

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Co/CoO TABANLI İNCE FİLMLEDE
EXCHANGE BIAS'IN
ELEKTRİK ALAN İLE KONTROLÜ

MUSTAFA ÖZTÜRK
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2016

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Co/CoO TABANLI İNCE FİLMLERDE
EXCHANGE BIAS'IN
ELEKTRİK ALAN İLE KONTROLÜ

MUSTAFA ÖZTÜRK
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. NUMAN AKDOĞAN

GEBZE
2016

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

ELECTRIC FIELD CONTROL
OF EXCHANGE BIAS
IN Co/CoO BASED THIN FILMS

MUSTAFA ÖZTÜRK

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. NUMAN AKDOĞAN

GEBZE
2016



GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/06/2016 tarih ve 2016/43 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/072016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mustafa ÖZTÜRK'ün tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Numan AKDOĞAN

ÜYE

: Doç Dr. Osman ÖZTÜRK

ÜYE

: Doç. Dr. Sevda AVCI

ÜYE

: Doç. Dr. Kemal ÖZDOĞAN

ÜYE

: Doç. Dr. Mustafa ERKOVAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

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

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Manyetik ince filmlerde elde edilen exchange bias etkisi teknolojik uygulamalara uygunluğu nedeniyle önemli bir çalışma alanıdır. Bunun yanında, teknolojik cihazlarda hedeflenen bir işi daha az enerji tüketerek yapan tasarımlar da ayrı bir önem taşımaktadır. Exchange bias etkisinin kontrolünü elektrik alan ile yapabilmek enerji kullanımı ve cihaz tasarımı açısından büyük bir avantaj sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında exchange biasın elektrik alan ile kontrolünü gerçekleştirebilmek için Si tabanlı alıttaşlar üzerine büyütölen Co/CoO tabanlı manyetik ince filmler üzerinde çalışıldı.

Tez çalışması üç kısımdan oluşmaktadır: temel kavramlar, ölçüm sisteminin kurulumu ve deneyler. İlk kısımda, temel tanımlamalar ile birlikte exchange bias etkisi, mıknatıslanmanın elektrik alan ile kontrolü ve manyeto-transport ölçümlerine ilişkin yapılmış eski çalışmalardan bahsedildi. İkinci kısımda, tez çalışması kapsamında kurulan çok fonksiyonlu transport ölçüm sistemi anlatıldı. Sistemin tasarım, kurulum ve yazılım geliştirme süreçleri detaylandırıldı. Üçüncü kısımda Co/CoO tabanlı çok katlı ince filmlerin ölçümlerinden elde edilen deneysel sonuçlar verildi. Tez çalışmasında kullanılan örnekler Si tabanlı alıttaşlar üzerine saçtırma tekniğı kullanılarak hazırlandı. Örneklerde dik manyetik anizotropiyi artırmak için Pt ve Cr alt ve ara tabakalar kullanıldı. Örneklerdeki tabakaların kalınlık, pürüzlölük ve yoğunluk değerleri X-ışını yansıması tekniğı ile analiz edildi. Örneklerin manyetik özellikleri ise manyeto-optik Kerr etkisi, titreşimli örnek manyetometresi ve anormal Hall etkisi yöntemleri ile araştırıldı.

Bu tez çalışmasında, dik mıknatıslanmaya sahip Co/ CoO tabanlı ince filmlerde elektrik alan altında exchange biasın kontrolü araştırılmıştır. Örneğıe ± 300 V uygulanarak oluşturulan elektrik alan ile 150 K'de exchange bias etkisi önemli ölçüde değıştirilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Antiferromanyetik Malzemeler, Dik Manyetik Anizotropi, Exchange Bias Etkisi, Anormal Hall Etkisi, Çok Fonksiyonlu Transport Ölçüm Sistemi.

SUMMARY

Exchange bias in magnetic thin films is of great interest because of its relevance for technological applications. Besides, the design of a device to perform a targeted job with less energy is of great importance. The control of exchange bias with electric field can provide a significant advantage in terms of energy use and device design. To achieve the electrical field control of exchange bias, Co/CoO based magnetic thin films grown on Si based substrates are investigated.

This thesis is organized in three parts: fundamentals of the concept, the design of a measurement setup, and experiment. In the first part, some of the previous studies for exchange bias, electrical field control of magnetism and magneto-transport measurements are reviewed. In the second part, within the framework of the present thesis a multifunctional transport measurement setup has been constructed. The design, installation and software development procedures of the setup are described. The third part contains the experimental results on Co/CoO based multilayers. Samples are grown on Si based substrates by using sputtering technique. Pt and Cr buffer and interlayers are used to enhance the perpendicular magnetic anisotropy. Thickness, roughness and density values of the layers in the samples are analyzed by using X-ray reflectivity technique. The magnetic properties of the samples are investigated by using the magneto-optical Kerr effect, vibrating sample magnetometer, and anomalous Hall effect techniques.

In the thesis, electric field control of exchange bias in perpendicularly magnetized Co/CoO based thin films has been investigated. Applied electric field with ± 300 V has significantly changed the exchange bias effect at 150 K.

Key Words: Antiferromagnetic Materials, Perpendicular Magnetic Anisotropy, Exchange Bias, Ferromagnetic Materials, Anomalous Hall Effect.

TEŞEKKÜR

Tez ile ilgili çalışmalarım boyunca her türlü destek ve imkânı sunan değerli danışmanım Doç. Dr. Numan Akdoğan'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımda kullandığım örneklerin hazırlanmasında laboratuvar imkânları ile destekleri için Doç. Dr. Osman Öztürk'e, Doç. Dr. Fikret Yıldız'a ve öğrencilerine çok teşekkür ederim.

112T857 numaralı proje çerçevesinde doktora tez çalışmamı destekleyen TÜBİTAK'a ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve sıkıntılarımı paylaşan sevgili eşim Hatice'ye, çocuklarım Muhammed Yasin ile Ömer Taha'ya ayrıca teşekkürü bir borç bilirim. Öğrenim hayatımın tüm aşamaları boyunca beni destekleyen ve hayatımın her anında dualarını her zaman yanımda hissettiğim değerli anne-babamı ve kardeşlerimi de hürmet ve muhabbetle anıyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ	xxii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KAVRAMLAR	3
2.1. Exchange bias Etkisi	3
2.1.1. Tanımı, Keşfi ve Önemi	3
2.1.2. İdeal Meiklejohn ve Bean modeli	3
2.1.3. Engelleme Sıcaklığı	9
2.1.4. Dik Mıknatıslanmaya Sahip Örneklerde Exchange bias Etkisi	10
2.1.5. Negatif ve Pozitif Exchange Bias Etkileri	12
2.1.6. Mıknatıslanmanın ve Exchange Bias'ın Elektrik Alan ile Kontrolü	13
2.1.7. Elektrik Alanla Mıknatıslanmanın Kontrolünün Fiziksel Temelleri	17
2.2. Malzemelerin Elektriksel Direnci	18
2.3. Manyeto-direnç ve Hall Etkileri	22
2.3.1. Ölçüm Geometrileri	23
2.3.2. Normal Manyeto-direnç (OMR)	24
2.3.3. Anizotropik Manyeto-direnç (AMR)	25
2.3.4. Dev Manyeto-direnç (GMR)	27
2.3.5. Tünelleme Manyeto-direnç (TMR)	30
2.3.6. Normal Hall Etkisi (HE)	30
2.2.7. Anormal Hall Etkisi (AHE)	32
2.3.8. Planar Hall Etkisi (PHE)	34
3. TRANSPORT ÖLÇÜM SİSTEMİNİN TASARIMI VE KURULUMU	37
3.1. Cihaz Bileşenleri	38

3.1.1. Sistemin Genel Yapısı	38
3.1.2. Çok Fonksiyonlu Örnek Çubuğu ve Örnek İstasyonu	39
3.1.3. Kontrol Yazılımı ve Arayüz	40
3.1.4. Sıcaklık Sensörü ve Kalibrasyonu	41
3.2. Kontakların Hazırlanması	44
3.2.1. İki Nokta ve Dört Nokta Direnç Ölçüm Teknikleri	44
3.2.2. Örnek Tutucuya Örneklerin Yerleştirilmesi	45
3.3. Test Ölçümleri	47
4. DENEYSEL SONUÇLAR	49
4.1. Pt/Co/Pt/CoO Örneklerde Anormal Hall Etkisi ile Exchange Bias Etkisi Ölçümleri	49
4.1.1. Giriş	49
4.1.2. Örneklerin Hazırlanması	49
4.1.3. Veriler ve Tartışma	52
4.1.3.1. Oda Sıcaklığında ve Yüksek Sıcaklıklarda AHE Ölçümleri	52
4.1.3.2. Düşük Sıcaklıkta Exchange bias Etkisi Ölçümleri	54
4.1.4. Sonuçlar	55
4.2. Pt/Co/Cr/CoO Örneğinde Dik ve Paralel Geometrilere Exchange bias Etkisinin Birlikte Görünmesi	56
4.2.1. Giriş	56
4.2.2. Örneklerin Hazırlanması	57
4.2.3. Veriler ve Tartışma	58
4.2.4. Sonuçlar	65
4.3. Elektrik Alan Altında Yapılan EB Etkisi Ölçümleri	66
4.3.1. Giriş	66
4.3.2. Yalıtkan Hafniyum Dioksit (HfO ₂) ile Yapılan Çalışmalar	66
4.3.3. Yalıtkan Fused Silika (SiO ₂) Alttaşı ile Yapılan Çalışmalar	72
4.3.3.1. AHE ile Sıcaklığa Bağlı EB Ölçümleri	72
4.3.3.2. Elektrik Alan Altında Yapılan Ölçümler	74
4.3.4. Yalıtkan MgO ve PMMA ile Yapılan Çalışmalar	77
4.3.4.1. Sürekli Film Yapısına Sahip MgO'lu Örneklerin Hazırlanması	77
4.3.4.2. Sürekli Film Yapısına Sahip MgO'lu Örneklerin Mıknatıslanma Ölçümleri	78

4.3.4.3. Örneklerin PPMA ile Kaplanması ve Elektrik Alan Altında AHE Ölçümleri	86
4.3.5. Yalıtkan MgO ve Apiezon N Gres ile Yapılan Çalışmalar	87
4.3.6. Sonuçlar	90
4.4. Teknolojik Cihaz Uygulamalarında Kullanılabilecek Antiferromanyetik IrMn Tabanlı Örnekler İçin Uygun Büyütme Şartlarının Araştırılması	92
4.4.1. Giriş	92
4.4.2. Örneklerin Hazırlanması	94
4.4.3. Veriler ve Tartışma	94
4.4.4. Sonuçlar	99
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	120
EKLER	121

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
Ag	: Gümüş
Al ₂ O ₃	: Aliminyum oksit
Ar	: Argon
As	: Arsenik
Au	: Altın
B	: Bor
Co	: Kobalt
CoO	: Kobalt oksit
Cr	: Krom
Cr ₂ O ₃	: Krom (III) oksit
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Hf	: Hafniyum
HfO ₂	: Hafniyum dioksit (Hafnia)
In	: İndiyum
IrMn	: İridyum mangan
MgO	: Magnezyum oksit
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
Pd	: Paladyum
Pt	: Platin
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Fused silika
Ta	: Tantal
Ti	: Titanyum
Zr	: Zirkonyum
A	: Kesit alan
A _{FM}	: FM malzemenin birim atomunun yüzey alanı

\vec{B}	: Dış manyetik alan vektörü
C	: Kondansatör sığası
d	: Kalınlık
\vec{E}	: Elektrik alan vektörü
H	: Manyetik alan
H _C	: Sıfırlayıcı alanlar
H _{EB}	: Exchange bias alanı
H _{FC}	: Soğutma Manyetik Alanı
H _K	: Anizotropi alanı
I	: Akım
\vec{J}	: Akım yoğunluğu
J_{EB}	: Arayüzey değiş-tokuş çiftlenim enerjisi
K_{AF}	: AF tabaka anizotropisi
K_{etkin}	: Etkin anizotropi
K_S	: Yüzey anizotropisi
$K_{tekyönlü}$: Tek yönlü anizotropi
K_v	: Hacim anizotropisi
l	: Uzunluk
mA	: mili amper
M	: Mıknatıslanma
M _{eff}	: Etkin mıknatıslanma
M _R	: Kalıcı mıknatıslanma
M _S	: Doyum mıknatıslanması
μ_0	: Boşluğun geçirgenliği
n	: Taşıyıcı yük yoğunluğu
Oe	: Oe (manyetik alan birimi)
q	: Yük
R	: Direnç
R _A	: Anormal Hall katsayısı
R _{Hall}	: Hall Direnci
ρ	: Özdirenç
σ	: Malzemenin iletkenliği
σ_s	: Gerilme (stress) sabiti

T	: Sıcaklık
T_B	: Engelleme sıcaklığı
T_N	: Néel sıcaklığı
\vec{v}	: Hız vektörü
V	: Voltaj (gerilim)
V_{AHE}	: Anormal Hall voltajı
V_H	: Hall voltajı
V_{PHE}	: Planar Hall voltajı
V_R	: Kalıcı voltaj
V_S	: Doyum voltajı
W	: Watt (güç birimi)
ϵ	: Yalıtkan ortamın geçirgenliği
ϵ_0	: Vakumun geçirgenliği
κ	: Yalıtkanın dielektrik sabiti
ρ_{AHE}	: Anormal Hall özdirenci
ρ_{HE}	: Hall özdirenci
λ	: Bükülmezlik (stiffness) sabiti
AC	: Alternatif akım
AF	: Antiferromanyetik
AHE	: Anormal Hall etkisi
ALD	: Atomik kat biriktirme
AMR	: Anizotropik manyeto-direnç
BDK	: Baskı devre kartı
CIP	: Akım örnek düzleminde
CPP	: Akım örnek düzlemine dik
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
DC	: Doğru akım
DMA	: Dik Manyetik Anizotropi
EB	: Exchange Bias
FM	: Ferromanyetik
GMR	: Dev manyeto-direnç
GPIB	: General purpose interface bus
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi

HDD	: Hard disk
HE	: Hall etkisi
MBE	: Moleküler beam epitaxy
MOKE	: Manyeto-optik Kerr etkisi
MR	: Manyeto-direnç
MRAM	: Manyetik RAM
MTJ	: Manyetik tünelleme eklemleri
NEB	: Negatif exchange bias
NM	: Manyetik olmayan
OMR	: Normal manyeto-direnç
PEB	: Pozitif exchange bias
PHE	: Plenary Hall etkisi
PLD	: Pulsed laser deposition
PM	: Paramanyetik
PMMA	: Polymethyl methacrylate
RAM	: Random-access memory
RF	: Radyo frekans
RT	: Oda sıcaklığı
RTA	: Hızlı ısıtma
STT	: Spin transfer tork
TMR	: Tünelleme manyeto-direnç
VISA	: Virtual instrument software architecture
VSM	: Titreşimli örnek manyetometresi
XPS	: X-ray photoelectron spectroscopy
XRR	: X-ışını yansımaları

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: FM/AF ara yüzeyin şematik gösterimi.	4
2.2: Meiklejohn ve Bean'in Co/CoO parçacıkları için 1956 ve 1957 yıllarında yayınladıkları makalelerde elde ettikleri histeresis eğrileri ve exchange bias etkisi.	5
2.3: İdeal Meiklejohn ve Bean modeline göre EB'ı açıklamak için kullanılan parametrelerin vektör diyagramı.	6
2.4: Exchange bias etkisinde manyetik alan değişimine bağlı olarak FM malzemenin spin yöneliminin şematik gösterimi.	9
2.5: Exchange bias etkisi gözlenen örnek sistemlerinde a) sıfırlayıcı alanların ve b) EB'nin sıcaklığa bağlı değişimi.	10
2.6: Nogués vd.'nin FeF ₂ /Fe örneği ile ilk kez gözlemledikleri pozitif exchange bias etkisi.	12
2.7: Ohno vd.'nin (In, Mn)As ferromanyetik yarıiletkenlerle yaptığı çalışmasında elektrik alan ile boşluk konsantrasyonunun ve mıknatıslanmanın değiştirilmesi.	14
2.8: Ohno vd.'nin (In,Mn)As ferromanyetik yarıiletkenlerle yaptığı çalışmasında, 22.5 K'de ±125 V ile oluşturulan elektrik alan etkisine bağlı olarak, mıknatıslanma (RHall) eğrilerinde meydana gelen değişim.	14
2.9: Maruyama vd.'nin metalik Fe ile yaptıkları ve "Nature Nanotechnology" dergisinde yayınladıkları çalışmada kullanılan örnek sisteminin şematik gösterimi ve uygulanan voltajın histeresis eğrisine etkisi.	16
2.10: Chiba vd.'nin metalik Co ile yaptıkları ve "Nature Materials" dergisinde yayınladıkları çalışmada kullanılan örnek sisteminin şematik gösterimi ve uygulanan voltajın histeresis eğrisine etkisi.	16

2.11:	a) İletken, b) yarıiletken ve c) yalıtkan malzemeler için bant yapısının şematik gösterimi.	20
2.12:	a) İletken, b) yarıiletken ve yalıtkanların genel IV karakteristikleri.	21
2.13:	a) İletken, b) yarıiletken ve yalıtkanların sıcaklığa bağlı direnç davranışı.	22
2.14:	Direnç ölçümlerinde sıklıkla kullanılan ölçüm geometrileri.	24
2.15:	a) Hiçbir dış etkinin olmadığı durumda ve b) manyetik alan uygulandığında elektronun izlediği yol gösterilmektedir. c) Uygulanan manyetik alanın yönüne göre manyetik olmayan metallerde OMR etkisinin davranışı.	25
2.16:	a) Dış manyetik alanın akım ile aynı yönlü olduğu ve b) dış manyetik alanın akıma dik olduğu durumların şematik gösterimleri. c) Dış manyetik alanın dik veya paralel uygulanma durumlarına göre ferromanyetik malzemelerde AMR etkisinin alan ile değişim grafiği.	26
2.17:	a) Piraux vd. tarafından oda sıcaklığında ölçülen Co tellere ait histeresis eğrileri ve b) Aynı örneğe ait 4.2 K'de paralel ve dik geometride ölçülen AMR sonuçları.	27
2.18:	Akım ve manyetik alanın yüzeye paralel olarak uygulandığı geometri için Fe/Cr çok katlı ince filmlerinin dış manyetik alana bağlı direnç ölçümleri.	28
2.19:	a) GMR yapısında herhangi bir dış manyetik alan olmadığında ve b) sisteme manyetik alan uygulandığında mıknatıslanma vektörleri verilmiştir. c) Çok katlı yapılarda GMR etkisinin manyetik alan ile değişimi gösterilmiştir.	29
2.20:	GMR yapılarında a) akımın örnek düzleminde (CIP) ve b) örnek düzlemine dik olarak ilerlediği (CPP) durumlar için ölçüm geometrileri.	29
2.21:	a) Hall etkisi ölçüm geometrisi. b) Hall etkisi nedeniyle oluşan elektrik alan.	31

2.22:	Yarıiletken malzemelerde Hall voltajı ölçümlerinde taşıyıcı tipine göre eğimin durumu.	32
2.23:	a) AHE ölçüm geometrisi. b) AHE ölçümlerinde uygulanan manyetik alan ve mıknatıslanma vektörlerinin şematik gösterimi.	33
2.24:	Anormal Hall etkisi yöntemi ile ölçülen ferromanyetik bir malzemenin histeresis eğrisinin şematik gösterimi.	34
2.25:	Side-jump ve skew scattering şekilleri.	34
2.26:	a) Hall ölçümlerinde manyetik alan ve mıknatıslanma vektörlerinin şematik gösterimi. b) PHE ölçüm geometrisi.	35
3.1:	Çok fonksiyonlu örnek çubuğu, örnek bağlantı istasyonu, ölçüm tankı, harici cihazlar ve bilgisayardan oluşan sistemin genel görünümü.	39
3.2:	a) Çok fonksiyonlu örnek çubuğunun, b) örnek yuvasının ve c) örnek bağlantı istasyonunun fotoğrafları.	40
3.3:	Kontrol yazılımının kullanıcı arayüzü.	41
3.4:	Transport sistemindeki örnek tutucuda bulunan cernox termometrenin direnç-sıcaklık ölçümü.	42
3.5:	Cernox termometrenin direncindeki değişime göre elde edilen deneysel ve teorik sıcaklık eğrileri. İç grafikte deney ile teori arasındaki fark verilmiştir.	44
3.6:	a) İki nokta ve b) dört nokta direnç ölçüm tekniklerinin ve eşdeğer direnç devrelerinin şematik gösterimi.	45
3.7:	Van der Pauw metoduna uygun olarak kontakların köşelerde olduğu ölçüm geometrisinin şematik gösterimi.	45
3.8:	AHE ölçümleri için örneğin tutucu üzerinde konumlandırılması ve kontaklar gösterilmektedir.	46
3.9:	Dik mıknatıslanmaya sahip örnek A'nın VSM (solda) ve AHE (sağda) teknikleri ile ölçülmüş mıknatıslanma eğrisi.	47
3.10:	Dik mıknatıslanmaya sahip Örnek B'nin farklı sıcaklıklarda AHE tekniği ile ölçülmüş EB eğrileri.	48

4.1:	Çalışılan örnek sistemlerinin şematik gösterimi.	50
4.2:	S1 ve S2 örneklerinin XRR ölçümleri ve simülasyon sonuçları.	51
4.3:	AHE ölçümleri için örneklerin tutucuya yerleştirilmesi.	51
4.4:	S1 ve S2 örneklerinin 400 K'de AHE ile ölçülen histeresis eğrileri.	52
4.5:	S1 ve S2 örneklerinin oda sıcaklığında AHE ile alınan histeresis ölçümleri.	53
4.6:	S1 ve S2 örneklerinin oda sıcaklığında MOKE ile dik geometride alınan histeresis ölçümleri.	53
4.7:	S1 ve S2 örneklerinin 150 K'de AHE ile ölçülen ve EB gözlenen histeresis eğrileri.	54
4.8:	Co kalınlığı 4 Å olan S1 örneği için sıfırlayıcı alanların sıcaklığa bağlı değişim grafiği ve engelleme sıcaklığı.	55
4.9:	Çalışılan örnek sisteminin şematik gösterimi.	57
4.10:	a) Düzleme paralel geometride VSM sistemi ile ölçülmüş sıcaklığa bağlı MR/MS davranışı ve b) düzleme dik geometride AHE ile ölçülmüş sıcaklığa bağlı VR/VS davranışı.	59
4.11:	VSM ile paralel (sol sütun) ve AHE ile dik (sağ sütun) geometride farklı sıcaklıklarda kaydedilen normalize edilmiş histeresis ölçümleri.	60
4.12:	VSM ile paralel (sol sütun) ve AHE ile dik (sağ sütun) geometrielerde alınan histeresis ölçümlerinden elde edilen HEB değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.	61
4.13:	Farklı manyetik alanlar altında soğutulup 10 K'de VSM ile örnek düzlemine paralel ve AHE ile örnek düzlemine dik geometrielerde ölçülen histeresis eğrileri.	64
4.14:	VSM ile paralel geometride, AHE ile dik geometride alanda soğutma işleminden sonra 10 K'de ardışık 5'er kez alınan histeresis ölçümleri.	64
4.15:	a) Mıknatıslanmanın kontrolü için yapılan ve Nature Materials dergisinde yayınlanan çalışmanın örnek sistemi. b) Elektrik alan altında EB etkisi çalışması için planladığımız örnek sistemi.	67

4.16:	HfO ₂ 'in yalıtkanlığını test etmek için hazırlanan örnek sisteminin genel şematik gösterimi.	68
4.17:	Si / Pt (35 nm) / HfO ₂ (50 nm) örneği için XRR ölçümleri ve ölçümün simülasyonu.	69
4.18:	HfO ₂ tabakasının elektriksel karakterizasyonu için hazırlanan örneklerin a) şematik gösterimi ve b) fotoğrafı.	70
4.19:	HfO ₂ 'in iki yüzeyinden alınan kontaklar ile ölçülen akım voltaj grafiği.	71
4.20:	AHE ölçümleri için farklı alttaşlara büyütülen Co/CoO tabanlı örnekler gösterilmektedir. İkinci örnekte alttaşın diğer yüzeyindeki altın tabakası elektrik alan uygulamak için hazırlanmıştır.	72
4.21:	AHE ölçümleri için örneğin tutucu üzerinde konumlandırılması gösterilmektedir.	73
4.22:	İki farklı alttaş üzerine büyütülmüş Pt/Co/Pt/CoO/Pt örneklerin farklı sıcaklıklarda AHE ile elde edilen histeresis eğrileri verilmiştir.	74
4.23:	İki farklı alttaş üzerine büyütülmüş Pt/Co/Pt/CoO/Pt örneklerin sıfırlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri gösterilmektedir.	74
4.24:	Elektrik alan altında AHE geometrisi ölçümleri için örneğin tutucu üzerinde konumlandırılması gösterilmektedir. Örneğe elektrik alan uygulamak için 2 ve 7 numaralı noktalardan örneğin üstüne ve altına bağlantı yapılmıştır.	75
4.25:	Farklı elektrik alanlar altında AHE ile ölçülen histeresis eğrileri gösterilmektedir.	75
4.26:	Örneğe uygulanan elektrik alan ile yüklerin Pt ve Au tabakalarında birikmesinin şematik gösterimi.	76
4.27:	Co tabakasının dik mıknatıslanma gösterdiği kalınlığın belirlenmesi için hazırlanan örnekler.	78
4.28:	Pt (4Å) /Co (7 Å, 9 Å, 15 Å, 20 Å) /MgO (30 Å) ince filmlerin dik ve paralel geometrilerde alınan histeresis eğrileri.	80

4.29:	Co ile MgO tabakaları arasına Pt ilave edilmiş örneklerin yapısı.	81
4.30:	Aradaki Pt katman kalınlığının 4 Å olduğu örneğin VSM ile a) paralel ve b) dik geometrilere oda sıcaklığında ölçülen histeresis eğrileri.	82
4.31:	Aradaki Pt katman kalınlığının a) 2 Å ve b) 4 Å olduğu örneklerin AHE ile oda sıcaklığında elde edilen histeresis eğrileri.	82
4.32:	Si (100) ve Si (111) alttaşlara ayrı ayrı büyütülen sürekli film yapısındaki örnekler.	83
4.33:	Si (100) ve Si (111) alttaşlara ayrı ayrı büyütülen sürekli film yapısındaki CoO/Pt/Co/Pt/MgO örneklerin XRR ölçümleri.	83
4.34:	Si (100) alttaş üzerine büyütülmüş örneğin oda sıcaklığında ve manyetik alan altında soğutma sonrası 250 K, 200 K ve 10 K'de ölçülmüş histeresis eğrileri.	84
4.35:	a) EB ve b) sıfırlayıcı alanların sıcaklığa bağlı davranışı.	85
4.36:	Si (111) alttaş üzerine büyütülmüş örneğin a) oda sıcaklığında ve b) manyetik alan altında soğutma sonrası 200 K'de ölçülmüş histeresis eğrileri.	85
4.37:	Geçit malzemesi olarak yalıtkan PMMA ve iletken Al'nin kullanıldığı örneklerin bağlantılarının şematik gösterimi.	86
4.38:	a) Si (100) alttaş üzerine büyütülmüş örneğin manyetik alan altında soğutma sonrası 200 K'de farklı elektrik alanlar altında ölçülmüş histeresis eğrileri. b) Si (111) alttaş üzerine büyütülmüş örneğin oda sıcaklığında farklı elektrik alanlar altında ölçülmüş histeresis eğrileri.	87
4.39:	Geçit malzemesi olarak kullanılan Apiezon N gres ve Cu levha kullanılan örnek sistemi ve bağlantıların şematik gösterimi.	88
4.40:	Yalıtkan olarak Apiezon N gresin kullanıldığı örneğin 150 K'deki voltaj-akım ölçümü.	89
4.41:	a) Manyetik alan altında soğutma sonrası 150 K'de 0 V, -300 V ve +300 V ile oluşturulan elektrik alan altında ölçülmüş histeresis eğrileri. b) Uygulanan geçit voltajına bağlı olarak EB'de meydana gelen değişim.	89

- 4.42: AF malzeme olarak IrMn'in kullanıldığı örnekler gösterilmektedir. İlk 94
iki örnekte IrMn büyütülürken altta sıcaklığı 300°C, diğerlerinde ise
altta sıcaklığı 500°C'de tutulmuştur.
- 4.43: IM-A örneğinin 450 K'de 1 saat boyunca 1T manyetik alan altında 95
tavlandıktan sonra, alan altında soğutulularak, oda sıcaklığında elde
edilen VSM ölçüm sonucu.
- 4.44: IM-B örneğinin tavlama öncesinde ve 400K'de 1 saat boyunca 1T 96
manyetik alan altında tavlandıktan sonra oda sıcaklığında elde edilen
VSM ölçüm sonuçları gösterilmiştir.
- 4.45: IM-C örneğinin tavlama öncesinde ve 400K'de 1 saat boyunca 1T 97
manyetik alan altında tavlandıktan sonra oda sıcaklığında elde edilen
VSM ölçüm sonuçları gösterilmiştir.
- 4.46: IM-C örneğine ait sıfırlayıcı alanlarının sıcaklığa bağlı değişimi 97
gösterilmiştir.
- 4.47: IM-D örneğinin oda sıcaklığında örnek düzlemine paralel (üst solda) 98
ve örnek düzlemine dik (üst sağda) geometrilerde VSM ölçümleri ve
örnek düzlemine dik (altta) geometride AHE ölçümü gösterilmiştir.
- 4.48: IM-E örneğinin oda sıcaklığında örnek düzlemine paralel (üst solda) 99
ve örnek düzlemine dik (üst sağda) geometrilerde VSM ölçümleri ve
örnek düzlemine dik (altta) geometride AHE ölçümü gösterilmiştir.

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Farklı örneklerle yapılan çalışmalarda elektrik alan uygulanarak elde edilen anizotropi değişimleri gösterilmektedir.	15
3.1: Cernox termometrenin sıcaklık-direnç eğrisinin kalibrasyonunda kullanılan sabit değerler.	43
4.1: Si / Pt (35 nm) / HfO ₂ (50 nm) örneği için simülasyonla elde edilen yoğunluk, kalınlık ve pürüzlülük değerleri.	69
4.2: Manyetik alan altında soğutma sonrası 150 K'de 0 V, -300 V ve +300 V ile oluşturulan elektrik alan altında ölçülmüş histeresis eğrilerinin sıfırlayıcı alan ve EB değerleri.	90

1. GİRİŞ

Bir ferromanyetik (FM) malzeme ile antiferromanyetik (AF) malzeme birbirleri ile temas halindeyken Néel sıcaklığının (T_N) üstünden manyetik alan altında soğutulmasıyla ferromanyetik malzemenin histeresis eğrisinde meydana gelen kayma exchange bias (EB) etkisi olarak tanımlanır [1]. Bu etkinin ilk önemli uygulamaları bilgisayarlarda yüksek yoğunluklu depolama aygıtları, okuyucu kafalar, spin vanaları ve MRAM gibi teknolojik cihazlarla başlamıştır [2-6]. Teknolojik uygulamalar için düşük enerji tüketimli, güçlü, kontrol edilebilir ve sonuçları tahmin edilebilir exchange bias etkisine olan ihtiyaç, araştırmacıları bu etkinin bilimsel temellerini çok daha iyi anlamaya yönelik çalışmalara motive etmektedir [7, 8]. Araştırmalarda temel hedef hem olayın fiziksel nedenlerini ortaya koyabilmek, hem de yeni uygulamalara zemin hazırlayacak ürünler geliştirebilmektir.

Exchange bias etkisi ile ilgili yapılan çalışmalar iki önemli başlık altında toplanabilir [1, 9-11]. Bunlardan birincisi manyetik özellikleri iyi bilinen malzemelerle ara yüzeyde gerçekleşen fiziksel olayların temellerini anlamaya yönelik model ve formüller geliştiren çalışmalardır. İkincisi ise teknolojik uygulamalar için oda sıcaklığının çok üstünde de çalışabilecek cihazlara yönelik farklı manyetik malzemelerin kombinasyonları ile ilgili testlerdir. Yapılacak yeni çalışmalar ile daha önce düşünülmeyen sistemlerin ve farklı tekniklerin ortaya konulması olaya farklı bir bakış açısı kazandıracak ve bilimsel nedenlerden yeni cihazlara doğru uzanan çözüm yolları sunacaktır.

EB etkisinin yanında, son yıllarda mıknatıslanmanın elektrik alanla kontrolü konusu da çok önemli hale gelmiştir. Bu amaçla birçok farklı örnek sistemi çalışılmıştır [7, 8, 12-34]. Özellikle anormal Hall etkisi (AHE) kullanılarak yapılan ölçümlerde elektrik alan altında ferromanyetik Co metalinin manyetik özelliklerinin değiştiği yayınlanmıştır [7, 30, 35, 36]. Dolayısıyla sabit sıcaklıkta sadece uygulanan elektrik alan etkisiyle Co metalinde manyetik faz geçişi oluşturulmuştur.

Bu tez çalışmasında, FM metal ile AF tabakalar arasındaki EB etkileşmesinin elektrik alan ile manipüle edilmesi ve AHE yöntemiyle ölçülmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Bu maksatla örnek düzlemine dik yönde EB etkisi gösteren FM/AF örnek sistemleri büyütülerek farklı elektrik alanlar altında AHE ölçümleri yapılmıştır. Uygulanan elektrik alan ile FM tabakanın mıknatıslanmasının değişimi

amaçlanmış, dolayısıyla FM ve AF tabakalar arasındaki exchange bias etkileşmesi manipüle edilmeye çalışılmıştır. Sabit sıcaklıkta exchange bias etkisinin elektrik alan ile değiştirilebilmesi spintronik alanında yeni cihaz tasarımlarına yol açabilecektir. Çünkü mıknatıslanma kontrolünü sıcaklık değişimi yerine elektrik alan ile yapabilmek enerji kullanımını ve cihaz tasarımları açısından kolaylık sağlayacaktır.

Tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Bundan sonraki ikinci bölümde öncelikle EB ve AHE'yi anlamak üzere genel kavramların tanımları üzerine duruldu ve bu konularda daha önceden yapılmış çalışmalar değerlendirildi.

Tezin üçüncü bölümünde elektrik alan altında AHE ölçümlerini yapabilmek için tasarımını ve kurulumunu yaptığımız ölçüm sisteminin özellikleri anlatıldı. Ölçüm sisteminin cihaz bileşenleri ve bu bileşenlerin kontrolü için geliştirdiğimiz yazılım hakkında bilgi verildi. Ayrıca, sistemin diğer ölçüm yöntemleri ile kıyaslanmasına imkân sağlayan test ölçümleri anlatıldı.

Tezin dördüncü bölümünde deneysel sonuçlara yer verildi. Tez çalışmasının deneysel kısmı üç temel adımdan oluşmaktadır. İlk aşamada dik mıknatıslanmaya sahip ferromanyetik malzemeler hazırlandı ve AHE ölçümleri ile histeresis eğrileri ölçüldü. İkinci olarak AHE ölçümleri sonucunda seçilen uygun örnekler elektrik alan uygulanabilecek şekilde cihaz yapısına dönüştürüldü. Son aşamada elektrik alan altında EB etkisinin kontrolü üzerine çalışmalar yapıldı.

Tezin son bölümünde ise tüm sonuçlar değerlendirildi ve gelecekte bu alanda yapılacak çalışmalara yönelik öneriler sunuldu.

2. GENEL KAVRAMLAR

2.1. Exchange bias Etkisi

2.1.1. Tanımı, Keşfi ve Önemi

Ferromanyetik malzeme ile antiferromanyetik malzemedan oluşan bir örnek sistemi antiferromanyetik malzemenin Néel sıcaklığının üstünden başlanarak manyetik alan altında soğutulursa, ölçümlerde ferromanyetik malzemenin miknatislanma eğrisinde manyetik alan ekseninde kayma meydana gelmektedir [37]. Malzemelerin ara yüzeyinde oluşan manyetik çiftlenim (coupling) ile değiş-tokuş (exchange) etkileşiminin rol oynadığı bu kayma, exchange bias etkisi veya değiş-tokuş exchange bias etkisi olarak adlandırılmaktadır [38]. Bu etki, FM malzemenin miknatislanmasını uygulanan soğutma alanı doğrultusunda, belirli bir yönde sabitlediği için tek-yönlü anizotropi olarak da isimlendirilmektedir [37, 39].

Exchange bias etkisi, ilk kez 1956 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından, üzerinde çalıştıkları kobalt (Co) parçacıkların bir kısmının doğal olarak oksitlenmesi ve kobalt oksit (CoO) oluşumu neticesinde, düşük sıcaklık çalışmalarında gözlenmiştir [37, 39]. İlk kez gözlenmesinin üzerinden geçen zamana rağmen etkinin mikroskopik temelleri günümüzde hâlâ tam olarak belirlenemediğinden daha iyi anlaşılabilmesine yönelik bilimsel çalışmalar devam etmektedir.

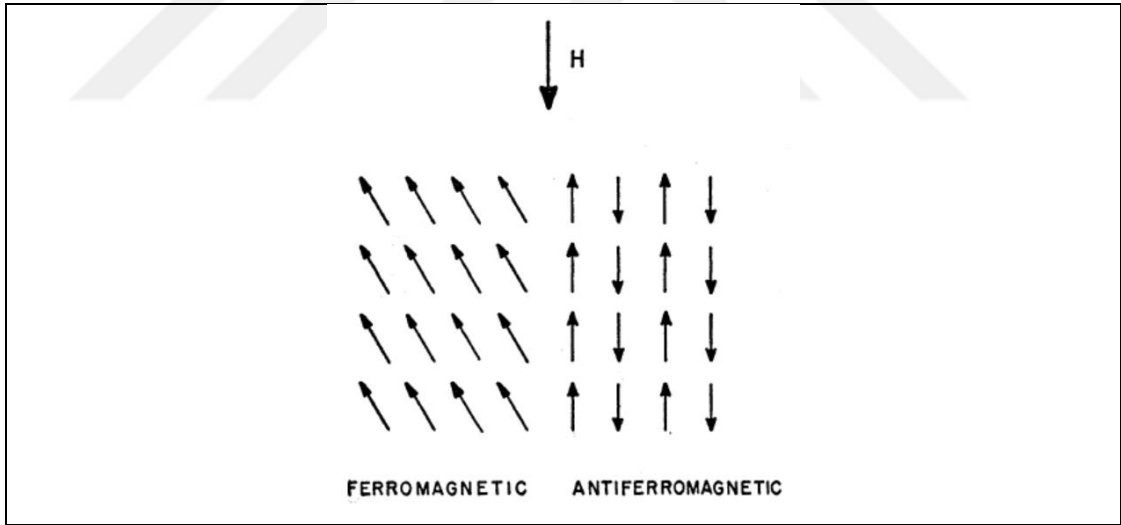
Exchange bias etkisi, yüksek yoğunluklu depolama aygıtları, okuyucu kafalar, spin vanaları, MRAM ve sensör gibi teknolojik uygulamalarda kullanılabilir [2-6, 40]. Ancak teknolojik cihazlarda düşük enerji tüketimli, güçlü, kontrol edilebilir ve sonuçları tahmin edilebilir uygulamalar için bu etkinin bilimsel temellerinin çok daha iyi anlaşılması büyük önem arz etmektedir [7, 8].

2.1.2. İdeal Meiklejohn ve Bean modeli

Meiklejohn ve Bean'in 1956 yılında exchange bias etkisini keşfinden sonra, ilerleyen yıllarda etkinin oluşumuna ilişkin birçok model öne sürüldü [1, 37, 39, 41-48]. Bu modellerde ara yüzeylerdeki eşleşmiş-eşleşmemiş spinler, ara yüzeye dik veya paralel domen duvarı oluşumları, ara yüzey pürüzlülüğü gibi mekanizmalar tartışıldı. Ancak anizotropiler, kristal yapısı, ara yüzey pürüzlülüğü, ara yüzey spin

düzenleri ve manyetik domenler gibi parametrelerin çokluğu nedeniyle, henüz hiçbir model exchange bias etkisi alanının (H_{EB}) değişmesi ve sıfırlayıcı alanların (H_C) artması gibi sonuçları tam olarak açıklayabilmek için yeterli değildir.

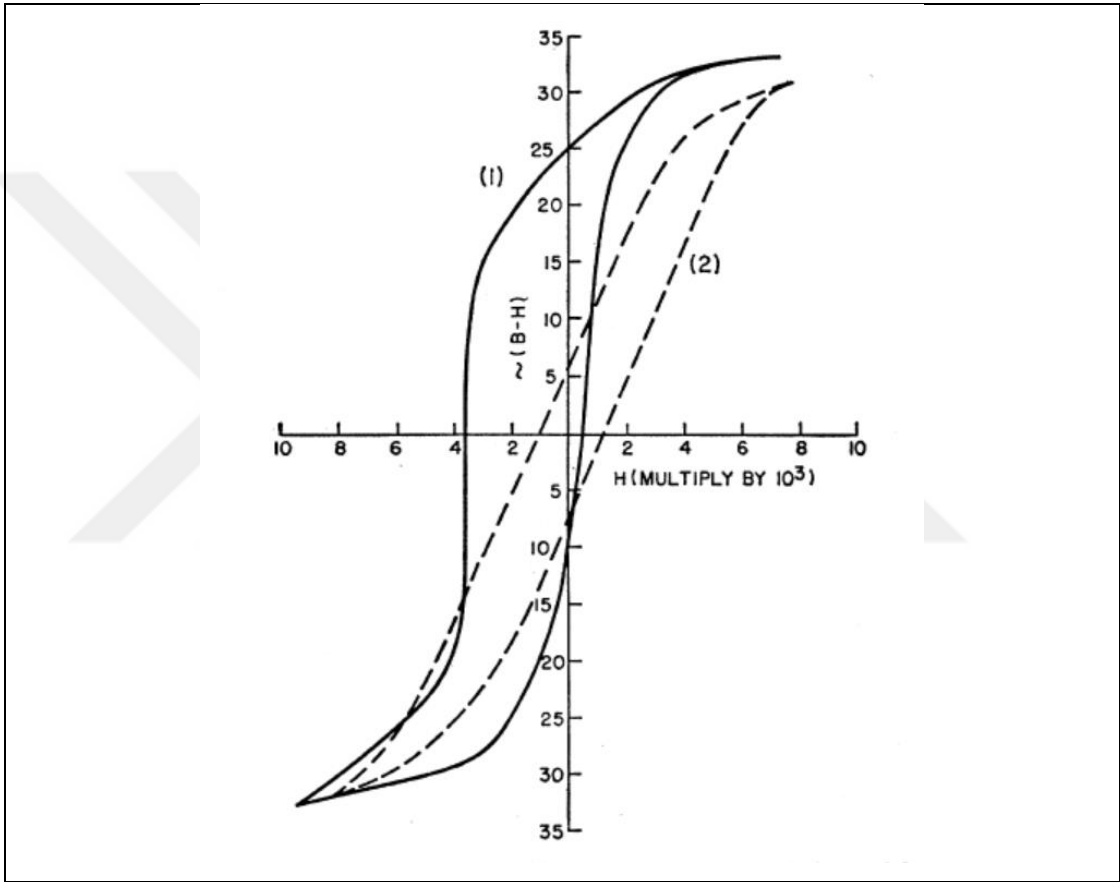
Meiklejohn ve Bean'ın etkiyi açıklamak için atomik olarak pürüzsüz ara yüzey ve eşleşmemiş spinler üzerinden ortaya sürdükleri teorik varsayımlar, eşleşmiş ara yüzeylerin ve amorf yapıların kullanıldığı sonraki deneysel çalışmaların sonuçlarını açıklamaya yetmiyor olsa da, etkinin temel olarak tanımlanması açısından büyük önem arz etmektedir [1, 39, 41, 47]. Meiklejohn ve Bean'ın Şekil 2. 1'de gösterilen modelde [39] ortaya koyduğu varsayımlara göre FM/AF arayüzeyi pürüzsüz ve tekli domen yapıdadır. Bununla birlikte AF tabakanın ara yüzeyde eşleşmemiş spinleri bulunmaktadır, yani ara yüzeyde net manyetik momente sahiptir. Ayrıca bu modele göre FM malzemenin mıknatıslanması uygulanan alana bağlı olarak komple bir şekilde dönmekte, ancak AF malzemenin spinleri FM malzemenin spinlerinin dönmesi esnasında sabit kalmaktadır. Ara yüzeyde ise AF ve FM malzemeler birbirleri ile değiş-tokuş etkileşimi ile çift oluşturmaktadır.



Şekil 2. 1: FM/AF ara yüzeyin şematik gösterimi.

Bu modele göre exchange bias etkisinin oluşabilmesi için FM malzemenin Curie sıcaklığı (T_C), AF malzemenin Néel sıcaklığının (T_N) üzerinde olmalıdır. Ayrıca malzeme manyetik alan altında T_N 'nin üzerindeki bir sıcaklıktan soğutulmalıdır. Meiklejohn ve Bean'ın Co/CoO parçacıkları ile çalışırken elde ettikleri histeresis eğrisi Şekil 2. 2'de gösterilmiştir [37, 39]. Buna göre, (2) numaralı kesikli çizgilerle gösterilen ölçüm manyetik alan uygulamaksızın 77 K'e soğutma

sonrasında, (1) numaralı düz çizgi ile gösterilen ölçüm 10 kOe manyetik alan altında soğutma sonrasında alınmıştır. Manyetik alan uygulamaksızın yapılan soğutma sonrası elde edilen histeresis eğrisi simetrik iken, manyetik alan altında soğutma sonrası elde edilen histeresis eğrisi uygulanan alanın tersi yönünde 1600 Oe'lik bir kayma göstermiştir. Bu çalışmalarda farklı soğutma alanları da denenmiştir. Soğutma alanı 70 kOe'e kadar artırılmış ancak kayma değerinde önemli bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 2. 2: Meiklejohn ve Bean'in Co/CoO parçacıkları için 1956 ve 1957 yıllarında yayınladıkları makalelerde elde ettikleri histeresis eğrileri ve exchange bias etkisi.

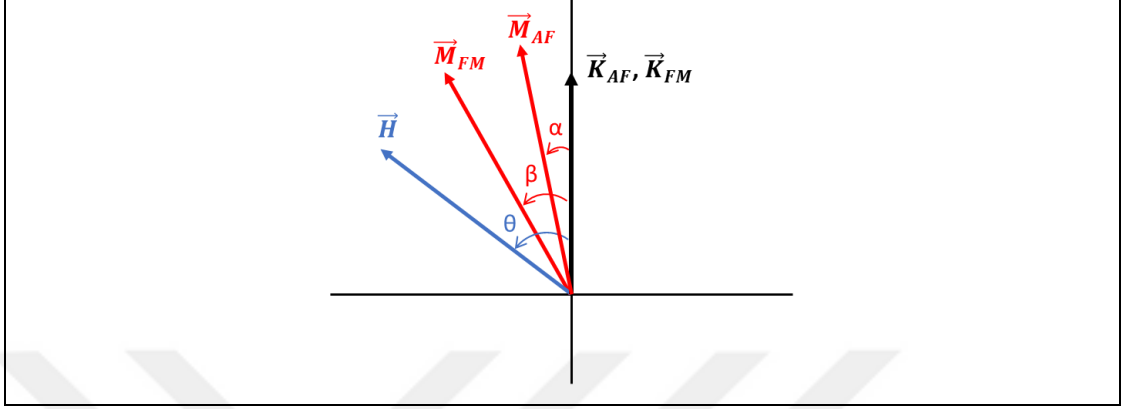
Kesikli çizgilerle gösterilen eğri (2) alansız soğutmadan sonra, düz çizgilerle gösterilen eğri (1) 10 kOe alan altında soğutulduktan sonra alınmıştır.

Exchange bias etkisi alanı (H_{EB}) değeri histeresis eğrisinin merkezinin orijinden kayma miktarıdır. Bu tanıma göre H_{EB} ve ortalama sıfırlayıcı alan (H_C) histeresis eğrilerinin sıfırlayıcı alan değerlerinden;

$$H_{EB} = \frac{H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (2.1)$$

$$H_C = \frac{-H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanabilir [1].



Şekil 2. 3: İdeal Meiklejohn ve Bean modeline göre EB'ı açıklamak için kullanılan parametrelerin vektör diyagramı.

İdeal Meiklejohn ve Bean modeline göre FM ve AF malzemeler ara yüzeyde değiş-tokuş etkileşmesi ile çift oluşturmaktadır. Bu etkileşim için J_{EB} olarak sembolize edilen birim alanda ara yüzey değiş-tokuş çiftlenim enerjisi tanımlanmaktadır. Buradan Şekil 2. 3'te gösterilen vektör diyagramına göre [39, 49] sistemin toplam enerjisi;

$$E = -\mu_0 H M_{FM} d_{FM} \cos(\theta - \beta) + K_{FM} d_{FM} \sin^2(\beta) + K_{AF} d_{AF} \sin^2(\alpha) - J_{EB} \cos(\beta - \alpha) \quad (2.3)$$

şeklinde yazılabilir [1, 49]. Bu eşitlikte ilk terim Zeeman enerjisi, ikinci terim FM tabakanın anizotropi enerjisi, üçüncü terim AF tabakanın anizotropi enerjisi, dördüncü terim ise exchange bias etkisine ilişkin değiş tokuş çiftlenim enerjisidir. Burada, H uygulanan manyetik alan, M_{FM} FM tabakanın mıknatıslanması, d_{FM} FM malzemenin kalınlığı, K_{FM} FM tabakanın anizotropi sabiti, θ uygulanan manyetik alan ile K_{FM} arasındaki açı, β FM tabakanın mıknatıslanması ile K_{FM} arasındaki açı, α ise AF tabakanın mıknatıslanması ile K_{AF} arasındaki açıdır. Soğutma esnasında uygulanan manyetik alan ile ölçüm esnasında uygulanan manyetik alan aynı yönlü olduğundan denklem içerisinde ilk terimde bulunan θ değeri sıfır olur [49]. Sistemin

toplam enerjisinin denge durumunu (minimum enerji) bulmak için denklem (2.3)'ün α ve β 'ya göre birinci türevleri alınıp, denklem sıfıra eşitlenebilir.

Denklem (2.3)'deki ara yüzey değiş-tokuş enerjisi (J_{EB}) AF malzemenin anizotropisi (K_{AF}) ve kalınlığı (d_{AF}) ile ilişkilidir. İlk olarak denklem (2.3)'ün α 'ya göre türevi alınıp, denklem sıfıra eşitlendiğinde;

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \frac{K_{AF}d_{AF}}{J_{EB}} \sin(2\alpha) - \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad (2.4)$$

ifadesi elde edilir. Buradan exchange bias gözlenebilmesi için kritik durum ifadesi çıkarılabilir. Buna göre;

$$\begin{cases} \frac{K_{AF}d_{AF}}{J_{EB}} \geq 1, \text{ EB görülür} \\ \frac{K_{AF}d_{AF}}{J_{EB}} < 1, \text{ EB görülmez ancak } H_C \text{ artar} \end{cases} \quad (2.5)$$

durumları ile karşılaştırılır. Yani exchange bias etkisinin görülebilmesi için AF malzemenin anizotropi ve kalınlık değerlerinin matematiksel çarpımının ara yüzey değiş-tokuş enerjisinden büyük ya da eşit ($K_{AF}d_{AF} \geq J_{EB}$) olması gerekmektedir. Bu bağıntıya göre, deneysel şartlar sağlandığında çok ince AF'nin kullanıldığı bir filmde exchange bias etkisi görünmüyorsa, AF malzemenin kalınlığının artırılması gerekmektedir. $K_{AF}d_{AF} < J_{EB}$ olduğu durumlarda ise H_{EB} değeri sıfır olsa da sıfırlayıcı alanların (H_{C1} ve H_{C2}) arttığı görülür [49].

Sistemin toplam enerjisinin denge durumunu bulmak için ikinci yöntem olarak denklem (2.3)'ün β 'ya göre türevi alınıp, denklem sıfıra eşitlendiğinde;

$$\frac{\partial E}{\partial \beta} = \mu_0 H M_{FM} d_{FM} \sin(\beta) + K_{FM} d_{FM} \sin(2\beta) + J_{EB} \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad (2.6)$$

ifadesi bulunur. Burada denklem (2.6)'da verilen eşitlik, $\beta = 0$ ve π için çözümlerse sıfırlayıcı alanlar [49];

$$H_{C1} = -\frac{2K_{FM}d_{FM} + J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} d_{FM}} \quad (2.7)$$

$$H_{C2} = \frac{2K_{FM}d_{FM} - J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} d_{FM}} \quad (2.8)$$

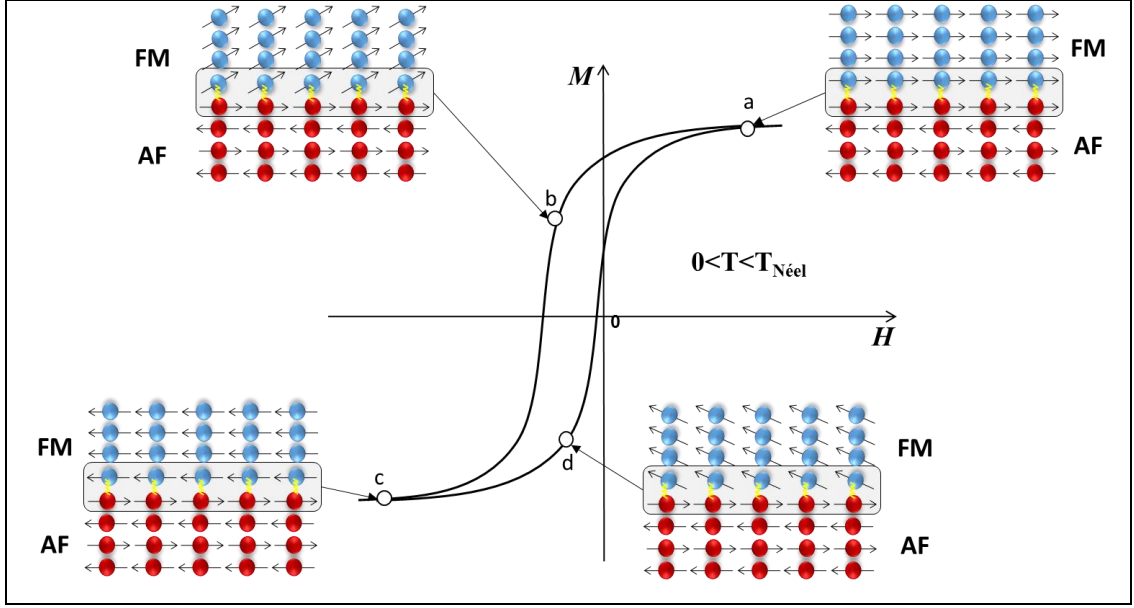
olarak bulunur. Denklem (2.1) ve (2.2)'deki ifadeler, burada denklem (2.7) ve (2.8)'de bulunan sıfırlayıcı alanlara göre yeniden düzenlenirse H_{EB} ve H_C ;

$$H_{EB} = -\frac{J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} d_{FM}} \quad (2.9)$$

$$H_C = \frac{2K_{FM}}{\mu_0 M_{FM}} \quad (2.10)$$

elde edilir. Burada denklem (2.9) exchange bias etkisinin beklenen değerini ifade etmek için kullanılan en temel formüldür [1, 49].

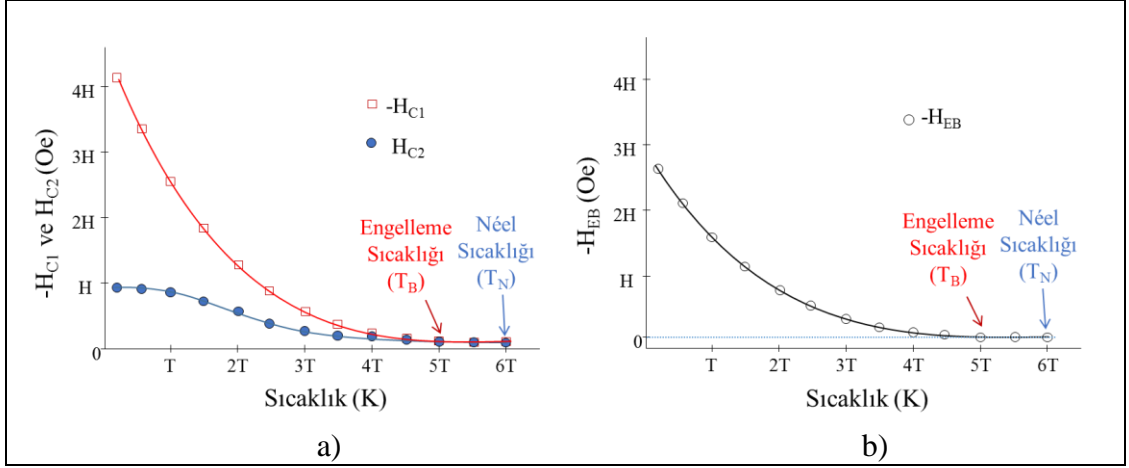
İdeal Meiklejohn ve Bean modeline göre exchange bias etkisi olayında FM malzemenin spin yönelimlerinde meydana gelen değişim şematik olarak Şekil 2. 4'teki gibi gösterebilir [38]. Şekilde temsili olarak histeresis eğrisi verilen örnek T_N 'nin üzerindeki bir sıcaklıktan T_N 'nin altındaki bir hedef sıcaklığa pozitif manyetik alan altında soğutulmuştur. Hedef sıcaklıkta elde edilen histeresis eğrisi soğutma alanının tersi yönünde yani negatif yönde kaymıştır. Buna göre şekilde gösterilen (a) noktasında, FM'nin spinleri ile AF'nin ara yüzeyindeki eşleşmemiş spinler soğutma manyetik alanı yönündedir. (b) noktası civarına gelindiğinde ise FM malzemenin spinleri, yönü değişen alandan etkilenmiş ancak AF'nin etkisinden de kurtulamamıştır. FM malzemenin spinlerinin negatif tarafa tamamen yönelebilmesi için (c) noktasında görüldüğü gibi negatif yönde büyük bir manyetik alana ihtiyaç vardır. Tekrar pozitif tarafa yönelim ise, AF malzemenin de katkısıyla, (d) noktasında görüldüğü gibi daha kolaydır. Malzemeye uygulanan manyetik alan henüz negatif yönünde iken, AF malzemenin etkisiyle FM malzemenin mıknatıslanması bir miktar pozitif yöne dönmeye başlamıştır. Bu sebeple, Sıfırlayıcı alan değerleri $|H_{C1}| > |H_{C2}|$ olacak şekilde birbirlerinden farklı hale gelmektedir ve H_{EB} gözlenmektedir.



Şekil 2. 4: Exchange bias etkisinde manyetik alan değişimine bağlı olarak FM malzemenin spin yöneliminin şematik gösterimi.

2.1.3. Engelleme Sıcaklığı

Exchange bias etkisinin gözlenebilmesi için AF malzemenin soğutma alanı doğrultusunda AF düzene sahip olması gerekmektedir. AF malzemeler T_N sıcaklığının üzerinde paramanyetik (PM) düzende, T_N sıcaklığının altında ise AF düzendedir. Bu nedenle FM/AF örnek sistemi manyetik alan altında soğutularak T_N sıcaklığının altındaki bir hedef sıcaklığına getirilir. Exchange bias etkisi bazı nedenlerden dolayı hemen T_N sıcaklığı ile birlikte başlamayabilir [50, 51]. Bu sebeple, exchange bias etkisinin görüldüğü sıcaklık engelleme sıcaklığı (T_B) olarak adlandırılır. Bu durum Şekil 2. 5'te temsili gösterim ile anlatılmıştır. Exchange bias etkisi ölçümlerinde genellikle düşük sıcaklıklarda sıfırlayıcı alan değerleri (H_{C1} ve H_{C2}) şeklindeki gibi birbirlerinden farklı iken, sıcaklık arttıkça değerler birbirlerine yaklaşmakta ve T_B 'ye gelindiğinde H_{C1} ve H_{C2} değerleri birbirlerine eşitlenmektedir [50, 51].



Şekil 2. 5: Exchange bias etkisi gözlenen örnek sistemlerinde a) sıfırlayıcı alanların ve b) EB'nin sıcaklığa bağlı değişimi.

2.1.4. Dik Mıknatıslanmaya Sahip Örneklerde Exchange bias Etkisi

Exchange bias etkisi, spin vanaları ve manyetik tünelleme eklemleri (MTJ) ve manyetik sensörler başta olmak üzere teknolojik uygulamalarda önemli bir yere sahiptir [52, 53]. Exchange bias etkisi görülen örneklerle yapılan çalışmaların birçoğunda FM malzemenin mıknatıslanması örnek düzleminde [1, 50, 51, 54]. Ancak mıknatıslanmanın örnek düzleminde olduğu durumlarda, örneğin kenarlarında mıknatıslanma bükülmeye (curling) gittiğinden, örneklerin boyutu (boy/en oranı) yüksek tutulmak zorundadır [53]. Ayrıca günümüz teknolojisinde kullanılan manyetik depolama aygıtlarında amaç daima daha küçük alanlarda daha büyük hafıza bölgeleri oluşturmak olduğundan, mıknatıslanmanın örnek düzlemine dik geometride olması önem arz etmektedir [55].

Film yüzeyine dik geometride exchange bias etkisi sürekli [52, 56] veya nanoyapılı [57] çok katlı ince filmlerle yapılan birçok çalışmada gözlenmiştir. Dik exchange bias etkisinin görülebilmesi için FM malzemenin mıknatıslanmasının örnek düzlemine dik olması, yani dik manyetik anizotropiye (DMA) sahip olması gerekmektedir. Hacim (bulk) halinde örnek düzleminde mıknatıslanmaya sahip bazı ferromanyetik ince filmler, birkaç atomik tabaka kalınlığına düşürüldüğünde yüzey anizotropi etkilerinden dolayı örnek düzlemine dik mıknatıslanmaya sahip olma eğilimindedirler [58, 59]. Bu şekilde çok ince FM filmlerde yüzey anizotropileri baskın hale geldiğinden, komşu atomların niteliği de çok büyük bir önem kazanır. Komşu tabaka olarak manyetik olmayan (NM) malzemelerin kullanıldığı bir

NM₁/FM/NM₂/AF örnek sistemi ile örnek düzlemine dik exchange bias etkisi oluşturulmak istendiğinde FM malzemenin etkin anizotropisi (K_{etkin});

$$K_{etkin} = K_V + 2\pi M_S^2 + \frac{2K_S}{d_{FM}} + \frac{3}{2}\lambda\sigma_s + K_{AF} + K_{tekyönlü} \quad (2.11)$$

şeklindeki terimlerle ifade edilebilir. Burada K_V , M_S , K_S , λ , σ_s , K_{AF} ve $K_{tekyönlü}$ sembolleri sırasıyla hacim anizotropisini, FM malzemenin doyum mıknatıslanmasını, yüzey anizotropisini, bükülmezlik (stiffness) sabitini, gerilme (stress) sabitini, AF tabaka anizotropisini ve tek yönlü anizotropiyi ifade etmektedir [52]. $2K_S$ ile verilen ifade FM malzemenin her iki komşusundan kaynaklanan yüzey anizotropilerinin toplamıdır. Denklemden ifade edildiği gibi etkin anizotropi FM malzemenin kalınlığı (d_{FM}) ile ters orantılıdır. Aşırı ince FM filmlerde yüzey anizotropisi etkin anizotropinin değerinin ve işaretinin belirlenmesinde baskın hale gelmektedir. Denklem (2.11) ile verilen etkin anizotropinin işareti negatif olduğunda mıknatıslanma örnek düzlemine paralel, pozitif olduğunda ise örnek düzlemine diktir.

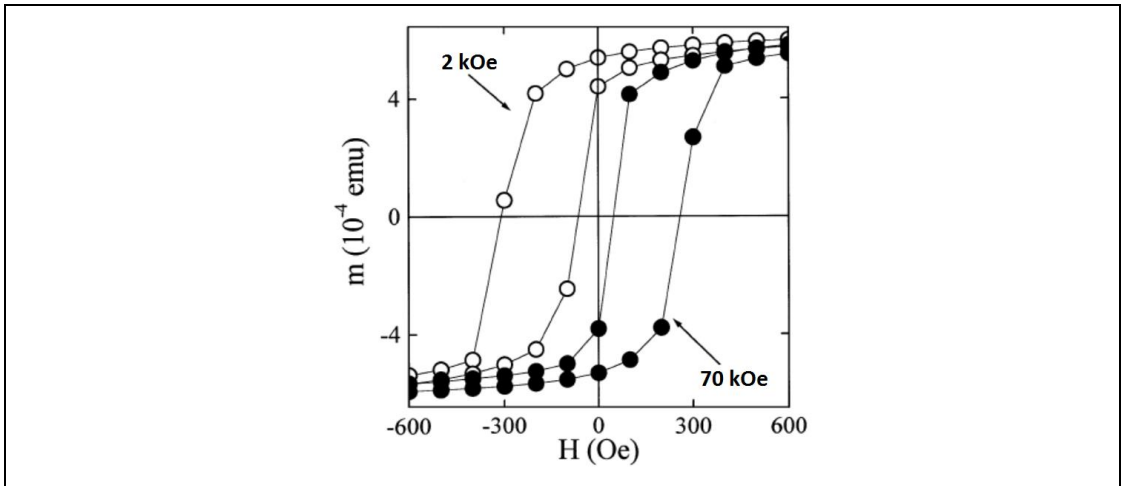
İlk prensiplere (*first principles*) göre yapılan teorik hesaplamalarda, güçlü spin-yörünge etkileşmesi nedeniyle Co'nun serbest tek bir tabaka olması durumunda bile mıknatıslanmasının örnek düzlemine paralel olacağı ifade edilmektedir [60, 61]. Bu nedenle Co ince filmi ile yapılan çalışmalarda Pt [62-65] ve Pd [65-67] gibi NM malzemeler alt ve/veya ara tabaka olarak kullanılarak dik mıknatıslanma oluşturulmaktadır. Co/Pt sistemlerinde Pt 5d ile Co 3d seviyeleri arasında ara yüzeyde gerçekleşen hibritleşme güçlü spin-yörünge etkileşmesi nedeniyle DMA'yı etkin hale gelmektedir [61].

Dik manyetik anizotropiye sahip Pt/Co iki katlı veya tekrarlı çok katlı ince filmlerde exchange bias etkisinin araştırılmasına yönelik farklı AF malzemeler kullanılarak yapılmış birçok çalışma mevcuttur [52, 55, 56, 68-77]. Pt/Co çalışmalarında dik anizotropi için Co kalınlığı 3-10 Å aralığında, ara tabaka olarak kullanılan Pt kalınlığı ise maksimum 10 Å civarında tutulmaktadır [52]. Co kalınlığının fazla olması mıknatıslanmanın örnek düzlemine inmesine sebep olurken, Pt kalınlığının fazla olması FM/AF arasında artan mesafe nedeniyle exchange bias etkisini azaltmaktadır [52].

2.1.5. Negatif ve Pozitif Exchange Bias Etkileri

Exchange bias etkisi kısaca, T_N 'nin altına kadar manyetik alan altında soğutulan FM/AF örneğin, histeresis eğrisinde meydana gelen kayma olarak tanımlanmaktadır. Soğutma alanı ile aynı ekseninde gerçekleşen bu kayma, soğutma alanı ile ters veya aynı yönlü olabilir. Soğutma alanının tersi yönünde gerçekleşen kayma negatif exchange bias (NEB), soğutma alanı ile aynı yönde gerçekleşen kayma ise pozitif exchange bias (PEB) olarak tanımlanmaktadır [1, 78].

İlk keşfinden bu yana exchange bias etkisi konusunda yapılan birçok çalışmada genel olarak kayma soğutma alanının tersi yönünde yani negatif yönde gözlenmiştir. Ayrıca yine birçok örnekte uygulanan soğutma alanının büyüklüğü exchange bias etkisinin büyüklüğünde çok fazla bir öneme sahip olmamaktadır [1]. Ancak PEB görülen örneklerde soğutma alanının büyüklüğü önemli hale gelmektedir [49, 78-82]. Bazı örnekler düşük manyetik alan altında soğutulduğunda NEB etkisi gösterirken, yüksek manyetik alan altında soğutulduklarında PEB etkisi gösterirler. Şekil 2. 6'da verilen Nogués vd.'nin çift katlı FeF_2 (90 nm)/Fe (13 nm) filmi ile yaptıkları çalışmada 2 kOe'lik alanda soğutma sonrası 10 K'de yapılan ölçümlerde NEB görülürken (açık daireler), 70 kOe'lik alanda soğutma sonrası histeresis eğrisinde PEB görülmüştür (siyah daireler) [78].



Şekil 2. 6: Nogués vd.'nin FeF_2/Fe örneği ile ilk kez gözlemledikleri pozitif exchange bias etkisi. 10 K'de yapılan ölçümlerde 2 kOe'lik alanda soğutma sonrası NEB görülürken (açık daireler), 70 kOe'lik alanda soğutma sonrası PEB görülmüştür (siyah daireler).

PEB'i açıklamak için bazı modeller geliştirilmiştir [1, 44, 78]. Tüm modellerde bahsedilen temel unsur, FM/AF tabakaların ara yüzeyindeki etkileşimin hangi tür olduğu ile ilgilidir. Eğer iki tabaka ara yüzeyindeki çiftlenim (*coupling*) ferromanyetik ise NEB gözlenirken, antiferromanyetik çiftlenim durumunda uygulanan dış manyetik alanın artmasına bağlı olarak PEB görülebilmektedir. Antiferromanyetik çiftlenim durumunda düşük alanlarda, çiftlenim antiferromanyetik olarak kalmaya devam edecektir. Ancak uygulanan manyetik alan yeterince yüksek olduğunda soğutma esnasında ara yüzeydeki spinlerin etkileşimi ferromanyetik hale gelecektir. Bu sayede, soğutma sonrasında ölçülen histeresis eğrisinde PEB görülmektedir. Bazı ölçümlerde, PEB ve NEB birlikte görülür [80, 82, 83]. Bu durum histeresis eğrilerinde basamaklı yapı oluşmasına sebebiyet verir. PEB ve NEB'in birlikte görülmesi, AF malzemenin momentlerinin soğutma esnasında domen oluşumu gibi kısmi yönelimlerden kaynaklanmaktadır[82].

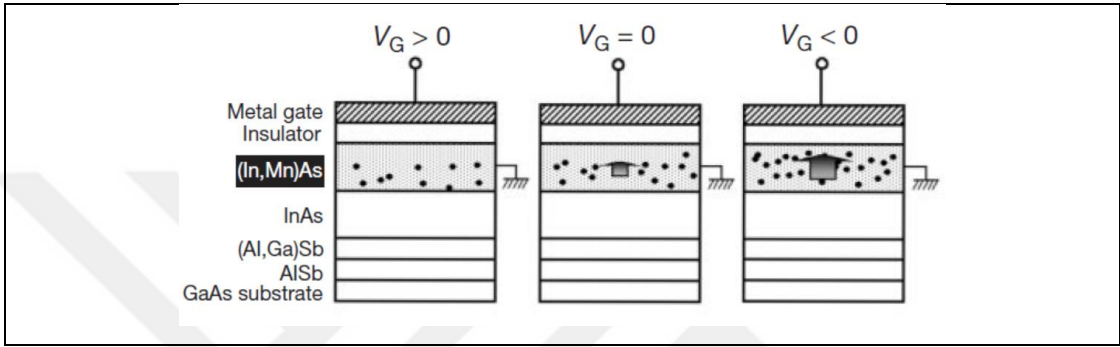
Co/CoO kullanılarak yapılan çalışmalarda düşük sıcaklıklarda genelde negatif exchange bias etkisi görülürken, birkaç çalışmada engelleme sıcaklığı civarında düşük miktarlarda da olsa pozitif exchange bias etkisi görülmüştür [84, 85]. Bu durum, AF taneciklerin düşük anizotropileri nedeniyle ara yüzeyde manyetik düzensizlik oluşturması ile açıklanmıştır [85].

2.1.6. Mıknatıslanmanın ve Exchange Bias'ın Elektrik Alan ile Kontrolü

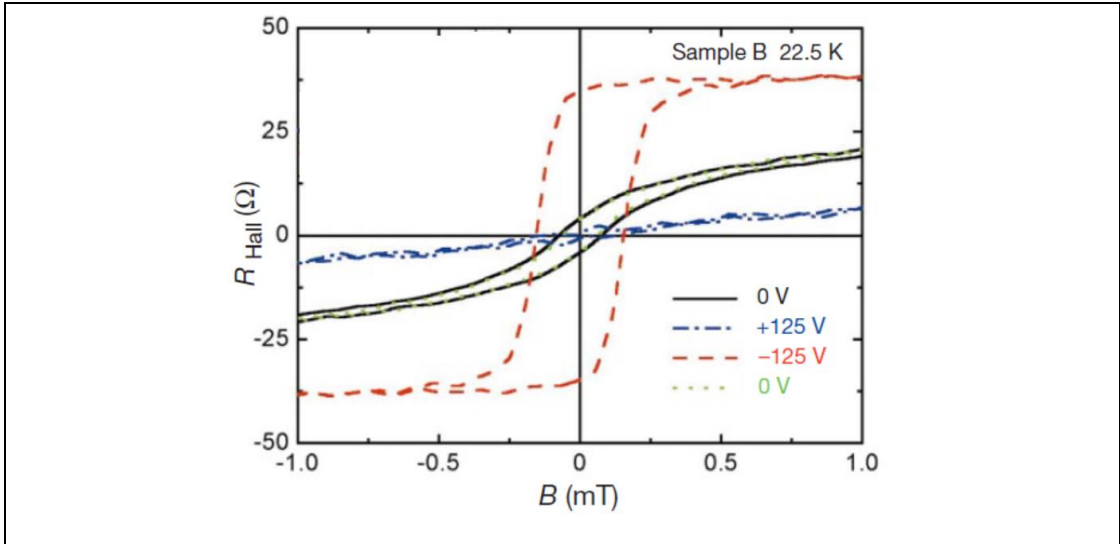
Ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanmasının yönlendirilebilmesi için kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıs gibi manyetik alan kaynakları eski zamanlardan beri kullanılmaktadır. Günümüzde spintronik alanındaki gelişmelerle birlikte spin polarize akımlar [86, 87] veya lokal ısıtma [88] gibi yeni tekniklerle de mıknatıslanma değiştirilebilmektedir. Yeni nesil manyetik depolama cihazlarında bir yandan işlem hızının artırılması diğer yandan güç tüketimini azaltmak büyük önem arz etmektedir [26]. Mıknatıslanmanın elektrik alan ile kontrolü bu konuda en iyi adaylardan biri olarak görülmektedir [7, 31]. Çünkü statik elektrik ile, hem az enerji harcayarak hem de mevcut entegre devre teknolojisine uyumlu bir şekilde, cihazların mıknatıslanmasının kontrolü yapılabilecektir [8, 89].

Ferromanyetizmanın elektrik alan ile kontrolüne yönelik çalışmalar Ohno vd.'nin 2000 yılındaki *Nature* dergisinde yayınlanan makaleleri ile başlamıştır [89].

Bu çalışmada bir ferromanyetik yarıiletken olan (In,Mn)As kullanılmıştır. Şekil 2. 7’de şematik olarak gösterilen örnek sistemi ve uygulanan voltaja bağlı durumlar için, 22.5 K sıcaklığında, Şekil 2. 8’de verilen histeresis eğrileri elde edilmiştir [89]. Uygulanan pozitif voltaj (+125 V) ile birlikte histeresis eğrisi paramanyetik faza kaymış, buna karşın uygulanan negatif voltaj (-125 V) ile birlikte histeresis eğrisi daha belirgin hale gelmiştir. Bu sayede elektrik alan değişimiyle ferromanyetik malzemenin mıknatıslanması kontrol edilebilmiştir.



Şekil 2. 7: Ohno vd.’nin (In, Mn)As ferromanyetik yarıiletkenlerle yaptığı çalışmasında elektrik alan ile boşluk konsantrasyonunun ve mıknatıslanmanın değiştirilmesi. Uygulanan negatif voltaj ile (In, Mn)As içerisindeki boşluk konsantrasyonu ve mıknatıslanma artırılmaktadır.



Şekil 2. 8: Ohno vd.’nin (In,Mn)As ferromanyetik yarıiletkenlerle yaptığı çalışmasında, 22.5 K’de ± 125 V ile oluşturulan elektrik alan etkisine bağlı olarak, mıknatıslanma (R_{Hall}) eğrilerinde meydana gelen değişim.

Düşük sıcaklıkta yapılan bu çalışmanın ardından, yarıiletkenler [12-15], piezoelektrik malzemelerin kullanıldığı hibrit sistemler [16-20], multiferroik özellikli

yapılar [21-24] ve magnetoelektrik malzemeler [25, 26] kullanılarak, spintronik uygulamalar için Curie sıcaklığının, sıfırlayıcı alanların, manyetik momentin veya manyetik anizotropinin elektrik alan ile değiştirilebildiği gösterilmiştir.

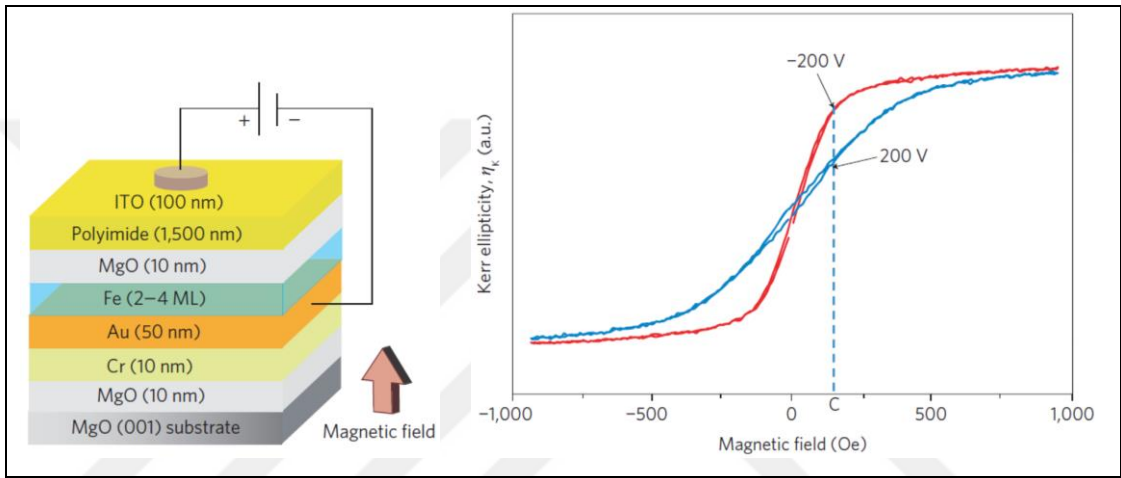
Metalik ferromanyetik malzemelerde manyetik anizotropilerin elektrik alanla kontrolü ise Weisheit vd.'nin çok ince FePt ve FePd filmleri ile yaptıkları çalışma ile başlamıştır [27]. Sonraki yıllarda da Fe [28, 29], Co [7, 30, 31], CoFe [32, 33] veya CoFeB [8, 34] gibi metal yapılarda mıknatıslanma özellikleri elektrik alan ile kontrol edilebilmiştir. Fowley vd.'nin yaptıkları çalışmada bazı metallerdeki mıknatıslanmanın ve anizotropilerin elektrik alan altındaki değişimi Tablo 2. 1'de özetlenmiştir [34].

Tablo 2. 1: Farklı örneklerle yapılan çalışmalarda elektrik alan uygulanarak elde edilen anizotropi değişimleri gösterilmektedir. İkinci sütun anizotropi değişiminin işaretini, üçüncü sütun sıfırlayıcı alanların değişim miktarını ve dördüncü sütun ölçümlerin yapıldığı sıcaklıkları göstermektedir.

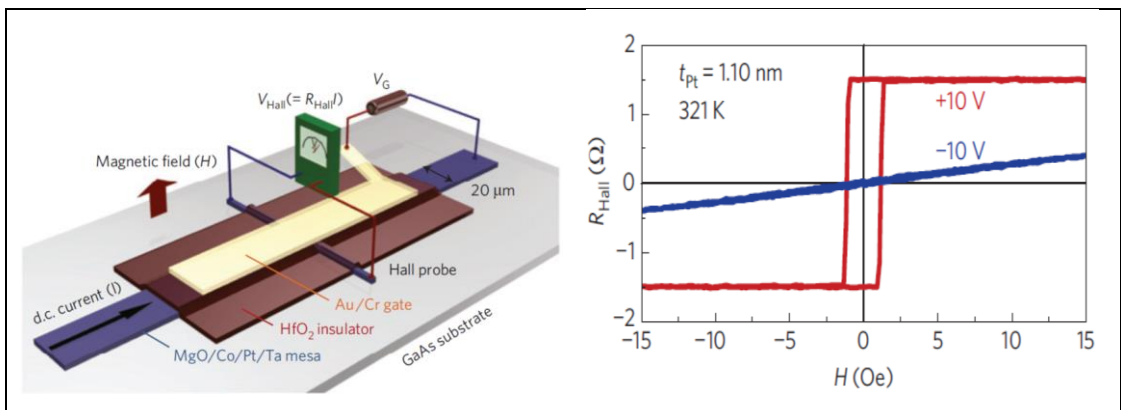
System	ΔK_{eff}	ΔH_c	T
2 nm L_{10} FePt	↓	4.5%	300 K
2 nm L_{10} FePd	↑	1%	300 K
Au/Fe (0.58 ML)/MgO	↓	—	300 K
Au/Fe ₈₀ Co ₂₀ (0.48 ML) /MgO	↓	5%	300 K
CoCrPt	↓	30%	300 K
MgO/Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀ (0.6 nm)/Pd	↑	0.7%	12 K
Ta/Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀ (1.16 nm)/MgO	↓	40%	300 K
MgO/Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀ (1 nm)/Pt	↓	1%	12 K

Maruyama vd.'nin metalik Fe ile [28] ve Shiota vd.'nin FeCo ile [33] yaptıkları çalışmalarda, 1500 nm kalınlığında polyimide, Chiba vd.'nin metalik Co ile [7] yaptığı çalışmada ise 50 nm kalınlığında HfO₂ kullanılmıştır. Chiba vd.'nin yaptıkları bazı başka çalışmalarda ise yalıtkan tabaka yerine, iyonik sıvı film kullanılmıştır [30, 31, 35, 36]. Maruyama vd.'nin metalik Fe ile yaptıkları çalışmanın şematik gösterimi ile, uygulanan voltajın histeresis eğrisine etkisi Şekil 2. 9'da verilmiştir [28]. Bu çalışmada elektrik alanının etkisinin görülebilmesi için ± 200 V uygulanmıştır. Verilen şekle göre uygulanan voltaj pozitif olduğunda histeresis eğrisi paramanyetik bir hale gelirken, negatif voltaj uygulandığında ferromanyetik histeresis eğrisi daha belirgin bir hale gelmektedir. Maruyama vd.'nin bu çalışmasında uygulanan elektrik alan ile manyetik anizotropinin dik hale

getirilebilmesi hedeflenmiştir. Chiba vd.'nin metalik Co ile yaptıkları çalışma da ise, uygulanan -10 V histeresis eğrisinin paramanyetik hale gelmesine, +10 V histeresis eğrisinin belirginleşmesine neden olmuştur (Şekil 2. 10) [7]. Chiba vd.'nin yapmış olduğu çalışmanın önemi ferromanyetik bir metalde daha önceki çalışmalardan farklı olarak sıfırlayıcı alanlar ve anizotropiden ziyade ferromanyetik faz geçişinin kendisinin elektriksel kontrolünün yapılabildiği olmasıdır. Bu durum, ileride düşük güç tüketimli oda sıcaklığında çalışabilen yeni nesil manyetik cihazların yapılabilmesi için çok önemli bir adımdır.



Şekil 2. 9: Maruyama vd.'nin metalik Fe ile yaptıkları ve “*Nature Nanotechnology*” dergisinde yayınladıkları çalışmada kullanılan örnek sisteminin şematik gösterimi ve uygulanan voltajın histeresis eğrisine etkisi.



Şekil 2. 10: Chiba vd.'nin metalik Co ile yaptıkları ve “*Nature Materials*” dergisinde yayınladıkları çalışmada kullanılan örnek sisteminin şematik gösterimi ve uygulanan voltajın histeresis eğrisine etkisi.

Mıknatıslanmanın elektrik alan ile kontrolüne ek olarak, literatürde EB'nin de elektrik alan ile kontrolüne yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, EB'yi elektrik alanla kontrol edebilmek için multiferroik [22-24], magnetoelektrik [26, 90, 91] veya piezoelektrik [17] malzemeler kullanılmıştır. Ancak, EB FM ve AF tabakaların ara yüzeyinde gerçekleşen bir etki olduğundan direk FM'nin elektrik alan ile kontrolü ile EB de değiştirilebilir. Bu tez çalışmasında, FM metal malzemeler kullanılarak FM/AF sistemlerde EB etkisinin elektrik alanla kontrolünün yapılabilmesi amaçlanmıştır.

2.1.7. Elektrik Alanla Mıknatıslanmanın Kontrolünün Fiziksel Temelleri

Elektrik alan ile mıknatıslanmanın kontrolüne yönelik yapılan çalışmalarda ince filmler paralel iletken levhalar gibi düşünülmektedir. Arasında yalıtkan bulunan karşılıklı iki iletken levha için, levhalara uygulanan voltaj (V) ile levhalar arasında oluşan elektrik alan (E) arasındaki ilişki;

$$E = \frac{V}{d_{yalıtkan}} = \frac{(Volt)}{(m)} \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada “d” levhalar arasında kullanılan yalıtkan malzemenin kalınlığını ifade eden bir sabit sayı olduğundan, literatürde bazı çalışmalarda “voltaj” ile “elektrik alan” kavramları birbirlerinin yerine kullanılmaktadır.

Çalışmalarda, ince filmlerin bir kondansatör oluşturduğu düşünülmekte ve üzerinde biriken yük;

$$q = C.V \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada kondansatörün sığası olan C yerine, ince filmi oluşturan tabakada sığayı oluşturan parametreler yazılırsa, iletken levhadaki bir atomda biriken yük;

$$q = \frac{\epsilon_{yalıtkan} A_{FM}}{d_{yalıtkan}} V \quad (2.14)$$

ifadesi ile hesaplanabilir [28]. Burada ϵ yalıtkan ortamın geçirgenliğini, A_{FM} kondansatör yapısında FM malzemenin örgü parametresine göre birim atomun yüzey alanını, d ise iletkenler arasında kullanılan yalıtkanın kalınlığını ifade etmektedir. Ayrıca, κ yalıtkanın dielektrik sabiti ve ϵ_0 vakumun geçirgenliği olmak üzere yalıtkan ortamın geçirgenliği $\epsilon = \kappa \cdot \epsilon_0$ şeklinde ifade edilebilir. FM malzeme üzerinde daha fazla yük biriktirebilmek için denklem (2.14)'e göre, dielektrik sabiti daha büyük olan bir yalıtkan kullanmak ya da yalıtkanın kalınlığını mümkün olduğunca azaltmak gerekir.

Geçiş metalleriindeki ferromanyetizmanın kaynağı 3d orbitallerindeki eşleşmemiş spinlerdir. Fe, Co, Ni ve alaşımlarında 3d elektronlarının sayısı manyetik özellikleri belirlemektedir. Elektrik alan uygulandığında denklem (2.14)'te verilen formülden hareketle bir atom başına biriken yük miktarı değiştiğinden, FM tabakasının mıknatıslanması da değişmektedir [7, 28, 31]. Bununla birlikte, elektrik alan yalnızca ara yüzeyde etkin olduğundan, FM tabaka sadece birkaç atomik tabakadan oluşmalıdır [28].

2.2. Malzemelerin Elektriksel Direnci

Direnç, bir elektrik akımının bir malzemedan geçme zorluğunun ölçüsü olarak tanımlanabilir. Bir iletken malzemenin direnci Ohm yasası olarak bilinen aşağıdaki denklem (2.15) ile hesaplanır [92].

$$R = \frac{V}{I} = \frac{(Volt)}{(Amper)} \quad (2.15)$$

Burada V gerilimi, I ise akımı ifade etmektedir. Esasen Ohm yasası fizikte ortalama serbest yol üzerinden tanımlanmaktadır. Bu tanım elektronun bir malzeme içerisinde üzerine uygulanan elektriksel alan etkisinde yol alırken karşılaştığı çarpışmalarla ilişkilidir. Ortalama serbest yolda çarpışmalar göz önünde bulundurulduğunda Ohm yasası;

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.16)$$

şeklinde yazılabilir [93]. Burada \vec{j} malzeme içerisinde herhangi bir konumda akım yoğunluğunu, \vec{E} bu konumdaki elektriksel alanı ve σ malzemenin elektriksel iletkenliğini ifade etmektedir. İletkenlik malzemeler için ayırt edici bir özelliktir ve ρ ile sembolize edilen özdirencin tersidir. Özdirenç ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki matematiksel olarak;

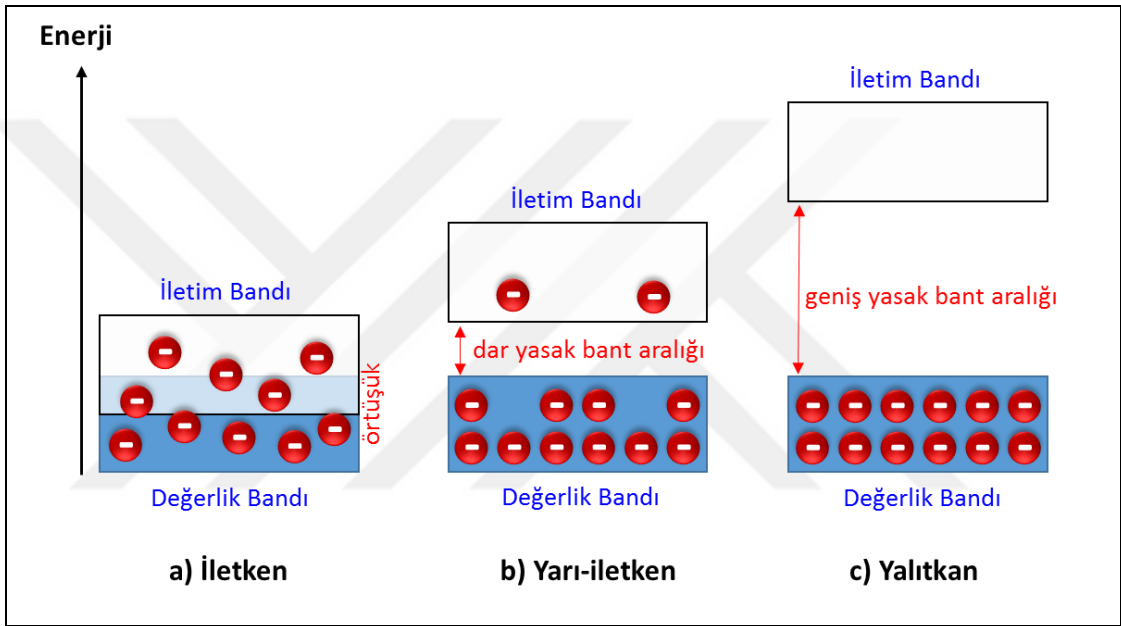
$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilebilir [93]. Metallerde yük taşıyıcıları serbest elektronlar olup bu sayede metaller iyi birer iletkenlerdir. Metal boyunca uygulanan elektrik alan sayesinde elektronlar eksi kutuptan artı kutba doğru hareket ederler. Kesit alanının artması taşıyıcı elektron sayısının da artması anlamına gelir. İletkenin uzunluğunun artması ise elektronun hareketi boyunca karşılaşacağı çarpışma ve saçılmaların fazlaşacağı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bir metal malzemenin özdirenci (ρ), uzunluğu (l) ve kesit alanı (A) biliniyorsa malzemenin direnç değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.18)$$

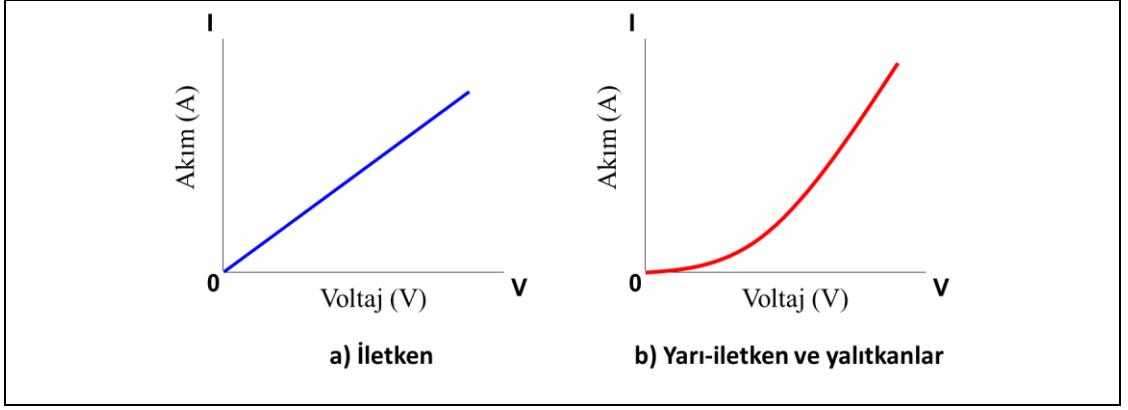
İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerde genel olarak elektriksel iletkenlik bant yapısıyla açıklanabilmektedir. Enerji bantları tam olarak dolu ya da tamamen boş ise bir kristal yalıtkan gibi davranır. Çünkü bant içerisinde elektronların hareket edeceği boş yerler yoktur. Birbirleri ile bağ yapan atomlarda son yörüngelerindeki elektronların oluşturdukları enerji bantları değerlik ve iletim bandı olarak ifade edilir. İletken malzemelerde bu iki bant Şekil 2. 11.a)'da şematik olarak gösterildiği gibi birbirleri ile çakışmıştır [93, 94]. Bu sayede iletim bandında serbest elektronlar olduğundan rahatça hareket edebilirler ve iletkenliği sağlarlar. Yarıiletken malzemelerde değerlik ve iletim bantları arasında Şekil 2. 11.b)'de gösterilen bir yasak bant aralığı vardır. Bu malzemelerde iletkenlik atoma bağlı elektronların değerlik bandından iletim bandına geçmesi sayesinde gerçekleşir. Elektronlar iletim bandında ilerlerken ayrıldığı değerlik bandında bir boşluk bırakır. Yarıiletkenlerde elektronlar negatif yük taşıyıcıları iken, boşluklar ise pozitif yük taşıyıcıları olarak

adlandırılırlar. Yalıtkanlar elektriksel yüklerin kendilerinden rahatça akamadıkları malzemeler olarak tanımlanır. Ancak hiçbir yalıtkan tam anlamıyla mükemmel bir yalıtkan değildir. Çünkü düşük oranda da olsa akımın akabileceği yük taşıyıcıları bulundurulur [94]. Yalıtkanların çoğu geniş bant aralığına sahiptirler. Yeterli büyüklükte voltaj uygulanırsa, güçlü elektrik alan etkisi ile yüksek enerjili elektronlarla tamamen dolu olan değerlik bandından elektronların ayrılması sağlanır ve yalıtkan elektriksel olarak iletken hale getirilmiş olur. Bu voltaj değeri yalıtkanın “çöküm (breakdown) voltajı” olarak adlandırılır.



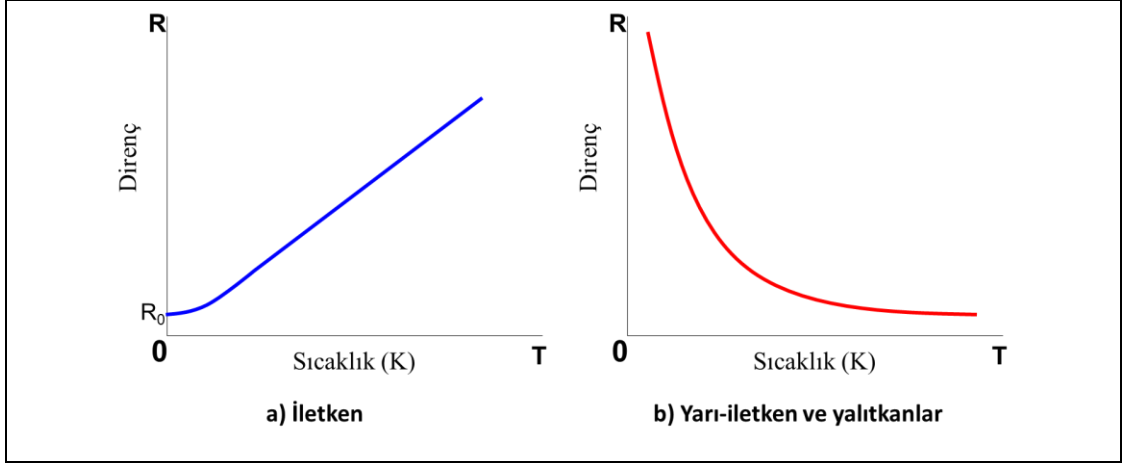
Şekil 2. 11: a) İletken, b) yarıiletken ve c) yalıtkan malzemeler için bant yapısının şematik gösterimi.

Şekil 2. 12’de iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin sabit sıcaklıklar için genel IV karakteristikleri verilmiştir. İletken malzemelerde IV karakteristiği genel olarak Ohm yasasına uygun olarak doğrusal bir artış göstermektedir. Ohm yasasına uygun IV karakteristiğine sahip malzemeler omik malzemeler olarak adlandırılır. Yarıiletken ve yalıtkan malzemelerde ise gerilim arttıkça yük taşıyıcıları arttığından, akım değişiminin doğrusallığı bozulabilmektedir.



Şekil 2. 12: a) İletken, b) yarıiletken ve yalıtkanların genel IV karakteristikleri.

Şekil 2. 13'te iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerde sıcaklığa bağlı direnç davranışı gösterilmiştir. Metallerde elektriksel direncin sebebi olan iletkenlik elektronlarının çarpışmaları, oda sıcaklığında baskın olarak örgü fononları ile gerçekleşmekte, sıvı helyum sıcaklığı (4.2 K) gibi düşük sıcaklıklarda ise titreşimler azaldığından baskın olarak örgüdeki safsızlık (impurity) atomları ve kusurlarla gerçekleşmektedir [93]. Bu sayede, metallerde sıcaklık azaldıkça çarpışmalar azalacağından metalin direnci de azalmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise, Şekil 2. 13'te gösterildiği gibi direnç sıcaklıkla doğrusal olarak artmaktadır. Yarıiletkenlerde ise sıcaklık mutlak sıfırdan oda sıcaklığına doğru yükselmeye başladıkça, kristal yapının kazandığı ısı enerjisi serbest elektronların oluşumuna sebebiyet verir. Oluşan bu serbest elektronlar yarıiletkenin iletkenlik düzeyini artırarak direncin düşmesine neden olur. İletkenliğin çok düşük olduğu yalıtkan malzemelerde de sıcaklığa bağlı iletkenlik değişimi yarıiletkenlerdekine benzer bir davranış göstermektedir.



Şekil 2. 13: a) İletken, b) yarıiletken ve yalıtkanların sıcaklığa bağlı direnç davranışı.

2.3. Manyeto-direnç ve Hall Etkileri

İçerisinden akım geçen malzemelere manyetik alan uygulanıp direnç ölçümleri yapıldığında kullanılan malzemenin cinsine, ölçüm geometrisine ve uygulanan manyetik alan yönüne bağlı olarak ölçümlerden farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu şekilde uygulanan manyetik alana bağlı yapılan elektriksel ölçümler, genel anlamda manyeto-direnç (MR) veya Hall etkileri olarak isimlendirilmektedir. Bu iki konu arasındaki temel farklılık, MR yapılarında gerilimin akımla aynı doğrultuda, Hall etkilerinde ise akıma dik ölçülüyor olmasıdır. MR veya Hall etkisi gösteren malzemeler kullanılarak, günümüzde ticari olarak manyetik sensörler, bilgisayarlarda manyetik okuyucu kafalar ve manyetik hafıza elemanları üretilmektedir. Bu sebeple, MR ve Hall etkileri ile ilgili çalışmalar günümüzde de yoğun bir şekilde devam etmektedir. Spintronik tabanlı uygulamalardaki önemi nedeniyle, MR çeşitlerinden biri olan dev manyeto-direnç (GMR) çalışmaları 2007 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür [95].

MR genel anlamda, içerisinden akım geçen bir malzemenin dış manyetik alan etkisiyle elektriksel direnç değerinde meydana gelen değişim olarak tanımlanır. Bu etkinin büyüklüğünü veren MR oranı;

$$\text{MR oranı} = \frac{|R_H - R_0|}{R_0} \quad (2.19)$$

ifadesiyle hesaplanır [96-98]. Burada R_H manyetik alan ile değişen direnç değeri, R_0 ise dış manyetik alanın sıfır olduğu durumdaki direnç değeridir.

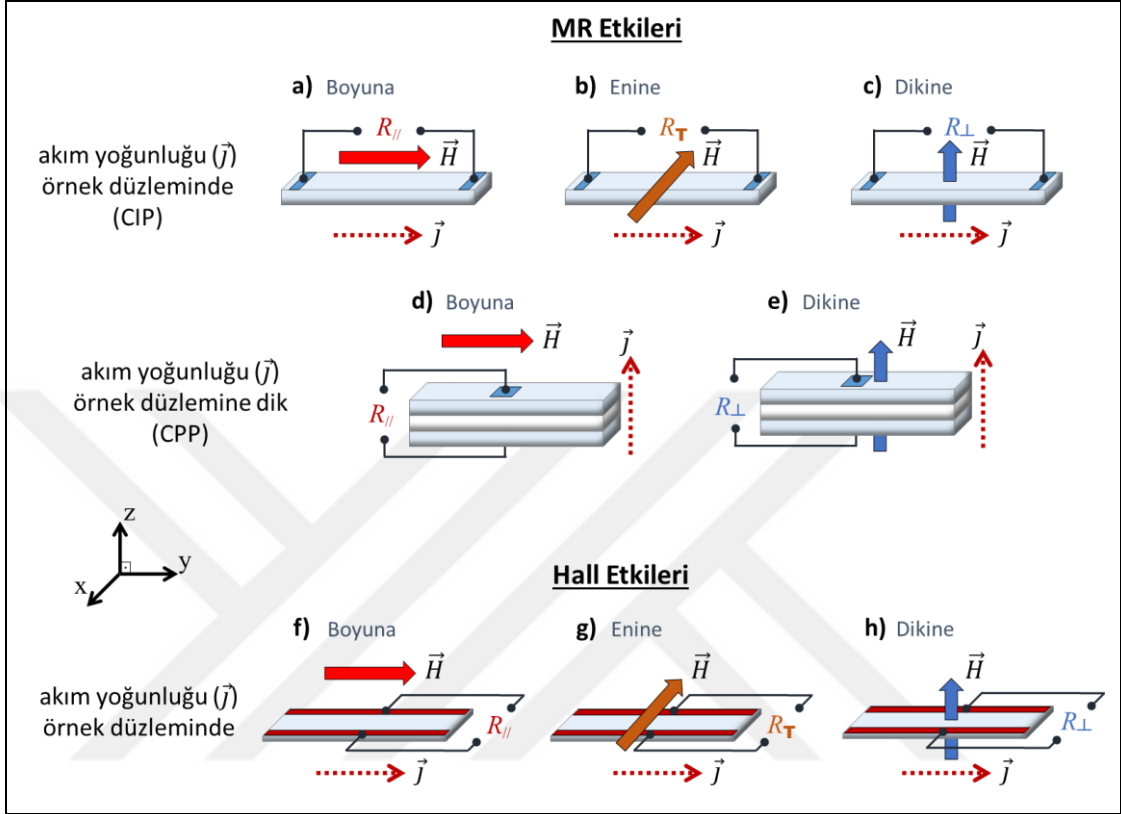
MR etkisi, Lord Kelvin adıyla bilinen İrlandalı bilim adamı William Thomson tarafından, ilk kez 1856 yılında gözlenmiştir [99]. Kelvin'in nikel (Ni) ve demir (Fe) parçaları ile yaptığı çalışmada akım ile aynı doğrultuda uygulanan manyetik alanın direnci bir miktar artırdığı, dik yönde uygulanan alanın ise direnci bir miktar azalttığı bulunmuştur. Lord Kelvin'den 23 sene sonra ise 1879 yılında Edwin Herbert Hall, akıma dik uygulanan manyetik alanın, akıma ve manyetik alana dik bir elektriksel alan meydana getirdiğini keşfetmiştir [100]. Bu olay Hall etkisi olarak isimlendirilmektedir.

Bu bölümde, ilk önce MR ve Hall ölçümlerinde kullanılan geometriler anlatılacak, ardından direnç kavramından başlanarak normal manyeto-direnç (OMR), ferromanyetik malzemelerde görülen anizotropik manyeto-direnç (AMR), çok katlı metalik yapılarda görülen dev manyeto-direnç (GMR) ve tünelleme manyeto-direnç (TMR) etkileri anlatılacaktır. Bununla birlikte, uygulanan akıma dik gerilimin ölçülmesine bağlı olarak gözlenen Hall etkileri (HE) ile ferromanyetik malzemelerde görülen anormal Hall etkisi (AHE) ve planar Hall etkisi (PHE) hakkında bilgi verilecektir. Manyetik alan, malzemedan geçen akımı etkilediğı gibi, son yıllarda bir anlamda bunun tersi, yani spin polarize akımların malzemelerin mıknatıslanmasını etkilediğine yönelik spin transfer tork (STT) adı verilen çalışmalar da yapılmaktadır [101]. Tamamen farklı bir mekanizma olduğı için bu kısımda konu manyeto-direnç ve Hall etkileri çerçevesinde sınırlı tutulacaktır.

2.3.1. Ölçüm Geometrileri

MR ve Hall etkilerinde uygulanan manyetik alanın ve ölçülen voltajın yönüne bağlı olarak kullanılan ölçüm geometrileri Şekil 2. 14'te gösterilmiştir [40, 102-105]. MR etkilerinde malzemedan geçen akım ile direnç ölçümleri aynı doğrultuda yapılır. Ölçümler esnasında akım örnek düzlemine paralel olabileceğı gibi, örnek düzlemine dik de olabilir. Şekil 2. 14.a), b) ve c)'de akımın örnek düzleminde, manyetik alanın ise akıma göre sırasıyla boyuna, enine ve dikine uygulandığı geometriler gösterilmiştir. Akım örnek düzlemine dik olduğunda ise manyetik alan için boyuna ve dikine olmak üzere Şekil 2. 14.d) ve e)'de gösterilen iki durum vardır. Hall etkilerinde malzemedan geçen akım ile direnç ölçümleri birbirlerine dik olarak

gerçekleşmektedir. Hall etkileri ölçümlerinde de Şekil 2. 14.f), g) ve h)'deki gibi manyetik alan için sırasıyla boyuna, enine ve dikine olmak üzere üç geometri ile karşılaşılacaktır.



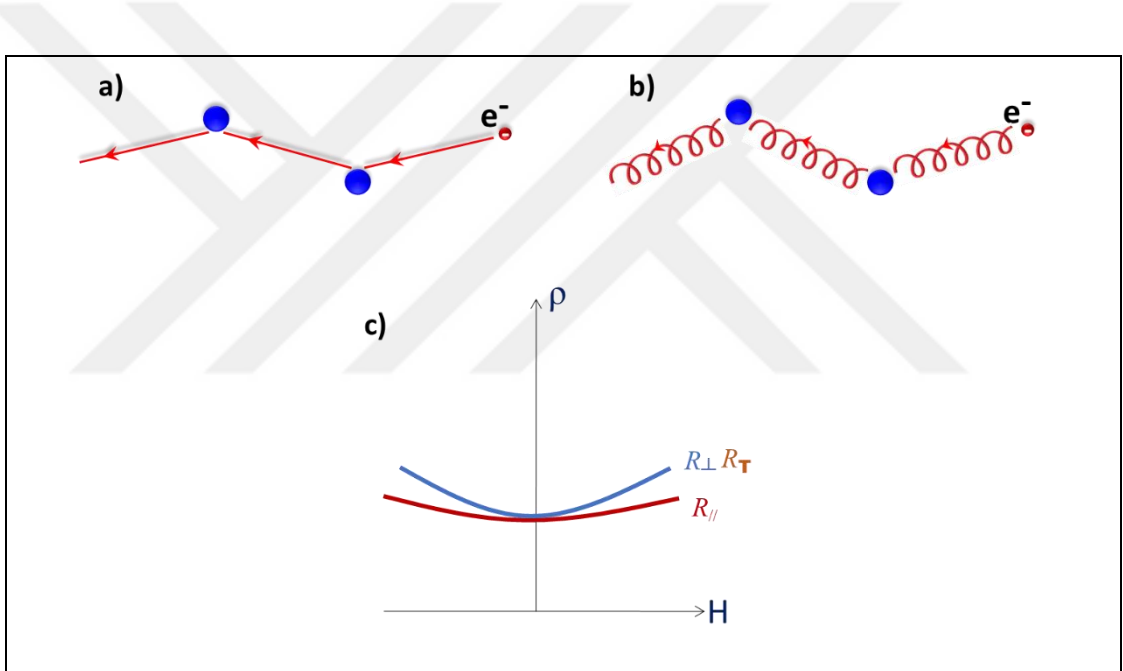
Şekil 2. 14: Direnç ölçümlerinde sıklıkla kullanılan ölçüm geometrileri. MR etkilerini ölçerken akım yoğunluğu örnek düzleminde (CIP) olduğunda a) boyuna, b) enine ve c) dikine, akım yoğunluğu örnek düzlemine dik olduğunda (CPP) olduğunda ise d) boyuna ve e) enine geometriler kullanılabilir. Hall Etkilerinin ölçümlerinde de f) boyuna, g) enine ve h) dikine geometriler kullanılabilir.

2.3.2. Normal Manyeto-direnç (OMR)

Hiçbir dış etkinin olmadığı durumda, elektronlar katıyı oluşturan atomlar arasında çarpışma ve saçılmalarla Şekil 2. 15.a)'da gösterildiği gibi doğrusal olarak hareket ederler. Dışarıdan uygulanan elektrik ve manyetik alanların olduğu durumlarda ise elektronun üzerine etkiyen *Lorentz* kuvveti;

$$\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.20)$$

ifadesi ile verilmektedir [93]. Manyetik olmayan altın (Au), gümüş (Ag) ve bakır (Cu) gibi metallerde hareket halindeki iletkenlik elektronlarına manyetik alan uygulandığında, elektronlar sapmaya uğrar. Bu sapma ile birlikte elektronlar Şekil 2. 15.b)'deki gibi sarmal bir yol izlerler [98]. Böylece elektronların aldıkları yol ve saçılmalar artar. Bu da, normal metallerde uygulanan manyetik alanla birlikte direncin artmasına sebep olur. Farklı geometriler için metallerin normal manyeto-direnç (OMR) davranışları Şekil 2. 15.c)'de gösterildiği gibidir [102]. Enine ve dikine geometrilerde uygulanan manyetik alan ile MR değerlerinde meydana gelen değişim, boyuna geometriye göre biraz daha fazladır ve her durumda işareti pozitifdir. OMR etkisi diğer MR etkilerine kıyasla çok küçük olduğundan teknolojik uygulamalarda kullanılmamaktadır.



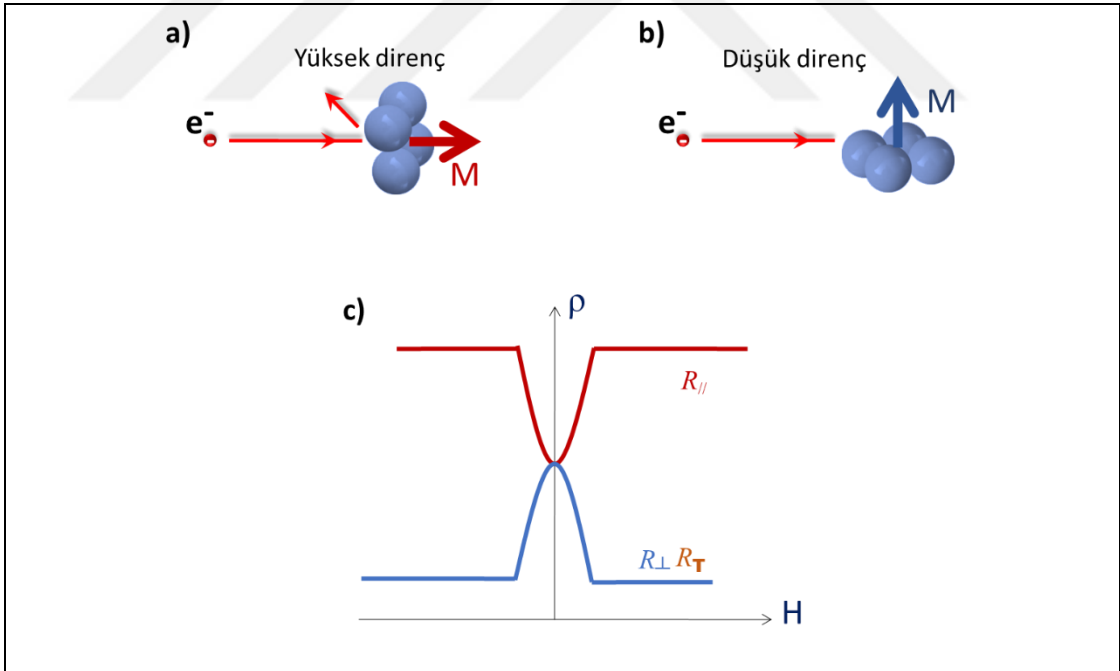
Şekil 2. 15: a) Hiçbir dış etkinin olmadığı durumda ve b) manyetik alan uygulandığında elektronun izlediği yol gösterilmektedir. c) Uygulanan manyetik alanın yönüne göre manyetik olmayan metallerde OMR etkisinin davranışı.

2.3.3. Anizotropik Manyeto-direnç (AMR)

Fe ve Ni gibi ferromanyetik malzemelerde akım ile aynı doğrultuda (boyuna) uygulanan manyetik alan direnci artırmakta, dik yönde uygulanan alan ise direnci azaltmaktadır [99]. Dirençteki bu değişim uygulanan alanın yönü ile ilişkili olduğundan anizotropik manyeto-direnç olarak adlandırılır. Bu durum 1856 yılında Lord Kelvin [99] tarafından ifade edilmiş olmasına rağmen, anizotropik manyeto-

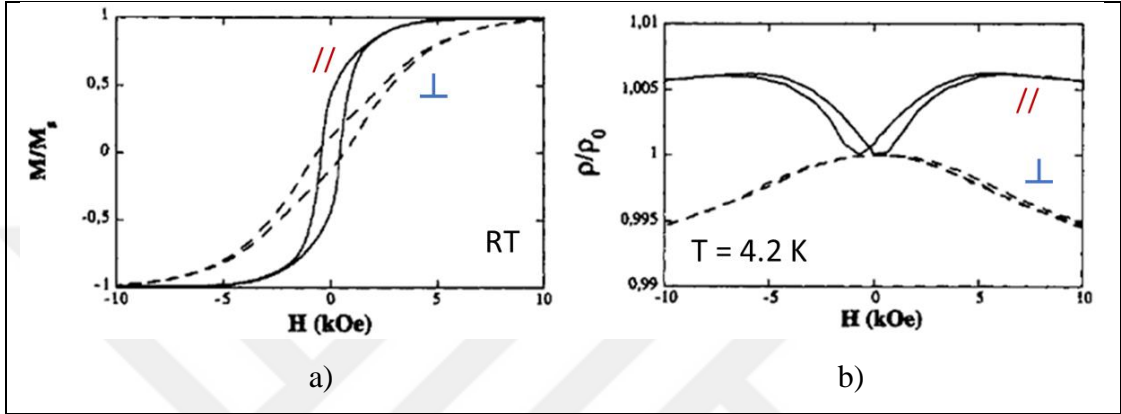
direnç etkisinin temelde spin-yörünge etkileşmesinden kaynaklandığına dair kapsamlı açıklama, etkinin keşfinden yaklaşık 100 yıl sonra 1962 yılında Kondo tarafından [106] yapılmıştır. AMR etkisi, manyetik alan değişimine gösterdiği tepki nedeniyle teknolojik cihazlarda kullanılmıştır. Bilgisayar teknolojisinde ilk kez 1990'lı yılların başında IBM firmasının üretimi ile hard disklerin (HDD) okuyucu kafalarında kullanılmaya başlanmış ve GMR etkisinin keşfine kadar veri depolama kapasitesinin artırılmasında önemli rolü olmuştur [95].

AMR etkisinde, iletkenlikten sorumlu s elektronları 3d elektronlarının yörünge açılma momentleri ile etkileşerek saçılırlar [98]. Uygulanan dış manyetik alan ile akım birbirlerine paralel olduklarında, yörünge kaynaklı saçılma kesit alanı manyetik alanın uygulanmadığı duruma göre Şekil 2. 16.a)'daki gibi artış gösterir. Buna karşın uygulanan alan dik olduğunda ise yörünge kaynaklı saçılma kesit alanı Şekil 2. 16.b)'deki gibi azalmaktadır. Her iki durum için manyetik alan değişimine bağlı direnç ölçümleri yapıldığında Şekil 2. 16.c)'dekine benzer MR grafikleri elde edilir [98, 102]. AMR ölçümlerinde MR oranı %1-2 seviyelerindedir.



Şekil 2. 16: a) Dış manyetik alanın akım ile aynı yönlü olduğu ve b) dış manyetik alanın akıma dik olduğu durumların şematik gösterimleri. c) Dış manyetik alanın dik veya paralel uygulanma durumlarına göre ferromanyetik malzemelerde AMR etkisinin alan ile değişim grafiği.

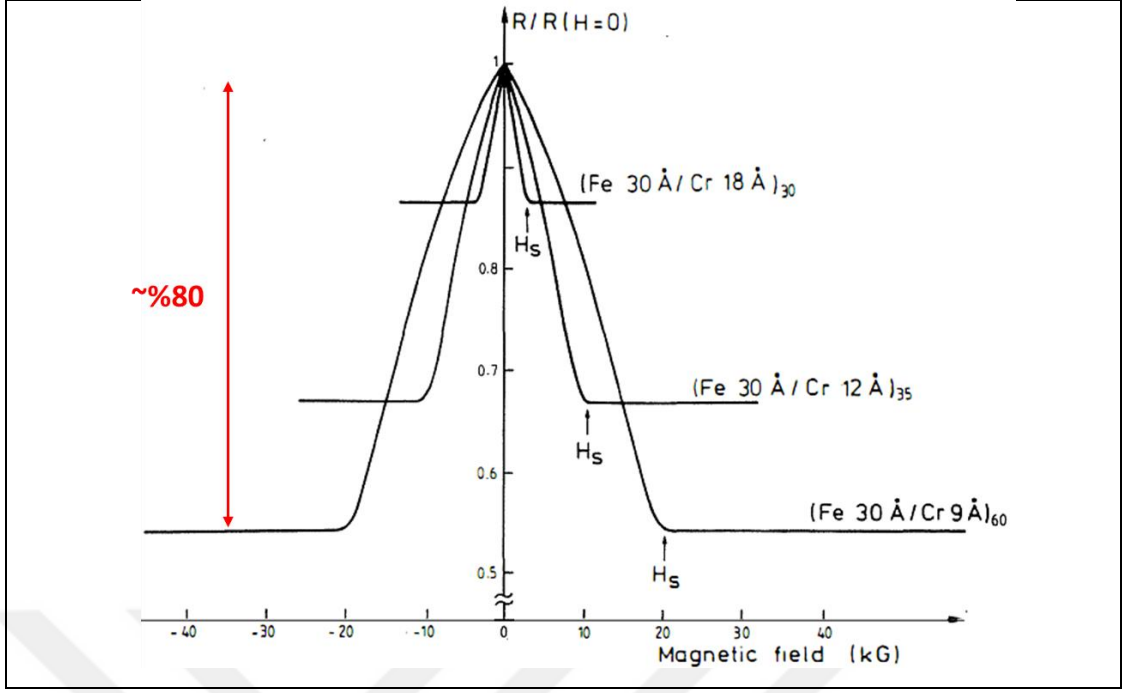
AMR etkisi ölçümleri ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrileri ile uyumludurlar. Şekil 2. 17'deki Piraux vd.'nin Co tellerle yaptıkları çalışmadaki gibi, AMR eğrileri mıknatıslanma eğrilerine benzer histeretik bir davranış gösterirler [107]. AMR ölçümlerinde manyetik alanın pozitiften negatife ve tersi yönde taranması esnasındaki tepe/çukur değerleri mıknatıslanma eğrilerindeki sıfırlayıcı alan değerlerine karşılık gelir.



Şekil 2. 17: a) Piraux vd. tarafından oda sıcaklığında ölçülen Co tellere ait histeresis eğrileri ve b) Aynı örneğe ait 4.2 K'de paralel ve dik geometride ölçülen AMR sonuçları.

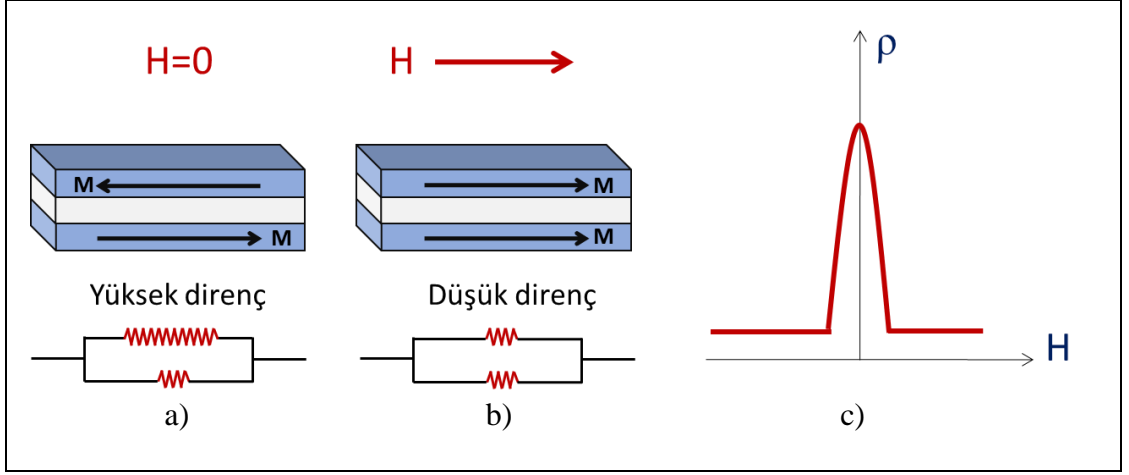
2.3.4. Dev Manyeto-direnç (GMR)

Dev manyeto-direnç (GMR) etkisi çok katlı ince film yapıları ile oluşturulan bir etkidir. GMR etkisi spin vanası yapısı nedeniyle bilgisayar hard disklerinde, biyosensör uygulamalarında ve otomotiv sektöründe manyetik alan sensörü olarak kullanılmaktadır [108]. Albert Fert'in (1988) ve Peter Grünberg'in (1989) GMR etkisinin keşfine yönelik bağımsız çalışmaları 2007 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür [2, 3, 95]. Fert grubunun bahsi geçen Fe/Cr çok katlı filmleriyle 4.2 K'de yaptıkları çalışmada MR oranı Şekil 2. 18'de gösterildiği gibi %80'lere kadar ulaşmıştır [2]. Bu MR oranı, %1-2 seviyesindeki AMR'ye oranla oldukça büyük olduğundan bu etki dev manyeto-direnç olarak adlandırılmıştır.



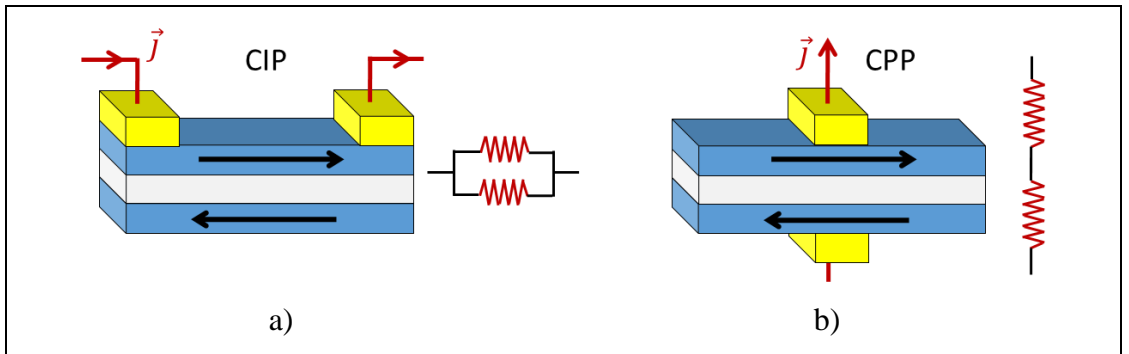
Şekil 2. 18: Akım ve manyetik alanın yüzeye paralel olarak uygulandığı geometri için Fe/Cr çok katlı ince filmlerinin dış manyetik alana bağlı direnç ölçümleri.

GMR etkisinin araştırılmak istendiği çok katlı ince film yapısı en az iki FM tabaka ile manyetik olmayan (NM) bir tabakadan oluşmalıdır. Burada NM tabakanın kalınlığı kritik bir öneme sahiptir. Çünkü GMR yapısında hiç dış manyetik alanın olmadığı durumda FM tabakaların mıknatıslanma vektörleri birbirleri ile Şekil 2. 19.a)'daki gibi AF olarak etkileşmelidirler [98, 102]. Bu durumda sistemden akım geçirilirse elektronlar büyük bir direnç ile karşılaşmış olurlar. Sisteme yeterince büyük manyetik alan uygulanırsa bu durumda FM tabakaların mıknatıslanmaları Şekil 2. 19.b)'deki gibi uygulanan alana paralel olurlar [98, 102]. Bu durumda elektronların spinleri daha küçük bir direnç ile karşılaşır. GMR etkisinde yüksek veya düşük direnç görülmesinin temel sebebi elektronların ilk tabakadan geçişi esnasında spinlerinin mıknatıslanma etkisiyle polarize olması ve sonra diğer tabaka ile bu duruma göre etkileşmesidir [109]. Şekil 2. 19. a) ve b)'de her iki durum için eşdeğer direnç yapıları çok katlı ince film görsellerinin altında şematik olarak çizilmiştir. Şekil 2. 19.c)'de çok katlı yapılarda GMR etkisinin manyetik alan ile değişimi gösterilmiştir [98, 102].



Şekil 2. 19: a) GMR yapısında herhangi bir dış manyetik alan olmadığında mıknatıslanma vektörleri birbirleriyle AF olarak etkileşmekte ve nispeten yüksek bir direnç gözlenmektedir. b) Sisteme manyetik alan uygulandığında mıknatıslanma vektörleri birbirleriyle FM olarak etkileşmekte ve nispeten daha az direnç oluşmaktadır. c) Çok katlı yapılarda GMR etkisinin manyetik alan ile değişimi gösterilmiştir.

GMR sistemlerinde MR ölçümleri yapılırken akım örnek düzlemine paralel (CIP-*current in plane*) olabileceği gibi (Şekil 2. 20.a)), örnek düzlemine dik (CPP-*current perpendicular plane*) de uygulanabilir (Şekil 2. 20.b)) [105]. CIP ile ölçümlerde manyetik tabakalar paralel dirençler gibi, CPP ölçümlerinde ise seri dirençler gibi davranırlar. Aynı örnekte CPP ile elde edilen MR oranı, CIP ile elde edilene göre daha yüksek olmasına rağmen, uygulamalara uygunluğu nedeniyle cihaz tasarımlarında daha çok CIP tercih edilmektedir [105].



Şekil 2. 20: GMR yapılarında a) akımın örnek düzleminde (CIP) ve b) örnek düzlemine dik olarak ilerlediği (CPP) durumlar için ölçüm geometrileri.

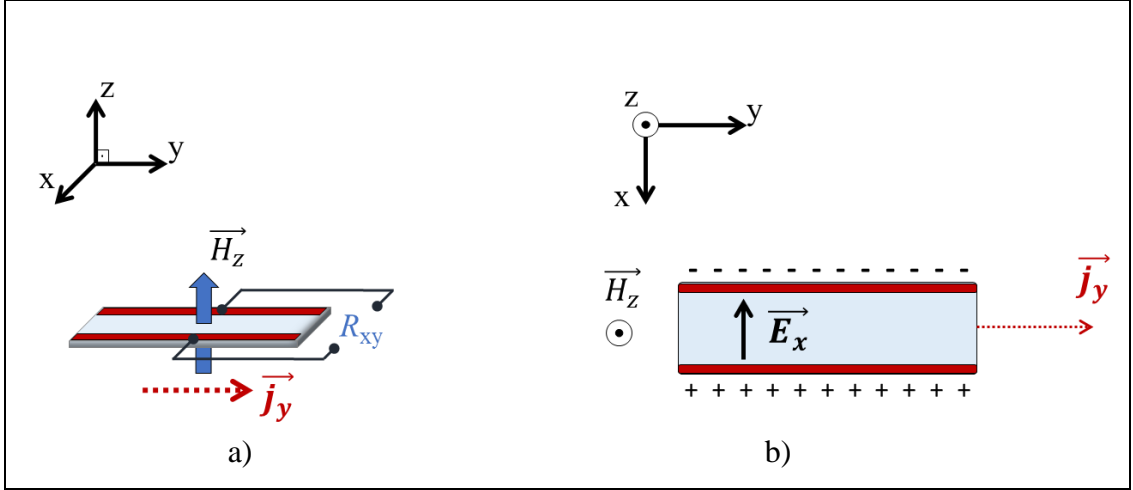
2.3.5. Tünelleme Manyeto-direnç (TMR)

Çok katlı ince filmlerde GMR etkisinin elde edilmesinde manyetik olmayan ara tabaka için krom (Cr), altın (Au) ve bakır (Cu) gibi iletken metaller tercih edilmektedir. Bunların yerine GMR yapısına benzer çok katlı ince filmlerde ferromanyetik tabakalar birbirlerinden magnezyum oksit (MgO) [110] veya alüminyum oksit (Al_2O_3) [111] gibi yalıtkan tabakalarla da ayrılabilirler. Yalıtkan ara tabaka kullanımıyla hazırlanan bu çok katlı ince filmlerde elektronlar, yalıtkan tabakadan kuantum mekaniksel bir etki olan *tünelleme* yöntemiyle geçerler [111]. Bu yüzden GMR ile benzer özellikteki bu etki, tünelleme manyeto-direnç adını almıştır.

TMR etkisine yönelik ilk çalışma 1975 yılında Jullière [112] tarafından yapılmış olsa da, örnek sisteminin tekrarlanması zor olması ve düşük direnç değişimi nedeniyle MR alanında yeterince ilgi çekememiştir [95]. Ancak GMR etkisinin keşfinden sonra TMR etkisine olan ilgi de artmış ve bu çalışmalarda oda sıcaklığında MR oranı % 600'lere kadar ulaşabilmiştir [110].

2.3.6. Normal Hall Etkisi (HE)

Şekil 2. 21'deki gibi içerisinde y -yönünde akım (i) geçen iletken bir malzemeye, akıma dik z -yönünde manyetik alan (H) uygulandığında malzemede akıma ve manyetik alana dik bir elektrik alan (E_x) oluşur [93]. 1879 yılında Edwin Herbert Hall tarafından keşfedilen bu durum Hall olayı olarak adlandırılmaktadır [100]. Bu etkinin keşfi özellikle yarıiletken malzemeleri tanımlamada önemli bir dönüm noktası olmuştur. Çünkü Hall etkisi sayesinde yarıiletkenlerde taşıyıcının tipi (n-tipi veya p-tipi) kolaylıkla tespit edilebilmekte ve taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı hareketliliği gibi çok önemli parametreler kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Hall etkisine dayalı Hall sensörleri otomotivden bilgisayar teknolojilerine kadar birçok endüstriyel üründe uygulama alanı bulmaktadır.



Şekil 2. 21: a) Hall etkisi ölçüm geometrisi. b) Hall etkisi nedeniyle oluşan elektrik alan.

Manyetik alan uygulandığında elektronlar daha önce denklem (2.20)'de bahsedildiği gibi *Lorentz kuvvetinin* etkisi altında olurlar. Elektronlara etki eden kuvvet sağ el kuralına göre belirlenir. Buna göre, yüklere etki eden kuvvetin etkisiyle yükler kenarlarda birikir. Şekil 2. 21.b)'deki gibi biriken yüklerle potansiyel fark (elektrik alan) oluşur [93]. Bu potansiyel fark Hall voltajı ($V_H=V_{xy}$) olarak adlandırılır. Hall voltajı akım ve manyetik alan cinsinden;

$$V_H = \frac{I_y H_z}{qnd} \quad (2.21)$$

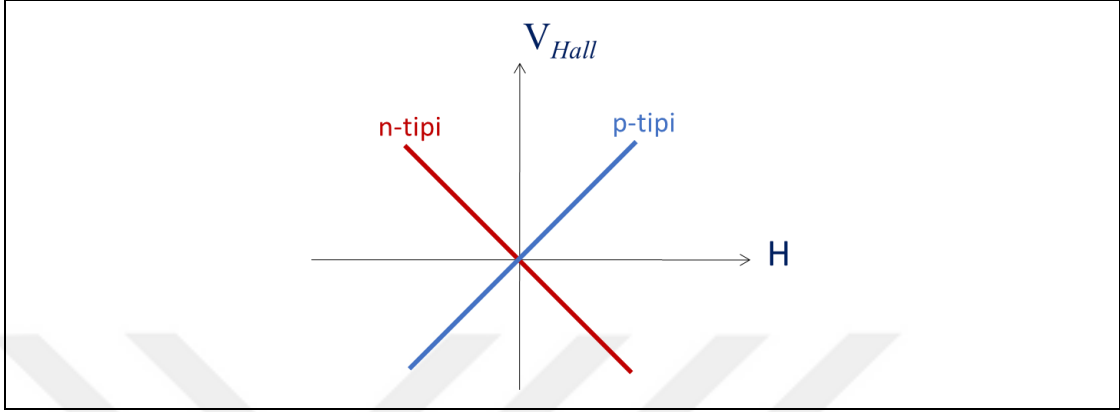
olarak yazılabilir [113]. Burada n taşıyıcı yük yoğunluğu, d örneğin kalınlığı ve q taşıyıcı yük değeridir. Metallerde yük taşıyıcısı elektronlar olduğundan denklemdeki q ifadesi yerine elektronun yük değeri yazılarak potansiyel farkı bulunur. Yarıiletkenlerde ise yük taşıyıcıları elektronlar (n-tipi) veya boşluklar (p-tipi) olabilir. Denklemde q yerine elektronun yükü yazılıp, ifadeden Hall katsayısı;

$$R_0 = -\frac{1}{ne} \quad (2.22)$$

şeklinde tanımlanırsa [93] bu durumda Hall voltajı;

$$V_H = -\frac{R_0 I_y H_z}{d} \quad (2.23)$$

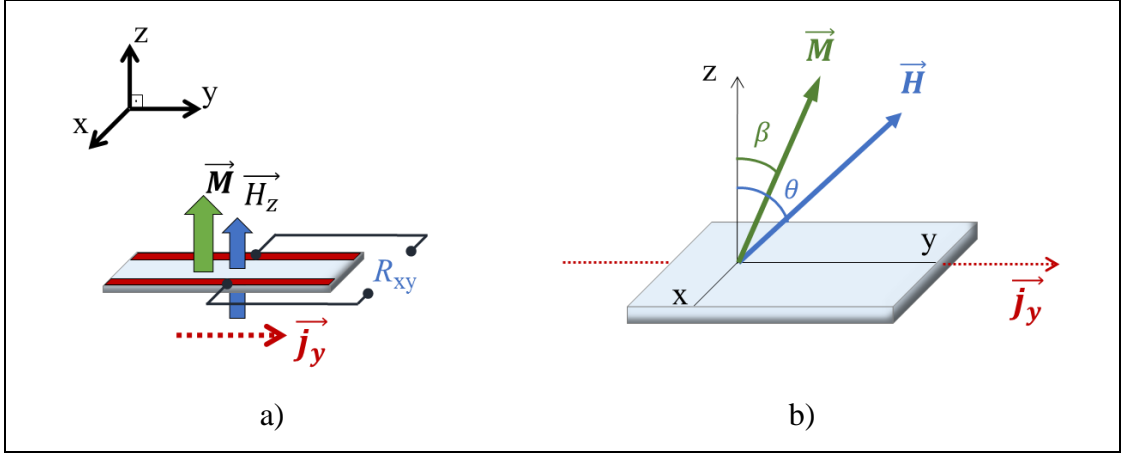
olarak yazılır [103]. Yarı iletkenlerde manyetik alana karşı Hall voltajı ölçümü yapılırsa taşıyıcı tipine göre iki farklı eğim durumu çıkar. Yarıiletkenlerin kullanıldığı ölçümlerde Şekil 2. 22'deki gibi eğimin negatif olduğu durumlar n-tipi taşıyıcılara, eğimin pozitif olduğu durumlar p-tipi taşıyıcılara atfedilir [114].



Şekil 2. 22: Yarıiletken malzemelerde Hall voltajı ölçümlerinde taşıyıcı tipine göre eğimin durumu.

2.2.7. Anormal Hall Etkisi (AHE)

Ferromanyetik malzemelerde Hall ölçümleri yapılırken klasik Hall olayından farklı olarak, malzemenin mıknatıslanması da ölçümlerde önemli hale gelmektedir [104]. Ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanmasının da dikkate alındığı bu etki anormal Hall etkisi (AHE) olarak adlandırılmaktadır. Anormal Hall etkisi ilk defa yine Edwin Hall tarafından 1881 yılında ince bir demir tabakası ile yaptığı çalışmada gözlenmiştir [115]. AHE etkisi için ferromanyetik malzemenin mıknatıslanmasının örnek düzlemine dik olması ya da mıknatıslanmanın örnek düzlemine dik iz düşümünün bulunması gerekir (Şekil 2. 23) [93, 103].



Şekil 2. 23: a) AHE ölçüm geometrisi. b) AHE ölçümlerinde uygulanan manyetik alan ve mıknatıslanma vektörlerinin şematik gösterimi.

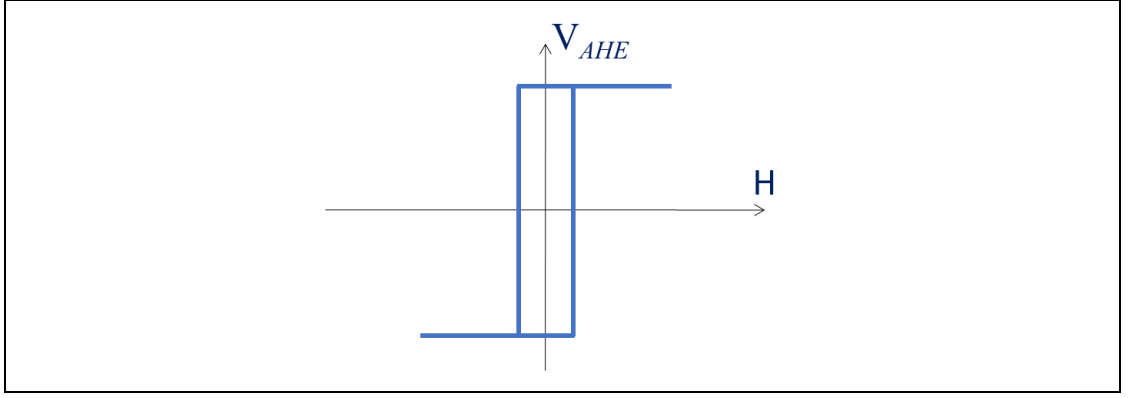
Şekil 2. 23.b)'de gösterilen açı ve vektörlere göre ferromanyetik malzemelerde Hall voltajı;

$$V_H = \left(\frac{R_0 I}{d}\right) H \cos \theta + \left(\frac{R_A \mu_0 I}{d}\right) M \cos \beta \quad (2.24)$$

ifadesi ile bulunur [103]. Denklemdaki birinci terim uygulanan manyetik alanın, ikinci terim ise malzemenin mıknatıslanmasının Hall voltajına katkısını göstermektedir. Burada normal Hall etkisinden farklı olarak ikinci terim ilave olmaktadır. Denklemda M malzemenin mıknatıslanmasını, R_A anormal Hall katsayısını, μ_0 boşluğun geçirgenliğini, θ uygulanan alanın z-ekseninden sapma açısını, β mıknatıslanmanın z-ekseninden sapma açısını tanımlamaktadır. Benzer şekilde açı sapmalarını ihmal ederek Hall öz direnci;

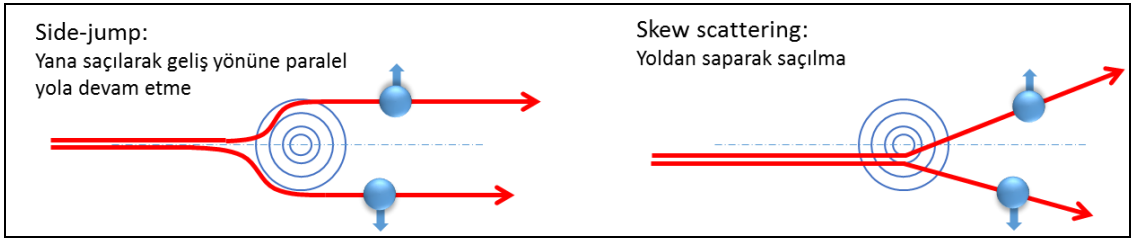
$$\rho_H = \rho_{HE} + \rho_{AHE} = R_0 H + R_A \mu_0 M \quad (2.25)$$

şeklinde yazılabilir [103]. Ferromanyetik malzemelerin çoğunda Hall katkısından gelen ilk terim ihmal edilebilecek kadar küçüktür [103]. Böylece ikinci terimin baskın olduğu durumda Hall voltajı ve malzemenin mıknatıslanma davranışı hakkında bilgi verir. Şekil 2. 24'te AHE yöntemi ile ölçülen bir ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 2. 24: Anormal Hall etkisi yöntemi ile ölçülen ferromanyetik bir malzemenin histeresis eğrisinin şematik gösterimi.

AHE yöntemi çok ince ferromanyetik filmlerin mıknatıslanma ölçümlerinde sıklıkla kullanılmasına rağmen, etkiyi oluşturan mekanizmanın kaynağı halen bir tartışma konusudur. Konuya ilişkin bazı teoriler geliştirilmiştir. Bu teorilere göre, AHE'nin kaynağı, taşıyıcıların kristal içerisinde yana saçılarak geliş yönüne paralel bir şekilde yoluna devam etmesi (side-jump) ve yollarından tamamen saparak saçılması (screw scattering) gibi dış nedenler veya kristal momentum uzayında Berry fazı etkisi gibi iç nedenler olabilir (Şekil 2. 25) [104]. AHE etkisinde bu mekanizmalardan birisi diğerlerine göre baskın olsa da, teorik hesaplamalar yapılırken bu üç bağımsız etkinin toplamı ele alınmaktadır [104].



Şekil 2. 25: Side-jump ve skew scattering şekilleri.

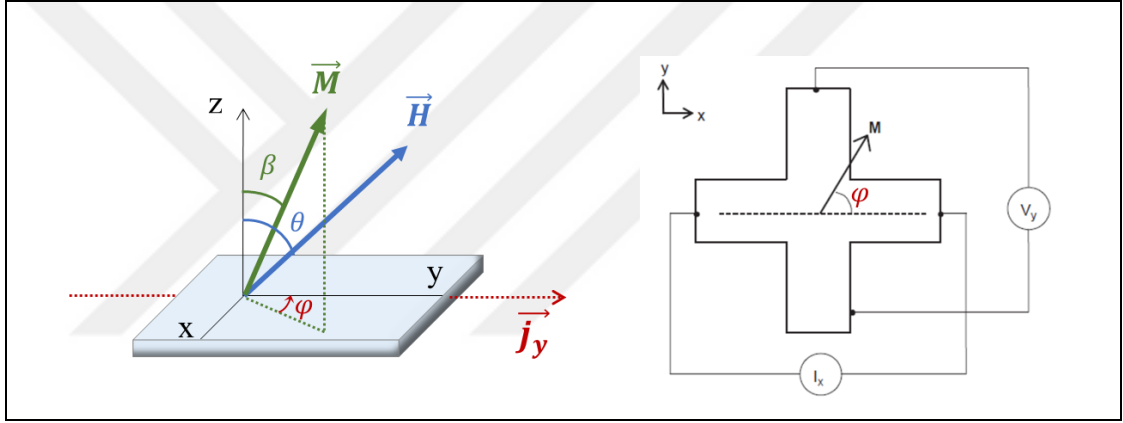
2.3.8. Planar Hall Etkisi (PHE)

Normal Hall etkisinde uygulanan dış manyetik alan örnek düzlemine dik iken, PHE'de uygulanan dış manyetik alan örnek düzlemine paraleldir. Esasen ferromanyetik malzemelerde uygulanan akıma karşılık Hall voltajı ölçümleri yapılırken, üç etki birden gözlenmektedir. Böylece toplam Hall voltajı;

$$V_H = V_{HE} + V_{AHE} + V_{PHE} \quad (2.26)$$

$$= \left(\frac{R_0 I}{d}\right) H \cos \theta + \left(\frac{R_A \mu_0 I}{d}\right) M \cos \beta + \left(\frac{k I}{d}\right) M^2 \cos^2 \beta \sin 2\varphi \quad (2.27)$$

ile verilmektedir [103]. Burada ilk iki terim denklem (2.24) ile verilen normal ve anormal Hall etkisi katkılarıdır. Üçüncü terim ise planar Hall etkisinden gelmektedir. Burada k manyeto-direnç etkisinden gelen bir sabit sayı, φ ise mıknatıslanma vektörünün iz düşümünün yatayda akım yönüyle yaptığı açıdır (Şekil 2. 26.a)) [103]. PHE örgü atomlarının manyetik momentleri sebebiyle yük taşıyan elektronların anizotropik saçılmalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2. 26: a) Hall ölçümlerinde manyetik alan ve mıknatıslanma vektörlerinin şematik gösterimi. b) PHE ölçüm geometrisi.

PHE sensörleri, nanotesla seviyesinde hassasiyete sahip olduklarından çok düşük manyetik alanların ölçümü için sıklıkla kullanılmaktadırlar [116]. Bu özellikleriyle manyetik parçacıkla işaretlenmiş tek bir biyomolekülü bile algılayabilirler [117]. Örnek düzlemine paralel manyetik alan uygulanarak, Şekil 2. 26.b)'de gösterilen geometride ölçüm yapıldığında elde edilen PHE voltaj değeri;

$$V_{PHE} = V_y = \frac{1}{2} I_x \left(\frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{d} \right) \sin(2\varphi) \quad (2.28)$$

olarak verilmektedir [118]. Burada, denklem (2.27)'deki PHE teriminden farklı olarak, anizotropi ve mıknatıslanma ifadeleri yerine akıma paralel ve dik yönde uygulanan manyetik alana göre, öz dirençler ρ_{\parallel} ve ρ_{\perp} sembolleriyle yer almaktadır.

Yine Şekil 2. 26.b)'de gösterilen geometri için, uygulanan dış manyetik alana bağlı olarak PHE voltajı;

$$V_y \approx I_x \Delta R \frac{H_y}{H_K + H_{EB}} \quad (2.29)$$

şeklinde de yazılabilir [118]. Burada $\Delta R = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})/d$, H_y sensörü etkileyen dış manyetik alan, H_K anizotropi alanı ve H_{EB} exchange bias alanıdır.



3. TRANSPORT ÖLÇÜM SİSTEMİNİN TASARIMI VE KURULUMU

Transport deneyleri manyetik alan altında malzemelerin direncindeki değişimin ölçülmesidir [2, 3, 5, 99, 100, 104]. Günümüzün veri işleme ve depolama teknolojileri bu temel özellik üzerine kuruludur [108]. Ayrıca günümüzde skyrmionlar [119, 120], manyeto-kalorik etki [121-124], spin Hall etkisi [122, 125, 126] ve biyolojik uygulamalar için planar Hall etkisi gibi [40] birçok konu transport ölçümleri ile çalışılmaktadır. Günümüz teknolojik uygulamaları için daha hızlı, daha küçük, kalıcı hafızaya sahip ve daha az enerji harcayan cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Böyle teknolojik cihazların geliştirilebilmesi için yapılan çalışmalarda pratik, hızlı ve kullanım esnekliği olan cihazlar tercih edilmektedir.

Transport ölçümlerinin planlamasında, araştırması yapılacak malzemenin cinsi ve ölçüm koşulları önemli faktörlerdir. Birçok durumda, ölçüm sisteminden dışarı çıkarmadan ve ölçümü durdurmadan istenilen sıcaklıklarda örneğin döndürülebiliyor olması gerekebilir. Bazı teknolojik cihazların karakterizasyonunda elektrik alanın uygulandığı, bu sayede ince filmlerin ve bulk malzemelerin mıknatıslanmasının değiştirilebildiği görülmüştür [7, 31]. Bu sebeple transport sistemi içerisinde elektrik alan uygulama seçeneğinin bulunmasıyla sistemin yetenekleri artırılmış olacaktır. Malzeme çeşidine ve diğer ihtiyaçlara bağlı olarak tek bir ölçüm sisteminde sıcaklığın, manyetik alanın, elektrik alanın, örnek açısının, akımın ve voltajın geniş ölçekte değiştirilebilmesi bu alandaki çalışmaları pratikleştirme adına önemli avantajlar sağlayacaktır.

Bu bölümde, transport ölçümleri için kullanılan çok fonksiyonlu bir örnek çubuğunun tasarımı, yapımı ve diğer cihazlara entegrasyonu anlatılacaktır. Ayrıca ölçülecek örneklerin, örnek tutucu üzerine kontaklarının hazırlanmasından bahsedilecek ve deneme amaçlı hazırlanan örneklerden elde edilmiş sonuçlar verilecektir. Sistemi test etmek için dik mıknatıslanmaya sahip $\text{Co}(4 \text{ \AA})/\text{Pt}/\text{CoO}$ ve $\text{Co}(5 \text{ \AA})/\text{Pt}/\text{CoO}$ aşırı-ince filmler ile öncelikle oda sıcaklığında anormal Hall etkisi (AHE) ölçümleri yapıldı ve elde edilen histeresis eğrileri titreşimli örnek manyetometresi (VSM) ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı. Ayrıca, sistemin farklı sıcaklıklardaki çalışma performansını denemek için sıcaklığa bağlı exchange bias etkisi ölçümleri yapıldı.

3.1. Cihaz Bileşenleri

Transport ölçümlerinin yapılabilmesi için uygun donanımların sağlanması gerekir. Transport ölçümlerinin çoğunluğu için en az 5 kOe'e kadar ulaşan bir manyetik alan kaynağına, mikroamper seviyesinden amper seviyesine kadar akım uygulayabilen bir akım kaynağına, nanovolt değerlerinden volt değerlerine kadar okuma yapabilen voltmetreye ve örnek sıcaklığını ölçen termometreye ihtiyaç vardır.

Ayrıca tezin ikinci bölümünde bahsedilen MR ve Hall ölçümlerini tek bir ölçüm düzeneğiyle yapabilmeye imkân sağlayan bir örnek tutucusuna ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı geometrilerde, geniş sıcaklık aralığında ve vakum koşullarında bu ölçümler için örneklerin serbestçe döndürülebilmesi gerekmektedir. Bu düşünceyle tez kapsamında, elle ve bilgisayarla kontrol edilebilen çok fonksiyonlu bir örnek ölçüm çubuğu tasarlandı.

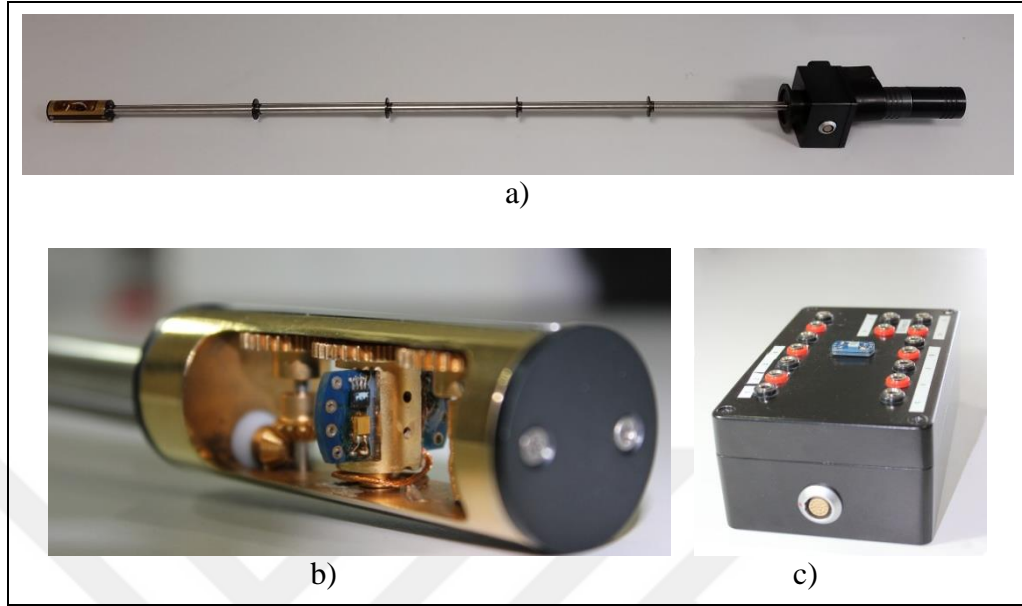
Bu tez çalışmasında tasarımı ve kurulumu yapılan transport ölçüm sistemi örnek ölçüm çubuğunu, harici ölçüm cihazlarını ve elektromıknatıs içermektedir. Bütün sistemi bilgisayarla kontrol edebilmek bir yazılım geliştirilmiştir. Böylece, elektrik ve manyetik alan, örnek açısı, sıcaklık, akım ve voltaj değerleri geniş aralıkta değiştirilerek her tür transport ölçümleri yapılabilir.

3.1.1. Sistemin Genel Yapısı

Çok fonksiyonlu örnek çubuğu, örnek bağlantı istasyonu, ölçüm tankı, elektromıknatıs ve diğer harici cihazlardan oluşan transport ölçüm sisteminin genel görünümü Şekil 3. 1'de verilmiştir. Ölçümler esnasında çok fonksiyonlu örnek çubuğu ölçüm tankına yerleştirilir. Ölçüm çubuğunun üst ucu ölçüm bağlantı istasyonu aracılığıyla ölçüm yapan harici cihazlara bağlıdır. Ölçüm tankı bünyesinde manyetik alan uygulamaya yarayan elektromıknatıs bulunmaktadır. Elektromıknatıs ve diğer harici cihazlar bilgisayar ile kontrol edilmektedir.

Transport ölçümleri esnasında örneğe manyetik alan uygulayabilmek ve örneği ısıtıp soğutmak için, ölçüm tankı olarak PPMS (Quantum Design PPMS 9T) sistemi kullanıldı. Bu sayede örneğin sıcaklığı 2K-400K aralığında değiştirilebilmekte ve örneğe $\pm 9T$ 'ya kadar manyetik alan uygulanabilmektedir. Direnç ölçümleri esnasında "Keithley 6221 AC and DC Current Source" ile akım uygulanarak, "Keithley 2182A Nanovoltmeter" ile voltaj değerleri okunmaktadır. Yüksek direnç değerine sahip yarı

12mm x 12mm olan örnekler yerleştirilebilmektedir. Ölçüm yuvası pirinçten, örnek çubuğunun diğer kısımları ise manyetik olmayan paslanmaz çelikten imal edilmiştir.



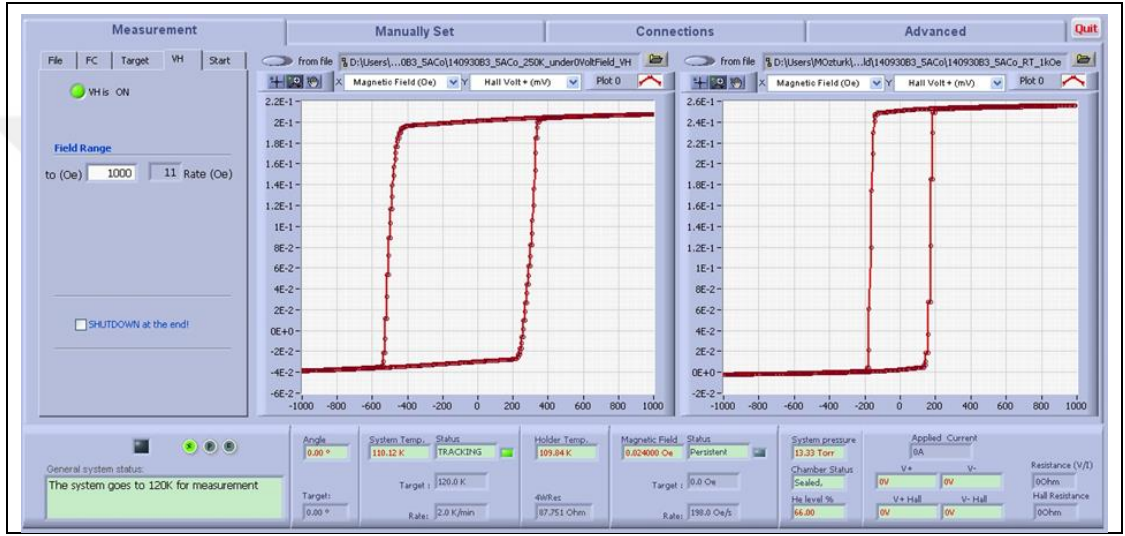
Şekil 3. 2: a) Çok fonksiyonlu örnek çubuğunun, b) örnek yuvasının ve c) örnek bağlantı istasyonunun fotoğrafları.

Çok fonksiyonlu örnek çubuğunun, üst ucunda vakuma uygun elektriksel bağlantı girişi bulunmaktadır. Buradan Şekil 3. 2.b)'deki örnek bağlantı istasyonuna yalıtkan kaplı kablolarla iletim sağlanır. Örnek bağlantı istasyonunda örnek çubuğu ile harici cihazlar arasında köprü vazifesi gören on iki adet bağlantı noktası bulunmaktadır. Bu noktalardan dördü örnek tutucunun dişi parçası üzerinde yer alan cernox termometre tarafından kullanılmaktadır. Geriye kalan sekiz nokta ise ölçüm cihazlarını bağlamak içindir. Örnek bağlantı istasyonunun üzerinde bir adet dişi örnek tutucu bulunmaktadır. Bu sayede, ölçümü yapılmak istenen örneklerin kontaktları önceden test edilebilir.

3.1.3. Kontrol Yazılımı ve Arayüz

Transport ölçüm sisteminde kullanılan bütün cihazların (çok fonksiyonlu örnek çubuğu döndürücüsü hariç) kontrolü cihazlarda bulunan GPIB (General Purpose Interface Bus) erişim noktaları ile sağlanmaktadır. Örnek çubuğu üzerindeki döndürücü motorun bilgisayarla iletişimi ise RS232 portu üzerinden USB girişi ile yapılmaktadır. Sistem çok fazla değişken içerdiğinden cihazların kontrolü tamamen

otomatik olarak ve bilgisayar kontrollü yapılmaktadır. Bu amaçla transport ölçümlerine özel, NI Labview tabanlı, kullanımı kolay bir yazılım geliştirilmiştir. Şekil 3. 3'te yazılımın kullanıcı arayüzünün görüntüsü gösterilmektedir. Kullanıcı arayüzünün altındaki göstergelerde sistem sıcaklığı, örnek sıcaklığı, vakum, örnek açısı, manyetik alan gibi verilerin gerçek zamanlı takibi yapılabilmektedir. Aynı zamanda devam eden ölçümler ile eski veriler eş zamanlı olarak ekranda gösterilebilmektedir. Transport sistemi yazılımının arka planına ilişkin bazı temel bilgiler tezin sonunda EK B'de verilmiştir.



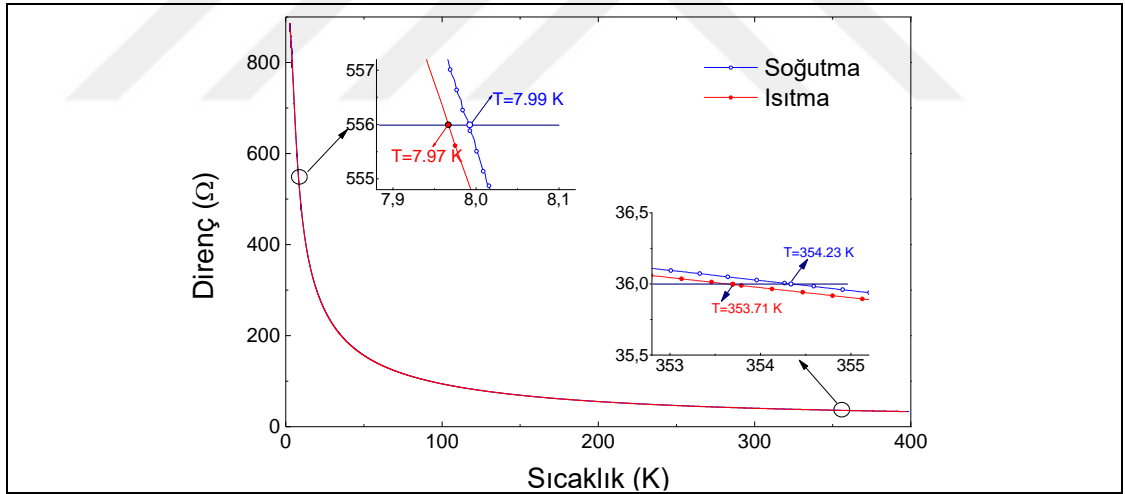
Şekil 3. 3: Kontrol yazılımının kullanıcı arayüzü.

3.1.4. Sıcaklık Sensörü ve Kalibrasyonu

Transport sisteminde, PPMS tankının kendi termometreleri bulunmaktadır. Ancak, çubuğun örneğe en yakın yerinde ayrıca bir de “cernox” termometre yer almaktadır. Sistemde direk temas yerine örneğin sıcaklık değişimi vakum ortamında bir miktar bulunan helyum gazı tanecikleri yardımıyla sağlanmaktadır. Helyum iyi bir ısı iletkenidir [127]. Bu nedenle örnekler hedef sıcaklığa kısa sürede ulaşmaktadır. Ancak, sıcaklık değişimlerine karşı manyeto-direnç ölçümleri aşırı hassasiyet gösterdiğinden, ölçümler cernox termometresi iyice sabitlendikten sonra yapılmalıdır.

Cernox termometre, örnek tutucunun dışı BDK kısmının altına yerleştirilmiş ve kullanılmadan önce kalibre edilmiştir. Aşağıda, cernox termometrenin kalibrasyonu için yapılmış olan işlemler anlatılmıştır.

Örnek tutucuda bulunan bu termometrenin kalibrasyonu için öncelikle kalibrasyonu bilinen başka ticari standart bir cernox termometre erkek BDK üzerine yerleştirildi ve ölçüm için dört nokta yöntemine göre bağlantıları yapıldı. Her iki termometre örnek tutucu üzerinde olduğundan ısıtma ve soğutma kaynaklarına uzaklıkları eşit mesafededir. “Lakeshore-331 Temperature Controller” cihazına standart termometrenin ticari kalibrasyon dosyaları yüklenerek, ortalama 0.2 K sıcaklık adımıyla, 2 K - 400 K arasında “Keithley 2002 Multimeter” cihazıyla dört nokta yöntemiyle yeni termometrenin direnç değerleri hem ısıtma, hem de soğutma esnasında kaydedildi. Bu ölçümler esnasında elde edilen sıcaklık-direnç grafiği Şekil 3. 4’te gösterilmiştir. Şekil 3. 4’teki iç grafiklerde görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda (8 K civarında) soğutma ve ısıtma eğrileri arasındaki fark 0.02 K gibi çok küçük bir değere sahipken, yüksek sıcaklıklarda (354 K civarında) bu fark 0.5 K gibi yine kabul edilebilir bir düzeydedir. Eğrilerin şeklinden ve elde edilen değerlerden de görüldüğü üzere, cernox termometre 5 K - 400 K aralığında tüm sıcaklıklar için oldukça hassas sonuçlar vermiştir.



Şekil 3. 4: Transport sistemindeki örnek tutucuda bulunan cernox termometrenin direnç-sıcaklık ölçümü.

Cernox termometrenin ısıtma ve soğutma esnasında direnç-sıcaklık ölçümü alındıktan sonra, her iki eğrinin ortalaması alınarak, yeni tek bir eğri oluşturuldu. Bu eğriyi fit etmek için aşağıda denklem (3.1) ile verilen ifade kullanıldı [128].

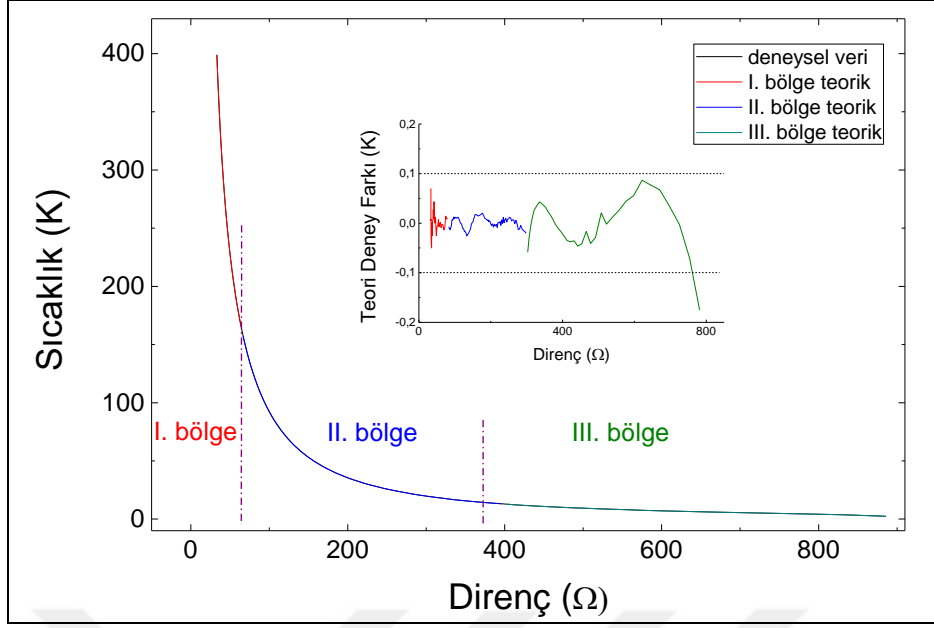
$$T = \frac{R}{a + bR + cR^2 + dR^3} \quad (3.1)$$

Bu denklemde T sıcaklık değeri, R direnç değeri, a, b, c ve d değerleri ise sabit katsayılardır. Bu denklem sayesinde herhangi bir sıcaklıkta cernox termometrede okunan direnç değeri sıcaklık değerine dönüştürülebilmektedir. Sıcaklığın yüksek hassasiyetle belirlenmesi için, kalibrasyon ölçümü ile elde edilen eğri eğim durumuna göre üç farklı bölgeye ayrıldı. Yukarıda formülü verilen ifadede yer alan sabit katsayılar her üç bölge için ayrı ayrı belirlendi. Bölgeler için elde edilen katsayılar Tablo 3. 1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1: Cernox termometrenin sıcaklık-direnç eğrisinin kalibrasyonunda kullanılan sabit değerler.

	I. bölge için	II. bölge için	III. bölge için
a	-0,02732	0,07032	-12,96771
b	8,50859E-4	-0,00272	0,08696
c	6,07795E-5	1,04412E-4	-8,24134E-5
d	4,20586E-7	2,41578E-7	3,49096E-7

Bu katsayılar ve denklem (3.1) kullanılarak her üç bölge için teorik olarak eğriler oluşturuldu. Elde edilen teorik ve deneysel eğriler Şekil 3. 5’te her üç bölge için ayrı ayrı verilmiştir. Şekilde deney ile teorinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu uyumu detaylandırmak için direnç değerine göre çizdirilmiş teori ve deney arasındaki fark grafiği şekilde ayrıca iç grafik olarak verilmiştir. Teori ile deney arasındaki fark şekilde de görüldüğü gibi genelde 0.1 K’in çok altındadır.



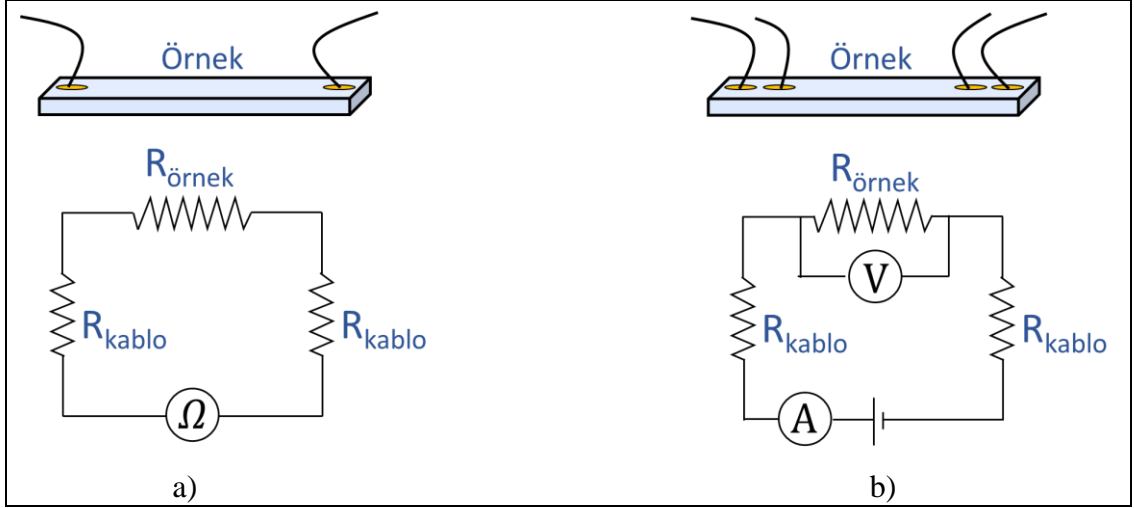
Şekil 3. 5: Cernox termometrenin direncindeki değişime göre elde edilen deneysel ve teorik sıcaklık eğrileri. İç grafikte deney ile teori arasındaki fark verilmiştir.

3.2. Kontakların Hazırlanması

Bu bölümde iki nokta ve dört nokta ölçüm teknikleri ile örnek tutucuya örneklerin yerleştirilmesi esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar anlatılacaktır.

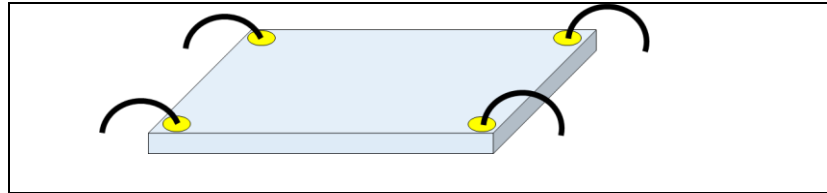
3.2.1. İki Nokta ve Dört Nokta Direnç Ölçüm Teknikleri

Malzemelerin dirençlerinin ölçümünde iki nokta (2N) ve dört nokta (4N) olmak üzere iki farklı ölçüm tekniği kullanılabilir. Bu ölçüm tekniklerine ait şematik çizimler ve bunlara karşılık gelen eşdeğer direnç devreleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekil 3.6.a)'daki gibi örnek üzerinde yalnızca iki noktadan kontak alınıp direnç ölçümü yapıldığında, ohm-metre kablo dirençlerini de okuyacaktır. Şekil 3.6.b)'deki gibi örnek üzerinden dört noktadan kontak alınırsa dıştaki kontaklardan akım sürülecek ve içteki kontaklardan voltaj değerleri okunacaktır. Bu durumda yalnızca örneğin kendisinden gelen direnç değeri okunmuş olur. Çünkü seri bağlı dirençlerden aynı akım geçer. Kablolardan geçen akım ile örnekten geçen akım her zaman için aynıdır. Ampermetrenin iç direnci sıfıra yakın değerdedir. Voltmetrenin iç direnci ise 10^{10} - 10^{15} Ohm mertebelerinde yani iletken örneklerin direncine görece sonsuz büyüklüktedir. Bu durumda dört nokta ölçüm tekniği ile iletken malzemelerde yalnızca örnek direnci okunmuş olur.



Şekil 3.6: a) İki nokta ve b) dört nokta direnç ölçüm tekniklerinin ve eşdeğer direnç devrelerinin şematik gösterimi.

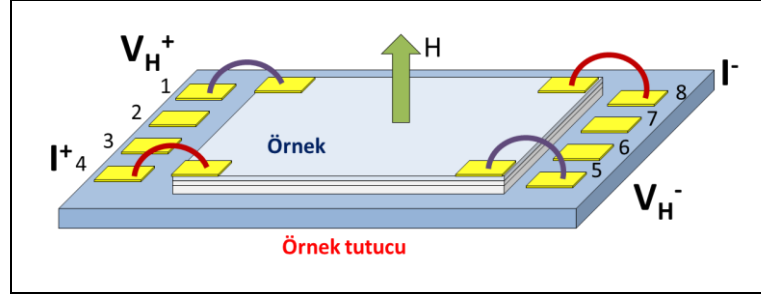
Dört nokta ölçümlerinde kontak noktaları Şekil 3.6.b)'deki gibi birbirlerine göre doğrusal olabildikleri gibi, Şekil 3. 7'deki gibi kare bir örneğin köşelerinde de olabilir. Kontakların köşelerde oluşturulduğu dört noktalı ölçüm tekniği van der Pauw metodu olarak adlandırılır [129]. Transport ölçümleri yapılan manyetik ince filmlerde AMR ve GMR gibi ölçümler için kontak noktalarının doğrusal olması tercih edilebilirken, AHE ve PHE gibi ölçümlerde kontak noktaları Van der Pauw metoduna uygun olarak hazırlanmaktadır.



Şekil 3. 7: Van der Pauw metoduna uygun olarak kontakların köşelerde olduğu ölçüm geometrisinin şematik gösterimi.

3.2.2. Örnek Tutucuya Örneklerin Yerleştirilmesi

Çok fonksiyonlu örnek çubuğunda bulunan örnek tutucuya yerleştirilebilecek örneklerin ebatları 12 mm x 12 mm'dir. Bu ve daha küçük ebattaki örnekler örnek tutucuya yerleştirilerek, örnek üzerinden kontaklar alınabilir. Şekil 3. 8'de AHE ölçümleri için örnekten örnek tutucuya yapılan bağlantılar ve örneğin konumlandırılması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 8: AHE ölçümleri için örneğin tutucu üzerinde konumlandırılması ve kontaklar gösterilmektedir.

Şekil 3. 8’de gösterildiği gibi AHE ölçümlerinde örnekler örnek tutucuya yerleştirildikten sonra van der Pauw metoduna uygun olarak bağlantılar örneğin dört köşesinde hazırlanır. Bağlantılar için dışı yalıtkan 0.05 mm - 0.1 mm çaplarında bakır tel kullanılabilir. Bakır telin bir ucu örneğe, diğer ucu örnek tutucuya gümüş boya/pasta ya da indiyum lehim teli ile tutturulur. Gümüş boyanın/pastanın avantajı bağlantı esnasında, kısmi de olsa, örneğin ısınmaya maruz kalmamasıdır. Kısmi ısıtmaya rağmen düşük erime sıcaklığı nedeniyle (~430K) indiyum lehimleme tercih edilebilir. Gümüş boya/pasta ile lehimlemenin dezavantajı bağlantıların nispeten kolay bir şekilde yüzeyden kopmalarıdır. Gümüş boya/pasta kullanıldığı durumlarda, kontakların kurumması ve katılaşması için ölçümlerden önce en az yarım saat beklenmesi gerekir. Bağlantı noktaları hazırlandıktan sonra multimetre ile bağlantıların çalışıp çalışmadıkları direnç değerlerine bakılarak test edilebilir. Bu test esnasında bağlantılara zarar vermemeye özen gösterilmelidir. Bunun için örnek tutucuda numaralandırılmış noktalardan karşılıklı olarak direnç değerleri okunur ve değerlerin birbiriyle uyumlu olup olmadıkları tespit edilir. Ayrıca kurumayı hızlandırmak ve bağlantıları güçlendirmek için bekleme esnasında örnek çeşidine göre bir miktar ısıtma yapılabilir.

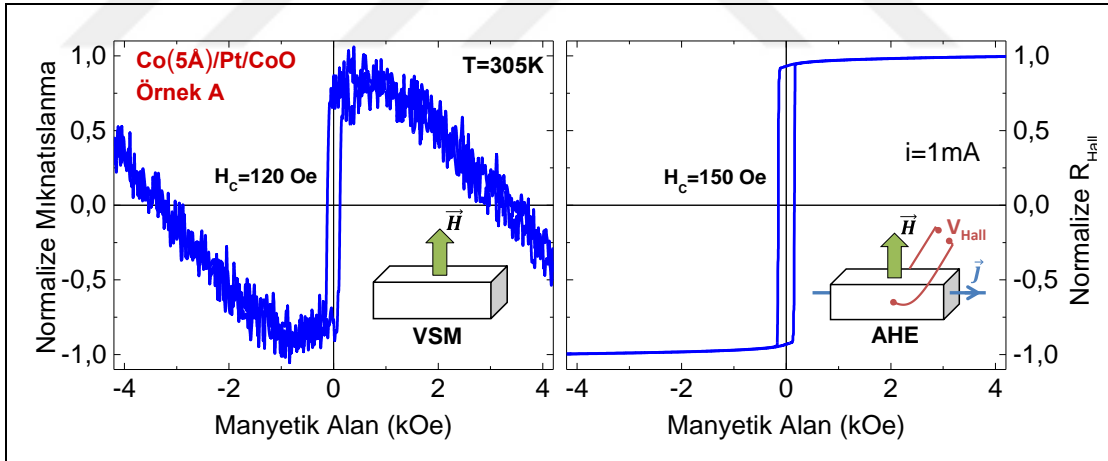
Bunların dışında, örnekler ve kontak noktaları ile ilgili aşağıda verilen genel birkaç hususunda göz önünde bulundurulması ölçümlerin kalitesi açısından önemli olacaktır [113].

- Örnek yüzeyine bağlanan tellerin yüzeye iyi tutunup, tutunmadığına dikkat edilmelidir. Bunun için kontak tipinin omik olması (metal-metal kontağı) uygun olacaktır.
- Kontak noktalarının ortalama çapı, kontaklar arasındaki mesafeden mümkün olduğunca küçük olmalıdır.

- Ölçümlerde sıcaklık dalgalanması termomanyetik etkilere neden olabildiğinden, örneğe uygulanan akımın örneği ısıtmayacak büyüklükte olmasına ve ölçüm ortamında sıcaklığın sabit tutulabilmesine dikkat edilmelidir. Bunun için $P=i^2.R$ ile hesaplanan elektriksel güç değeri 1-2 mW seviyesinde tutulabilir.
- Yüzey etkilerinin çok önemli olduğu örneklerde (özellikle yarıiletken malzemelerde) kontakların ve ölçümün yapıldığı ortamın temiz olmasına özen gösterilmeli ve ölçümler için vakum ortamları tercih edilmelidir.

3.3. Test Ölçümleri

Çok fonksiyonlu örnek çubuğunu ve transport ölçüm sisteminin bütün parametrelerini test etmek için en uygun yöntemlerden biri olması sebebiyle, dik mıknatıslanmaya sahip örneklerde AHE ölçümleri yapıldı. Bunun için silika camlar üzerine büyütülmüş dik mıknatıslanmaya sahip iki adet Pt(5 Å) /Co(5 Å) /Pt(5 Å) /CoO(10 nm) /Pt(3 nm) ve Pt(5 Å) /Co(4 Å) /Pt(5 Å) /CoO(10 nm) /Pt(3 nm) ince film örnek kullanıldı. Bu örnekler sırasıyla örnek A ve örnek B olarak isimlendirildi.

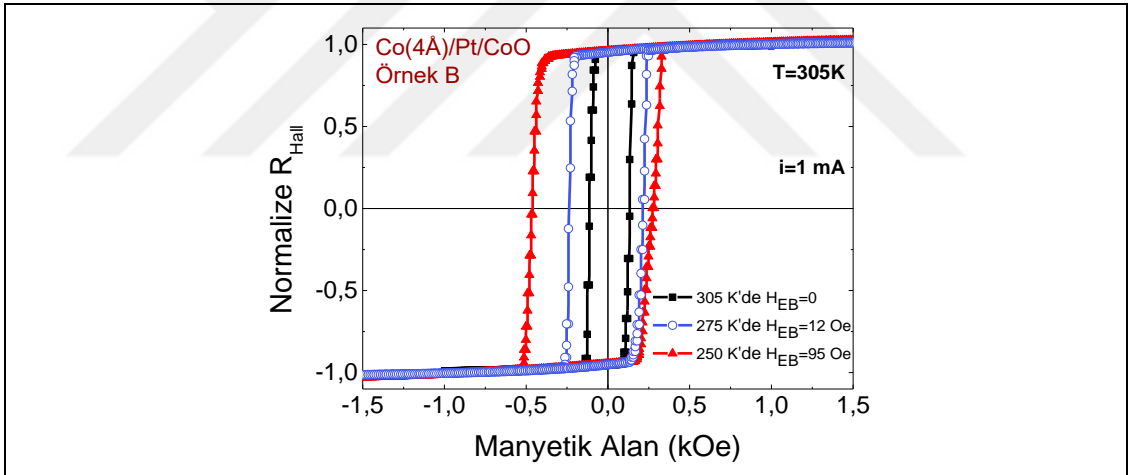


Şekil 3. 9: Dik mıknatıslanmaya sahip örnek A'nın VSM (solda) ve AHE (sağda) teknikleri ile ölçülmüş mıknatıslanma eğrisi.

Şekil 3. 9'da örnek A'ya ait VSM (sol) ve AHE (sağ) ile oda sıcaklığında alınmış ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi VSM'den alınmış eğrinin sinyal/gürültü oranı AHE'ye kıyasla oldukça düşüktür. Ayrıca VSM ölçümünde diyamanyetik katkı baskın görülmektedir. AHE ile yapılan ölçümde ise çözünürlük oldukça yüksektir ve eğrinin şekli oldukça nettir. VSM ölçümlerinde örnekten gelen

bilginin yanında, alttaş ve örnek tutucudan da sinyal gelmektedir. Bu tür cihazlarla yapılan aşırı ince filmlerin ölçümlerinde, örnek dışından gelen katkılar, örneğin sinyalini baskılamaktadır [55, 130].

Şekil 3. 10'da örnek B'ye ait sıcaklığa bağlı AHE ile EB ölçüm sonuçları verilmiştir. Transport ölçüm sistemiyle 2 K ile 400 K aralığında tüm sıcaklıklarda ölçümler yapılabilmektedir. Burada örnek olarak yalnızca 250 K, 275 K ve 300 K sıcaklıklarında yapılmış sonuçlar verilmiştir. Örnekte hem ferromanyetik (FM), hem de antiferromanyetik (AF) tabakalar olduğundan, AF malzeme olan CoO'nin Néel sıcaklığının ($T_N \sim 291$ K) altındaki ölçümlerde EB etkisi görülmektedir [55, 131]. Oda sıcaklığında simetrik bir eğri gözlenirken, 275 K'de 12 Oe'lik EB alanı, 250 K'de ise 95 Oe'lik EB alanı elde edilmiştir. Bu kadar ince bir film için yüksek hassasiyet ve netlikte elde edilen ölçüm sonuçları, geliştirilen ölçüm sisteminin ince filmlerdeki MR ve Hall etkilerinin incelenmesi için uygunluğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3. 10. Dik mıknatıslanmaya sahip Örnek B'nin farklı sıcaklıklarda AHE tekniği ile ölçülmüş EB eğrileri.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Elektrik alan ile exchange bias etkisinin kontrolü için uygun örneklerin büyütülmesi ve elektrik alan ölçümlerine uygun bir şekilde kontaklarının hazırlanması gerekmektedir. Bu bölümde ilk olarak elektrik alan uygulamalarına uygun olarak hazırlanmış exchange bias etkisi gösteren dik mıknatıslanmaya sahip örneklerin büyütülmesi ve bu örneklerin yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi anlatılmıştır. Daha sonra exchange bias'ın elektrik alan ile düşük sıcaklıklarda kontrolüne yönelik yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Son kısımda ise, aynı etkiyi oda sıcaklığında gösteren malzemelerin elde edilmesi için yapılan çalışmalar verilmiştir.

4.1. Pt/Co/Pt/CoO Örneklerde Anormal Hall Etkisi ile Exchange Bias Etkisi Ölçümleri

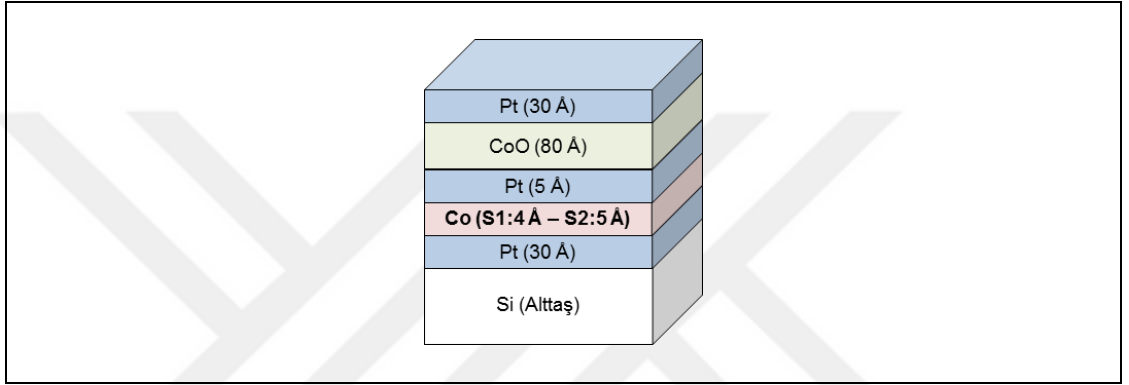
4.1.1. Giriş

Bu kısımda exchange bias etkisi gösteren, dik mıknatıslanmaya sahip örneklerin elde edilmesi ve bu örneklerin yapısal/manyetik özelliklerinin karakterizasyonu üzerine çalışıldı. Örneklerin yapısal özellikleri x-ışını yansıması (XRR) tekniği ile incelendi [38, 55]. XRR ile örneklerin kalınlık, yoğunluk ve ara yüzey pürüz değerleri belirlendi. Daha sonra örneklerin manyetik özellikleri manyeto-optik Kerr etkisi (MOKE) ve AHE metotları ile incelendi [132]. AHE ile elde edilen sonuçlar MOKE ile ölçülen sonuçlarla karşılaştırıldı.

4.1.2. Örneklerin Hazırlanması

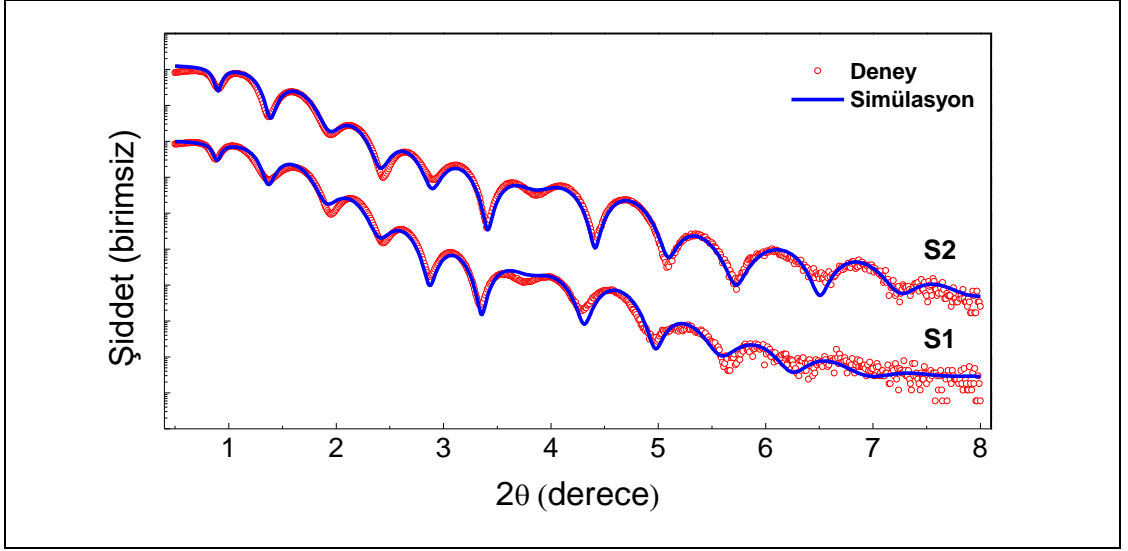
Örnekler, yüzeyi oksitlenmiş Si (001) altaş üzerine yüksek vakum altında ($<10^{-8}$ mbar) magnetron saçtırmalı kaplama tekniği ile büyütüldü. Hazırlanan iki farklı örnek sisteminin şematik gösterimi Şekil 4. 1'de verilmiştir. İki örnek arasındaki temel fark ferromanyetik Co tabakasının kalınlığının değişmesidir. Her iki örnek için de önce altaş üzerinde 30 Å kalınlığında Pt tabaka büyütüldü. Ardından ferromanyetik Co tabakası bir örnekte 4 Å, diğerinde ise 5 Å olacak şekilde hazırlandı. Daha sonra Co üzerine 5 Å kalınlığında Pt tabakası büyütüldü. Böylece

Co katmanının her iki yüzeyinde de bulunan Pt ile dik mıknatıslanmaya katkı sağlayacak yüzey anizotropisinin artırılması hedeflendi (Bkz. Bölüm 2.1.4). Ardından AFM malzeme olarak 80 Å kalınlığında CoO tabakası kullanıldı. Co ile CoO arasındaki Pt tabakası aynı zamanda Co tabakasının oksitlenmesini de engellemektedir. Son olarak, koruyucu katman olarak ve daha kolay kontak alabilmek için en üste Pt tabakası büyütüldü. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında her iki örneğin tanımlamasında kolaylık olması açısından Co kalınlığı 4 Å olan örnek S1 şeklinde, Co kalınlığı 5 Å olan örnek S2 şeklinde isimlendirilmiştir.



Şekil 4. 1: Çalışılan örnek sistemlerinin şematik gösterimi.

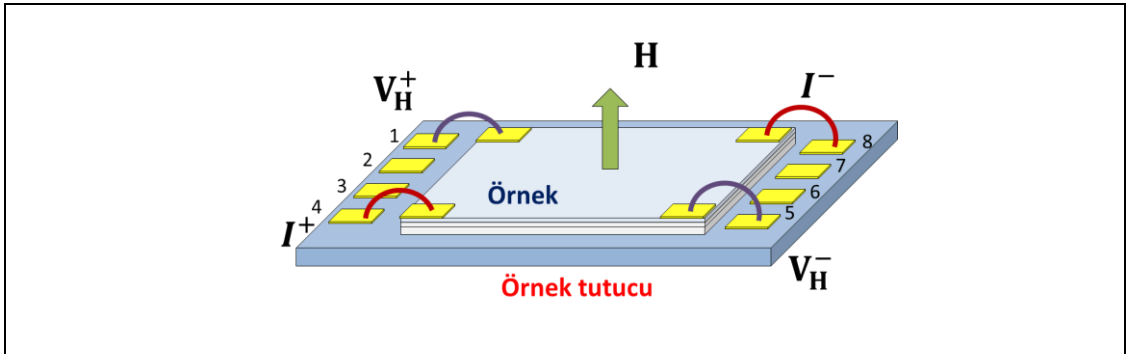
Şekil 4. 2’de S1 ve S2 örneklerine ait XRR ölçüm sonuçları ve “GlobalFit” programı ile yapılan simülasyonlar verilmiştir. Bu simülasyonlar ile altaş üzerine büyütülen her bir tabakanın yoğunluğu, kalınlığı ve pürüzlülüğü hesaplanmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen veriler Şekil 4. 1’de gösterilen beklenen değerlerle uyumlu çıkmıştır. Tek farklılık, altaşın üzerinde yaklaşık 1.5 nm kalınlığında SiO₂ tabakasının görülmesidir. Atmosfer ortamı ile temas etmiş olan Si altaşlar için yüzeyde böyle bir doğal oksitlenme genel olarak beklenen bir durumdur.



Şekil 4. 2: S1 ve S2 örneklerinin XRR ölçümleri ve simülasyon sonuçları.

- AHE geometrisi ölçümleri için bağlantıların hazırlanması:

Önce örnekler transport ölçüm sistemine uygun olarak 4 mm x 4 mm ebatlarında kesildi ve örneklerin dört köşesinden alınan kontaklarla bağlantılar hazırlandı. Bağlantılar için 0.1 mm çapında bakır tel kullanıldı. Bakır telin bir ucu örneğe, diğer ucu Şekil 4. 3'te gösterildiği gibi örnek tutucuya gümüş boya ile tutturuldu. Gümüş boya sürüldükten sonra, yarım saat kurutma için beklenildi. Ardından multimetre ile bağlantıların çalışıp çalışmadıkları direnç değerlerine bakılarak test edildi. Örnek tutucuda numaralandırılmış noktalardan, iki nokta arasında sırasıyla 1-5, 4-8, 1-4, 5-8 olacak şekilde, direnç ölçümleri alındı. Kontak kalitesini artırmak için örnekler 400 K'e kadar ısıtıldı ve bu sıcaklıkta yarım saat kadar bekletildi.



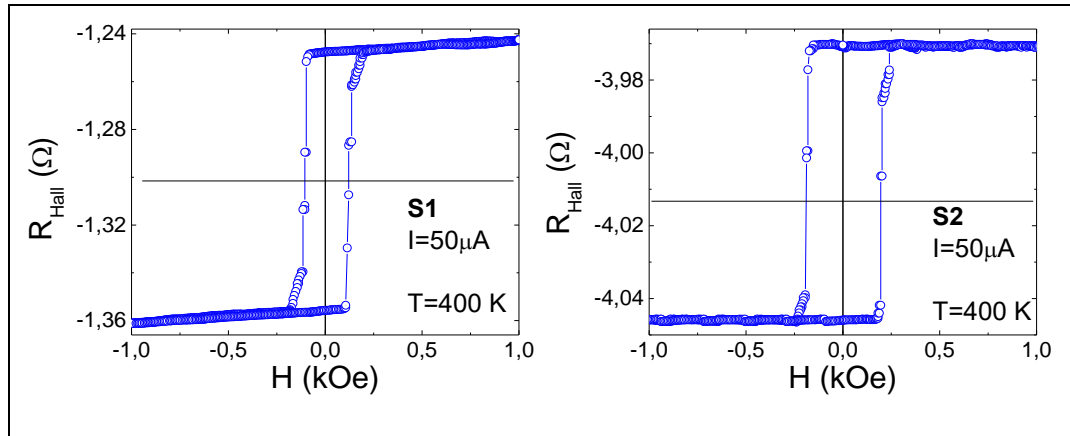
Şekil 4. 3: AHE ölçümleri için örneklerin tutucuya yerleştirilmesi.

AHE ölçümleri için, bir önceki bölümde anlatılan, kendi geliştirdiğimiz transport ölçüm sistemi kullanıldı. Ölçüm sisteminin üzerinde bulunan döndürücü sayesinde manyetik alan örnek düzlemine dik olarak uygulandı ve Şekil 4. 3'te gösterildiği gibi Van der Pauw geometrisine uygun olarak çapraz bağlantılarla örneğe akım uygulanarak voltaj ölçümleri yapıldı.

4.1.3. Veriler ve Tartışma

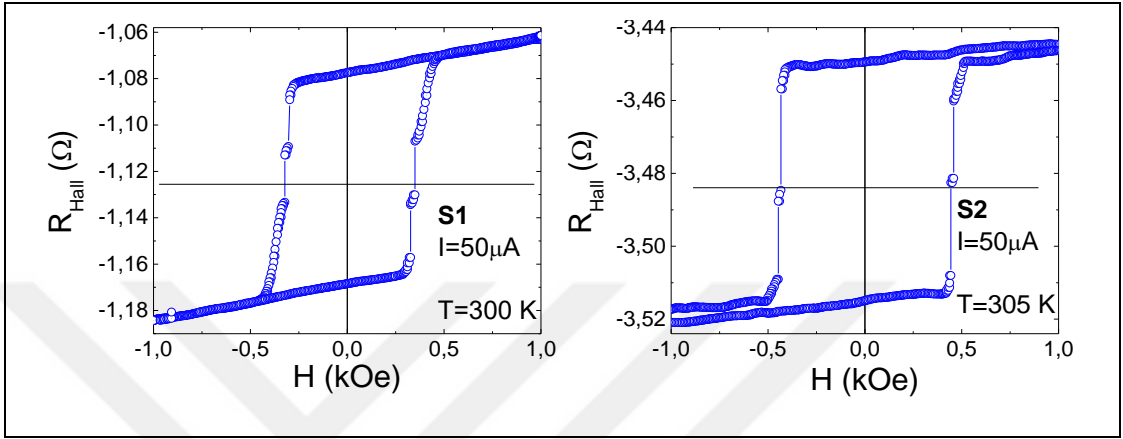
4.1.3.1. Oda Sıcaklığında ve Yüksek Sıcaklıklarda AHE Ölçümleri

Örnekler vakum ortamında 400K'e kadar ısıtıldı ve ölçümden önce bu sıcaklıkta yarım saat kadar bekletildi. Ardından örnekler 50 μ A büyüklüğünde akım uygulandı ve manyetik alana bağlı olarak ölçülen Hall voltaj değerleri kaydedildi. Okunan Hall voltajı değerleri uygulanan akım değerine bölünerek Hall direnci elde edildi. Şekil 4. 4'te S1 ve S2 örnekleri için 400 K'de elde edilen histeresis ölçüm sonucu verilmiştir. Direnç değerlerinin düşey eksende orijine göre simetrik olmaması hazırlanan kontakların geometrisinden kaynaklanmaktadır. Çünkü kontaklar tam olarak bir karenin köşelerine yerleştirilemediğinde, AHE'nin yanı sıra normal direnç ve AMR katkıları da ölçüm sonucuna eklenmektedir. Ancak bu katkılar sıfırlayıcı alan değerlerini ve EB alanını değiştirmedikenden düşeydeki kaymaların düzeltilmesine ihtiyaç duyulmamıştır. 400 K'de Co kalınlığı 4 Å olan S1 örneğinin sıfırlayıcı alan değerleri 110 Oe, Co kalınlığı 5 Å olan S2 örneğinin sıfırlayıcı alan değerleri 195 Oe olarak ölçülmüştür.



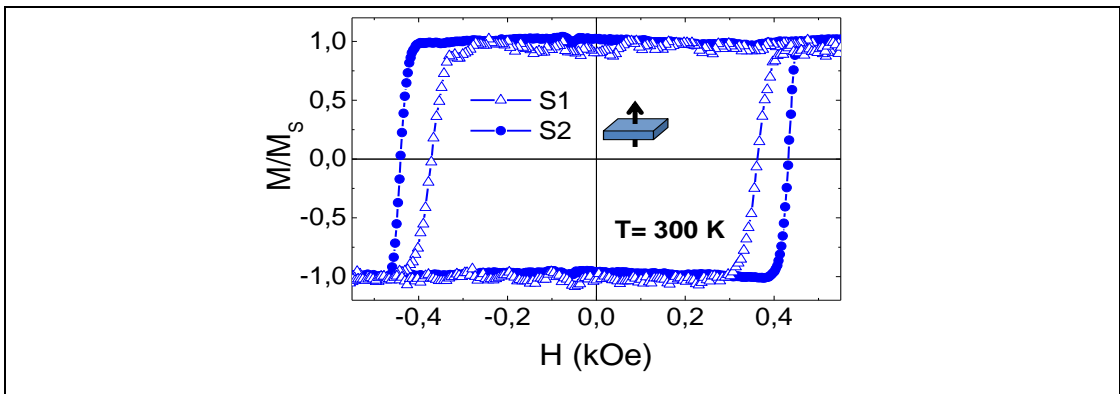
Şekil 4. 4: S1 ve S2 örneklerinin 400 K'de AHE ile ölçülen histeresis eğrileri.

Yüksek sıcaklık ölçümlerinin ardından oda sıcaklığında yine $50 \mu\text{A}$ akım uygulanarak her iki örnek için Hall ölçümleri yapıldı. Şekil 4. 5'te manyetik alana bağlı olarak değişen Hall direnç değerleri her iki örnek için gösterilmiştir. Co kalınlığı 4 \AA olan S1 örneği için oda sıcaklığında sıfırlayıcı alan değerleri 335 Oe , Co kalınlığı 5 \AA olan S2 örneği için sıfırlayıcı alan değerleri 440 Oe olarak ölçüldü.



Şekil 4. 5: S1 ve S2 örneklerinin oda sıcaklığında AHE ile alınan histeresis ölçümleri.

Her iki örnek için oda sıcaklığında ayrıca MOKE ile de ölçümler yapıldı. MOKE ile elde edilen ve Şekil 4. 6'da gösterilen histeresis eğrilerinde sıfırlayıcı alanlar S1 ve S2 için sırasıyla 367 Oe ve 436 Oe olarak bulunmuştur. Buna göre AHE ile elde edilen sonuçlar MOKE ölçümleri ile elde edilen sonuçlara çok yakındır.

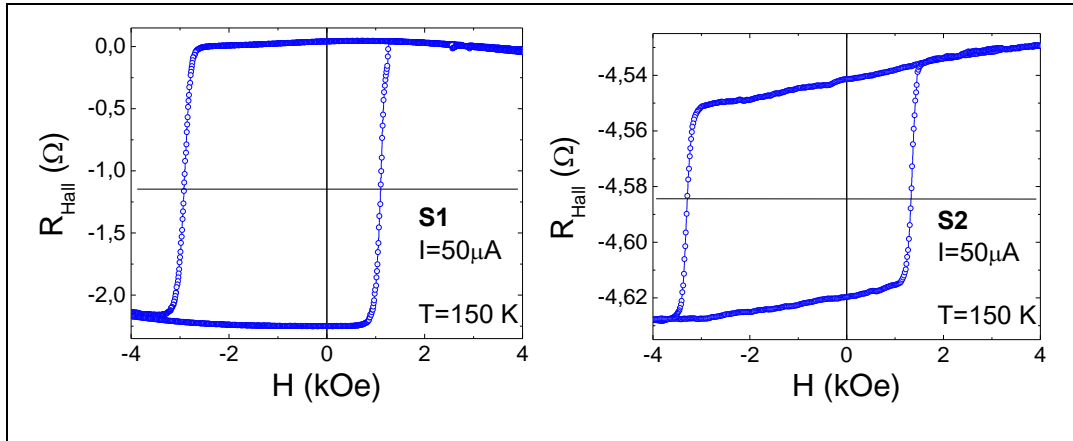


Şekil 4. 6: S1 ve S2 örneklerinin oda sıcaklığında MOKE ile dik geometride alınan histeresis ölçümleri.

Bu örnekler için aynı zamanda VSM ile histeresis eğrisi ölçümleri de yapılmıştır. MOKE ve VSM ile yapılan ölçümlerin sonuçları “*Journal of Magnetism ve Magnetic Materials*” dergisinde yayınlanan bir çalışmamızda verilmiştir [55]. MOKE ile AHE çalışmalarında elde edilen sonuçlar yukarıda bahsedildiği gibi birbirlerine çok yakın değerdeyken, VSM sonuçları bunlardan bir miktar farklı olmuştur. Bunun nedeni VSM ölçümlerinde örnek ve alttaş dâhil tüm manyetik sinyallerin ölçüme dâhil edilmesi, AHE ve MOKE ölçümlerinde ise sadece örnekten bilgi alınmasıdır.

4.1.3.2. Düşük Sıcaklıkta Exchange bias Etkisi Ölçümleri

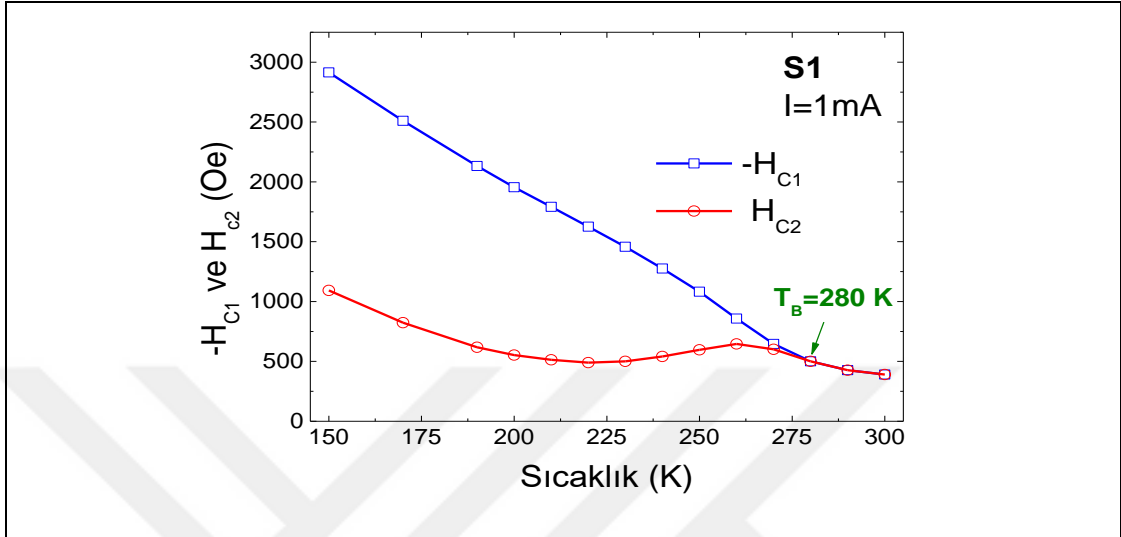
Düşük sıcaklık exchange bias etkisi ölçümleri için, örnekler CoO Néel sıcaklığının ($T_N=291$ K [133]) çok üstüne, 400 K’ye ısıtıldı. Ardından 2 kOe’lik manyetik alan altında hedef sıcaklıklara soğutuldu. T_N ’nin altındaki hedef sıcaklıklarda her iki örnekte de exchange bias etkisi görüldü. Şekil 4. 7’de 150 K’de alınan histeresis eğrileri gösterilmiştir. Co kalınlığı 4 Å olan örnek (S1) için 150 K’de exchange bias alanı değeri 910 Oe olarak, Co kalınlığı 5 Å olan örnek (S2) için 150 K’de exchange bias alan değeri 960 Oe olarak belirlendi.



Şekil 4. 7: S1 ve S2 örneklerinin 150 K’de AHE ile ölçülen ve EB gözlenen histeresis eğrileri.

Şekil 4. 8’de Co kalınlığı 4 Å olan örnek (S1) için, histeresis eğrilerinden okunarak elde edilmiş, sıfırlayıcı alanların sıcaklığa bağlı değişim grafiği çizdirilmiştir. Buna göre örnek soğutuldukça 280 K’den itibaren sıfırlayıcı alan değerleri birbirlerinden ayrılmaktadır. Yani Co kalınlığı 4 Å olan örnek için AHE

ölçümlerinden elde edilen engelleme sıcaklığı 280 K civarındadır. AHE ölçümleri ile tespit edilen bu sıcaklık değeri, daha önce VSM ile elde edilen sonuçlarla aynıdır [55].



Şekil 4. 8: Co kalınlığı 4 Å olan S1 örneği için sıfırlayıcı alanların sıcaklığa bağlı değişim grafiği ve engelleme sıcaklığı.

4.1.4. Sonuçlar

Tezin bu kısmında, magnetron saçtırma tekniği kullanılarak yüksek vakum koşullarında Si alttaşlar üzerine büyütülen Pt/Co(4Å)/Pt/CoO/Pt ve Pt/Co(5Å)/Pt/CoO/Pt manyetik ince filmlerinin manyetik özellikleri AHE yöntemiyle incelendi. Oda sıcaklığında AHE ile elde edilen sonuçlar MOKE ölçümleri ile düşük sıcaklıklarda elde edilen sonuçlar ise VSM ölçümleri ile kıyaslandı.

Co kalınlığı 5 Å olan örneğin sıfırlayıcı alan değerleri ve EB alanı 4 Å olan örneğe göre daha büyük çıktı. MOKE ve AHE ile oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde sıfırlayıcı alan değerlerinin birbirleri ile hemen hemen aynı olduğu gözlemlendi. Ancak düşük sıcaklıklarda AHE ile elde edilen değerler VSM’de elde edilen değerlerden bir miktar farklı çıktı. Bu durum, AHE’den farklı olarak VSM’in alttaş ile birlikte örneğin tamamından ve ölçümün yapıldığı tüm çevreden bilgi alması ile açıklandı.

4.2. Pt/Co/Cr/CoO Örneğinde Dik ve Paralel Geometrilere Exchange bias Etkisinin Birlikte Görünmesi

4.2.1. Giriş

Exchange bias etkisi manyetik veri depolama ünitelerinden manyetik biyosensörlere kadar birçok teknolojik uygulama alanında yer almaktadır [40, 80]. EB bir AF ile yakın komşuluk halinde bulunan bir FM malzemenin belirli koşullar altında histeresis eğrisinde meydana gelen kayma olarak tanımlanır [1, 37]. Kaymanın görülmesi için FM/AF yapısı Néel sıcaklığının üstünde bir sıcaklıktan manyetik alana maruz bırakılarak soğutulmalıdır [1, 51, 55, 131]. EB ara yüzey değiş tokuş çiftleşmesine dayandığından, ara yüzeyde gerçekleşen ya da ara yüzeyi etkileyen en ufak bir değişiklik EB özelliklerini de değiştirmektedir. FM ile AF arasına bir başka ara tabakanın yerleştirilmesi, yerleştirilen ara tabakanın cinsi ve kalınlığı gibi etkenler EB sonuçlarını ciddi bir şekilde değiştirmektedir. EB sistemlerinde çalışmanın amacına göre Pt [52, 56, 71, 72, 134-137], Cu [71, 134-136, 138-140], Pd [141], Mn [142], Ru [83], Au [135, 139, 143], Ag [139], Ta [135] ve Cr [61, 140, 144, 145] gibi birçok element ara tabaka ya da alt tampon tabaka olarak tercih edilmektedir. Bu sayede FM katmanın mıknatıslanması ve anizotropisi değiştirilebilmektedir [52, 72, 146]. Alt ve/veya ara tabaka olarak Pt kullanılan çalışmalarda DMA'nın ve dik EB etkisinin arttığı gözlenmiştir [52, 72, 146]. Buna karşın Cr'un ara tabaka olarak kullanıldığı durumlarda exchange bias etkisinin azaldığı ifade edilmiştir [145]. Bununla birlikte ferromanyetik Co ince filmlerinin üzerine büyütülen Cr tabakasının anizotropiyi örnek düzlemine indirdiği gösterilmiştir [55, 144]. Ayrıca, Cr tabakası sadece birkaç atomik tabakadan oluştuğunda paramanyetik özellik göstermektedir [147].

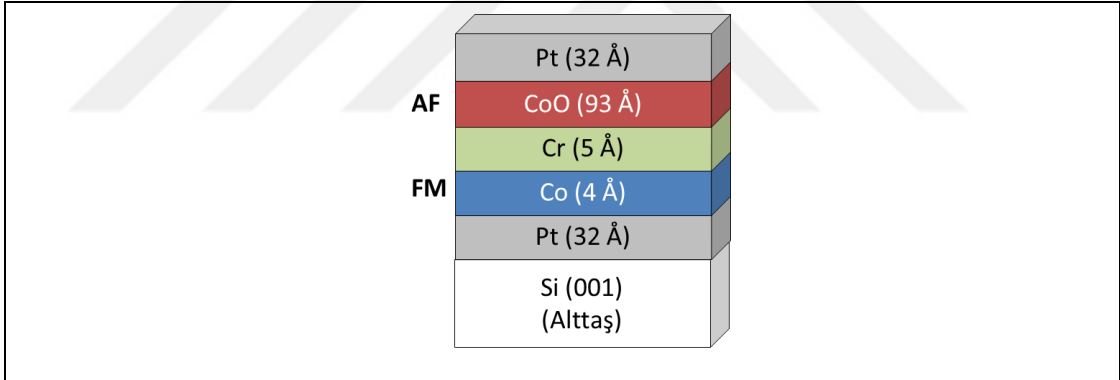
Exchange bias etkisinin keşfinden sonra Co/CoO sistemleri hem örnek düzleminde hem de örnek düzlemine dik eksenlerde yapılan çalışmalarda birçok yönüyle incelenmiştir.[17, 37, 83-85, 148, 149]. İnce Co filmi ile yapılan bu çalışmalarda EB etkisi dik ve paralel geometrilere ayrı ayrı gözlenmiştir. Aynı anda hem örnek düzleminde, hem de örnek düzlemine dik olarak EB etkisinin görüldüğü farklı örneklerle yapılan çalışmalar da mevcuttur [150-153]. Bu durum için, bazen iki farklı FM malzeme kullanılmış [150, 151], bazen FM malzemenin kalınlığı ve tabakaların tekrar sayısı değiştirilmiş [74], bazen çok katlı FM/AF yapılar

kullanılmış [152], bazen de farklı yönlerde soğutma alanları uygulanmıştır [153]. Bunların dışında NiFe/Cr₂O₃/Al₂O₃(0001) örneğinde örnek düzlemine paralel ve dik exchange bias etkisi aynı anda görülmüştür [154]. Bunun sebebi Cr₂O₃'ün AF spin eksenin hızlı tavlama (rapid thermal annealing) sonrasında bir miktar eğilmesidir.

Bu çalışmada, tek bir ferromanyetik tabakanın kullanıldığı Pt/Co/Cr/CoO ince filmde örnek düzlemine paralel ve dik exchange bias etkisi aynı anda elde edilmiştir. Bu etki FM tabakanın komşuları ile etkileşmesi sonucu yüzey anizotropilerinin değişimi ile sağlanmıştır.

4.2.2. Örneklerin Hazırlanması

Bu çalışmada, Si (001) tek kristal alttaş üzerine magnetron saçtırmalı kaplama yönetimiyle hazırlanan Pt (32 Å) / Co (4 Å) / Cr (5 Å) / CoO (93 Å) / Pt (32 Å) ince filminin sıcaklığa bağlı exchange bias etkisi özellikleri detaylı olarak incelendi. Hazırlanan örnek sisteminin şematik gösterimi Şekil 4. 9'da verilmiştir.



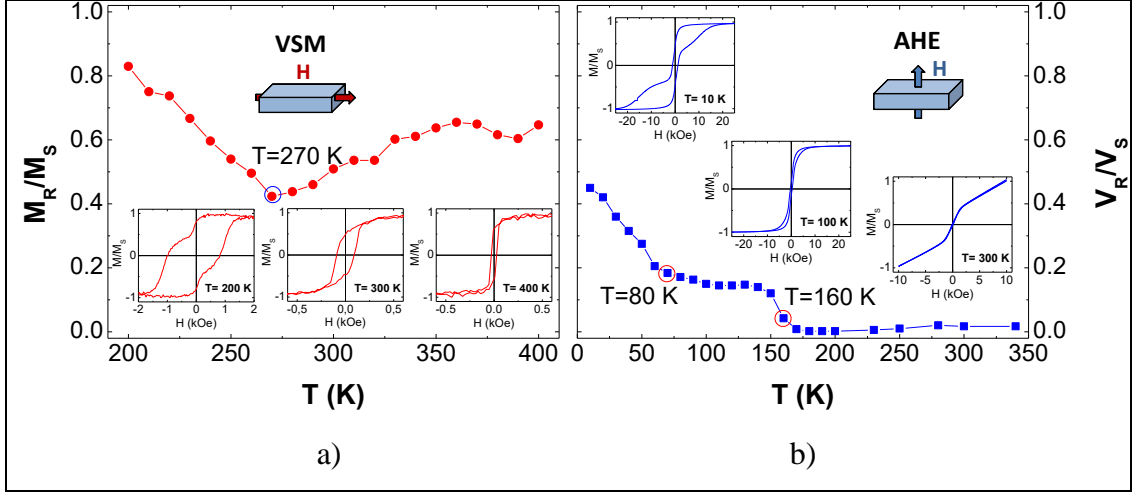
Şekil 4. 9: Çalışılan örnek sisteminin şematik gösterimi.

Örnekler büyütülmeye başlamadan önce temel basınç $\sim 10^{-8}$ mbar seviyesine getirildi. Film büyütme esnasında sistemin basıncı 1.4×10^{-3} mbar civarında tutuldu. Pt, Co ve Cr tabakaları oda sıcaklığında (RT) sırasıyla 2W DC, 25W RF ve 20W DC güçler kullanılarak hazırlandı. Benzer şekilde CoO tabakası da oda sıcaklığında 40 W RF güç kullanılarak reaktif saçtırma ile hazırlandı. En son olarak CoO'in üzerine koruyucu katman olarak Pt hazırlandı. CoO'in sitokiyometrik kimyasal kompozisyonu büyütme esnasında *X-ray photoelectron spectroscopy* (XPS) ile kontrol edildi. 625 K'in altında hazırlanan tüm CoO'lerde genel bir özellik olarak beklenen Co₃O₄ gibi diğer oksit fazlarının olduğu görüldü [131, 155]. Örnekteki

katmanların kalınlık, yoğunluk ve yüzey-ara yüzey pürüzlülükleri XRR ölçümleri ile simüle edilerek kontrol edildi. XRR fitinde elde edilen değerlerin, CoO yoğunluğu hariç, nominal değerlerle uyumlu olduğu görüldü. CoO'in yoğunluğunun nominal değerden düşük çıkması durumu CoO içerisinde farklı oksit fazlarının bulunmasıyla ilişkilidir. CoO'in bu özelliği ile ilgili farklı fazların görüldüğü XPS sonuçları farklı bir çalışmada yayınlanmıştır [131].

4.2.3. Veriler ve Tartışma

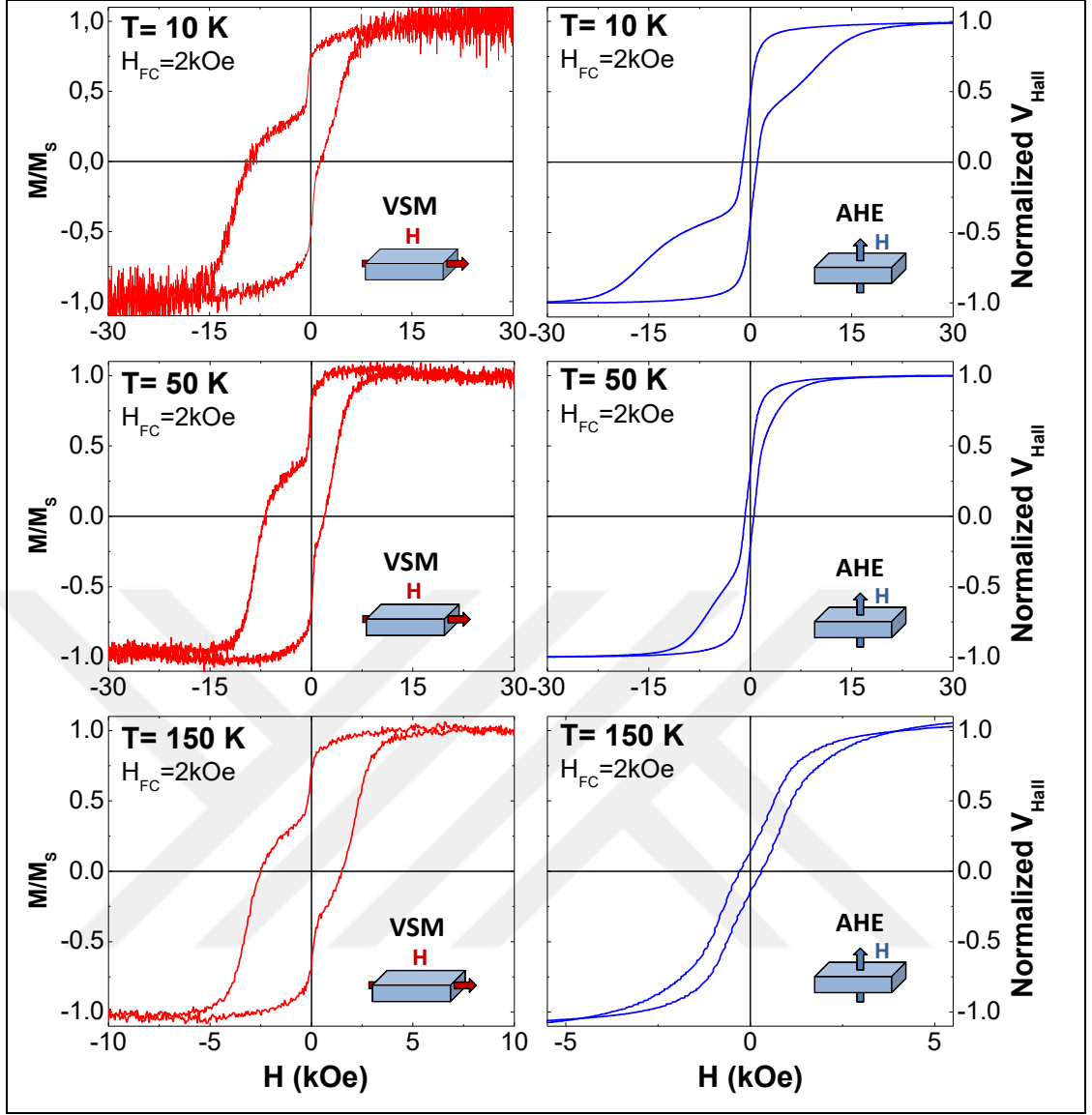
Örneğin izotermal mıknatıslanma ölçümleri için VSM ve AHE metotları kullanıldı. Şekil 4. 10.a)'da düzleme paralel ve Şekil 4. 10.b)'de düzleme dik geometrilere ölçülmüş histeresis ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı mıknatıslanma davranışı verilmiştir. VSM ölçümlerinde mıknatıslanma, AHE ölçümlerinde voltaj ölçüldüğünden, şekilde belirtilen M_R ve V_R sembolleri sırasıyla kalıcı mıknatıslanma ve kalıcı voltaj değerlerini, M_S ve V_S sembolleri ise doyum mıknatıslanması ile doyum voltajı değerlerini ifade etmek için kullanılmıştır. Şekillerde ayrıca belirli sıcaklıklarda ölçülen histeresis eğrileri iç grafik olarak verilmiştir. Oda sıcaklığı histeresis eğrilerinde düzleme paralel eksenin kolay eksen olduğu, ancak 10 K ile 400 K aralığında alınan eğrilerde sıcaklık değişimi ile birlikte eğrilerde kayda değer değişimler gözlenmiştir. Düzleme paralel geometride yapılan ölçümlerde sıcaklık 400 K'den 270K'e azalırken mıknatıslanma da azalmaktadır. 400 K ve 300 K'de tipik FM histeresis eğrileri ölçülürken, 200 K'de ölçülen mıknatıslanma eğrisi basamaklı bir yapıdadır. Bu basamaklı yapı sıcaklık düştükçe belirginleşmeye devam etmektedir.



Şekil 4. 10: a) Düzleme paralel geometride VSM sistemi ile ölçülmüş sıcaklığa bağlı M_R/M_S davranışı ve b) düzleme dik geometride AHE ile ölçülmüş sıcaklığa bağlı V_R/V_S davranışı.

Buna karşın, Şekil 4. 10.b)'de gösterilen AHE ile yapılan ölçümlerde 350 K'den 160 K'e doğru inilirken V_R/V_S değeri sıfır civarındadır. 160 K'den 80 K'e gidilirken bu değer artmaya başlamaktadır ve histeresis eğrilerinde iç grafiklerde basamaklı yapı görülmeye başlamaktadır. 80 K'in altına inildikçe V_R/V_S değeri daha güçlü bir şekilde artmakta ve histeresis eğrilerinde basamaklı yapı daha belirgin hale gelmektedir.

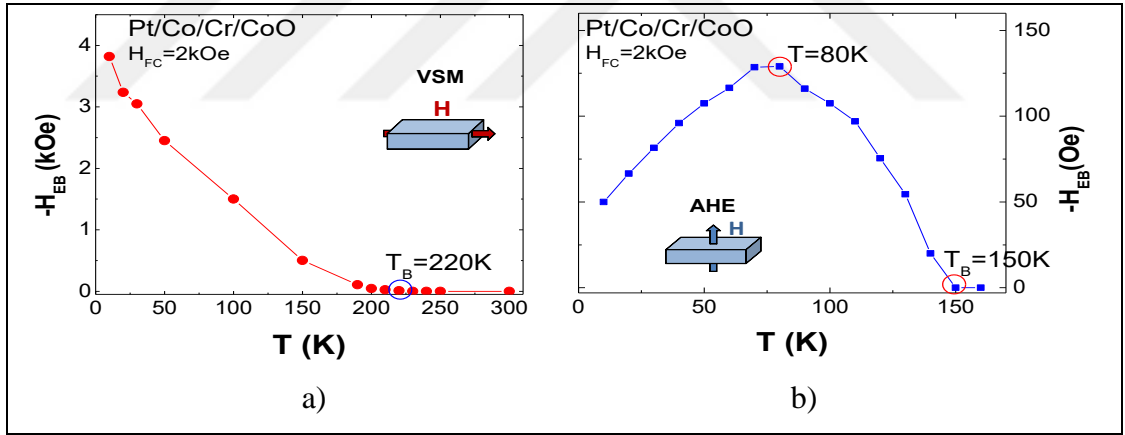
Örneğin dik ve paralel geometrilerde sıcaklığa bağlı histeresis davranışları incelendikten sonra, her iki geometri için sıcaklığa bağlı EB özellikleri ayrı ayrı incelendi. EB ölçümleri için örnek önce 320 K'e kadar ısıtıldı ve 2 kOe'lik manyetik alan altında hedef ölçüm sıcaklıklarına soğutuldu. Şekil 4. 11'de VSM ve AHE ile paralel ve dik geometrilerde 10 K, 50 K ve 150 K sıcaklıklarında alınmış histeresis eğrileri gösterilmiştir. Her iki geometride yapılan ölçümlerde eğrinin pozitif ve negatif yönde kaymalara uğradığı anormal iki basamaklı histeresis eğrileri elde edilmiştir. Paralel geometride (VSM, sol sütun) yapılan ölçümlerde kayma CoO'in Néel sıcaklığının (291 K [133]) biraz altında başlamaktadır ve sıcaklık azaldıkça kayma artmaktadır. Dik geometride ise (AHE, sağ sütun), basamaklı yapı Şekil 4. 10.b)'de bahsedilen mıknatıslanma davranışıyla uyumlu olarak 160 K'de başlamaktadır.



Şekil 4. 11: VSM ile paralel (sol sütun) ve AHE ile dik (sağ sütun) geometride farklı sıcaklıklarda kaydedilen normalize edilmiş histeresis ölçümleri.

Her iki ölçüm geometrisi için exchange bias etkisinin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 4. 12’de verilmiştir. Burada EB alanının (H_{EB}) sıcaklığa bağlı değişim grafiklerine göre FM/AFM sistemi için paralel geometride değiş-tokuş çiftlenimi 220 K’de, dik geometride ise 150 K’de başlamaktadır. Yani tek bir örnek sisteminde farklı iki ayrı geometri için iki ayrı engelleme sıcaklığı (T_B) bulunmaktadır. Şekil 4. 10.b)’de bahsedildiği üzere dik geometride 160 K’in altında kolay eksen histeresis eğrileri gözlemlendiği için bu sıcaklığın altında EB etkisinin görülmesi de aynı şekilde beklenen bir durumdur. H_{EB} değerlerinin büyüklüğü paralel eksen sıcaklığın azalmasıyla birlikte monoton bir şekilde Şekil 4. 12.a)’da gösterildiği gibi değişmektedir. Ancak dik geometride 150 K’den 80 K’e inilirken

H_{EB} değerleri önce artmakta, 80 K'den 10 K'e doğru ise sıcaklıkla birlikte azalmaktadır. Exchange bias'ın sıcaklıkla bu şekilde anormal değişimi daha önce birkaç başka çalışmada da gözlenmiştir [79, 130]. Demirci vd. bu anormal durumu FM/AF arayüzeyde eşleşmemiş AF spinlerin eğilmesi ile açıklamaktadır [130]. Morales vd. ise bu durumu, sıcaklığın azalmasına bağlı olarak, FM malzemenin mıknatıslanmasının bir yönden diğer yöne dönüş mekanizmasının değişmesi ile açıklamaktadır [79]. Bizim örneklerimizde ise EB'nin sıcaklığa bağlı davranışı her iki geometri için farklılık göstermektedir. Örnek düzleminde yapılan ölçümde azalan sıcaklıkla EB 220 K'de başlayıp 10 K'e kadar sürekli artarken, örnek düzlemine dik geometride yapılan ölçümde EB 150 K'de başlayıp 80 K'de maksimum değere ulaşmakta ve sonra 10 K'e kadar tekrar azalmaktadır. Örnek düzlemine dik geometride EB değeri 80 K'den 10 K'e %60 civarında azalmaktadır. Dik geometrideki bu durum mıknatıslanmanın dönüş mekanizmasının düşük sıcaklıklarda değişmesi ile ilişkilendirilebilir. Şekil 4. 10.b)'de V_R/V_S oranının da benzeri şekilde 80 K'de değişiyor olması bu açıklamayı desteklemektedir.



Şekil 4. 12: VSM ile paralel (sol sütun) ve AHE ile dik (sağ sütun) geometrilerde alınan histeresis ölçümlerinden elde edilen H_{EB} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Çalışılan örnek sisteminde FM Co tabakası Pt ve Cr gibi iki farklı komşuya sahiptir. FM tabaka çok ince olduğundan sistemin toplam anizotropi enerjisi için komşuların etkisinin olduğu yüzey anizotropi ifadesi çok önemli hale gelmektedir. Ölçümlerde kullanılan örnek için etkin anizotropi denklem (4.1)'de verildiği gibi yazılabilir.

$$K_{etkin} = K_V + 2\pi M_s^2 + \frac{2K_S}{d_{Co}} + \frac{3}{2}\lambda\sigma_s + K_{CoO} + K_{tekyönlü} \quad (4.1)$$

Burada K_V , M_s , K_S , λ , σ_s , K_{CoO} ve $K_{tekyönlü}$ sembolleri sırasıyla hacim anizotropisini, FM malzemenin doyum mıknatıslanmasını, yüzey anizotropisini, bükülmezlik (stiffness) sabitini, gerilme (stress) sabitini, AF CoO tabakasının anizotropisini ve tek yönlü anizotropiyi ifade etmektedir [52]. FM malzemenin her iki komşusundan kaynaklanan yüzey anizotropilerinin toplamı olan $2K_S$ ifadesi;

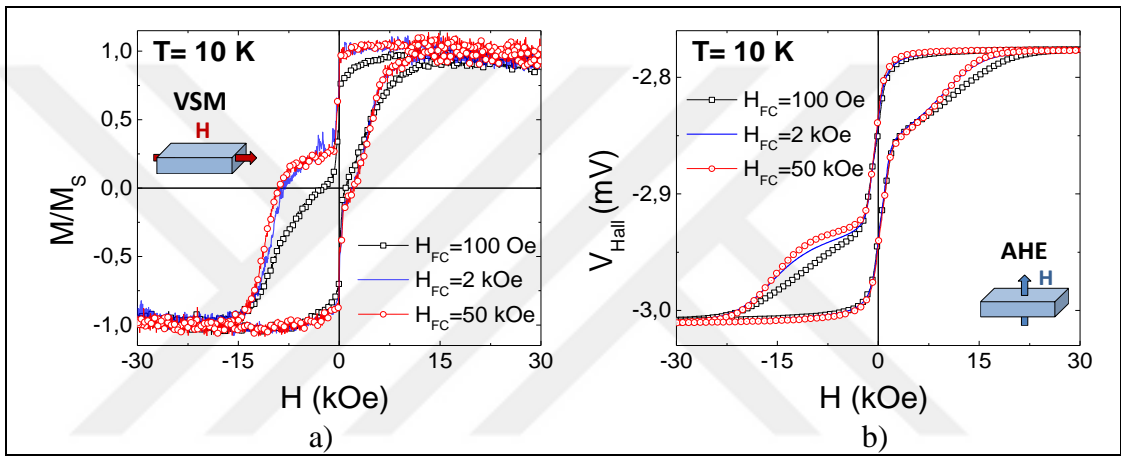
$$2K_S = K_{Pt/Co} + K_{Co/Cr} \quad (4.2)$$

olarak yazılabilir. $K_{Cr/Co}$ ve $K_{Co/Pt}$ şeklinde ifade edilen semboller FM Co tabakasının sırasıyla Cr ve Pt yüzeyleri arasındaki anizotropi sabitleridir. Co ince filmin altında kullanılan Pt tabakası büyük spin-yörünge çiftlenimine sahip olduğu için, Co 3d ile Pt 5d seviyeleri arasındaki güçlü hibritleşme nedeniyle dik manyetik anizotropi (DMA) oluşmaktadır [61, 72, 146]. Diğer yandan Cr tabakası mıknatıslanmayı örnek düzlemine indirme eğilimine sahiptir [55, 144]. Yani Pt tabakası mıknatıslanmayı örnek düzlemine dik hale getirmek isterken, Cr tabakası mıknatıslanmayı örnek düzleminde tutmak istemektedir. Yüzey anizotropi terimleri aynı zamanda sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir ve sıcaklığa bağlı değişim oranları her malzeme için farklılıklar göstermektedir [156]. Ara yüzeyde gerçekleşen bu mücadele nedeniyle malzemenin etkin mıknatıslanması düşük sıcaklıklarda dik eksenden örnek düzlemine doğru bir miktar eğilmektedir. Pt ve Cr komşuların dışında AF malzeme de T_N 'nin altında FM momentler üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. CoO'in spin eksenini kristal içerisinde hem düzleme paralel hem de düzleme dik iz düşümü bulunan diyagonal bir yapıya sahiptir [157]. Bu durum örnekte aynı anda hem dik hem de paralel EB görülmesini açıklamaktadır.

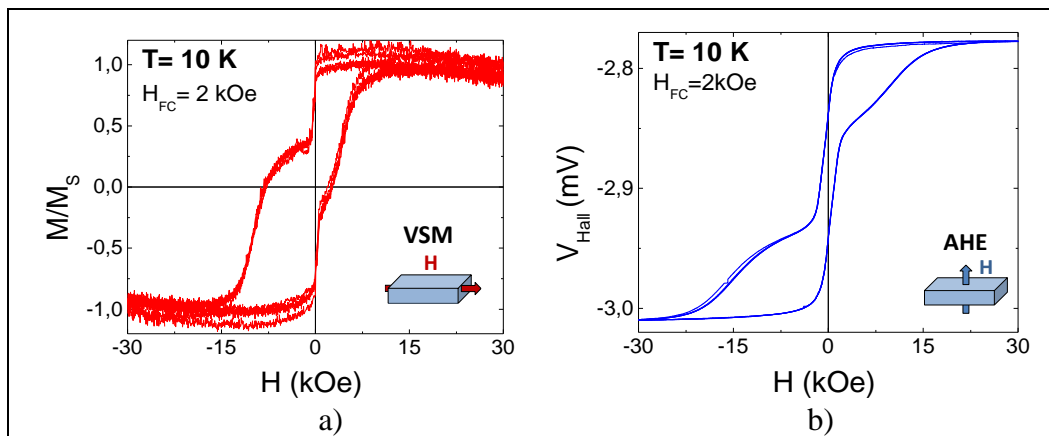
Her iki geometride de ölçülen histeresis eğrilerinde basamaklı yapı görülmüştür. Basamaklı yapıya neden olarak üç farklı olasılık tartışılabilir. Bunlardan ilki, AF CoO'in içerisinde FM Co kümelerinin (clusters) bulunma ihtimalidir. Literatürde Co/CoO sistemi ile yapılan çalışmalarda Co kümecikleri nedeniyle basamaklı histeresis eğrilerine rastlanmaktadır [158]. Ancak bu çalışma için bu ihtimal pek mümkün görünmemektedir. Çünkü CoO tabakasının XPS ile yapılan analizinde, CoO içerisinde metalik kobalta rastlanmamıştır [131]. Buna ek

olarak, bu durumu kontrol etmek için çalışılan örnek sistemi ile aynı koşullarda yeni bir CoO örneği hazırlanmış ve VSM ile mıknatıslanma ölçümleri yapılmıştır. Ölçümde ferromanyetik bir sinyal görülmemiş, yalnızca diyamanyetik katkılardan gelen bir eğri elde edilmiştir. Basamaklı yapıya neden olabilecek ikinci olasılık, AF malzemede arayüzeyde domenlerin oluşmasıdır [159]. Bu durum örneklerin büyütülmesi sonrasında FM domenlerin birbirlerine anti-paralel bir şekilde hizalanarak şeritli bir domen yapı meydana getirmesinden kaynaklanabilir [159, 160]. Böyle şeritli yapılara, AFM malzemenin Néel sıcaklığının üstünde bir sıcaklıkta, FM malzemelerin mıknatıslılığının giderilmesi (demagnetization) sonrasında da rastlanmaktadır [161]. Manyetik alan altında soğutma esnasında domenlerin sabitlenme yönü FM tabakanın mıknatıslanma yönü ile belirlendiğinden, AFM domenler oluşmakta ve mıknatıslanma eğrisi basamaklı yapı göstererek pozitif veya negatif yöne kaymaktadır [160]. Ancak, böyle iki katmanlı yapılar çok yüksek alan altında soğutulduğunda basamaklı yapı kaybolmaktadır [159, 161]. Bu çalışmada, çok yüksek alanlar altında soğutma sonrasında yine de basamaklı yapı korunduğundan, basamaklı yapı nedeninin şeritli domen yapılar ile ilişkilendirilmesi zor görünmektedir. Ancak FM tabaka aşırı ince olduğundan bu ihtimali tamamen elemek de mümkün olmamaktadır. Düşük sıcaklıklarda basamaklı histeresis eğrilerinin görülmesine neden olabilecek üçüncü ihtimal, örneklerde aynı anda pozitif ve negatif EB etkisinin birlikte olmasıdır. Bu senaryoya göre FM tabaka tekli domen yapıdadır. Ancak, arayüzeydeki AFM momentler uygulanan soğutma alanıyla kısmi olarak yönlendirilebilmektedir [82]. Böylece histeresis eğrilerinde pozitif ve negatif kayma görülür. Örnekte pozitif ve negatif EB'nin birlikte var olup olmadığını araştırmak için, örnek 100 Oe'den 50 kOe'e kadar farklı büyüklükteki manyetik alanlar altında soğutuldu. Farklı alanlar altında soğutma sonucunda, daha önceden yapılmış çalışmaların aksine, basamaklı davranışın kaybolması [159] veya EB'nin negatif yönden pozitif yöne doğru kayması [80, 83] gibi durumlar gözlenmedi. 100 Oe, 2 kOe ve 50 kOe'lik manyetik alanlarda soğutma sonrası 10 K'de VSM ile örnek düzlemine paralel ve AHE ile örnek düzlemine dik ölçülen histeresis eğrileri Şekil 4. 13'te gösterilmiştir. Histeresis eğrilerinde görüldüğü gibi artan manyetik alanla birlikte soğutma alanının tersi yönünde negatif EB'nin bir miktar arttığı gözlemlendi. Yani beklenen kayma pozitif yönde değil, tam tersi negatif yönde oldu ve soğutma alanı değişimine rağmen basamaklı yapı korundu. Bununla birlikte pozitif ve negatif EB'nin birlikte görüldüğü bir çalışmada sıcaklık değiştirilmeden ardışık histeresis

ölçümleri alındığında talim etkisi nedeniyle basamaklı yapı kaybolmuş ve tek yönde exchange bias etkisi görülmüştür [82]. Bu durumu araştırmak için örnek paralel ve dik geometrilerde ayrı ayrı 2 kOe'lik manyetik alan altında 10 K'e kadar soğutuldu ve örneğin bu sıcaklıkta ardışık histeresis ölçümleri yapıldı. Şekil 4. 14'te VSM ile paralel geometride, AHE ile dik geometride ardışık 5'er kez alınan histeresis ölçümleri gösterilmiştir. Şekil 4. 14'te görüldüğü gibi ardışık ölçümler sonucunda da basamaklı yapı kaybolmamıştır. Bu sebeplerden dolayı ölçümlerde görülen basamaklı yapının pozitif ve negatif EB'nin birlikte görülmesi ile ilişkili olduğu ispatlanamamıştır.



Şekil 4. 13: Farklı manyetik alanlar altında soğutulup 10 K'de VSM ile örnek düzlemine paralel ve AHE ile örnek düzlemine dik geometrilerde ölçülen histeresis eğrileri.



Şekil 4. 14: VSM ile paralel geometride, AHE ile dik geometride alanda soğutma işleminden sonra 10 K'de ardışık 5'er kez alınan histeresis ölçümleri.

4.2.4. Sonuçlar

Pt/Co/Cr/CoO çok katlı ince filmde aynı anda düzleme paralel ve düzleme dik geometrilere exchange bias etkisi gözlendi. Oda sıcaklığında örneğın kolay eksenini örnek düzlemine paralel olmaktadır. Ancak 160 K'in altında örnek düzlemine paralel ve dik eksenlerin ikisi de kolay eksen davranışını göstermektedir. Ayrıca manyetik alan altında soğutma ile birlikte paralel eksen için 220 K'de, dik eksen için 150K'de EB etkisi görülmeye başlandı. Paralel geometride, EB etkisi sıcaklığın azalmasıyla artarken, dik geometride ise sıcaklığa bağlı olarak anormal bir EB davranışını göstermektedir. Dik geometride soğutma ile birlikte EB etkisi 80 K'e kadar önce artmakta, ardından bir miktar azalmaktadır. Dik geometride görülen bu anormal davranış mıknatıslanmanın bir yönden diğer yöne dönüş mekanizmasının değişiyor olması ile ilişkilendirildi. Ayrıca, düşük sıcaklıkta alınan histeresis eğrilerinde basamaklı bir yapı gözlendi. Sonuç olarak, tek bir örnekten her iki geometride aynı anda EB etkisinin görülmesi yeni cihaz tasarımlarına yol açabilecektir.

4.3. Elektrik Alan Altında Yapılan EB Etkisi Ölçümleri

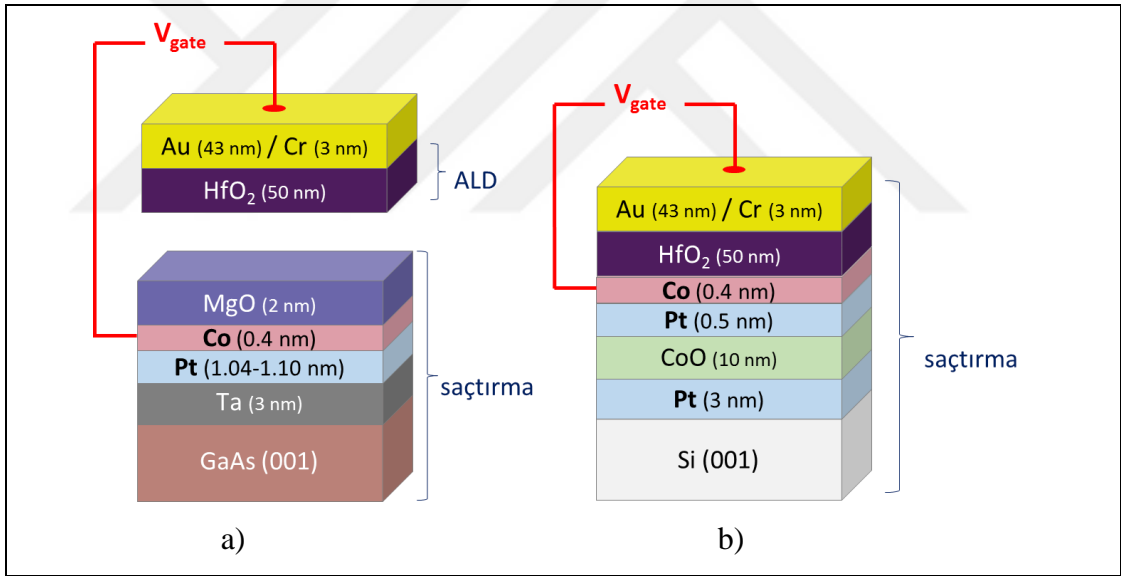
4.3.1. Giriş

Elektrik alan ile exchange bias etkisinin kontrolüne yönelik çalışmalar, ilk iki kısımda anlatılan örnek sistemlerinden elde edilen tecrübelerle hazırlanan, yeni örnek sistemleri ile oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda yapıldı. İnce filmlerde elektrik alan oluşturmak için örnek sistemini oluşturan tabakaların üzerinde yük biriktirilmelidir. Örneklerde metalik FM tabakanın mıknatıslanmasının değiştirilmesi istendiğinden yük birikimi bu tabaka üzerinde oluşturulmalıdır. Yani elektrik alanı oluşturacak birbirlerine paralel levhalardan ilki bu FM tabaka olmalı ve karşısında iletken başka bir tabaka yer almalıdır. Ancak paralel iki tabaka arasında, içinden akımın geçemeyeceği iyi bir yalıtkan tabakaya ihtiyaç vardır. Kalınlık nano boyutlara doğru gidildikçe içinden akımın sızmayacağı yalıtkan tabaka oluşturmak zorlaşmaktadır. Yalıtkan tabakayı oluşturmak ve böylelikle cihaz yapısındaki örneklere elektrik alan uygulamak amacıyla tez çalışmasında dört farklı yöntem denendi. İlk olarak Co tabakasının üzerine iyi bir yalıtkan malzeme olan hafnium dioksitin (HfO_2) büyütülmesi konusunda çalışıldı. İkinci olarak yalıtkan bir alümina faydalanmak suretiyle, alüminanın altında ve üstünde elektrik alan oluşturma denemeleri yapıldı. Üçüncü olarak yalıtkan MgO tabakası üzerine yine yalıtkan bir polimer malzeme büyütülmesi ile ilgili çalışmalar yapıldı. Son olarak yalıtkan Apiezon N gres kullanılarak deneyler yapıldı. Tez çalışmasında kullanılan bu yöntemlerin detayları aşağıda ayrı başlıklar altında verilmiştir.

4.3.2. Yalıtkan Hafnium Dioksit (HfO_2) ile Yapılan Çalışmalar

Hafnium dioksit (HfO_2) hafniumun en yaygın bulunan kararlı bileşiklerinden birisidir. Hafnia olarak da adlandırılmaktadır. Geçit (gate) dielektrik malzemesi olarak kullanım alanıyla periyodik cetvel IV-B grubu metal oksitlerin en önemli üyesidir. Aynı grup metal oksitlerin diğer üyeleri ZrO_2 ve TiO_2 de dielektrik çalışmalarında kullanılmaktadır. Ancak HfO_2 geniş bant aralığı (5.5-6 eV), göreceli yüksek dielektrik sabiti (22-25), yüksek çöküm gerilimi (3.9-6.7 MV/cm) ve yüksek termal kararlılık gibi özellikleri ile diğer metal oksitler arasında ön plana çıkmaktadır [162, 163]. Silikaya (SiO_2) oranla 4-6 kat daha büyük yüksek dielektrik sabiti

nedeniyle günümüz transistörlerinde tercih edilebilen bir malzemedir [164]. Ancak malzemenin dielektrik sabiti ve diğer özellikleri büyütme yöntemine ve hazırlanma koşullarına göre değişiklikler arz etmektedir. HfO₂ hazırlamak için saçtırma [165], moleküler beam epitaxy (MBE) [166], pulsed laser deposition (PLD) [167], sol-gel [168], kimyasal buhar biriktirme (CVD) [169] ve atomik kat biriktirme (ALD) [163, 170, 171] gibi metotlar kullanılmaktadır. HfO₂ hazırlanma koşullarına göre kübik, dörtgen, monoklinik ve ortorombik gibi farklı kristal fazlarda olabilmektedir [172]. Günümüz yarıiletken cihazların geçit (gate) kısmında kullanılan ve çoğunlukla ALD tekniği ile hazırlanan HfO₂ amorf yapıdadır [163]. Yüksek dielektrik sabitine sahip HfO₂ ince filmlerinin hazırlanması için ALD genelde ideal olarak en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Yalıtkanlık için istenen özelliklerde HfO₂ elde etmek için PVD tabanlı metotlardan biri olan Ar+O₂ ortamında yüksek basınç reaktif saçtırma yöntemi de tercih edilebilmektedir [163, 165, 173-176].

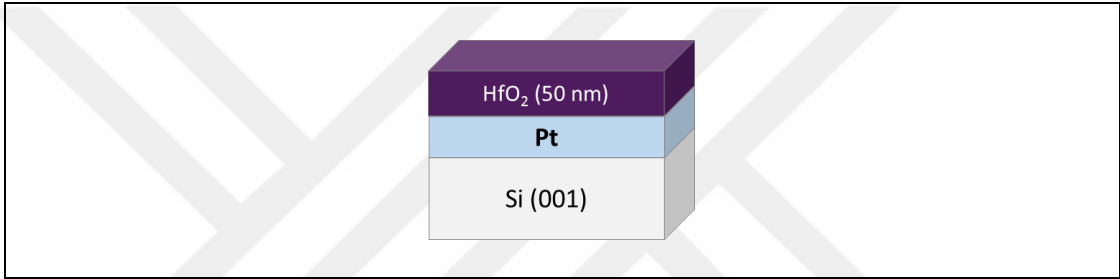


Şekil 4. 15: a) Miknatislanmanın kontrolü için yapılan ve *Nature Materials* dergisinde yayınlanan bir çalışmanın örnek sistemi. b) Elektrik alan altında EB etkisi çalışması için planladığımız örnek sistemi.

2011 yılında *Nature Materials* dergisinde yayınlanan FM Co metalinin miknatislanmasının elektrik alan ile kontrolünün yapıldığı bir çalışmada dielektrik malzeme olarak HfO₂ kullanılmıştır [7]. Bahsi geçen makalenin örnek sisteminin çizimi Şekil 4. 15.a)'da, bu tez kapsamında çalışılacak örnek sistemi ise Şekil 4. 15.b)'de gösterilmiştir. Makalede bahsedildiğine göre alttaşın üzerine Ta, Pt, Co ve MgO dc ve RF saçtırma yöntemleri ile, HfO₂ ise ALD tekniği ile hazırlanmıştır. Yani

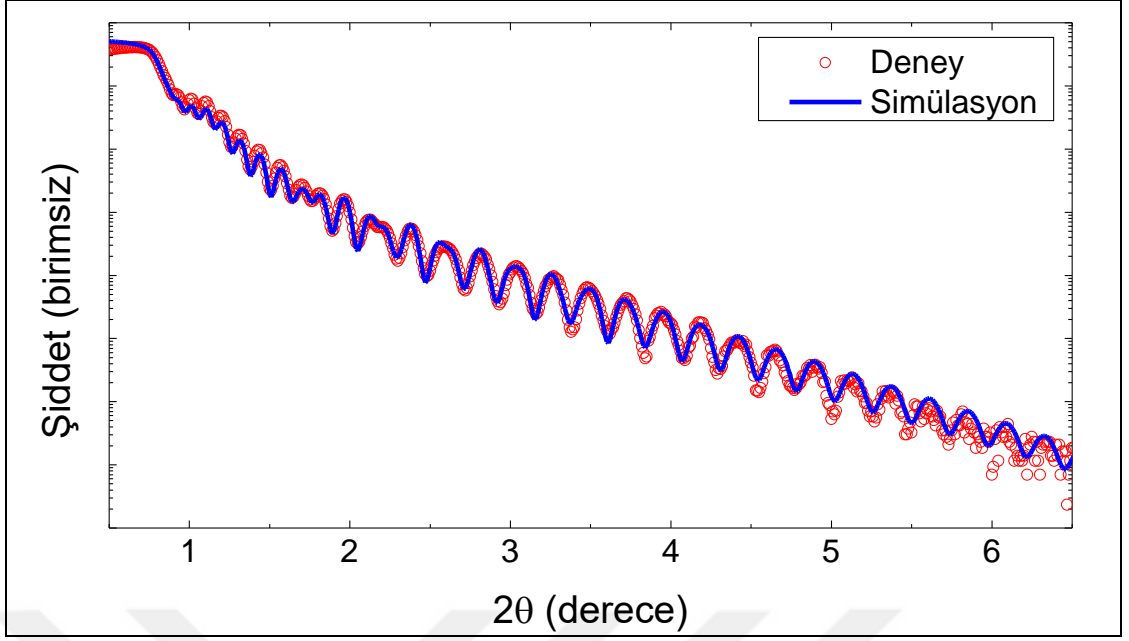
örneklerin hazırlanması iki ayrı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında incelenecek örneklerde ise tüm katmanların saçırma tekniği (katmana göre dc veya RF) ile büyütülmesi planlanmıştır.

Yukarıda bahsedilen asıl örneğe geçmeden önce en uygun büyütülme koşullarının belirlenmesi için HfO_2 ile çalışıldı. HfO_2 filmler 2.5×10^{-3} mbar basınç seviyesinde, sisteme oksijen akışı sağlanarak, reaktif saçırma tekniği ile 50 W RF güç kullanılarak Hf hedef malzemesinden hazırlandı. Kaplama esnasında hedef numune mesafesi 100 mm, argon gaz akışı 3 sccm, oksijen gaz akışı 0.35 sccm değerlerinde tutuldu. Şekil 4. 16'da Si (001) altaş kullanılarak hazırlanan örnek sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. 16: HfO_2 'in yalıtkanlığını test etmek için hazırlanan örnek sisteminin genel şematik gösterimi.

HfO_2 örnekler hazırlandıktan sonra XPS ve XRR yöntemleri ile yapısal analizleri yapıldı. XPS ile Hf ve O oranlarının uygunluğu tespit edilen örneklerin, XRR ile yoğunluk, kalınlık ve pürüzlülükleri kontrol edildi. Şekil 4. 17'de XRR ile yapılan ölçüm sonucu ve "GlobalFit" programı ile yapılan simülasyonu verilmiştir. Bu simülasyon ile altaşın üzerinde ince filmi oluşturan katmanların yoğunlukları, kalınlıkları ve pürüzlülükleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Tablo 4. 1'de verilmiştir. Simülasyon sonucunda altaşın üst yüzeyinde yaklaşık 2.5 nm kalınlığında SiO_2 tabakası tespit edilmiştir. Yani Si altaşın yüzeyinde doğal olarak beklenen bir oksitlenme vardır. Bu sonuçlara göre yoğunluk değerleri beklenen değerlerdedir. Yani HfO_2 için karışımda istenilen oranlar elde edilmiştir. Tüm katmanlar için XRR ile elde edilen pürüzlülük değerleri de nm altı mertebesinde olup kabul edilebilir düzeydedir. Büyütme için HfO_2 kalınlığının istenilen değeri 50 nm idi. Simülasyon sonucunda ise bu kalınlık 59 nm olarak tespit edilmiştir. Bu bilgi sonraki çalışmalarda kalınlık kalibrasyonu için önem arz etmektedir.

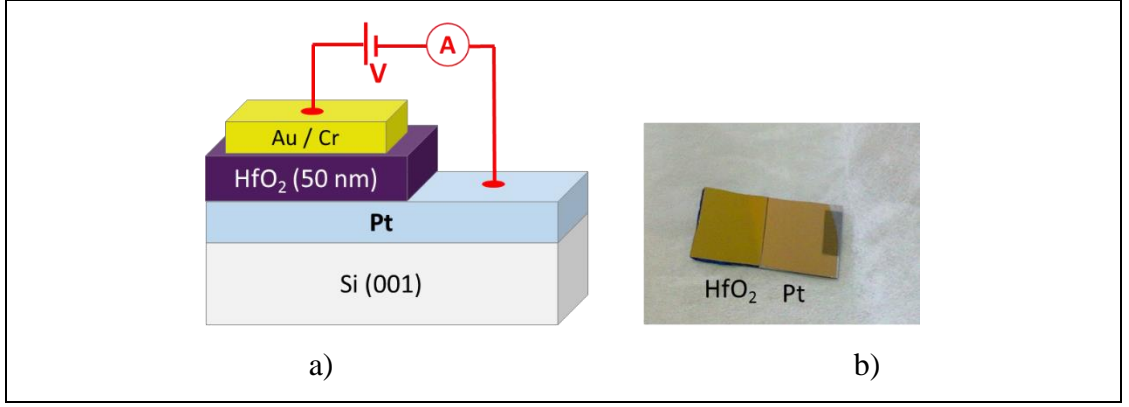


Şekil 4. 17: Si / Pt (35 nm) / HfO₂ (50 nm) örneği için XRR ölçümleri ve ölçümün simülasyonu.

Tablo 4. 1: Si / Pt (35 nm) / HfO₂ (50 nm) örneği için simülasyonla elde edilen yoğunluk, kalınlık ve pürüzlülük değerleri.

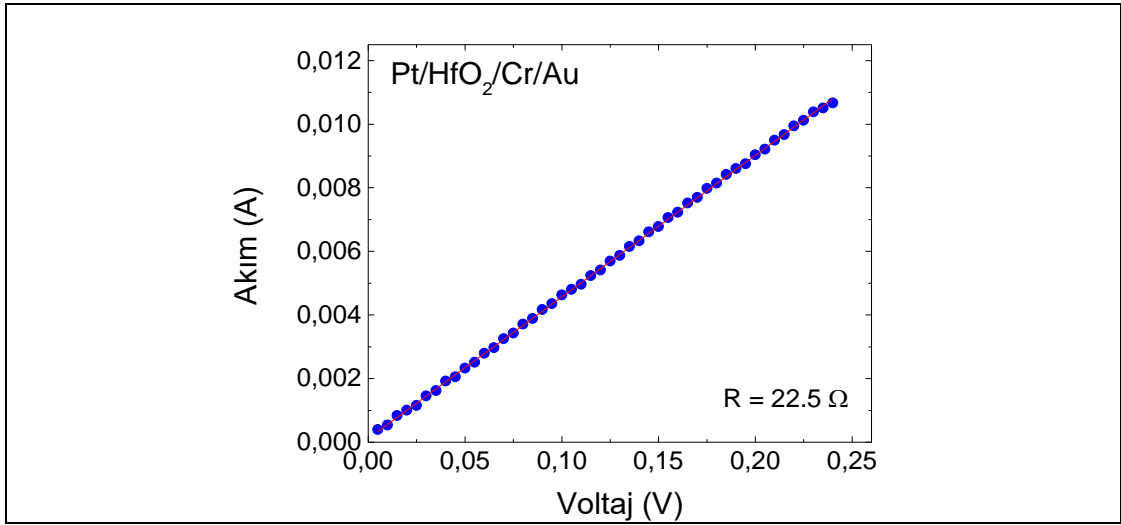
Tabaka	Yoğunluk (g/cm ³)	Kalınlık (nm)	Pürüzlülük (nm)
HfO ₂	9.68	58.9	1.02
Pt	21.4	36.2	0.45
SiO ₂	2.2	2.5	0.6
Si altaş	2.33	-	0.5

XPS ve XRR ile HfO₂'e ait yapısal özellikler belirlendikten sonra Şekil 4. 18.a)'da şematik olarak gösterilen ve fotoğrafı verilen örnekler hazırlandı. Altaş üzerine Pt büyütüldükten sonra örneğin bir tarafı maskelenerek, üzerine HfO₂ ve onun üstüne de buharlaştırma (*evaporator*) yöntemi ile daha küçük bir alanda 50-100 nm kalınlığında krom/altın (Cr/Au) tabakaları hazırlandı. Burada maskeleyemedeki amaç, elektrik alan uygulaması için paralel levhalar oluşturmaktır.



Şekil 4. 18: HfO₂ tabakasının elektriksel karakterizasyonu için hazırlanan örneklerin a) şematik gösterimi ve b) fotoğrafı.

Eğer HfO₂ yalıtkan bir film olarak büyütülebilmişse Şekil 4. 18.a)'daki gibi güç kaynağı ve ampermetre ile oluşturulan devrede ampermetrenin değer okumaması ya da en fazla nanoamper seviyelerinde okuma yapması gerekmektedir. Bu örnek için elde edilen I-V ölçüm sonucu Şekil 4. 19'da gösterilmiştir. Levhalar arasındaki gerilim 0.05 V'dan başlamak suretiyle 0.24 V'a kadar 0.05 V'luk adımlarla artırılarak devreye seri bağlı ampermetrede akım değerleri okundu. Devrede okunan akım ve hesaplanan direnç değeri bir yalıtkindan beklenenden çok düşük ve metallerdeki gibi doğrusal çıktı. HfO₂'in bir yalıtkan gibi davranmaması üç neden ile açıklanabilir. Birinci sebep HfO₂'in saçtırma yöntemi ile istenilen kalitede hazırlanamamış olmasıdır. İkinci sebep olarak, en üstte Au tabakasının buharlaşma yöntemi ile hazırlanması sırasında taneciklerinin HfO₂ içerisinde iletken bir yol oluşturma ihtimalidir. Au, alüminyum (Al) ve gümüş (Ag) gibi diğer metallere göre yüksek sıcaklıklarda buharlaşmaktadır. Yüksek enerji ile buharlaşıp yüzeye gelen Au atomları HfO₂ tabakasının içlerine kadar gidebilir. Bu nedenle Pt tabakasına ulaşarak iletken davranışa sebebiyet verebilir. Bu ihtimali ortadan kaldırmak için, aynı çalışma Au yerine Al ve Ag gibi daha düşük sıcaklıklarda buharlaşan metallere de denendi ve benzer sonuçlar elde edildi. HfO₂'in yalıtkan davranış göstermemesine neden olabilecek üçüncü ihtimal, kontakların alınmasında kullanılan gümüş pastanın etkisi olabilir. Gümüş pasta içerisindeki sıvı çözücüler HfO₂'e zarar verip kısa devreye sebebiyet verebilirler. Bu durumu ortadan kaldırmak için de en alttaki Pt büyütülmesi esnasında maskeler kullanılmış ve sonradan kullanılan gümüş pasta ile Pt tabakasının birbirleri ile etkileşimleri engellenmiştir. Ancak bu durumda da istenilen sonuca ulaşamamıştır.

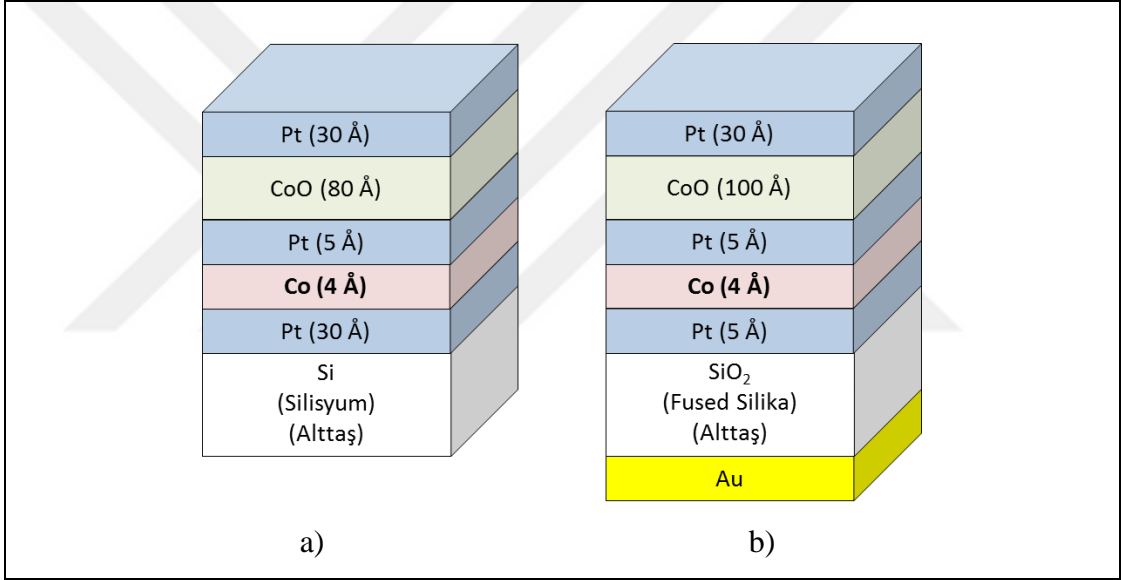


Şekil 4. 19: HfO₂'in iki yüzeyinden alınan kontaklar ile ölçülen akım voltaj grafiği.

Sonuç olarak, saçtırma yöntemi ile hazırlanan örneklerde XPS ile yapılan ölçümlerde HfO₂ için yalıtkanlık istenen düzeyde görülmesine rağmen, akım-voltaj ölçümlerinde akım sızıntısı (leakage) görüldü. Benzeri durumla literatürde HfO₂ ile yapılan başka çalışmalarda da karşılaşılmaktadır [170, 175]. Düşük akım sızıntısı için konuya ilişkin yapılan çalışmalarda ALD yöntemi ya da O₂/Ar gazlarıyla yüksek basınç koşullarında HfO₂ hazırlanması önerilmektedir [170]. Laboratuvarlarımızda ALD ile HfO₂ hazırlama imkânı bulunmamaktadır. O₂/Ar gazlarıyla yüksek basınç koşullarında Co'nun oksitlenme ihtimali olacağından bu yöntemde kullanılamamıştır. Ayrıca, bazı çalışmalarda yüksek basınç yanında 1000°C gibi sıcaklıklarda hızlı ısıtılma (RTA) işlemleri yapılmaktadır. Bu tür yüksek sıcaklıklar Pt ve Co'nun alaşım yapmasına sebebiyet vermekte ve istenen manyetik özelliklerin sağlanmasını imkânsız kılmaktadır. Bu şartlar göz önüne alınarak oda sıcaklığında saçtırma tekniği ile yapılan HfO₂ çalışmalarında yalıtkanlık anlamında istenilen sonuç elde edilemediğinden çalışmaya HfO₂ yerine başka alternatif malzemelerle devam edilmesine karar verilmiştir.

4.3.3. Yalıtkan Fused Silika (SiO₂) Alttaş ile Yapılan Çalışmalar

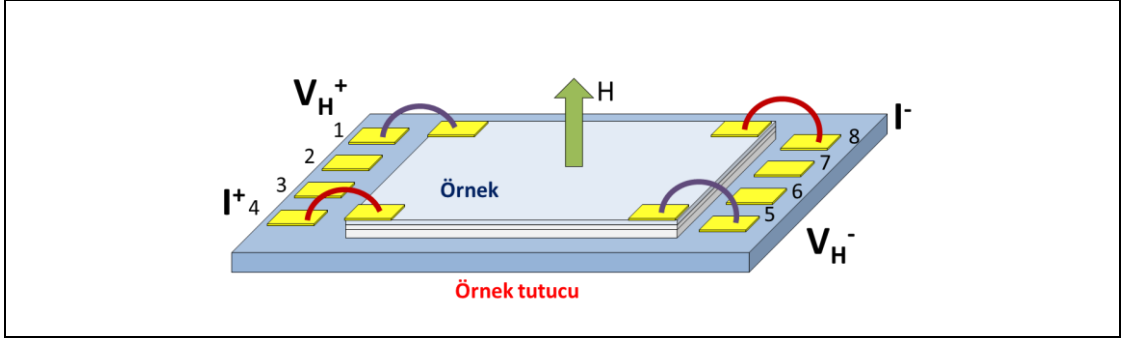
Elektrik alan altında EB'nin kontrolüne yönelik çalışmalar için yüksek yalıtkanlığa sahip SiO₂ (Fused Silika) alttaş üzerine Pt(5Å)/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO(100Å)/Pt(30Å) örneği büyütüldü. Alttaşın diğer yüzeyine buharlaştırma (evaporator) tekniği ile 100-150 nm kalınlığında Au tabakası kaplandı. Kullanılan alttaş bölüm 4.1'de kullanılan alttaştan farklı olduğu için, elektrik alan çalışmalarına geçmeden önce, büyütülen ince filmin manyetik özellikleri AHE ölçümleri ile incelendi. Bölüm 4.1'de bahsedilen ve burada referans olarak kullanılan filmin yapısı Şekil 4. 20.a)'da, yeni hazırlanan filmin yapısı ise Şekil 4. 20.b)'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 20: AHE ölçümleri için farklı alttaşlara büyütülen Co/CoO tabanlı örnekler gösterilmektedir. İkinci örnekte alttaşın diğer yüzeyindeki altın tabakası elektrik alan uygulamak için hazırlanmıştır.

4.3.3.1. AHE ile Sıcaklığa Bağlı EB Ölçümleri

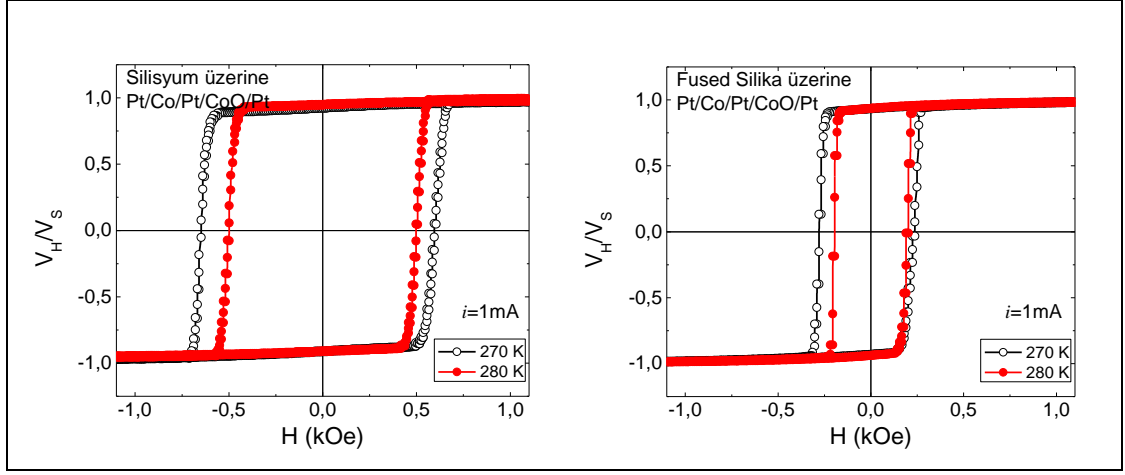
Örnekler AHE ölçümleri için örnek tutucuya Şekil 4. 21'de gösterildiği gibi yerleştirilerek bağlantıları gümüş boya ile yapıldı. Ardından gümüş boyanın kuruması için örnek tutucu 400 K'de yarım saat bekletildi.



Şekil 4. 21: AHE ölçümleri için örneğin tutucu üzerinde konumlandırılması gösterilmektedir.

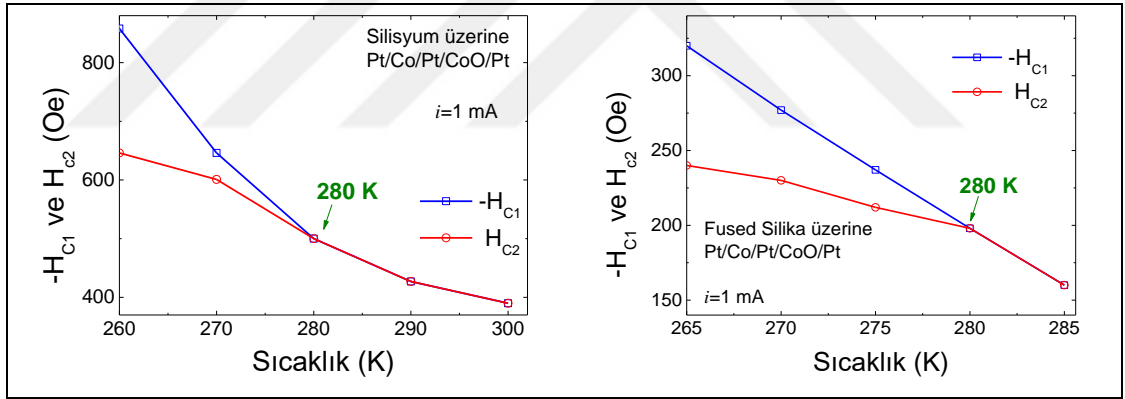
Sıcaklığa bağlı exchange bias etkisi ölçümleri için örnekler vakum ortamında önce CoO'in Néel sıcaklığının üzerinde bir değer olan 320K'e ısıtıldı ve ardından 2 kOe'lik manyetik alan altında AHE ölçümlerinin yapılacağı hedef sıcaklıklara soğutuldu. Ölçümler esnasında akım değeri 1mA değerinde sabit tutuldu. Bölüm 4.1'de bahsedilen silisyum alttaş üzerine büyütülmüş örneklerde engelleme sıcaklığı (T_B) 280 K civarında bulunmuştu. Fused silika üzerine hazırlanmış örneklerin ilk örneklerle benzerliğini görmek ve T_B 'yi tespit etmek için AHE ölçümleri yalnızca 265 K -300 K sıcaklık aralığında gerçekleştirildi.

Şekil 4. 22'de her iki örneğe ait 280 K ve 270 K sıcaklıklarında AHE ile ölçülen histeresis eğrileri verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi her iki örnek için 280 K'de histeresis eğrileri simetrik iken, 270 K'de her iki örneğin histeresis eğrisinde de bir miktar kayma meydana gelmiştir. Silisyum üzerine büyütülen referans örneklerinin histeresis eğrilerinde sıfırlayıcı alan değerleri daha büyük çıkmıştır. Bunun sebebi alttaş üzerindeki Pt kalınlığının farklı olmasının yanı sıra, farklı zamanlarda büyütülen örneklerin Å mertebesinde Co kalınlıklarının tam olarak aynı olmaması düşünülebilir.



Şekil 4. 22: İki farklı alttaş üzerine büyütülmüş Pt/Co/Pt/CoO/Pt örneklerin farklı sıcaklıklarda AHE ile elde edilen histeresis eğrileri verilmiştir.

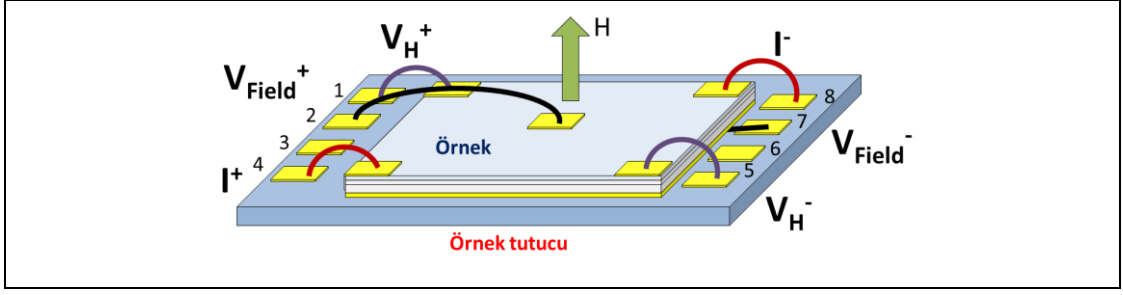
Şekil 4. 23'te her iki örnek için farklı sıcaklıklarda histeresis eğrilerinden elde edilen sıfırlayıcı alan değerleri sıcaklığın fonksiyonu olarak verilmiştir. Buna göre her iki örnekte de EB etkisinin başladığı sıcaklık yaklaşık 280 K'dir.



Şekil 4. 23: İki farklı alttaş üzerine büyütülmüş Pt/Co/Pt/CoO/Pt örneklerin sıfırlayıcı alan değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri gösterilmektedir.

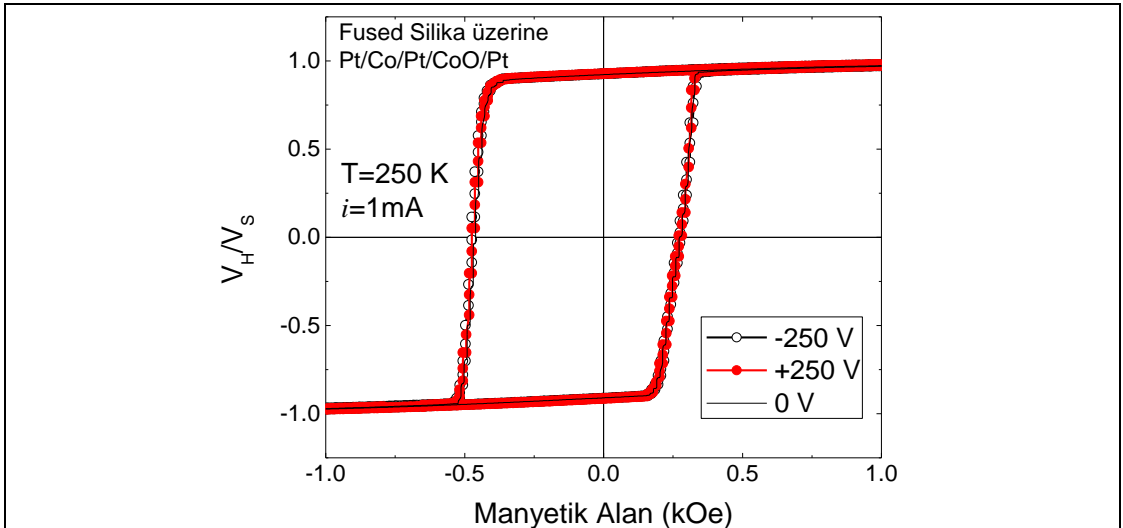
4.3.3.2. Elektrik Alan Altında Yapılan Ölçümler

Fused silika alttaş üzerine büyütülmüş örnek, elektrik alan ölçümleri için AHE ölçümlerine benzer şekilde örnek tutucuya yerleştirildi. Elektrik alan için ilave olarak örneğin altından ve üstünden iki ayrı bağlantı, Şekil 4. 24'te gösterildiği gibi hazırlandı. Bağlantılar örneğin üzerindeki Pt tabakasından ve alttaşın altına büyütülmüş Au tabakasından alındı. Bu sayede elektrik alan ile manyetik alan aynı doğrultuda olmaktadır.



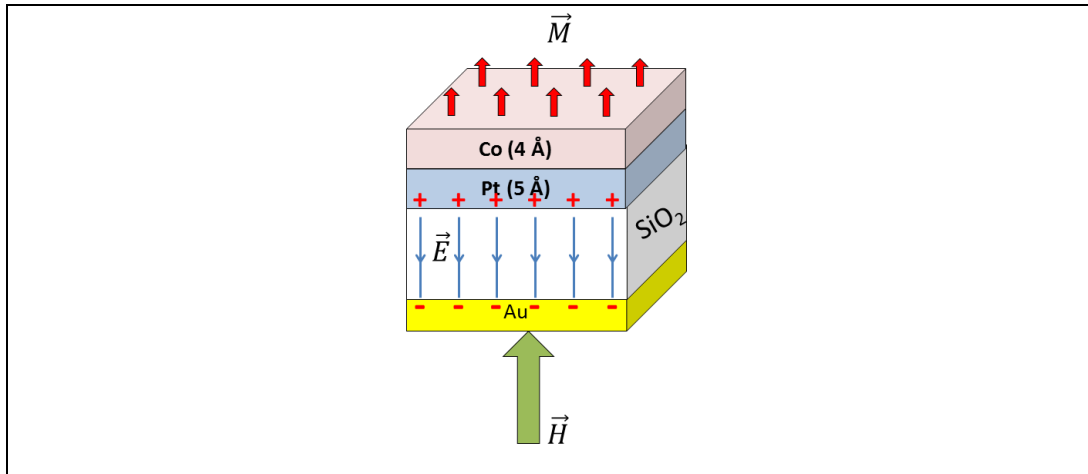
Şekil 4. 24: Elektrik alan altında AHE geometrisi ölçümleri için örneğin tutucu üzerinde konumlandırılması gösterilmektedir. Örneğe elektrik alan uygulamak için 2 ve 7 numaralı noktalardan örneğin üstüne ve altına bağlantı yapılmıştır.

Bu iki bağlantıya gerilim uygulanarak elektrik alan elde edilmeye çalışıldı. Gerilim değerleri ± 1 V'tan başlanarak ± 400 V değerine kadar değiştirilmiştir. Şekil 4. 25'te 320 K'den 2kOe'lik manyetik alan altında 250 K'e kadar soğutulmuş örneğin ± 250 V ile oluşturulan elektrik alan altında ve alansız AHE ile ölçülmüş histeresis eğrileri verilmiştir. Ölçümlerde örnek her seferinde 320 K'e kadar ısıtılmış ve manyetik alan altında soğutulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi uygulanan elektrik alan örneğin histeresis eğrilerinde hiçbir değişim meydana getirmemiştir. Her üç ölçümde de EB miktarları tamamen aynı çıkmıştır. Esasen örneğe 1000 V değerine kadar gerilim uygulanmış ancak 400 V'dan sonra uygulanan voltaj değerleri devrede ark yaparak, bağlantıları bozmuştur. 400 V'a kadar uygulanan voltaj değerleri histeresis eğrilerinde hiçbir değişim meydana getirmemiştir.



Şekil 4. 25: Farklı elektrik alanlar altında AHE ile ölçülen histeresis eğrileri gösterilmektedir.

Sonuç olarak, yalıtkan alttaşı kullanılarak elektrik alan altında yapılan çalışmada histeresis eğrilerinde ve EB’de hiçbir değişim elde edilememiştir. Değişimin görülmemesi Co metaline uygulanan elektrik alanın yeterince büyük olmaması ile açıklanabilir. EB etkisini değiştirecek yeterli büyüklükte elektrik alan elde edilememesi ise iki sebep ile olabilir. Birincisi iletken levhalar arası uzaklığın, yani alttaşı kalınlığının fazla olmasıdır. Elektrik alanın mıknatıslanmaya etkisinin görüldüğü çoğu bilimsel çalışmada elektrik alanın oluştuğu levhalar arası mesafe nanometre veya mikrometre mertebesindedir [7, 28, 33]. Bu örnekte ise alttaşı kalınlığı 1 mm olduğundan, diğer çalışmalardaki elektrik alanı sağlamak için çok yüksek voltajlar (5-100 kV) gerekmektedir. İkinci sebep ise elektrik alana sebebiyet veren yüklerin Co tabakasında değil de, alttaşın hemen üzerindeki ilk tabaka olan Pt tabakasında birikmesidir. Bu sayede Co tabakasını etkileyecek elektrik alan değeri iyice azalmaktadır. Bu durum Şekil 4. 26’daki şematik çizimde gösterilmiştir. Benzer şekilde yalıtkan ile sınırda Pd tabakası kullanılarak, ferromanyetik Co tabakasının mıknatıslanmasının elektrik alan ile değiştirildiği ve Pd’nin olumsuz bir etki oluşturmadığı birkaç çalışma vardır [30, 35]. Ancak buradaki çalışmada Pt’nin nasıl bir etkiye sebebiyet verdiği tam olarak bilinmemektedir.



Şekil 4. 26: Örneğe uygulanan elektrik alan ile yüklerin Pt ve Au tabakalarında birikmesinin şematik gösterimi.

4.3.4. Yalıtkan MgO ve PMMA ile Yapılan Çalışmalar

Bu kısımda CoO/Pt/Co ince filmlerin üzerinin, yalıtkan malzeme olarak önce MgO, ardından *polymethyl methacrylate* (PMMA) ile kaplanması ve elektrik alan altında ölçüm aşamaları anlatılacaktır.

Yalıtkan polimerler elektrik alan uygulamalarında tercih edilen malzemelerden biridir. Miknatıslanmanın elektrik alan ile kontrol edilmek istendiği çalışmalarda *polyimide* (ticari olarak bilinen bir formu *kapton* film) gibi polimer malzemelerin kullanımına rastlanmaktadır [28, 32, 33]. Yalıtkan olarak yaygın bir şekilde kullanılan başka bir polimer malzeme de PMMA'dır (ticari olarak genel bilinen formları akrilik ve pleksiglasdır) [177, 178]. Bu tür polimer malzemeler tek başına yalıtkan olarak kullanılabilirdiği gibi MgO gibi başka dielektrik malzemelerle birlikte de kullanılabilir [28]. MgO ile birlikte kullanıldığında bu sayede geniş bir yüzeyde deliksiz (*pinhole-free*) bir şekilde akım sızıntısını önlediği ifade edilmektedir [28].

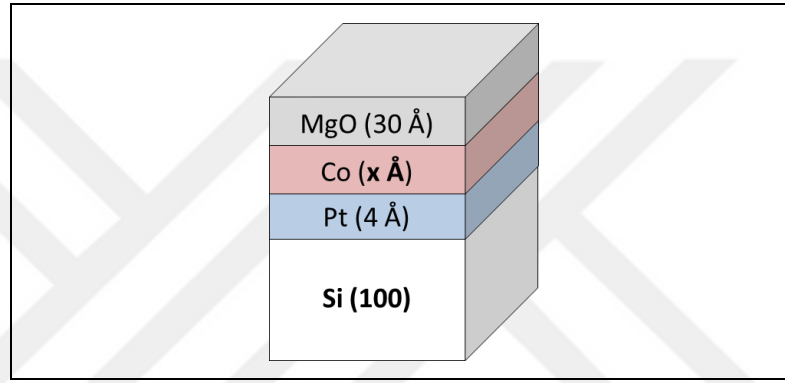
Polimer malzemenin önce MgO kullanılması sebebi, polimer malzemenin saçırma sisteminin dışında döndürmeli kaplama cihazı ile hazırlanmasıdır. MgO kullanılmaksızın örneğin üzerine direk polimer malzeme büyütülmek istense en üstte bulunan Co tabakası atmosfer ortamına çıktığında oksitlenecek ve istenilen özellikler kaybolacaktır. Yalıtkan MgO tabakası atmosfer ortamında oksitlenmeyi önlemek için kullanılmaktadır. MgO ayrıca yüksek çöküm gerilimine (*breakdown voltage*) sahiptir. Bu özelliği ile birçok manyetik tünelleme eklemlerinde de (MTJ) tercih edilen iyi bir bariyer malzemesidir [28, 179].

4.3.4.1. Sürekli Film Yapısına Sahip MgO'lu Örneklerin Hazırlanması

Sürekli film yapısındaki örnekler saçırma tekniği ile hazırlandı. Örnekler büyütülmeye başlamadan önce sistemde temel basınç $\sim 10^{-8}$ mbar seviyesine getirildi. Filmlerin büyütülmesi esnasında sistemin basıncı Ar ile 1.4×10^{-3} mbar civarında tutuldu. CoO, Pt, Co ve MgO tabakaları oda sıcaklığında (RT) sırasıyla 40W RF, 2W DC, 25W RF ve 50 W RF güçler kullanılarak hazırlandı.

Örneklerde yer alan MgO ince filmlerin büyütülmesi esnasında dışarıdan sisteme oksijen verilmeyerek, saçırma sisteminde direk olarak MgO hedef malzeme

kullanıldı. Ancak büyütülen Co tabakası aşırı ince olduğundan MgO'nun kendi bünyesinde bulunan oksijen ile bağ yapması ve manyetik özelliklerini kaybetmesi ihtimaline karşın, asıl film yapısına geçilmeden önce Co tabakasının dik mıknatıslanma gösterdiği şartların belirlenmesi üzerine çalışıldı. Bunun için Si (100) alttaşlar üzerine önce Şekil 4. 27'de gösterilen Co kalınlığının sırasıyla $x=4 \text{ \AA}$, 5 \AA , 6 \AA , 7 \AA , 9 \AA , 15 \AA , ve 20 \AA olacak şekilde değiştiği Pt (4 \AA) /Co (x) /MgO (30 \AA) ince filmler hazırlandı. Örnekler, örnek düzleminde ve örnek düzlemine dik olarak uygulanan manyetik alan ile MOKE, VSM ve AHE yöntemleriyle incelendi.



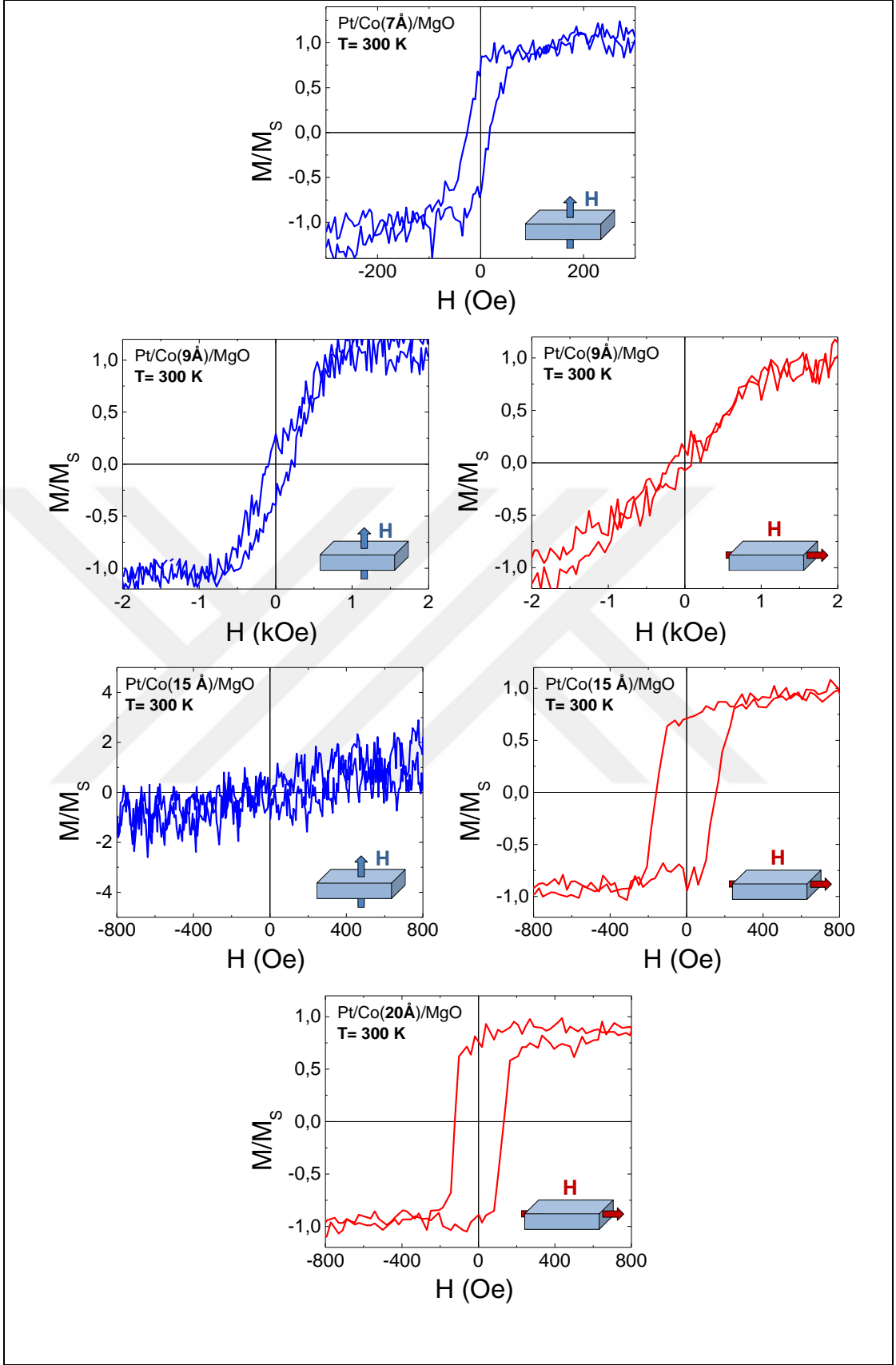
Şekil 4. 27: Co tabakasının dik mıknatıslanma gösterdiği kalınlığın belirlenmesi için hazırlanan örnekler.

4.3.4.2. Sürekli Film Yapısına Sahip MgO'lu Örneklerin Mıknatıslanma Ölçümleri

Örnekler çok ince olduğu için tüm örneklerde VSM sinyalleri oldukça zayıf çıktı. AHE ölçümleri ile dik geometride yapılan ölçümler ise MOKE ile benzer sonuçlar vermiştir. Şekil 4. 28'de MOKE ile alınan ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Co kalınlığının 4 \AA , 5 \AA ve 6 \AA olduğu örneklerde her üç ölçüm metoduyla da histeresis eğrileri için manyetik sinyal alınamadı. Kalınlığın 7 \AA olduğu örnekte MOKE ile dik geometride zayıf ve gürültülü bir ölçüm alınabildi. Paralel geometride ise bu kalınlıktaki örneğin ölçümü manyetik sinyal vermedi. Co kalınlığının 9 \AA olduğu örnekte her iki geometride de mıknatıslanma Şekil 4. 28'de gösterildiği gibi zayıftır. Dik ekseninde mıknatıslanma görülüyor olsa da doyum değeri yüksek olduğundan (1kOe) kolay eksen olarak ifadelendirilemez. Co kalınlığının 15 \AA ve 20 \AA olduğu örneklerde histeresis eğrilerinden açıkça görüldüğü gibi kolay eksenler

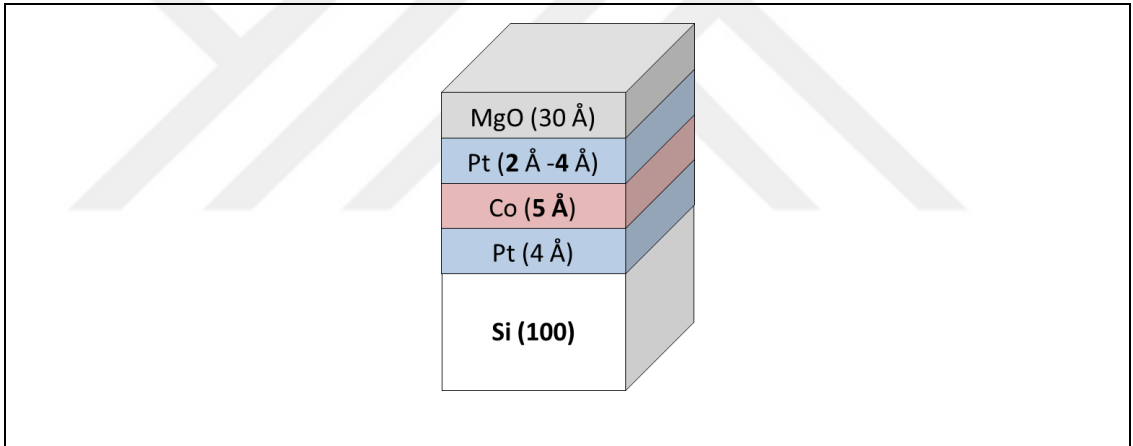
paralel geometride yapılan ölçümlerdir. Yani farklı Co kalınlıklarına sahip yedi adet örnek ile yapılan ölçümlerde dik mıknatıslanmaya atfedilecek tek örnek Co kalınlığının 7 Å olduğu örnektir. Ancak bu örnek için sinyaller oldukça zayıf ve gürültülüdür.





Şekil 4. 28: Pt (4Å) /Co (7 Å, 9 Å, 15 Å, 20 Å) /MgO (30 Å) ince filmlerin dik ve paralel geometrilere alınan histeresis eğrileri.

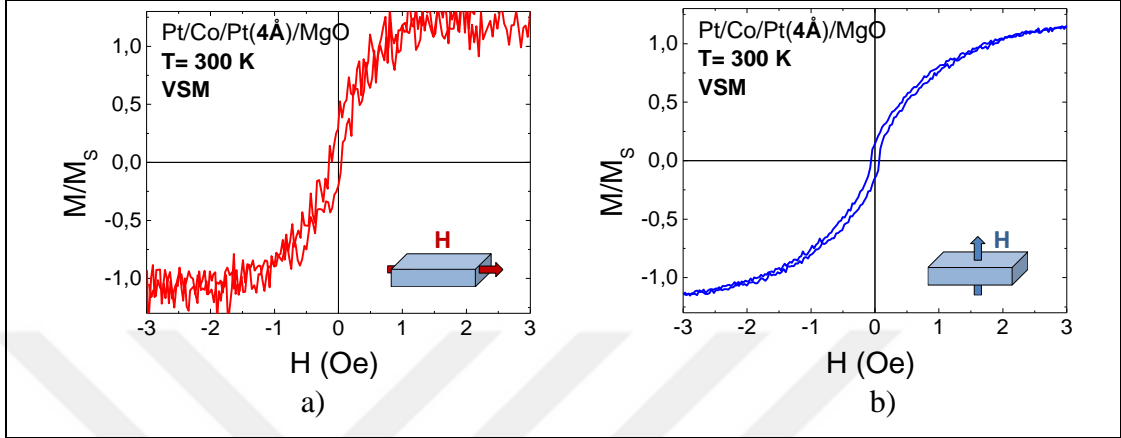
İlk grup örneklerde elde edilen sonuçlardan sonra, ikinci grup örnek sistemi olarak, Şekil 4. 29'da gösterilen Co ile MgO arasına Pt tabakasının eklendiği filmler hazırlandı. Pt için 2 Å ve 4 Å olmak üzere iki ayrı kalınlık ile çalışıldı. Bölüm 4.1'de bahsedildiği üzere Co tabakasının her iki yüzeyine büyütülen Pt tabakası Co ile etkileşmekte ve örneğin mıknatıslanmasını artırmaktadır. Bu sayede MgO ile Co'nun direk ara yüzey etkileşmesi önlenmekte ve Co tabakasının oksitlenme ihtimali azaltılmaktadır. Elektrik alan uygulama işleminde yüklerin FM tabakada birikmesi için, bu tabakanın iletken son tabaka olması gerekmektedir. Ancak Co ile MgO arasına 2nm'ye kadar Pd büyütülerek yapılan çalışmalar, bu durumun sistemde mıknatıslanmanın elektrik alan ile kontrolünde olumlu katkı sağladığını göstermiştir [30, 35, 36]. Pt tabakasının Co ile etkileşmesi, Pd tabakasının Co ile etkileşmesine benzerlik gösterdiğinden Co ile MgO tabakaları arasında Pt tabakasının kullanımı planlanmıştır.



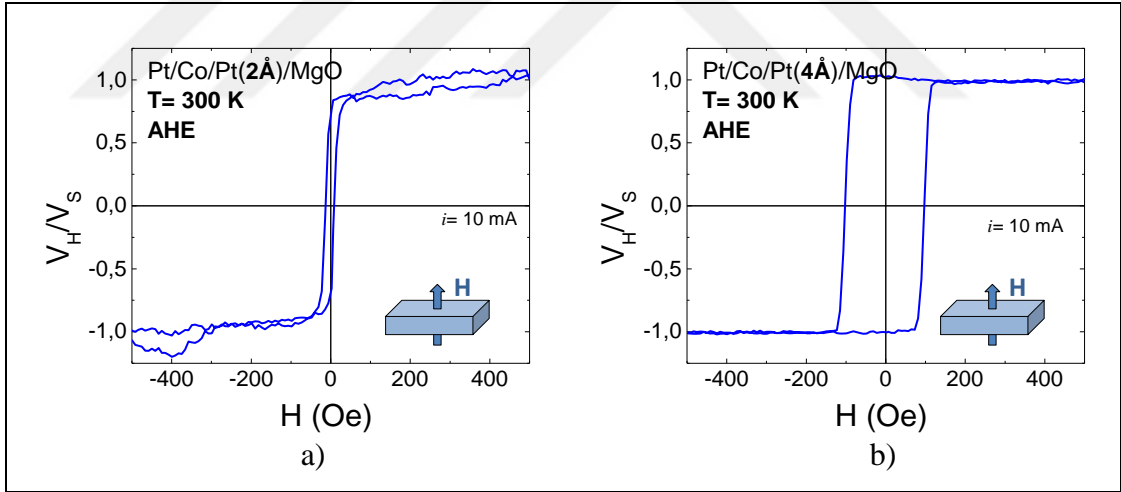
Şekil 4. 29: Co ile MgO tabakaları arasına Pt ilave edilmiş örneklerin yapısı.

Hazırlanan ikinci grup örneklerin histeresis davranışlarını görmek için VSM ve MOKE ile ölçümler yapıldı. Örnek sistemi çok ince yapıda FM tabaka içerdiği için VSM ile yapılan ölçümler oldukça gürültülü çıktı. Ayrıca aradaki Pt katman kalınlığının 2 Å olduğu örnekte net ölçümler elde edilememiştir. Aradaki Pt katman kalınlığının 4 Å olduğu örnek için dik ve paralel geometride VSM ile elde edilen histeresis eğrileri Şekil 4. 30'da gösterilmiştir. Paralel geometride yapılan ölçüm (Şekil 4. 30.a) oldukça gürültülüdür. Dik geometride yapılan ölçüm (Şekil 4. 30.b) sonucu ise nispeten daha az gürültülüdür. Ancak mıknatıslanma eğrisi net bir FM histeresis davranışı göstermemektedir. Buna karşın Şekil 4. 31'de verilen AHE

tekniki ile yapılan ölçümlerde FM davranış daha net görülmektedir. AHE ölçümlerinde Pt katman kalınlığının 2 Å olduğu örneğin sıfırlayıcı alan değerleri 10 Oe civarındadır. Pt katman kalınlığının 4 Å olduğu örneğin sıfırlayıcı alan değerleri ise 100 Oe civarındadır.

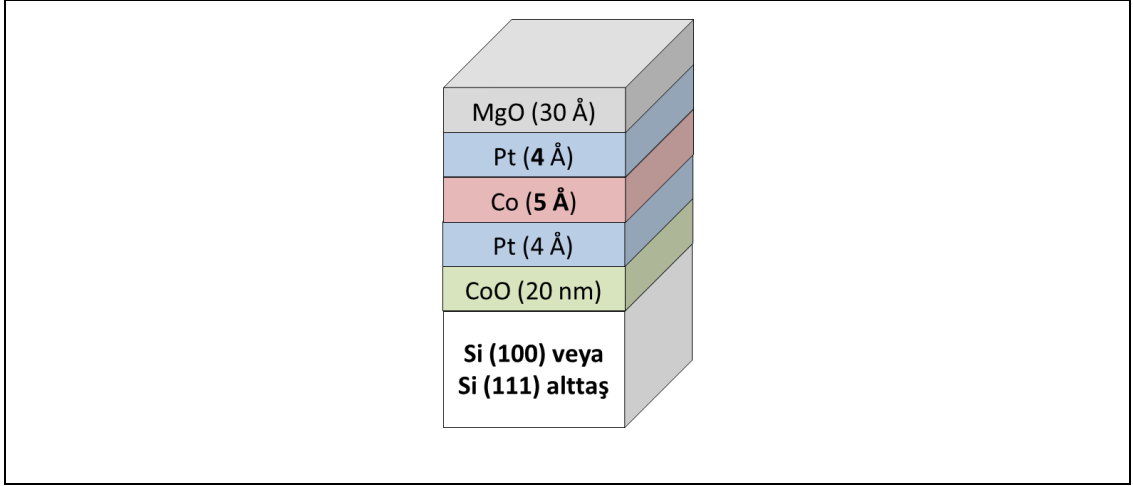


Şekil 4. 30: Aradaki Pt katman kalınlığının 4 Å olduğu örneğin VSM ile a) paralel ve b) dik geometrilerde oda sıcaklığında ölçülen histeresis eğrileri.



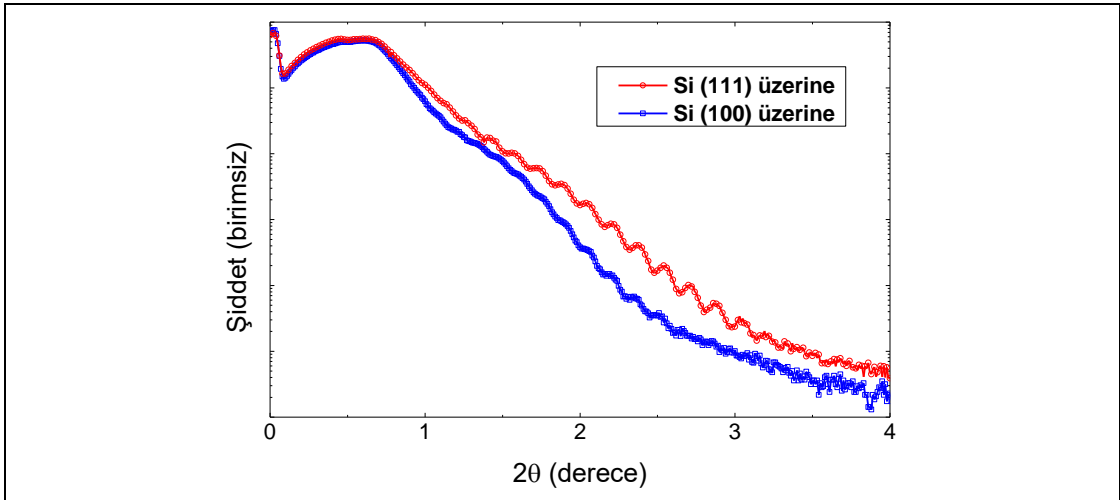
Şekil 4. 31: Aradaki Pt katman kalınlığının a) 2 Å ve b) 4 Å olduğu örneklerin AHE ile oda sıcaklığında elde edilen histeresis eğrileri.

Aradaki Pt katman kalınlığının 4 Å olduğu örneğin AHE ölçüm sonuçlarına göre ikinci adım olan elektrik alan uygulamak için gerekli olan sürekli film yapısındaki örneklerin hazırlanmasına geçildi. Bunun için Şekil 4. 32'de şematik olarak gösterilen ince filmler Si (100) ve Si (111) alttaşlar üzerine ayrı ayrı büyütüldü.



Şekil 4. 32: Si (100) ve Si (111) alttaşlara ayrı ayrı büyütülen sürekli film yapısındaki örnekler.

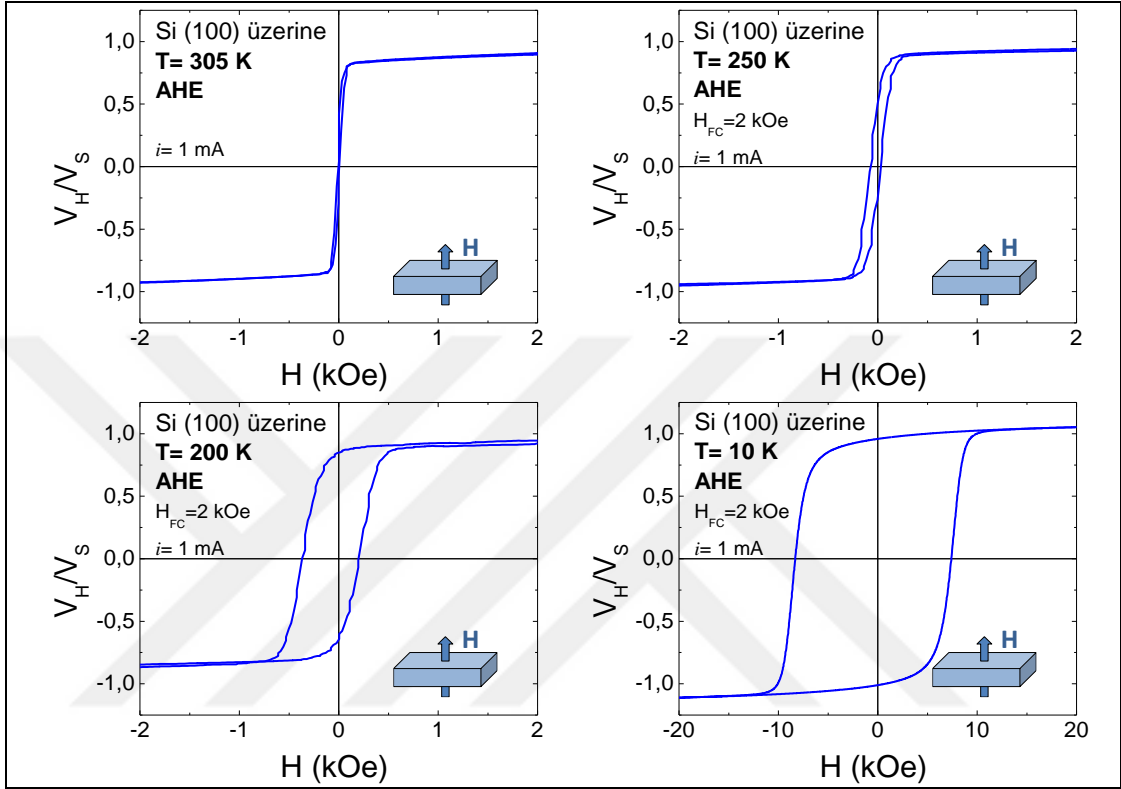
Her iki örneği yapısal olarak kıyaslayabilmek için öncelikle XRR ölçümleri yapıldı. Şekil 4. 33'te gösterilen XRR ölçümlerinde üstteki eğride salınımlar alttakine göre daha belirgindir ve alttaki eğrinin şiddeti açığa bağlı olarak daha fazla azalmaktadır. Bunun anlamı alttaki örnek yüzeyinin daha pürüzlü olduğudur. Salınım şekillerine bakıldığında her iki eğride de tepe ve çukurların aynı hizada olduğu görülmektedir. Yani her iki örnekte bulunan ince film katman kalınlıkları aynıdır.



Şekil 4. 33: Si (100) ve Si (111) alttaşlara ayrı ayrı büyütülen sürekli film yapısındaki CoO/Pt/Co/Pt/MgO örneklerin XRR ölçümleri.

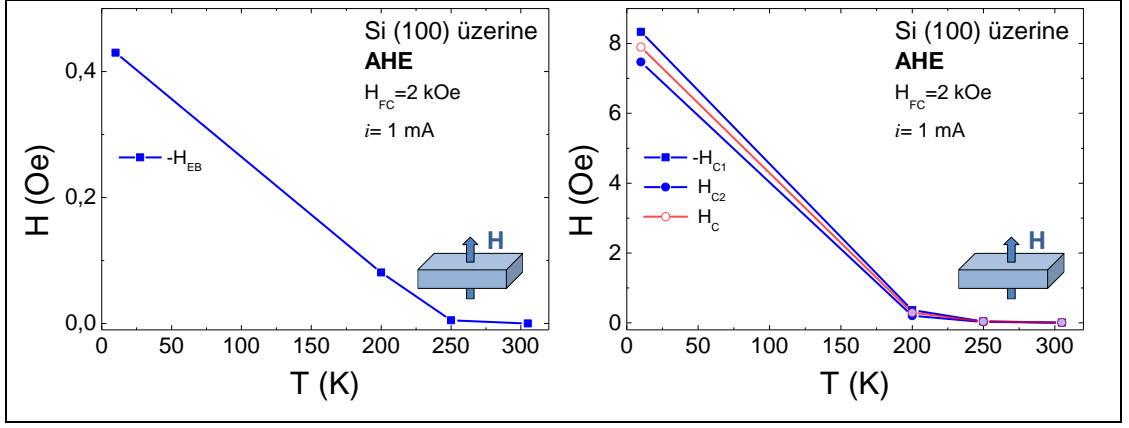
Öncelikle Si (100) alttaş üzerine büyütülmüş örneğin oda sıcaklığı histeresis ölçümleri ve 2 kOe'lik manyetik alan altında soğutma sonrası düşük sıcak histeresis eğrileri ölçüldü. Elde edilen histeresis eğrileri Şekil 4. 34'te gösterilmiştir. Oda

sıcaklığında örneğe ait sıfırlayıcı alan değerleri oldukça küçük, yalnızca birkaç Oe'dir. Sıcaklık azaldıkça sıfırlayıcı alan değerleri artmaktadır. Oda sıcaklığından aşağılara inildikçe bu artış 200 K'de iyice belirginleşmekte (~0.3 kOe), 10 K'e gelindiğinde ise çok büyük değerlere sahip olmaktadır (~8.5 kOe).



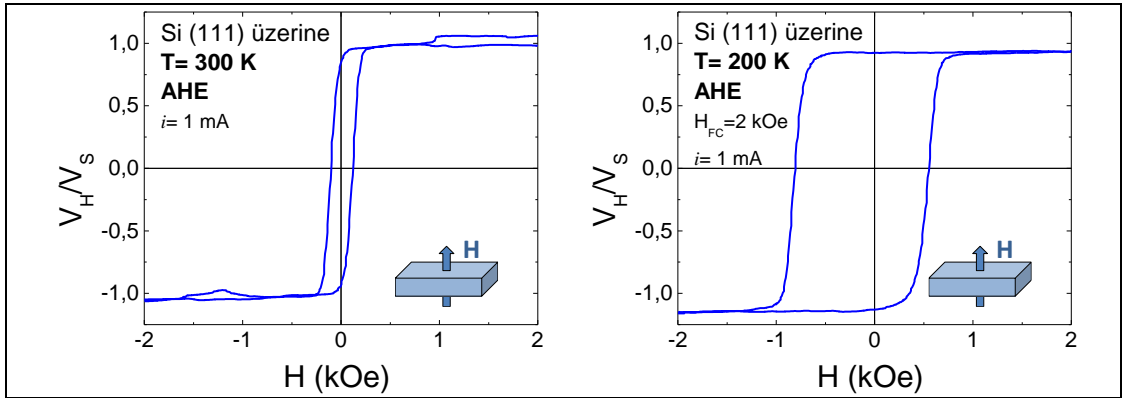
Şekil 4. 34: Si (100) altaş üzerine büyütülmüş örneğin oda sıcaklığında ve manyetik alan altında soğutma sonrası 250 K, 200 K ve 10 K'de ölçülmüş histeresis eğrileri.

Şekil 4. 35'te histeresis eğrilerinin bazı sıcaklıklardaki sıfırlayıcı alanları ve bu değerlerden hesaplanan EB alanları sıcaklığın fonksiyonu olarak verilmiştir. Düşük sıcaklıklarda sıfırlayıcı alanlarla birlikte EB'de sıcaklığa bağlı olarak giderek artmaktadır. Bu örnekte EB'nin sıcaklığa bağlı davranışı, MgO olmaksızın hazırlanan ve bölüm 4.1'de anlatılan örneklerin sonuçları ile benzerlik gösterdiğinden başka sıcaklıklarda ölçümlere ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 4. 35: a) EB ve b) sıfırlayıcı alanların sıcaklığa bağlı davranışı.

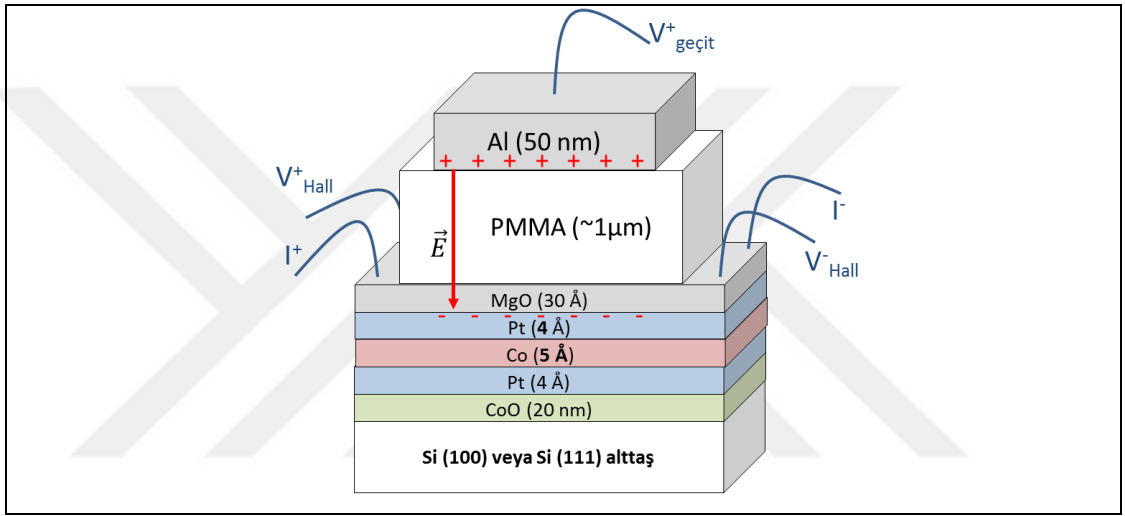
Si (111) üzerine büyütülmüş örnekte ise oda sıcaklığından itibaren sıfırlayıcı alanlar Si (100) üzerine büyütülmüş örneğe göre daha geniştir. Oda sıcaklığında ve 2 kOe'lik manyetik alan altında soğutma sonrası 200 K'de alınan histeresis eğrileri Şekil 4. 36'da gösterilmiştir. Oda sıcaklığında sıfırlayıcı alan değerleri 120 Oe civarında, 200 K'de sıfırlayıcı alan değerleri ise 800 Oe civarındadır. 200 K'de elde edilen histeresis eğrisinde 115 Oe civarında bir exchange bias etkisi görülmektedir. Si (111) alttaş için her iki sıcaklık değerinde elde edilen histeresis eğrilerinde sıfırlayıcı alanlar, Si (100) alttaş ile elde edilen histeresis eğrilerine göre daha geniş ve belirgindir.



Şekil 4. 36: Si (111) alttaş üzerine büyütülmüş örneğin a) oda sıcaklığında ve b) manyetik alan altında soğutma sonrası 200 K'de ölçülmüş histeresis eğrileri.

4.3.4.3. Örneklerin PPMA ile Kaplanması ve Elektrik Alan Altında AHE Ölçümleri

Örneklerin AHE ile histeresis ölçümleri tamamlandıktan sonra elektrik alan uygulaması için örneklerin en üst kısmı spin kaplama (spin coater) yöntemi kullanılarak yaklaşık 1 μm kalınlığında yalıtkan PMMA ile kaplandı. PMMA kaplamasının ardından en üste saçtırma yöntemi ile yaklaşık 50 nm kalınlığında iletken Al büyütüldü. PMMA ve Al kaplanması sırasında maskeleme ile örneğin dört köşesinden Şekil 4. 37’de gösterildiği gibi kontak noktaları için boşluklar bırakıldı.

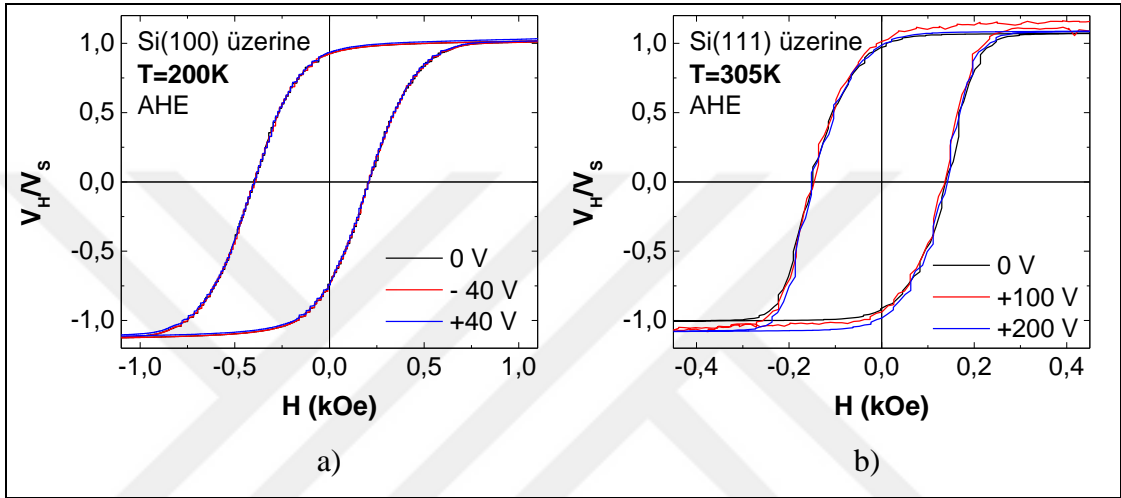


Şekil 4. 37: Geçit malzemesi olarak yalıtkan PMMA ve iletken Al'nin kullanıldığı örneklerin bağlantılarının şematik gösterimi.

AHE ölçümleri için örneğin çapraz iki köşesindeki kontak noktalarından akım uygulanırken, diğer iki köşesinden voltaj ölçümleri yapıldı. Elektrik alan oluşturmak için en üstteki Al tabakası üzerinden ve PMMA'nın altındaki MgO üzerinden iki ayrı kontak daha yapıldı. Al üzerine güç kaynağının pozitif ucu tutturuldu. Örnek sisteminde PMMA üzerinde bulunan iletken Al tabakası ile iletken Co/Pt tabakası paralel levhalar olarak davranırlar. Bu sayede tabakalara uygulanan voltaj ile elektrik alan üretilmiş olur.

Sistemde sabit voltaj altında AHE ile ölçümlerden önce, örnek sisteminde PMMA'in yalıtkanlığını test etmek için, 5 mV'dan başlayıp çok küçük adımlarla 1 Volt değerine kadar voltaj değeri artırılarak akım oluşup oluşmadığı test edildi. Ancak 1 V gibi küçük değerde bile voltaj-akım (V-I) ölçümünde doğrusala yakın bir artış görüldü. Örneklerin farklı parçaları için yalıtkan PMMA tabakasının yeniden

hazırlanması ve V-I ölçümleri tekrar tekrar denendi. Ancak her bir denemenin sonucunda aynı doğrusal davranış çıktı. Doğrusal davranışın anlamı PMMA'in alt ve üst tabakalarında Şekil 4. 37'de gösterildiği gibi istenen yük birikmesinin sağlanamadığı, yani levhalarda elektrik alan üretilemediği anlamına gelmektedir. Buna rağmen her iki örnekte de voltaj uygulanarak Şekil 4. 38'de gösterilen AHE ölçümleri yapıldı. Beklendiği gibi her iki örnekte de uygulanan voltajın AHE ölçümleri üzerinde hiçbir etkisi görülmedi.

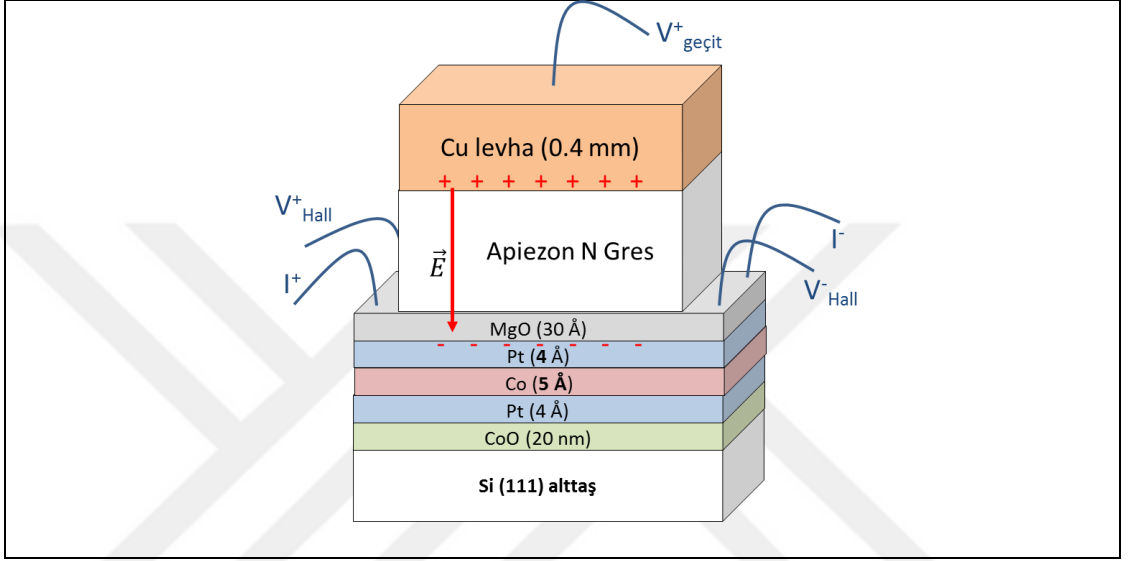


Şekil 4. 38: a) Si (100) alttaş üzerine büyütülmüş örneğin manyetik alan altında soğutma sonrası 200 K'de farklı elektrik alanlar altında ölçülmüş histeresis eğrileri. b) Si (111) alttaş üzerine büyütülmüş örneğin oda sıcaklığında farklı elektrik alanlar altında ölçülmüş histeresis eğrileri.

4.3.5. Yalıtkan MgO ve Apiezon N Gres ile Yapılan Çalışmalar

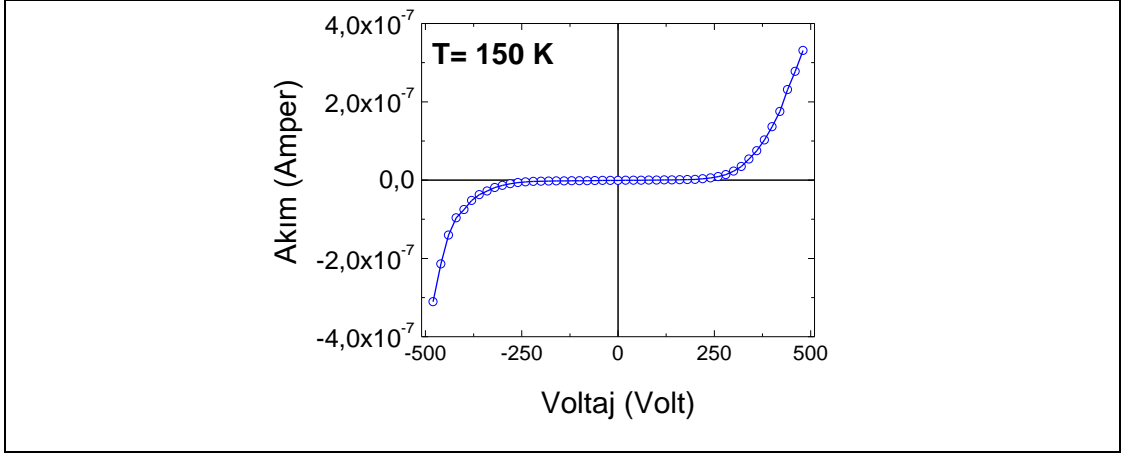
Geçit yapısında yalıtkan malzeme olarak PMMA'nın kullanıldığı örneklerde exchange bias etkisinin elektrik alan ile kontrolünde arzu edilen sonuçlar elde edilemedi. Bu yüzden MgO üzerinde iyi bir yalıtkan olan Apiezon N gres kullanılarak elektrik alan altında yeni ölçümler yapıldı. Bir önceki kısımda en iyi AHE sonuçları Si (111) üzerine büyütülen örnekte elde edildiği için, bu kısımda yalnızca Si(111) alttaş üzerine büyütülen örnek ile çalışıldı. Apiezon N gres iyi bir yalıtkan ($\rho = 2.0 \times 10^{16} \Omega \text{cm}$ [180]) olmasına rağmen gres özelliğinden kaynaklanan avantaj ve dezavantajlar içermektedir. Gresin akışkanlığı çok düşük olmasına rağmen yine de şekillendirilebilmektedir. Bu özelliği sayesinde üzerine yerleştirilen iletken levha ile örnek arasındaki mesafenin ayarlanabilmesi mümkündür. Ancak yüksek elektrik alanlarda levhalar birbirlerini çekerek kısa devreye sebep olabilirler. Ayrıca

iki levha arasındaki çekme kuvvetinin büyüklüğüne göre, levhalar arası mesafe değişebilecektir. Bu sebeplerle Apiezon N Gres ile çalışmak kararlı ve rakamsal değerler açısından tekrar edilebilir sonuçlar doğurmasa da elektrik alanın exchange bias'a etkisinin olup olmadığını görebilmek için kolay bir düzenek sağlamaktadır. Şekil 4. 39'da elektrik alan altında AHE ölçümleri için hazırlanan örnek sistemi ve bağlantılar gösterilmektedir.



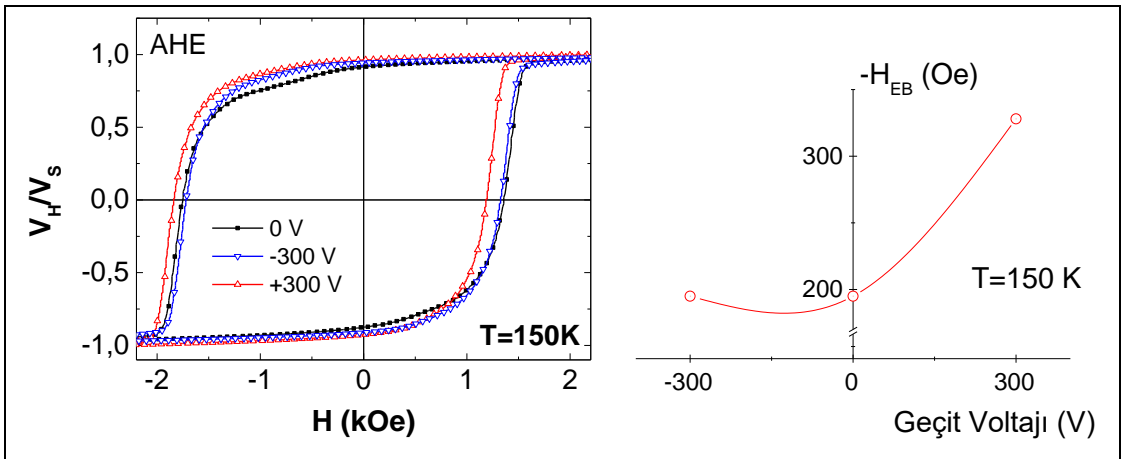
Şekil 4. 39: Geçit malzemesi olarak kullanılan Apiezon N gres ve Cu levha kullanılan örnek sistemi ve bağlantılarının şematik gösterimi.

Elektrik alan altında AHE ölçümlerine geçmeden önce, örneğin yalıtkanlığını tespit etmek için voltaj-akım ölçümleri yapıldı. ± 500 V değeri arasında voltaj-akım ölçümleri hem oda sıcaklığında, hem de 150 K'de gerçekleştirildi. 150 K'de elde edilen ölçüm sonucu Şekil 4. 40'da gösterilmiştir. Elde edilen V-I grafiğinin eğimi yalıtkan bir malzemeden beklenildiği gibi artan voltaj ile birlikte artmaktadır. Bu sonuç hazırlanan geçit yapısının elektrik alan ölçümlerine uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 40: Yalıtkan olarak Apiezon N gresin kullanıldığı örneğin 150 K'deki voltaj-akım ölçümü.

Geçit yapısını kontrol ettikten sonra, exchange bias'ın elektrik alan ile kontrolüne yönelik ölçümler 150 K'de yapıldı. Bunun için örnek önce 320 K'e kadar ısıtıldı. Ardından 2kOe'lik manyetik alan altında 150 K'e soğutuldu. Bu sıcaklıkta önce hiç elektrik alan uygulanmaksızın mıknatıslanma ölçümü alındı. Alınan ilk ölçümden sonra talim etkisinin (aynı sıcaklıkta ardışık histeresis eğrisi ölçümlerinde exchange bias değerinde azalma) olup olmadığını araştırmak için ardışık bir ölçüm daha yapıldı. Ardışık ölçümde talim etkisi görüldüğünden sonraki bütün voltaj ölçümleri öncesinde her seferinde sistem 320 K'e çıkarılarak, 2 kOe'lik alan altında hedef ölçüm sıcaklığı olan 150 K'e soğutuldu.



Şekil 4. 41: a) Manyetik alan altında soğutma sonrası 150 K'de 0 V, -300 V ve +300 V ile oluşturulan elektrik alan altında ölçülmüş histeresis eğrileri. b) Uygulanan geçit voltajına bağlı olarak EB'de meydana gelen değişim.

Şekil 4. 41'de voltaj uygulamaksızın 150 K'de alınan ölçüm ile, manyetik alan altında soğutma sonrası -300 V ve +300 V uygulanarak alınan histeresis ölçümleri gösterilmiştir.

Elektrik alan uygulaması ile yapılan bu ölçümlerde elektrik alanın mıknatıslanma eğrisi ve exchange bias üzerindeki etkileri yukarıda Şekil 4. 41'de verilen grafiklerde net bir şekilde görülmektedir. Bu grafiklerde her bir ölçüm için okunan sıfırlayıcı alan değerleri Tablo 4. 2'de verilmiştir. Buna göre uygulanan pozitif voltaj (+300 V) ile birlikte sıfırlayıcı alanlar artmış, H_{EB} değeri 195 Oe'den 328 Oe değerine çıkmıştır. Uygulanan negatif voltaj (-300 V) ise sıfırlayıcı alanların bir miktar azalmasına sebebiyet vermiş, ancak exchange bias alanını değiştirmemiştir.

Tablo 4. 2: Manyetik alan altında soğutma sonrası 150 K'de 0 V, -300 V ve +300 V ile oluşturulan elektrik alan altında ölçülmüş histeresis eğrilerinin sıfırlayıcı alan ve EB değerleri.

	$-H_{C1}$ (Oe)	H_{C2} (Oe)	$-H_{EB}$ (Oe)	H_c (Oe)
0 V	1750	1360	195	1555
- 300 V	1720	1330	195	1525
+ 300 V	1840	1184	328	1512

4.3.6. Sonuçlar

Bu kısımda exchange bias etkisinin elektrik alan ile kontrolüne ilişkin çalışmalar yapıldı. Bunun için dik anizotropiye sahip ince film örneklerin üzerine yalıtkan malzemeler kaplanarak örnek üzerinde elektrik alan uygulaması yapılabilecek geçit yapıları oluşturuldu.

Yalıtkan malzeme olarak öncelikle dielektrik katsayısı yüksek olan HfO_2 'in başarılı bir şekilde üretilebilmesi üzerine çalışıldı. Ancak RF saçtırma tekniği ile hazırlanan HfO_2 yalıtkanlık anlamında istenilen sonuçları veremedi.

İkinci olarak yüksek yalıtkanlığa sahip fused silika alttaş üzerine büyütülen örneklerle elektrik alan denemeleri yapıldı. Kullanılan alttaş kalınlığı çok büyük olduğu için (~mm), bu örneklerde 250 K sıcaklığında yapılan ölçümlerde uygulanan elektrik alan EB etkisi üzerinde hiçbir değişikliğe sebebiyet vermedi.

Üçüncü olarak yalıtkan bir polimer olan PMMA ince filmler üzerine spin kaplama yöntemi ile hazırlandı. Ancak PMMA yalıtkanlık anlamında istenen kalitede olmadığından EB'in elektrik alan ile kontrolünde bu malzeme ile de arzu edilen sonuçlar elde edilemedi.

Son olarak iyi bir yalıtkan olan Apiezon N gres yalıtkan tabaka olarak kullanıldı. Bu sayede oluşturulan geçit yapısıyla ± 300 V uygulanarak yapılan AHE ölçümlerinin, 0 V ile yapılan ölçümlerden farklı olduğu gözlemlendi. Uygulanan pozitif voltaj örnek sisteminde sıfırlayıcı alanları ve H_{EB} 'yi artırmış, buna karşın uygulanan negatif voltaj sıfırlayıcı alanları azaltmış ancak H_{EB} değerini değiştirememiştir.

Pozitif voltaj ile histeresis eğrisinde çok büyük değişiklik görülürken, negatif voltaj ile az değişiklik gözlenmesi FM Co üzerinde biriken yüklerin işareti ile açıklanmıştır. Geçit yapısına pozitif voltaj uygulandığında FM Co üzerinde negatif yükler yani elektronlar birikmektedir. Dolayısıyla Co tabakasındaki elektron yoğunluğu artmakta ve Co'ın FM özellikleri etkilenmektedir. Düşük sıcaklıklarda Co tabakası CoO tabaka ile etkileşim halinde olduğu için EB etkisi de değişmektedir.

4.4. Teknolojik Cihaz Uygulamalarında Kullanılabilecek Antiferromanyetik IrMn Tabanlı Örnekler İçin Uygun Büyütme Şartlarının Araştırılması

4.4.1. Giriş

Bu bölümünün ilk kısımlarında dik mıknatıslanmaya sahip Co/CoO tabanlı örnekler ve bu örneklerle yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu kısımda ise günümüz teknolojik cihazlarında kullanılabilecek ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek EB etkisi için, Co/IrMn ince filmlerin elde edilmesi üzerine çalışıldı. Bu örneklerin yapısal ve manyetik özellikleri incelendi.

Oda sıcaklığının hemen altında kolay erişebilir Néel sıcaklığına ($T_{N:CoO}=291K$ [133]) sahip olması nedeniyle ölçümleri kolaylaştırdığı için, bilimsel çalışmalarda AF malzeme olarak CoO sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak cihaz uygulamalarında Néel sıcaklığı oda sıcaklığının üstünde olan IrMn gibi ($T_{N:IrMn}>400K$) AF malzemeler tercih edilmektedir [69, 181]. Bununla birlikte, IrMn'in T_N ve T_B 'si Ir ve Mn'in karışım oranlarına göre bir miktar değişebilmektedir. Yapılan bir çalışmada IrMn için engelleme sıcaklığı Ir oranının %22.5 olduğu örneklerde 345 K, %20 olduğu örneklerde 400 K ve %12.9 olduğu örneklerde 480 K olarak ifade edilmiştir [182]. Cihaz tasarımları yapılırken bu özellik dikkate alınarak oranlar belirlenebilir. Yapılan iki farklı çalışmada Ir içeriğinin %13-22 veya %23-33 olduğu aralıklarda kristal kalitelerine bağlı olarak exchange bias etkisi en yüksek değerlerde görülmüştür [182, 183].

Antiferromanyetik malzeme olarak IrMn'nin kullanılması yukarıda bahsettiğimiz yüksek engelleme ve Néel sıcaklığının yanısıra, düşük kritik kalınlığa sahip olması gibi başka önemli özelliği nedeniyledir [184]. Tüm AF malzemelerde olduğu gibi IrMn'in kalınlığı T_N 'yi etkileyen önemli bir faktördür. IrMn kalınlığı 30 Å'dan fazla olduğunda T_N 'nin 400 K'in üzerinde olduğu, az olduğunda T_N 'nin oda sıcaklığına yaklaştığı görülmüştür [69]. Ayrıca, oksitlenmeye karşı gösterdiği yüksek direnç nedeniyle de IrMn teknolojik cihazlarda tercih edilmektedir [184].

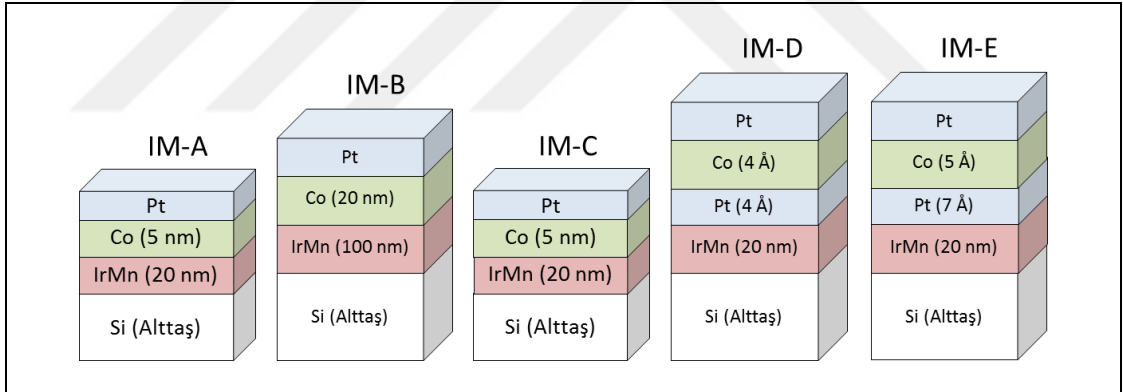
Ferromanyetik malzeme olarak Co ince filmlerin kullanıldığı dik mıknatıslanmaya sahip örneklerle yapılan çalışmalarda antiferromanyetik IrMn tabakası genellikle FM tabakanın üstüne büyütülmüştür [52, 73, 75, 76, 184-190]. Ancak birkaç çalışmada da IrMn FM'nin altında büyütülmüş ve dik mıknatıslanma

ile exchange bias etkisi gözlenmiştir [71, 184, 190]. Van Dijken vd.nin yaptıkları bir çalışmada, ferromanyetik Co tabakası önce büyütüldüğünde dik EB'ye etkisinin daha yüksek olduğunu, ancak ısıtma ve alan altında soğutma işlemleri yapılırsa alttaki IrMn'lı örneğin daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir [184]. IrMn sonra büyütüldüğünde domen yapısı Co yüzeyinin dik manyetik momentlerinden etkilenmekte ve bu sayede ölçümlerde dik exchange bias etkisi daha büyük olmaktadır [184]. IrMn tabakası altta büyütüldüğünde ise domen oluşumu etkilenmemekte ve daha düşük değerlerde dik exchange bias etkisi gözlenmektedir [184]. Ancak yüksek sıcaklıklara kadar ısıtma (450-500 K) ve yüksek manyetik alan altında (5 T) soğutma ile IrMn'ın altta olduğu örnekte dik exchange bias etkisinde artma ve üstte olduğu örnekte azalma görülmüştür [184]. Çünkü Co/IrMn ara yüzeyinde manyetik anizotropi IrMn etkisiyle örnek düzlemine doğru inmek istemekte ve EB etkisini azaltmaktadır [184]. Bu iki yüzey arasına Pt tabakasının eklenmesi dik EB etkisini artırmaktadır [52, 71, 184]. Aradaki Pt tabakası bir yandan Co'nun dik mıknatıslanmasına katkı sağlarken, diğer yandan Co ve IrMn yüzeyleri arasındaki mesafeyi açıp etkileşimlerini azaltmaktadır. Çalışmalara göre Pt'in EB etkisini arttığı ideal kalınlık değerleri 3-5 Å aralığındadır [52, 71, 184]. Dik mıknatıslanmaya sahip Co/Pt/IrMn temelli örneklerde Pt katkısının exchange bias etkisini arttığı, buna karşın örnek düzleminde mıknatıslanmaya sahip örneklerde Pt katkısının exchange bias etkisini azalttığı gözlenmiştir [76]. Araya Pt ilavesi ile Co/Pt ara yüzeyinin dik manyetik anizotropiye sebep olmasının fiziksel nedeni ara yüzeydeki simetrinin bozulması ve Co 3d - Pt 5d orbitallerindeki elektronların orbital manyetik momentlerinin artmasıdır [61]. Böylece ekstra bir spin-orbit eşleşmesi dik manyetik anizotropiyi güçlendirmektedir [61]. Bununla birlikte, Co'nun dik anizotropiye sahip olması için kalınlığının belirli kritik kalınlık değerinden küçük olması gerekmektedir [52].

Tez çalışmasında kullanılacak dik anizotropiye sahip örneklere elektrik alan uygulamak için IrMn tabakasının FM malzemenin altında olması gerekmektedir. Bu sebeple elektrik alan uygulamalarında kullanılacak cihaz yapısı oluşturabilmek için bu bölümde, literatürde var olan yukarıda bahsedilen çalışmalar ışığında ve yine yukarıda bahsi tez çalışmasından edinilen tecrübe ile IrMn tabakasının altta olduğu örnekler üzerinde çalışıldı.

4.4.2. Örneklerin Hazırlanması

IrMn'in en uygun büyütme koşullarının belirlenmesi için Şekil 4. 42'de gösterilen beş farklı örnek Si (100) alttaşlar üzerine hazırlandı. Örnekler yüksek vakum ortamında magnetron saçtırmalı kaplama tekniği ile büyütüldü. Tüm örneklerde genel olarak IrMn büyütülmeden önce alttaşlar yüksek sıcaklıklara ısıtıldı ve IrMn tabakası hazırlandıktan sonra tekrar oda sıcaklığına dönülerek Pt ve Co gibi diğer ince film katmanları büyütüldü. Şekil 4. 42'de gösterilen ilk iki örnek sisteminde IrMn tabakası 300°C'de, sonraki üç örnekte ise 500°C'de hazırlandı. Metin içerisinde anlatım kolaylığı açısından örnekler büyütülme sırasına göre IM-A, IM-B, IM-C, IM-D ve IM-E şeklinde isimlendirilecektir. İlk üç örneğin (IM-A, IM-B, IM-C) hazırlanmasında Co tabakasının kalınlığı nm mertebesinde olduğu için mıknatıslanmasının örnek düzleminde olması beklenmektedir. Diğer iki örnekte ise (IM-D, IM-E) araya konulan Pt tabakası ve Å mertebesindeki Co tabakası nedeniyle mıknatıslanmanın örnek düzlemine dik olması beklenmektedir.

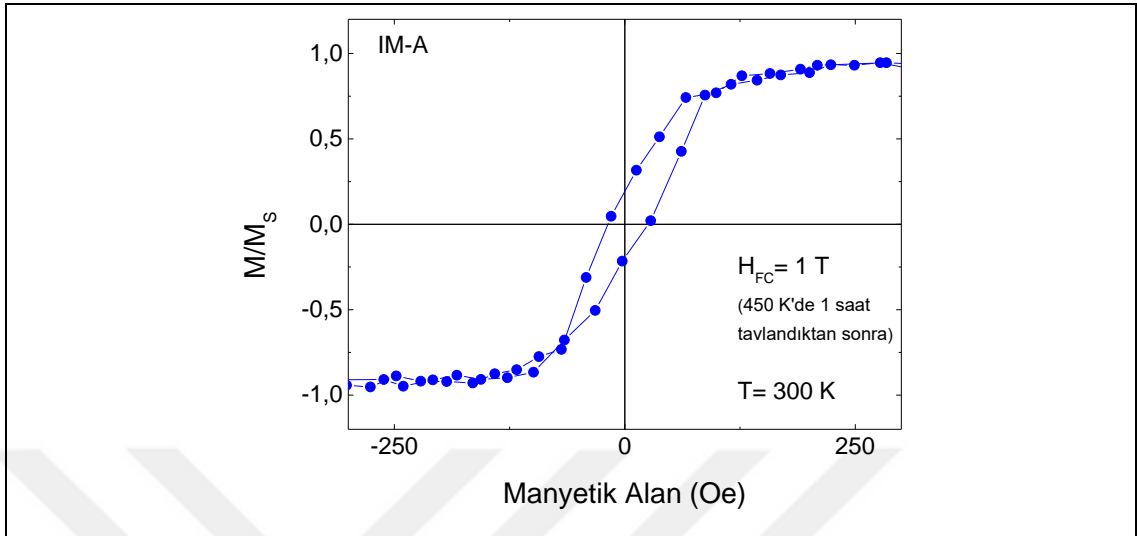


Şekil 4. 42: AF malzeme olarak IrMn'in kullanıldığı örnekler gösterilmektedir. İlk iki örnekte IrMn büyütülürken alttaş sıcaklığı 300°C, diğerlerinde ise alttaş sıcaklığı 500°C'de tutulmuştur.

4.4.3. Veriler ve Tartışma

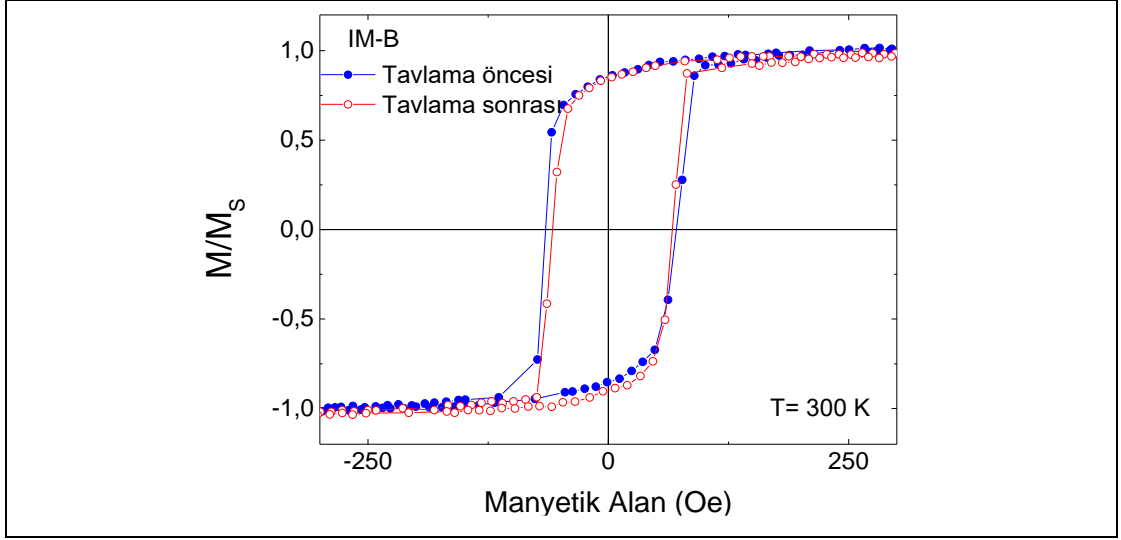
Örneklerin mıknatıslanma davranışlarının belirlenmesi için VSM ve AHE teknikleri kullanıldı. Şekil 4. 43'te IM-A örneğinin VSM ile örnek düzleminde oda sıcaklığındaki histeresis eğrisi gösterilmiştir. Ölçümlerden önce örnek 450 K'de 1 saat boyunca örnek düzleminde 1T manyetik alan altında tavlandı. Ardından 2

kOe'lik manyetik alan altında soğutuldu. Elde edilen ölçüm sonucunda bu örnek için oda sıcaklığında EB etkisi gözlenmemiştir.



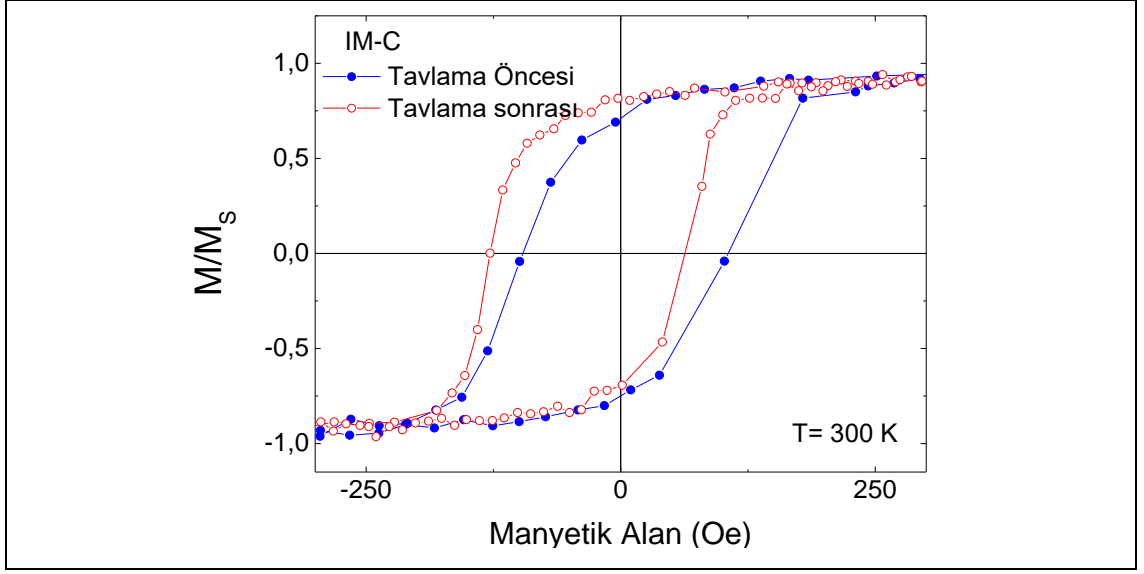
Şekil 4. 43: IM-A örneğinin 450 K'de 1 saat boyunca 1T manyetik alan altında tavlandıktan sonra, alan altında soğutulularak, oda sıcaklığında elde edilen VSM ölçüm sonucu.

İlk örnekte EB gözlenmeyince, yine aynı şartlarda ancak Co ve IrMn kalınlıklarının daha fazla olduğu ikinci örnek hazırlandı. IM-B olarak isimlendirdiğimiz ikinci örnekte IrMn kalınlığı 100 nm, Co kalınlığı ise 20 nm olarak belirlendi. Şekil 4. 44'te IM-B örneğine ait tavlama öncesinde ve sonrasında oda sıcaklığında yapılan histeresis ölçümleri gösterilmiştir. Tavlama için örnek 400 K'e kadar ısıtılmış, 1 saat boyunca örnek düzlemi doğrultusunda uygulanan 1T manyetik alan altında beklenmiş ve aynı manyetik alan altında oda sıcaklığına soğutulup, VSM'de ölçüm alınmıştır. Tavlama öncesinde ve sonrasında yapılan iki ölçüm arasında kayda değer bir fark görülmemiştir.



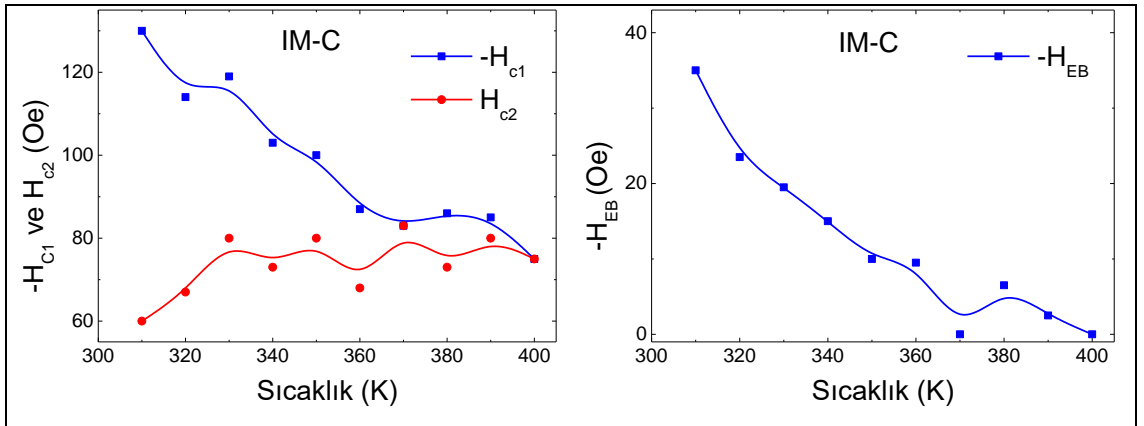
Şekil 4. 44: IM-B örneğinin tavlama öncesinde ve 400K’de 1 saat boyunca 1T manyetik alan altında tavlandıktan sonra oda sıcaklığında elde edilen VSM ölçüm sonuçları gösterilmiştir.

İlk iki örnekte EB etkisi görülmediğinden üçüncü örnekte büyütme şartları değiştirildi. IrMn’ın büyütülmesi esnasında alttaş sıcaklığı 500°C’de tutuldu. IM-C olarak isimlendirdiğimiz bu örnekte IrMn ve Co kalınlıkları ilk örnekte olduğu gibi sırasıyla 20 nm ve 5 nm olarak hazırlandı. Şekil 4. 45’te IM-C örneğine ait histeresis ölçümleri gösterilmiştir. Tavlama için örnek düzleminde 400 K’de 1 saat boyunca 1T manyetik alan altında beklenmiş ve aynı manyetik alan altında aynı geometride oda sıcaklığı değerine kadar soğutulup VSM’de ölçüm alınmıştır. Tavlama öncesinde ve tavlama sonrasında yapılan ölçümlerde bu örnekte histeresis eğrilerinde sıfırlayıcı alanlar arasında 60 Oe’lik bir fark ve 30 Oe’lik EB gözlemlendi.



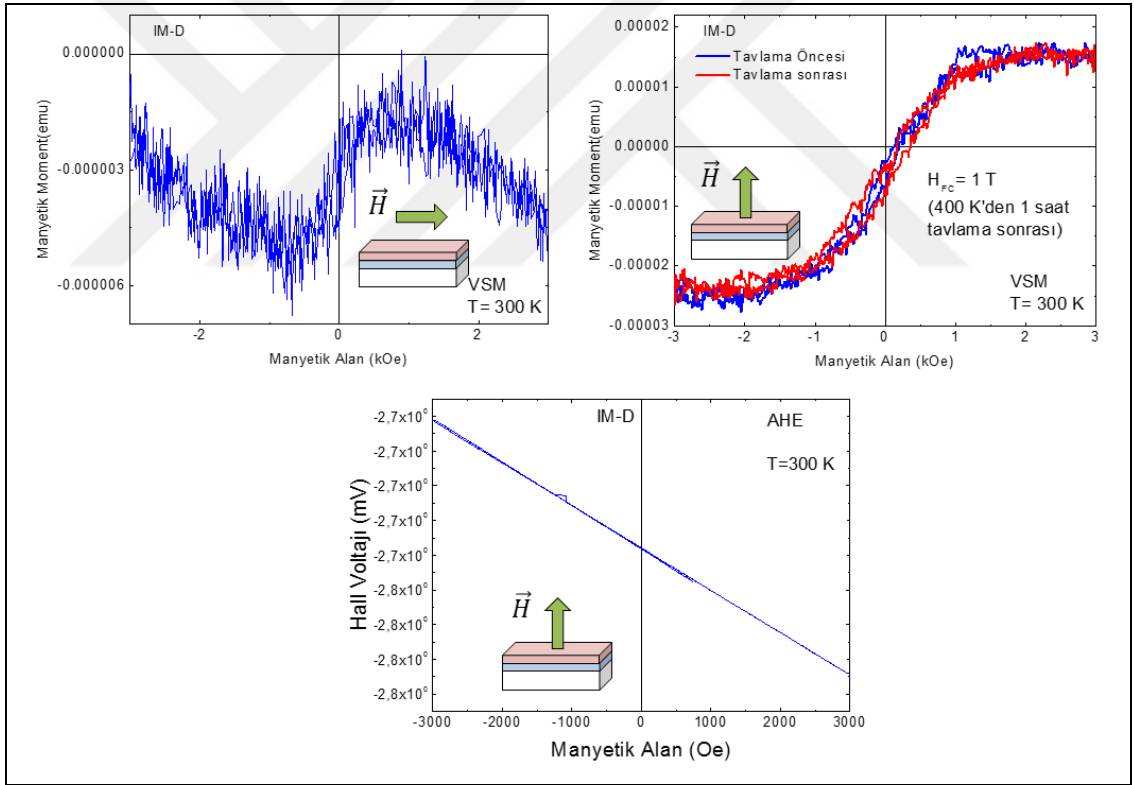
Şekil 4. 45: IM-C örneğinin tavlama öncesinde ve 400K’de 1 saat boyunca 1T manyetik alan altında tavlandıktan sonra oda sıcaklığında elde edilen VSM ölçüm sonuçları gösterilmiştir.

Oda sıcaklığında histeresis eğrisinde EB görüldükten sonra örneğin engelleme sıcaklığını bulmak için 300 K ile 400 K aralığında EB ölçümleri yapıldı. Bunun için ölçüm yapılacak her bir hedef sıcaklığa gitmeden önce her seferinde örnek 400K’e kadar ısıtıldı ve manyetik alan altında soğutuldu. Şekil 4. 46’da örneğe ait sıfırlayıcı alanların sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir. Elde edilen grafikte görüldüğü gibi H_{C1} ve H_{C2} sıfırlayıcı alan değerleri 400 K sıcaklığına doğru birbirlerine yaklaşmakta ve aradaki fark kapanmaktadır.



Şekil 4. 46: IM-C örneğine ait sıfırlayıcı alanlarının sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir.

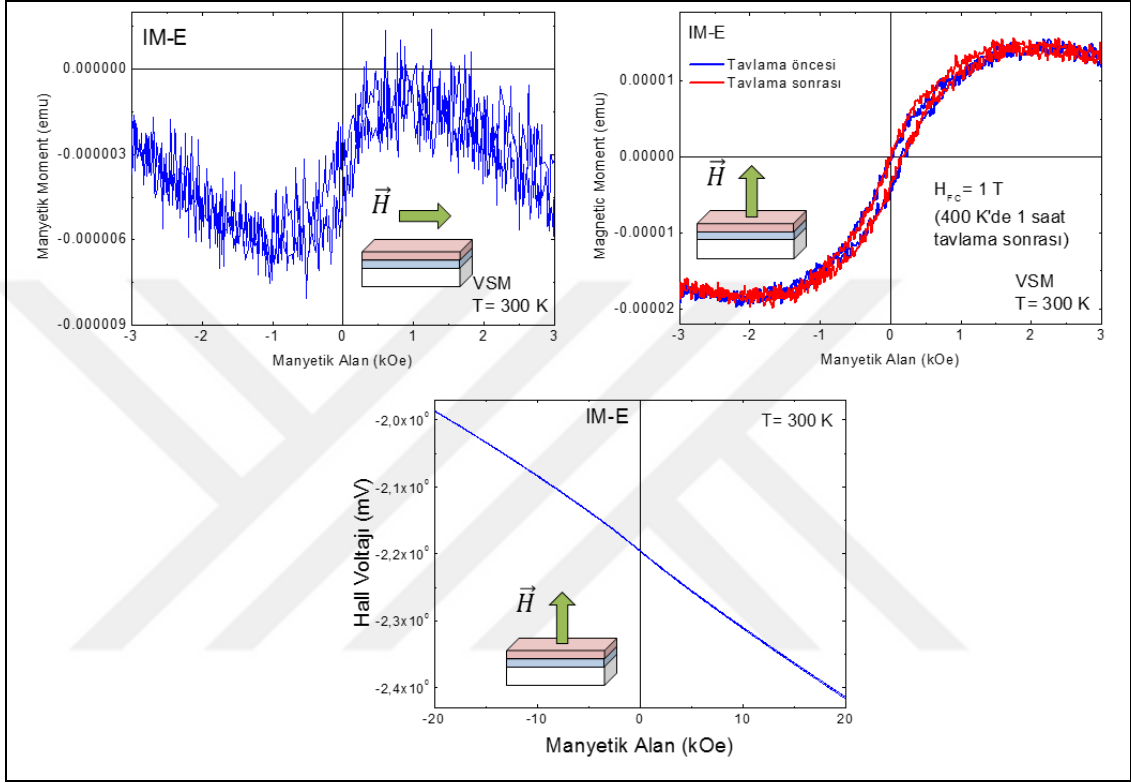
Üçüncü örnek ile örnek düzleminde EB etkisinin gözlemlenmesinden sonra 500°C’de hazırlanmış IrMn’ın AF malzeme olarak kullanılabilmesi anlaşılmış oldu. Böylece IrMn kullanılarak örnek düzlemine dik mıknatıslanmaya sahip örneklerin hazırlanması aşamasına geçildi. Bu amaçla ilk olarak IrMn üzerine 4Å kalınlığına sahip Pt tabakası ve onun üzerine yine 4Å kalınlığına sahip Co tabakası büyütülerek IM-D örneği hazırlandı. Şekil 4. 47’de bu örnek için VSM ve AHE ile oda sıcaklığında elde edilen ölçüm sonuçları verilmiştir. Yapılan ölçümlerde dik mıknatıslanmaya ilişkin iyi sonuçlar elde edilememiştir. VSM ile bir miktar mıknatıslanma davranışı görülse de, mıknatıslanma değerinin düşük olması, doyumun çok yüksek alanda gerçekleşmesi ve aynı sonucun AHE ile doğrulanamaması mıknatıslanmanın Co sürekli film yapısı kaynaklı değil, altaş ve ölçüm ortamı kaynaklı diğer katkılardan geldiğini düşündürmektedir.



Şekil 4. 47: IM-D örneğinin oda sıcaklığında örnek düzlemine paralel (üst solda) ve örnek düzlemine dik (üst sağda) geometrilerde VSM ölçümleri ve örnek düzlemine dik (altta) geometride AHE ölçümü gösterilmiştir.

IrMn yüzeyinde pürüzlülüğün yüksek miktarda olabileceği bu sebeple çok ince Co tabakasının sürekli bir film yapısına sahip olamayacağı düşüncesiyle dik mıknatıslanmaya sahip örneklerin büyütülebilmesi için Pt ve Co kalınlıklarının

dördüncü örneğe kıyasla bir miktar artırılmasına karar verildi. Bu amaçla IrMn üzerine 7Å Pt ve 5Å Co büyütülerek IM-E örneği hazırlandı. Oda sıcaklığında VSM ve AHE ölçüm düzeneğiyle yapılan ölçümlerde IM-D örneğine benzer yine dik mıknatıslanma açısından sağlıklı olmayan sonuçlar elde edildi. Şekil 4. 48'de bu son örnek için alınmış ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4. 48: IM-E örneğinin oda sıcaklığında örnek düzlemine paralel (üst solda) ve örnek düzlemine dik (üst sağda) geometrilerde VSM ölçümleri ve örnek düzlemine dik (altta) geometride AHE ölçümü gösterilmiştir.

4.4.4. Sonuçlar

IrMn AF malzeme olarak oda sıcaklığında çalışan cihaz uygulamaları açısından önemli olduğundan, IrMn tabanlı örneklerde EB etkisinin gözlemlenmesi üzerine çalışıldı. IrMn'ın AF olarak büyütülmesi için uygun şartlar belirlendi. 500°C'de hazırlanan ve büyütme sonrasında 400K'de 1 saat boyunca 1 T manyetik alan altında tavlanan IrMn tabakasının AF özellik gösterdiği belirlendi. Mıknatıslanması örnek düzleminde olan IrMn(20nm)/Co(5nm) örnek sisteminde oda sıcaklığında EB etkisi yaklaşık 30 Oe olarak ölçüldü. Ancak dik EB etkisinin görüldüğü CoO tabanlı örneklerle aynı koşullarda ve aynı kalınlıklarda hazırlanan

IrMn tabanlı örneklerde beklenildiği gibi dik mıknatıslanma ve dik EB etkisi görülmedi. Bunun sebebi olarak yüksek sıcaklıkta hazırlanan IrMn tabakasının pürüzlülüğün çok yüksek olması düşünülmektedir. IrMn/Pt/Co örneklerde dik mıknatıslanma görülmediğinden, elektrik alan uygulanmasına yönelik bir çalışma yapılmadı.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

EB'nin elektrik alan ile kontrolü spintronik alanında yeni cihaz tasarımlarına yol açabilecek önemli bir adım olarak görülmektedir. Yarıiletken ve metalik ferromanyetik malzemelerde mıknatıslanmanın, manyetik anizotropilerin, sıfırlayıcı alanların ve Curie sıcaklığının elektrik alan ile değiştirilebilmesi, günümüz teknolojik cihazlarında özellikle güç tüketimi konusunda verimliliği artırabilecektir. Bu nedenle EB etkisini elektrik alan ile değiştirmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Manyetoelektrik ve piezoelektrik malzemelerin desteğiyle bu konuda başarıya ulaşmış çalışmalar yapılmıştır. Bu tez çalışmasında ise yalnızca metal FM malzemeler kullanılarak EB etkisinin elektrik alan ile kontrolü üzerine çalışılmıştır.

Exchange bias etkisinin elektrik alan ile kontrolünün yapılabilmesi için bu tez çalışmasında iki adım gerçekleştirildi. İlk adım elektrik alan uygulayabilecek ve ölçümleri yapabilecek ölçüm düzeneğinin kurulması, ikinci adım ise uygun örnek yapılarının hazırlanıp incelenmesi şeklinde tanımlanabilir.

İlk adım için öncelikle çok fonksiyonlu bir transport sisteminin GTÜ laboratuvarlarında bulunan PPMS sistemi ile uyumlu olacak şekilde tasarımı ve kurulması gerçekleştirildi. Sisteme bağlı bütün cihazların bilgisayar ile kontrolü için NI Labview görsel programlama dili tabanlı özel bir yazılım geliştirildi.

Tezde ikinci adımı oluşturan ve ölçümleri kapsayan deneysel bölüm aşağıdaki gibi dört kısımdan oluşmaktadır.

İlk iki kısımda dik anizotropiye sahip manyetik ince film örneklerin büyütülmesi için çalışıldı. Bunun için magnetron saçtırma tekniği kullanılarak, yüksek vakum koşullarında Si alttaşlar üzerine büyütülen Pt/Co(4Å)/Pt/CoO/Pt ve Pt/Co(5Å)/Pt/CoO/Pt manyetik ince filmlerinin manyetik özellikleri AHE yöntemiyle incelendi. Co kalınlığı fazla olan örnekte (5 Å) oda sıcaklığında sıfırlayıcı alan değerleri daha büyük çıktı. Yine benzer şekilde düşük sıcaklıklarda exchange bias alanının kalın örnekte (5 Å) daha fazla olduğu gözlemlendi.

Benzer şekilde manyetik özelliklerin incelendiği ikinci kısımda Pt/Co(4Å)/Cr/CoO/Pt ince filmi ile çalışıldı. Bu yapıda düzleme paralel ve düzleme dik geometrilerde exchange bias etkisi tek bir örnekte gözlemlendi. Düşük sıcaklıklarda her iki geometride gözlenen exchange bias etkisinin kaynağı AF ve FM spin eksenleri ile ilişkilendirildi. Bu etkinin tek bir örnekte her iki geometride aynı anda

görülmesi, yeni nesil bilgi depolama teknolojileri için yeni imkânlar oluşturabilecek önemli bir çalışmadır.

DeneySEL bölümün üçüncü kısmında EB'nin elektrik alan ile kontrolüne yönelik örnek sistemlerinin elde edilmesi hususunda çalışıldı. Temelde Co/Pt ince filmlerinden oluşan örneklerle elektrik alan uygulayabilmek için, bu yapının altında ya da üstünde iyi bir yalıtkan malzeme ve karşısında başka bir iletken tabaka olması gerekmektedir. Yalıtkan malzeme olarak HfO₂, fused silika alttaş, PMMA ve Apiezon N gres kullanılarak ölçümler yapıldı. HfO₂ ve PMMA'in yalıtkan olarak kullanılmak istendiği çalışmalarda her iki malzeme de istenen özelliklerde yalıtkan olarak elde edilemedi. Fused silika alttaş kalınlığı çok fazla olduğundan (~mm), literatürde mikrometre kalınlıklarda yalıtkanlar kullanılarak elde edilen olumlu sonuçlar, bu çalışmada elde edilemedi. Ancak yalıtkan olarak Apiezon N gresin kullanıldığı ve ±300 V uygulanarak yapılan çalışmada 150 K'de EB etkisinin değiştirilebildiği gözlemlendi.

Elektrik alan ile 150 K'de görülen etkinin ardından oda sıcaklığında da aynı etkiyi görebilmek için AF malzeme olarak IrMn kullanılarak çalışmalar yapıldı. Ancak IrMn kullanılarak yapılan çalışmalarda dik anizotropiye sahip örnekler elde edilemediğinden, elektrik alan altında ölçümler yapılmadı.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında çok fonksiyonlu transport sisteminin kurulumu başarılı bir şekilde yapılmış ve Co/Pt/CoO sistemlerinde EB etkisi elektrik alanla önemli ölçüde değiştirilmiştir. Aynı etkinin yüksek sıcaklıklarda da gözlenebilmesi için dik mıknatıslanmaya sahip IrMn/Pt/Co filmlerle ilgili sistematik çalışmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- [1] Nogues J., Schuller I. K., (1999), "Exchange bias", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 192, 203.
- [2] Baibich M. N., Broto J. M., Fert A., Nguyen 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.
- [3] Binasch G., Grunberg P., Saurenbach F., Zinn W., (1989), "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange", *Phys Rev B Condens Matter*, 39 (7), 4828-4830.
- [4] Daughton J. M., (1997), "Magnetic tunneling applied to memory", *Journal of Applied Physics*, 81 (8), 3758-3763.
- [5] Moodera J. S., Kinder L. R., Wong T. M., Meservey R., (1995), "Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions", *Physical Review Letters*, 74 (16), 3273-3276.
- [6] Parkin S. S. P., Roche K. P., Samant M. G., Rice P. M., Beyers R. B., Scheuerlein R. E., O'Sullivan E. J., Brown S. L., Bucchigano J., Abraham D. W., Lu Y., Rooks M., Trouilloud P. L., Wanner R. A., Gallagher W. J., (1999), "Exchange-biased magnetic tunnel junctions and application to nonvolatile magnetic random access memory (invited)", *Journal of Applied Physics*, 85 (8), 5828-5833.
- [7] Chiba D., Fukami S., Shimamura K., Ishiwata N., Kobayashi K., Ono T., (2011), "Electrical control of the ferromagnetic phase transition in cobalt at room temperature", *Nature Materials*, 10 (11), 853-856.
- [8] Endo M., Kanai S., Ikeda S., Matsukura F., Ohno H., (2010), "Electric-field effects on thickness dependent magnetic anisotropy of sputtered MgO/Co(40)Fe(40)B(20)/Ta structures", *Applied Physics Letters*, 96 (21).
- [9] Kiwi M., Mejia-Lopez J., Portugal R. D., Ramirez R., (2001), "Exchange bias theory: The role of interface structure and of domains in the ferromagnet", *Physics of Low Dimensional Systems*, 295-300.
- [10] Nogues J., Sort J., Langlais V., Skumryev V., Surinach S., Munoz J. S., Baro M. D., (2005), "Exchange bias in nanostructures", *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 422 (3), 65-117.
- [11] Radu F., Zabel H., (2008), "Magnetic Heterostructures; Advances and Perspectives in Spinstructures and Spintransport; Series", *Springer Tracts Modern Physics*, 227, 97.

- [12] Dietl T., Ohno H., Matsukura F., Cibert J., Ferrand D., (2000), "Zener model description of ferromagnetism in zinc-blende magnetic semiconductors", *Science*, 287 (5455), 1019-1022.
- [13] Chiba D., Sawicki M., Nishitani Y., Nakatani Y., Matsukura F., Ohno H., (2008), "Magnetization vector manipulation by electric fields", *Nature*, 455 (7212), 515-518.
- [14] Chiba D., Matsukura F., Ohno H., (2006), "Electric-field control of ferromagnetism in (Ga,Mn)As", *Applied Physics Letters*, 89 (16).
- [15] Chiba D., Yamanouchi M., Matsukura F., Ohno H., (2003), "Electrical manipulation of magnetization reversal in a ferromagnetic semiconductor", *Science*, 301 (5635), 943-945.
- [16] Novosad V., Otani Y., Ohsawa A., Kim S. G., Fukamichi K., Koike J., Maruyama K., Kitakami O., Shimada Y., (2000), "Novel magnetostrictive memory device", *Journal of Applied Physics*, 87 (9), 6400-6402.
- [17] Polisetty S., Echtenkamp W., Jones K., He X., Sahoo S., Binek C., (2010), "Piezoelectric tuning of exchange bias in a BaTiO₃/Co/CoO heterostructure", *Physical Review B*, 82 (13), 134419.
- [18] Goennenwein S. T. B., Althammer M., Bihler C., Brandlmaier A., Gepraegs S., Opel M., Schoch W., Limmer W., Gross R., Brandt M. S., (2008), "Piezo-voltage control of magnetization orientation in a ferromagnetic semiconductor", *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*, 2 (3), 96-98.
- [19] Moutis N., Suarez-Sandoval D., Niarchos D., (2008), "Voltage-induced modification in magnetic coercivity of patterned Co₅₀Fe₅₀ thin film on piezoelectric substrate", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320 (6), 1050-1055.
- [20] Ghidini M., Pellicelli R., Prieto J. L., Moya X., Soussi J., Briscoe J., Dunn S., Mathur N. D., (2013), "Non-volatile electrically-driven repeatable magnetization reversal with no applied magnetic field", *Nature Communications*, 4, 1453.
- [21] Overby M., Chernyshov A., Rokhinson L. P., Liu X., Furdyna J. K., (2008), "GaMnAs-based hybrid multiferroic memory device", *Applied Physics Letters*, 92 (19).
- [22] Chu Y.-H., Martin L. W., Holcomb M. B., Gajek M., Han S.-J., He Q., Balke N., Yang C.-H., Lee D., Hu W., Zhan Q., Yang P.-L., Fraile-Rodriguez A., Scholl A., Wang S. X., Ramesh R., (2008), "Electric-field control of local ferromagnetism using a magnetoelectric multiferroic", *Nature Materials*, 7 (6), 478-482.

- [23] 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.
- [24] Wu S. M., Cybart S. A., Yu P., Rossell M. D., Zhang J. X., Ramesh R., Dynes R. C., (2010), "Reversible electric control of exchange bias in a multiferroic field-effect device", *Nature Materials*, 9 (9), 756-761.
- [25] Echtenkamp W., Binek C., (2013), "Electric Control of Exchange Bias Training", *Physical Review Letters*, 111 (18), 187204.
- [26] He X., Wang Y., Wu N., Caruso A. N., Vescovo E., Belashchenko K. D., Dowben P. A., Binek C., (2010), "Robust isothermal electric control of exchange bias at room temperature", *Nature Materials*, 9 (7), 579-585.
- [27] Weisheit M., Fahler S., Marty A., Souche Y., Poinignon C., Givord D., (2007), "Electric field-induced modification of magnetism in thin-film ferromagnets", *Science*, 315 (5810), 349-351.
- [28] Maruyama T., Shiota Y., Nozaki T., Ohta K., Toda N., Mizuguchi M., Tulapurkar A. A., Shinjo T., Shiraishi M., Mizukami S., Ando Y., Suzuki Y., (2009), "Large voltage-induced magnetic anisotropy change in a few atomic layers of iron", *Nature Nanotechnology*, 4 (3), 158-161.
- [29] Ohta K., Maruyama T., Nozaki T., Shiraishi M., Shinjo T., Suzuki Y., Ha S. S., You C. Y., Van Roy W., (2009), "Voltage control of in-plane magnetic anisotropy in ultrathin Fe_n-GaAs(001) Schottky junctions", *Applied Physics Letters*, 94 (3), 032501.
- [30] Hibino Y., Koyama T., Obinata A., Miwa K., Ono S., Chiba D., (2015), "Electric field modulation of magnetic anisotropy in perpendicularly magnetized Pt/Co structure with a Pd top layer", *Applied Physics Express*, 8 (11), 113002.
- [31] Chiba D., Ono T., (2013), "Control of magnetism in Co by an electric field", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46 (21), 213001.
- [32] Ha S.-S., Kim N.-H., Lee S., You C.-Y., Shiota Y., Maruyama T., Nozaki T., Suzuki Y., (2010), "Voltage induced magnetic anisotropy change in ultrathin Fe₈₀Co₂₀/MgO junctions with Brillouin light scattering", *Applied Physics Letters*, 96 (14), 142512.
- [33] Yoichi S., Takuto M., Takayuki N., Teruya S., Masashi S., Yoshishige S., (2009), "Voltage-Assisted Magnetization Switching in Ultrathin Fe₈₀Co₂₀ Alloy Layers", *Applied Physics Express*, 2 (6), 063001.
- [34] Fowley C., Rode K., Oguz K., Kurt H., Coey J. M. D., (2011), "Electric field induced changes in the coercivity of a thin-film ferromagnet", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44 (30), 305001.

- [35] Obinata A., Hibino Y., Hayakawa D., Koyama T., Miwa K., Ono S., Chiba D., (2015), “Electric-field control of magnetic moment in Pd”, *Sci Rep*, 5, 14303.
- [36] Chiba D., (2015), “Electric field effect on magnetism in metallic ultra-thin films”, *Frontiers in Physics*, 3 (83), 1-6.
- [37] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1956), “New Magnetic Anisotropy”, *Physical Review*, 102 (5), 1413-1414.
- [38] Öztürk M., (2011), “Manyetik Malzemelerde Kaydırma (Exchange Bias) Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [39] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1957), “New Magnetic Anisotropy”, *Physical Review*, 105 (3), 904-913.
- [40] Hung T. Q., Terki F., Kamara S., Kim K., Charar S., Kim C., (2015), “Planar Hall ring sensor for ultra-low magnetic moment sensing”, *Journal of Applied Physics*, 117 (15), 154505.
- [41] Meiklejohn W. H., (1962), “Exchange Anisotropy—A Review”, *Journal of Applied Physics*, 33 (3), 1328-1335.
- [42] Malozemoff A. P., (1987), “Random-field model of exchange anisotropy at rough ferromagnetic-antiferromagnetic interfaces”, *Phys Rev B Condens Matter*, 35 (7), 3679-3682.
- [43] 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.
- [44] Koon N. C., (1997), “Calculations of Exchange Bias in Thin Films with Ferromagnetic/Antiferromagnetic Interfaces”, *Physical Review Letters*, 78 (25), 4865-4868.
- [45] Stiles M. D., McMichael R. D., (1999), “Model for exchange bias in polycrystalline ferromagnet-antiferromagnet bilayers”, *Physical Review B*, 59 (5), 3722-3733.
- [46] 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.
- [47] Ali M., Marrows C. H., Al-Jawad M., Hickey B. J., Misra A., Nowak U., Usadel K. D., (2003), “Antiferromagnetic layer thickness dependence of the IrMn/Co exchange-bias system”, *Physical Review B*, 68 (21).
- [48] Schulthess T. C., Butler W. H., (1998), “Consequences of Spin-Flop Coupling in Exchange Biased Films”, *Physical Review Letters*, 81 (20), 4516-4519.

- [49] Radu F., (2005), “Fundamental Aspects of Exchange Bias”, Phd. Thesis, Ruhr-Universität.
- [50] Öztürk M., Demirci E., Topkaya R., Kazan S., Akdoğan N., Obaida M., Westerholt K., (2011), “Effect of Exchange Bias on Magnetic Anisotropies in Fe/CoO Bilayers”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 1-7.
- [51] 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 (9), 093911.
- [52] Sort J., Baltz V., Garcia F., Rodmacq B., Dieny B., (2005), “Tailoring perpendicular exchange bias in [Pt/Co]-IrMn multilayers”, *Physical Review B*, 71 (5), 054411.
- [53] Nishimura N., Hirai T., Koganei A., Ikeda T., Okano K., Sekiguchi Y., Osada Y., (2002), “Magnetic tunnel junction device with perpendicular magnetization films for high-density magnetic random access memory”, *Journal of Applied Physics*, 91 (8), 5246-5249.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Maat S., Takano K., Parkin S. S. P., Fullerton E. E., (2001), “Perpendicular Exchange Bias of Co/Pt Multilayers”, *Physical Review Letters*, 87 (8), 087202.
- [57] Sort J., Dieny B., Fraune M., Koenig C., Lunnebach F., Beschoten B., Güntherodt G., (2004), “Perpendicular exchange bias in antiferromagnetic-ferromagnetic nanostructures”, *Applied Physics Letters*, 84 (18), 3696-3698.
- [58] Wang D.-s., Wu R., Freeman A. J., (1993), “State-tracking first-principles determination of magnetocrystalline anisotropy”, *Physical Review Letters*, 70 (6), 869-872.
- [59] Gay J. G., Richter R., (1986), “Spin Anisotropy of Ferromagnetic Films”, *Physical Review Letters*, 56 (25), 2728-2731.
- [60] Wang D.-s., Wu R., Freeman A. J., (1994), “Magnetocrystalline anisotropy of interfaces: first-principles theory for Co-Cu interface and interpretation by an effective ligand interaction model”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 129 (2), 237-258.

- [61] Nakajima N., Koide T., Shidara T., Miyauchi H., Fukutani I., Fujimori A., Iio K., Katayama T., Nyvlt M., Suzuki Y., (1998), "Perpendicular magnetic anisotropy caused by interfacial hybridization via enhanced orbital moment in Co/Pt multilayers: Magnetic circular x-ray dichroism study", *Physical Review Letters*, 81 (23), 5229-5232.
- [62] Bertero G. A., Sinclair R., Park C. H., Shen Z. X., (1995), "Interface structure and perpendicular magnetic anisotropy in Pt/Co multilayers", *Journal of Applied Physics*, 77 (8), 3953-3959.
- [63] Kim J. H., Shin S. C., (1996), "Interface roughness effects on the surface anisotropy in Co/Pt multilayer films", *Journal of Applied Physics*, 80 (5), 3121-3123.
- [64] Zhang B., Krishnan K. M., Lee C. H., Farrow R. F. C., (1993), "Magnetic anisotropy and lattice strain in Co/Pt multilayers", *Journal of Applied Physics*, 73 (10), 6198-6200.
- [65] Carcia P. F., (1988), "Perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co and Pt/Co thin-film layered structures", *Journal of Applied Physics*, 63 (10), 5066-5073.
- [66] Carcia P. F., Meinhaldt A. D., Suna A., (1985), "Perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co thin film layered structures", *Applied Physics Letters*, 47 (2), 178-180.
- [67] Draaisma H. J. G., de Jonge W. J. M., (1987), "Magnetization curves of Pd/Co multilayers with perpendicular anisotropy", *Journal of Applied Physics*, 62 (8), 3318-3322.
- [68] Yoon S., Kwon J., Cho B. K., (2014), "Sign change of exchange bias in [Pt/Co]₃/IrMn multilayer", *Journal of Applied Physics*, 115 (17), 17D720.
- [69] Vinai G., Moritz J., Bandiera S., Prejbeanu I. L., Dieny B., (2013), "Enhanced blocking temperature in (Pt/Co)₃/IrMn/Co and (Pd/Co)₃/IrMn/Co trilayers with ultrathin IrMn layer", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46 (32), 322001.
- [70] Bandiera S., Sousa R. C., Rodmacq B., Dieny B., (2012), "Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy through reduction of Co-Pt interdiffusion in (Co/Pt) multilayers", *Applied Physics Letters*, 100 (14), 142410.
- [71] Castro G. M. B., Nagamine L. C. C. M., Geshev J., Saitovich E. B., Schmidt J. E., (2011), "Perpendicular exchange bias in IrMn/Pt/[Co/Pt]₃ multilayers with cone magnetization", *Thin Solid Films*, 519 (19), 6591-6594.
- [72] Liu Y. F., Cai J. W., He S. L., (2009), "Large perpendicular exchange bias in IrMn/CoFe/[Pt/Co] multilayers grown on a Ta/Pt buffer layer", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42 (11), 115002.

- [73] Lechevallier L., Zarefy A., Lardé R., Chiron H., Le Breton J. M., Baltz V., Rodmacq B., Dieny B., (2009), “Structural analysis and magnetic properties of $(\text{Pt}/\text{Co})_3/\text{Pt}_{(\text{Pt})}/\text{IrMn}$ multilayers”, *Physical Review B*, 79 (17), 174434.
- [74] Lin K. W., Guo J. Y., Kahwaji S., Chang S. C., Ouyang H., van Lierop J., Phuoc N. N., Suzuki T., (2007), “In-plane and perpendicular exchange bias in $[\text{Pt}/\text{Co}]/\text{NiO}$ multilayers”, *physica status solidi (a)*, 204 (12), 3970-3974.
- [75] Kim S. S., Hwang J. Y., Rhee J. R., (2007), “Characteristics of perpendicular exchange bias in $[\text{Pt}/\text{Co}]-\text{IrMn}$ multilayers”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 310 (2, Part 3), 2310-2312.
- [76] Czapkiewicz M., Stobiecki T., Rak R., Zoladz M., van Dijken S., (2007), “Exchange bias energy in $\text{Co}/\text{Pt}/\text{IrMn}$ multilayers with perpendicular and in-plane anisotropy”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 316 (2), 151-154.
- [77] Zhonghai Z., Yang I., Jiao T., Baohe L., Guanghua Y., Fengwu Z., (2007), “Perpendicular exchange bias of $(\text{Pt}/\text{Co})_n/\text{FeMn}$ multilayers”, *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 14 (6), 543-546.
- [78] Nogués J., Lederman D., Moran T. J., Schuller I. K., (1996), “Positive Exchange Bias in FeF_2 -Fe Bilayers”, *Physical Review Letters*, 76 (24), 4624-4627.
- [79] Morales R., Basaran A. C., Villegas J. E., Navas D., Soriano N., Mora B., Redondo C., Batlle X., Schuller I. K., (2015), “Exchange-Bias Phenomenon: The Role of the Ferromagnetic Spin Structure”, *Physical Review Letters*, 114 (9), 097202.
- [80] Morales R., Kovylyina M., Schuller I. K., Labarta A., Batlle X., (2014), “Antiferromagnetic/ferromagnetic nanostructures for multidigit storage units”, *Applied Physics Letters*, 104 (3), 032401.
- [81] Roshchin I. V., Petravic O., Morales R., Li Z. P., Batlle X., Schuller I. K., (2005), “Lateral length scales in exchange bias”, *Europhysics Letters (EPL)*, 71 (2), 297-303.
- [82] Phuoc N. N., Phu Thuy N., Anh Tuan N., Thanh Hung L., Trung Thanh N., Thanh Nam N., (2006), “Coexistence of positive and negative exchange bias in CrMn/Co bilayers”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 298 (1), 43-47.
- [83] Kirk T. L., Hellwig O., Fullerton E. E., (2002), “Coercivity mechanisms in positive exchange-biased Co films and Co/Pt multilayers”, *Physical Review B*, 65 (22), 224426.

- [84] 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.
- [85] Gredig T., Krivorotov I. N., Eames P., Dahlberg E. D., (2002), "Unidirectional coercivity enhancement in exchange-biased Co/CoO", *Applied Physics Letters*, 81 (7), 1270.
- [86] Berger L., (1996), "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current", *Physical Review B*, 54 (13), 9353-9358.
- [87] Slonczewski J. C., (1996), "Current-driven excitation of magnetic multilayers", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 159 (1-2), L1-L7.
- [88] Ostler T. A., Barker J., Evans R. F. L., Chantrell R. W., Atxitia U., Chubykalo-Fesenko O., El Moussaoui S., Le Guyader L., Mengotti E., Heyderman L. J., Nolting F., Tsukamoto A., Itoh A., Afanasiev D., Ivanov B. A., Kalashnikova A. M., Vahaplar K., Mentink J., Kirilyuk A., Rasing T., Kimel A. V., (2012), "Ultrafast heating as a sufficient stimulus for magnetization reversal in a ferrimagnet", *Nature Communications*, 3, 666.
- [89] Ohno H., Chiba D., Matsukura F., Omiya T., Abe E., Dietl T., Ohno Y., Ohtani K., (2000), "Electric-field control of ferromagnetism", *Nature*, 408 (6815), 944-946.
- [90] Borisov P., Hochstrat A., Chen X., Kleemann W., Binek C., (2005), "Magnetoelectric switching of exchange bias", *Physical Review Letters*, 94 (11), 117203.
- [91] Chen X., Hochstrat A., Borisov P., Kleemann W., (2006), "Magnetoelectric exchange bias systems in spintronics", *Applied Physics Letters*, 89 (20), 202508.
- [92] Halpern A., Erlbach E., (1998), "Schaum's Outline of Beginning Physics II: Electricity and Magnetism, Optics, Modern Physics", 1st Edition, McGraw-Hill Education.
- [93] Kittel C., (2004), "Introduction to solid state physics", 8th Edition, Wiley.
- [94] Ashby N., Miller S. C., (1970), "Principles of Modern Physics", 1st Edition, Holden-Day.
- [95] Web, (2007), "The Nobel Prize in Physics 2007", Nobel Media AB, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/index.html, (Erişim Tarihi: 28/03/2016).
- [96] Coey J. M. D., (2010), "Magnetism and Magnetic Materials", 1st Edition, Cambridge University Press.

- [97] Cullity B. D., Graham C. D., (2011), "Introduction to Magnetic Materials", 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- [98] Spaldin N. A., (2010), "Magnetic Materials", 1st Edition, Cambridge University Press.
- [99] Thomson W., (1856), "On the Electro-Dynamic Qualities of Metals:--Effects of Magnetization on the Electric Conductivity of Nickel and of Iron", Proceedings of the Royal Society of London, 8, 546-550.
- [100] Hall E. H., (1879), "On a New Action of the Magnet on Electric Currents", American Journal of Mathematics, 2 (3), 287-292.
- [101] Ralph D. C., Stiles M. D., (2008), "Spin transfer torques", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320 (7), 1190-1216.
- [102] Chien C. L., (1995), "Magnetism and Giant Magneto-Transport Properties in Granular Solids", Annual Review of Materials Science, 25 (1), 129-160.
- [103] Haan S. d., Lodder C., J.A. Popma T., (1991), "The (Anomalous) Hall Magnetometer as an Analysis Tool For High Density Recording Media", Journal of the Magnetism Society of Japan, 15 (S_2_PMRC_91), S2_349-354.
- [104] Nagaosa N., Sinova J., Onoda S., MacDonald A. H., Ong N. P., (2010), "Anomalous Hall effect", Reviews of Modern Physics, 82 (2), 1539-1592.
- [105] van den Berg H. A. M., Hartmann U., Coehoorn R., Gijs M. A. M., Grünberg P., Rasing T., Röhl K., (2013), "Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance: Fundamentals and Industrial Applications", 1st Edition, Springer Berlin Heidelberg.
- [106] Kondo J., (1962), "Anomalous Hall Effect and Magnetoresistance of Ferromagnetic Metals", Progress of Theoretical Physics, 27 (4), 772-792.
- [107] Piraux L., Dubois S., Ferain E., Legras R., Ounadjela K., George J. M., Maurice J. L., Fert A., (1997), "Anisotropic transport and magnetic properties of arrays of sub-micron wires", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 165 (1-3), 352-355.
- [108] Lee J.-S., Yoon J., Kang M.-B., You C.-Y., (2014), "Low coercivity giant magnetoresistance with perpendicular magnetic anisotropy", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 358-359, 159-162.
- [109] Prinz G. A., (1998), "Magnetoelectronics", Science, 282 (5394), 1660-1663.
- [110] Ikeda S., Hayakawa J., Ashizawa Y., Lee Y. M., Miura K., Hasegawa H., Tsunoda M., Matsukura F., Ohno H., (2008), "Tunnel magnetoresistance of 604% at 300K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature", Applied Physics Letters, 93 (8), 082508.

- [111] Miyazaki T., Tezuka N., (1995), "Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 139 (3), L231-L234.
- [112] Julliere M., (1975), "Tunneling between ferromagnetic films", *Physics Letters A*, 54 (3), 225-226.
- [113] Web, (2008), Thurber W. R., "Hall Effect Measurements", The National Institute of Standards and Technology (NIST), <http://www.nist.gov/pml/div683/hall.cfm>, (Erişim Tarihi: 13/04/2016).
- [114] Akdogan N., Nefedov A., Zabel H., Westerholt K., Becker H. W., Somsen C., Gok A., Bashir A., Khaibullin R., Tagirov L., (2009), "High-temperature ferromagnetism in Co-implanted TiO₂ rutile", *Journal of Physics D-Applied Physics*, 42 (11), 115005.
- [115] Hall E. H., (1881), "On the "Rotational Coefficient" in nickel and cobalt", *Philosophical Magazine Series 5*, 12 (74), 157-172.
- [116] Moutaigne F., Schuhl A., Van Dau F. N., Encinas A., (2000), "Development of magnetoresistive sensors based on planar Hall effect for applications to microcompass", *Sensors and Actuators A: Physical*, 81 (1-3), 324-327.
- [117] Hung T. Q., Kim D. Y., Rao B. P., Kim C. (2013), "Novel Planar Hall Sensor for Biomedical Diagnosing Lab-on-a-Chip". In: T. Rincken, Editor, "State of the Art in Biosensors - General Aspects", InTech.
- [118] Ejsing L., Hansen M. F., Menon A. K., Ferreira H. A., Graham D. L., Freitas P. P., (2005), "Magnetic micro-bead detection using the planar hall effect", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 293 (1), 677-684.
- [119] Schulz T., Ritz R., Bauer A., Halder M., Wagner M., Franz C., Pflleiderer C., Everschor K., Garst M., Rosch A., (2012), "Emergent electrodynamic of skyrmions in a chiral magnet", *Nature Physics*, 8 (4), 301-304.
- [120] Yu X. Z., Kanazawa N., Zhang W. Z., Nagai T., Hara T., Kimoto K., Matsui Y., Onose Y., Tokura Y., (2012), "Skyrmion flow near room temperature in an ultralow current density", *Nature Communications*, 3, 988.
- [121] Kim H., Huse D. A., (2012), "Heat and spin transport in a cold atomic Fermi gas", *Physical Review A*, 86 (5), 053607.
- [122] Uchida K., Takahashi S., Harii K., Ieda J., Koshibae W., Ando K., Maekawa S., Saitoh E., (2008), "Observation of the spin Seebeck effect", *Nature*, 455 (7214), 778-781.

- [123] Meier D., Reinhardt D., van Straaten M., Klewe C., Althammer M., Schreier M., Goennenwein S. T. B., Gupta A., Schmid M., Back C. H., Schmalhorst J.-M., Kuschel T., Reiss G., (2015), “Longitudinal spin Seebeck effect contribution in transverse spin Seebeck effect experiments in Pt/YIG and Pt/NFO”, *Nature Communications*, 6 (8211), 1-7.
- [124] Flipse J., Bakker F. L., Slachter A., Dejene F. K., van Wees B. J., (2012), “Direct observation of the spin-dependent Peltier effect”, *Nature Nanotechnology*, 7 (3), 166-168.
- [125] Hirsch J. E., (1999), “Spin Hall Effect”, *Physical Review Letters*, 83 (9), 1834-1837.
- [126] Okamoto N., Kurebayashi H., Trypiniotis T., Farrer I., Ritchie D. A., Saitoh E., Sinova J., Mašek J., Jungwirth T., Barnes C. H. W., (2014), “Electric control of the spin Hall effect by intervalley transitions”, *Nature Materials*, 13 (10), 932-937.
- [127] Hampel C. A., (1968), “The Encyclopedia of the Chemical Elements“, 1st Edition, New York: Van Nostrand Reinhold.
- [128] Swartz M. S., (2015), “Temperature Measurement and Control Catalog”, Lake Shore Cryotronics, Inc., Westerville, OH 43082.
- [129] van der Pauw L. J., (1958), “A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape”, *Philips Research Reports*, 13, 1-9.
- [130] Demirci E., Öztürk 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*, 591, 72-75.
- [131] 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.
- [132] Akdoğan N., (2004), “İnce Filmlerde Manyeto-Optik Ölçümler”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [133] 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.
- [134] Akmaldinov K., Auffret S., Joumard I., Dieny B., Baltz V., (2013), “Benefit of inserting a (Cu/Pt) intermixing dual barrier for the blocking temperature distribution of exchange biased Co/(Cu/Pt)/IrMn stacks”, *Applied Physics Letters*, 103 (4), 042415.
- [135] Ali M., Marrows C. H., Hickey B. J., (2008), “Controlled enhancement or suppression of exchange biasing using impurity δ layers”, *Physical Review B*, 77 (13), 134401.

- [136] Castro G. M. B., Geshev J., Schmidt J. E., Saitovich E. B., Nagamine L. C. C. M., (2009), "Cone magnetization state and exchange bias in IrMn/Cu/[Co/Pt]₃ multilayers", *Journal of Applied Physics*, 106 (11), 113922-113924.
- [137] Nozaki T., Oida M., Ashida T., Shimomura N., Shibata T., Sahashi M., (2014), "Positive exchange bias observed in Pt-inserted Cr₂O₃/Co exchange coupled bilayers", *Applied Physics Letters*, 105 (21), 212406.
- [138] Garcia F., Casali G., Auffret S., Rodmacq B., Dieny B., (2002), "Exchange bias in (Pt/Co_{0.9}Fe_{0.1})_n/FeMn multilayers with perpendicular magnetic anisotropy", *Journal of Applied Physics*, 91 (10), 6905-6907.
- [139] Gökemeijer N. J., Ambrose T., Chien C. L., (1997), "Long-Range Exchange Bias across a Spacer Layer", *Physical Review Letters*, 79 (21), 4270-4273.
- [140] Mewes T., Roos B. F. P., Demokritov S. O., Hillebrands B., (2000), "Oscillatory exchange bias effect in FeNi/Cu/FeMn and FeNi/Cr/FeMn trilayer systems", *Journal of Applied Physics*, 87 (9), 5064-5066.
- [141] Grunberg P., (2001), "Layered magnetic structures: history, facts and figures", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 226, 1688-1693.
- [142] Tsunoda M., Yoshitaki S., Ashizawa Y., Kim D. Y., Mitsumata C., Takahashi M., (2007), "Enhancement of exchange bias by ultra-thin Mn layer insertion at the interface of Mn-Ir/Co-Fe bilayers", *physica status solidi (b)*, 244 (12), 4470-4473.
- [143] Ernult F., Dieny B., Billard L., Lançon F., Regnard J. R., (2003), "Increase in ferromagnetic/antiferromagnetic exchange bias due to a reduction of the interfacial exchange interaction", *Journal of Applied Physics*, 94 (10), 6678-6682.
- [144] Reith T., Shaw J. M., Falco C. M., (2006), "Effect of very thin Cr films on the magnetic behavior of epitaxial Co", *Journal of Applied Physics*, 99 (8), 08N506.
- [145] Yanson Y., Petravic O., Westerholt K., Zabel H., (2008), "Tuning the exchange bias by using Cr interfacial dusting layers", *Physical Review B*, 78 (20), 205430.
- [146] Garcia F., Sort J., Rodmacq B., Auffret S., Dieny B., (2003), "Large anomalous enhancement of perpendicular exchange bias by introduction of a nonmagnetic spacer between the ferromagnetic and antiferromagnetic layers", *Applied Physics Letters*, 83 (17), 3537-3539.
- [147] Mukherjee T., Sahoo S., Skomski R., Sellmyer D. J., Binek C., (2009), "Magnetocaloric properties of Co/Cr superlattices", *Physical Review B*, 79 (14), 144406.

- [148] Menéndez E., Dias T., Geshev J., Lopez-Barbera J. F., Nogués J., Steitz R., Kirby B. J., Borchers J. A., Pereira L. M. C., Vantomme A., Temst K., (2014), “Interdependence between training and magnetization reversal in granular Co-CoO exchange bias systems”, *Physical Review B*, 89 (14), 144407.
- [149] Suszka A. K., Idigoras O., Nikulina E., Chuvilin A., Berger A., (2012), “Crystallography-Driven Positive Exchange Bias in Co/CoO Bilayers”, *Physical Review Letters*, 109 (17), 177205.
- [150] Nogués J., Stepanow S., Bollero A., Sort J., Dieny B., Nolting F., Gambardella P., (2009), “Simultaneous in-plane and out-of-plane exchange bias using a single antiferromagnetic layer resolved by x-ray magnetic circular dichroism”, *Applied Physics Letters*, 95 (15), 152515.
- [151] Gong W. J., Liu W., Liu X. H., Guo S., Feng J. N., Li B., Zhang Z. D., (2011), “Tuning exchange bias in ferromagnetic/ferromagnetic/antiferromagnetic heterostructures [Pt/Co]/NiFe/NiO with in-plane and out-of-plane easy axes”, *Journal of Applied Physics*, 109 (4), 043906-043906-043904.
- [152] Phuoc N. N., Suzuki T., (2008), “In-Plane and Out-of-Plane Exchange Biases in Epitaxial FePt-FeMn Multilayers With Different Crystalline Orientations”, *Ieee Transactions on Magnetics*, 44 (11), 2828-2831.
- [153] Xing H., Keshoju K., Zhou S. M., Sun L., (2007), “Field cooling induced perpendicular exchange bias in FeMn(FeNiFeMn)_n multilayers”, *Journal of Applied Physics*, 101 (9), 09E509.
- [154] Lin K.-W., Guo J.-Y., (2008), “Tuning in-plane and out-of-plane exchange biases in Ni₈₀Fe₂₀/Cr-oxide bilayers”, *Journal of Applied Physics*, 104 (12), 123913.
- [155] Carson G. A., Nassir M. H., Langell M. A., (1996), “Epitaxial growth of Co₃O₄ on CoO(100)”, *Journal of Vacuum Science & Technology a-Vacuum Surfaces and Films*, 14 (3), 1637-1642.
- [156] Aktaş B., Heinrich B., Woltersdorf G., Urban R., Tagirov L. R., Yıldız F., Özdoğan K., Özdemir M., Yalçın O., Rameev B. Z., (2007), “Magnetic anisotropies in ultrathin iron films grown on the surface-reconstructed GaAs substrate”, *Journal of Applied Physics*, 102 (1), 013912.
- [157] Roth W. L., (1958), “Magnetic Structures of MnO, FeO, CoO, and NiO”, *Physical Review*, 110 (6), 1333-1341.
- [158] Dobrynin A. N., Bael M. J. V., Temst K., Lievens P., (2007), “Evidence for coexistence of exchange bias and exchange spring effects in oxidized Co nanocluster assembled films”, *New Journal of Physics*, 9 (8), 258.
- [159] Chen J. Y., Thiyagarajah N., Xu H. J., Coey J. M. D., (2014), “Perpendicular exchange bias effect in sputter-deposited CoFe/IrMn bilayers”, *Applied Physics Letters*, 104 (15), 152405.

- [160] Lin J., Shi Z., Zhou S.-M., Zhang X., Xia Y.-J., (2009), “Exchange Bias in NiCo/FeMn Bilayers with Stripe Domains”, *Chinese Physics Letters*, 26 (10), 107501.
- [161] Chien C. L., Gornakov V. S., Nikitenko V. I., Shapiro A. J., Shull R. D., (2003), “Hybrid domain walls and antiferromagnetic domains in exchange-coupled ferromagnet/antiferromagnet bilayers”, *Physical Review B*, 68 (1), 014418.
- [162] Bersch E., Rangan S., Bartynski R. A., Garfunkel E., Vescovo E., (2008), “Band offsets of ultrathin high- κ oxide films with Si”, *Physical Review B*, 78 (8), 085114.
- [163] Choi J. H., Mao Y., Chang J. P., (2011), “Development of hafnium based high- κ materials—A review”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 72 (6), 97-136.
- [164] Wilk G. D., Wallace R. M., Anthony J. M., (2001), “High- κ gate dielectrics: Current status and materials properties considerations”, *Journal of Applied Physics*, 89 (10), 5243-5275.
- [165] He G., Liu M., Zhu L. Q., Chang M., Fang Q., Zhang L. D., (2005), “Effect of postdeposition annealing on the thermal stability and structural characteristics of sputtered HfO₂ films on Si (100)”, *Surface Science*, 576 (1-3), 67-75.
- [166] Yan Z. J., Xu R., Wang Y. Y., Chen S., Fan Y. L., Jiang Z. M., (2004), “Thin HfO₂ films grown on Si(100) by atomic oxygen assisted molecular beam epitaxy”, *Applied Physics Letters*, 85 (1), 85-87.
- [167] Wang H., Wang Y., Feng J., Ye C., Wang B. Y., Wang H. B., Li Q., Jiang Y., Huang A. P., Xiao Z. S., (2008), “Structure and electrical properties of HfO₂ high- κ films prepared by pulsed laser deposition on Si (100)”, *Applied Physics A*, 93 (3), 681-684.
- [168] Wang Z. J., Kumagai T., Kokawa H., Tsuaur J., Ichiki M., Maeda R., (2005), “Crystalline phases, microstructures and electrical properties of hafnium oxide films deposited by sol-gel method”, *Journal of Crystal Growth*, 281 (2-4), 452-457.
- [169] Kim M.-S., Ko Y.-D., Yun M., Hong J.-H., Jeong M.-C., Myoung J.-M., Yun I., (2005), “Characterization and process effects of HfO₂ thin films grown by metal-organic molecular beam epitaxy”, *Materials Science and Engineering: B*, 123 (1), 20-30.
- [170] Ono S., Häusermann R., Chiba D., Shimamura K., Ono T., Batlogg B., (2014), “High performance organic field-effect transistors with ultra-thin HfO₂ gate insulator deposited directly onto the organic semiconductor”, *Applied Physics Letters*, 104 (1), 013307.

- [171] Niinistö J., Putkonen M., Niinistö L., Stoll S. L., Kukli K., Sajavaara T., Ritala M., Leskelä M., (2005), "Controlled growth of HfO₂ thin films by atomic layer deposition from cyclopentadienyl-type precursor and water", *Journal of Materials Chemistry*, 15 (23), 2271.
- [172] Miikkulainen V., Leskelä M., Ritala M., Puurunen R. L., (2013), "Crystallinity of inorganic films grown by atomic layer deposition: Overview and general trends", *Journal of Applied Physics*, 113 (2), 021301.
- [173] Toledano-Luque M., San Andrés E., Olea J., del Prado A., Mártil I., Bohne W., Röhrich J., Strub E., (2006), "Hafnium oxide thin films deposited by high pressure reactive sputtering in atmosphere formed with different Ar/O₂ ratios", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 9 (6), 1020-1024.
- [174] Toledano-Luque M., San Andrés E., del Prado A., Mártil I., Lucía M. L., González-Díaz G., Martínez F. L., Bohne W., Röhrich J., Strub E., (2007), "High-pressure reactively sputtered HfO₂: Composition, morphology, and optical properties", *Journal of Applied Physics*, 102 (4), 044106.
- [175] Dueñas S., Castán H., García H., Gómez A., Bailón L., Toledano-Luque M., Mártil I., González-Díaz G., (2007), "Electrical properties of high-pressure reactive sputtered thin hafnium oxide high-k gate dielectrics", *Semiconductor Science and Technology*, 22 (12), 1344-1351.
- [176] Pereira L., Marques A., Águas H., Nedev N., Georgiev S., Fortunato E., Martins R., (2004), "Performances of hafnium oxide produced by radio frequency sputtering for gate dielectric application", *Materials Science and Engineering: B*, 109 (1-3), 89-93.
- [177] Shang L., Liu M., Tu D., Liu G., Liu X., Ji Z., (2009), "Low-Voltage Organic Field-Effect Transistor With PMMA/ZrO₂ Bilayer Dielectric", *Ieee Transactions on Electron Devices*, 56 (3), 370-376.
- [178] Deman A. L., Tardy J., (2005), "PMMA-Ta₂O₅ bilayer gate dielectric for low operating voltage organic FETs", *Organic Electronics*, 6 (2), 78-84.
- [179] Yuasa S., Nagahama T., Fukushima A., Suzuki Y., Ando K., (2004), "Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions", *Nature Materials*, 3 (12), 868-871.
- [180] Web, (2016), "Vacuum Grease Properties", Apiezon M&I Materials Ltd. , <http://www.apiezon.com/products/vacuum-greases/vacuum-greases-properties-table>, (Erişim Tarihi: 15/04/2016).
- [181] Kohn A., Kovács A., Fan R., McIntyre G. J., Ward R. C. C., Goff J. P., (2013), "The antiferromagnetic structures of IrMn₃ and their influence on exchange-bias", *Sci Rep*, 3, 2412.

- [182] Aley N. P., O'Grady K., (2011), "Compositional dependence of antiferromagnetic anisotropy in IrMn/CoFe exchange bias systems", *Journal of Applied Physics*, 109 (Article), -.
- [183] Tsunoda M., Imakita K.-i., Naka M., Takahashi M., (2006), "L12 phase formation and giant exchange anisotropy in Mn₃Ir/Co-Fe bilayers", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304 (1), 55-59.
- [184] van Dijken S., Besnier M., Moritz J., Coey J. M. D., (2005), "IrMn as exchange-biasing material in systems with perpendicular magnetic anisotropy", *Journal of Applied Physics*, 97 (10), 10K114.
- [185] Tsai C. Y., Hsu J.-H., Lin K. F., (2015), "Perpendicular exchange bias behaviors of CoPt/IrMn and CoPt/FeMn bilayers: A comparative study", *Journal of Applied Physics*, 117 (17), 17D153.
- [186] Sort J., Garcia F., Rodmacq B., Auffret S., Dieny B., (2004), "Enhancement of exchange bias through a non-magnetic spacer", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 272-276, Part 1, 355-356.
- [187] Romanens F., Pizzini S., Yokaichiya F., Bonfim M., Pennec Y., Camarero J., Vogel J., Sort J., Garcia F., Rodmacq B., Dieny B., (2005), "Magnetic relaxation of exchange biased PtCo multilayers studied by time-resolved Kerr microscopy", *Physical Review B*, 72 (13), 134410.
- [188] Malinowski G., Albrecht M., Guhr I. L., Coey J. M. D., van Dijken S., (2007), "Size-dependent scaling of perpendicular exchange bias in magnetic nanostructures", *Physical Review B*, 75 (1), 012413.
- [189] Tsai C. Y., Hsu J.-H., Saravanan P., Lin K. F., (2014), "Study on the occurrence of spontaneously established perpendicular exchange bias in Co₄₉Pt₅₁/IrMn bilayers", *Journal of Applied Physics*, 115 (17), 17D726.
- [190] Sort J., Dieny B., Nogués J., (2005), "Exchange bias in antiferromagnetic-ferromagnetic-antiferromagnetic structures with out-of-plane magnetization", *Physical Review B*, 72 (10), 104412.
- [191] Keithley, (2009), "Model 2002 Multimeter User's Manual", 2002-900-01 Rev. E / February 2009, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, Ohio, U.S.A.
- [192] Keithley, (2008), "Model 6221 AC and DC Current Source Reference Manual", 622x-901-01 Rev. C / October 2008, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, Ohio, U.S.A.
- [193] Keithley, (2004), "Model 2182/2182A Nanovoltmeter User's Manual", 2182A-900-01 Rev. A / June 2004, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, Ohio, U.S.A.
- [194] Keithley, (2009), "Model 6517B Electrometer Reference Manual", 6517B-901-01 Rev. B / June 2009, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, Ohio, U.S.A.

- [195] Maloof E., (2009), “Model 331 Temperature Controller User’s Manual”, P/N 119-031 Revision: 1.9, Lake Shore Cryotronics, Inc., Westerville, Ohio 43082-8888 USA.
- [196] QD, (1996), “Physical Property Measurement System GPIB Commands Manual”, Quantum Design, San Diego, CA, U.S.A.



ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Öztürk 1980 yılında Kütahya'da doğdu. 2003 yılında Boğaziçi Üniversitesi'nde Fizik Öğretmenliği bölümünde tezsiz yüksek lisans ile birleştirilmiş lisans eğitimini tamamladı. Bir süre Fizik öğretmenliği yaptıktan sonra, 2010 yılında Gebze Teknik Üniversitesi'nde Fizik Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2011 yılında Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini başarı ile tamamlayarak aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. Yüksek lisans ve doktora süresince nanomanyetik ince filmler, nanoparçacıklar, spin elektronığı, manyetik bilgi depolama teknolojileri, manyetik sensörler ve biyosensörler konularında çalıştı.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2016), Coexistence of perpendicular and in-plane exchange bias using a single ferromagnetic layer in Pt/Co/Cr/CoO thin film, *Europhysics Letters*, 114, 17008.

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, *J. Magn. Magn. Mater.*, 373, 120–123.

Yağmur A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2013), Exchange bias properties of Pt/Co/X/CoO/Pt multilayers (X=Pt, Cr), *NanoTR9*, 24 – 28 June 2013, Atatürk University, Erzurum, Turkey.

Yağmur A., Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2013), Manipulation of exchange bias in Pt/Co/M/CoO/Pt multilayers (M=Pt, Cr), *International Conference on Nanoscale Magnetism (ICNM-2013)*, September 2 – 6, 2013, İstanbul, Turkey.

Akdoğan N., Öztürk M., Yağmur A., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., (2014), Perpendicular exchange bias in magnetic multilayers, *Yoğun Madde Fiziği (YMF) - İzmir Toplantısı*, 11 April 2014, İzmir, Turkey.

Öztürk M., Yağmur A., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2014), Interface induced manipulation of perpendicular exchange bias in Co/CoO thin films, *ICSM2014*, 27 April - 02 May 2014, Antalya, Turkey.

Öztürk M., Yağmur A., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2014), Interface effects in exchange biased Co/(Pt,Cr)/CoO thin films, *NanoTR10*, 17 – 21 June 2014, Yeditepe University, İstanbul, Turkey.

Öztürk M., Yağmur A., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2014), Tuning Exchange Bias in Pt/Co/(Pt,Cr)/CoO Thin Films, *11th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies (NN14)*, 8-11 July 2014, Thessaloniki, Greece.

Akdoğan N., Yağmur A., Öztürk M., Demirci E., Öztürk O., Erkovan M., (2014), Interface induced manipulation of perpendicular exchange bias in Pt/Co/(Pt,Cr)/CoO thin films, *11th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies (NN14)*, 8-11 July 2014, Thessaloniki, Greece.

Öztürk M., Yağmur A., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2014), Structural and magnetic properties of exchange biased Co/(Pt,Cr)/CoO thin films, *12th SESAME Users' Meeting*, November 26-27, 2014, Amman, Jordan.

Öztürk M., Yağmur A., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2015), Pt/Co/Cr/CoO Çok Katlı İnce Filminde Çift Geometrilili Exchange Bias Etkisi, Adım Fizik Günleri IV, 28-29 Mayıs 2015, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Turkey.

Öztürk M., Yağmur A., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2015), Double exchange bias effect in Pt/Co/Cr/CoO thin film, 11th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-11), 22-25 June 2015, ODTU, Ankara, Turkey.

Demirci E., Öztürk M., Öcal M. T., Öztürk O., Akdoğan N., (2016), Extraordinary temperature dependence of PEB in ultra-thin Co (6Å)/Pt (8Å)/Cr₂O₃ (0006) layered structure, 12th International Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-12), 03-05 June 2016, Gebze, Turkey.

Öztürk M., Demirci E., Erkovan M., Öztürk O., Akdoğan N., (2016), Simultaneous observation of perpendicular and in-plane exchange bias in Pt/Co/Cr/CoO thin film, 12th International Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-12), 03-05 June 2016, Gebze, Turkey.

Ek B: Transport Ölçüm Sisteminin Kontrol Yazılımına İlişkin Detaylar

Bölüm 3'te kullanım detayları anlatılan transport ölçüm sisteminde “Keithley 2002 Multimeter”, “Keithley Model 6221 AC and DC Current Source”, “Keithley 2182A Nanovoltmeter”, “Keithley 6517B Electrometer/High Resistance Meter”, “Lakeshore-331 Temperature Controller” ve “Physical Property Measurement System (QD PPMS9T)” cihazları kullanılmaktadır. Bu cihazların kontrolü ise *NI Labview* grafiksel programlama dili ile hazırlanan bir yazılım ile yapılmaktadır. Bu bölümde bu cihazların her birinin ayrı ayrı kontrolüne ait temel bilgisayar kodları anlatılacaktır. Ayrıca bu ve benzeri ölçüm sistemlerini kullanacak araştırmacılar için *NI Labview* ile oluşturulan temel öğeler pratik bir kaynak olarak verilmiştir.

Cihazların kontrolünde kullanılan komut kodlarına ilişkin açıklamaların hazırlanmasında cihaz üreten firmaların kullanım kılavuzlarından istifade edilmiştir. Her bir cihaz için ilgili bir kod verilmiş ve ardından kısa açıklaması yapılmıştır. Cihazlarla iletişimde kullanılacak kodlar burada verilenlerle sınırlı değildir. Burada yalnızca bir kullanıcı deneyimi aktarılmak istenmiş ve en temel komutlar listelenmiştir. Buradaki kodlar *NI Labview* dışında, C++ ve benzeri programlama dilleriyle de kullanılabilir.

- *Keithley 2002 Multimeter* İçin Temel Ölçüm Kodları

Bu cihazın kullanımına ve kodların geniş detaylarına ilişkin üretici firmanın kullanım kılavuzuna başvurulabilir [191]. Cihazın üretici firma tarafından önceden tanımlanmış GPIB adresi 16'dır. Bu adres isteğe bağlı olarak kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Bu cihazın komut kodları ve kodların kullanımı *Keithley 2182A* ve *6517B* cihazları ile benzerlikler göstermektedir.

- *RST

Cihazı ön ayarlanmış duruma (default) getirir. Cihazda beklemede kalmış komutları iptal eder.

- *CLS

Cihazdaki kaydedilmiş bilgileri sıfırlar. Arayüzde beklemede olan komutları ve hataları temizler.

- :FETCh?

Bu komut multimetre ekranında bulunan son değeri getirmek için kullanılır. Bu komut cihazın ayarları üzerinde bir değişiklik yapmaz. Hızlı bir iletişim kodudur. Ölçüm için gerekli tüm ayarlar cihaz üzerinde önceden elle ya da bilgisayar kontrolü ile yapılmış ise, cihazdan bilgi okunması için en hızlı iletişim kodudur.

- :READ?

“:FETCh?” komutuna işlevsel olarak benzer bir komuttur. Ancak “Abort”, “Initiate” ve “Fetch” olarak adlandırılan ayarları (yani iptal etme/başlatma, sıfırlama ve ölçüm işlemlerini) birlikte yapar.

- :MEASure[:<function>]?

Bu kod ile cihaza tek seferlik okuma için özelleştirilmiş komut gönderilir. Sinyal tabanlı ölçümler için en kapsamlı koddur. Bu kod ile öncelikle cihaz ayarları sıfırlanır, ardından özelleştirilen ölçüm alınır.

Tablo B1.1: Burada <function> kısmında kullanabilecek komutlar verilmiştir.

Komut	Açıklama
= VOLTage:DC	-DCV fonksiyonu (DC voltaj ölçümü için)
= CURRent:DC	-DCI fonksiyonu (DC akım ölçümü için)
= VOLTage:AC	-ACV fonksiyonu (AC voltaj ölçümü için)
= CURRent:AC	-ACI fonksiyonu (AC akım ölçümü için)
= RESistance	-W2 fonksiyonu (İki nokta direnç ölçümü için)
= FRESistance	-W4 fonksiyonu (Dört nokta direnç ölçümü için)
= FREQuency	-FREQ fonksiyonu (Frekans ölçümü için)
= TEMPerature	-TEMP fonksiyonu (Sıcaklık ölçümü için)

Not: Tüm *Keithley* cihazlarında olduğu gibi, yukarıdaki kodlar bütünüyle kullanılabilmesi gibi, kodların yalnızca büyük harflerle ifade edilen kısmının kullanımı da yeterlidir. Örnek: :MEASure yerine kısaca :MEAS yazılması yeterlidir.

- Keithley Model 6221 AC and DC Current Source İçin Kodlar

Bu cihazın kullanımına ve kodların geniş detaylarına ilişkin üretici firmanın kullanım kılavuzuna başvurulabilir [192]. Bu cihazın üretici firma tarafından önceden tanımlanmış GPIB adresi 12'dir. Bu adres isteğe bağlı olarak kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Sistemimizde kullandığımız komutlar ve kısa açıklamaları aşağıda verilmiştir.

- *RST

Cihazı ön ayarlanmış duruma (default) getirir. Cihazda beklemede kalmış komutları iptal eder.

- *CLS

Cihazdaki kaydedilmiş bilgileri sıfırlar. Arayüzde beklemede olan komutları ve hataları temizler.

- CURRent:RANGe:AUTO

Uygulanacak akım aralığının otomatik olarak seçilip/seçilmemesini sağlar. Burada yerine otomatik modu açmak için ON, ya da kapatmak için OFF yazılmalıdır.

- CURRent <n>

Bu komut ile DC akım için uygulanacak değer girilir. Burada <n> numerik değer ifade eder. Örneğin <n> yerine 105e-3 yazıldığında 105mA'lık akım uygulanmaya hazırdır.

- CURRent:COMPliance <NRf>

Bu komut cihazın uygulayacağı gücü sınırlamak için kullanılır. Bunun için <NRf> yerine 0.1 ile 105 arasında bir voltaj değeri yazılır.

- OUTPut

Uygulanacak akım değerinin cihaza gönderilmesi akımın uygulandığı anlamına gelmez. Akım uygulama işlemini başlatmak için yerine ON, bitirmek için OFF yazılır.

Not: Tüm Keithley cihazlarında olduğu gibi, yukarıdaki kodlar bütünüyle kullanılabilir gibi, kodların yalnızca büyük harflerle ifade edilen kısmının kullanımı da yeterlidir. Örnek: CURRent yerine kısaca CURR yazılması yeterlidir.

- Keithley 2182A Nanovoltmeter İçin Kodlar

Bu cihazın kullanımına ve kodların geniş detaylarına ilişkin üretici firmanın kullanım kılavuzuna başvurulabilir [193]. Bu cihazın üretici firma tarafından ön tanımlı GPIB adresi 07'dir. Bu adres isteğe bağlı olarak kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Bu cihazın komut kodları ve kodların kullanımı Keithley 2002 ve 6517B cihazları ile benzerlikler göstermektedir.

- *RST

Cihazı ön ayarlanmış duruma (default) getirir. Cihazda beklemede kalmış komutları iptal eder.

- *CLS

Cihazdaki kaydedilmiş bilgileri sıfırlar. Arayüzde beklemede olan komutları ve hataları temizler.

- :FETCh?

Bu komut multimetre ekranında bulunan son değeri getirmek için kullanılır. Bu komut cihazın ayarları üzerinde bir değişiklik yapmaz. Hızlı bir iletişim kodudur. Ölçüm için gerekli tüm ayarlar cihaz üzerinde önceden elle ya da bilgisayar kontrolü ile yapılmış ise, cihazdan bilgi okunması için en hızlı iletişim kodudur.

- :READ?

“:FETCh?” komutuna işlevsel olarak benzer bir komuttur. Ancak “Abort”, “Initiate” ve “Fetch” olarak adlandırılan ayarları (yani iptal etme/başlatma, sıfırlama ve ölçüm işlemlerini) birlikte yapar.

- :MEASure[:<function>]?

Bu kod ile cihaza tek seferlik okuma için özelleştirilmiş komut gönderilir. Sinyal tabanlı ölçümler için en kapsamlı koddur. Bu kod ile öncelikle cihaz ayarları sıfırlanır, ardından özelleştirilen ölçüm alınır.

Tablo B1.2: Burada <function> kısmında kullanabilecek komutlar verilmiştir.

Komut	Açıklama
= VOLTage[:DC]	-DCV fonksiyonu (DC voltaj ölçümü için)
= TEMPerature	-TEMP fonksiyonu (Sıcaklık ölçümü için)

- :SENSe:CHANnel <n>

Cihazın ölçüm için iki kanalı bulunmaktadır. Bu komut ile ölçümün hangi kanaldan yapılacağı belirlenir. Burada <n> yerine 0, 1 yada 2 yazılabilir. Burada 0 iç sıcaklık sensörü içindir. Ölçüm için kırmızı ve siyah kablolar kullanılacaksa 1 tercih edilmeli, yeşil ve beyaz kablolar kullanılacaksa 2 tercih edilmelidir.

Not: Tüm Keithley cihazlarında olduğu gibi, yukarıdaki kodlar bütünüyle kullanılabilmesi gibi, kodların yalnızca büyük harflerle ifade edilen kısmının kullanımı da yeterlidir. Örnek: :SENSe:CHANnel 1 yerine kısaca :SENS:CHAN 1 yazılması yeterlidir.

- Keithley 6517B Electrometer/High Resistance Meter İçin Kodlar

Bu cihazın kullanımına ve kodların geniş detaylarına ilişkin üretici firmanın kullanım kılavuzuna başvurulabilir [194]. Bu cihazın üretici firma tarafından önceden tanımlanmış GPIB adresi 27'dir. Bu adres isteğe bağlı olarak kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Bu cihazın komut kodları ve kodların kullanımı *Keithley 2002* ve *2182A* cihazları ile benzerlikler göstermektedir.

- *RST

Cihazı ön ayarlanmış duruma (default) getirir. Cihazda beklemede kalmış komutları iptal eder.

- *CLS

Cihazdaki kaydedilmiş bilgileri sıfırlar. Arayüzde beklemede olan komutları ve hataları temizler.

- :FETCh?

Bu komut multimetre ekranında bulunan son değeri getirmek için kullanılır. Bu komut cihazın ayarları üzerinde bir değişiklik yapmaz. Hızlı bir iletişim kodudur. Ölçüm için gerekli tüm ayarlar cihaz üzerinde önceden elle ya da bilgisayar kontrolü ile yapılmış ise, cihazdan bilgi okunması için en hızlı iletişim kodudur.

- :READ?

“:FETCh?” komutuna işlevsel olarak benzer bir komuttur. Ancak “Abort”, “Initiate” ve “Fetch” olarak adlandırılan ayarları (yani iptal etme/başlatma, sıfırlama ve ölçüm işlemlerini) birlikte yapar.

- :MEASure[:<function>]?

Bu kod ile cihaza tek seferlik okuma için özelleştirilmiş komut gönderilir. Sinyal tabanlı ölçümler için en kapsamlı koddur. Bu kod ile öncelikle cihaz ayarları sıfırlanır, ardından özelleştirilen ölçüm alınır.

Tablo B1.3: Burada <function> kısmında kullanabilecek komutlar verilmiştir.

Komut	Açıklama
= VOLTage[:DC]	-DCV fonksiyonu (DC voltaj ölçümü için)
= CURRent[:DC]	-DCI fonksiyonu (DC akım ölçümü için)
= RESistance	-W2 fonksiyonu (İki nokta direnç ölçümü için)
= CHARge	-Coulomb yük ölçüm fonksiyonu

- Lakeshore-331 (veya 335) Temperature Controller İçin Kodlar

Bu cihazın kullanımına ve kodların geniş detaylarına ilişkin üretici firmanın kullanım kılavuzuna başvurulabilir [195]. Bu cihazın üretici firma tarafından önceden tanımlanmış GPIB adresi 12'dir. Bu adres isteğe bağlı olarak kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir.

- *RST

Cihazı ön ayarlanmış duruma (default) getirir. Cihazda beklemede kalmış komutları iptal eder.

- *CLS

Cihazdaki kaydedilmiş bilgileri sıfırlar. Arayüzde beklemede olan komutları ve hataları temizler.

- CRDG? <input>

Sıcaklığın santigrat (Celcius) cinsinden okunmasını sağlar. Termometrenin bağlantılarının giriş yerine göre <input>'a A ya da B yazılır.

- KRDG? <input>

Sıcaklığın Kelvin cinsinden okunmasını sağlar. Termometrenin bağlantılarının giriş yerine göre <input>'a A ya da B yazılır.

- SETP <loop>, <value>[term]

Sistemi istenen sıcaklık değerine gönderen komuttur. Burada <loop> yerine sisteme bağlı olan ısıtıcının bulunduğu kanal 1 ya da 2 şeklinde yazılır. <value> yerine ise istenilen sıcaklık değeri rakam olarak yazılır.

- SETP? <loop>[term]

Sistemin hangi sıcaklık değerine gönderildiğini belirlemek için kullanılan sorgulama komutudur. Burada <loop> yerine sisteme bağlı olan ısıtıcının bulunduğu kanal 1 ya da 2 şeklinde yazılır.

• Physical Property Measurement System (QD PPMS9T) İçin Kodlar

Bu cihazın kullanımına ve kodların geniş detaylarına ilişkin üretici firmanın kullanım kılavuzuna başvurulabilir [196]. Bu cihazın üretici firma tarafından önceden tanımlanmış GPIB adresi 15'dir. PPMS cihazı, üretici firmanın kendi yazılımları ile kullanılmaya uyarlandığından adres çakışmaları durumunda diğer cihazların adreslerini değiştirmek uygun olacaktır.

- *RST

Cihazı ön ayarlanmış duruma (default) getirir. Cihazda beklemede kalmış komutları iptal eder. Sistem kapatılıp açılmış olur.

- *CLS

Cihazdaki kaydedilmiş bilgileri sıfırlar. Arayüzde beklemede olan komutları ve hataları temizler.

- CHAMBER ChamberCode

PPMS sistemindeki örnek odacığının vakumuna ilişkin işlemleri yapmak için kullanılır. Burada “ChamberCode” yerine 0, 1, 2, 3, 4 gibi değerler kullanılır. Bu rakamların operasyonel karşılıkları sırasıyla 0=Seal Immediately (örnek odacığının vakumladığı vanayı kapat), 1= Purge and Seal (örnek odacığını gaz helyum ile temizle, odacığı vakuma al ve vanayı kapat), 2= Vent and Seal (örnek odacığındaki vakumu boz ve vanayı kapat), 3= Pump Continuously (örnek odacığını sürekli vakumlamaya devam et) ve 4= Vent Continuously (örnek odacığının vakumunu boz ve içeriye gaz helyum ver) şeklindedir.

- CHAMBER?

Vakuma ilişkin durum bilgisi yukarıda açıklanan kodlar cinsinden alınır.

- FIELD Field Rate [ApproachMode] [MagnetMode]

Bu komutla istenen manyetik alan değeri, istenilen adımlarla ve istenilen yaklaşım moduyla uygulanır. Burada “Field” uygulanan manyetik alan ve birimi Oersted cinsindedir. “Rate” parametresi ise manyetik alanın istenen değere hangi adımlarla gideceğini gösterir ve birimi Oe/sn'dir. [ApproachMode] parametresi uygulanacak alana nasıl ulaşılabileceği işlemini belirler ve 0, 1, 2 gibi rakamlar kullanılır. Bunların anlamı 0= Linear Approach (default), 1= No Overshoot Approach, 2= Oscillate Approach şeklindedir. [MagnetMode] ise istenilen manyetik alana ulaşıldığında süperiletken mıknatısın bırakılacağı modu belirler. Burada 0= Persistent Mode (default), 1= Driven Mode anlamına gelir. Bu işlemlerin detayları PPMS sisteminin kullanım kılavuzunda anlatılmaktadır [196].

- FIELD?

Bu komut ile manyetik alana ilişkin bilgiler alınır. Sistemden alınan bilgi yukarıdaki komutta olduğu gibi sırasıyla Field, Rate, ApproachMode ve MagnetMode şeklindedir.

- LEVEL?

Sistemdeki sıvı helyum seviyesini öğrenmek için kullanılır.

- TEMP Temp Rate [ApproachCode]

Sistem sıcaklığını ayarlamak için kullanılır. “Temp” 1.9 ile 400 arasında bir değer olarak alınır ve birimi Kelvin’dir. “Rate” sıcaklığın ne kadar hızlı değiştirileceğini belirler ve 20’ye kadar bir sayıdır. Birimi K/min’dir. Soğutma işlemlerinde en az helyum sarfiyatı için değişim hızı için 2-4 gibi (K/min) değerlerin kullanılması tavsiye edilir. Burada [ApproachCode] yerine 0 ya da 1 kullanılabilir. 0= Fast Settle Approach (default) ve 1= No Overshoot Approach anlamına gelir.

- TEMP?

Sıcaklıkla ilgili bilgiler yukarıda anlatılan sırayla sistemden alınır.

- SHUTDOWN

Sıcaklık kontrolünün yapılmayacağı durumlarda sıcaklık kontrolünü devreden çıkarmak için kullanılır. Bu sayede helyum sarfiyatı en aza indirilmiş olur.

• Örnek Çubuğunda Bulunan Örnek Döndürücü İçin Kodlar

Örnek döndürücünün bilgisayarla kontrolünün yapılabilmesi için USB kablo ile bağlantı yapılır. Örnek döndürücünün bilgisayarla iletişimi RS232 seri port (VISA) arayüzü ile sağlanmaktadır. Döndürücüye aşağıdaki istenilen komut gönderildikten sonra “satırbaşı” işlemi yapılmalıdır. Bunun için NI Labview programına “concatenate strings” ile “line feed constant” karakteri eklenebilir. Ya da “satırbaşı” işlemi yerine \n ifadesi komutun sonuna eklenebilir.

- a,

Virgül ile kullanılan bu komuttan sonra yazılan rakam ile döndürücünün o açığa gitmesi sağlanır. Ancak girilen açı değeri “67.1139” değeri ile çarpılmalıdır. Örnek 90 derece döndürülmek isteniyorsa, $90 \times 67.1139 = 6040$ sonucuna göre yazılması gereken komut a,6040\n’dır.

- L

Örneği döndüren adımlı motorun durumu hakkında bilgi almak için kullanılır. Eğer motordan alınan cevap H ise konumlama bitmiş demektir. Eğer konumlama bitmemişse R şeklinde bir cevap gelir. Bir komutun işlemi bitmeden döndürücüye yeni bir işlem komutu gönderilmemelidir.

- u

Örneği döndüren adımlı motorun pozisyonunu okumak için kullanılır. Ancak açığı hesaplamak için, elde edilen değer “67.1139” değerine bölünmelidir.

- p,

Herhangi bir PID değerini cihaza göndermek için kullanılabilir. Komut “p,0.75,0.12,500\n” şeklinde yazılabilir.

- r

PID değerini okumak için kullanılır. PID değeri okununca karşımıza “r,0.75,0.12,500” gibi bir sonuç çıkmaktadır. “r” ifadesinden sonraki değerler sırasıyla P, I ve D değerleridir.

- h

Örnek döndürücünün pozisyonunu kontrolcünün dokunmatik ekranında güncellemek için kullanılır.

- g

Bu komut örnek döndürücünün pozisyonunu sıfırlamak için kullanılır.

Ek C: Labview İle Cihaz Kontrolü İçin Bazı Temel İşlemler

NI Labview, akış şemaları kullanılarak sinyal işlemeye yarayan görsel bir programlama dilidir. Program ön panel ve blok diyagram olmak üzere iki kısımdan oluşur. Ön panel kullanıcılar tarafından görülen kısımdır. Cihazlara gönderilen komutların akış şemaları ise arka planda blok diyagramda bulunmaktadır. Cihazlara komutlar blok diyagramda yer alan GPIB ve VISA fonksiyonları üzerinden

gönderilir. Her iki fonksiyonla cihazlara komut göndermenin temel uygulamaları aşağıda verilmiştir.

- GPIB Write

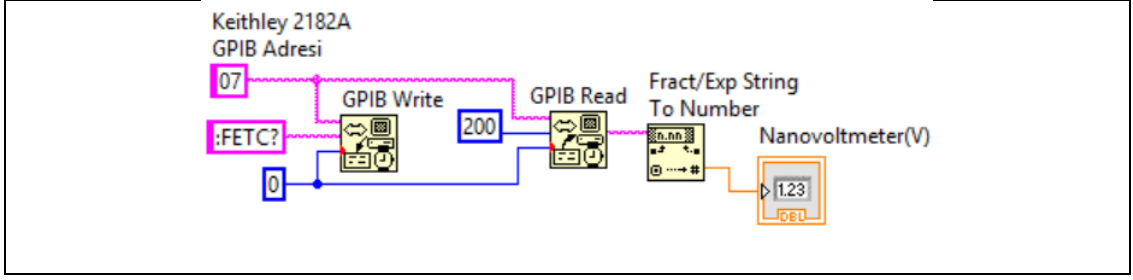
Bilgisayara GPIB kartı ile bağlanan cihazlara komut gönderimi için kullanılan bir fonksiyondur. Şekil C1.1’de PPMS Model 6000 ve Keithley 6221 cihazları için iki ayrı basit örnek gösterilmiştir. “GPIB write” fonksiyonuna temel olarak adres girişi ve komut girişi bağlanmalıdır. Şekil C1.1.a)’da “SHUTDOWN” komutunun, Şekil C1.1.b)’de ise “OUTP ON” komutunun gönderilmesi gösterilmiştir. Her iki komut da tek yönlüdür ve her iki komut için de cihazdan tekrar geri bildirim ihtiyacı duyulmamaktadır.



Şekil C1. 1: a) *PPMS Model 6000* ve b) *Keithley 6221* cihazları için “GPIB write” fonksiyonunun kullanımı.

- GPIB Read

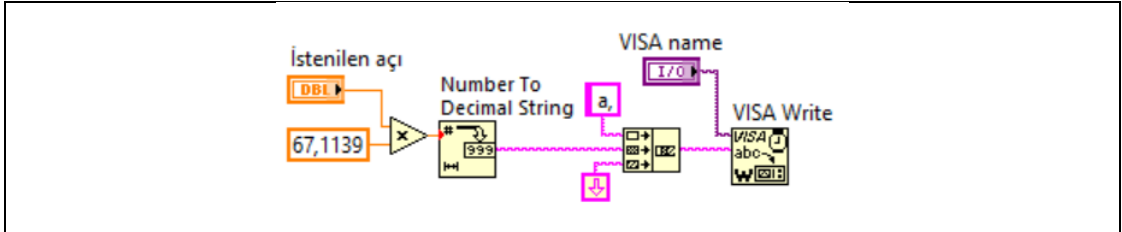
Cihazdan bilgi almak istenildiğinde ve geri bildirim ihtiyacı duyulduğunda “GPIB Write” fonksiyonu ile birlikte kullanılır. Önce, cihazdan hangi bilginin istendiği “GPIB Write” fonksiyonuyla belirlenir. Şekil C1.2’de *Keithley 2182A* cihazından elde edilen bilgiyi bilgisayara aktarmak için oluşturulmuş bir akış şeması verilmiştir. Bu örnekte önce “GPIB Write” ile 07 adresli cihaza “:FETC?” komutu gönderilmiştir. Ardından “GPIB Read” ile bilgi alınmaktadır. Bilgi alımı karakter dizisi (string) şeklinde gerçekleştiği için akışın en sonunda elde edilen karakter dizisi sayıya dönüştürülmüştür.



Şekil C1. 2: Keithley 2182A cihazı için “GPIB write” ve “GPIB read” fonksiyonlarının birlikte kullanıldığı bir örnek akış şeması.

- VISA Write/Read

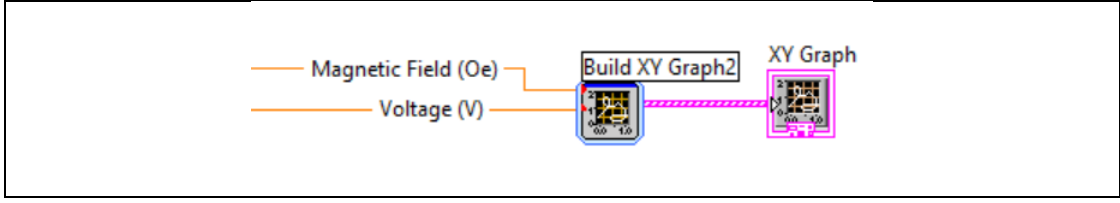
Bilgisayara VISA (Virtual Instrument Software Architecture) ara yüzü ile bağlanan cihazlara komut gönderimi için kullanılan fonksiyonlardır. “VISA write” ve “VISA read” fonksiyonlarının kullanımı GPIB fonksiyonlarına benzemektedir. Şekil C1.3’te “VISA write” fonksiyonunun kullanıldığı çok fonksiyonlu örnek çubuğunun döndürücüsünün akış şeması örnek olarak gösterilmiştir. Burada örneğin belirlenen açığa döndürülmesi için kullanılacak komut gösterilmiştir. Açık değeri sabit 67,1139 ile çarpıldıktan sonra karakter dizisine çevrilmiş a, ile birleştirilerek cihaza gönderilmiştir.



Şekil C1. 3: Örnek döndürücü için “VISA write” fonksiyonu ile yapılan akış şeması.

- Ölçüm Grafiği Oluşturma

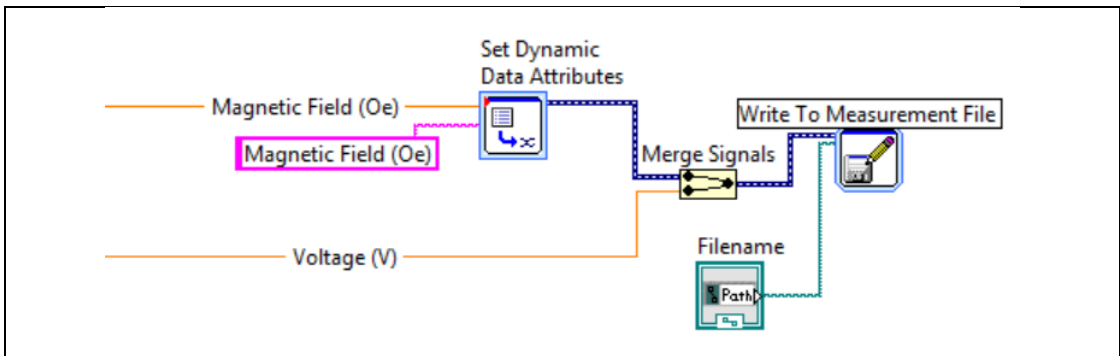
Ölçümlerde elde edilen verilerle grafik oluşturulmak istendiğinde Labview programı ile bir sürü hazır fonksiyon sunmaktadır. Bir örnek olarak Şekil C1.4’te gösterilen yol izlenebilir. Burada manyetik alan süren ve voltaj okuyan iki ayrı cihazdan elde edilen veriler “Express XY Graph” fonksiyonu ile kullanıcı ön panelinde görülebilir bir grafiğe dönüştürülmektedir.



Şekil C1. 4: Cihazlardan elde edilen veriler ile grafik oluşturmak için kullanılacak bir akış şeması.

- Ölçümleri Dosyaya Kaydetme

Ölçümlerde elde edilen veriler bilgisayar dosyası olarak saklanmak istendiğinde bir örnek olarak Şekil C1.5'te gösterilen yol izlenebilir. Burada manyetik alan süren ve voltaj okuyan iki ayrı cihazdan elde edilen verilerin ölçüm dosyasına kaydedilmesi akış şeması gösterilmiştir. Böyle bir akış şeması oluşturmak için öncelikle, fonksiyon paletinden "Write to Measurement File" fonksiyonu blok diyagrama eklenir. Dosyaların kaydedileceği yeri belirlemek için "Filename" fonksiyonu buraya bağlanır. "Write to Measurement File" fonksiyonun sinyaller için tek bir girişi vardır. Bu yüzden "Merge Signals" fonksiyonu ile iki ve daha fazla sayıda sinyalin birleştirilmesi yapılabilir. Gelen sinyalin isminin de dosya da bulunması isteniyorsa "Set Dynamic Data Attributes" fonksiyonu kullanılabilir. Aşağıda verilen örnekte cihazlardan elde edilen manyetik alan ve voltajlar iki ayrı sütun halinde kaydedilecektir. Kaydedilen dosyada ilk sütunun başında, "Set Dynamic Data Attributes" fonksiyonu kullanıldığı için, manyetik alan başlığı yer alacak, ancak ikinci sütun için veriler direk bağlandığından voltaj başlığı yer almayacaktır.



Şekil C1. 5: Cihazlardan elde edilen verileri bilgisayara kaydetmek için kullanılacak örnek bir akış şeması.