1913 yılında yaptığı çalışmalar kristal yapıda olan malzemelerin incelenmesi için yapılan araştırmalar x-ışınlarının kullanımının yolunu açmış oldu [26]. Malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında x-ışınları farklı kullanım alanlarına ve tekniklerine sahip olsa da burada anlatılacak olan x-ışını kırınımı (XRD) yöntemi incelenecek olan malzemenin kristal yapısı ve kristal fazları hakkında detaylı bilgiler sunmaktadır. XRD tekniğinin temel prensibi, periyodik olarak dizilmiş atomlardan oluşan malzemenin üzerine elektromanyetik dalgaların gönderilmesi ve bu elektromanyetik dalgaların atomlardan so urulmadan saçılmalarını sağlayarak yapıcı girişimler elde edilmesine

dayanır. Anlatılan bu tanımın geometrik gösterimi 1913 yılında W.L.Bragg tarafından Bragg Yasası olarak denklem 3.2’de gösterildiği gibi verilmiştir [27].



Şekil 3.2: Bragg yasası şematik gösterimi.

$$n\lambda = 2d(hkl)\sin \Theta \quad (3.23)$$

Şekilde de gösterildiği gibi belirli bir açıda gelen elektromanyetik dalgalar farklı düzlemlerden yansıma yaparak yapıcı girişimler oluşturur. Belirli açı değerlerinde gözlemlenen bu yapıcı girişimler sonucunda XRD paternleri oluşur. Tam olarak burada kullanılan elektromanyetik dalganın dalga boyu bilindiği takdirde Bragg Yasası kullanılarak düzlemler arası mesafe (d) hesaplanabilir.

Tablo 3.1: Kristal yapılara göre düzlemler arası mesafe formülleri.

Kristal Yapı	Ardışık Kristal Düzlemler Arası Mesafe
Kübik	$\frac{1}{d^2} = (h^2 + k^2 + l^2) \frac{1}{a^2}$
Tetragonal	$\frac{1}{d^2} = (h^2 + k^2 + l^2 (a/c)^2) \frac{1}{a^2}$
Hegzagonal	$\frac{1}{d^2} = \left[\frac{4}{3} (h^2 + k^2 + hk) + l^2 (a/c)^2 \right] \frac{1}{a^2}$
Ortorombik	$\frac{1}{d^2} = \left[\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right]$

Farklı kristal yapı çeşitleri için düzlemler arası mesafe (d) ile örgü parametresi arasında (a), (hkl) Miller indislerine bağlı olarak verilen formüller ile (Tablo 3.1) ile incelenen örneğin kristal düzlemleri, düzlemler arası mesafe ve örgü parametreleri gibi değerler hesaplanabilir [27]. Bir malzeme üzerinde XRD analizlerinin yapılması konusunda iki önemli nokta bulunmaktadır.

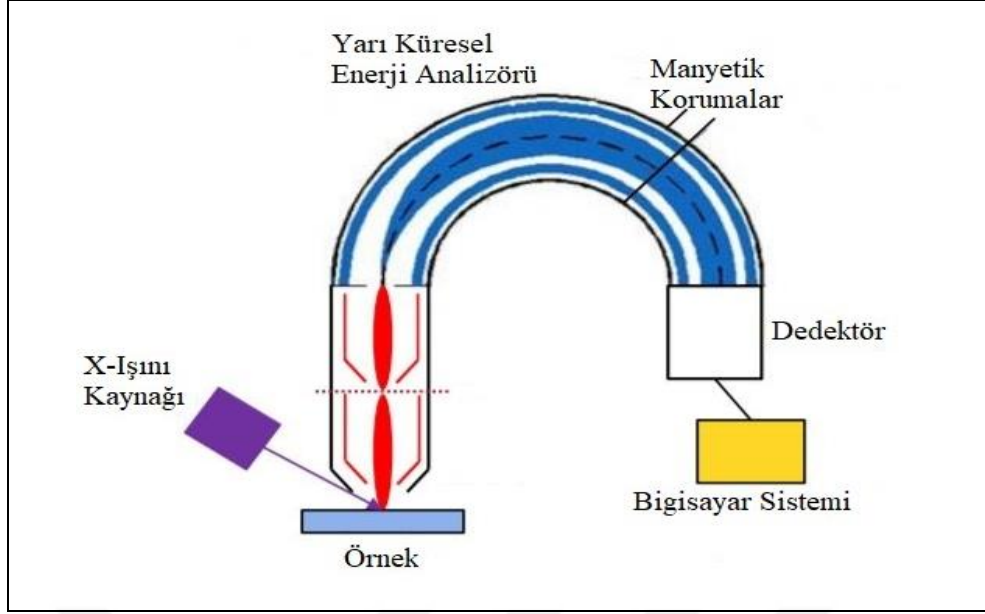
- Birincisi; incelenecek olan malzemenin kristal yapıda olması yani kendisini oluşturan atomların periyodik bir dizilime sahip olması gerekmektedir. Aksi durumda yapıcı girişimler oluşmayacağından ekranda analizi yapılacak bir kırınım piki görünmez.
- İkincisi ise; örnek malzeme üzerine gönderilen elektromanyetik dalganın dalga boyunun malzemenin örgü parametresi ile orantılı olması gerekmektedir.

3.2.2 X-Işını Foto elektron Spektroskopisi (XPS)

X-Işını Foto elektron Spektroskopisi (XPS) ya da diğer bir adıyla Kimyasal Analiz Elektron Spektroskopisi (ESCA) yüzeylerin kimyasal analizleri için sıkça kullanılan deneysel bir yöntemdir. İlk olarak gaz moleküllerinin kimyasal analizleri için kullanılan bu yöntem ultra yüksek vakum (UHV) sistemlerinin zamanla geliştirilmesi ile katı yüzeylerin kullanımı için gelişmiş ve yaygınlaşmıştır. XPS tekniği kullanılarak katı yüzeyler üzerinde;

- Yüzeydeki atomik bileşimin % dağılımı,
- Yüzeydeki atomik bileşimin stokiyometrik oranları,
- Yüzeyin atomik bileşimindeki değişim miktarı,
- Kaplama kalınlığı gibi bilgiler elde edilebilir.

XPS sistemlerinin çalışma prensibi temel olarak fotoelektrik etkiye dayanmaktadır (Şekil 3.3). 3 temel sistemin birleşiminden oluşan XPS sisteminde, ilk olarak bir örnek malzeme yüzeyindeki atomlardan elektronlar kopararak foto elektronlar oluşturulur. Daha sonra oluşturulan bu foto elektronlar bir yarı küresel enerji analizöründen geçerek detektörlere ulaşır. Burada elektronların bağlanma enerjileri hesaplanır ve bilgisayar ortamında bir spektrum oluşturulur (Şekil 3.4). Bu spektrum sayesinde incelenen örnek yüzeyinde hangi atomlar bulunmaktadır, bulunan atomların, atomik olarak yoğunlukları, yüzeyin % olarak bileşim hesabı yapılabilir [28]. İncelenecek olan malzeme yüzeyinde bulunan atomlardan elektronların koparılması için belirli şartların sağlanması gereklidir. Malzemenin iş fonksiyonundan (elektronların yüzeye bağlanma enerjisi) daha yüksek ya da eşit seviyede enerjiye sahip x-ışınları ile yüzeye bombardıman yapılmalıdır. Denklem 3.2' de verilen şartın sağlanması durumunda yüzey üzerinden elektronlar koparak (foto elektronlar) bir elektron analizörü tarafından yakalanarak bağlanma enerjileri analiz edilir.



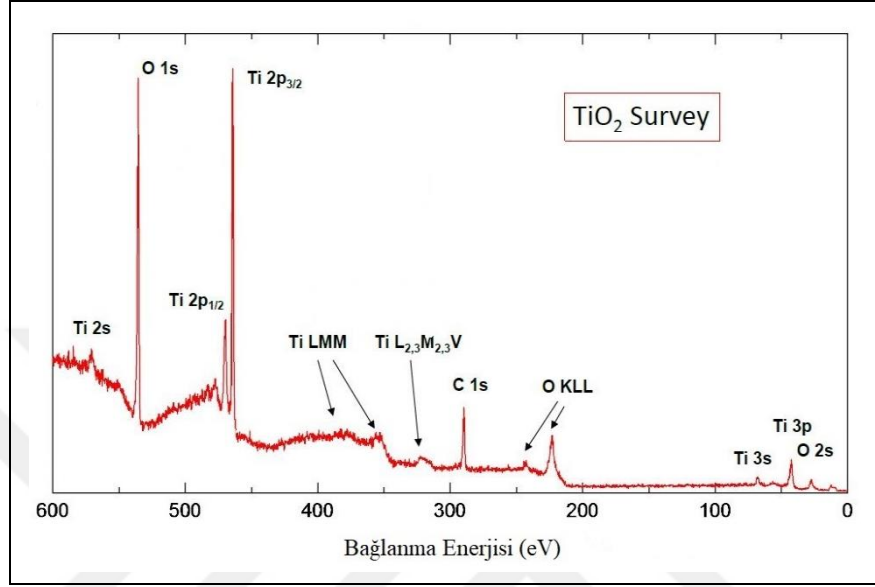
Şekil 3.3: XPS sisteminin çalışma prensibi.

XPS sisteminin çalışma mantığı ise tam olarak burada başlar. Her bir farklı malzeme için yüzey üzerinde oluşan bağlanma enerjisi farklı olacaktır. Bu farklı enerji değerlerine dayanarak enerjileri analiz edilen elektronların hangi atomdan, hatta hangi çekirdek kabuğundan koptuğu belirlenebilir.

$$E_b = h\nu - E_{kin} \quad (3.24)$$

Elektronların yüzeyden koparılması sürecinde bazen karmaşık durumlar söz konusu olabilir. Kaynaktan gelen x-ışınlarının veya hızlı elektronun enerjisi foto elektronu ortaya çıkarabilmek için gerekli olan E_b enerjisinden çok büyükse tüm enerji foto elektrona aktarılamaz, enerjinin bir kısmı atomun üzerine yayılır, bu durumda foto elektronun boşluğu doldurulurken fazla enerjinin atomdan boşaltılabilmesi için aynı elektron kabuğundan bir elektron daha fırlatılır. Bu fırlatılan elektrona Auger Elektronu denir. Atom numarası özellikle 3-9 arasındaki elementlerde ortamda Auger elektronları hakimken atom numarası 20'den büyük elementlerde foto elektronlar daha çoktur. Şekil 3.5'te TiO_2 'nin survey taraması gösterilmiştir. Burada Ti LMM ve O KLL ile işaretlenen noktalar Auger Elektronlarıdır [29]. XPS analizlerinde incelenen

örneğin kimyasal analiz ve atomik % bileşim hesaplamaları da XPS analizlerinden elde edilebilir. Yüzey morfolojisi çalışmalarında oldukça sık kullanılan bu yöntem birden fazla element içeren alaşım malzemelerde kimyasal konsantrasyon hesaplamaları için oldukça kullanışlı ve başarılı bir yöntemdir.



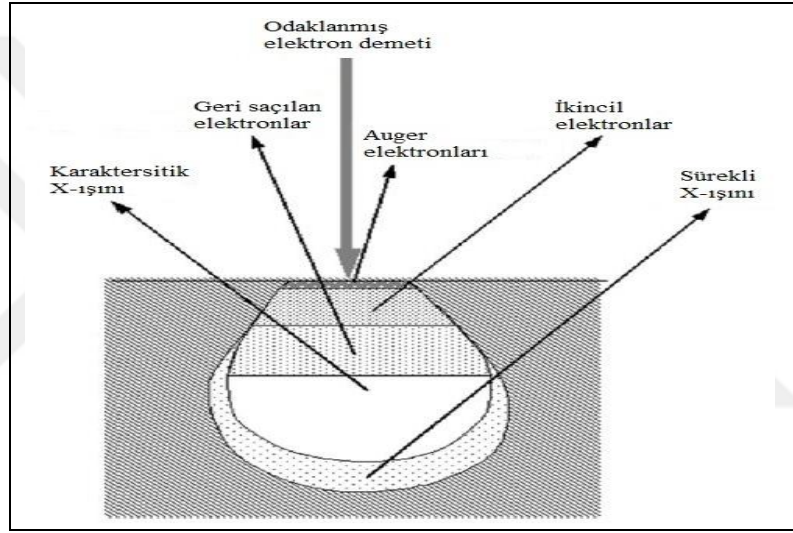
Şekil 3.4: TiO₂ XPS survey spektrumu.

Şekil 3.4'te TiO₂'nin survey taraması gösterilmiştir. Burada Ti LMM ve O KLL ile işaretlenen noktalar Auger Elektronlarıdır. XPS spektrumlarında kimyasal analiz ve atomik % bileşim hesaplamaları survey spektrumu üzerinden yapılır. Survey taraması esansında oluşan piklerin detaylı taramaları yapılarak özel bir fit programı üzerinde integral hesapları yapılır. Bu sayede yüzey üzerinde bulunan atomların atomik olarak % oranları hesaplanmış olur.

3.2.3 Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM)

Taramalı elektron mikroskopi (SEM), çeşitli ince film veya yığın malzemelerin yüzey morfolojilerinin, mikro yapı özelliklerinin incelenmesinde ve kimyasal bileşim analizleri için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir [30]. Bilimsel çalışmalar için son derecede önemli olan ve hala kullanılmaya devam eden ışık mikroskoplarının

yerine, elektronların manyetik alan sayesinde hareket edebilmesine dayanan bu sistemler son yıllarda oldukça kullanılmıştır. SEM cihazları genel olarak yüksek enerjili elektronların malzeme yüzeyine gönderilmesi ve yüzey üzerinde gerçekleşen etkileşim sonucunda saçılan elektronların algılanması prensibine göre çalışmaktadır. Ancak yüksek enerjili elektron demetleri ile yüzey üzerinde gerçekleşen etkileşimler biraz karmaşık bir durumdur. Odaklanmış elektron demetleri örnek yüzeyi üzerinde belirli derinliklere sızarak Şekil 3.5'te gösterilen sonuçlardan birinin oluşmasına sebep olacaktır. Birçok SEM sistemlerinde, alınan bu farklı sinyalleri (çoğunlukla ikincil elektronlar) algılayarak örnek hakkında bilgi ve 2 boyutta görüntüsünü elde eder [31].



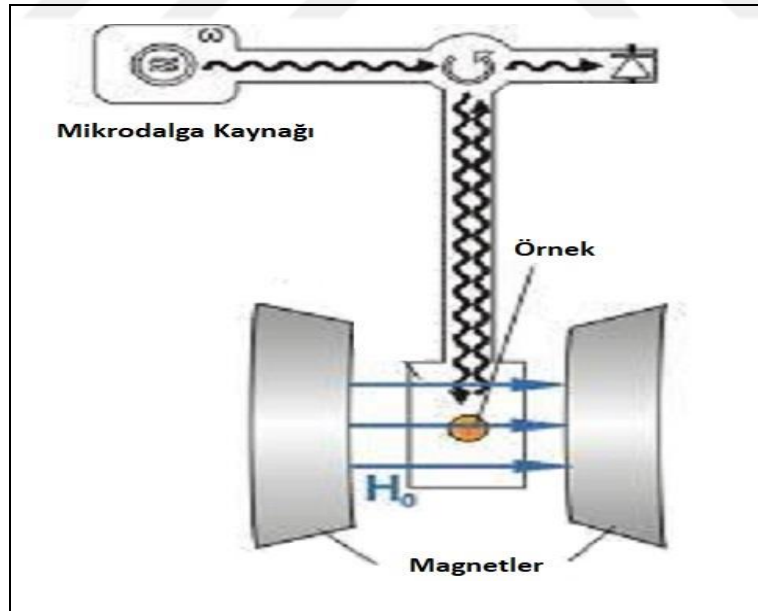
Şekil 3.5: Elektron demeti ve örnek arasında üretilen çeşitli sinyaller ve bu sinyallerin alındığı bölgeler.

Taramalı elektron mikroskopları temel olarak ince filmlerin yüzey morfolojileri hakkında bilgi edinilmesi için kullanılır. Ancak Şekil 3.5' de gösterilen etkileşimler sonucunda farklı türde sinyaller karakterize edilen malzemenin farklı derinliklerinden elde edilir. Bu sayede kimyasal analiz gibi farklı türde analizlerin yapılması içinde kullanılabilir. Yeterli bir ekipman ile donatılmış SEM cihazlarında örnek üzerindeki elementlerin kimyasal bileşimlerini hesaplamakta mümkündür. Yüzey üzerinde bulunan elementlerin atomik yapısının karakteristiği olan belirli dalga boylarındaki x-ışınlarını yayan elektronlar ile örnek yüzeyi uyarılır. Sonrasında ise bir enerji dağıtıcı

detektör sayesinde yayılan x-ışınları analiz edilerek örnek içerisinde bulunan atomların kompozisyonu belirlenebilir. Bu prosedür *Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDS)* olarak adlandırılır ve bir numunenin yüzeyinde örneği oluşturan bileşenlerin kompozisyon oranlarını analiz etmek için kullanılır [33-34]. Bu tez çalışması kapsamında Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Philips XL 30 SFEG marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak çeşitli yüzeylerin görüntüleri alınmıştır.

3.2.4 Ferromanyetik Rezonans Tekniği (FMR)

Manyetizma tabanlı çalışmalarda manyetik malzemelerin, manyetik özelliklerini incelemek için birçok yöntem ve sistem mevcuttur. Ancak FMR tekniği bu yöntemler arasında en güçlü deneysel tekniklerden biridir. İnce filmlerin manyetik özelliklerini tanımlayan manyetik anizotropi, manyetik moment, Curie sıcaklığı, manyeto-elastik etkileşme katsayıları ve mıknatıslanmanın durulma mekanizması gibi tüm parametreler FMR sistemleri kullanılarak hesaplanabilir [35-36].



Şekil 3.6: Ferromanyetik Rezonans tekniği şematik gösterimi.

Spintronik sistemler için kullanılan malzemeler, ferromanyetik ya da spin ile ilişkili malzemeler olduğu için FMR sadece manyeto statik davranışları incelemek için kullanılmaz, örneğin anizotropi sabitleri, g faktörü, sönümlenme sabiti vb. gibi çeşitli parametreler hakkında detaylı bilgiler elde edilebilir [35].

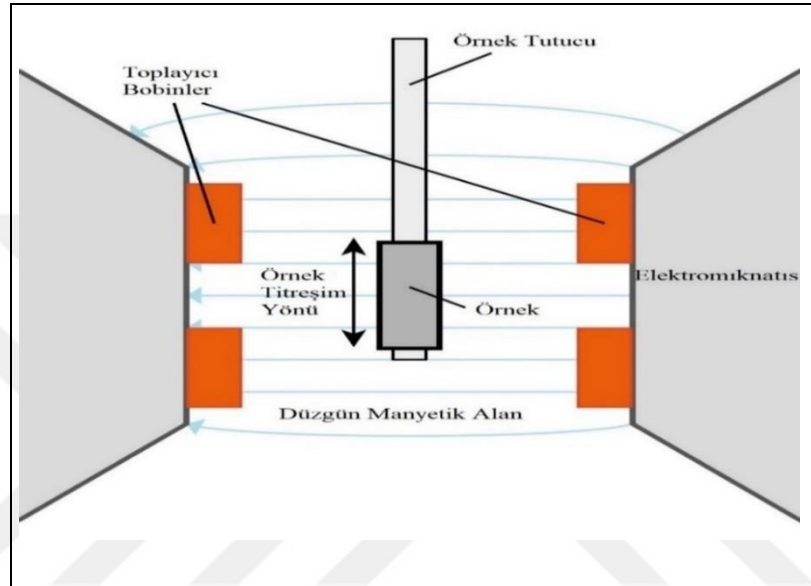
FMR yönteminin çalışma prensibini detaylı olarak inceleyecek olursak; sistemin içerisine yerleştirilen bir örneğin manyetik momentleri harici bir manyetik alan sayesinde H_0 uygulanan alana paralel olacak şekilde yönlendirilir. Bu esnada örnek malzemenin manyetik momentleri alan vektörü etrafında ω_0 öz frekansı (Larmour Frekansı) ile presesyon hareketi yapar. Bu koşullar altında örnek malzeme üzerine radyo frekansı (ω) (mikrodalga) ışını uygulanırsa (manyetik alan bileşeni H_0 alanına dik olacak şekilde), ω frekansı, ω_0 öz frekansına yaklaşır ve enerji absorbe etmeye başlar. Frekanslar eşit olduğunda $\omega=\omega_0$ yani rezonans durumunda maksimum mikrodalga enerjisi absorpsiyonu (soğrulması) olur. Bu olaya “Ferromanyetik Rezonans” denir. Ancak deneylerde kullanılan ESR (FMR) sistemlerinde mikrodalga frekansı (ω) sabitken manyetik alan yani (Larmour Frekansı ω_0) değişkendir. Diğer bir değişle maksimum absorpsiyonun olduğu manyetik alan değeri rezonans alanı olarak ifade edilir ve denklem (3.1) gibi ifade edilir [36]:

$$H_0 = \frac{\omega_0}{\gamma} \quad (3.25)$$

bu rezonans alanı ESR (FMR) cihazlarında, ESR spektrumunda pik olarak gözlemlenir. Ferromanyetik rezonans tekniği kullanılarak bir malzeme üzerinde anizotropi özelliklerini belirlemek mümkündür. İncelenen örnek farklı geometrilerde sistem içerisine yerleştirilerek düzlem içi geometri (in-plane geometri) ve düzlem dışı geometri (out-of-plane geometri) ölçümleri yapılabilir ve incelenen örneğin manyetik anizotropi değerleri hakkında derinlemesine bilgiler elde edilebilir.

3.2.5 Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)

Titreşimli Örnek Manyetometresi (Vibration Sample Magnetometer) (VMS), özellikle ince film çalışmalarında, incelenen örneklerin manyetik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin bağımlılıklarının açıklanabilmesi için sıkça kullanılan bir yöntemdir.



Şekil 3.7: VSM sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi.

VSM sistemleri kullanılarak manyetik moment; sıcaklık, manyetik alan, açı ve zamanının bir fonksiyonu olarak ölçülebilir. Bu sayede manyetik analizler, termomanyetik analizler veya anizotropi özellikleri belirlenebilir. Titreşimli örnek manyetometreleri temel olarak, eş dağılımlı bir manyetik alan içerisinde örneğin uygulanan manyetik alana dik olarak titreştirilmesi ve oluşan manyetik akı değişiminin analiz edilmesi prensibine dayanarak çalışır [37].

Bu konuyu biraz daha detaylı olarak ele alacak olursak; güncel olarak kullanılan tüm VSM sistemleri Faraday İndüksiyon yasasına dayanarak çalışır ve bu yasa değişen manyetik alanın bir elektrik alan üreteceğini ve bu elektrik alanın ölçülebilir olacağını söyler. VSM sistemlerinde, incelenecek olan örnek sabit bir manyetik alan içerisine yerleştirilir ve bu sabit manyetik alan malzeme içerisindeki manyetik momentleri alan

yönünde hizalayarak örnek etrafında harici bir manyetik alan oluşturur. Örneğin harmonik olarak yaptığı hareket bu harici alanın değişmesine sebep olur ve bu değişim algılayıcı bobinler tarafından dedekte edilir. Alternatif manyetik alan, Faraday İndüksiyon Yasasına göre alıcı bobinlerde elektrik akımına neden olacaktır. Bu akım, numunenin mıknatıslanması ile orantılı olacaktır. İndüklenen akım gerekli amplifikatörler ile yükseltilerek ve çeşitli bileşenler ile bilgisayar yazılımına aktarılarak örneğin ne kadar mıknatıslandığını ve mıknatıslanmanın nelere bağlı olarak değiştiğini söyleyebilir[39-40]. Elde edilen çıktı ise indüklenen manyetik akı yoğunluğu ile mıknatıslanma kuvveti arasındaki ilişkiyi gösteren ve malzemenin manyetik doygunluk, tekrarlanma, zorlama ve mıknatıslanma seviyesi hakkında önemli bilgiler veren bir histerezis eğrisidir. Titreşimli Örnek Manyetometresi sistemlerinin en büyük avantajı ölçüm kesinliği ve ölçüm hassasiyet oranlarıdır. Ayrıca çeşitli konfigürasyonlar ile düşük sıcaklık deneyleri, elektriksel karakterizasyonlar gibi çeşitli analizlerinde yapılabilmesi VSM sistemlerin daha kullanışlı bir hale getirmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ve sonuçlara yer verilmiştir. Örneklerin hazırlanma yöntemleri, yapılan analizler ve sonuçları, dikkat edilen hususlar konusunda bilgilendirilmeler yapılarak deneysel çalışmaların sonuçları detaylı bir şekilde paylaşılmıştır.

4.1. Altaşların Temizliği ve Örneklerin Hazırlanması

Yapmış olduğumuz çalışmada örneklerin hazırlanması için iki aşamalı bir süreç planlanmıştır. Bu süreçlerden birincisi; ince filmlerin büyütüleceği altaşların temizliği, ikinci ise filmlerin büyütölme işlemidir. Yapmış olduğumuz çalışmada analiz sonuçlarına direkt olarak etki edebilecek bu iki süreç çalışma boyunca dikkatli ve planlı bir şekilde yürütölmüştür. İnce film sistemlerinin üretilme proseslerinde en önemli noktalardan biri film büyütölcek olan yüzeyin (altaş) temizliğidir. Yapılacak olan çalışmanın motivasyonuna bağılı olarak hazırlanan filmlerin kalitesine ve analiz sonuçlarına direkt olarak etki edebilecek kadar önemli bir işlem sürecin, dikkatli ve özenli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Film büyütölcek yüzey büyütme öncesinde kimyasal ve termal temizleme prosedürlerine sabit kalarak temizlenir ve büyütme öncesinde daha temiz bir yüzey ve kimyasal bileşim elde edilir.

Yapmış olduğumuz çalışmada alaşım ince filmler MgO (100) altaşlar üzerine hazırlanmıştır, filmleri hazırlamak için kullanmış olduğumuz her bir MgO (100) altaşlar büyütme öncesinde termal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Film büyütme işleminden önce yapılan termal tavlama işleminde altaşlar 450 °C ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklık değeriinde ortalama 1 saat beklenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Termal tavlama süreci sona erdikten sonra kristal yapının bozunuma uğramaması ve sistem güvenliği için sistematik bir soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir ve altaşlar büyütme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Kullanılan her bir altaş, farklı parametrelerin etkisini en aza indirmek için birebir aynı süreçlerden geçirilmiştir. Yapılan termal temizleme işlemi ile büyütme öncesinde yüzeye yapışmış olan yabancı

(kirlilik) atomlar ve moleküller temizlenerek büyütme işlemi öncesinde temiz bir yüzey ve saf bir alttaş elde edilerek analiz hatalarının en az seviyeye indirilmesi hedeflenmiştir.

Tek kristal MgO alttaşların temizliğinin yapılmasından sonra tümleşik bir ince film büyütme sistemi sayesinde filmlerin hazırlanacağı yüzeyler atmosfer basıncına çıkarılmadan büyütme işleminin yapılacağı sputter sisteme aktarılmıştır. Örneklerin büyütme işlemleri UHV (Ultra Yüksek Vakum) DC Sputter (Magnetron Saçtırma) sistemi kullanılarak yapılmıştır. 6 adet hedef malzemeyi (target) aynı anda kullanabilme imkânı sunan cihaz içerisinde NiFe-Cu alaşım ince film sistemleri co-sputter tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Sistemin taban basıncı 3×10^{-9} mbar mertebesinde ve büyütme işlemi sırasında Ar gazı basıncı 1×10^{-3} mbar'dır. %99,9 saflık oranında NiFe ve Cu hedef malzemeleri kullanılmıştır. Py-Cu alaşım ince filmlerinde kimyasal konsantrasyon oranlarının yapısal ve manyetik özellikler üzerinde etkisini incelemek için Tablo 4.1'de görüldüğü gibi 4 farklı konsantrasyon oranında filmler hazırlanmıştır. Büyütme parametreleri kullanılarak filmlerin kimyasal konsantrasyon oranları hesaplanarak verilmiştir.

Tablo 4.1: Büyütme parametreleri ve hesaplanan NiFe yüzde oranları.

Örnek İsmi	NiFe Power	Growth Rate (nm/min)	Hesaplanan % NiFe
S_01	100 W	1,90	%74 NiFe
S_02	80 W	1,56	%60 NiFe
S_03	40 W	0,60	%50 NiFe
S_04	30 W	0,35	%35 NiFe

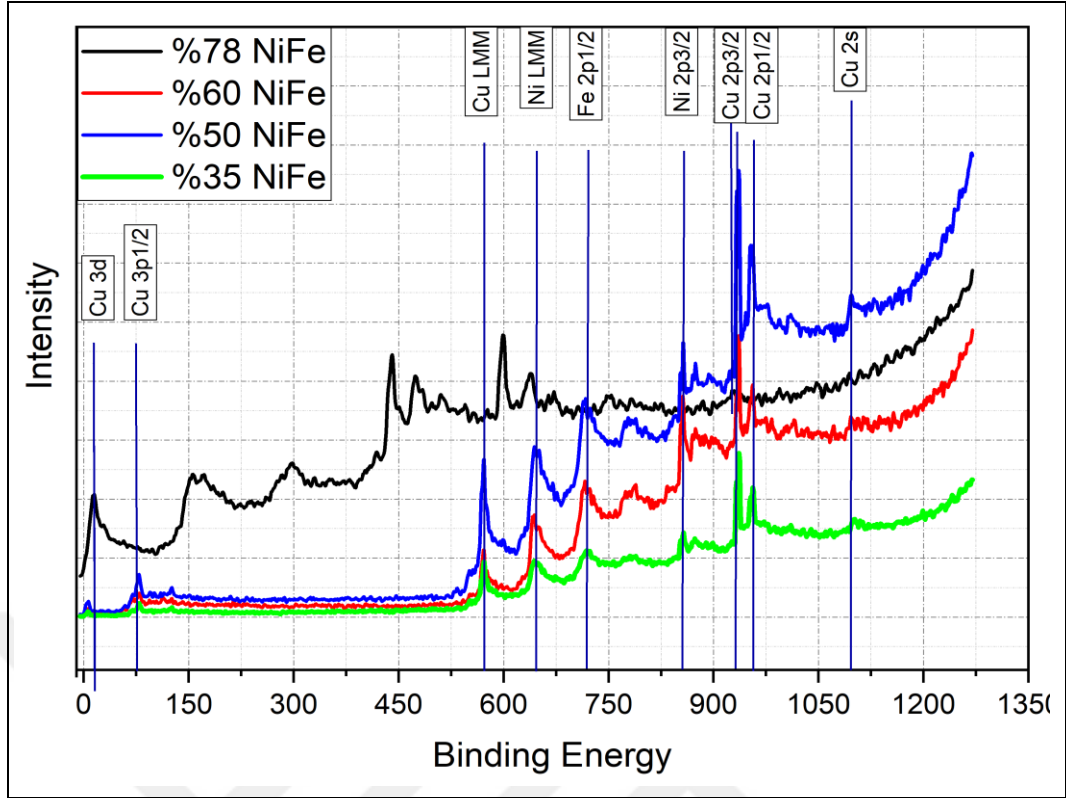
Büyütme işlemlerinin tamamlanmasının ardından her bir örneğin kimyasal kompozisyon oranları X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) ve X-ışını Enerji Dağılımı

Spektroskopisi (EDS) analizleri yapılarak büyütme öncesinde beklenen değerler ile karşılaştırılmıştır. XPS ve EDS analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Büyütme parametreleri ve hesaplanan NiFe yüzde oranları.

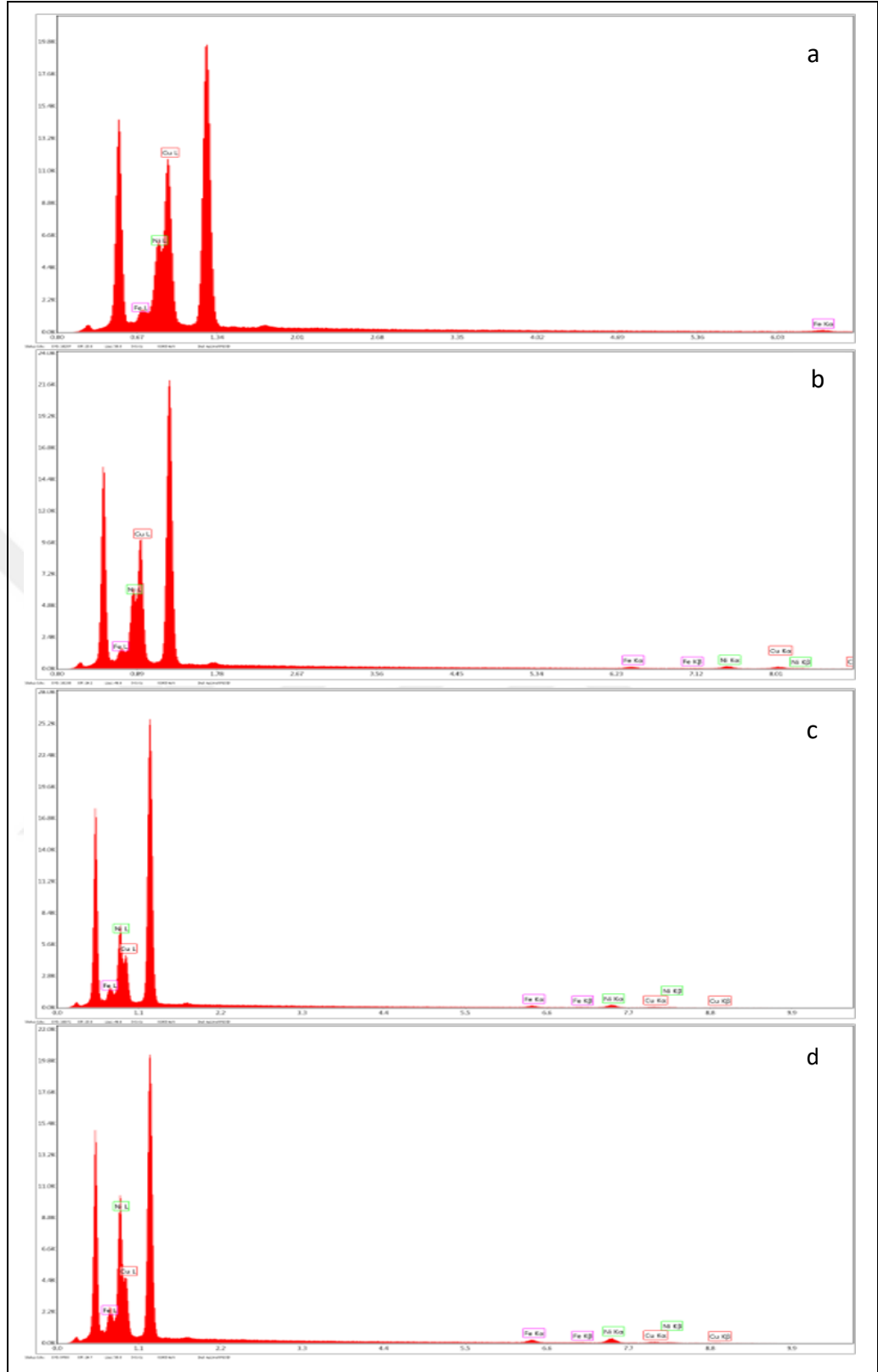
Örnek İsmi	Hesaplanan % NiFe	XPS Sonuçları	EDS Sonuçları
S_01	%74 NiFe	%78,77 NiFe	%72,24 NiFe
S_02	%60 NiFe	%59,45 NiFe	%59,85 NiFe
S_03	%50 NiFe	%50,73 NiFe	%47,05 NiFe
S_04	%35 NiFe	%35,27 NiFe	%30,33 NiFe

Örneklerin XPS ölçümleri sonucunda survey taramalarından da görüleceği gibi (Şekil 4.1) hazırlamış olduğumuz filmler içerisinde sadece Ni, Fe ve Cu elementleri gözlemlenmiştir. Alaşım filmler içerisinde kimyasal konsantrasyon oranları değiştikçe survey taramalarında piklerin şiddeti ve Ni, Fe, Cu elementlerine ait farklı piklerin oluşumu gözlemlenmiştir. Örneklerin kimyasal kompozisyonları spektrumlarda belirlenen her bir pikin detaylı olarak taranması sonucunda özel bir fit programı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1: MgO alttaş üzerine hazırlanan filmlerin XPS spektrumları.

İnce filmlerin kimyasal analizleri için kullanılan başka bir sistem ise X-ışını Enerji Dağılımı Spektroskopisidir. Genel olarak, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazına entegre bir şekilde bulunan sistem üzerinde, incelenen numuneye ait hangi elementlerin bulunduğu ve bu elementlerin atomik olarak yüzde oranı rahatlıkla belirlenebilir. Py-Cu alaşım ince filmleri hazırlandıktan sonra kimyasal konsantrasyon oranları XPS ve EDS sistemleri kullanılarak yapılmıştır. Analizlerin sonuçları Tablo 4.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.2: MgO alttaş üzerine hazırlanan filmlerin EDS spektrumları a) %35 NiFe b) %50 NiFe c) %60 NiFe d) %74 NiFe.

Elde edilen sonuçlar bakımında oldukça başarılı bir yaklaşım ile belirlenen değerlerde ince filmlerin üretim aşmaları tamamlanmıştır. Karşılaştırmalı olarak yapılan iki analizin sonucunda filmlerin yüzde olarak kimyasal konsantrasyon oranları belirlenmiş ve bu oranları etkileyecek herhangi başka bir atom\ molekül bileşimi olmadığı tespit edilmiştir.

4.2. Yapısal Analizlerin Sonuçları

Hazırlanan örneklerin kristal yapıları, yüzey morfolojileri sırası ile X-Işını Kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) teknikleri ile analiz edilmiştir. Örneklerin manyetik özelliklerinin iyi anlaşılabilmesi ve ortaya çıkacak olan manyetizma mekanizmasının açıklanabilmesi için yapısal analizler yapılarak birlikte değerlendirilmesi önemli bir noktadır.

4.2.1 X-Işını Kırınımı (XRD) Sonuçları

Hazırlanan örneklerin kristal yapıları ve yapısal faz oluşumları XRD tekniği kullanılarak incelenmiştir. X-ışını kırınımı ölçümleri Rigaku Smartlab X-ray Difraktometre cihazı kullanılarak yapılmış ve sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi film spektrumlarında birbirlerine yakın açılarda Cu (111) ve NiFe (200) pikleri tespit edilmiştir. Gözlemlenen bu pikler Py-Cu alaşım filmlerin iki farklı kristal düzlemde büyüdüğünü göstermiştir. Bu sonuçlara bakarak alaşım film içerisinde NiFe atomlarının katkılarının bulunduğu bir Cu bölgesi ve NiFe, Cu atomlarının birlikte oluşturduğu bir bölgeden bahsedilebilir. Alaşım filmlerde konsantrasyon oranlarının değişimi sonucunda NiFe-Cu (200) daha küçük açılarda oluşması, film içerisinde NiFe baskınlığının azaldığını göstermektedir.

Yapısal analizler sırasında örneklerin örgü sabitleri iki farklı yöntem ile hesaplanmıştır. Bir önceki konuda XRD analizleri detaylı olarak anlatılır iken Bragg Yasasına değinilmiştir. XRD ölçüm sonuçlarında kullanılan kaynağın dalga boyu (λ) bilindiği takdirde örgü sabitleri hesaplanabilir. Ayrıca alaşım filmlerin kimyasal

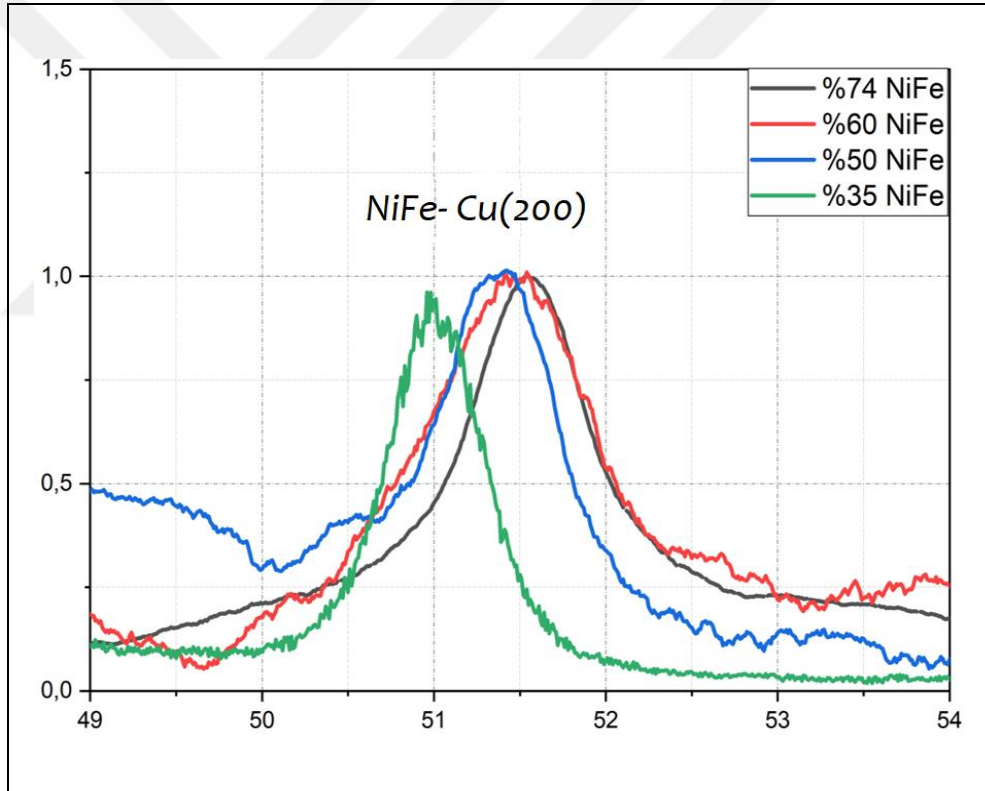
konsantrasyon oranları bilindiği takdirde Vegard İkili Alaşım yasası kullanılarak örgü sabitlerinin hesaplamaları yine yapılabilir.

$$n\lambda = 2d(hkl)\sin\Theta \quad (4.26)$$

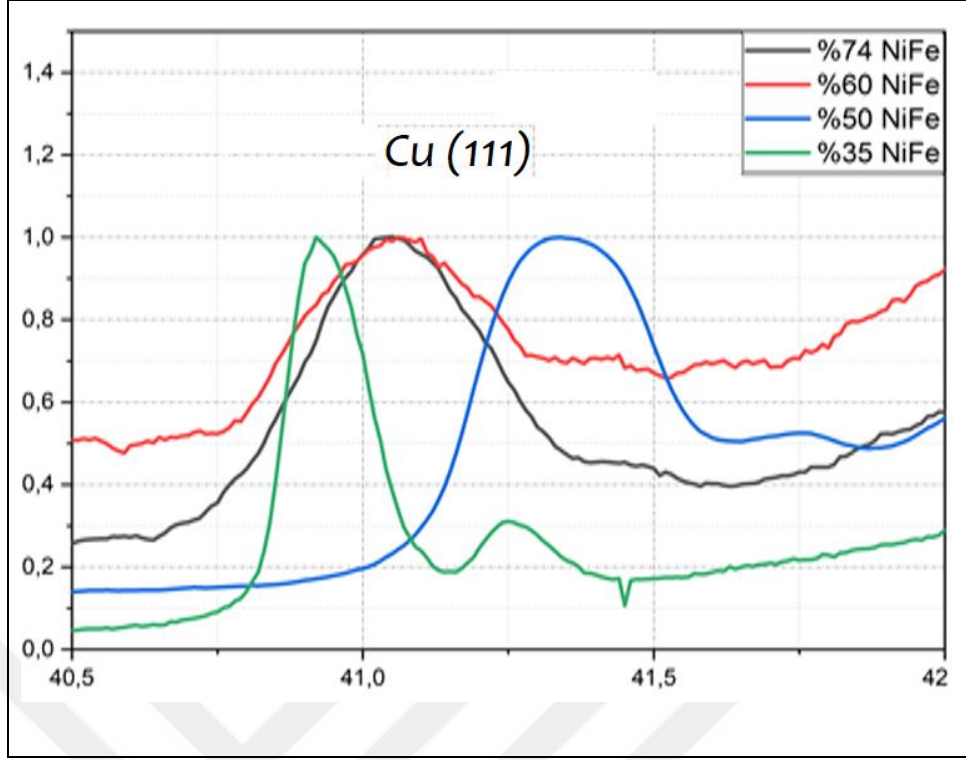
$$\frac{1}{d^2} = (h^2 + k^2 + l^2) \frac{1}{a^2} \quad (4.27)$$

$$a = a_A^0(1 - X) + a_B^0(x) \quad (4.28)$$

Denklem 4.27 ve 4.28 kullanılarak hesaplanan örgü sabitlerinin değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3: NiFe/Cu alaşım ince filmlerin x-ışını kırınımı (XRD) NiFe-Cu (200) düzlemi.



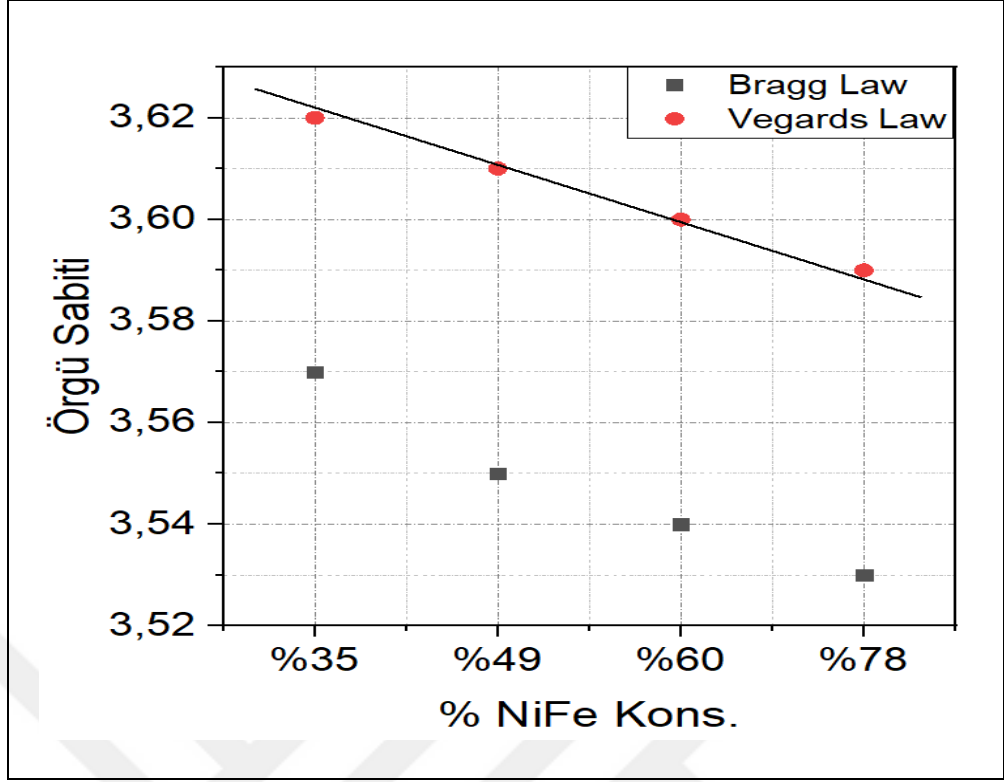
Şekil 4.4: NiFe/Cu alaşım ince filmlerin x-ışını kırınımı (XRD) Cu (111) düzlemi.

Tablo 4.3'te görüldüğü gibi deneysel verilerden hesaplanan örgü sabitleri ile teorik modelleme üzerinden hesaplanan örgü sabiti değerlerinde farklılar olmasına rağmen aynı karakteristik davranış söz konusudur. Alaşım içerisinde NiFe konsantrasyon oranı azaldıkça örgü sabitleri artmıştır. Yüzde çoğunluk olarak Cu atomlarının artması sebebi ile bu beklenen bir durumdur.

Tablo 4.3: NiFe-Cu alaşım filmlerin örgü sabitleri.

Örnek İsmi	Bragg Yasası	Vegard İkili Bileşik Yasası
S_01	3,53 Å°	3,59 Å°
S_02	3,54 Å°	3,60 Å°
S_03	3,55 Å°	3,61 Å°
S_04	3,57 Å°	3,62 Å°

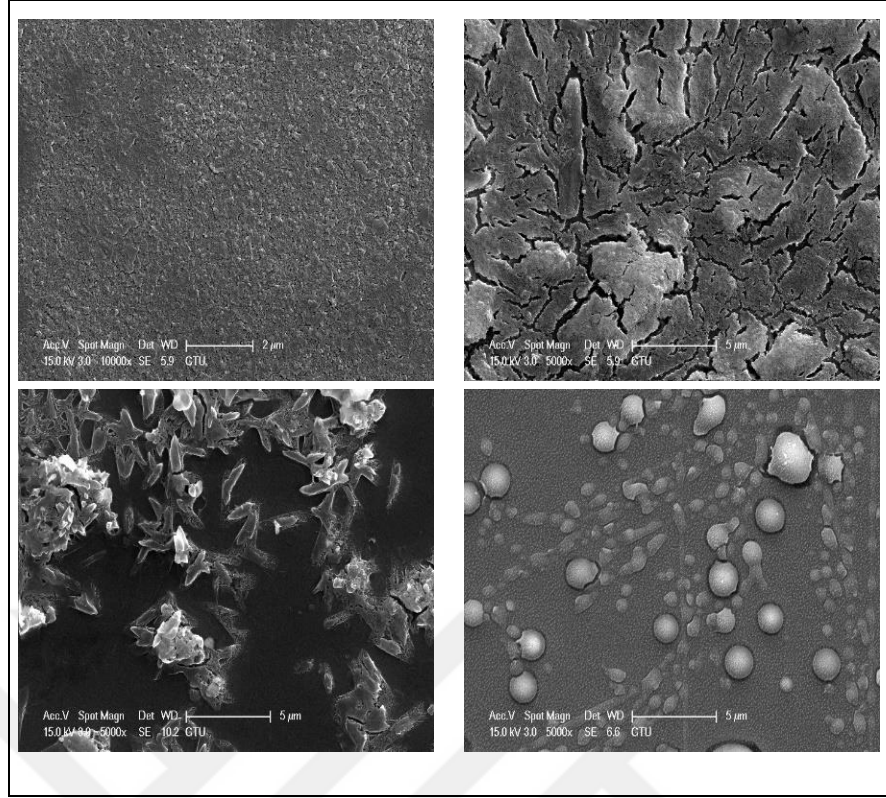
Deneysel veriler ile teorik modelleme arasında gerçekleşen bu fark ise kristal yapı oluşumunda gerçekleşen kusurlar (defect) ile açıklanabilir. MgO alttaş'ın örgü sabitinin NiFe alaşımı ve Cu elementlerinin örgü sabitlerinden büyük olması sebebi ile kristal yapı oluşumunda örgü sabitlerinde gerilmelerin oluşmasına sebep olmuştur. Vegard ikili alaşım yasası ile örgü sabitlerinin hesaplanması işlemlerinde bu etki dikkate alınmamıştır. Ancak deneysel veriler üzerinde bu etkilerin tümü mevcut olacaktır. Burada dikkate alınması gereken durum karakteristik davranıştır. Örgü parametreleri her iki hesaplama için de alaşım içerisinde NiFe konsantrasyonu azaldıkça büyümektedir. Dirk C. Mayer NiFe ve Cu çok katmanlı sistemlerde Cu katman sayısının ve kalınlığına bağlı olarak benzer bir sonuç elde etmiştir. Çok katmanlı yapılarda Cu katman kalınlığının ve sayısının değişimi göreceli olarak film kimyasal kompozisyon oranını değiştirmek ile benzer bir durumdur [39].



Şekil 4.5: Örgü sabitleri değişimi.

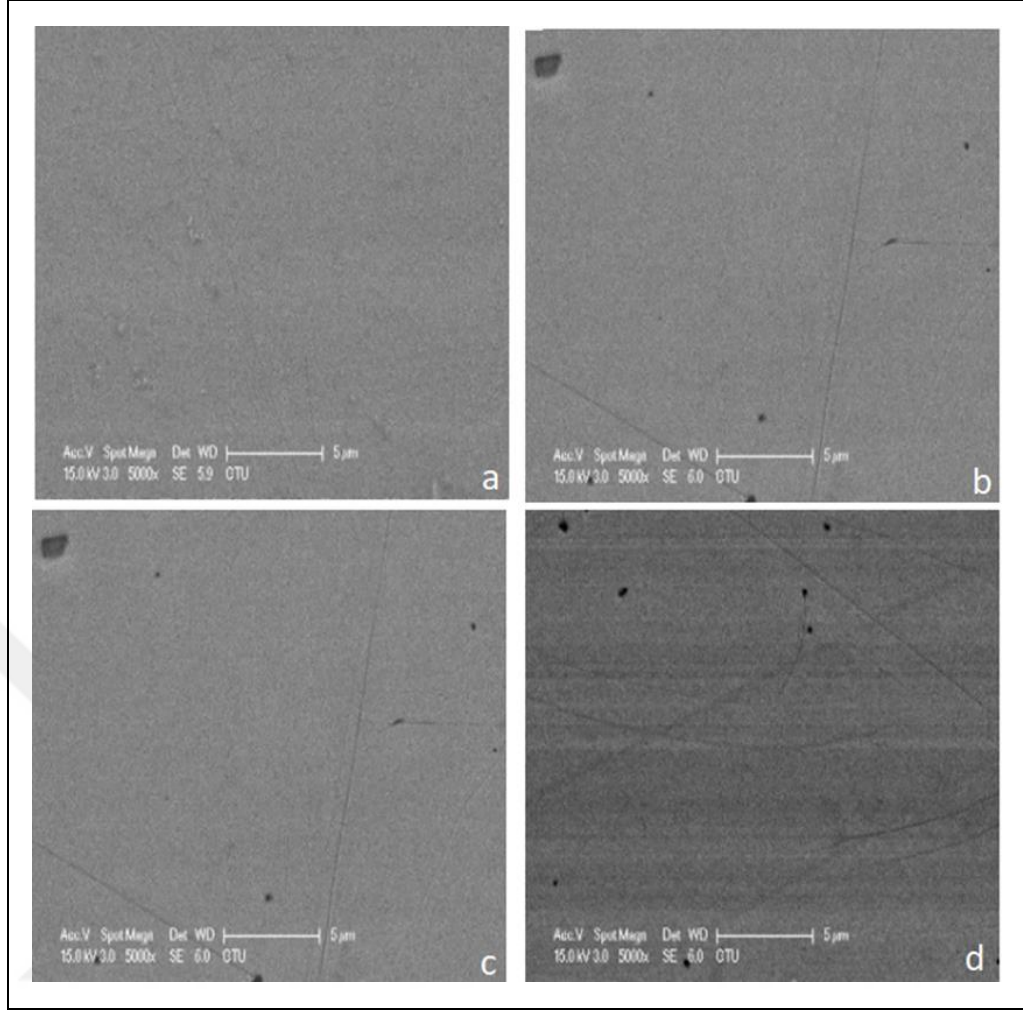
Permalloy alaşımı ve bakır elementinin örgü parametreleri literatür bilgilerinde sırası ile 3,588 Å ve 3,651 Å olarak verilmektedir. En düşük permalloy konsantrasyon oranından en büyük konsantrasyon oranına doğru gidildikçe alaşım filmlerin örgü sabitinin NiFe örgü sabitine yaklaştığı görülmüştür. Alaşım filmlerin kristal yapılarında birim hücre içerisinde Cu atomları yerlerini çoğunluk olarak NiFe atomlarına bırakması sebebi ile örgü parametrelerinde gerçekleşen bu değişimlerin olduğu gözlemlenmiştir.

Örneklerin yüzey morfolojileri Philips XL 30 SFEG markalı SEM cihazı ile incelenmiştir. Metalik alaşım ince filmlerde film yüzeyleri tane büyüklüğü ve dağılımına bağlı olarak farklı şekiller oluşturabilir. NiFe ince filmlerin yüzey morfolojileri daha önceki yapılan çalışmalarda filmlerin büyümesi sırasında yüzeylerinde çatlaklar ve kümelenmelerin (grain) oluşarak büyüdüğü gözlemlenmiştir [14-40]. Deneysel çalışmalarımız sırasında hazırlanan bazı örneklerde bu etkilere rastlanılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: Oda sıcaklığında hazırlanan bazı NiFe/Cu alaşım ince filmlerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) ölçümleri.

Şekil 4.7’te ise 320 C’de hazırlanan filmlerin SEM görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 karşılaştırıldığında ise farklı koşullar altında hazırlanan alaşım ince filmlerin yüzey morfolojileri arasında belirgin olarak ortaya çıkan farklar gözlemlenebilir ve büyütme parametlerinin yüzey morfolojileri üzerindeki etkisi açıktır. Tez çalışması kapsamında değerlendirilmeye alınan ve manyetik özellikleri üzerinde çalışmalar yapılan 4 farklı örneğin taramalı elektron mikroskopu görüntülerinde de görüldüğü gibi ortalama tane büyüklükleri eşit homojen bir yüzey elde edilmiştir.



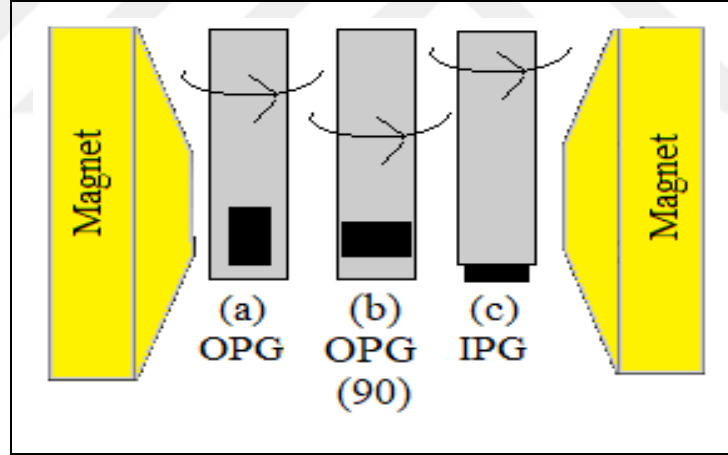
Şekil 4.7: NiFe/Cu alaşım ince filmlerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) ölçümleri a) %74 NiFe b) %60 NiFe c) %50 NiFe d) %35 NiFe.

4.3. Manyetik Analizlerin Sonuçları

Hazırlanan örneklerin yapısal analizleri tamamlandıktan sonraki aşama manyetik özelliklerin ve manyetik anizotropi özelliklerinin belirlenmesi ve analiz edilmesi olmuştur. Manyetik analizlerin yapılması için Ferromanyetik Rezonans (FMR) ve Titreşimli Örnek Manyetometre (VSM) teknikleri kullanılmıştır. FMR tekniği manyetik özelliklerin ve manyetik anizotropi özelliklerinin anlaşılması açısından oldukça hassas ve kullanılabilir bir yöntemdir. Oda sıcaklığında açığa bağlı olarak yapılan FMR ölçümlerinde 3 farklı ölçüm geometrisi kullanılarak (Şekil 4.8), hazırlanan örneklerin spektrumlarının ve rezonans alanlarının grafikleri elde edilmiştir.

Ferromanyetik rezonans tekniğinde, örnek sabit bir manyetik alan içerisine yerleştirilerek uygulanan harici manyetik alan vektörünün yüzey normali ile 90° 'lik bir açı yapması sağlanır. Daha sonra örnek örnek tutucu (holder) aracılığı ile manyetik alan ile farklı açılar yapacak şekilde döndürülür bu ölçüm geometrisine düzlem dışı (out-of-plane), aynı şekilde örneğin manyetik alan vektörü ile sürekli dik açı yaparak kendi etrafında döndürülmesine ise düzlem içi (in-plane) geometri denir.

Deneyssel ölçümlere bunlara ek olarak bir geometri daha tanımlanmıştır. Manyetik anizotropi özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için örnek düzlem dışı geometride olduğu gibi yerleştirilmiş fakat kendi ekseninde 90° çevrilmiştir. Örnekleri ölçüm geometrileri şematik olarak şekil 4.8'de detaylıca gösterilmiştir. Örneklerin sırası ile her bir geometride açığa bağlı olarak ölçümü gerçekleştirilmiştir. Açısal adımlar düzlem dışı geometrilerde 10° , düzlem içi geometride ise 5° olarak belirlenmiştir. Hazırlanan örneklerin FMR ölçümleri oda sıcaklığında ve şekil 4.8'de gösterildiği gibi 3 farklı geometride yapılmıştır.



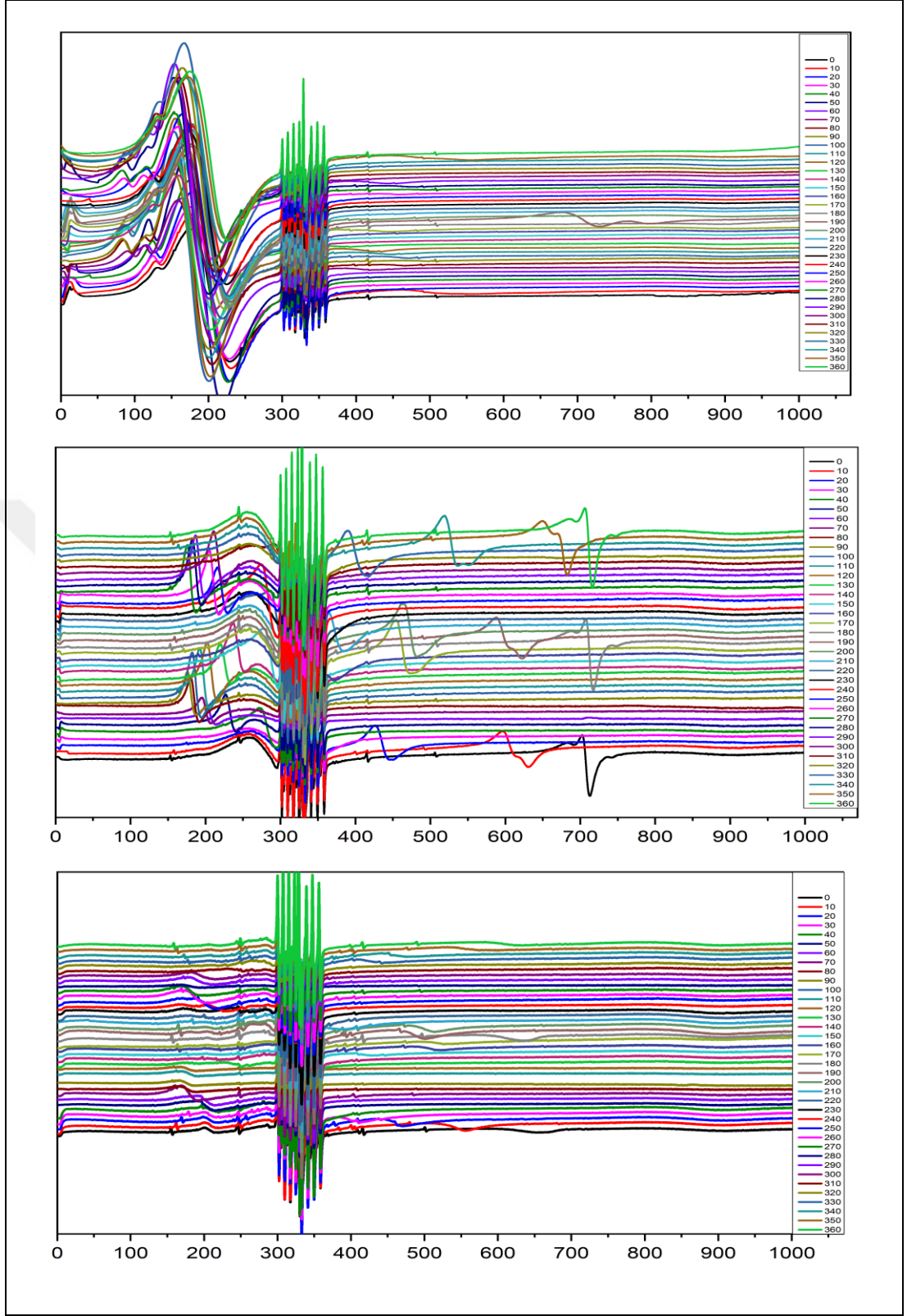
Şekil 4.8: FMR In-plane ve Out-Of-Plane ölçüm geometrilerinin şematik gösterimi.

out-of-plane b) out-of-plane (90° dön.) c) in-plane.

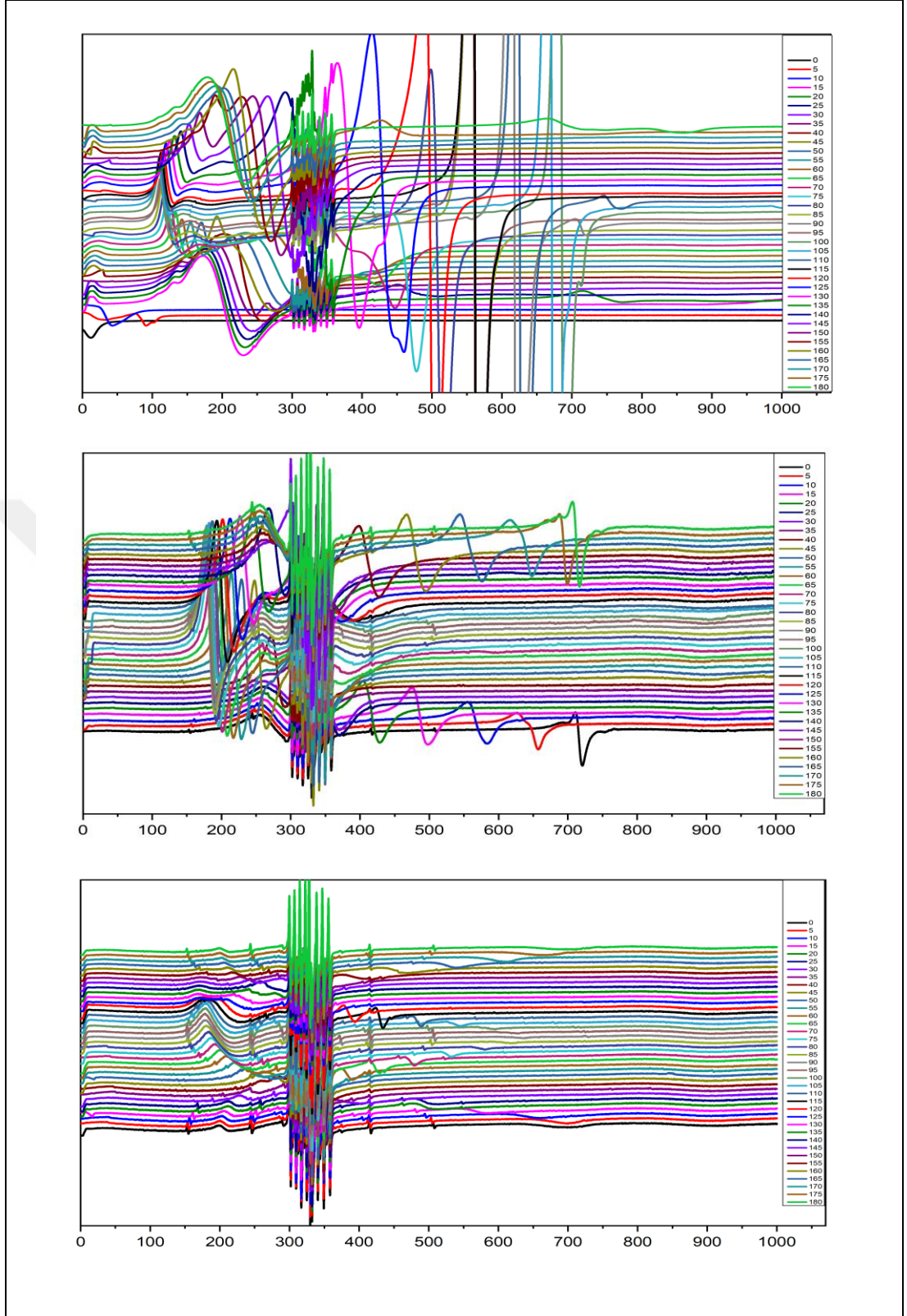
Örneklerin spektrumları şekil 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir. Ölçümlerin sonucunda düzlem içi (in-plane) ve düzlem dışı (out-of-plane) geometrilerin her ikisi için de iki farklı manyetik anizotropi tespit edilmiştir ve rezonans alanları detaylı olarak incelenmiştir.

FMR spektrumları incelenen örneğin manyetik özelliklerinin, özellikle manyetik anizotropi özelliklerinin belirlenmesi için önemli bir veridir. FMR spektrumlarında elde edilen ferromanyetik sinyalin yarı yel genişliği, açılal değışimlere göre verdiği tepkiler, manyetik anizotropi özelliklerini belirlemek için önemli verilerdir. Açıya bağı olarak yapılan ölçümlerde spektrumlar üzerinde bir ferromanyetik malzemenin anizotropi özellikleri ve karakteristik davranışları direk olarak görülebilir. FMR ölçümlerinde rezonans alanlarının belirlenmesi ise tam olarak bu etkinin görülebilmesi için detaylı olarak incelenmesidir. Her bir örnek için FMR spektrumlarında ferromanyetik sinyallerin ölçüm geometrisine göre değışimi ve açılal değışimi analiz edilerek manyetik anizotropi özelliklerinin belirlenmesi sağlanmıştır.



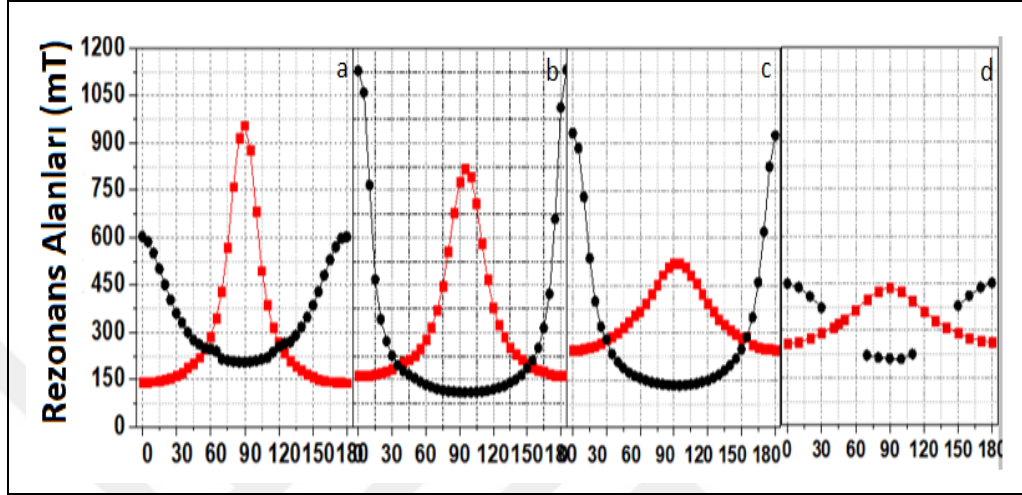


Şekil 4.9: NiFe/Cu alaşım ince filmlerin In-plane FMR spektrumları. a) %74 NiFe b) %60 NiFe c) %50 NiFe d) %35 NiFe.



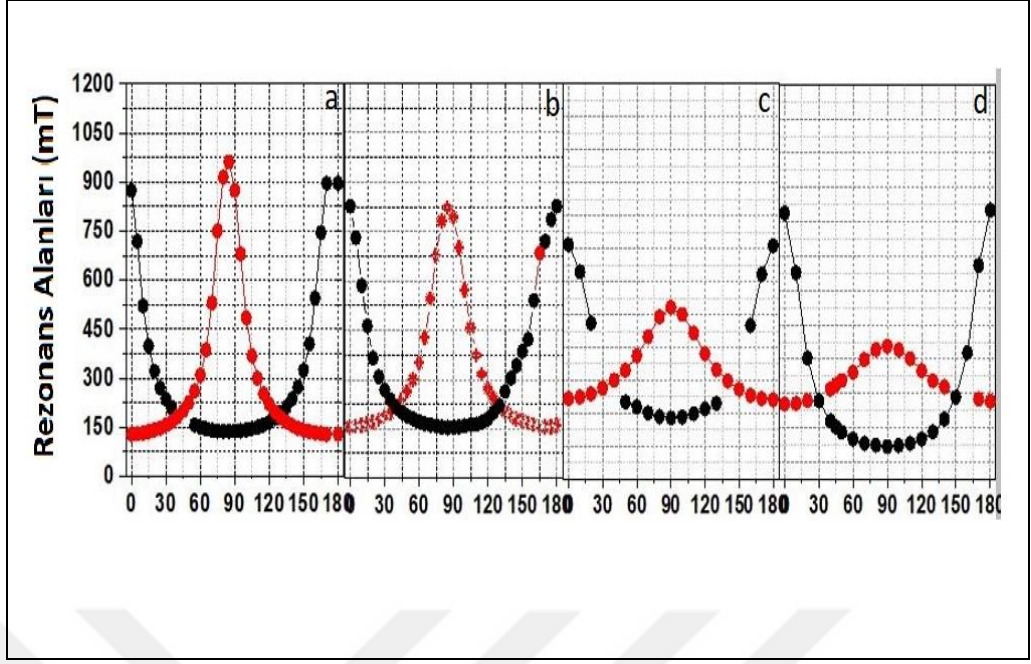
Şekil 4.10: NiFe/Cu alaşım ince filmlerin Out-Of-Plane FMR spekturumları.a) %74 NiFe b) %60 NiFe c) %50 NiFe d) %35 NiFe.

Alaşım ince filmlerin manyetik anizotropi özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için rezonans alanları (H_R) detaylı bir şekilde incelemesi yapılmıştır. Her bir geometri için elde edilen FMR sinyallerinin açıya bağlı olarak detaylı analizleri sonucunda elde edilen rezonans alanları şekil 4.11, 4.12 ve 4.13’ de gösterilmiştir.



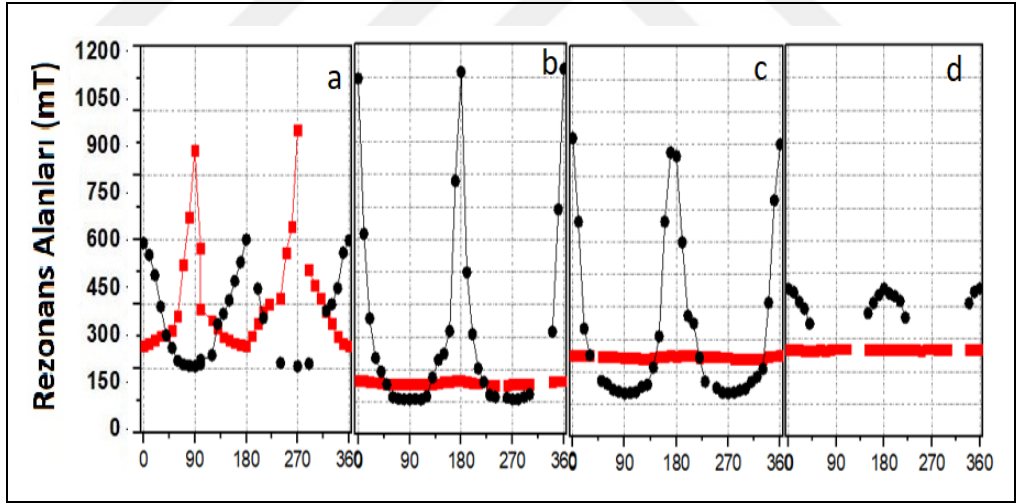
şekil 4.11: NiFe/Cu alaşım ince filmlerin Out-Of-Plane rezonans alanları.

a) %74 NiFe b) %60 NiFe c) %50 NiFe d) %35 NiFe.



Şekil 4.12: NiFe/Cu alaşım ince filmlerin out-of-plane (90° dön.) rezonans alanları.

a) %74 NiFe b) %60 NiFe c) %50 NiFe d) %35 NiFe.



Şekil 4.13: NiFe/Cu alaşım ince filmlerin In-Plane rezonans alanları.

a) %74 NiFe b) %60 NiFe c) %50 NiFe d) %35 NiFe.

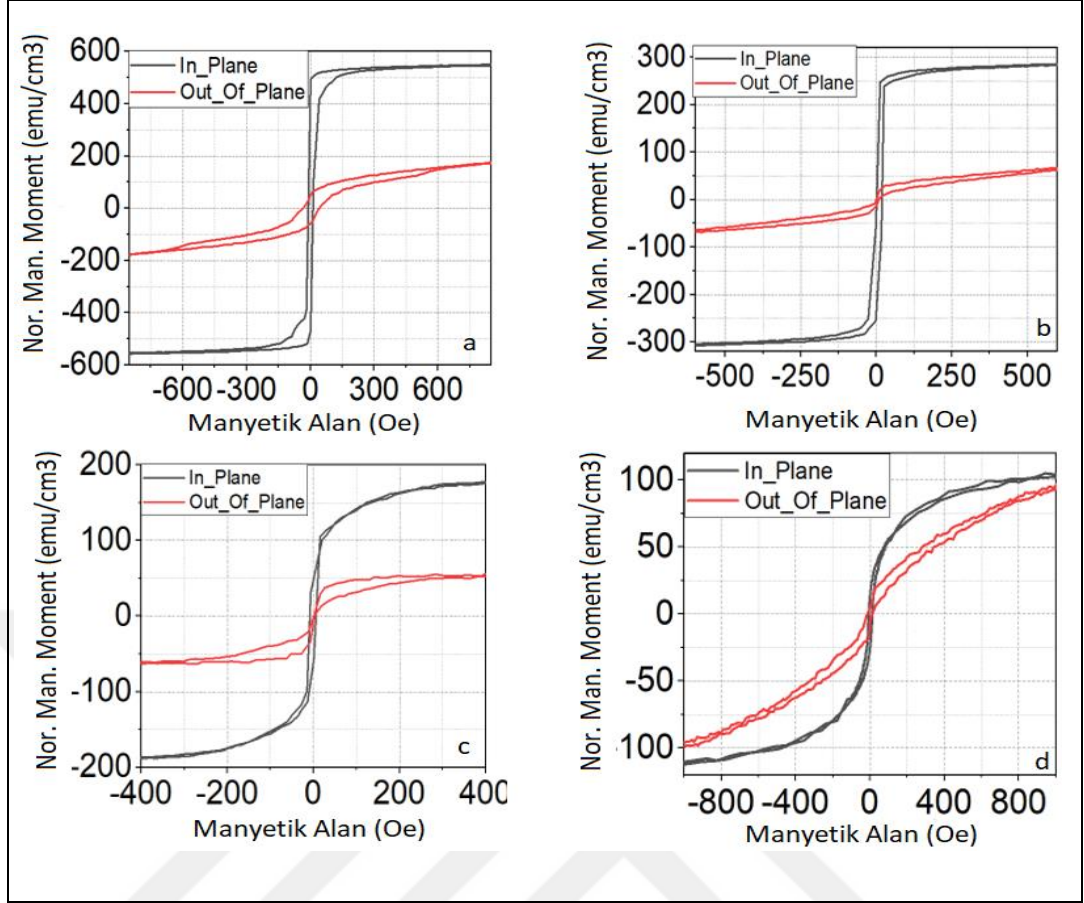
Out-of-plane FMR ölçümleri sonucunda elde edilen rezonans alanları incelendiğinde iki farklı kristal düzleminden kaynaklanan iki farklı FMR sinyali tespit edilmiştir. Kırmızı renk ile işaretlenen veriler Py-Cu (200) bölgelerinden, siyah renk ile işaretlenen veriler

ise NiFe atomlarının etkisini olduğu Cu (111) bölgelerinden kaynaklanmaktadır. Kimyasal konsantrasyon oranlarının sistematik olarak azaltılması sonucunda kırmızı renk ile ifade edilen verilerde rezonans alanlarının azalması da bu sonucu doğrulamaktadır. Alaşım içerisinde ferromanyetik özellik gösteren NiFe atomlarının azalması sonucunda rezonans alanlarının değeri azalmıştır.

İn-plane rezonans alanları incelendiğinde ise filmlerin güçlü derecede uniaxial anizotropi özellikleri gösterdiği görülmüştür. Rezonans alanlarının değerlerinin ferromanyetik malzemelere göre yüksek değerlerde olması manyetik momentlerin film içerisinde düzleme belirli açılarda yöneldiğini işaret etmektedir. Şekil 4.11 ve 4.12’de rezonans alanları değeri arasındaki farklar kullanılarak bu açılar hesaplanabilir. Yapılan hesaplarda manyetik momentlerin 29° ile 70°’lik açılar ile yöneldiği görülmüştür.

Ferromanyetik rezonans sonuçlarında Py-Cu alaşım filmlerde iki manyetik anizotropinin etkisi açıkça gözlemlenmiştir ve alaşım konsantrasyon oranlarının azalması manyetik anizotropi özelliklerine etkileri gösterilmiştir.

Py-Cu alaşım ince filmlerin manyetik analizlerinde mıknatıslanma özelliklerini ölçmek için Titreşimli Örnek Manyetometrisi (VSM) kullanılmıştır. Gebze Teknik Üniversite’inde bulunan VSM ölçüm opsiyonlu Quantum Design 9T PPMS cihazında 2-1000 K sıcaklık değeri arasında mıknatıslanma ölçümleri yapılabilir. Bu sayede örneklerin histerisiz eğrileri elde edilerek manyetik analizlerin yapılması mümkündür. VSM ölçümleri her bir örnek için 10-400 K sıcaklıkları arasında 50K’lık adımlar halinde yapılarak In-plane ve Out-of-plane M-H eğrileri elde edilmiştir. Yine her bir örnek için FC-ZFC (field cooling-zero field cooling) ölçümleri yapılarak M-T analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.14: Oda sıcaklığında farklı konsantrasyon oranlarında M-H eğrileri. a) %74 NiFe b) %60 NiFe c) %50 NiFe d) %35 NiFe.

Şekil 4.14'te her bir konsantrasyon oranı için oda sıcaklığında M-H eğrileri verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken iki önemli bilgi yer almaktadır. Birincisi bütün örneklerde in-plane düzlemi kolay eksen, out-of-plane düzlemi ise zor eksen olarak belirlenmiştir. İkincisi ise alaşım filmlerin manyetik özelliklerinin konsantrasyon oranı ile değiştiği açık olarak görülmektedir. VSM ölçümlerinin en büyük amacı incelenen malzemenin doyum mıknatıslanması değerine nasıl ulaştığıdır. İncelen örneklerin kolay ve zor eksenleri buna göre belirlenir 2. Bölüm içerisinde kolay ve zor eksenlerin tanımı ve anlamları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Hazırlanan örneklerin histerisiz eğrileri incelendiğinde, en yüksek NiFe konsantrasyonu tipik bir ferromanyetik malzeme gibi davranırken, en düşük NiFe konsantrasyonuna sahip örnek ise süper paramanyetik bir davranışın etkileri olduğu görülmektedir. Histerisiz eğrileri, alaşım filmler içerisinde Py konsantrasyon oranı azaldıkça ferromanyetik özelliklerini

kaybettiğini göstermektedir. Mıknatıslanma ölçümlerinde manyetik anizotropi özellikleri de incelenebilir. Şekil 4.14'te verilen in-plane ve out-of-plane ölçümler birlikte incelendiğinde eğrilerin arasında kalan anizotropi değerini vermektedir. Buradan anlaşılabacağı gibi konsantrasyon oranına bağlı olarak anizotropi değerinin azaldığı görülebilir. Bu durum FMR ölçümlerinde rezonans alanları incelenirken gözlemlenmişti. Rezonans alanlarında konsantrasyon oranlarına bağlı olarak ferromanyetik etkilerin azalması sonucu azalan manyetik anizotropi değeri VSM ölçümleri ile de desteklenmiştir.

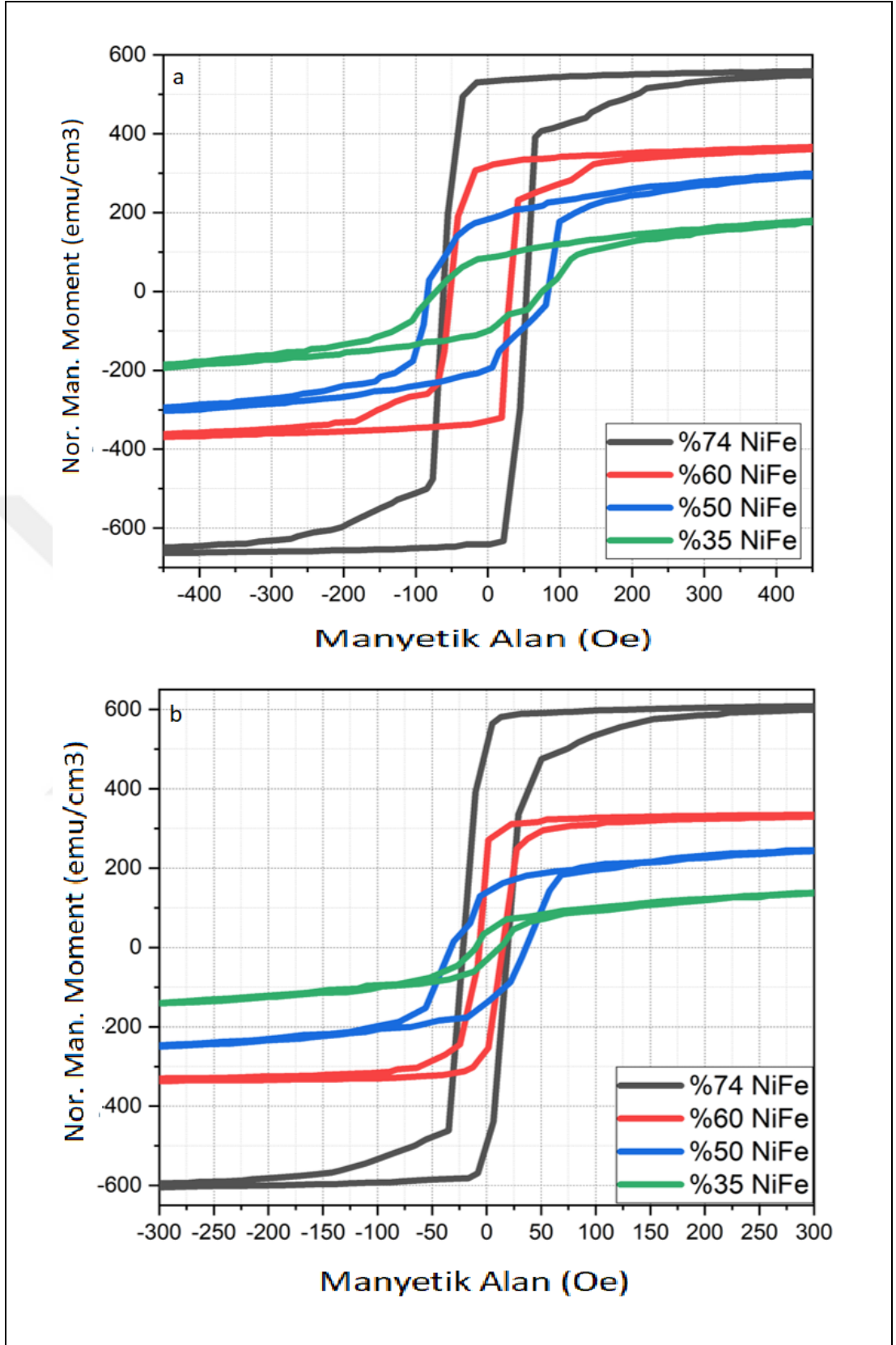
Örneklerin konsantrasyon oranlarına bağlı olarak ferromanyetik özelliklerinin değişmesi bu tür alaşımların ihtiyaç duyulan özelliklere göre hazırlanabileceğinin göstergesi olup manyetik malzemelerin literatürü açısından önemli bir bilgidir.

VSM ölçümleri her bir konsantrasyon için 10-300 K arasında 50 K'lık adımlar halinde yapılmıştır. Şekil 4.14 ve 4.15'te 10 ve 300 K değerleri için in-plane ve out-of-plane M-H grafikleri detaylı olarak gösterilmiştir. Manyetik malzemelerin karakteristik özellikleri (M_s , M_r , H_c) incelenmiştir. Py-Cu alaşım filmlerinde Py konsantrasyon oranlarına bağlı olarak manyetik özelliklerin değiştiği açık olarak görülmektedir. Tablo 4.4'te bu değerler belirlenerek verilmiştir.

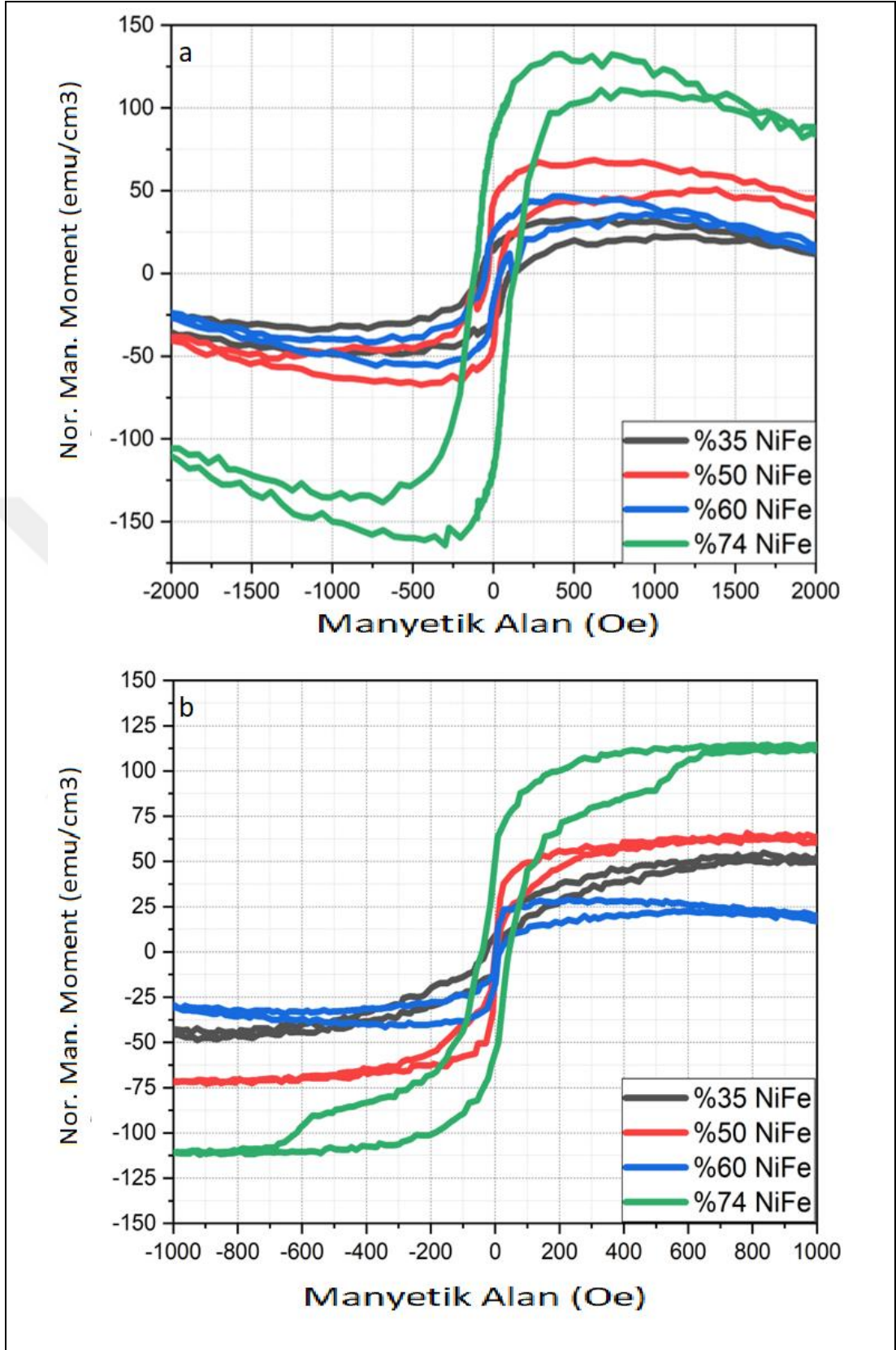
Tablo 4.4: NiFe-Cu alaşım filmlerin manyetik özellikleri.

Örnek % NiFe Oranı	%74 NiFe	%60 NiFe	%50 NiFe	%35 NiFe
M_s (emu/cm ³)	586	284	145	100
M_r (emu/cm ³)	509	254	59	22
H_c (Oe)	22	20	16	19

10K ve 300K histerisiz ölçümleri incelendiğinde, in plane VSM ölçümlerinde iki farklı manyetik anizotropi olduğu görülmektedir. Yapılan VSM ve FMR ölçümleri birbirlerini desteklemekle beraber alaşım filmlerde iki farklı anizotropi olduğu ve bu anizotropi sabitlerinin ve özelliklerinin konsantrasyon oranına göre değiştiği görülmüştür. Elde edilen veriler eşliğinde Py-Cu alaşım filmlerinde manyetik özelliklere katkı sağlayan NiFe atomlarının katkısının azalması sonucunda bu özelliklerin etkilerinin azaldığı literatür bilgilerinde de doğrulanmıştır. Bu bakımdan elde ettiğimiz sonuçlar alaşım filmlerin manyetik özellikleri açısından tutarlıdır. Ayrıca 10 K' de bütün örneklerde bir değiş-tokuş (Exchange bias) etkileşmesi gözlemlenmiştir. Bu etki farklı sıcaklıklarda bir faz geçişlerinin olduğuna işaret etmektedir. Bu sebeple örnekler üzerinde field cooling (FC) ve zero-field cooling (ZFC) ölçümleri de yapılmıştır.

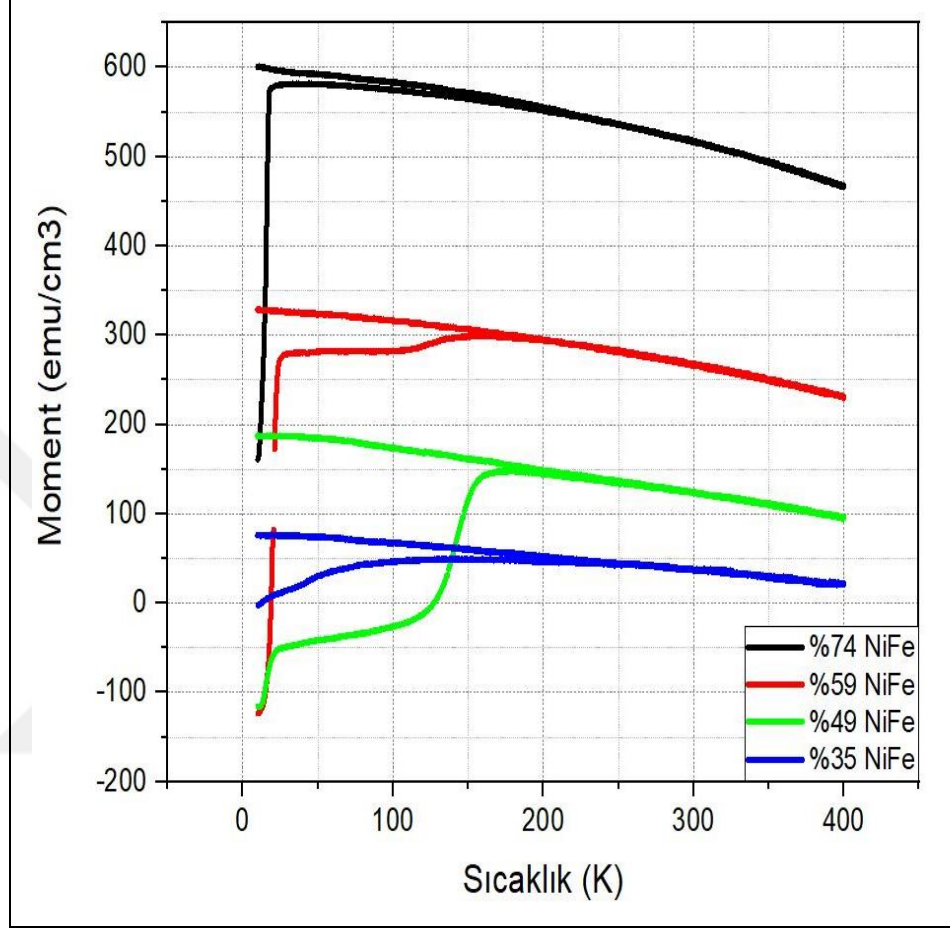


Şekil 4.15: Farklı sıcaklar için In-plane histerisz eğrileri a)10 K ve b)300 K.



Şekil 4.16: Farklı sıcaklar için Out-of-plane histerisz eğrileri a)10 K ve b) 300 K.

FC ve ZFC (Field Cooling, Zero Field Cooling) ölçümleri şekil 4.17’ de verilmiştir. Hazırlanan örneklerin manyetik özelliklerini sıcaklığa bağlı olarak incelemek için örneklerin M-T analizleri yapılmıştır.



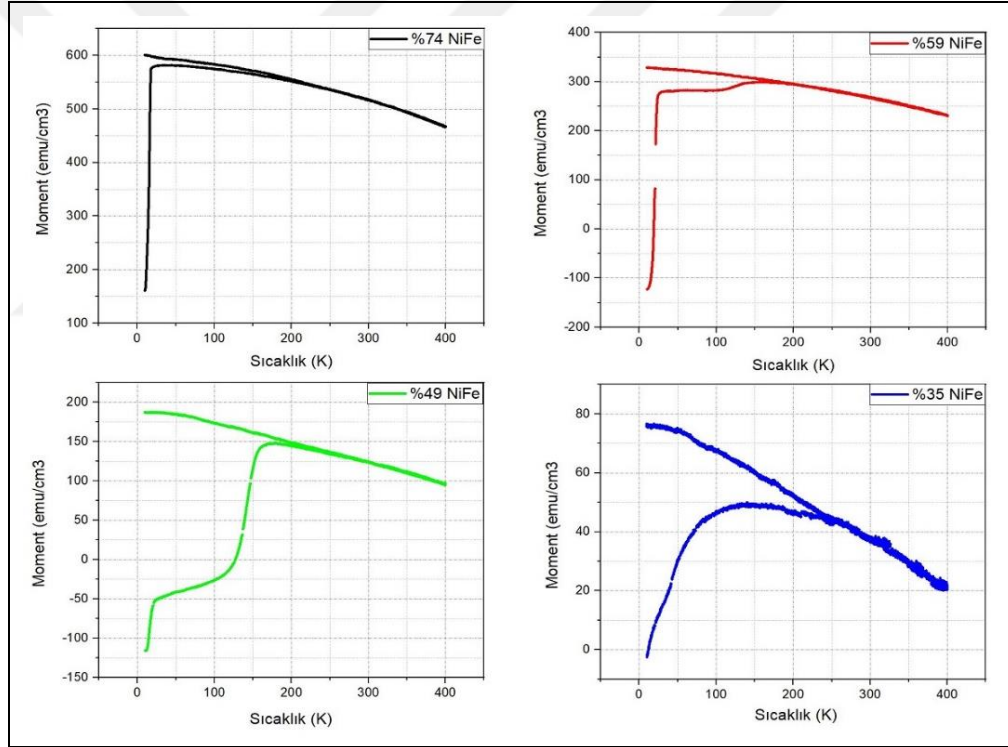
Şekil 4.17: NiFe-Cu M-T ölçümleri.

M-T ölçümlerinde bütün örneklerin, 20K altında ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçtiği görülmüştür. 4 farklı konsantrasyon oranı ayrı ayrı incelendiğinde alaşım filmlerin konsantrasyon oranlarına bağlı olarak farklı sıcaklıklarda iki farklı engelleme sıcaklığı (blocking temperature) (T_B) tespit edilmiştir. Tablo 4.5 ve Şekil 4.17’ de bu sıcaklıkların analizleri her bir örnek için detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.5: Engelleme sıcaklığının konsantrasyon oranlarına göre değişimi.

	%74 NiFe	%60 NiFe	%50 NiFe	%35 NiFe
T_B (K)	214	182	272	278
1. T_B (K)	-	134	165	123
2. T_B (K)	20 K	23 K	22 K	32 K

Tablo 4.5 ve Şekil 4.17' de bu sıcaklıkların analizleri her bir örnek için gösterilmiştir.



Şekil 4.18: T_B geçiş sıcaklıkları.

NiFe-Cu alaşım filmlerin yapısal ve manyetik analizleri birlikte incelendiğinde önemli bir ilişki ortaya çıkmaktadır. Alaşım filmlerin manyetik özellikleri kimyasal konsantrasyon oranına bağlı olarak önemli derece değişimler göstermektedir. Kristal

yapı oluşumu sırasında ortaya çıkan iki farklı kristal düzleminin, farklı manyetik özelliklerin oluşumunu direkt olarak etki ettiği belirlenmiştir. FMR ve VSM sonuçları ile bu oluşumların detaylı olarak açıklamaları yapılmıştır.



5. SONUÇ

(Py)_xCu_{1-x} alaşım filmleri yapısal ve manyetik özelliklerinin araştırılması, spintronik sistemlerde kullanılabilir yeni malzemelerin keşfedilmesi ve literatür bilgilerine katkı sağlanması amacı ile hazırlanmıştır. Tek kristal MgO (100) alttaşlar üzerine co-sputter tekniği kullanılarak hazırlanan alaşım ince film sistemlerinin yapısal ve manyetik özellikleri konsantrasyon oranına bağlı olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

(Py)_xCu_{1-x} alaşım filmlerinin kristal yapıları incelendiğinde XRD spektrumlarında NiFe-Cu (200) ve Cu (111) pikleri açık olarak gözlemlenmiş ve Py-Cu alaşım filmlerin MgO alttaşlar üzerine iki farklı kristal düzleminde büyüdüğü anlaşılmıştır. şekil 4.3' te NiFe-Cu (200) pikinin alaşım konsantrasyon oranına göre değişmesi ve Cu (111) pikinin sabit kalması, alaşım filmlerin içerisinde Py atomlarının da bulunduğu Cu bölgesini ve ayrı bir Py-Cu bölgelerini temsil etmektedir. Alaşım filmler içerisine Py kimyasal konsantrasyon oranının azalması sonucunda Py-Cu (200) pikinin daha küçük açılarda oluşması, alaşım filmlerde Cu bölgelerinin etkisini arttırmasının bir sonucudur. Bu analizler FMR ölçümlerinden elde edilen rezonans alanlarının değişimleri ile daha açık görölmektedir. In-plane ve Out-of-plane rezonans alanları incelendiğinde kırmızı ve siyah renk ile ifade edilen iki farklı manyetik anizotropinin oluşumu kristal yapıda geręekleşen bu farklı bölgeden kaynaklanmaktadır. Rezonans alanları analiz edildiğinde alaşım ince filmlerin manyetik anizotropi özelliklerinin Py konsantrasyon oranına göre değiştiği gözlemlenmiştir. Manyetik malzemelerde alışılmış olarak manyetik momentlerin yönelimi düzlem içi ve düzlem dışı olarak bilinir. Ancak alaşım filmlerin içerisinde oluşan bu farklı bölgenin sahip olduğu manyetik momentler birbirlerini etkileyerek alaşım film içerisinde farklı bir yönelim oluşturmuştur. Out-of-plane FMR analizlerinde anlaşıldığı gibi manyetik momentler konsantrasyon oranına göre 29° ile 70° arasında değişen açılarla yöneldiği hesaplanmıştır. Örneklerin histerisis eğrileri ve mıknatıslanma özellikleri VSM tekniği ile incelenmiştir. Örneklerin mıknatıslanma özellikleri (doymuş mıknatıslanması, koersif alan değerleri vb.) konsantrasyon oranlarına bağlı olarak değişebileceği açıkça

gösterilmiştir. VSM ölçümlerinde örneklerde Py konsantrasyon oranı azaldıkça ferromanyetik davranış yerini ferromanyetizmanın özel bir durumu olan süperparamanyetik davranışa bıraktığı görülmüştür. VSM analizleri sonucunda manyetik malzemelerin karakteristik özellikleri olan M_s , M_R , H_C değerlerinin alaşım filmlerin konsantrasyon oranına bağlı olarak azaldığı anlaşılmıştır. Bu durumda Py-Cu alaşım filmlerinde kimyasal konsantrasyon oranlarının manyetik özellikleri önemli derecede etkilediği söylenebilir. M-T analizlerinde her bir örnek için bir iki farklı engelleme sıcaklığı (blocking temperature) belirlenmiştir. Özel olarak kimyasal konsantrasyon oranları birbirlerine yaklaşık olan örneklerde bu davranış açık olarak görülmektedir.

Bu sonuçlar doğrultusunda demir-nikel-bakır elementleri literatürde ilk defa uygun yöntemler ile alaşım ince film haline getirilmiştir ve oda sıcaklığında gösterdiği ferromanyetik özellikler ve detaylı yapılan analizlerde manyetik özellikler üzerindeki değişimler sebebi ile spin tabanlı sistemler ve teknolojiler için kullanılabileceği gösterilmiştir. Alaşım filmlerin farkı konsantrasyon oranlarında farklı etkileşimleri ve tipik faz geçişleri literatür için önemli bir bilgidir. Elde edilen alaşım manyetik filmlerin manyetik özellikleri, kimyasal konsantrasyon oranı ile güçlü derece ilişkili olup istenilen değerlerde ve özelliklerde üretilebileceğini göstermiştir. Bu çalışmanın sonucunda, gelecek çalışmalar da spintronik sistemler için düşük maliyetli, kolay üretilebilir malzemelerin keşfi açısından önemli bir çalışma olarak literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Fiore J.M., (2019), "Semiconductor Devices Theory and Application", 1 st Edition, Mohawk Valley Community College
- [2] Wolf S.A., (2001), "Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future", Science 294, 1488
- [3] Coey J.M.D., (2009), "Magnetisim and Magnetic Materials", 1 st Edition, Cambridge University Press
- [4] Hirohata A., (2014), "Future Perspectives for Spintronic Devices", Journal of Applied Physics 47, 193001, 19
- [5] Ennen I., (2016), "Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications", Sensors 16, 904
- [6] Web 3, (2019), http://www.scholarpedia.org/article/Giant_magnetoresistance (Erişim Tarihi: 15.12.2019)
- [7] Li X., (2016), "First-principles design of spintronics materials", National Science Review 3, 365-381
- [8] Munekata H., (2019), "Molecular Beam Epitaxy: Materials and Applications for Electronics and Optoelectronics", 1st Edition, John Wiley & Sons
- [9] Wilamowski Z., (2006), "Spintronics in semiconductors", Materials Science-Poland 24, 3
- [10] McHenry M.E., Laughlin D.E., (2014), "Physical Metallurgy", Fifth Edition, Elseiver
- [11] Neamtu J., (1999), "Magnetoresistive properties and microstructure of NiFe Thin Films and NiFe/Cu/NiFe multilayer films" Thin Solid Film, 343-344, 218-221
- [12] Fulthorpe B.D., (2001), "Structural and magnetic changes on annealing 77ermalloy/copper multilayers", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 226-230, 1733-1734
- [13] Shkurdoda Y.O., (2017), "The influence of the concentration of components in magnetic layers on the magnetoresistive properties of three-layer film systems based on Fex Ni1-x and Cu", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 443, 190-194

- [14] Liang C., (2014), "Magnetic Properties of FeNi-Based Thin Film Materials with Different Additives", *Biosensors* 4, 189-203
- [15] Fnidiki A., (2010), "Structural and magnetic properties of granular (NiFe)₅₄Al₄₆ sputtered thin films", *Physica B.* 405, 2632–2639
- [16] Rantchler J.O., (2007), "Effect of 3d, 4d, and 5d transition metal doping on damping in 78 permalloy thin films", *Journal of Applied Physics*, 101, 033911
- [17] Cullity B. D., Graham C. D., (2009), "Introduction to Magnetic Materials", 2 nd Edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey
- [18] Iacovacci V., (2016), "Lab-on-a-Chip Fabrication and Application", 1 st Edition IntechOpen
- [19] Gould R.D., (2017), "Handbook of Electronic and Photonic Materials", Springer International Publishing, 648-702
- [20] Wasa K., (2004), "Thin film materials technology: sputtering of compound materials", 1st Edition, William Andrew Publishing Springer
- [21] Park J.H., Sudarshan T.S., (2001), "Chemical vapor deposition", 1st Edition, ASM International
- [22] Whiteside P.J.D., (2016), "Techniques and Challenges for Characterizing Metal Thin Films with Applications in Photonics", *Coatings* 6, 35
- [23] Moshfegh A.Z., (2003), "Physics and Technology of Thin Films", 1st Edition, World Scientific Publishing
- [24] Bubert H., Rivière J. C., Arlinghaus H. F., Hutter H., Jenett H., (2002), "Surface and Thin Film Analysis", 1 st Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [25] Alfonso E., Olaya J., Cubillos G., (2015) "Thin Film Growth Through Sputtering Technique and Its Applications", *Crystallization – Science and Technology InTech* 397-432
- [26] Hassan M.M., (2018), "Handbook of Antimicrobial Coatings", 1 st Edition, Elsevier Inc,
- [27] Kelly P. J., (2000), "Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications", *Vacuum* 56, 159-172
- [28] Kittel C., (2005) "Introduction to Solid State Physics", 8th Edition, John Wiley & Sons

- [29] Epp J., (2016), "Materials Characterization Using Nondestructive (NDE) Methods", 1 st Edition, Elsevier Ltd.
- [30] Konno H., (2016) "Materials Science and Engineering of Carbon", 1 st Edition, Elsevier Inc 153-171
- [31] Gunawardane R., (2006), " Handbook of Applied Solid State Spectroscopy", 1 st Edition, Springer, Boston, MA
- [32] Zhou W., Apkarian R. P., Wang Z. L., Joy D., " Scanning Microscopy for Nanotechnology", 1st Edition, Springer, New York, Ny
- [33] Sharma K.S., (2018) "Handbook of Materials Characterization", 1 st Edition, Springer International Publishing AG
- [34] Ebnesajjad S., (2011), "Handbook of Adhesives and Surface Preparation", 1 st Edition, Elsevier Inc.
- [35] Farle M., (1998) "Ferromagnetic resonance of ultrathin metallic layers", Reports on Progress in Physics 61, 755-826
- [36] Heinrich B., Cochran J. F., (1993), "Ultrathin metallic magnetic films: magnetic anisotropies and exchange interactions", Advances in Physics, 42, 5, 523-639
- [37] Yalçın O, (2013), "Ferromagnetic Resonance: Theory and Applications", 1 st Edition, InTech
- [38] Ofstad J., (2014), "Ferromagnetic Resonance Spectroscopy Studies of Permalloy/ Copper/ Chromium/ Copper thin films", Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology
- [39] Foner S., (1959), "Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer", Review of Scientific Instruments, 30, 7, 548-557
- [40] Kirupakar B. R., (1959), "Vibrating Sample Magnetometer and Its Application In Characterisation Of Magnetic Property Of The Anti Cancer Drug Magnetic Microspheres", International Journal Of Pharmaceutics & Drug analysis, 4, 5, 227-233
- [41] Meyer D. C., Paufler P., (2000) "Coherency and lattice spacings of textured permalloy/copper multilayers as revealed by X-ray diffraction", Journal of Alloys and Compounds, 298, 42-46

- [42] Liang C., Gooneratne C., (2012) "Development of FeNiMoB thin film materials for microfabricated magnetoelastic sensors", Journal of Applied Physics, 112, 113912
- [43] Web 2, (2019), <https://www.ucl.ac.uk/EarthSci/people/lidunka/GEOL2014%20/Geophysics9%20-Magnetism%20/Useful%20papers/Magnetism.htm>, (Erişim Tarihi: 13.10.2019)
- [44] Web 3, (2019), <https://physics.mq.edu.au/~jcresser/Phys301/Chapters/Chapter6.pdf>, (Erişim Tarihi: 17.10.2019)
- [45] Web 4, (2019), http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2mb/hg2m_b.html#diamagnetism, (Erişim Tarihi: 16.11.2019)
- [46] Web 5, (2019), https://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_b/hg2m_b.html#diamagnetism, (Erişim Tarihi:16.11.2019)
- [47] Web 6, (2019), <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/ferro.html>, (Erişim Tarihi: 16.11.2019)
- [48] Web 7, (2019), <https://www.britannica.com/biography/Wilhelm-Rontgen>, (Erişim Tarihi 19.10.2019)
- [49] Web 8, (2019), <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html>, (Erişim Tarihi: 13.10.2019)
- [50] Web 9, (2019), https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Layer_growth_models.svg, (Erişim Tarihi 09.11.2019)

ÖZGEÇMİŞ

Yasin AKBAŞ 1991 yılında İstanbul’da doğdu. 2010 yılında başladığı Gebze Teknik Üniversitesi Temel Bilimler Fakültesi Fizik Bölümünden 2017 yılında “Süper İletken Malzemelerde Agent Etkisi” isimli çalışmasını tamamlayarak mezun oldu. Aynı yıl içerisinde Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında lisansüstü eğitime başladı ve lisansüstü eğitimi boyunca Gebze Teknik Üniversitesi Nano manyetizma ve Spintronik (NASAM) Laboratuvarı’nda ince film üretimi ve karakterizasyonu konusunda deneysel çalışmalar yaparak manyetizma ve ince film konularında çalıştı.

