

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

[Ni/Pt/CoO]_x ÇOK KATLI İNCE FİLMLEİN
YAPISAL VE MANYETİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

AYŞE SÖNMEZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2015

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

[Ni/Pt/CoO]_x ÇOK KATLI İNCE FİLMLEİN
YAPISAL VE MANYETİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

AYŞE SÖNMEZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. NUMAN AKDOĞAN

GEBZE
2015

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

**INVESTIGATION OF STRUCTURAL
AND MAGNETIC PROPERTIES OF
[Ni/Pt/CoO]_x MULTILAYER THIN FILMS**

AYŞE SÖNMEZ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS**

**THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. NUMAN AKDOĞAN**

**GEBZE
2015**



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/06/2015 tarih ve 2015/41 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/07/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ayşe Sönmez'in tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Numan AKDOĞAN

ÜYE

: Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Mustafa ERKOVAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışmasında, $[\text{Ni}/\text{Pt}/\text{CoO}]_x$ çok katlı ince filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri tekrar eden tabaka sayısına (X) bağlı olarak incelendi. İnce filmler Si (111) alttaş üzerine magnetron saçtırma (MS) tekniği ile büyütüldü. Filmlerin yapısal özelliklerini belirlemek için x-ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanıldı. XRD sonuçlarına göre örneklerin çoklu kristal (polycrystalline) yapıya, tampon Pt tabakasının ise zayıf (111) yönelimine sahip olduğu gözlemlendi. Manyetik özellikler manyetik-optik Kerr etkisi (MOKE) ve titreşimli örnek manyetometresi (VSM) teknikleriyle incelendi. Örneklerin kolay mıknatıslanma yönlerini belirlemek için, örnek düzlemi ve örnek düzlemine dik yöndeki mıknatıslanma eğrileri oda sıcaklığında MOKE sistemi ile ölçüldü. MOKE ölçüm sonuçları bütün örneklerin kolay eksenlerinin örnek düzleminde olduğunu gösterdi. Kaydırma etkisinin (KE) sıcaklığa bağlı davranışı VSM tekniği ile incelendi. Kaydırma etkisi ölçümleri 300 - 150 K aralığında ve 2 kOe soğutma alanı (H_{FC}) altında yapıldı. VSM ölçüm sonuçlarından, kaydırma etkisinin gözlenmeye başladığı sıcaklık değeri olan engelleme sıcaklığı (T_B), tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak, 270 - 250 K arasında belirlendi. Düşük sıcaklık VSM ölçüm sonuçlarından, zorlayıcı alan (H_C) ve kaydırma etkisi alan (H_{EB}) değerlerinin sıcaklığın azalmasıyla arttığı gözlemlendi. Tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak zorlayıcı alan değerinin arttığı bulundu. Ancak kaydırma etkisi alanının tekrar eden tabaka sayısının artmasıyla $X=1$ 'den $X=3$ 'e kadar arttığı, $X=4$ 'te ise azaldığı belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Kaydırma Etkisi (KE), Engelleme Sıcaklığı (T_B), Magnetron Saçtırma (MS), X-Işını Kırınımı (XRD), Manyetik-Optik Kerr Etkisi (MOKE), Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM).

SUMMARY

In this thesis, structural and magnetic properties of $[\text{Ni}/\text{Pt}/\text{CoO}]_X$ multilayers have been investigated as a function of repeating layers (X). The thin films were grown on Si (111) substrate by magnetron sputtering (MS) system. In order to determine structural properties of the thin films x-ray diffraction (XRD) method was used. According to XRD data, the samples have polycrystalline structure, but broad peak of (111) was observed for the buffer Pt layer showing weak texturing. Magnetic properties have been investigated by using magneto-optical Kerr effect (MOKE) and vibrating sample magnetometer (VSM) methods. Both in-plane and out-of-plane hysteresis curves were measured by MOKE at room temperature in order to determine easy magnetization axis of the samples. The MOKE results have revealed that all multilayers have an easy magnetization axis in the film plane. Temperature dependence of exchange bias (EB) properties has been studied by using VSM technique. The exchange bias measurements have been performed from 320 K to 150 K under cooling field (H_{FC}) of 2 kOe. From VSM results, blocking temperature (T_B) were specified between 270 – 250 K depending on the repeating layer. Low temperature VSM measurements indicate that coercive field (H_C) and exchange bias field (H_{EB}) increase with decreasing temperature. In addition, coercive field increases with the increasing number of repeating layer. However exchange bias field increases with the increasing number of repeating layer until $X=3$ and then it decreases.

Key Words: Exchange Bias (EB), Blocking Temperature (T_B), Magnetron Sputtering (MS), X-ray Diffraction (XRD), Magneto-optical Kerr Effect (MOKE), Vibrating Sample Magnetometer (VSM).

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda beni destekleyen, akademik hayatıma ilk adımı atmama vesile olan, iş ahlakını ve azmini kendime örnek aldığım, öğrencilerinin her daim daha iyisini yapabileceğine inanan danışmanım Doç. Dr. Numan Akdoğan'a,

Tez çalışmasında kullanılan örnek sisteminin hazırlanmasında emeği geçen Umut Parlak, Yrd. Doç. Dr. Mustafa Erkovan ve Doç. Dr. Osman Öztürk'e,

Tezimin hazırlanmasında destek ve yardımlarını benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlanma fırsatı veren değerli grup arkadaşlarım Ayşe Canlı, Erdem Demirci, Arş. Gör. Mustafa Öztürk'e,

Fizik Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Rauf Süleymanlı'ya ve araştırmalarımızı yapabilmemiz için gerekli laboratuvar koşullarını sağlayan Sayın Prof. Dr. Bekir Aktaş'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 114F004 ve 112T857 nolu TÜBİTAK projeleri tarafından desteklenmiştir.

Eğitim hayatıma devam ederek hayallerini gerçekleştirdiğim aileme, tüm hayatım boyunca seçimlerime gösterdikleri saygıdan ve bana olan inançlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. YAPISAL ve MANYETİK ÖZELLİKLER	3
2.1. Nikel (Ni)	5
2.2. Kobalt Oksit (CoO)	7
3. KAYDIRMA ETKİSİ	9
3.1. İdeal Kaydırma Etkisi Modeli	11
3.2. İdeal Meiklejohn-Bean Modeli	14
3.3. Zorlayıcı Alanlar	17
3.4. Engelleme Sıcaklığı	18
3.5. Talim Etkisi	19
3.6. Kaydırma Etkisinin Teknolojik Uygulamaları	20
4. DENEYSEL TEKNİKLER	22
4.1. Magnetron Saçtırma Tekniği	22
4.2. X-Işını Kırınımı Tekniği	23
4.3. Manyetik-Optik Kerr Etkisi Tekniği	25
4.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi Tekniği	27
4.4.1. Titreşimli Örnek Manyetometresinin Çalışma Prensibi	29
5. DENEYSEL SONUÇLAR	33
5.1. Örneklerin Hazırlanması	33
5.2. X-Işını Kırınımı Ölçüm Sonuçları	37
5.3. Manyetik-Optik Kerr Etkisi Ölçüm Sonuçları	40
5.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi Ölçüm Sonuçları	42

5.4.1. Oda Sıcaklığı Titreşimli Örnek Manyetometresi Ölçüm Sonuçları	42
5.4.2. Düşük Sıcaklık Titreşimli Örnek Manyetometresi Ölçüm Sonuçları	44
6. SONUÇLAR	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	62
EKLER	63

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kisaltmalar</u>	
Ni	: Nikel
Pt	: Platin
CoO	: Kobalt Oksit
K	: Kelvin
Oe	: Oersted
H_{FC}	: Soğutma Alanı
T_B	: Engelleme Sıcaklığı (Blocking Temperature)
H_{EB}	: Kaydırma Etkisi Alanı
H_C	: Zorlayıcı Alan (Coercive Field)
Å	: Angstrom
SiO ₂	: Silisyum Oksit
Si	: Silisyum
H	: Manyetik Alan Vektörü
T_N	: Néel Sıcaklığı
Fe	: Demir
Co	: Kobalt
r_a	: Atom Yarıçapı
r_{3d}	: 3d Kabuğunun Yarıçapı
J_{ex}	: Değiş-tokuş İntegrali
Cr	: Krom
Mn	: Manganez
Gd	: Gadolinyum
A	: Amper
m	: Metre
T_C	: Curie Sıcaklığı
NaCl	: Sodyum Klorür

μ	: Manyetik Moment
H_{C1}	: Sol Zorlayıcı Alan
H_{C2}	: Sağ Zorlayıcı Alan
T	: Sıcaklık
K_{FM}	: Ferromanyetik Tabakanın Anizotropi Sabiti
M_{FM}	: Ferromanyetik Tabakanın Mıknatıslanma Değeri
β	: K_{FM} ve M_{FM} Arasındaki Açık
Θ	: \mathbf{H} ve K_{FM} Arasındaki Açık
E	: Birim Alan Başına Düşen Toplam Enerji
μ_0	: Serbest Uzayın Geçirgenliği
t_{FM}	: FM Tabakanın Kalınlığı
J_{EB}	: Birim Alan Başına Düşen Değiş-tokuş Etkileşme Enerjisi
M_S	: Doyum Mıknatıslanması
M_R	: Kalıcı Mıknatıslanma
PtCo	: Platin Kobalt
mbar	: Milibar
Ar	: Argon
Ne	: Neon
He	: Helyum
Kr	: Kripton
Xe	: Ksenon
eV	: Elektron Volt
d_{hkl}	: Düzlemler Arası Mesafe
Θ	: X-Işınının Örneğe Geliş Açısı
λ	: X-Işınının Dalga Boyu
n	: Kırılma İndisi
Cu	: Bakır
m	: metre
Hz	: Hertz
r	: Yarıçap

l	: Tel Uzunluğu
i	: Akım
Φ_H	: Manyetik Akı
ε	: Elektromotor Kuvveti
a	: Yüzey Alanı
n	: Sarım Sayısı
z	: Örneğin Salınım Yaptığı Düzlem
t	: Zaman
κ	: Çiftleşme Sabiti
A	: Salınımın Genliği
ν	: Salınımın Frekansı
t_{Ni}	: Nikel Tabakasının Kalınlığı
t_{CoO}	: Kobalt Oksit Tabakasının Kalınlığı
AFM	: Antiferromanyetik
bcc	: Hacim-merkezli Kübik (Body Centered Cubic)
ccp	: Sıkı Paketli Kübik (Cubic Close-packed)
dc	: Doğru Akım
DMS	: Seyreltilmiş Manyetik Yarıiletken
EB	: Exchange Bias
FC	: Alan Altında Soğutma (Field Cooling)
fcc	: Yüzey-merkezli Kübik (Face Centered Cubic)
FI	: Ferimanyetik
FM	: Ferromanyetik
GMR	: Dev Manyeto-direnç
KE	: Kaydırma Etkisi
L-MOKE	: Boyuna MOKE (Longitudinal MOKE)
M-H	: Miknatıslanma Eğrisi
MOKE	: Manyetik-optik Kerr Etkisi (Magneto-optical Kerr Effect)
MR	: Manyeto-direnç
MRAM	: Manyetik Rastgele Erişimli Hafıza (Magnetic Random Access Memory)

MS	: Magnetron Saçtırma (Magnetron Sputtering)
NM	: Manyetik Olmayan
P-MOKE	: Kutupsal MOKE (Polar MOKE)
PM	: Paramanyetik
PPMS	: Physical Property Measurement System
QCM	: Kuvars Kristal Mikrodenge (Quartz Crystal Microbalance)
rf	: Radyo Frekans
T-MOKE	: Enine MOKE (Transverse MOKE)
TMR	: Tünelleme Manyeto-direnç
VSM	: Titreşimli Örnek Manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometer)
X	: Tekrar Eden Tabaka Sayısı
XPS	: X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (X-ray Photoelectron Spectroscopy)
XRD	: X-ışını Kırınımı (X-ray Diffraction)
ZFC	: Alansız Soğutma (Zero Field Cooling)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Bethe-Slater eğrisi.	3
2.2: Tek kristal demir (kırmızı) ve nikel (mavi) için mıknatıslanma eğrileri.	4
2.3: Yüzey-merkezli kübik yapının şematik gösterimi. a) Yüzey-merkezli kübik yapının birim hücresi. b) Çok sayıda atomun bir araya gelmesiyle ortaya çıkan kristal yapı. c) Kristal yapının (111) düzleminde alınmış bir kesit, d) (111) düzlemindeki altıgen simetriye sahip atom dizilimi.	6
2.4: Uzay örgüsü yüzey merkezli kübik yapıda olan sodyum klorür yapısının şematik gösterimi. Atomların birim hücredeki konumları adım adım gösterilmiştir.	7
2.5: Kobalt oksidin kristal yapısının şematik gösterimi.	7
2.6: Kobalt oksitin monoklinik ve kübik birim hücresi arasındaki ilişkinin şematik gösterimi.	8
3.1: FM/AFM örnek sisteminde, a) Néel sıcaklığı üzerinde, b) Néel sıcaklığı altında ölçülen mıknatıslanma eğrileri.	9
3.2: Yüzeyleri oksitlenmiş Co parçacıklarından oluşan sisteme ait, $T=77\text{ K}$ 'de FC (düz çizgi) ve ZFC (kesikli çizgi) ile ölçülen mıknatıslanma eğrileri.	10
3.3: FC ile ölçülen mıknatıslanma eğrisinin farklı evrelerindeki ferromanyetik ve antiferromanyetik tabakalara ait manyetik spin konfigürasyonları.	12
3.4: İdeal Meiklejohn-Bean modelindeki açı ve vektörlerin şematik gösterimi.	15
3.5: Ferromanyetik malzemeler için mıknatıslanma eğrisi.	17
3.6: Zorlayıcı alanların sıcaklığa bağlı değişimi.	18
3.7: Talim etkisinin çalışıldığı, $\text{Pt}_{0.40}\text{Co}_{0.60}/\text{CoO}$ örneği için sol zorlayıcı alan değerlerinin ardışık olarak yapılan mıknatıslanma ölçümüne bağlı değişimi. Talim etkisinin gözlemlendiği, 10 K 'de ardışık olarak ölçülen mıknatıslanma eğrileri grafiğin sol üst köşesinde verilmiştir.	19
3.8: Spin vanası, GMR ve TMR yapılarının temsili gösterimleri.	20

3.9:	Spin vanalarında düşük “0” ve yüksek “1” direnç durumu.	21
4.1:	Magnetron Saçtırma Tekniğinin temsili gösterimi.	22
4.2:	Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü’ndeki x-ışını difraktometresi.	25
4.3:	Manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm geometrileri. a) P-MOKE, b) L-MOKE, c) T-MOKE ölçüm geometrisi.	26
4.4:	Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü’ndeki manyetik-optik Kerr etkisi Sistemi.	26
4.5:	Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü’ndeki PPMS sistemi.	27
4.6:	Örneğin titreştirildiği VSM motoru ve manyetik akı değişimlerini ölçen VSM bobinleri.	28
4.7:	Üzerinden akım geçirilen (a) doğrusal tel etrafında, (b) bobinde merkezinde oluşturulan manyetik alan.	29
4.8:	Değişken manyetik alana maruz bırakılan bobinler. Değişken manyetik alan a) mıknatısla, b) üzerinden akım geçirilen tel ile oluşturulmuştur.	30
5.1:	Tez çalışmasında kullanılan Pt/[Ni/Pt/CoO] _x /Pt/SiO ₂ /Si (111) çok katlı ince filmlerin şematik gösterimleri ve nominal kalınlık değerleri. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin şematik gösterimi.	33
5.2:	Pt/[Ni/Pt/CoO] _x /Pt/SiO ₂ /Si (111) örnek sistemi ve tabakalara ait örgü parametreleri.	35
5.3:	Alttaşa ait x-ışını kırınımı ölçüm sonucu.	37
5.4:	Çok katlı ince filmlerin x-ışını kırınımı ölçüm sonuçları. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin x-ışını kırınımı ölçüm sonucu.	39
5.5:	Çok katlı ince filmler için L-MOKE ve P-MOKE ölçüm sonuçları. a) X=1, L-MOKE, b) X=1, P-MOKE, c) X=2, L MOKE, d) X=2, P-MOKE, e) X=3, L-MOKE, f) X=3, P MOKE, g) X=4, L-MOKE, h) X=4, P-MOKE ölçüm sonucu.	41
5.6:	Çok katlı ince filmler için oda sıcaklığı in-plane ve out-of-plane ölçüm sonuçları. a) X=1, in-plane, b) X=1, out-of-plane, c) X=2, in-plane, d) X=2, out-of-plane, e) X=3, in-plane, f) X=3, out-of-plane, g) X=4, in-plane, h) X=4, out-of-plane ölçüm sonucu.	43
5.7:	Pt/[Ni/Pt/CoO] _x /Pt/SiO ₂ /Si (111) çok katlı ince filmlere ait in plane ölçüm geometrisinde ölçülen düşük sıcaklık titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonuçları. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4	45

- örneğinin düşük sıcaklık titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonucu.
- 5.8: Çok katlı ince filmlerin 150 K'de ölçülen mıknatıslanma eğrileri. 46
a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonucu.
- 5.9: Çok katlı ince filmlere ait H_{C1} ve H_{C2} alan değerlerinin sıcaklığa bağlı 48
davranışı. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin zorlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı davranışı.
- 5.10: Çok katlı ince filmlere ait H_C (kırmızı), $-H_{EB}$ (siyah) değerlerinin 49
sıcaklığa bağlı değişimi. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin zorlayıcı alan ve kaydırma etkisi alan değerlerinin sıcaklığa bağlı davranışı.
- 5.11: Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmlere ait 50
 H_C (altıgen), $-H_{EB}$ (daire), T_B (kare) değerlerinin tekrar eden tabaka sayısına bağlı davranışı.

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: Çeşitli kristal yapılara ait d_{hkl} formülleri.	24
5.1: Ni filmlerin büyütme parametreleri.	34
5.2: CoO filmlerin büyütme parametreleri.	35

1. GİRİŞ

Daha az enerji harcayan, daha hızlı, daha fazla depolama alanına ve kalıcı hafızaya sahip ürünlerin geliştirilmesi için, bilgi depolama teknolojilerinde kullanılan malzemelerin fiziksel ve yapısal özellikleri çok büyük önem taşımaktadır. Özellikle manyetik sensörlerde, spin vanalarında, MRAM'lerde (manyetik rastgele erişimli hafıza) ve sabit disklerin okuyucu başlıklarında kullanılan malzemelerin yukarıda bahsedilen özelliklere sahip olması gerekmektedir [1]. Bu tür cihazların ortak noktası kendilerini oluşturan nano boyutlardaki tabakalar arası etkileşimlerdir. 1956 yılında W. H. Meiklejohn ve C. P. Bean tarafından ferromanyetik (FM) ve antiferromanyetik (AFM) malzemeler arası etkileşme incelenmiş ve yeni manyetik anizotropi adında bilimsel yayına dönüştürülmüştür [2]-[4]. Ancak bu etkinin teknolojik açıdan önemi o yıllarda bilinmediğinden 1978 yılına kadar bilim dünyasında fazla ilgi görmemiştir. 1978 yılında, Hemstead, Krongelb ve Thompson tarafından bu etkinin bilgi depolamak için kullanılması ile kaydırma etkisi dikkatleri üzerine çekmeyi başarmıştır [5]. Bilim adamlarının yeni ilgi alanı haline gelen kaydırma etkisi özellikle manyeto-direnç (MR) etkisinin teknolojik uygulamalarında sıkça kullanılmıştır.

Lord Kelvin tarafından 1857 yılında iletken manyetik bir malzemenin direncinin, uygulanacak dış bir alan ile değiştirilebileceği fikri ileri sürülmüştür. Bu fikre dayanarak manyeto-direnç özelliği 1991 yılında Dieny ve arkadaşları tarafından, ferromanyetik tabakaların çok ince ve manyetik olmayan (NM) bir tabaka ile ayrılması esasına dayanan spin-vana yapısını göstermesiyle teknolojide uygulama alanı bulmuştur [6]. 2007 yılında Nobel Fizik Ödülü alan bilim adamları A. Fert [7] ve P. Grünberg [8] tarafından keşfedilen ve teknolojiye aktarılan dev manyeto-direnç (GMR) [9]-[14] ve tünelleme manyeto-direnç (TMR) [14], [15] etkileri manyeto-direnç etkisinin en önemli örneklerindedir.

Kaydırma etkisinin bilgi depolama teknolojilerinde çok yoğun bir şekilde kullanılmasına rağmen, etkiyi oluşturan fiziksel sebepler tam olarak açıklanamamıştır [1], [16]-[18]. Kaydırma etkisinin tam olarak açıklanabilmesi için pek çok çalışma yapılmıştır [1], [16], [19], [20]. Meiklejohn-Bean modeli [2]-[4] başta olmak üzere rastgele ara yüzey modeli [21]-[26], AFM domen duvar modelleri

[27], FM/AFM dik mıknatıslanma modeli [28], değişmeyen ara yüzey modeli [29]-[31], domen durum modeli [32], [33], tanecik modeli [34] gibi çeşitli modeller öne sürülmüştür. Bu modellerin tek ortak özelliği olan ara yüzey değiş-tokuş etkileşmesi, farklı malzemeler ve örnek sistemleri kullanılarak yapılan çalışmalarda incelenmiştir [1], [27], [30], [31], [35]-[43].

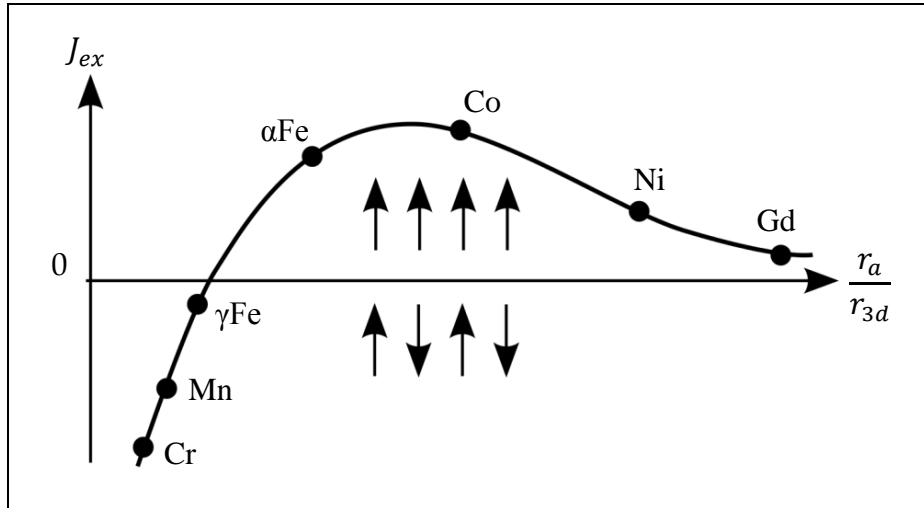
Bu tez çalışmasında, ferromanyetik Ni ile antiferromanyetik CoO arasına çok ince ($\sim 4 \text{ \AA}$) Pt tabakası büyütülerek, tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak kaydırma etkisi çalışılmıştır. Kullanılan örnek sistemi $[\text{FM}/\text{NM}/\text{AFM}]_x$; ($X=1, 2, 3$ ve 4) formunda ve çok katlı (multilayer) ince film yapısındadır. Belirlenen örnek sistemine bağlı kalarak, magnetron saçtırma tekniği ile dört adet ince film büyütülmüştür. Alttaş olarak yüzeyi doğal oksit (SiO_2), (111) yönelimli tek kristal (single crystalline) Si kullanılmıştır. Filmlerin atmosfer ortamında oksitlenmeden muhafaza edilebilmesi için film yüzeyleri vakum ortamından çıkmadan önce Pt tabakası ile kaplanmıştır.

$\text{Pt}/[\text{Ni}/\text{Pt}/\text{CoO}]_x/\text{Pt}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (111) çok katlı ince filmlerin yapısal özelliklerini belirlemek için x-ışını kırınımı, manyetik özelliklerinin belirlenmesi için manyetik-optik Kerr etkisi ve titreşimli örnek manyetometresi sistemleri kullanılmıştır.

Oda sıcaklığında yapılan MOKE ölçümleri ile film yüzeyine paralel (in-plane) ve dik (out-of-plane) manyetik alan (H) uygulanarak, mıknatıslanma eğrileri (M - H) alındı. MOKE ölçüm sonuçlarından filmlerin kolay mıknatıslanma eksenlerinin örnek düzleminde olduğu belirlendi. Kaydırma etkisinin sıcaklığa bağlı özelliklerinin belirlenmesi için VSM sistemi kullanıldı. Sıcaklığa bağlı kaydırma etkisi ölçümleri $300 - 150 \text{ K}$ aralığında gerçekleştirildi. Sıcaklığa bağlı VSM ölçüm sonuçlarından, bu tez çalışmasında kullanılan çok katlı ince filmler için kaydırma etkisinin gözlemlenmeye bağladığı sıcaklık değeri $X=1$, $X=2$ ve $X=3$ örnekleri için 270 K , $X=4$ örneği için 250 K olduğu belirlendi (CoO için Néel sıcaklığı (T_N) $\sim 291 \text{ K}$).

2. YAPISAL ve MANYETİK ÖZELLİKLER

Manyetik malzemeler, üzerlerine uygulanan dış manyetik alana karşı gösterdikleri tepkiye göre farklı sınıflara ayrılırlar. Uygulanan dış manyetik alan nedeniyle malzemenin manyetik momentlerinin uygulanan alan yönünde veya alana zıt yönde yönlenmesiyle malzemelerin manyetik düzeni değişmektedir. Ayrıca, bazı manyetik malzemeler kendiliğinden mıknatıslanma özelliğine sahiptir. Örneğin, ferromanyetik malzemeler dış manyetik alanın uygulanmadığı durumlarda da manyetik düzene sahiptir. Demir, nikel ve kobalt oda sıcaklığında ferromanyetik özellik gösteren elementlerdir. Ferromanyetizmanın oda sıcaklığında neden sadece bu üç metalde (Fe, Ni, Co) gözlemlendiği ise Bethe-Slater eğrisinin incelenmesiyle anlaşılabilir [44]. Şekil 2.1’de gösterilen Bethe-Slater eğrisinin yatay eksenini atom yarıçapı (r_a) ve 3d kabuğunun yarıçapı (r_{3d}) oranını, dikey eksenini ise değiş-tokuş integralinin (J_{ex}) değişimi ifade edilmektedir. Bethe-Slater eğrisi, değiş-tokuş integralinin atomlar arasındaki uzaklıkla (r_a/r_{3d} oranıyla) değişimini göstermektedir. Burada r_a atomun yarıçapı, r_{3d} ise 3d kabuğunun yarıçapını göstermektedir.



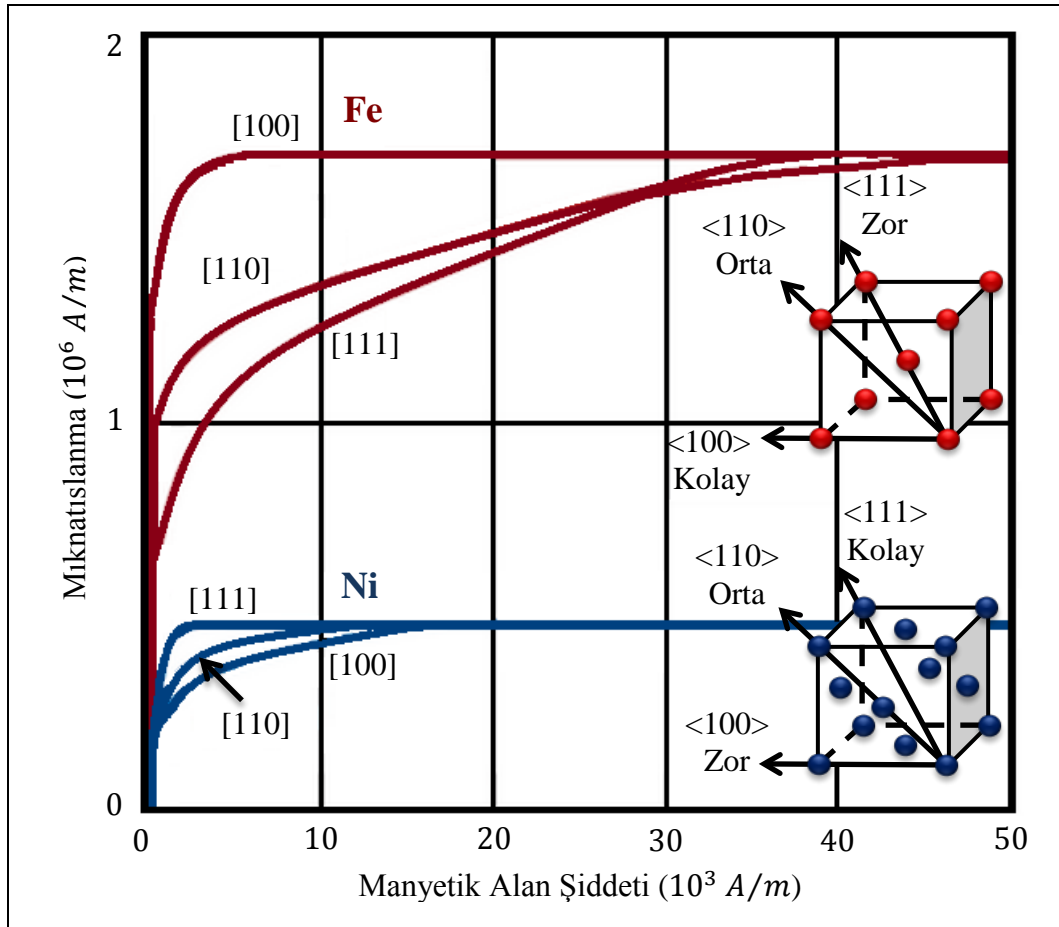
Şekil 2.1: Bethe-Slater eğrisi.

Katılarda atomların birbirine değdiği kabul edilmektedir. Bu nedenle iki atom merkezinin birbirine uzaklığı atom çapı ($2 r_a$ olarak) ifade edilir. Eğer aynı cins iki atomun 3d kabuklarının yarıçapı değişmeden birbirine yaklaştırılırsa, r_a/r_{3d} oranı azalır. Oran küçüldükçe ve 3d elektronları birbirine yaklaştırıldıkça

pozitif değiş-tokuş etkileşmesi gözlenir ve değiş-tokuş etkileşmesi giderek güçlü hale gelir ve sonra sifira gider. Ferromanyetizma olarak isimlendirilen bu durumda malzemenin manyetik momentleri birbirine paraleldir. Atomlar arası uzaklığı daha da küçültürsek negatif değiş-tokuş etkileşmesi gözlenir. Bu durum ise antiferromanyetizma olarak isimlendirilir. Bu durumda malzemenin manyetik momentleri birbirine antiparalel hale gelir [45].

Manyetizma, kristal yapı ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle kristal yapının iyi derecede bilinmesi manyetizma çalışmalarında kritik önem taşımaktadır.

Manyetik malzemeler için kolay mıknatıslanma eksenleri (easy magnetization axis) kristal yapıya bağlı olarak değişmektedir. Birim hücresi yüzey-merkezli kübik (face centered cubic, fcc) yapıda olan nikelin ve birim hücresi hacim-merkezli kübik (body centered cubic, bcc) yapıda olan demirin kristal yönelimine göre mıknatıslanma eksenleri (easy, medium, hard) Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



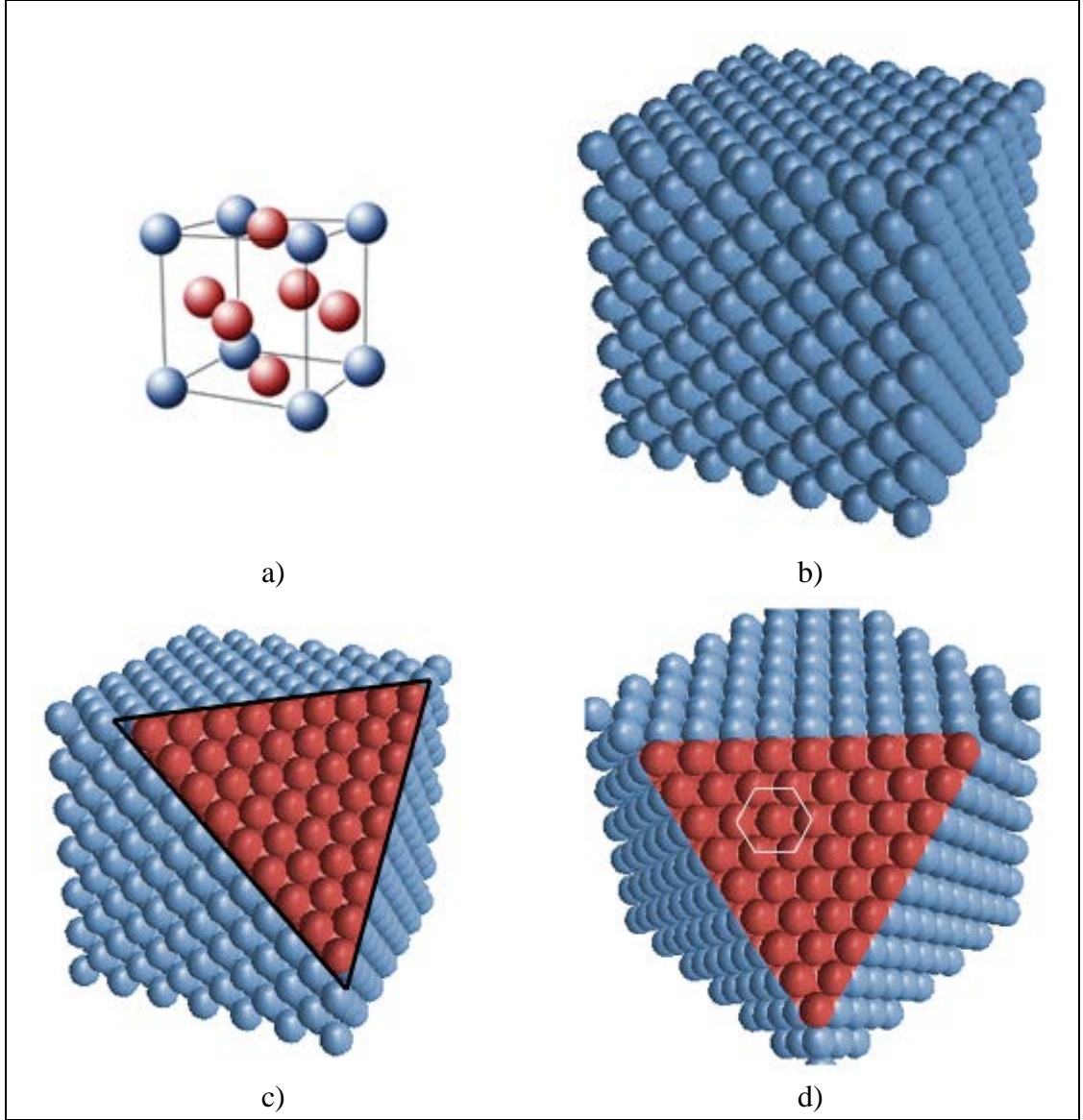
Şekil 2.2: Tek kristal demir (kırmızı) ve nikel (mavi) için mıknatıslanma eğrileri.

Yüzey-merkezli kübik yapıda olan manyetik malzemeler için kolay mıknatıslanma eksenini (easy magnetization axis) $\langle 111 \rangle$ yönünde iken, zor mıknatıslanma eksenini (hard magnetization axis) $\langle 100 \rangle$ yönündedir. $\langle 110 \rangle$ yönü, ne kolay ne de zor mıknatıslanma eksenini (medium magnetization axis) olarak ifade edilebilir, ancak bu eksen de $\langle 111 \rangle$ yönüne kıyasla zor mıknatıslanma eksenini olarak kabul edilebilir.

Hacim-merkezli kübik yapıda olan manyetik malzemeler ise kolay mıknatıslanma eksenini $\langle 100 \rangle$ yönünde iken, zor mıknatıslanma eksenini $\langle 111 \rangle$ yönündedir. $\langle 110 \rangle$ yönü, ne kolay ne de zor mıknatıslanma eksenini (medium magnetization axis) olarak ifade edilebilir, ancak bu eksen de $\langle 100 \rangle$ yönüne kıyasla zor mıknatıslanma eksenini olarak kabul edilebilir.

2.1. Nikel (Ni)

Nikel, yüzey-merkezli kübik kristal yapıya sahip bir geçiş metalidir. Nikelin kristal yapısı ve atomların birim hücredeki konumları Şekil 2.3'te gösterilmiştir [47]. Şekil 2.3.a)'da birim hücrenin yüzey merkezinde konumlanan atomlar kırmızı, köşelerinde konumlanan atomlar ise mavi renkte gösterilmiştir. Birim hücrenin köşelerinde konumlanan atomlar, sekiz komşu birim hücre tarafından paylaşılmaktadır. Yüzeydeki atomlar ise iki komşu birim hücre tarafından paylaşılmaktadır. Yüzey-merkezli kübik yapının bir birim hücresinde toplamda 4 atom bulunmaktadır. Bu nedenle, yüzey-merkezli kübik yapı sıkı paketli kübik (cubic close-packed, ccp) yapı olarak da ifade edilmektedir [48].

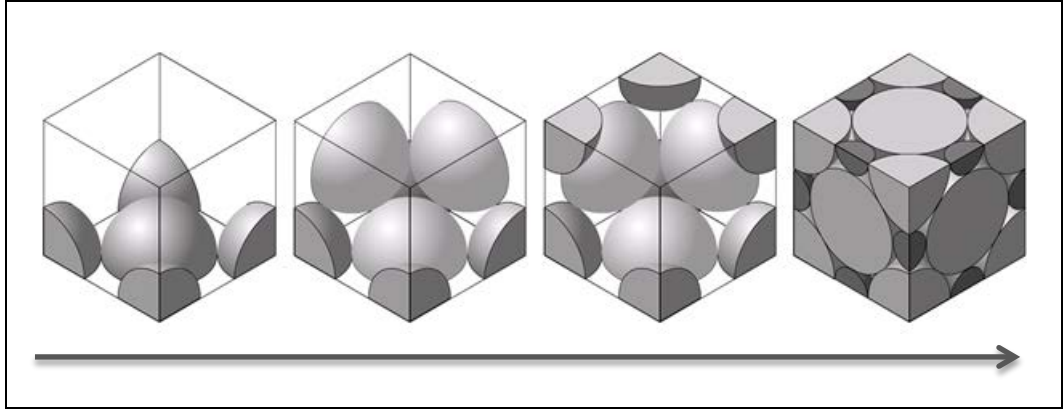


Şekil 2.3: Yüzey-merkezli kübik yapının şematik gösterimi. a) Yüzey-merkezli kübik yapının birim hücresi. b) Çok sayıda atomun bir araya gelmesiyle ortaya çıkan kristal yapı. c) Kristal yapının (111) düzleminde alınmış bir kesit, d) (111) düzlemindeki altıgen simetriye sahip atom dizilimi.

Ferromanyetik malzemeler için manyetik düzen sıcaklığı Curie sıcaklığı (T_C) olarak ifade edilmektedir. Oda sıcaklığında ferromanyetik manyetik düzene sahip olan nikelin Curie sıcaklığı ~ 631 K'dir. Manyetik düzen sıcaklığı üzerinde ferromanyetik malzemeler paramanyetik (PM) olmaktadır.

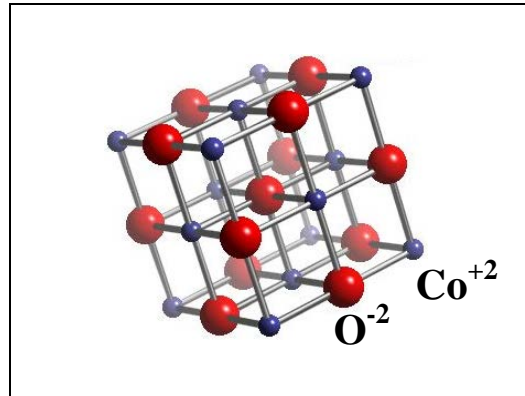
2.2. Kobalt Oksit (CoO)

Kobalt oksit, oda sıcaklığında sodyum klorür (NaCl) kristal yapısına sahiptir. Şekil 2.4'te gösterilen sodyum klorür (kaya tuzu) yapısının uzay örgüsü yüzey-merkezli kübik yapıdadır [49].



Şekil 2.4: Uzay örgüsü yüzey-merkezli kübik yapıda olan sodyum klorür yapısının şematik gösterimi. Atomların birim hücredeki konumları adım adım gösterilmiştir.

Şekil 2.5'te yüzey-merkezli kübik yapıdaki birim hücre gösterilmiştir [50]. Kobalt iyonlarından biri 000 'da konumlanırken, oksijen iyonlarından biri $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ 'de konumlanmaktadır [48].

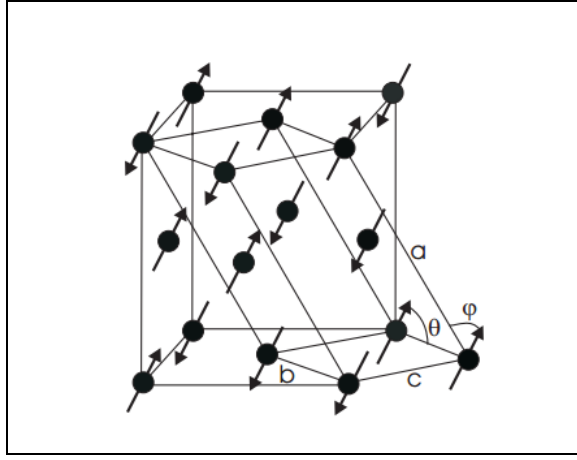


Şekil 2.5: Kobalt oksidin kristal yapısının şematik gösterimi.

Oda sıcaklığında paramanyetik olan kobalt oksit, manyetik düzen sıcaklığı altında antiferromanyetik düzene sahip olmaktadır. Antiferromanyetik malzemeler için manyetik düzen sıcaklığı Néel sıcaklığı (T_N) olarak ifade edilmektedir. Bu tez

çalışmasında antiferromanyetik malzeme olarak kullanılan kobalt oksit için Néel sıcaklığı ~ 291 K'dir.

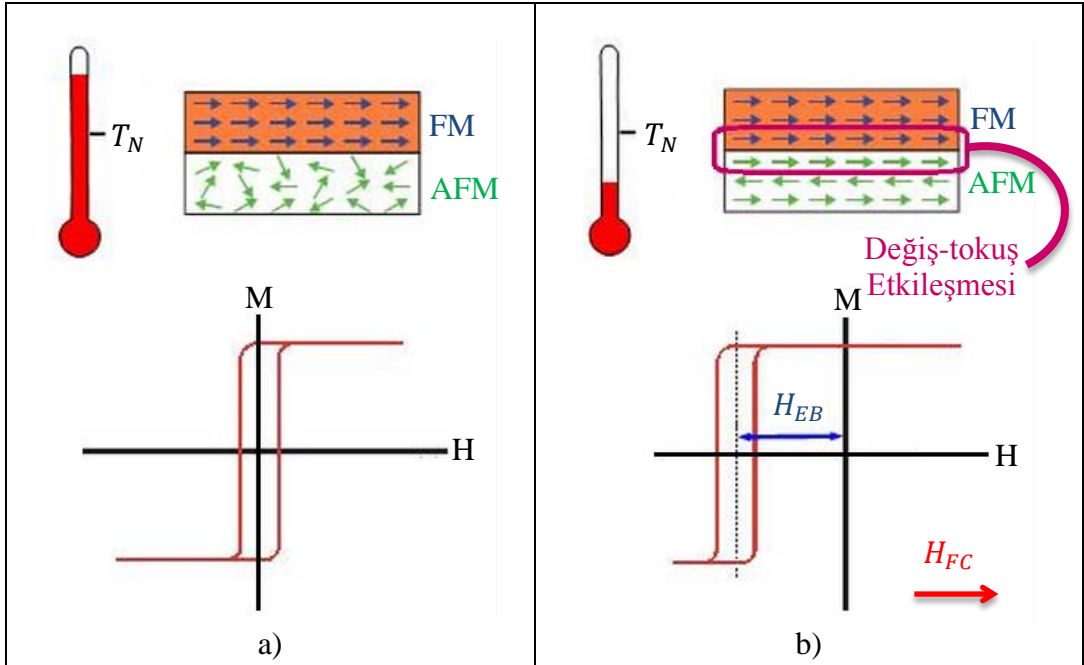
Paramanyetik düzende bulunan kobalt oksitin antiferromanyetik düzene geçişi, kobalt oksitin kristal yapısının bozulmasıyla ilişkilidir. Kristal yapıdaki deformasyon, küp kenarları boyunca geniş tetragonal bozulma ($c/a < 1$) ve $\langle 111 \rangle$ yönünde küçük deformasyon şeklinde kendini göstermektedir. Bu bozulmaların etkisiyle monoklinik simetri azalmaktadır. Kobalt oksitin monoklinik ve kübik birim hücresi arasındaki ilişki Şekil 2.6'da gösterilmiştir [51].



Şekil 2.6: Kobalt oksitin monoklinik ve kübik birim hücresi arasındaki ilişkinin şematik gösterimi.

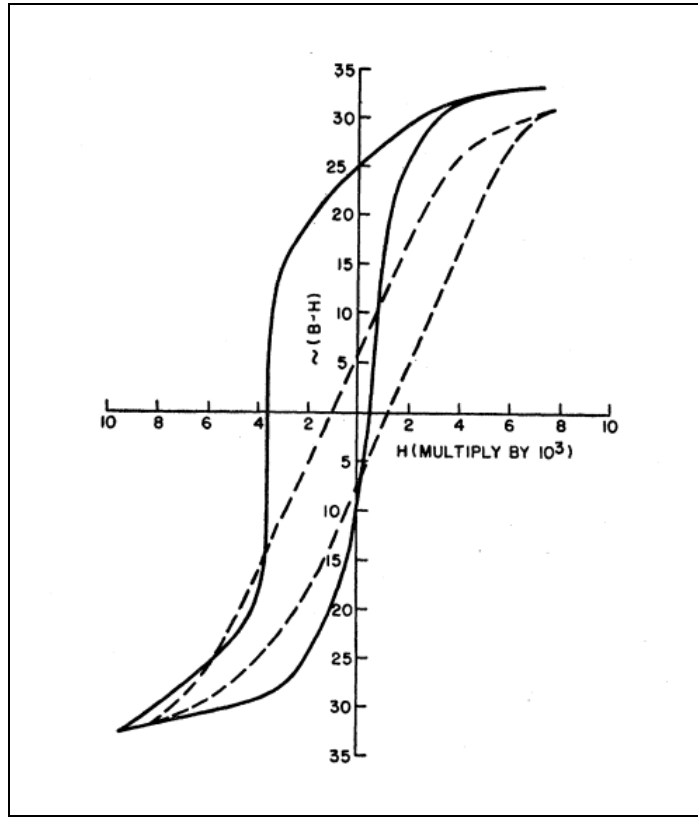
3. KAYDIRMA ETKİSİ

Curie sıcaklığı altında ferromanyetik düzene sahip bir malzeme ile Néel sıcaklığı altında antiferromanyetik düzene sahip bir malzeme birbirleri ile temas halindeyken, sistem Néel sıcaklığı üzerine ısıtılıp soğutma alanı uygulanarak Néel sıcaklığının altına kadar soğutulduğunda, ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi çoğunlukla uygulanan alana zıt yönde kayar. Tek yönlü anizotropi (unidirectional anisotropy) olarak da bilinen kaydırma etkisi, antiferromanyetik tabakanın manyetik momentlerinin (μ) ferromanyetik tabakanın manyetik momentlerini ara yüzeyde değiş-tokuş etkileşmesi yoluyla etkilemesi sonucunda meydana gelir. FM/AFM örnek sistemi için Néel sıcaklığı üzerinde ve altında ölçülen mıknatıslanma eğrileri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekil 3.1.a)’da Néel sıcaklığı üzerinde ölçülen, sol (H_{C1}) ve sağ (H_{C2}) zorlayıcı alan değerlerinin eşit olduğu mıknatıslanma eğrisi gösterilmiştir. Şekil 3.1.b)’de alan altında soğutma (field cooling, FC) sonrasında zorlayıcı alanların genişlediği ve eğrinin soğutma alanına zıt yönde kaydığı mıknatıslanma eğrisi gösterilmektedir [52].



Şekil 3.1: FM/AFM örnek sisteminde, a) Néel sıcaklığı üzerinde, b) Néel sıcaklığı altında ölçülen mıknatıslanma eğrileri.

İlk olarak 1956 yılında W. H. Meiklejohn ve C. P. Bean tarafından, yüzeyleri oksitlenmiş Co parçacıklarıyla çalışılırken, keşfedilen kaydırma etkisi tek yönlü anizotropi olarak isimlendirilmiştir. Şekil 3.2’de Meiklejohn ve Bean tarafından 77 K’de ölçülen mıknatıslanma eğrileri gösterilmektedir [2]. Kesikli çizgi ile gösterilen eğri soğutma alanı uygulanmadan (zero field cooling, ZFC) ölçülen mıknatıslanma eğrisini gösterirken, düz çizgi ile gösterilen eğri 10 kOe alan altında soğutulmuş ölçülen mıknatıslanma eğrisini göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi mıknatıslanmayı sıfır yapan zorlayıcı alan değerleri alan altında soğutmanın etkisiyle genişleyerek soğutma alanına zıt yönde kaymıştır.



Şekil 3.2: Yüzeyleri oksitlenmiş Co parçacıklarından oluşan sisteme ait, $T=77$ K’de FC (düz çizgi) ve ZFC (kesikli çizgi) ile ölçülen mıknatıslanma eğrileri.

Kaydırma etkisinin teorik açıklaması, W. H. Meiklejohn ve C. P. Bean tarafından, İdeal Meiklejohn-Bean modeli ile yapılmıştır [1], [2]. Bu model ile kaydırma etkisi alanı teorik olarak hesaplanmış, ancak ideal bir ara yüzey ile ilgili varsayımları Meiklejohn-Bean modelinin dezavantajı olmuştur [42], [53], [54]. Tek kristal yönelimli (single crystalline) iki tabakanın ara yüzeyinde bile pürüzlülükler olabilmektedir. Bu nedenle, pürüzlü bir ara yüzey için H_{EB}

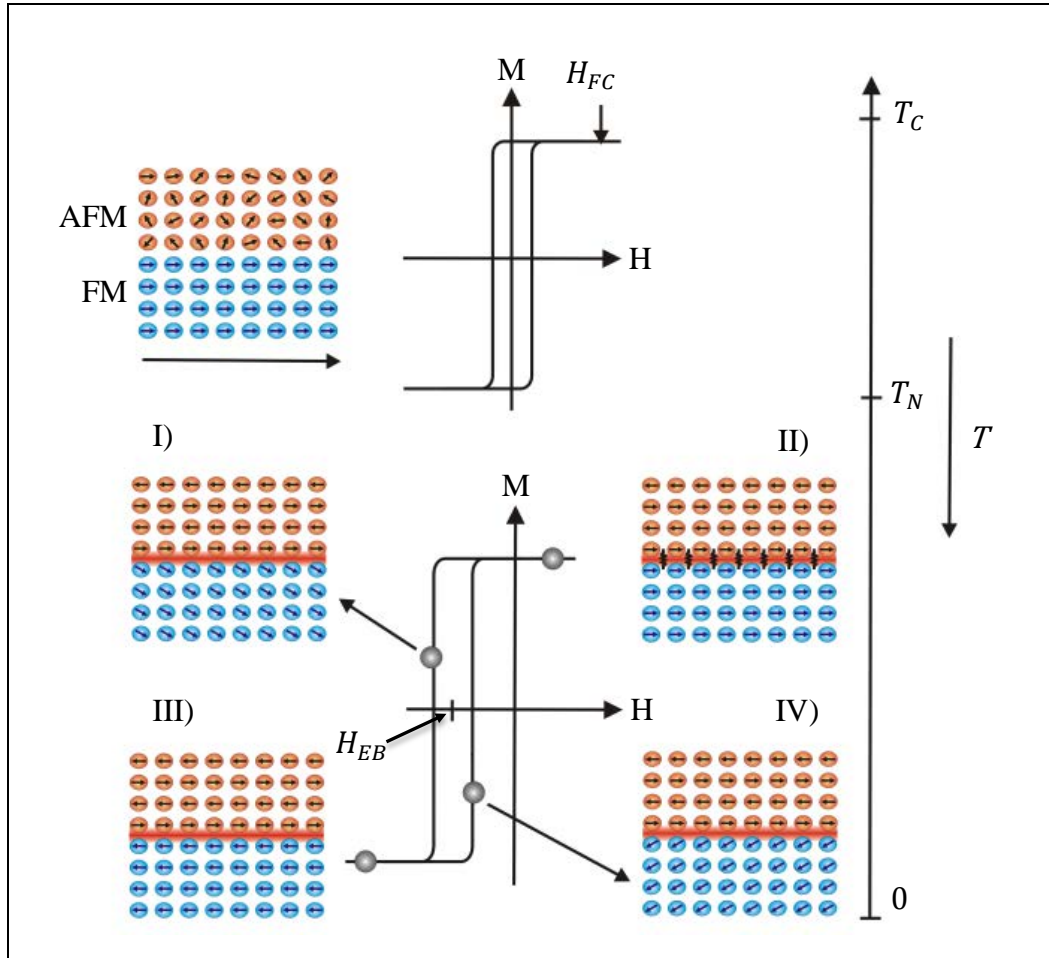
değerinin teorik hesaplamaları farklı teorik modellerin geliştirilmesiyle yapılmıştır [20]-[24], [26]-[34]. Ancak, bu teorik modellerin hiçbiri kaydırma etkisi özelliklerini farklı sistemler için tam olarak açıklayamamaktadır. Bunun başlıca nedeni, kaydırma etkisinin tabakalar arası ara yüzey değiş-tokuş etkileşmesinden kaynaklanmasıdır. Tabakalar arasındaki pürüzlülük oranının değişmesi veya sıcaklığa bağlı olarak yapısal değişikliklerin meydana gelmesi kaydırma etkisini büyük oranda etkilemektedir. Kaydırma etkisinin teknolojik uygulamaları üzerine ve temel çalışma prensiplerini açıklamak için pek çok kapsamlı çalışma yapılmıştır [1], [20], [42], [55]-[64].

Kaydırma etkisi çekirdek-kabuk nano parçacıklar [54], [65]-[67] ile keşfedilmiş olmasına rağmen günümüzde pek çok farklı sistemlerde gözlenmektedir. Tek kristal ince filmlerde [68], [69] ve nano parçacıklarda [70], [76], FM/AFM ara yüzeye sahip olmayan; FM/spin glass [77], FM/ferromanyetik (FI) [41], zayıf FM/sert FM [78], FI/AFM [79], FI/FI [56], [80] ince filmlerde, AFM/seyreltilmiş manyetik yarıiletken (DMS) [81], [82] sistemlerde de gözlenmiştir. Ayrıca FM/AFM çok katmanlı filmler de son yıllarda ilgi çekici hale gelmiştir [6], [18], [38], [83], [84].

3.1. İdeal Kaydırma Etkisi Modeli

Curie sıcaklığının Néel sıcaklığından büyük ($T_C > T_N$) olduğu sistemlerde kaydırma etkisi ölçümleri yapılırken, FM/AFM sistemi antiferromanyetik malzemeye ait Néel sıcaklık değeri üzerinden hedef sıcaklığa alan altında soğutulur. Hedef sıcaklık değerinde bir mıknatıslanma eğrisi ölçülür. Bu işlem esnada antiferromanyetik malzemenin kendi manyetik düzeninde olması nedeniyle ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri, antiferromanyetik tabakanın manyetik momentleri tarafından kontrol edilir. Şekil 3.3'de, alan altında soğutma işlemi sonrasında ve öncesinde ölçülen mıknatıslanma eğrileri gösterilmektedir [18]. Ferromanyetik tabakanın manyetik momentlerinin kendi manyetik düzeninde, antiferromanyetik tabakanın manyetik momentlerinin ise düzensiz olduğu mıknatıslanma eğrisinde AFM/FM ara yüzeyinde kaydırma etkisi gözlenmemektedir. Bu nedenle Néel sıcaklığı üzerinde ölçülen mıknatıslanma eğrisinin zorlayıcı alan değerleri eşittir. Néel sıcaklığı altında ölçülen ikinci

mıknatıslanma eğrisinde AFM/FM ara yüzeyinde kaydırma etkisinin gözlenmesi nedeniyle zorlayıcı alan değerleri farklılaşmıştır.



Şekil 3.3: FC ile ölçülen mıknatıslanma eğrisinin farklı evrelerindeki ferromanyetik ve antiferromanyetik tabakalara ait manyetik spin konfigürasyonları.

Alan altında soğutma işlemi sonrasında ölçülen mıknatıslanma eğrisinin x-ekseni boyunca manyetik alan taraması esnasında tabakaların manyetik spin konfigürasyonları aşağıda adım adım ifade edilmiştir.

- Adım I:

Sistemin Néel sıcaklığı altına soğutulmasının ardından, ferromanyetik ve antiferromanyetik tabakalarının manyetik momentleri kendi manyetik düzenlerinde dizilirler. AFM/FM ara yüzeyinde kaydırma etkisi gözlenmekte ve zorlayıcı alan değerleri farklılaşmaktadır. Manyetik alan taramasının pozitif yönde yapıldığı bu

durumunda, ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri uygulanan alan yönünde yönelmiştir.

- Adım II:

Manyetik alan taramasının ters yönde yapıldığı bu durumda, ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri uygulanan alan yönünde dönmeye başlar. Bu esnada, AFM/FM ara yüzeyindeki kaydırma etkisi ferromanyetik tabakanın momentlerini uygulanan alana ters yönde tutmaya çalışır.

- Adım III:

Ters yönde yeterince büyük bir alanın uygulanmasıyla ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri uygulanan alan yönünde döner ve ferromanyetik tabaka negatif yönde doyuma ulaşır. Ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri uygulanan alana ters yönelmiştir.

- Adım IV:

Miknatislanma eğrisinin tamamlanabilmesi için alan tekrar pozitif yönde ve malzeme doyuma ulaşınca dek uygulanır. Uygulanan alanın yön değiştirmesiyle birlikte ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri ilk durumlarına dönmeye başlar. Ferromanyetik tabakanın manyetik momentlerinin bu durumuna gelebilmesi için, c) duruma göre daha az enerji harcanır.

Değiş-tokuş etkileşmesinin, tabakaların ara yüzeydeki manyetik momentler arasında olmasından dolayı tabakalar arası pürüzlülük son derece büyük önem taşımaktadır. İdeal sistemlerde bu durum ihmal edilse de deneysel çalışmalarda özellikle çok katlı ince filmlerde çok sayıda tabakalar arası ara yüzey olmasından dolayı pürüzlük faktörü değiş-tokuş etkileşmesini büyük ölçüde etkilemektedir. Değiş-tokuş etkileşmesinin meydana gelebilmesi için FM/AFM ara yüzeylerinde tabakalara ait spinlerin kendi manyetik yapılarına uygun spin düzenlerinde bulunmaları gerekmektedir. Bu manyetik düzeni ise sıcaklık ile kontrol etmek mümkündür. Aşağıda FM/AFM sistemleri için temel sıcaklık kavramları açıklanmıştır.

- Sistem Sıcaklığının $T_C > T > T_N$ Olduğu Durum

T sıcaklığında, antiferromanyetik malzeme paramanyetik durumda iken ferromanyetik malzeme çoklu domen durumdadır. Bu sıcaklık değerinde tabakalar arasında değiş-tokuş etkileşmesi gerçekleşmez. Bu nedenle ölçülen mıknatıslanma eğrisi ferromanyetik tabakaya ait herhangi bir etkileşmenin olmadığı mıknatıslanma eğrisidir ve orijine göre simetrik durumdadır.

- Sistem Sıcaklığının $T_C > T_N > T$ Olduğu Durum

FM/AFM sistem sıcaklığı antiferromanyetik spin düzenine geçiş sıcaklığı olan Néel sıcaklığı altına olduğu durumda tabakalar arası değiş-tokuş etkileşmesi meydana gelir. Aynı zamanda sistem Néel sıcaklık değeri altına soğutulurken soğutma alanı uygulanırsa, çoklu domen durumunda bulunan ferromanyetik tabakası tekli domen durumuna geçer. Böylece tabakalar arası etkileşme başlar ve T sıcaklık değerinde alınan mıknatıslanma eğrisi, orijine göre asimetric duruma gelir. Bu asimetri genellikle mıknatıslanma eğrisinin uygulanan soğutma alanına zıt yönde kaymasıyla meydana gelmektedir.

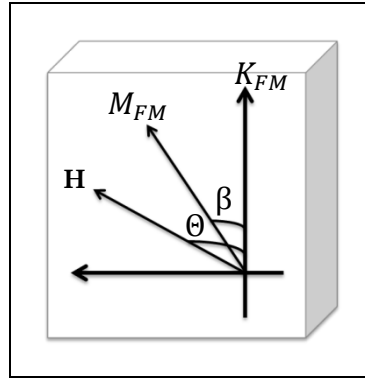
3.2. İdeal Meiklejohn-Bean Modeli

İdeal Meiklejohn-Bean modeli, ferromanyetik ile antiferromanyetik tabakaların birbirleriyle etkileşim halindeyken alanda soğutma işlemi sonrasında her iki tabakanın manyetik momentlerinin birbirleriyle etkileşmesi esasına dayanmaktadır [1], [2]. Ortaya çıkan yeni mıknatıslanma eğrisinin alanını hesaplamak için geliştirilen İdeal Meiklejohn-Bean modeli aşağıdaki şartları göz önünde bulundurmaktadır:

- FM tabakanın manyetik momentleri bir bütün olarak hareket eder.
- FM ve AFM tabakaları tek domen durumundadır.
- AFM/FM ara yüzeyi pürüzsüzdür.
- Uygulanan soğutma alanından sadece FM tabakanın manyetik momentleri etkilenerek alan doğrultusunda yönelirken AFM tabakanın manyetik momentleri bu alandan etkilenmeyip hareketsiz kalır.

- AFM tabakanın ara yüzeyinde yer alan manyetik momentlerin tam olarak eşleşmemiş (uncompensated) durumda olması nedeniyle AFM tabaka net bir manyetik momente sahiptir.
- FM ve AFM tabakalar, ara yüzeylerinde meydana gelen değiş-tokuş etkileşmesiyle etkileşir.
- AFM tabaka örnek düzleminde (in-plane magnetic anisotropy) tek eksenli (uniaxial magnetic anisotropy) manyetik anizotropiye sahiptir.

İdeal Meiklejohn-Bean modelindeki açı ve vektörler Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir. K_{FM} , ferromanyetik malzemeye ait anizotropi sabitidir. M_{FM} , ferromanyetik malzemeye ait mıknatıslanma değeridir. β ; K_{FM} ile M_{FM} arasındaki açı, Θ ; K_{FM} ile \mathbf{H} arasındaki açıdır [18].



Şekil 3.4: İdeal Meiklejohn-Bean modelindeki açı ve vektörlerin şematik gösterimi.

İdeal Meiklejohn-Bean modeline göre, antiferromanyetik tabakanın manyetik momentlerinin soğutma alanından etkilenmediği göz önüne alınmıştır. Böylece birim alana düşen toplam enerji miktarı denklem (3.1)'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$E = -\mu_0 H M_{FM} t_{FM} \cos(-\beta) + K_{FM} t_{FM} \sin^2(\beta) - J_{EB} \cos \beta \quad (3.1)$$

Burada, t_{FM} ferromanyetik malzemenin kalınlığı, J_{EB} birim alan başına düşen değiş-tokuş etkileşmesi enerjisi değeridir. Denklem (3.1)'in çözülmesiyle mıknatıslanmanın sıfır olduğu sol ve sağ zorlayıcı alanlara ait aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$H_{C1} = -\frac{2K_{FM}t_{FM} + J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (3.2)$$

$$H_{C2} = -\frac{2K_{FM}t_{FM} - J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (3.3)$$

Denklem (3.2) ve denklem (3.3) kullanılarak, zorlayıcı alan (H_C) ve mıknatıslanma eğrisinin kayma miktarı H_{EB} elde edilir.

$$H_C = \frac{|-H_{C1} + H_{C2}|}{2} \quad (3.4)$$

$$H_{EB} = \frac{H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (3.5)$$

Denklem (3.4) ve denklem (3.5)'teki ifadeler denklem (3.2) ve denklem (3.3)'te yerine yazılırsa:

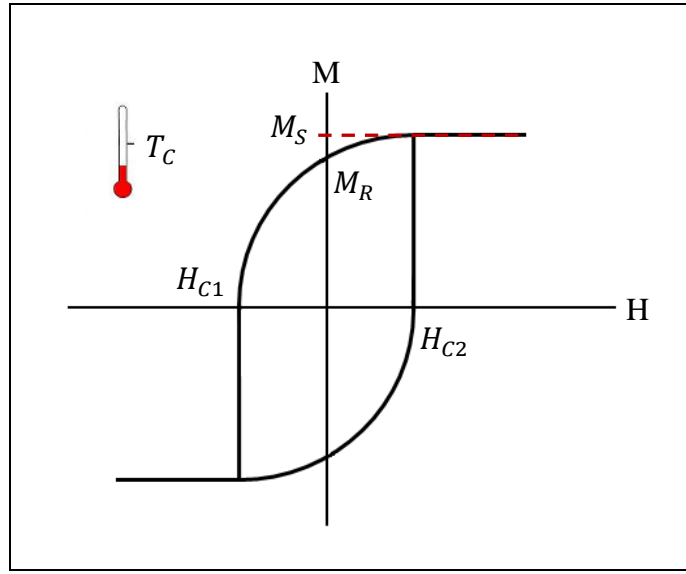
$$H_C = \frac{2K_{FM}}{\mu_0 M_{FM}} \quad (3.6)$$

$$H_{EB} = \frac{-J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (3.7)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (3.6) ve denklem (3.7), ideal bir sisteme ait mıknatıslanma eğrisinin zorlayıcı alan ve kaydırma etkisi alan değerleridir. Denklem (3.6) incelendiğinde ferromanyetik malzemeye ait mıknatıslanma eğrisinin ferromanyetik malzemenin manyetik anizotropisine ve mıknatıslanma değerine bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra denklem (3.7)'de kaydırma etkisinin ferromanyetik malzemenin kalınlığı ve mıknatıslanmasıyla ters orantılı olduğu, J_{EB} ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

3.3. Zorlayıcı Alanlar

Mıknatıslanmasının sıfırlandığı manyetik alan değerleri zorlayıcı ya da sıfırlayıcı alan (coercive field) değerleri olarak tanımlanır. Zorlayıcı alan değerleri sıcaklığın azalmasına bağlı olarak genellikle artış göstermektedir. Şekil 3.5'te ferromanyetik bir malzemeye ait mıknatıslanma eğrisi üzerinde zorlayıcı alan değerleri, malzemenin doyum (M_S) ve kalıcı (M_R) mıknatıslanma değerleri gösterilmiştir.

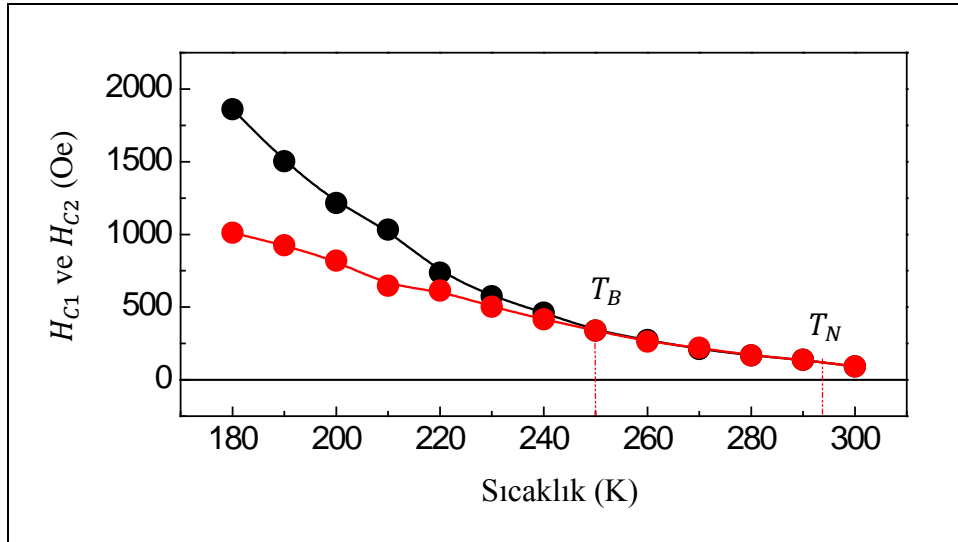


Şekil 3.5: Ferromanyetik malzemeler için mıknatıslanma eğrisi.

Ferromanyetik ve antiferromanyetik tabakalardan oluşan bir sistemde, Néel sıcaklığının üzerinde alınan mıknatıslanma eğrisinin zorlayıcı alan değerleri birbirlerine eşittir. Ancak alan altında soğutma işlemi yapılarak Néel sıcaklığından daha düşük sıcaklık değerlerine inildiğinde zorlayıcı alan değerleri artar ve mıknatıslanma eğrisi genellikle uygulanan soğutma alanına zıt yönde kayar. H_{C1} ve H_{C2} zorlayıcı alan değerlerine göre, mıknatıslanma eğrisinin kayma miktarı H_{EB} ve toplam zorlayıcı alan değerleri H_C , denklem (3.4) ve denklem (3.5)'de verilen formüllere göre hesaplanır.

3.4. Engelleme Sıcaklığı

Kaydırma etkisi ince filmlerde antiferromanyetik tabakasının hacimsel (bulk) yapıda olmamasından kaynaklı olarak veya içerisinde farklı fazların bulunmasından dolayı Néel sıcaklığından daha düşük sıcaklık değerlerinde gözlemlenmektedir [35], [37], [38], [85]. Kaydırma etkisinin gözlenmeye başladığı bu sıcaklık değeri engelleme sıcaklığı (blocking temperature, T_B) olarak tanımlanır. Şekil 3.6’da, bulk yapıdaki Néel sıcaklık değeri 291 K olan antiferromanyetik CoO tabakası ile ferromanyetik bir tabakadan oluşan sisteme ait zorlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği gösterilmektedir. Sisteme ait Néel sıcaklığı ve engelleme sıcaklığı grafik üzerinde gösterilmiştir.

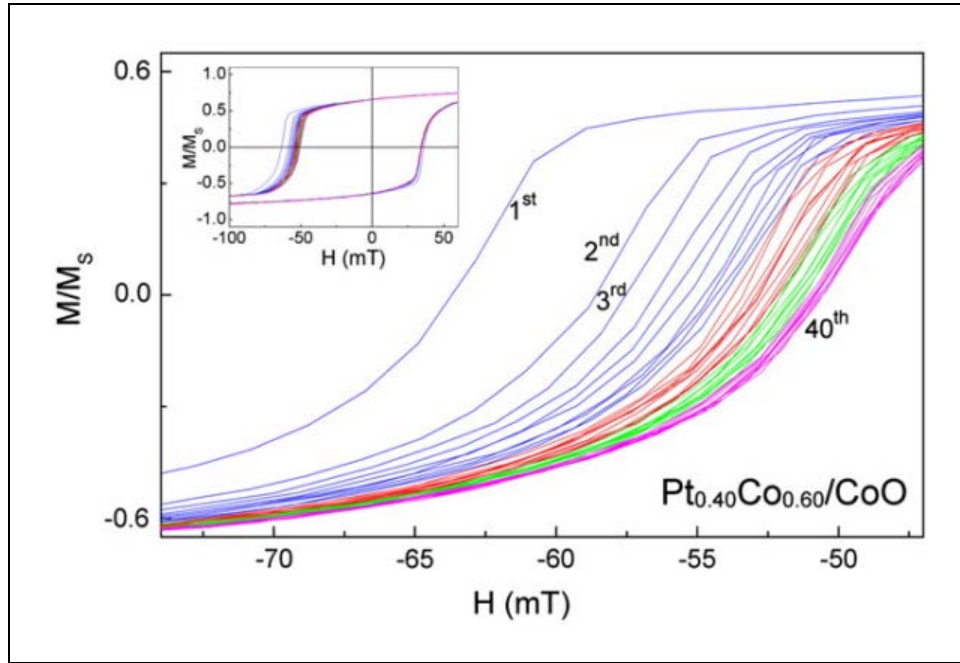


Şekil 3.6: Zorlayıcı alanların sıcaklığa bağlı değişimi.

Sistem yüksek sıcaklıklardan Néel sıcaklığına soğutulurken, antiferromanyetik tabakanın kendi spin düzeninde olmaması nedeniyle tabakalar arasında herhangi bir etkileşme gerçekleşmemekte ve bu nedenle kaydırma etkisi gözlenmemektedir. Sistem sıcaklığının Néel sıcaklığı civarında olduğu durumda kaydırma etkisi gözlemlenmemesi antiferromanyetik tabakanın tam olarak manyetik düzene girmediğinin önemli bir göstergesidir. Antiferromanyetik tabaka, engellenme sıcaklığı altında manyetik düzenine girmekte ve bu sıcaklık değerinde kaydırma etkisi ortaya çıkmaktadır.

3.5. Talim Etkisi

Kaydırma etkisi ölçümlerinde, Néel sıcaklığı üzerine çıkılmaksızın ardışık mıknatıslanma ölçümleri yapıldığında mıknatıslanma eğrisinin zorlayıcı alan değerlerinde ciddi bir değişim meydana gelmektedir. Mıknatıslanma eğrisinin şeklinde meydana gelen değişiklikler Şekil 3.7’de gösterilmiştir [36]. Néel sıcaklığı üzerine çıkmadan yapılan çok sayıda ardışık ölçüm sonrasında, sağ ve sol zorlayıcı alan değerleri ilk durumlarına kıyasla azalır. Kaydırma etkisi alan değerinin küçülmesine sebep olan bu durum talim etkisi (training effect) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.7: Talim etkisinin çalışıldığı, Pt_{0.40}Co_{0.60}/CoO örneği için sol zorlayıcı alan değerlerinin ardışık olarak yapılan mıknatıslanma ölçümüne bağlı değişimi. Talim etkisinin gözlemlendiği, 10 K’de ardışık olarak ölçülen mıknatıslanma eğrileri grafiğin sol üst köşesinde verilmiştir.

Şekil 3.7’de, ferromanyetik Pt_{0.40}Co_{0.60}/CoO ve antiferromanyetik CoO malzemelerinden oluşan FM/AFM sisteminin, 2 kOe alan altında 10 K’de soğutulduktan sonra ölçülen mıknatıslanma eğrileri gösterilmektedir. İlk mıknatıslanma ölçümüne ait olan mıknatıslanma eğrisinde (1st) kaydırma etkisi belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Néel sıcaklığı üzerine çıkmadan yapılan ikinci mıknatıslanma ölçümünde (2nd) zorlayıcı alan değeri ve buna bağlı

olarak kaydırma etkisi alanı ilk duruma göre önemli ölçüde azalmaktadır. Aynı sıcaklıkta ardışık ölçümler (3rd ... 40th) alınmaya devam edildiği takdirde kaydırma etkisi alanı ilk ölçüm değerinden daha düşük ölçülebilecektir.

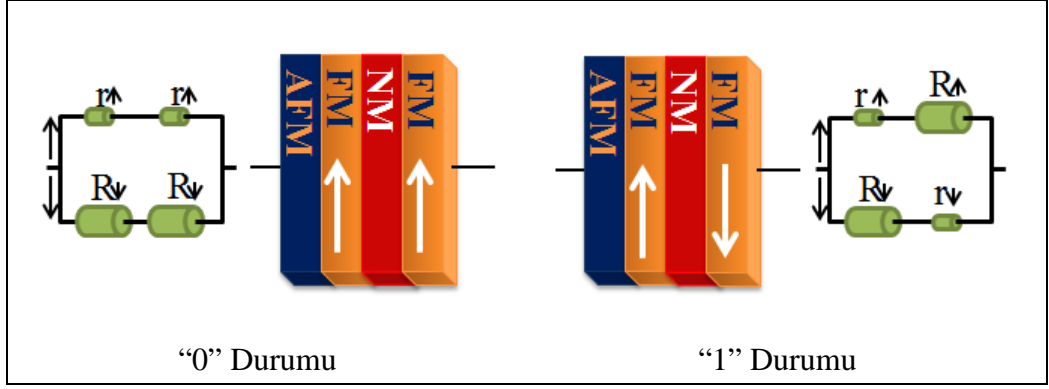
3.6. Kaydırma Etkisinin Teknolojik Uygulamaları

Kaydırma etkisi bilgi depolama ve kayıt cihazlarında, manyetik sensörlerde, spin vanalarında, sabit disk okuyucu başlıklarında ve MRAM'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır [86]. Manyeto-direnç etkisinin kullanıldığı spin vanası FM/NM/FM/AFM yapısındadır. Antiferromanyetik tabaka (pinning layer), kendisiyle temas halindeki ferromanyetik (pinned layer) tabakanın mıknatıslanmasını sabit tutmak için büyütülür. Diğer ferromanyetik tabakanın (free layer) mıknatıslanması ise serbesttir. Şekil 3.8'de gösterildiği gibi ferromanyetik tabakalar arasında manyetik olmayan bir malzeme kullanıldığında spin vanası, iletken bir malzeme kullanıldığında GMR yapısı, yalıtkan bir malzeme kullanıldığında ise TMR yapısı oluşmaktadır.



Şekil 3.8: Spin vanası, GMR ve TMR yapılarının temsili gösterimleri.

Manyeto-direnç özelliği Şekil 3.9'da gösterildiği gibi ferromanyetik tabakaların mıknatıslanmalarının birbirlerine paralel veya antiparalel olması durumuna göre değişmektedir. Ferromanyetik tabakaların mıknatıslanmaları birbirlerine paralel ise iki tabaka arasında ölçülen elektriksel direnç azalır ("0" durumu), anti paralel ise sistemin elektriksel direnci artar ("1" durumu) ve sistem üzerinden geçirilecek akım sıfıra yakın olur.



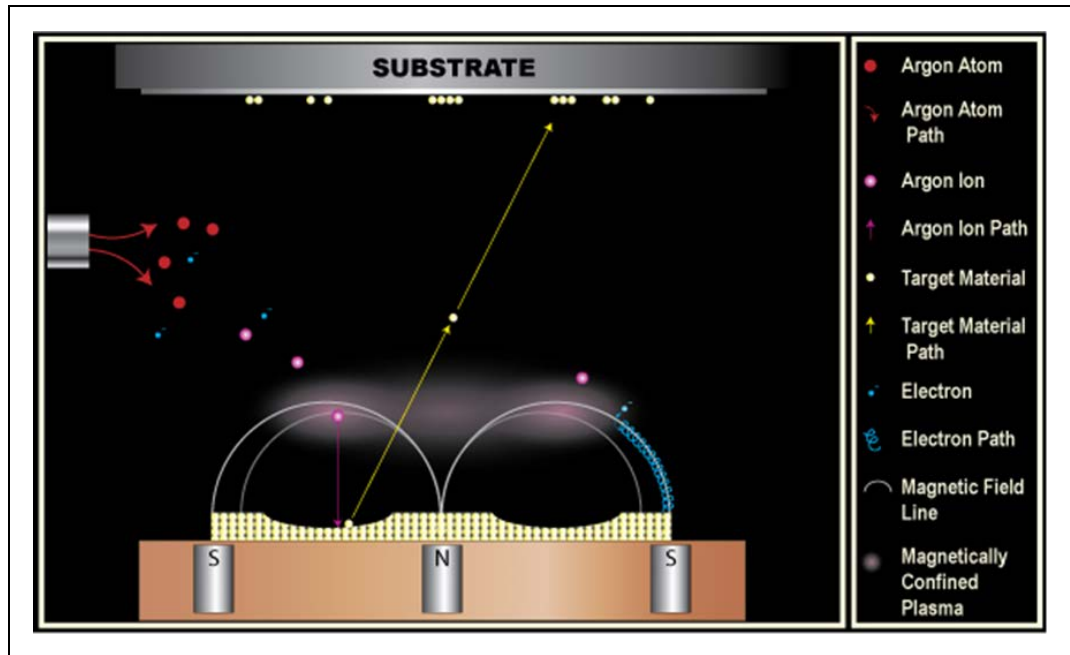
Şekil 3.9: Spin vanalarında düşük "0" ve yüksek "1" direnç durumu.

4. DENEYSEL TEKNİKLER

4.1. Magnetron Saçtırma Tekniği

Saçtırma tekniği ile kaplama, ilk kez 1852 yılında Grove tarafından doğru akım (dc) gaz deşarj (glow discharge) tüpü ile yapılmıştır. O zamanlarda, saçtırma tekniği, katodun bozulmasına sebep olduğu için istenilmeyen bir teknikti. Ancak günümüzde saçtırma tekniği yüzey temizleme, yüzey aşındırma, ince film büyütme ve yüzey analizi gibi kullanım alanlarına sahiptir. Bunlara ek olarak optik özelliklerinden dolayı yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda, girişim filtrelerinde, optik disklerde, türbin bıçakları ve kesici takımlar gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır [87].

Magnetron saçtırma (magnetron sputtering) tekniği, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi [88] hedef malzeme (target) yüzeyinin (genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile) hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilip, atomların yüzeyden sıçratılarak buhar fazına geçirilmesiyle alttaş üzerine biriktirilmesi esasına dayanır [89] ki tekniğin ismi de buradan gelmektedir.



Şekil 4.1: Magnetron saçtırma tekniğinin temsili gösterimi.

Magnetron saçtırma tekniği ile kaplama vakuma alınmış bir hazne içerisinde gerçekleştirilir. Haznenin basıncı sistemden sisteme değişmektedir, ancak kaplamanın yapıldığı basınç değeri $\sim 10^{-8}$ mbar seviyesindedir. Sisteme Ar gazı verildiğinde ise bu değer $\sim 10^{-3}$ mbar (ultra high vacuum) seviyesine kadar çıkar. Ar yerine yüksek saflıkta bir başka soygaz da (Ne, He, Kr, Xe gibi) kullanılabilir. Sistem istenilen basınç değerine getirildiğinde, hedef malzemeye (katot) dc veya radyo frekans (rf) gerilim uygulanır. Uygulanan gerilim altında katottan anoda doğru hızlandırılan elektronlar, Ar atomlarıyla çarpışarak Ar atomlarının iyonize olmasına neden olurlar. Bu şekilde plazma başlatılmış olur. Ar atomlarının iyonize olması için gereken enerji 15.7 eV'dir. İyonize olan Ar atomlarından ayrılan elektronlar ikincil elektronlar olarak tanımlanmaktadır. İkincil elektronlar, elektrik alana dik uzanan manyetik alan tarafından hedef malzemeye yakın bölgelerde tutulurlar. Bu şekilde plazmanın daha çabuk tutması ve daha verimli olması sağlanır.

Bu kaplama tekniğinde magnetron kullanılmasıyla, ortamda bulunan elektronların alttaş yüzeyine çarparak kontrolsüz bir şekilde ısıl işlem gerçekleştirmeleri engellenir ve plazmanın düşük ısı sığasına sahip olması sağlanır. Bu şekilde kaplama yapılan örneklerin bozulması engellenir. Kaplama homojenliği, kaplamalarda yüzey pürüzlülüğünün düşük tutulabilmesi, hedef malzeme çeşitliliği, alışı oluşturabilme imkânı, adhezyon ve yüksek hızda kaplama yapılabilmesi magnetron saçtırma tekniğinin diğer avantajları arasında sayılabilir.

4.2. X-Işıını Kırınımı Tekniği

X-ışını kırınımı tekniği, atmosfer ortamında numuneye zarar vermeden ölçüm yapabilme imkânı sağlayan, filmlerin kristal yapısının (amorf, single crystalline, polycrystalline), kristal yönelimlerinin (Miller indisleri) ve kristal kusurlarının belirlenmesinde kullanılan bir tekniktir. X-ışını kırınımı ölçüm metodunun temeli denklem (4.1)'de verilen Bragg formülüne dayanmaktadır [48]. Burada d düzlemler arası mesafe (d_{hkl}), θ x-ışınının örneğe geliş açısı, λ x-ışınının dalga boyudur.

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (4.1)$$

X-ışını kırınımı yöntemiyle örneğin örgü (lattice) parametreleri ve kristal yönelimleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Kristal yönelimlerin belirlenebilmesi için sırasıyla;

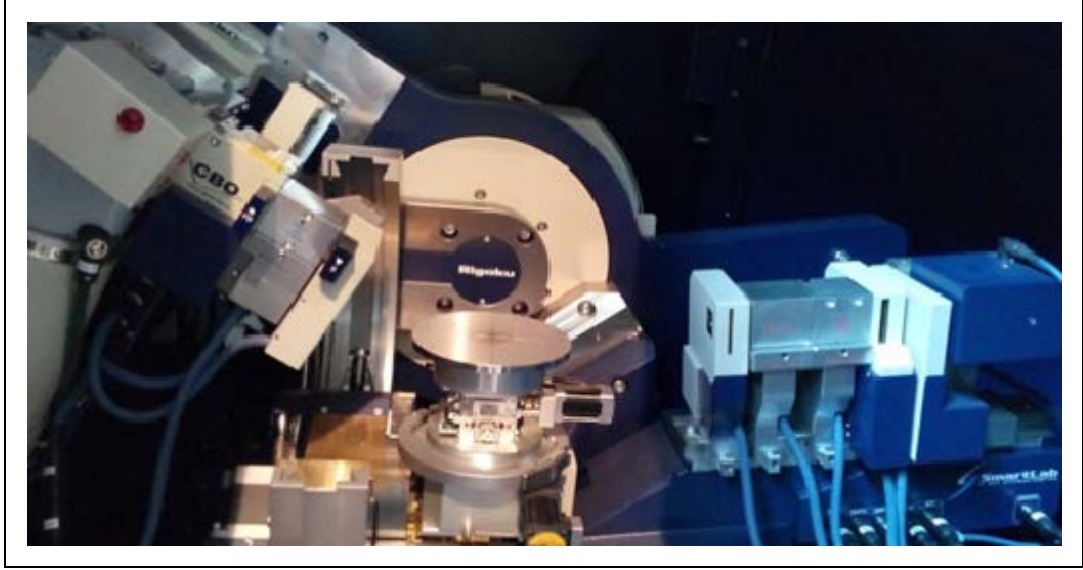
- pikin gözleendiği 2θ açısı belirlenir ve θ açısı hesaplanır,
- θ açısı radyana çevrilir ve $\sin \theta$ değeri hesaplanır,
- Denklem (4.1)'de, $n = 1$, λ ve hesaplanan $\sin \theta$ değeri yerine yazılarak d_{hkl} değeri hesaplanır,
- ilgili kristal yapının d_{hkl} formülü kullanılarak, Miller indisleri (h, k, l) bulunur ve kristal yönelimi belirlenir.

Kristal yapılara ait d_{hkl} formülleri Tablo 4.1'de verilmiştir [48].

Tablo 4.1: Çeşitli kristal yapılara ait d_{hkl} formülleri.

Kübik	$\frac{1}{d^2_{hkl}} = [h^2 + k^2 + l^2] \frac{1}{a^2}$
Tetragonal	$\frac{1}{d^2_{hkl}} = [h^2 + k^2 + l^2 \left(\frac{a}{c}\right)^2] \frac{1}{a^2}$
Ortorombik	$\frac{1}{d^2_{hkl}} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$
Hegzagonal	$\frac{1}{d^2_{hkl}} = \left[\frac{4}{3}(h^2 + k^2 + hk) + l^2 \left(\frac{a}{c}\right)^2\right] \frac{1}{a^2}$
Monoklinik	$\frac{1}{d^2_{hkl}} = \frac{h^2}{a^2 \sin^2 \gamma} + \frac{k^2}{b^2 \sin^2 \gamma} - \frac{2hk \cos \gamma}{ab \sin^2 \gamma} + \frac{l^2}{c^2}$

Şekil 4.2'de bu tez çalışmasında kullanılan, Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında bulunan, Rigaku SmartLab x-ışını difraktometresi gösterilmiştir. Ölçümlerde tek dalga boyuna sahip Cu- K_α x-ışını kaynağı (1,54 Å dalga boyuna sahip) kullanılmıştır.

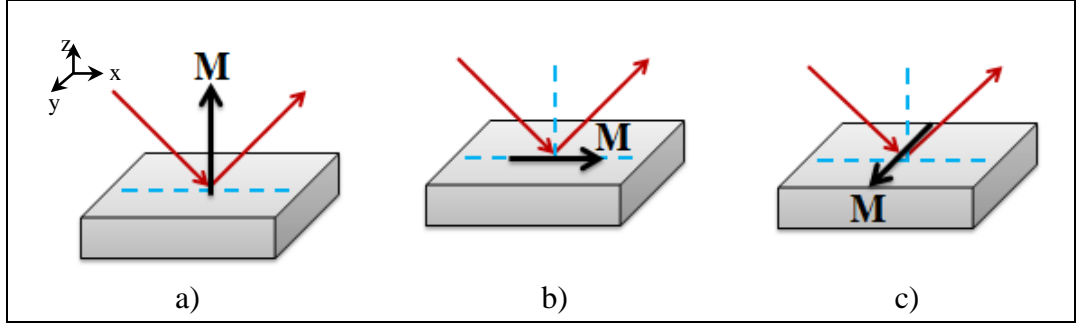


Şekil 4.2: Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'ndeki x-ışını difraktometresi.

4.3. Manyetik-Optik Kerr Etkisi Tekniği

Manyetik-optik Kerr etkisi (magneto-optical Kerr effect) tekniği, manyetik alan altındaki manyetik bir malzeme üzerine gönderilen polarize lazer ışınının örnekten yansdıktan sonra polarizasyonundaki değişiminin belirlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Örneğin polarizasyonundaki değişim mıknatıslanma ile doğru orantılı olduğu için, manyetik-optik Kerr etkisi sistemi ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrilerini elde etmekte kullanılan hassas yöntemlerden birisidir [60].

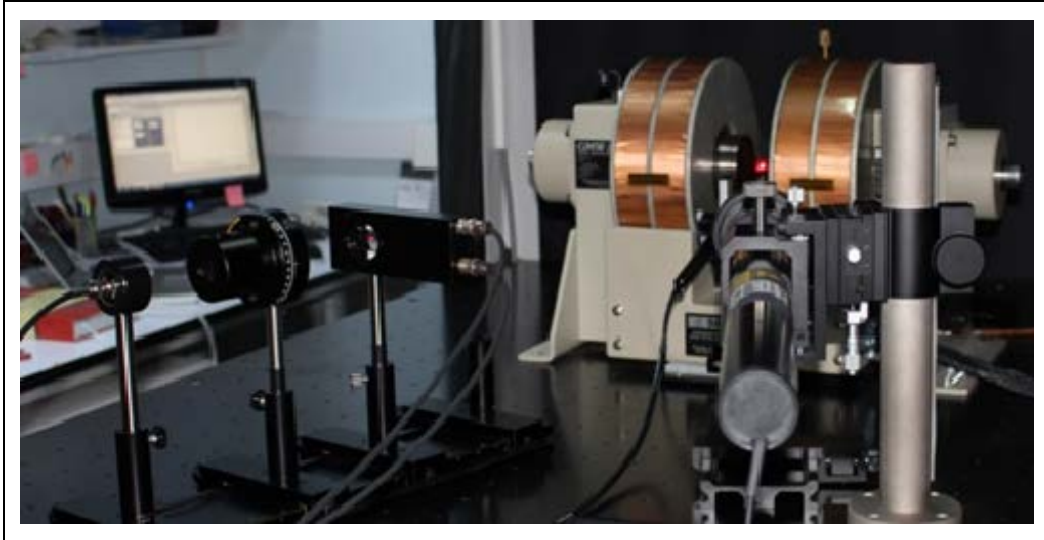
Manyetik-optik Kerr etkisi sistemi ölçüm metodu yönünden incelendiğinde lazer ışınının geliş yönü ve örneğin mıknatıslanma yönüne bağlı olarak üç temel ölçüm geometrisine sahiptir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi polarize lazer ışını örnek yüzeyine sabit bir şekilde gönderildiğinde örneğin mıknatıslanmasına göre manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm geometrileri tanımlanmaktadır. Eğer örneğin mıknatıslanması, Şekil 4.3.a)'da gösterildiği gibi örnek düzlemine dik yönde ise kutupsal (Polar) manyetik-optik Kerr etkisi (P-MOKE), Şekil 4.3.b)'de gösterildiği gibi mıknatıslanma örnek düzleminde x-ekseni boyunca uzanmış ise boyuna (Longitudinal) manyetik-optik Kerr etkisi (L-MOKE) ve Şekil 4.3.c)'de gösterildiği gibi mıknatıslanma örnek düzleminde y-ekseni boyunca uzanmış ise enine (Transverse) manyetik-optik Kerr etkisi (T-MOKE) olarak adlandırılır.



Şekil 4.3: Manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm geometrileri. a) P-MOKE, b) L-MOKE, c) T-MOKE ölçüm geometrisi.

Manyetik-optik Kerr etkisi sistemlerinde polarize lazer ışını kullanılmaktadır. Metallerde malzemeye giriş derinliği 15-20 nm civarında olan, 632 nm dalgaboyuna sahip lazer ışını Manyetik-optik Kerr etkisi sistemini yüzeye duyarlı bir ölçüm tekniği yapmaktadır [90]. Bu durum diamanyetik katkıların olmadığı bir mıknatıslanma eğrisi elde edilmesine imkân sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında bulunan Manyetik-optik Kerr etkisi sistemi (Nanosan Instruments-SmartMOKE Magnetometry System) kullanılmıştır. Şekil 4.4'te gösterilen Manyetik-optik Kerr etkisi sistemiyle oda sıcaklığında örnek düzleminde (L-MOKE) ve örnek düzlemine dik yönde (P-MOKE) ölçüm yapılabilmektedir.

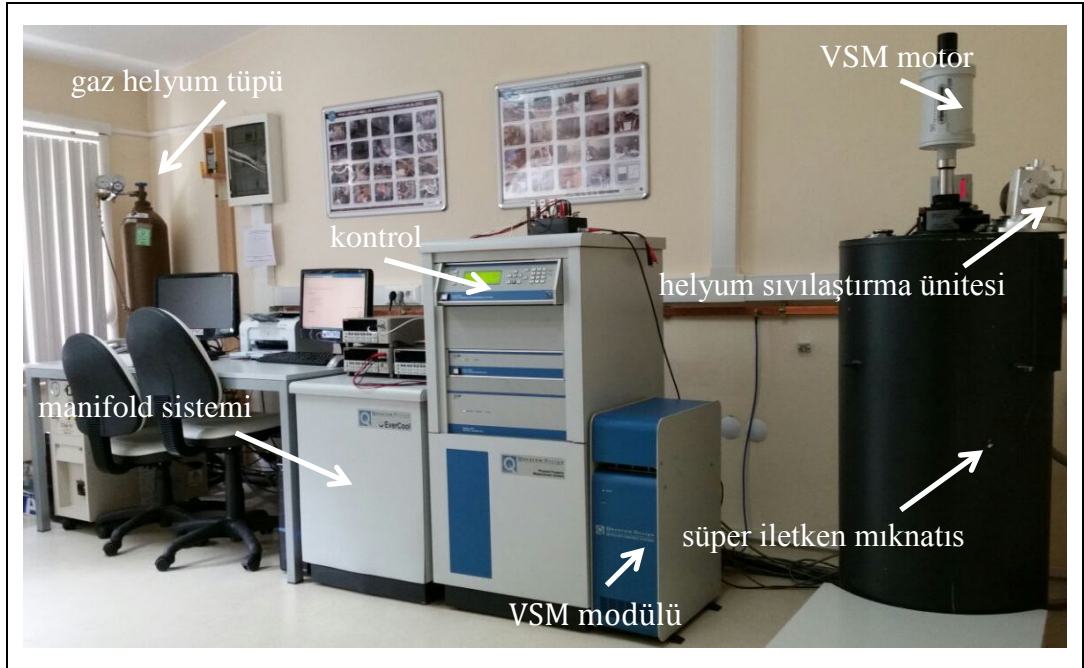


Şekil 4.4: Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'ndeki manyetik-optik Kerr etkisi Sistemi.

4.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi Tekniği

Titreşimli örnek manyetometresi (vibrating sample magnetometer) tekniğiyle ince film, bulk malzeme, toz ve sıvı örneklerin mıknatıslanma ölçümleri yapılabilmektedir. Titreşimli örnek manyetometresi, bu alandaki öncü çalışmaları sebebiyle Foner manyetometresi olarak da bilinir.

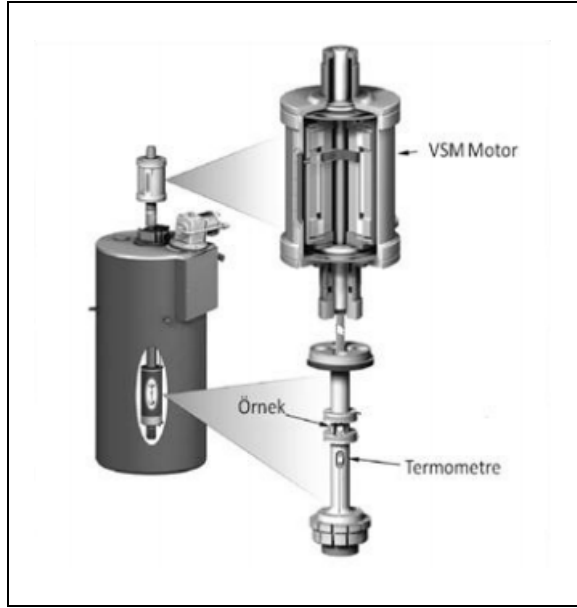
Bu tez çalışmasında kullanılan titreşimli örnek manyetometresi sistemi Quantum Design firması tarafından üretilen Physical Property Measurement System (PPMS) cihazının bir modülüdür. PPMS sistemi, Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, helyum sıvılaştırma ünitesi, manifold sistemi, kontrol paneli, titreşimli örnek manyetometresi modülü, süperiletken mıknatıs gaz helyum ünitesi ve VSM motor'dan oluşmaktadır. Örnekler süperiletken mıknatısın bulunduğu helyum tankının içerisine yerleştirilerek ölçülmektedir.



Şekil 4.5: Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'ndeki PPMS sistemi.

Şekil 4.6'da gösterilen VSM motor kullanılarak, sabit manyetik alan değerlerinde titreşim yaptırılarak örneğin ölçümünün yapılacağı en uygun yer tespit edilir [91]. Helyum tankı içerisindeki sıvı helyumun hızlı buharlaşmasını önlemek amacıyla helyum tankı bir vakum ceketiyle çevrilmiş ve örneğin bulunduğu yer de sıvı helyumdan bir vakum sistemiyle yalıtılmıştır. Sistemin

kontrolü ve alınan ölçümlerin görüntüleme işlemleri kontrol panelinden yapılmaktadır.



Şekil 4.6: Örneğin titreştirildiği VSM motoru ve manyetik akı değişimlerini ölçen VSM bobinleri.

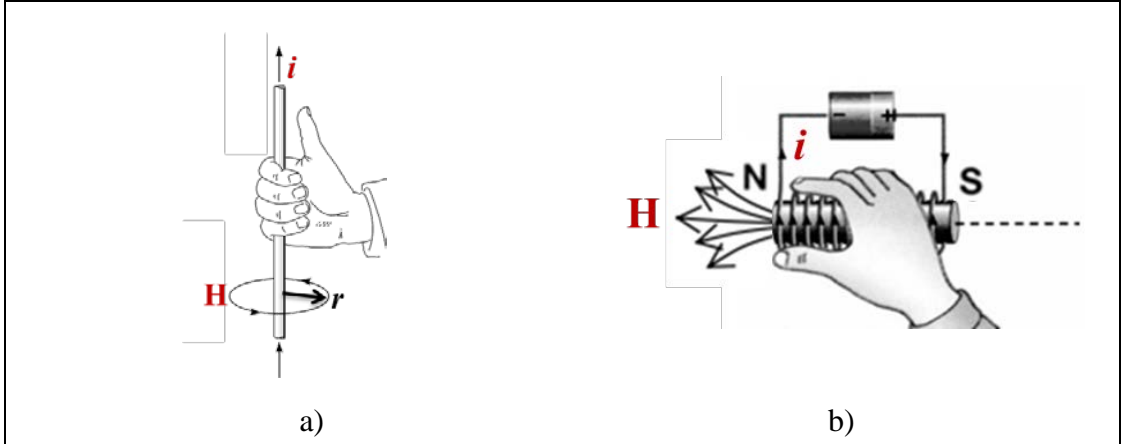
Standart bir titreşimli örnek manyetometresi ölçümünde ilk olarak, örnek dc manyetik alana maruz bırakılır. Örnek manyetik bir malzeme ise malzemenin manyetik momentleri bu alandan etkilenerek kendilerini alan doğrultunda yönlendirmek isteyecek ve malzeme içerisinde manyetik bir düzen oluşmasına sebep olacaklardır. Malzemenin manyetik dipol momentlerinin kendi etrafında oluşturdukları manyetik alanın VSM motor ile aşağı-yukarı hareket ettirilerek zamana bağlı manyetik alan değişimi ile indüklenmiş akım oluşturulur. Örneğin yeri tespit edildikten sonra manyetik alan taraması yapılarak örneğin mıknatıslanma eğrisi ölçülür. Titreşimli örnek manyetometresi ölçümleri örnek düzleminde ve örnek düzlemine dik geometrilerde, 4-1000 K sıcaklık aralığında ve içerisinde barındırdığı süperiletken mıknatıs sayesinde $\pm 9 \times 10^4$ Oe'lik manyetik alan altında yapılabilmektedir. Titreşimli örnek manyetometresi cihazının hassasiyeti 10^{-6} erg/Oe, titreşim genliği 1-3 mm aralığında ve titreşim frekansı 40 Hz'dir [91].

4.4.1. Titreşimli Örnek Manyetometresinin Çalışma Prensibi

Temel olarak elektromanyetik indüksiyon prensibine göre çalışan titreşimli örnek manyetometresi, ölçülecek manyetik malzemenin düşük genlikte periyodik bir şekilde hareket ettirilmesi esasına dayanır [92]. Titreşimli örnek manyetometresi ölçümü, bu hareket sonucunda oluşan periyodik manyetik alan değişiminin Faraday yasasının akı değişim özelliği temel alınarak gerçekleştirilir. Sağ el kuralına göre üzerinden akım geçirilen doğrusal bir telin etrafında Şekil 4.7.a)'da gösterildiği gibi manyetik alan oluşur. Aynı telin halkalar halinde sarıldığı durumda, Şekil 4.7.b)'de gösterildiği gibi telin üzerinden akım geçirilmesiyle bobin merkezinde kuvvetli bir manyetik alan oluşur. Bobinin merkezinde oluşan manyetik alanın yönü sağ el kuralı ile belirlenirken, büyüklüğü

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi r^2} |d\vec{l} \times \hat{r}| \quad (4.2)$$

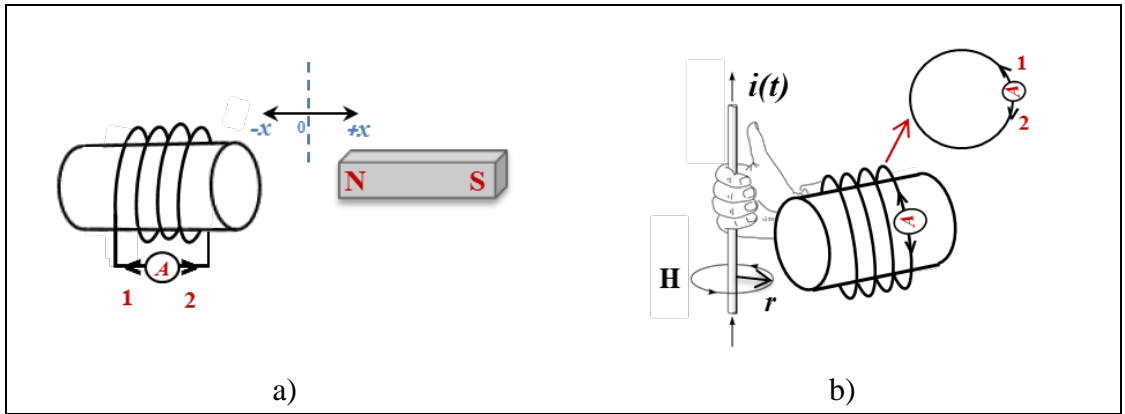
denklem (3.2)'de ifade edilen Biot-Savart yasası ile hesaplanmaktadır [93]. Burada, r halka şeklindeki telin yarıçapıdır, l ise telin uzunluğudur.



Şekil 4.7: Üzerinden akım geçirilen a) doğrusal tel etrafında, b) bobinde merkezinde oluşturulan manyetik alan.

Akım kullanılarak manyetik alan oluşturulduğu durumdan yukarıda detaylıca bahsedildi. Akım ve manyetik alan arasındaki bu ilişki tersinirdir. Şekil 4.8'de gösterildiği gibi manyetik alan kullanılarak da akım oluşturulabilir. Üzerinden akım geçirilmeyen herhangi bir telde akım oluşturulabilmesi için

telin değişken manyetik alana maruz bırakılması gerekir. Şekil 4.8.a)'da gösterildiği gibi mıknatıs, üzerinden akım geçmeyen bir bobine yakın mesafede hareketsiz olarak tutulduğunda akımölçerin okuduğu değer sıfırdır. Ancak mıknatıs ileri geri hareket ettirilmeye başlandığında, hareket hızına ve yönüne bağlı olarak bu değer farklılaşır. Mıknatıs tele yaklaştırılırken akımölçerden 2 yönünde akım değeri okunurken, mıknatıs telden uzaklaştırılırken 1 yönünde akım okunur. Benzer şekilde doğrusal bir tel yakınına akımölçer bağlı halka tel yerleştirilir ve doğrusal tel üzerinden sabit bir akım geçirilirse, akımölçerin okuduğu değer değişmez. Şekil 4.8.b)'de gösterildiği gibi telden zamana bağlı değişken bir akım geçirilecek olursa, halka telin üzerinden geçen akım değeri değişir. Akımölçer doğrusal telden geçen akımın artırılmasına bağlı olarak 1 yönünde, azalmasına bağlı olarak da 2 yönünde akım okur. Burada oluşan akıma indüksiyon akımı denir.



Şekil 4.8: Değişken manyetik alana maruz bırakılan bobinler. Değişken manyetik alan a) mıknatısla, b) üzerinden akım geçirilen tel ile oluşturulmuştur.

Manyetik alan ile oluşturulan indüksiyon akımı Faraday yasası ile ifade edilen manyetik akı değişimine bağlıdır. Manyetik akı (Φ_H) değişimi denklem (4.3)'de verilen bağıntı kullanılarak, elektromotor kuvveti (ϵ) ise denklem (4.4)'te ifade edilen bağıntının hesaplanması ile bulunur [91].

$$\Phi_H = \int \vec{H} \cdot d\vec{a} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_H}{dt} \quad (4.4)$$

Denklem (4.3) ve denklem (4.4) kullanılarak, yüzey alanı a ve sarım sayısı n olan bir bobin için elektromotor kuvveti:

$$\varepsilon = -n a \frac{dH}{dt} \quad (4.5)$$

olarak ifade edilir.

Üzerinden akım geçirilen bir bobin içerisine manyetik bir malzeme yerleştirilecek olursa, malzemenin hareket ettirilmesiyle bobin üzerinde akı değişimi meydana gelir. Akı değişimi

$$\Delta H = \mu_0 M \quad (4.6)$$

olarak ifade edilir. Burada μ_0 serbest uzayın geçirgenliği, M ise malzemenin mıknatıslanma değeridir. Denklem (4.6)'da ifade edildiği gibi, akı değişimi malzemenin mıknatıslanma değeri ile orantılıdır.

Denklem (4.5) ve denklem (4.6) kullanılarak elektromotor kuvveti:

$$\varepsilon \cdot dt = - n a \mu_0 M \quad (4.7)$$

olarak ifade edilir. Denklem (4.4) düşey düzlemde salınım yapan bir örnek için elektromotor kuvveti

$$\varepsilon_{sarım} = - \frac{d\Phi_H}{dt} = \frac{d\Phi}{dz} \frac{dz}{dt} \quad (4.8)$$

halini alır. Burada z örneğin salınım yaptığı düzlemi, t zamanı, Φ ise ölçüm salınımları tarafından çevrelenmiş manyetik akıyı ifade etmektedir. Harmonik salınım yapan bir örnek için

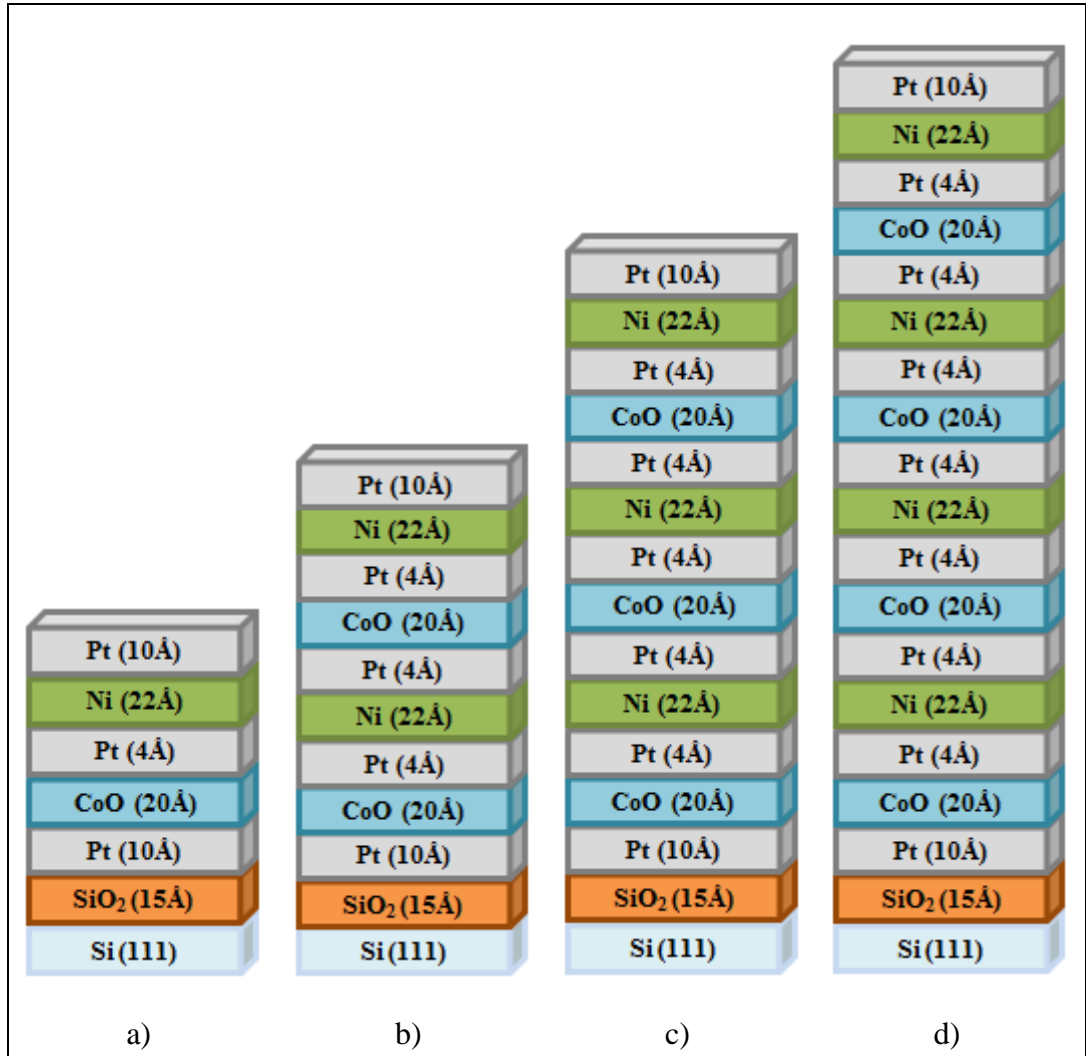
$$\varepsilon_{salınım} = 2\pi v \kappa \mu A \sin(2\pi v t) \quad (4.9)$$

olarak ifade edilir. Burada κ çiftleşme sabiti, μ örneğin manyetik momenti, A salınımın genliği, v ise salınım frekansıdır. Ölçümü yapılacak örnekler sinüzoidal olacak şekilde titreştirilebilecekleri bir örnek tutucuya yerleştirilirler. Burada salınım hareketinin merkezi, ölçüm sarımlarının merkezi ile aynı düşey pozisyonda olmalıdır. Bu salınım hareketinin genliği ve pozisyonu VSM motor modülü tarafından kontrol edilmektedir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Örneklerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında kaydırma etkisini sıcaklığa ve tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak incelemek için Şekil 5.1’de gösterilen Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmler kullanıldı.



Şekil 5.1: Tez çalışmasında kullanılan Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmlerin şematik gösterimleri ve nominal kalınlık değerleri. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin şematik gösterimi.

Filmlerin büyütüldüğü magnetron saçırma sisteminde kaplanan tabaların kalınlığı kuvars kristal mikrodenge (Quartz Crystal Microbalance, QCM) cihazı ve

x-ışını fotoelektron spektroskopisi (x-ray photoelectron spectroscopy, XPS) tekniği kullanılarak kontrol edildi [64].

Bu tez çalışmasında kullanılan ultra-ince nikel filmler Bestec Ultra High Vacuum Sputtering System 200 cihazıyla büyütüldü. Alttaşlar yüksek vakuma alınmadan önce etanol ile temizlendi. Sistem yüksek vakuma alındıktan sonra da 48.5 volt ve 6.25 amperlik akım uygulanarak pirolitik bor nitrür ısıtıcıyla 550 °C’de 20 dakika boyunca tavlama yapılarak yüzeye bağlı hidrokarbonların uzaklaştırılması sağlandı.

Ni filmler, nikelin ferromanyetik bir malzeme olması nedeniyle, radyo frekans (rf) güç kaynağı ve Tablo 5.1’de sunulan parametreler kullanılarak büyütüldü [64].

Tablo 5.1: Ni filmlerin büyütme parametreleri.

z -position: 100 mm	Starting Power: 40 W
Power Act: 30 W	Power: 30 W
Power Reflected: 0 W	DC Bias: 20 V
DC Bias: ~100 V	Timeout: 60 s
CL: 757	Timer 1: 60 s
CT: 625	Timer 2: 50 s
MFC: 2.9 – 3.1 sccm1	Kalınlık: 22 Å
P _{kaplama} : 1.3 – 1.4 x 10 ⁻³ mbar	Rate: 0.44 Å/s

Büyütme süreci başlatıldığında, MS sistemine Ar gazı verilerek sistemin basıncı yükseltildi. Basıncın yükselmesiyle birlikte plazma durumu oluşturuldu. Büyütme işlemi ilk 60 saniye boyunca (Timer 1) alttaş ile hedef malzeme arasındaki engel (shutter) üzerine yapıldı. Bu şekilde plazmanın gücü ayarlanan değerlere sabitlendi ve 60 saniyenin sonunda engel geri çekilerek alttaşın üzerine belirtilen süre boyunca (Timer 2) kaplama yapıldı.

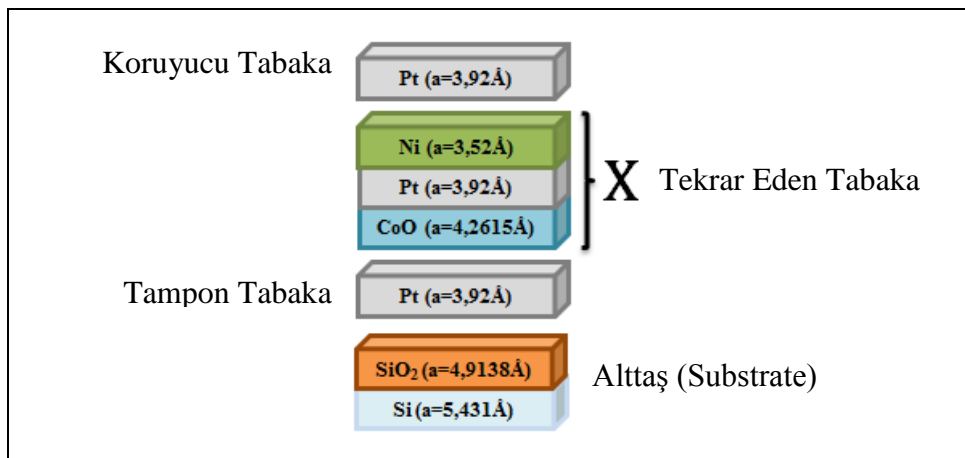
CoO için kalınlık kalibrasyonu ve kaplama parametreleri daha önceki çalışmalarda [36]-[38], [64] belirlendiği için bu çalışmada tekrarlanmamıştır. CoO tabakalarının büyütme parametreleri Tablo 5.2’de sunulmuştur [64].

Tablo 5.2: CoO filmlerin büyütme parametreleri.

z -position: 100 mm	Starting Power: 100 W
Power Act: 40 W	Power: 40 W
Power Reflected: 0 W	DC Bias: 20 V
DC Bias: ~245 V	Timeout: 120 s
CL: 740	Timer 1: 60 s
CT: 760	Timer 2: 60 s
MFCAr: 3.2 sccm	$P_{\text{kaplama}}: 1.2 - 1.4 \times 10^{-3}$ mbar
MFCO ₂ : 0.2 sccm	Kalınlık: 20 Å

CoO filmlerin büyütülmesi iki adımda gerçekleştirildi. İlk olarak sisteme bir miktar oksijen gazı verilerek basınç 1×10^{-5} mbar mertebesine getirilerek sabitlendi [95]. İkinci adımda ise sisteme Ar gazı verilerek istenen basınç değerlerinde ve yukarıda verilen şartlarda büyütme işlemi gerçekleştirildi.

Çok katlı ince filmler, yüksek vakum koşulları altında, MS tekniği ile doğal oksit yüzeye sahip Si (111) alttaş üzerine büyütüldü. Örnek sistemi, Şekil 5.2’de görüldüğü gibi alttaş (Si/SiO₂), tampon (Pt), AFM (CoO), NM (Pt), FM (Ni) ve koruyucu (Pt) tabakalardan oluşmaktadır. Örnek sisteminde X=1, 2, 3 ve 4 olmak üzere dört çok katlı ince film büyütüldü. Tekrar eden her bir ferromanyetik ve antiferromanyetik tabakalar arasına 4 Å kalınlığında Pt ara tabakası büyütüldü. Tabakaların özellikleri detaylı olarak aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.2: Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) örnek sistemi ve tabakalara ait örgü parametreleri.

Alttaş, büyütülecek malzemenin oluşumunu destekleyecek zemin yapıdır. Filmin büyümesini destekleyen bu yapının kalınlığı 0.5-1 mm mertebesindedir. Filme nazaran oldukça kalın olan bu yapının asgari miktarda yüzey pürüzlülüğüne sahip olması, büyütülecek filmin kalitesini belirleyen önemli bir faktördür. Alttaşın yüzey pürüzlüğü çeşitli şekillerde azaltılabilir. En basit yöntemlerden biri, alttaş malzemenin kendi oksit tabakasının kullanılmasıdır. Bu tez çalışmasında, alttaş olarak diamanyetik, yüzeyi doğal oksit, tek kristal yönelimli Si (111) alttaş kullanıldı.

- Tampon Tabaka (Buffer Layer)

Tampon tabaka alttaş ile büyütülecek olan manyetik malzemelerin örgü parametreleri arasında bir uyum sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra tampon tabakada kullanılan malzemenin özelliklerine göre oksitlenmeyi önlemek amacıyla koruyucu tabaka olarak veya manyetik yönelimi kontrol etmek amacıyla ara tabaka olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında doğal oksitlenmiş alttaş üzerine ince film büyütülmeden önce Pt tampon tabaka büyütülmüştür. En alttaki bu tabaka düşük plazma gücünde büyütülmüş, küçük tanelerden oluşmaktadır. Alttaş ile kobalt oksit tabakaları arasında koruyucu görevinde büyütülen bu tabaka sayesinde tavlama sırasında ortadan kalkmamış olan yüzey pürüzlüklerinin azaltılması sağlanmıştır. Böylelikle, yüzey pürüzlülüklerinin kaydırma etkisi alan değeri üzerindeki ve CoO tabakanın Néel sıcaklığı üzerindeki etkileri de minimize edilmektedir. Tampon tabakanın nominal kalınlığı 10 Å olarak seçildi.

- Tekrar Eden Tabaka (X)

Bu tez çalışmasında kaydırma etkisi tekrar eden tabaka sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak detaylıca incelenmiştir. Kaydırma etkisi etkisini incelemek için FM/AFM sisteminin kullanılması tercih edildi ve ferromanyetik malzeme olarak Ni, antiferromanyetik malzeme olarak CoO seçildi. CoO tabakasında bulunan oksijen atomlarının Ni tabakasının oksitlenmesini önlemek amacıyla FM/AFM tabakaları arasına Pt (4 Å) ara tabakası büyütüldü. Bu ara tabaka, iki tabakayı kimyasal bağlardan ve difüzyondan ayırmaktadır. Bu tabakanın nikel ve kobalt oksit ara yüzeyindeki etkileşimleri engelleyeceği düşünülebilir. Ancak birçok deneysel çalışmada, ferromanyetik ve antiferromanyetik tabakalar arasına büyütülen

çok ince manyetik olmayan ayırıcı tabakanın varlığının değiş-tokuş etkileşmesini engellemediği gözlenmiştir [35]-[38], [85].

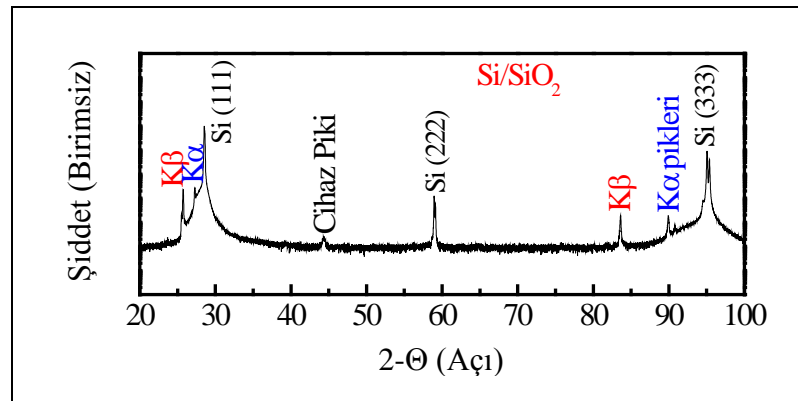
- Koruyucu Tabaka (Cap Layer)

Bilimsel araştırmalar için üretilen filmler her ne kadar yüksek vakum koşulları altında büyütölüyor olsa da, bu filmlerin ölçümleri çoğunlukla atmosfer ortamında yapılmaktadır. Filmler vakum ortamından çıkarıldığında bozulmadan muhafaza edilebilmeleri için, yüzeyleri kolaylıkla oksitlenmeyecek bir malzeme ile kaplanır. Film yüzeyine kaplanan bu tabaka koruyucu tabaka olarak bilinir ve kalınlığı genellikle birkaç nanometreyi geçmez. Bu çalışmada kullanılan ince filmlerde koruyucu katman olarak 10 Å Pt kullanıldı.

5.2. X-Işını Kırınımı Ölçüm Sonuçları

X-ışını kırınımı tekniği, Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmlerin kristal yapısını analiz etmek için kullanıldı.

Bu tez çalışmasında çok katlı ince filmlerin kristal yapısını incelemeyden önce filmlerin üzerine büyütölüleceği alttaşın kristal yapısı detaylıca incelendi. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi silisyum alttaş (111) yönelimine sahip tek kristal yapıdadır. Buna ek olarak x-ışını kırınımı ölçümlerinde 44 derecede farklı bir pik gözlemlenmektedir. Bu açıda ortaya çıkan pik örnekte tutucusuna aittir.

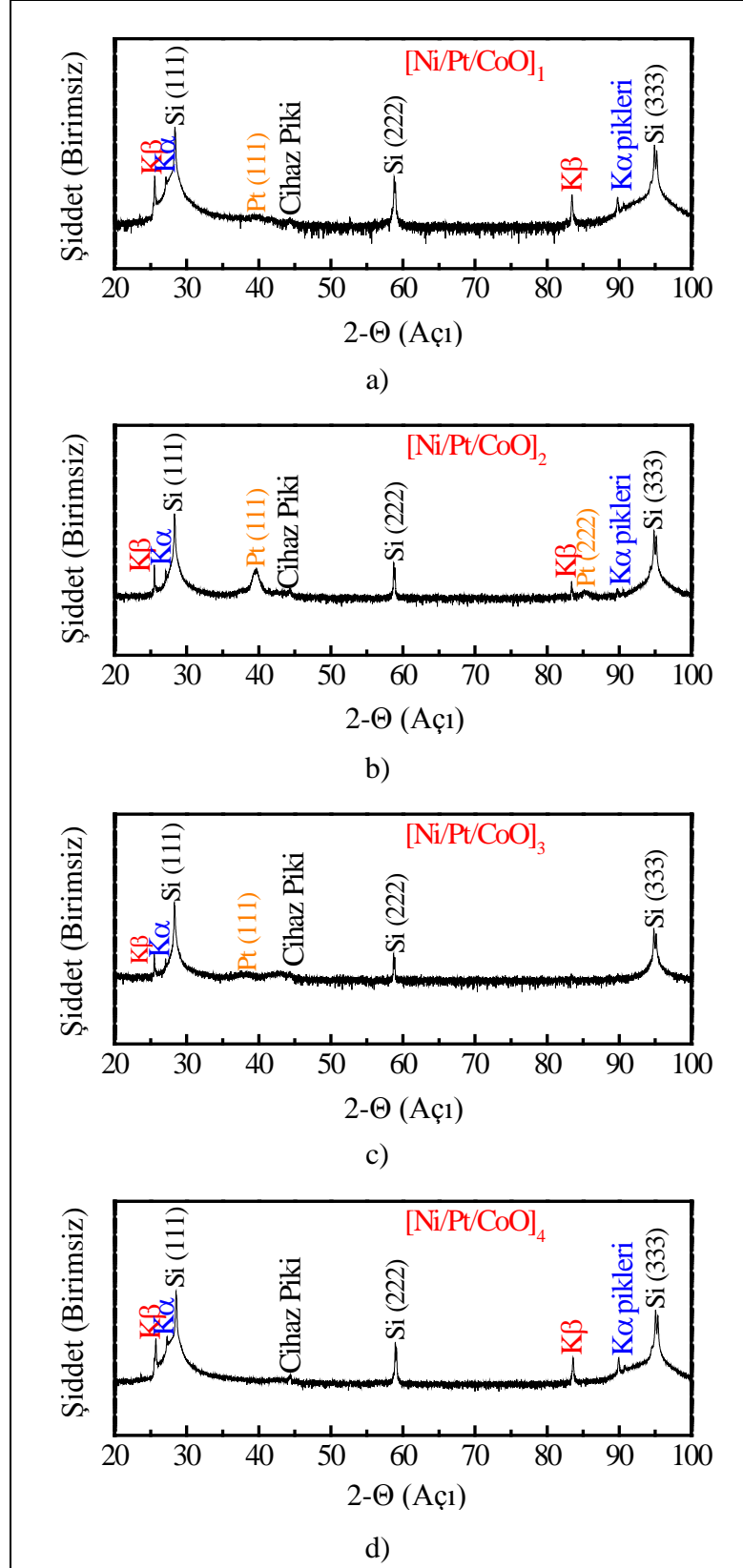


Şekil 5.3: Alttaşa ait x-ışını kırınımı ölçüm sonucu.

Alttaşa ait kristal yönelimi belirlendikten sonra çok katlı ince filmler x-ışını kırınımı tekniği ile ölçüldü. Çok katlı ince filmlere ait x-ışını kırınımı ölçüm

sonuçları Şekil 5.4'te verilmiştir. X-ışını kırınımı ölüm sonuçlarından, X=1 ve X=4 örneklerinde alttaşa ait silisyum pikleri ve örnek tutucu piki haricinde herhangi bir pik gözlenmezken, X=2 ve X=3 örneklerinde 39 derecede Pt (111) piki gözlendi. Ayrıca X=2 rneğinde 85 derecede Pt (222) piki gözlendi.

Çok katlı ince filmlerin kristal yapısının çoklu kristal yapıda olması beklenmektedir. Ancak X=2 ve X=3 rneklerinin x-ışını kırınımı ölüm sonuçlarında Pt elementine ait Pt (111) ve Pt (222) pikleri gözlendi. Bu pikler Si (111) zerine büyütülen ilk tabaka olan tampon Pt tabakasına aittir. Tampon Pt tabakası alttaşın kristal yönelimini taklit ederek, (111) yöneliminde ve texture yapıda büyümesine sebep olmuştur.



Şekil 5.4: Çok katlı ince filmlerin x-ışını kırınımı ölçüm sonuçları. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin x-ışını kırınımı ölçüm sonucu.

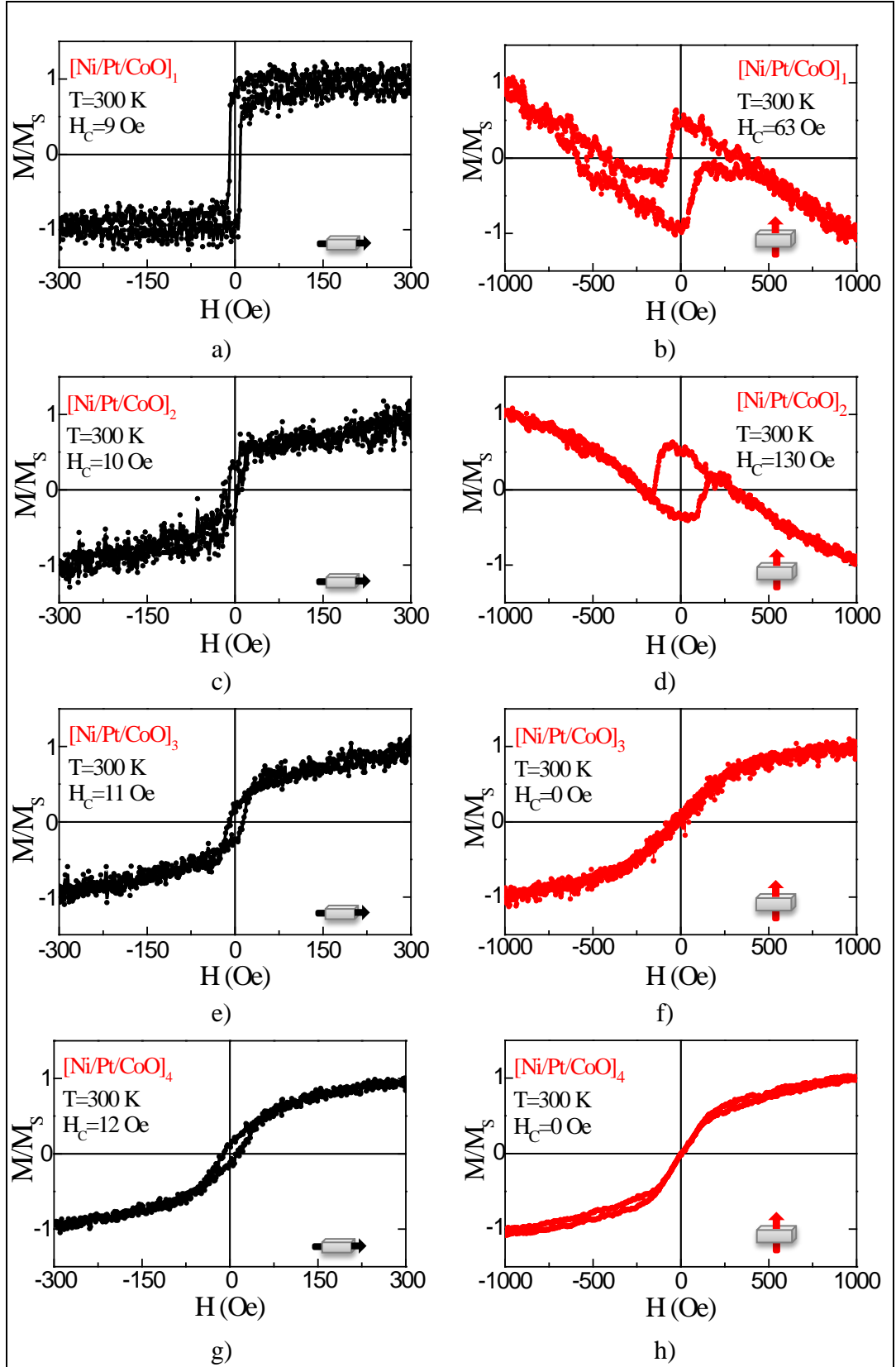
5.3. Manyetik-Optik Kerr Etkisi Ölçüm Sonuçları

Oda sıcaklığında, örnek düzleminde ve örnek düzlemine dik yönde manyetik alan uygulanarak yapılan manyetik-optik Kerr etkisi ölçümleri, filmlerin kolay mıknatıslanma eksenlerinin belirlenmesinde kullanıldı.

Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmler ilk olarak L-MOKE ölçüm geometrisinde 0, 45, 90 derece döndürülerek ölçüldü. Açıya bağlı L-MOKE ölçüm sonuçlarından örneklerin oda sıcaklığında açığa bağlı anizotropiye sahip olmadığı gözlemlendi. L-MOKE ölçümlerine ait mıknatıslanma eğrileri Şekil 5.5.a), Şekil 5.5.c), Şekil 5.5.e) ve Şekil 5.5.g)'de gösterilmiştir. Oda sıcaklığı L-MOKE ölçümlerine göre ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının artmasıyla kalıcı mıknatıslanma değerinin azaldığı tespit edildi. Ayrıca dört numunenin zorlayıcı alan değerlerinin tekrar eden tabaka sayısının artmasıyla arttığı belirlendi.

L-MOKE ölçümlerinin ardından dört numune oda sıcaklığında P-MOKE ölçüm geometrisinde ölçüldü. P-MOKE ölçümlerine ait mıknatıslanma eğrileri Şekil 5.5.b), Şekil 5.5.d), Şekil 5.5.f) ve Şekil 5.5.h)'de gösterilmiştir. P-MOKE ölçümlerine göre ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının artmasıyla M_R değerinin $X=1$ ve $X=2$ örnekleri için arttığı, ancak $X=3$ ve $X=4$ örnekleri için ise bu değerlerin sıfır olduğu gözlemlendi. Ayrıca oda sıcaklığı P-MOKE ölçüm sonuçları, Şekil 5.6.b) ve Şekil 5.6.d)'de gösterilen $X=1$ ve $X=2$ örneklerinin zorlayıcı alan değerlerinin tekrar eden tabaka sayısının artmasıyla arttığı belirlendi. Ayrıca bu iki örneğin mıknatıslanma eğrilerinde gözlenen beklenmedik davranış ikincil optik etkilerin yanı sıra [96], FM/AFM tabakalarının ara yüzeylerinde bazı ferromanyetik Ni atomlarının örnek düzlemine dik yönde bileşenlerinin olmasıyla açıklanmaktadır. Bu durumu daha detaylı incelemek için oda sıcaklığında titreşimli örnek manyetometresi ölçümleri yapılmıştır.

L-MOKE ve P-MOKE ölçümlerine ait mıknatıslanma eğrileri kıyaslandığında L-MOKE ölçüm geometrisinde alınan mıknatıslanma eğrilerinin daha düşük manyetik alanların uygulanmasıyla doyuma gittiği gözlemlendi. Oda sıcaklığı manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm sonuçlarına göre Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmlerin kolay mıknatıslanma eksenlerinin örnek düzleminde, zor mıknatıslanma eksenlerinin ise örnek düzlemine dik olduğu belirlendi.



Şekil 5.5: Çok katlı ince filmler için L-MOKE ve P-MOKE ölçüm sonuçları. a) X=1, L-MOKE, b) X=1, P-MOKE, c) X=2, L-MOKE, d) X=2, P-MOKE, e) X=3, L-MOKE, f) X=3, P-MOKE, g) X=4, L-MOKE, h) X=4, P-MOKE ölçüm sonucu.

5.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi Ölçüm Sonuçları

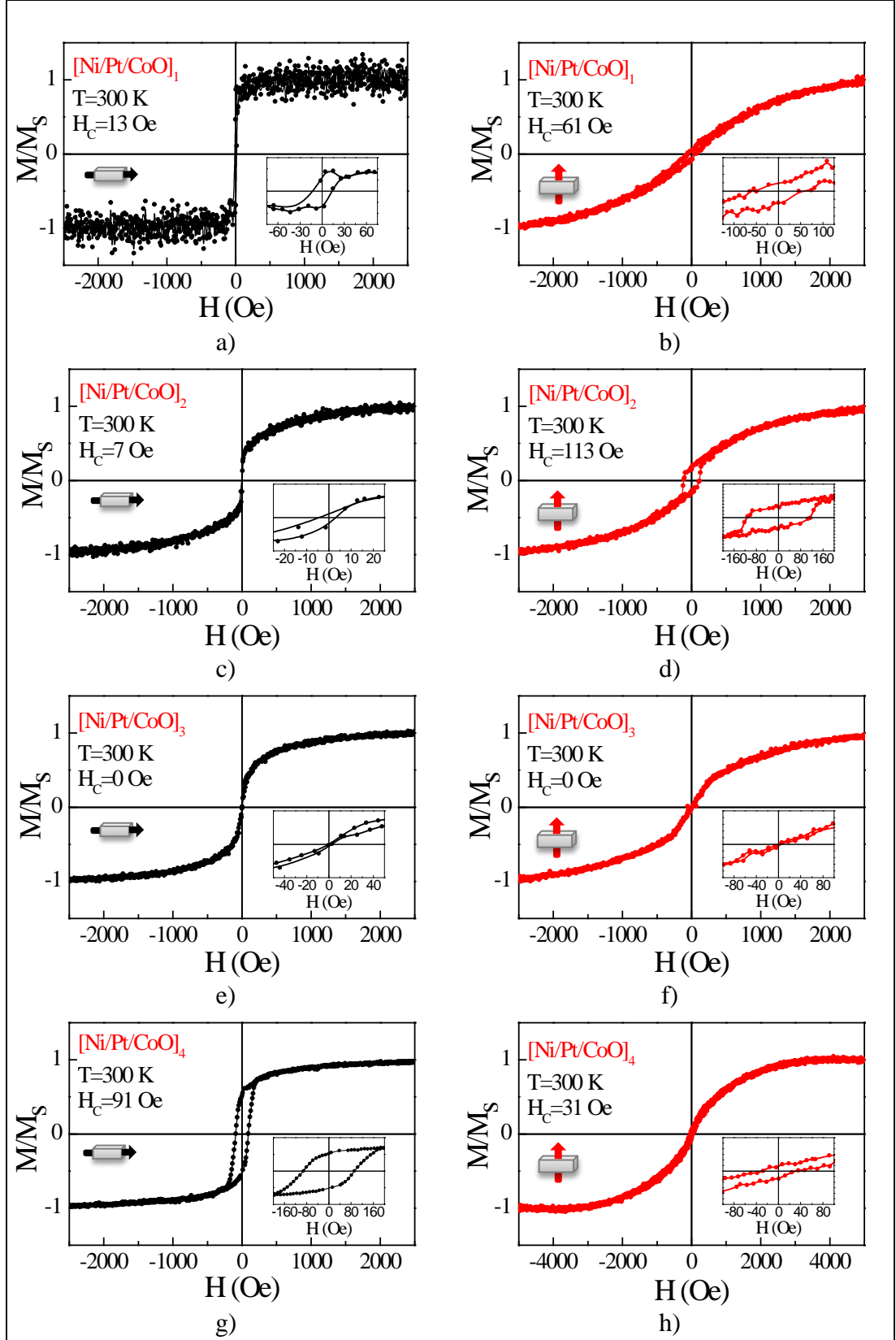
5.4.1. Oda Sıcaklığı Titreşimli Örnek Manyetometresi Ölçüm Sonuçları

Oda sıcaklığında titreşimli örnek manyetometresi ölçümleri, her bir örneğin manyetik-optik Kerr etkisi ölçümlerinin yapıldığı açılarda gerçekleştirildi. Oda sıcaklığında in-plane ölçüm geometrisinde alınan mıknatıslanma eğrileri (Şekil 5.6.a), (Şekil 5.6.c), (Şekil 5.6.e) ve (Şekil 5.6.g)'de gösterilmiştir.

Oda sıcaklığı in-plane ölçümlerine göre ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının artmasıyla kalıcı mıknatıslanma değerinin $X=3$ örneğine kadar azaldığı $X=4$ örneğinde ise arttığı tespit edildi. Ayrıca in-plane titreşimli örnek manyetometresi ölçümlerinden ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının artmasıyla H_C değerinin $X=1$ ve $X=4$ örnekleri için arttığı, ancak $X=2$ ve $X=3$ örnekleri için ise bu değerın sıfır olduğu tespit edildi.

In-plane titreşimli örnek manyetometresi ölçümlerinin ardından çok katlı ince filmler oda sıcaklığında out-of-plane ölçüm geometrisinde ölçüldü. Out-of-plane titreşimli örnek manyetometresi ölçümlerine ait mıknatıslanma eğrileri (Şekil 5.6.b), (Şekil 5.5.6), (Şekil 5.6.f) ve (Şekil 5.6.h)'de gösterilmiştir. Out-of-plane ölçümlerine göre ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının artmasıyla M_R değerinin $X=2$ örneğine kadar arttığı, $X=4$ örneği için ise azaldığı, ancak $X=3$ örneği için ise bu değerın sıfır olduğu gözlemlendi. Bununla birlikte (Şekil 5.6.b), (Şekil 5.6.d) ve (Şekil 5.6.h)'de gösterildiği gibi $X=1$, $X=2$ ve $X=4$ örneklerinin örnek düzlemine dik yönde mıknatıslanma katkısı da bulunmaktadır. Benzer sonuçlar oda sıcaklığında P-MOKE ölçüm sonuçlarında da gözlemlenmiştir. Her iki ölçüm yöntemiyle belirlenen zorlayıcı alan değerleri birbirleriyle uyumlu bulundu.

Oda sıcaklığı titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonuçlarına göre, manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm sonuçlarında olduğu gibi, çok katlı ince filmlerin kolay mıknatıslanma eksenlerinin örnek düzleminde, zor mıknatıslanma eksenlerinin ise örnek düzlemine dik yönde olduğu belirlendi.



Şekil 5.6: Çok katlı ince filmler için oda sıcaklığı in-plane ve out-of-plane titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonuçları. a) $X=1$, in-plane, b) $X=1$, out-of-plane, c) $X=2$, in-plane, d) $X=2$, out-of-plane, e) $X=3$, in-plane, f) $X=3$, out-of-plane, g) $X=4$, in-plane, h) $X=4$, out-of-plane ölçüm sonucu.

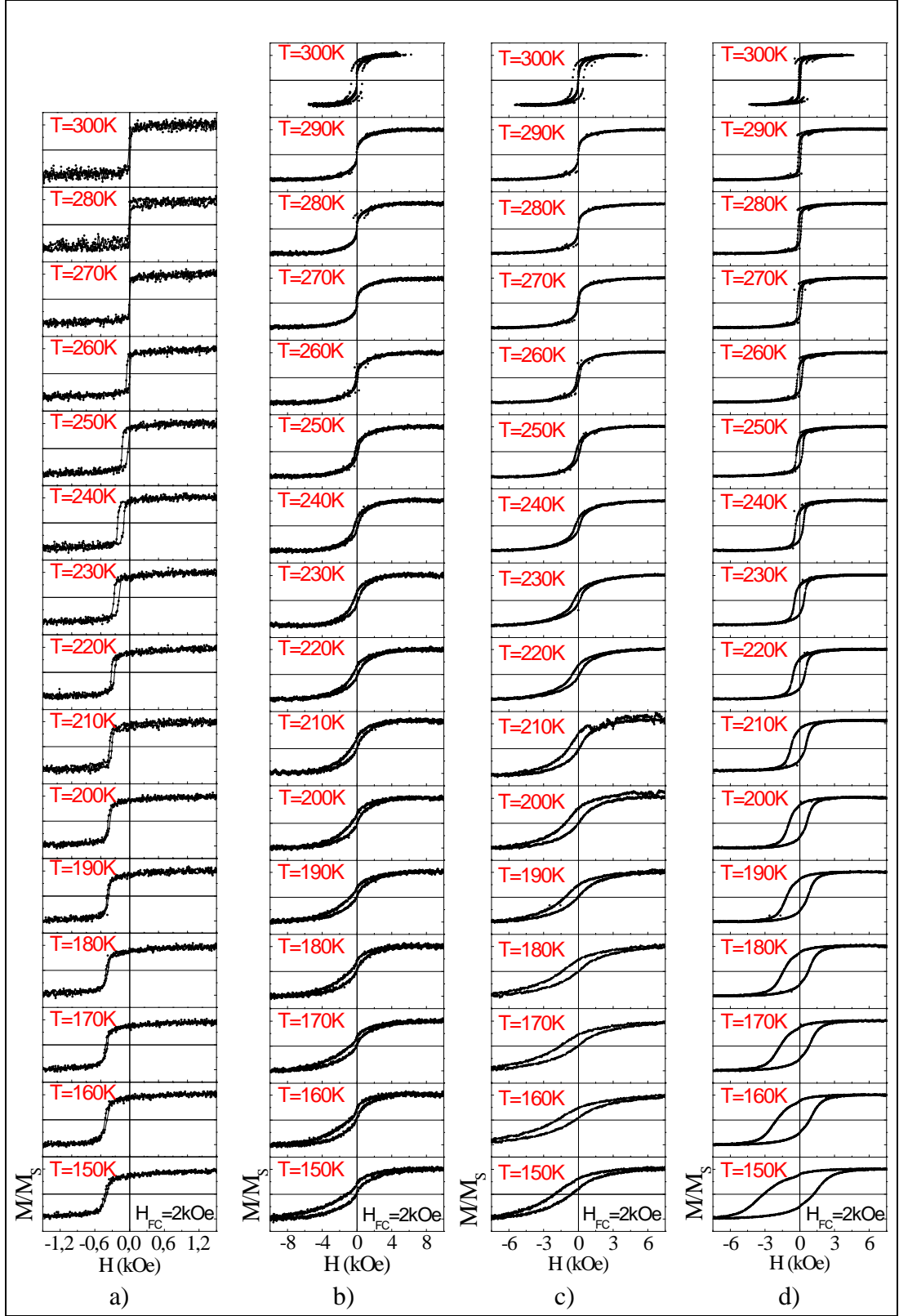
5.4.2. Düşük Sıcaklık Titreşimli Örnek Manyetometresi Ölçüm Sonuçları

Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmlerin manyetik özelliklerinin sıcaklığa ve tekrar eden tabaka sayısına bağlı davranışlarını incelemek için düşük sıcaklık titreşimli örnek manyetometresi ölçümleri yapıldı.

Kaydırma etkisi ölçümlerinde [Ni/Pt/CoO]_x çok katlı ince filmler ilk olarak bulk antiferromanyetik CoO tabakasının Néel sıcaklığı olan 291 K üzerine (320 K) ısıtıldı. Isıtma işleminin ardından filmler $H_{FC} = 2$ kOe alan altında istenilen hedef sıcaklığa (150 K) soğutuldu. Hedef sıcaklık değerine ulaşıldığında miknatislanma eğrisi ölçüldü. Düşük sıcaklık titreşimli örnek manyetometresi ölçümleri, bu sıcaklık (150 K) değerinden oda sıcaklığına (300 K) doğru 10 K adımlarla ve her bir hedef sıcaklık değerinde miknatislanma ölçümleri yapılarak gerçekleştirildi. In-plane ölçüm geometrisinde yapılan düşük sıcaklık titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonuçları her bir örnek için sıcaklığa bağlı olarak Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

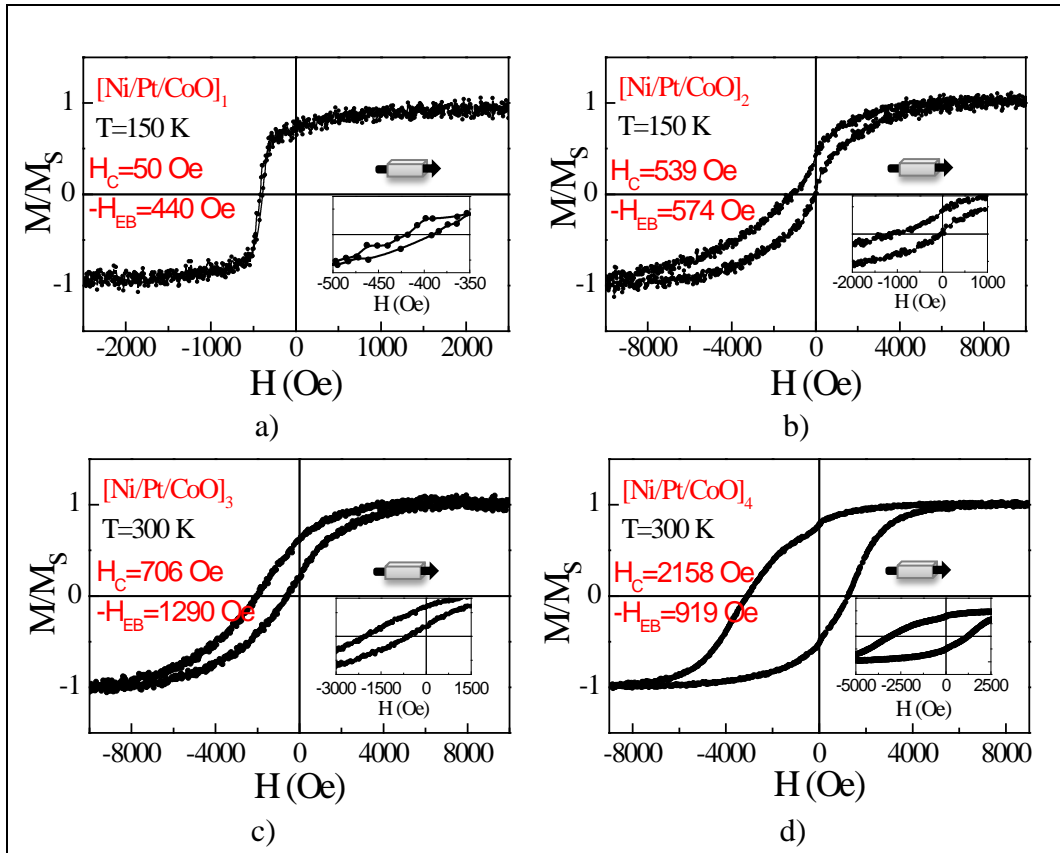
Düşük sıcaklık titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonuçları incelendiğinde X=1, X=2 ve X=3 örneklerinin benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Bu örneklerin sağ ve sol zorlayıcı alan değerleri negatif olup, kaydırma etkisi alan değerleri zorlayıcı alan değerlerinden büyüktür. X=4 örneği ise literatürle daha uyumlu ve daha genel bir davranış göstermektedir. Bu örnek için zorlayıcı alan değeri sıcaklığın azaltılmasıyla artmaktadır. Sağ zorlayıcı alan değeri pozitif kalırken sol zorlayıcı alan değeri negatiftir. Ayrıca sol zorlayıcı alan değerinin sağdan daha fazla arttığı görülmektedir ki bu pozitif soğutma alanı uygulanan sistemlerde gözlenen genel bir durumdur. Diğer üç örnek kendi aralarında incelendiğinde, X=1 örneği diğer örneklerden ve literatürden daha farklı bir davranış sergilemektedir. Tek katlı örneğin zorlayıcı alan değeri sıcaklığın azaltılmasıyla 240 K’e kadar artmakta, sonrasında 190 K’e kadar azalmakta ve bu sıcaklıktan sonra tekrar artmaktadır. X=2 ve X=3 örnekleri ise birbirleriyle benzer davranış göstermektedir. Bu örnekler için zorlayıcı alan değeri sıcaklığın azaltılmasıyla genel olarak artmaktadır.

Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmlerin zorlayıcı alan ve kaydırma etkisi alan değerlerinin sıcaklığa ve tekrar eden tabaka sayısına bağlı davranışının daha detaylı olarak incelenebilmesi için sağ ve sol zorlayıcı alan değerleri okunarak sıcaklığa bağlı olarak çizdirilmiştir.



Şekil 5.7: Pt/[Ni/Pt/CoO]_x/Pt/SiO₂/Si (111) çok katlı ince filmlere ait in-plane ölçüm geometrisinde ölçülen düşük sıcaklık titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonuçları. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin düşük sıcaklık titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonucu.

Her bir örnek için 150 K'de alınan mıknatıslanma eğrileri Şekil 5.8.a), Şekil 5.8.b), Şekil 5.8.c) ve Şekil 5.8.d)'de daha detaylı olarak gösterilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarına göre, sıcaklığın azaltılmasıyla kaydırma etkisi alan değerleri artmaktadır. Bununla birlikte kaydırma etkisi alan değeri tekrar eden tabaka sayısının artmasıyla da artmaktadır. Zorlayıcı alan değerlerinin tekrar eden tabaka sayısına bağlı davranışı incelendiğinde, tekrar eden ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının artmasıyla bu değerlerin arttığı görülmektedir. Zorlayıcı alan değerleri $X=1$ için $H_C=50$ Oe iken $X=2$ için bu değer $H_C=539$ Oe'dir. Ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının birden ikiye çıkmasıyla zorlayıcı alan değeri ciddi bir artış gösterirken, üçe çıktığında ikiye yakın bir değer ($H_C=706$ Oe) almış, dörde çıktığında ise oldukça yüksek bir değer ($H_C=2158$ Oe) almıştır. Ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının tek ve çift değer aldığı durumları kendi aralarında kıyasladığımızda, zorlayıcı alan değerinin tekrar eden tabaka sayısının artmasıyla arttığı ve çift değer aldığı durumdaki değerlerin tek değer aldığı durumdakinden büyük olduğu belirlendi.



Şekil 5.8: Çok katlı ince filmlerin 150 K'de ölçülen mıknatıslanma eğrileri. a) $X=1$, b) $X=2$, c) $X=3$, d) $X=4$ örneğinin titreşimli örnek manyetometresi ölçüm sonucu.

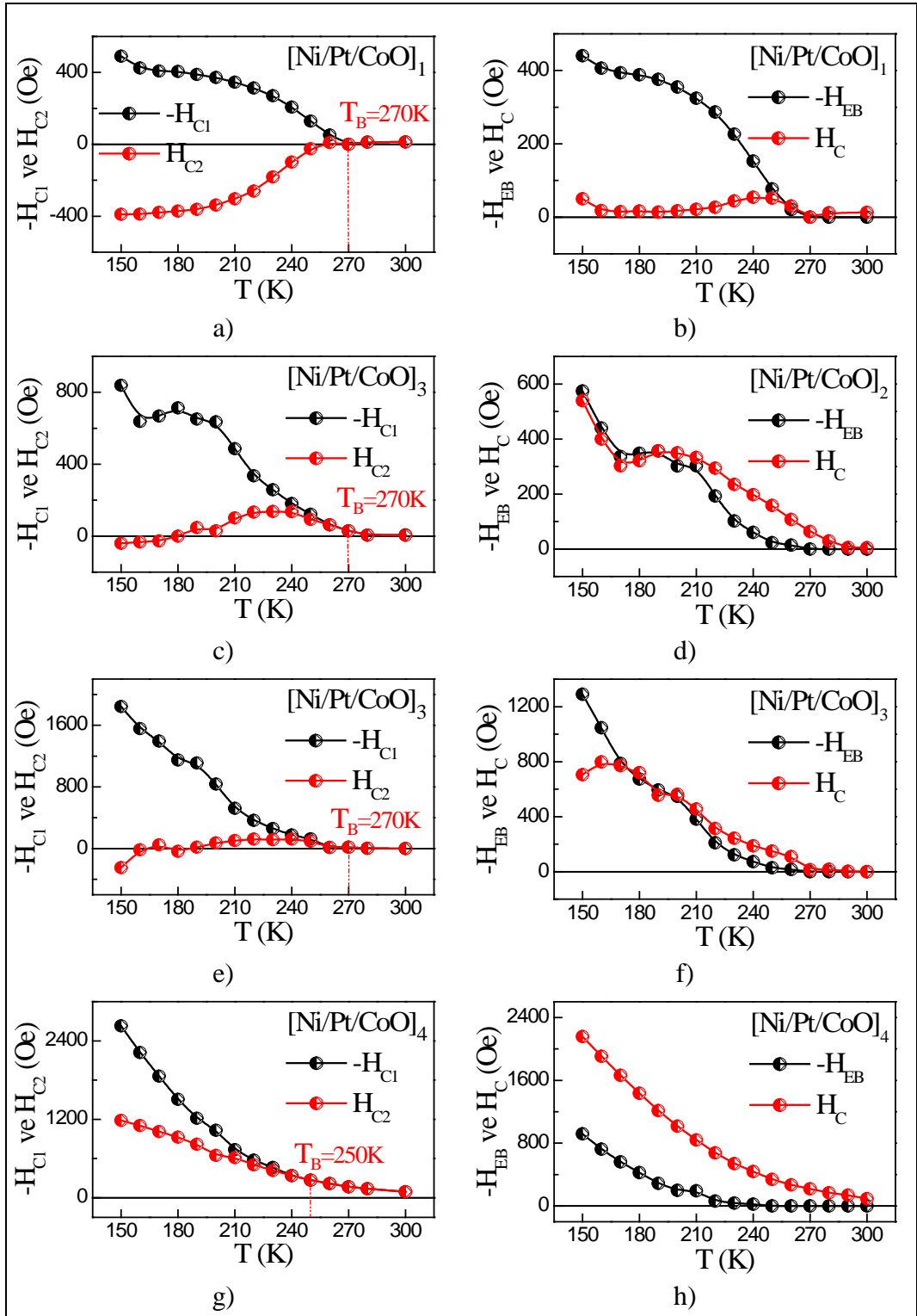
Çok katlı ince filmlerin manyetik özelliklerinin sıcaklığa ve tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak incelenebilmesi için sağ ve sol zorlayıcı alan değerleri okunarak sıcaklığa bağlı olarak çizdirildi. Sağ ve sol zorlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı davranışı Şekil 5.9.a), Şekil 5.9.c), Şekil 5.9.e) ve Şekil 5.9.g)'de gösterilmiştir. Bu grafiklere göre, sıcaklığın azaltılmasına ya da tekrar eden ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının artırılmasına bağlı olarak zorlayıcı alan değerleri genel olarak artış göstermektedir. Bu değerleri denklem (3.4) ve denklem (3.5)'de yerine yazarak zorlayıcı alan ve kaydırma etkisi alan değerleri hesaplandı. Zorlayıcı alan ve kaydırma etkisi alan değerlerinin sıcaklığa bağlı davranışlarının gösterildiği grafikler Şekil 5.9.b), Şekil 5.9.d), Şekil 5.9.f) ve Şekil 5.9.h)'da gösterilmiştir.

Her bir örneğin 150K sıcaklığında alınan M-H eğrilerinin zorlayıcı alan ve kaydırma etkisi alan değerlerini kendi içinde incelediğimizde, X=1, X=2 ve X=3 örneklerinin kaydırma etkisi alan değerinin zorlayıcı alan değerinden büyük olduğu görülmektedir. X=4 örneği ise bunun tam tersi bir durum sergilemektedir.

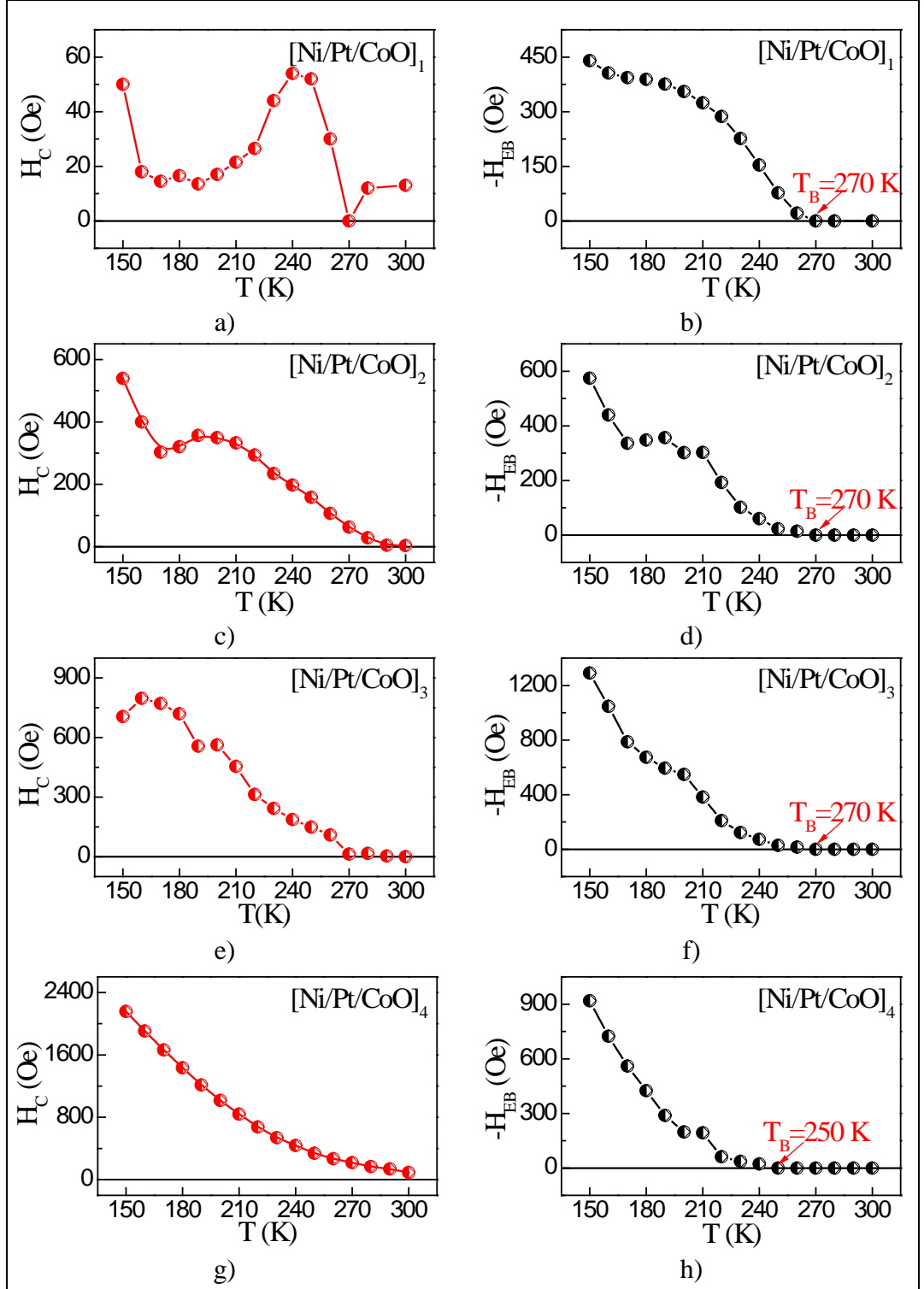
Çok katlı ince filmlerin zorlayıcı alan değeri Şekil 5.10.a), Şekil 5.10.c), Şekil 5.10.e) ve Şekil 5.10.g)'de daha detaylı olarak gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre X=2, X=3 ve X=4 örneklerinde sıcaklığın azaltılmasıyla zorlayıcı alan değeri artmaktadır. X=4 örneği istisnasız bir şekilde bu davranışı sergilerken, X=2 örneğinde 180K ve 170K değerlerinde, X=3 örneğinde ise 280K, 190K ve 150K değerlerinde azalma davranışı gözlenmektedir. Ancak X=1 örneği genel bir davranış sergilemeyip birçok artış azalış davranışı göstermektedir.

Çok katlı ince filmlerin kaydırma etkisi alan değeri Şekil 5.10.b), Şekil 5.10.d), Şekil 5.10.f) ve Şekil 5.10.h)'da daha detaylı olarak gösterilmiştir. Bu grafiklerden kaydırma etkisinin gözlenmeye başladığı sıcaklık değerleri X=1, X=2 ve X=3 için $T_B=270K$ olarak, X=4 için ise $T_B=250K$ olarak belirlenmiştir. T_B sıcaklığının T_N sıcaklığı altında ortaya çıkması antiferromanyetik CoO tabakasının içerisinde büyütme esnasında farklı fazlarının (Co_2O_3 ve Co_3O_4) oluşmasından ve ince filmlerde antiferromanyetik tabakasının hacimsel (bulk) yapıda olmamasından kaynaklanmaktadır [36], [38], [97]. Bu sonuçlara göre X=1, X=3 ve X=4 örneklerinde sıcaklığın azaltılmasıyla kaydırma etkisi alan değeri artmaktadır. Ancak X=2 örneğinde kaydırma etkisi alan değeri sıcaklığın azaltılmasıyla genel olarak artmakta fakat $T=210K$ 'den $T=170$ 'e kadar sıcaklığın azaltılmasıyla zorlayıcı alan değeri artış azalış ve tekrar artış şeklinde değişmektedir. Bu sonuçlara ek olarak

kaydırma etkisi alan değeri tekrar eden ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka sayısının artmasıyla da artmaktadır.



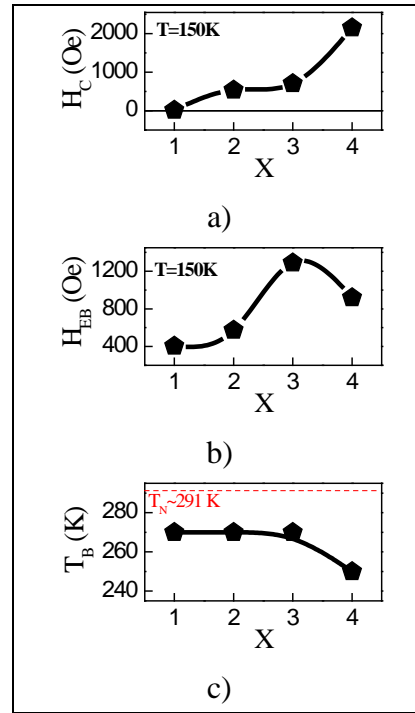
Şekil 5.9: Çok katlı ince filmlere ait H_{C1} ve H_{C2} alan değerlerinin sıcaklığa bağlı davranışı. a) X=1, b) X=2, c) X=3, d) X=4 örneğinin zorlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı davranışı.



Şekil 5.10: Çok katlı ince filmlere ait H_C (kırmızı), $-H_{EB}$ (siyah) değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi. a) $X=1$, b) $X=2$, c) $X=3$, d) $X=4$ örneğinin zorlayıcı alan ve kaydırma etkisi alan değerlerinin sıcaklığa bağlı davranışı.

Çok katlı ince filmlerde ferromanyetik tabakanın birden fazla antiferromanyetik tabakayla etkileşmesi kaydırma etkisi alan değerinin değişmesine neden olmaktadır. Bu durumu açıklamak için FM/AFM tabakaları arasındaki

etkileşmeler incelenmelidir. Şekil 5.1'deki örnek sistemleri incelendiğinde $X=1$ örneği için ferromanyetik Ni tabakası sadece bir tane antiferromanyetik CoO tarafından kontrol edilmektedir. $X=2$ örneğinde ise iki adet ferromanyetik Ni tabakası bulunmaktadır. Alttaşa yakın taraftaki Ni tabakası iki farklı CoO tarafından tutulurken koruyucu tabakaya yakın taraftaki Ni tabakası bir CoO tarafından kontrol edilmektedir. Aynı şekilde $X=3$ örneği için iki taraftan antiferromanyetik CoO ile kontrol edilen ferromanyetik Ni tabaka sayısı 2, tek taraflı kontrol edilen Ni tabaka sayısı 1'dir. $X=4$ örneği için iki taraftan antiferromanyetik CoO ile kontrol edilen ferromanyetik Ni tabaka sayısı 3, tek taraflı kontrol edilen Ni tabaka sayısı 2'dir. Bu durum göz önüne alınarak Şekil 5.11.a) ve Şekil 5.11.b) incelendiğinde, tabaka sayısının artmasıyla birlikte $X=1$ ve $X=3$ kendi aralarında, $X=2$ ve $X=4$ kendi aralarında olmak üzere kaydırma etkisi alanları artmaktadır. Zorlayıcı alan değerlerinin ise tekrar eden tabaka sayısının artmasına ve sıcaklığın azalmasına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Son olarak, engelleme sıcaklıklarının Şekil 5.11.c)'de gösterildiği gibi tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak değiştiği gözlemlendi.



Şekil 5.11: Çok katlı ince filmlere ait H_C (altıgen), $-H_{EB}$ (daire), T_B (kare) değerlerinin tekrar eden tabaka sayısına bağlı davranışı.

Genel olarak tabaka sayısının artması, örnek sisteminde bulunan ferromanyetik Ni manyetik momentlerinin artmasına ve bununla birlikte zorlayıcı alan değerlerinin artmasına sebep olmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, $[\text{Ni/Pt/CoO}]_x$ çok katlı ince filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak incelendi. Çok katlı ince filmler, Si (111) alttaş üzerine MS tekniği ile büyütüldü. Filmlerin yapısal özelliklerini belirlemek için x-ışını kırınımı tekniği, manyetik özelliklerini belirlemek için manyetik-optik Kerr etkisi ve titreşimli örnek manyetometresi teknikleri kullanıldı.

Örneklerin kristal yapısını belirlemek için yapılan x-ışını kırınımı ölçüm sonuçlarından örneklerin çoklu kristal (polycrystalline) yapıda olduğu tespit edildi. Ancak filmlerin polycrystalline yapıda büyümesine rağmen $X=1$, $X=2$ ve $X=3$ örneklerinde zayıf yönelimli Pt (111) ve Pt (222) pikleri gözlemlendi. Bu pikler, alttaşın tek kristal yapıda olması nedeniyle alttaş üzerine büyütülen ilk tabaka olan Pt'nin bir kısmının texture yapıda büyüdüğünü göstermektedir.

Manyetik özellikleri incelemek için ilk olarak filmlerin kolay mıknatıslanma eksenleri belirlendi. Bu amaçla oda sıcaklığında L-MOKE ölçüm geometrisinde açığa bağlı mıknatıslanma eğrileri alındı. Alınan mıknatıslanma eğrilerinin kalıcı mıknatıslanma değerleri açığa bağlı çizdirildiğinde örneklerin oda sıcaklığında anizotropiye sahip olmadığı tespit edildi. Manyetik-optik Kerr etkisi tekniği ile Şekil 5.3.a) ve Şekil 5.3.b)'de gösterilen ölçüm geometrilerinde alınan mıknatıslanma eğrileri normalize edilip her bir örnek için ayrı ayrı çizdirildi. Örneklerin her iki geometrideki normalize mıknatıslanma eğrileri üst üste çizdirildi. Ölçüm sonuçlarına göre örneklerin kolay mıknatıslanma eksenlerinin örnek düzleminde olduğu, fakat $X=1$ ve $X=2$ örneklerinin diğerlerinden farklı olarak bir miktar dik mıknatıslanma katkısına sahip olduğu tespit edildi.

Oda sıcaklığında örnek düzlemine dik ve paralel manyetik alan uygulanmasıyla gerçekleştirilen titreşimli örnek manyetometresi ölçümleri, manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm sonuçları ile benzer sonuçlar verdi. Ancak manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm sonuçlarından farklı olarak $X=4$ örneğinin de bir miktar dik mıknatıslanmaya sahip olduğu gözlemlendi. $X=1$, $X=2$ ve $X=4$ örneklerinde gözlenen dik mıknatıslanmanın Ni tabakalarının altına ve üstüne büyütülen Pt tabakalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Paramanyetik bir malzeme olan Pt'nin Fe, Ni ve Co gibi ferromanyetik malzemelerle alaşım oluşturduğunda manyetik moment kazandığı ve Pt'nin genellikle dik mıknatıslanmaya sebep olduğu da bilinmektedir [35]. Bu nedenle, bu tez çalışmasında incelenen $\text{Pt}/[\text{Ni/Pt/CoO}]_x/\text{Pt/SiO}_2/\text{Si}$ (111) çok katlı

ince filmlerinde Pt'nin ara yüzeyde Ni ile alaşım oluşturmuş olma ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır. X=1, X=2 ve X=4 örneklerinde dik mıknatıslanma gözlenmesi, X=3 örneğinde ise dik mıknatıslanmanın gözlenmemesi bu ihtimalin var olduğu, ancak oldukça küçük olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Kolay mıknatıslanma eksenlerinin tespit edilmesinin ardından kaydırma etkisinin sıcaklığa bağlı davranışı titreşimli örnek manyetometresi tekniği ile incelendi. Her bir örneğin düşük sıcaklık mıknatıslanma eğrilerinden H_{C1} ve H_{C2} zorlayıcı alan değerleri okundu ve sıcaklığa bağlı olarak çizdirildi. H_{C1} ve H_{C2} zorlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı davranışının incelenmesiyle kaydırma etkisinin gözlenmeye başladığı sıcaklık değerleri X=1, X=2 ve X=3 için 270 K olarak belirlenirken, X=4 örneği için bu değer 250 K olarak belirlendi. Elde edilen sonuçlara göre engelleme sıcaklığının tekrar eden tabaka sayısına bağlı olmadığı tespit edildi. Engelleme sıcaklığının bulk yapıdaki antiferromanyetik tabakanın Néel sıcaklığından düşük çıkması antiferromanyetik CoO tabakasının içerisinde farklı oksit fazlarının (Co_2O_3 ve Co_3O_4) oluşmasıyla açıklandı [36], [38], [97]-[99].

H_{C1} ve H_{C2} zorlayıcı alan değerleri denklem (3.4)'te yerine yazılarak mıknatıslanma eğrilerinin H_C değerleri hesaplandı. Bu değerler sıcaklığa ve tabaka sayısına bağlı olarak çizdirildi. Soğutma alanı kullanımından bağımsız bir şekilde H_C değerinin sıcaklığın azalmasına bağlı olarak artması beklenen bir durumdur. Bu davranışı X=2, X=3 ve X=4 örnekleri göstermekte, ancak X=1 örneğinin H_C değeri diğer örneklerden farklı olarak 240 K'den itibaren sıcaklığın düşürülmesiyle azalmaktadır. Zorlayıcı alan değeri (150 K'de), tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak incelendiğinde, tabaka sayısının artışına bağlı olarak H_C değerinin arttığı gözlenmektedir. X=1, X=2 ve X=3 örnekleri için H_C birbirine yakın değerler alırken, X=4 örneğinin değeri diğer örneklere kıyasla oldukça büyüktür.

Son olarak, H_{C1} ve H_{C2} zorlayıcı alan değerleri denklem (3.5)'te yerine yazılarak H_{EB} değerleri hesaplandı. Mıknatıslanma eğrilerinin kayma miktarı (H_{EB}) sıcaklığın azaltılmasıyla genel olarak artış göstermektedir. Kayma miktarı tekrar eden tabaka sayısına bağlı olarak incelendiğinde, X=1, X=2 ve X=3 örneklerinde tabaka sayısının artışına bağlı olarak H_{EB} değeri artış gösterirken, X=4 örneğinde ise azalma gözlenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Noguésa J., Schuller I. K., (1999), "Exchange Bias", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 192 (2), 203-232.
- [2] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1956), "New Magnetic Anisotropy", *Physical Review*, 102 (5), 1413-1414.
- [3] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1957), "New Magnetic Anisotropy", *Physical Review*, 105 (3), 904-913.
- [4] Meiklejohn W. H., (1962), "Exchange Anisotropy—A Review", *Journal of Applied Physics*, 33 (3), 1328-1335.
- [5] Hemstead S. K., Thompson D., (1978), "Unidirectional anisotropy in nickel-iron films by exchange coupling with antiferromagnetic films", *IEEE Transactions on Magnetics*, 14 (5), 521-523.
- [6] Dieny B., Speriosu V. S., Parkin S. S. P., Gurney B. A., Wilhoit D. R., Mauri D., (1991), "Giant magnetoresistive in soft ferromagnetic multilayers" *Physical Review B*, 43 (1), 1297-1300.
- [7] Baibich M. N., Broto J. M., Fert A., Van Dau F., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J., (1988), Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices, *Physical Review Letters*, 61 (21), 2472-2475.
- [8] Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W., (1989), "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange", *Physical Review B*, 39 (7), 4828-4830.
- [9] Lenssen K-M. H., van Kesteren H.W., Rijks Th. G. S. M., Kools J. C. S., de Nooijer M. C., Coehoorn R., Folkerts W., (1997), "Giant magnetoresistance and its application in recording heads", *Sensors and Actuators A: Physical*, 60 (1-3), 90-97.
- [10] Gurney B. A., Speriosu V. S., Wilhoit D. R., Lefakis H., Fontana R. E. Jr., Heim D. E., Dovek M., (1997), "Can spin valves be reliably deposited for magnetic recording applications? (invited)", *Journal of Applied Physics*, 81 (8), 3998-4003.
- [11] Coehoorn R., Kools J. C. S., Rijks Th. G. S. M., Lenssen K.-M. H. (1998), "Giant magnetoresistance materials for read heads", *Philips Journal of Research*, 51 (1), 93-124.
- [12] Nagasaka K., (2009), "CPP-GMR technology for magnetic read heads of future high-density recording systems", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321 (6), 508-511.

- [13] Djama M., Ramli, (2012), “Development of Sensors Based on Giant Magnetoresistance Material Procedia Engineering”, 32 (0), 60-68.
- [14] Schuhl A., Lacour D., (2005), “Spin dependent transport: GMR & TMR”, Comptes Rendus Physique, 6 (9), 945-955.
- [15] Shinjo T., (2014), “Nanomagnetism and Spintronics”, 2nd Edition, Elsevier.
- [16] Kiwi M., (2001), “Exchange bias theory”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 234 (3), 584-595.
- [17] Wu S.M., Cybart S. A., Yi D., Parker J. M., Ramesh R., Dynes R. C., (2013), “Full Electric Control of Exchange Bias”, Physical Review Letters, 110 (6), 067202.
- [18] Radu F., (2005), “Fundamental Aspects of Exchange Bias Effect in AF/F Bilayers and Multilayers”, Doctoral Thesis, Ruhr University.
- [19] Berkowitz A. E., Takano K., (1999), “Exchange anisotropy — a review”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 200 (1–3), 552-570.
- [20] Nogués J., Sorta J., Langlais V., Skumryeva V., Suriñach S., Muñoz J.S., Baró M.D., (2005), “Exchange bias in nanostructures”, Physics Reports, 422 (3), 65-117.
- [21] Malozemoff A.P., (1986), “Random-field model of exchange anisotropy at rough ferromagnetic-antiferromagnetic interfaces”, Physical Review B, 35 (7), 3679-3682.
- [22] Malozemoff A.P., (1988), “Heisenberg-to-Ising crossover in a random-field model with uniaxial anisotropy”, Physical Review B, 37 (13), 7673-7679.
- [23] Dimitrov D.V., Zhang S., Xiao J. Q., Hadjipanayis G. C., Prados C., (1998), “Effect of exchange interactions at antiferromagnetic/ferromagnetic interfaces on exchange bias and coercivity”, Physical Review B, 58 (18), 12090-12094.
- [24] Schulthess T.C., W.H. Butler, (1998), “Consequences of Spin-Flop Coupling in Exchange Biased Films”, Physical Review Letters, 81 (20), 4516-4519.
- [25] Malozemoff A.P., (1988), “Mechanisms of exchange anisotropy (invited)”, Journal of Applied Physics, 63 (8), 3874-3879.
- [26] Schulthess T.C., Butler W. H., (1999), “Coupling mechanisms in exchange biased films (invited). Journal of Applied Physics, 85 (8), 5510-5515.
- [27] Mauri D., Siegmann H. C., Bagus P. S., Kay E., (1987), “Simple model for thin ferromagnetic films exchange coupled to an antiferromagnetic substrate”, Journal of Applied Physics, 62 (7), 3047-3049.

- [28] Koon N.C., (1997), "Calculations of Exchange Bias in Thin Films with Ferromagnetic/Antiferromagnetic Interfaces", *Physical Review Letters*, 78 (25), 4865-4868.
- [29] Kiwi M., López J. M., Portugal R. D., Ramírez R., (1999), "Exchange-bias systems with compensated interfaces", *Applied Physics Letters*, 75 (25), 3995-3997.
- [30] Kiwi M., Mejía-López J., Portugal R. D., Ramírez R., (1999), "Exchange bias model for Fe/FeF₂ : Role of domains in the ferromagnet", *EPL (Europhysics Letters)*, 48 (5), 573.
- [31] Kiwi M., López J. M., Portugal R. D., Ramírez R., (2000), "Positive exchange bias model: Fe/FeF₂ and Fe/MnF₂ bilayers", *Solid State Communications*, 116 (6), 315-319.
- [32] Nowak U., Usadel K. D., Keller J., Miltényi P., Beschoten B., Güntherodt G., (2002), "Domain state model for exchange bias. I. Theory", *Physical Review B*, 66 (1), 014430.
- [33] Miltényi P., Gierlings M., Keller J., Beschoten B., Güntherodt G., (2000), "Diluted Antiferromagnets in Exchange Bias: Proof of the Domain State Model", *Physical Review Letters*, 84 (18), 4224-4227.
- [34] Choo D., Chantrell R. W., Lambertson R., Johnston A., O'Grady K., (2007), "A model of the magnetic properties of coupled ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers", *Journal of Applied Physics*, 101 (9), 09E521.
- [35] Akdoğan N., Yağmur A., Öztürk M., Demirci E., Öztürk O., Erkovan M., (2015), "Interface induced manipulation of perpendicular exchange bias in Pt/Co/(Pt,Cr)/CoO thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*", 373 (0), 120-123.
- [36] Demirci E., Öztürk M., Sınır E., Ulucan U., Akdoğan N., Öztürk O., Erkovan M., (2014), "Temperature-dependent exchange bias properties of polycrystalline Pt_xCo_{1-x}/CoO Bilayers", *Thin Solid Films*, 550 (0), 595-601.
- [37] Demirci E., Öztürk M., Topkaya R., Kazan S., Akdoğan N., Obaida M., Westerholt K., (2012), "Thickness and Temperature Dependence of Exchange Bias in Co/CoO Bilayers", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 25 (8), 2591-2595.
- [38] Öztürk M., Sınır E., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2012), "Exchange bias properties of [Co/CoO]_n multilayers", *Journal of Applied Physics*, 112, (093911).
- [39] Radu F., Etzkorn M., Siebrecht R., Schmitte T., Westerholt K., Zabel H., (2003), "Interfacial domain formation during magnetization reversal in exchange-biased CoO/Co Bilayers", *Physical Review B*, 67 (13), 134409.

- [40] Ambrose, T., Chien C. L., (1998), "Dependence of exchange coupling on antiferromagnetic layer thickness in NiFe/CoO bilayers", Journal of Applied Physics, 83 (11), 6822-6824.
- [41] Cain, W. C., Kryder M. H., (1990), "Investigation of the exchange mechanism in NiFe-TbCo bilayers", Journal of Applied Physics, 67 (9), 5722-5724.
- [42] Kiwi M., (2001), "Exchange bias theory", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 234 (3), 584-595.
- [43] Aköz M. E., "Pt_xCo_{1-x}/CoO Ultra İnce Filmlerde Exchange Bias Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [44] Web 1, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bethe-Slater_curve_by_Zureks.svg, (Erişim Tarihi: 14/18/2015).
- [45] Cullity B. D., G. C. D., (2009), "Introduction to Magnetic Materials, 2nd Edition", Wiley.
- [46] Web 2, <http://www.transtutors.com/questions/the-energy-per-unit-volume-required-to-magnetize-a-ferromagnetic-material-to-saturat-686212.htm>, (Erişim Tarihi: 14/18/2015).
- [47] Web 3, <http://muhendishane.org/wp-content/uploads/2012/07/dizilim1.png>, (Erişim Tarihi: 14/18/2015).
- [48] Kittel C., "Introduction to Solid State Physics, 8th Edition", Wiley.
- [49] Web 4, http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/Question_Mechanical_Properties_28.html, (Erişim Tarihi: 14/18/2015).
- [50] Web 5, http://www.webelements.com/compounds/cobalt/cobalt_oxide.html, (Erişim Tarihi: 08/16/2015).
- [51] Jauch W., Reehuis M., Bleif H. J., Kubanek F., Pattison P., (2001), "Crystallographic symmetry and magnetic structure of CoO", Physical Review B, 64 (5), 052102.
- [52] Web 6, http://ischuller.ucsd.edu/research/exchange_bias.php, (Erişim Tarihi: 08/16/2015).
- [53] O'Grady K., Fernandez-Outon L.E., Vallejo-Fernandez G., (2010), "A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 322 (8), 883-899.
- [54] Radu F., Zabel H., (2008), "Exchange Bias Effect of Ferro-/Antiferromagnetic Heterostructures", Springer, Berlin Heidelberg.

- [55] Berkowitz A., Takano K., (1999), "Exchange anisotropy - a Review", 200 (1-3), 552.
- [56] Berkowitz A. E., Kodama R. H., (2006), "Nanomagnetism: Ultrathin Films, Multilayers and Nanostructures- Exchange anisotropy", Elsevier.
- [57] Stamps R. L., (2000), "Mechanisms for exchange bias", Journal of Physics D: Applied Physics, 33 (23), R247.
- [58] Giri S., Patra M., Majumdar S., (2011), "Exchange bias effect in alloys and compounds", Journal of Physics: Condensed Matter, 23 (7), 073201.
- [59] Iglesias O., Labarta A., Batlle X., (2008), "Exchange Bias Phenomenology and Models of Core/Shell Nanoparticles", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 8 (4), 2761-2780.
- [60] Akdoğan N., (2004), "İnce Filmlerde Manyeto-optik Ölçümler", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [61] Demirci E., (2011), "CoO/Co Manyetik İnce Filmlerde Kaydırma (Exchange Bias) Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [62] Öztürk M., (2011), "Manyetik Malzemelerde Kaydırma (Exchange Bias) Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [63] Yağmur A., (2013), "Çok Katlı İnce Filmlerde Kaydırma (Exchange Bias) Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [64] Parlak U., (2014), "Ni/CoO İnce Filmlerde Exchange Bias Etkisinin Gözlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [65] Zeng H., Sun S., Li J., Wang Z. L., Liu J. P., (2004), "Tailoring magnetic properties of core/shell nanoparticles", Applied Physics Letters, 85 (5), 792-794.
- [66] Armitage J. G. M., Grahama R.G., Lorda J.S., Riedia P.C., Matarb S.F., Demazeaub G., (1992), "Pressure dependence of magnetic properties of Fe₄N and Mn₄N", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 104-107 (Part 3), 1935-1936.
- [67] Deng M.C., Hsu S.L., Chin T.S., (1992), "Acicular γ -Fe₂O₃ Particles Surface-Coated with Barium Ferrite", IEEE Transactions on, 28 (5), 2385-2387.
- [68] Berkowitz A. E., Greiner J. H., (1965), "Exchange Anisotropy and Strain Interactions in the Ni-NiO System", Journal of Applied Physics, 36 (10), 3330-3341.
- [69] Moran T. J., Gallego J. M., Schuller I. K., (1995), "Increased exchange anisotropy due to disorder at permalloy/CoO interfaces", Journal of Applied Physics, 78 (3), 1887-1891.

- [70] Martínez B., Obradors X., Balcells L., Rouanet A., Monty C., (1998), “Low Temperature Surface Spin-Glass Transition in γ -Fe₂O₃ Nanoparticles”, *Physical Review Letters*, 80 (1), 181-184.
- [71] Kodama R.H., Berkowitz A. E., McNiff E. J., Jr., Foner S., (1996), “Surface Spin Disorder in NiFe₂O₄ Nanoparticles”, *Physical Review Letters*, 77 (2), 394-397.
- [72] García del Muro M., Batlle X., Labarta A., (1999), “Erasing the glassy state in magnetic fine particles”, *Physical Review B*, 59 (21), 13584-13587.
- [73] Koksharov Y. A., Gubin S. P., Kosobudsky I. D., Yurkov G. Y., Pankratov D. A., Ponomarenko L. A., (2000), “Electron paramagnetic resonance spectra near the spin-glass transition in iron oxide nanoparticles”, *Physical Review B*, 63 (1), 012407.
- [74] Wang H., Zhu T., Zhao K., Wang W. N., Wang C. S., Wang Y. J., Zhan W. S., (2004), “Surface spin glass and exchange bias in Fe₃O₄ nanoparticles compacted under high pressure”, *Physical Review B*, 70 (9), 092409.
- [75] Manna P.K., Yusuf S. M., Shukla R., Tyagi A. K., (2010), “Coexistence of sign reversal of both magnetization and exchange bias field in the core-shell type La_{0.2}Ce_{0.8}CrO₃ nanoparticles”, *Applied Physics Letters*, 96 (24), 242508.
- [76] Manna P.K., Yusuf S. M., Shukla R., Tyagi A. K., (2011), “Exchange bias in BiFe_{0.8}Mn_{0.2}O₃ nanoparticles with an antiferromagnetic core and a diluted antiferromagnetic shell”, *Physical Review*, 83 (18), 184412.
- [77] Ali M., Adie P., Marrows C. H., Greig D., Hickey B. J., Stamps R. L., (2007), “Exchange bias using a spin glass”, *Nat Mater*, 6 (1), 70-75.
- [78] Binek C., Polisetty S., He X., Berger A., (2006), “Exchange Bias Training Effect in Coupled All Ferromagnetic Bilayer Structures”, *Physical Review Letters*, 96 (6), 067201.
- [79] Ball A. R., Fredrikzeb H., van der Zaag P. J., Jungbluta R., Reindersa A., van der Graaf A., Rekveldt M. Th., (1995), “Neutron reflectometry on an exchange biased Ni₈₀Fe₂₀/Fe₅₀Mn₅₀ bilayer”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 148 (1–2), 46-48.
- [80] Kishimoto M., Sueyoshi T., Hirata J., Amemiya M., Hayama F., (1979), “Coercivity of γ -Fe₂O₃ particles growing iron-cobalt ferrite”, *Journal of Applied Physics*, 50 (1), 450-452.
- [81] Zheng R.K., Liu H., Zhang X. X., Roy V. A. L., Djurišić A. B., (2004), “Exchange bias and the origin of magnetism in Mn-doped ZnO tetrapods”, *Applied Physics Letters*, 85 (13), 2589-2591.

- [82] Huang P. H., Huang H. H., Lai C. H., (2007), "Coexistence of exchange-bias fields and vertical magnetization shifts in ZnCoO/NiO System", Applied Physics Letters, 90 (6), 062509.
- [83] Nogués J., Lederman D., Moran T.J. and Schuller I.K., (1996), "Positive Exchange Bias in FeF₂-Fe Bilayers", Physical Review Letters, 76 (24), 4624-4627.
- [84] Yelon A., (1971), "Interactions in multilayer magnetic films", Physics of Thin Films: Academic Press.
- [85] Öztürk M., Demirci E., Topkaya R., Kazan S., Akdoğan N., Obaida M., Westerholt K., (2012), "Effect of Exchange Bias on Magnetic Anisotropies in Fe/CoO Bilayers", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 25 (8), 2597-2603.
- [86] Jeong W.C., Kim H. J., Park J. H., Jeong C. W., Lee E. Y., Oh J. H., Jeong G. T., Koh G. H., Koo H. C., Lee S. H., Lee S. Y., Shin J. M., Jeong H. S., Kim K., (2004), "A new reference signal generation method for MRAM using a 90-degree rotated MTJ", IEEE Transactions on Magnetics, 40 (4), 2628-2630.
- [87] Smallman R. E., Ngan A. H. W., (2007), "Physical Metallurgy and Advanced Materials, 7th Edition", Elsevier.
- [88] Web 7, <http://www.alyssahale.com/design.htm>, (Erişim Tarihi: 12/18/2015).
- [89] Web 8, <https://yusufbilgen.wordpress.com/2015/01/16/ince-film-teknikleri>, (Erişim Tarihi: 16/01/2015).
- [90] Demirci E., Ö. M., Öcal M. T, Öztürk O., Akdoğan N., (2015), "Investigation of spin canting phenomena in perpendicularly exchange biased Pt/Co/Pt/Cr₂O₃ thin films", Thin Solid Films, DOI: 10.1016/j.tsf.2015.08.020.
- [91] Quantum design, (2009), "VSM option user manual", San Diego.
- [92] Serway R. A., Jewett J. W., (2010), "Physics for Scientists and Engineers with Modern, 8th Edition", Brooks Cole.
- [93] Foner S., (1959), "Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer", Review of Scientific Instruments, 30 (7), 548-557.
- [94] Spaldin N. A., (2003), "Magnetic Materials: Fundamentals and Device Applications, 2nd Edition", Cambridge University Press.
- [95] Gruyters M., Riegel D., (2000), "Strong exchange bias by a single layer of independent antiferromagnetic grains: The CoO/Co model system", Physical Review B, 63 (5), 052401.

- [96] Akdogan N., B. Z. Rameev, L. Dorosinsky, H. Sozeri, R. I. Khaibullin, B. Aktaş, H. Zabel, (2005), "Anisotropy of ferromagnetism in Co-implanted rutile", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17 (34), L359.
- [97] Erkovan M., (2009), "Preparation of Cobalt Thin Films by Sputtering Systems and Its Magnetic Characterization", *Journal of Applied Physics*, 42,101-106.
- [98] Nowak G., Remhof A., Radu F., Nefedov A., Becker H.W., Zabel H., (2007), "Structural and magnetic properties of stoichiometric epitaxial CoO/Fe exchange-bias bilayers", *Physical Review B*, 75, 174405-174412.
- [99] Devasahayam A., Kryder M., (1999), "The dependence of the antiferromagnet/ferromagnet blocking temperature on antiferromagnet thickness and deposition conditions", *Journal of Applied Physics* 85, 5519-5521.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Kırcaali'de (Bulgaristan) doğdu. İlk ve orta öğrenimini Yunuseli Hacı Naciye Kanalcı İÖÖ'da tamamladı. Liseyi Hürriyet Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında Fatih Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında burslu okumaya hak kazandı. 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (yeni adıyla Gebze Teknik Üniversitesi) Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı ve "Dik Miknatıslanmaya Sahip Pt/Co/CoO ve Pt/Co/IrMn İnce Filmlerde Exchange Bias Etkisinin Elektrik Alan ile Manipülasyonu" adlı projede bursiyer araştırmacı olarak yer aldı. Yüksek Lisans eğitim süreci boyunca ulusal ve uluslararası bilimsel toplantılarda birçok bildiri sundu. ADİM FİZİK GÜNLERİ IV Kongresi'nde sunduğu "[Ni/Pt/CoO]_{1,2,3,4} İnce Filmlerde Kaydırma Etkisinin Tabaka Sayısına Bağlı Olarak İncelenmesi" başlıklı bildiriyle Katıhal Anabilim Dalında Poster Birinciliği aldı.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Ulusal ve Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiriler

Sönmez A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Parlak U., Aköz M. E., Öztürk O., Akdoğan N., (2014), “Exchange Bias Properties of $[\text{Ni}/\text{CoO}]_x$ Multilayers”, ICSM2014, 27 April -2 May 2014, Ankara University, Antalya, Turkey (Poster).

Sönmez A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Parlak U., Öztürk O., Akdoğan N., (2014), “Structural and Magnetic Properties of Exchange Biased $[\text{Ni}/\text{CoO}]_n$ Multilayers”, 4th National Crystallographic Meeting with International Participation, 17-19 May, Dicle University, Diyarbakır, Turkey (Poster).

Sönmez A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Parlak U., Aköz M. E., Öztürk O., Akdoğan N., (2014), “Exchange Bias Properties of $[\text{Ni}/\text{CoO}]_x$ Multilayers”, NanoTR10, 17-21 June 2014, Yeditepe University, Istanbul, Turkey (Poster).

Sönmez A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Parlak U., Öztürk O., Akdoğan N., (2014), “Structural and Magnetic Properties of $[\text{Ni}/\text{CoO}]_x$ Multilayers”, 12th SESAME Users' Meeting, 26-27 November, Amman, Jordan (Poster).

Sönmez A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Parlak U., Öztürk O., Akdoğan N., (2015), “ $[\text{Ni}/\text{Pt}/\text{CoO}]_x$ Çok Katlı İnce Filmlerde Kaydırma Etkisinin İncelenmesi”, 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, 26 Aralık, Ankara, Türkiye (Poster).

Sönmez A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Parlak U., Öztürk O., Akdoğan N., (2015), “ $[\text{Ni}/\text{Pt}/\text{CoO}]_x$ Çok Katlı Filmlerde Kaydırma Etkisi”, 4. İzmir Yoğun Madde Fiziği – İzmir Toplantısı, 17 Nisan 2015, İzmir, Türkiye (Poster).

Sönmez A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Parlak U., Öztürk O., Akdoğan N., (2015), “ $[\text{Ni}/\text{Pt}/\text{CoO}]_{1,2,3,4}$ İnce Filmlerde Kaydırma Etkisinin Tabaka Sayısına Bağlı Olarak İncelenmesi”, ADIM FİZİK GÜNLERİ IV Kongresi, 28-29 Mayıs 2015, Kütahya, Türkiye (Poster).

Sönmez A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Parlak U., Öztürk O., Akdoğan N., (2015), “Layer Number Dependence of Exchange Bias in $[\text{Ni}/\text{Pt}/\text{CoO}]_x$ Multilayers”, 11th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-11), 22-25 June 2015, Ankara, Turkey (Poster).