

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**DİK MIKNATISLANMAYA SAHİP FERROMANYETİK İNCE
FİLMERDE KAYDIRMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

HAZIRLAYAN: Selahattin ÇELİK
DANIŞMANLAR: Prof. Dr. Ali İhsan DEMİREL
Doç. Dr. Numan AKDOĞAN

VAN-2017

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**DİK MIKNATISLANMAYA SAHİP FERROMANYETİK İNCE
FİLMERDE KAYDIRMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

HAZIRLAYAN: Selahattin ÇELİK

VAN-2017

KABUL VE ONAY SAYFASI

Fizik Anabilim Dalında *Prof. Dr. Ali İhsan DEMİREL* ve *Doç. Dr. Numan AKDOĞAN* danışmanlığında, *Selahattin ÇELİK* tarafından sunulan “**Dik Miknatıslanmaya Sahip Ferromanyetik İnce Filmlerde Kaydırma Etkisinin İncelenmesi**” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince **08/10/2017** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ali İhsan DEMİREL

İmza: 

Üye: Doç. Dr. Rafet YILMAZ

İmza: 

Üye: Doç. Dr. Fikret YILDIZ

İmza: 

Üye: Doç. Dr. Koray KÖKSAL

İmza: 

Üye: Yrd. Doç. Dr. Abdullah ÖZKARTAL

İmza: 

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20/10/2017 tarih ve 2017/48-VI Sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

Prof. Dr. Suat ŞENSOY
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

(İmza)



Selahattin ÇELİK



ÖZET

DİK MIKNATISLANMAYA SAHİP FERROMANYETİK İNCE FİMLERDE KAYDIRMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÇELİK, Selahattin
Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı
Tez Danışmanları: Prof. Dr. Ali İhsan DEMİREL
Doç. Dr. Numan AKDOĞAN
Kasım 2017, 75 sayfa

Bu tez çalışmasında, Si üzerine yüksek vakum koşullarında manyetron saçtırmalı tekniği kullanılarak büyütülmüş Pt/IrMn/Pt/Co/Pt/MgO ince filmlerinin yapısal ve manyetik özellikleri incelendi.

Büyütülen ince filmlerin tabaka kalınlığı, yoğunluğu ve pürüzlükleri XRR tekniği ile belirlendi. İnce filmlerin yapısal karakterizasyonu için XRD tekniği kullanıldı. Örneklerin manyetik özellikleri ise Manyetik-Optik Kerr Etkisi (MOKE) ve Anormal Hall Etkisi (AHE) yöntemleri ile incelendi.

Oda sıcaklığında örneklerin kolay eksenini belirlemek için örnek düzlemine dik ve paralel manyetik alan uygulanarak histeresis eğrileri ölçüldü. Çıkan sonuçlara göre Pt/IrMn/Pt/Co/Pt/MgO ince filmlerinin dik manyetik anizotropiye sahip olduğu belirlendi. Exchange bias ölçümleri için büyütülen ince filmler, 8 kOe'lik manyetik alan altında 400 K sıcaklık değerine ısıtılarak bir saat boyunca tavlama işlemine tabi tutuldular. Daha sonra yine 8 kOe'lik manyetik alan altında hedef sıcaklıklara soğutulularak exchange bias alanları hesaplandı. Oda sıcaklığında exchange bias etkisi gözlenmezken düşük sıcaklıklarda dik exchange bias etkisi görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Dik Manyetik Anizotropi, IrMn, Kaydırma Etkisi.



ABSTRACT

INVESTIGATION OF EXCHANGE BIAS EFFECT IN PERPENDICULARLY MAGNETIZED FERROMAGNETIC THIN FILMS

ÇELİK, Selahattin

Ph. D. Thesis, Physics

Supervisors: Prof. Dr. Ali İhsan DEMİREL

Assoc. Prof. Dr. Numan AKDOĞAN

November 2017, 75 pages

In this study, we have investigated the structural and magnetic properties of Pt/IrMn/Pt/Co/Pt/MgO thin films grown on Si substrate by using magnetron sputtering system.

Thickness, density and roughness of the films were determined by using XRR method. The XRD is also used in order to analyze the crystal structure of thin films. The magnetic properties of the samples were investigated by using magneto-optical Kerr effect and anomalous Hall effect techniques.

Both out-of-plane and in-plane hysteresis curves were measured at room temperature to determine easy axis of samples. The results have revealed that Pt/IrMn/Pt/Co/Pt/MgO samples have perpendicular magnetic anisotropy. The samples were annealed at 400 K for one hour under a field $H=8$ kOe for exchange bias measurement. After cooling the samples down to 150 K under a magnetic field of 8 kOe, we have carried out AHE measurements. As a result, we have observed perpendicular exchange bias at low temperatures.

Keywords: Perpendicular Magnetic Anisotropy, IrMn, Exchange Bias.



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali İhsan DEMİREL'e ve tezimin deneysel kısmı için gittiğim Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nün bütün laboratuvar olanaklarını esirgemeyen, iş ahlakını ve azmini kendime örnek aldığım ikinci danışmanım Sayın Doç. Dr. Numan AKDOĞAN'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımda kullandığım örneklerin hazırlanmasında laboratuvar imkânları ile destekleri için Doç. Dr. Fikret YILDIZ'a ve Salih AKBULUT'a çok teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanmasında destek ve yardımlarını benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli grup arkadaşlarım Dr. Mustafa ÖZTÜRK, Dr. Erdem DEMİRCİ, Dr. Şafak GÖK ve Hasan PİŞKİN'e çok teşekkür ederim.

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

Çalışmalarım sırasında sürekli yanımda olan ve sıkıntılarımı paylaşan sevgili eşim Şennur'a, çocuklarım Sevde, Ayşegül ve Hatice Beril'e ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca bana her zaman destek olan ailemi ve bu günlere gelmemde emeği olan bütün hocalarımı hürmet ve muhabbetle anıyorum.

2017

Selahattin ÇELİK



İÇİNDEKİLER

	sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. İNCE FİLMLERDE MANYETİK ANİZOTROPİ	3
2.1. Anizotropi Kavramı ve Manyetik Anizotropinin Kaynağı.	3
2.2. Etkin Manyetik Anizotropi.	4
3. KAYDIRMA ETKİSİ (EXCHANGE BIAS).....	5
3.1. Kaydırma Etkisinin Mekanizması ve Hesaplanması.....	5
3.2. Meiklejohn ve Bean Modeli.....	9
3.3. Kaydırma Etkisinin Sıcaklığa Bağlı Davranışı.....	12
3.4. Kaydırma Etkisinin FM ve AFM Tabaka Kalınlığına Bağlı Davranışı.....	13
3.5. Kaydırma Etkisinin Teknolojik Uygulamaları.....	14
4. MATERYAL VE YÖNTEM.	17
4.1. X-Işını Yansıması (XRR) Tekniği.....	17
4.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Tekniği.....	19
4.3. Magnetron Saçtırma Tekniği.....	21
4.4. Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE) Tekniği.....	23
4.5. Anormal Hall Etkisi (AHE) Tekniği.....	26
5. BULGULAR	29
5.1. Giriş.....	29
5.2. Örneklerin Büyütülme Şartları.	30
5.3. Pt Katmanı Üzerine Yapılan Çalışmalar.	30
5.4. Antiferromanyetik IrMn Tabakası Üzerine Yapılan Çalışmalar.	34

	sayfa
5.5. En İyi Büyütme Şartları Belirlendikten Sonra Yeni Örneklerin Hazırlanması ve Analizi.....	36
5.6. En İyi Büyütme Şartları Belirlendikten Sonra Hazırlanan Örneklerin Miknatıslanma Ölçümleri.....	39
5.7. En İyi Büyütme Şartları Belirlendikten Sonra Hazırlanan Örneklerin Sıcaklığa Bağlı Exchange Bias Ölçümleri.	41
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	45
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	53



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge

Sayfa

Çizelge 5.1. XRR yöntemi kullanılarak yapılan fit sonucunda M3 örneği için elde edilen yoğunluk, kalınlık ve pürüzlülük değerleri..... 38



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir FM malzemenin kolay (siyah) ve zor (kırmızı) eksenlerinde ölçülen histeresis eğrileri.....	3
Şekil 3.1. Kesikli çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi (1) 77 K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi (2) ise 77 K'e kadar 10 kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir.	6
Şekil 3.2. Kaydırma etkisi mekanizmasının manyetik alana bağlı gösterimi.	7
Şekil 3.3. Histeresis eğrisindeki zorlayıcı alan değerleri.....	8
Şekil 3.4. Meiklejohn ve Bean modeline göre FM ve AFM malzemelerin mıknatıslanma yönleri.	9
Şekil 3.5. Dik manyetik anizotropili sistemler için Meiklejohn ve Bean modeli.	10
Şekil 3.6. Zorlayıcı alanların sıcaklığa bağlı değişimi.	13
Şekil 3.7. Spin vanası, GMR ve TMR yapılarının temsili gösterimleri.....	15
Şekil 3.8. Spin vanalarında düşük "0" ve yüksek "1" direnç durumu.....	15
Şekil 4.1. X-ışınının örnekten yansıma durumu.	17
Şekil 4.2. Bruker AXS D5000 difraktometresinin şematik görünümü.....	18
Şekil 4.3. Yansıma eğrisi ve verdiği bilgiler.....	19
Şekil 4.4. X-ışınının tabakalardan kırınımı.....	20
Şekil 4.5. Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan XRD cihazı.....	21
Şekil 4.6. Magnetron saçırma sisteminin şematik gösterimi.....	22
Şekil 4.7. Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünde bulunan ince film hazırlama ve analiz sistemi.	23
Şekil 4.8. Işığın manyetik malzemeyle etkileşmesi: Faraday ve Kerr etkileri.....	24
Şekil 4.9. MOKE ölçüm düzeneği.....	24
Şekil 4.10. Manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm geometrileri. a) T-MOKE, b) L-MOKE, c) P-MOKE ölçüm geometrileri.....	25

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünde bulunan MOKE sistemi.....	26
Şekil 4.12. AHE ölçümü için kontakların gösterimi.....	27
Şekil 5.1. Co tabakasının oksitlenmesini önlemek için Pt kalınlığına bağlı olarak büyütülen ince filmler.	31
Şekil 5.2. Co tabakasının oksitlenmesini önlemek için Pt tabakasının kalınlığına bağlı olarak büyütülen ince filmlerin MOKE ölçüm sonuçları.....	32
Şekil 5.3. Antiferromanyetik IrMn tabakası ile ferromanyetik Co tabakası arasında (a). Pt tabaka eklendiği, (b). Pt tabaka eklenmediği durumda büyütülen ince filmler.....	33
Şekil 5.4. Antiferromanyetik IrMn tabakası ile ferromanyetik Co tabakası arasında (a). Pt tabaka eklendiği, (b). Pt tabaka eklenmediği durumda MOKE ölçüm sonucu.	34
Şekil 5.5. Antiferromanyetik IrMn tabakasının, ferromanyetik Co tabakasının a) üzerinde, b) altında olduğu durum.....	35
Şekil 5.6. Antiferromanyetik IrMn tabakasının ferromanyetik Co tabakası a) üzerinde, b) altında olduğu durumda MOKE ölçüm sonuçları.....	36
Şekil 5.7. Çalışılan örnek sisteminin şematik gösterimi.	37
Şekil 5.8. M3 örneğinin XRR ölçümü ve simülasyon sonucu.	38
Şekil 5.9. Büyütülen ince filmlerin XRD ölçüm sonucu.	39
Şekil 5.10. M1, M2 ve M3 örneklerinin oda sıcaklığında MOKE ile örnek düzlemine dik geometride (P-MOKE) ve örnek düzleminde (L-MOKE) alınan histeresis ölçümleri.	40
Şekil 5.11. M1 ve M2 örneklerinin oda sıcaklığında AHE ile alınan histeresis ölçümleri.	41
Şekil 5.12. M1, M2 ve M3 örneklerinin manyetik alan altında tavlama işleminden sonra oda sıcaklığında MOKE ile dik geometride alınan histeresis ölçümleri.	42
Şekil 5.13. M1, M2 ve M3 örneklerinin 150 K' de AHE ile ölçülen ve exchange bias etkisi gözlenen mıknatıslanma eğrileri.	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Ar	Argon
Å	Angström
β	K_{FM} ve M_{FM} arasındaki açı
Co	Kobalt
CoO	Kobalt oksit
d	Düzlemler arası mesafe
dc	Doğru akım
E	Toplam enerji
E_{int}	Değiş-tokuş etkileşme enerjisi
γ	Doyum mıknatıslanma sabiti
H	Manyetik alan
H_C	Zorlayıcı alanlar
H_{C1}	Sol zorlayıcı alan
H_{C2}	Sağ zorlayıcı alan
H_{EB}	Exchange bias alanı
I	Akım
Ir	İridyum
IrMn	İridyum mangan
J_{EB}	Ara yüzey değiş-tokuş çiftlenim enerjisi
K	Kelvin
k	Kilo
K_{AFM}	AFM tabakanın manyetik anizotropi enerjisi
K_{FM}	FM tabakanın manyetik anizotropi enerjisi
K_{etkin}	Etkin anizotropi
K_V	Hacim anizotropisi
K_S	Yüzey anizotropisi

K_C	Manyeto-kristal anizotropi
K_d	Şekil anizotropisi
K_γ	Manyeto-elastik anizotropi
λ	X-ışınının dalga boyu
M	Mıknatıslanma
M_{FM}	FM tabakanın mıknatıslanması
M_{AFM}	AFM tabakanın mıknatıslanması
M_S	Doyum mıknatıslanması
MgO	Magnezyum oksit
Mn	Mangan
mbar	Milibar
μ_0	Boşluğun geçirgenliği
nm	Nanometre
O	Oksijen
Oe	Manyetik alan birimi
Pt	Platin
R	Direnç
RT	Oda sıcaklığı
rf	radio frekansı
R_A	Anormal Hall katsayısı
δ	Stres faktörü
Si	Silisyum
Ta	Tantal
T	Sıcaklık
T_B	Engelleme sıcaklığı
T_N	Nèel sıcaklığı
T_C	Curie sıcaklığı
t_{FM}	FM tabaka kalınlığı
t_{AFM}	AFM tabaka kalınlığı
Kısaltmalar	Açıklama
AFM	Antiferromanyetik
AHE	Anormal Hall Etkisi

GMR	Dev manyeto-direnç
FM	Ferromanyetik
PEB	Örnek düzlemine dik exchange bias
XRR	Küçük açı x-ışını yansıması
XRD	Büyük açı x-ışını kırınımı
MOKE	Manyeto Optik Kerr Etkisi
TMR	Tünelleme manyeto-direnç
T-MOKE	Enine MOKE geometrisi
L-MOKE	Boyuna MOKE geometrisi
P-MOKE	Kutupsal MOKE geometrisi
PEM	Fotoelastik modülatör
PCB	Baskılı devre kartı
MRAM	Manyetik Rastgele Erişimli Hafıza
STT	Spin transfer tork



1. GİRİŞ

Manyetizma üzerine yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen manyetik malzemeler ve bu malzemelerle yapılan teknolojik cihazlar (spin vanaları, sabit disk okuyucu başlıkları, manyetik sensörler vb.) günümüzde önemli bir yere sahiptir. Teknolojik açıdan minimum enerji harcayan, daha fazla bilgi depolayabilen, hızlı ve dayanıklı cihazların üretilmesi daha da önem arz etmektedir (Noguès ve Schuller, 1999). Üretilen cihazların esasını ise nano boyuttaki katmanlar arası etkileşme oluşturmaktadır. 1956 yılında W. H. Meiklejohn ve C. P. Bean, Ferromanyetik (FM) ve antiferromanyetik (AFM) malzemeler arası etkileşmeyi inceleyerek yeni bir anizotropi çeşidi olarak isimlendirmişlerdir (Meiklejohn ve Bean, 1956; 1957; Meiklejohn, 1962). Sonraki yıllarda exchange bias (kaydırma etkisi) diye adlandırılan bu etkileşmeyi anlamaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

Exchange bias etkisi ile ilgili yapılan çalışmalara baktığımızda karşımıza iki önemli çalışma alanı çıkmaktadır. Bunlardan ilki ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemelerin ara yüzeyinde gerçekleşen fiziksel olayları anlamaya yönelik geliştirilen model ve formüllerdir (Meiklejohn ve Bean, 1956; 1957). İkincisi ise teknolojik uygulamalar için oda sıcaklığının çok üstünde de çalışabilen cihaz tasarımına yönelik farklı manyetik malzeme arayışları ile ilgili çalışmalardır (Kohn ve ark., 2013; Vinai ve ark., 2013).

Exchange bias (kaydırma etkisi) her ne kadar kendisine uygulama alanı bulmuş olsa da, bu etkinin fiziksel nedenleri net olarak anlaşılabilmiş ve olayı açıklayan fiziksel teori tam olarak geliştirilebilmiş değildir (Binasch ve ark., 1989; Radu, 2005). Bunun yanı sıra kullanım alanını artırmaya yönelik çalışmalar da devam etmektedir.

Exchange bias etkisi üzerine yapılan çalışmaların çoğu örnek düzleminde miknatislanmaya sahip örnekler üzerine olmuştur (Noguès ve Schuller, 1999; Akdoğan ve ark., 2011; Öztürk ve ark., 2012a; 2012b; Demirci ve ark., 2012). Ancak son zamanlarda, örnek düzlemine dik yönde miknatislanmaya sahip Pt/Co/IrMn ince filmlerinde de exchange bias etkisi incelenmeye başlanmıştır (Sort ve ark., 2003; Garcia ve ark., 2003; Binek ve ark., 2005). Çünkü dik manyetik anizotropiye (perpendicular

exchange bias-PEB) sahip malzemeler kullanılarak daha küçük alanlara daha fazla bilgi kaydetme imkânı bulunmaktadır. Bu sayede bilgi yoğunluğu daha fazla olan sabit diskler elde edilmiştir. Bunun yanı sıra dik manyetik anizotropi, spin transfer tork cihazlarında daha düşük akımlar ile çalışma imkânı sağladığı için tercih edilmektedir. Literatürde PEB alanının, sıcaklığa, FM ve AFM tabaka kalınlığına, FM ve AFM arasında kullanılan ayırıcı tabaka kalınlığına, AFM tabaka ve alttaş arasında kullanılan tampon tabaka kalınlığına ve alttaşa bağlı davranışına odaklanılmıştır (Minaru ve ark., 1980; Xu ve ark., 2011; Demirci ve ark., 2014).

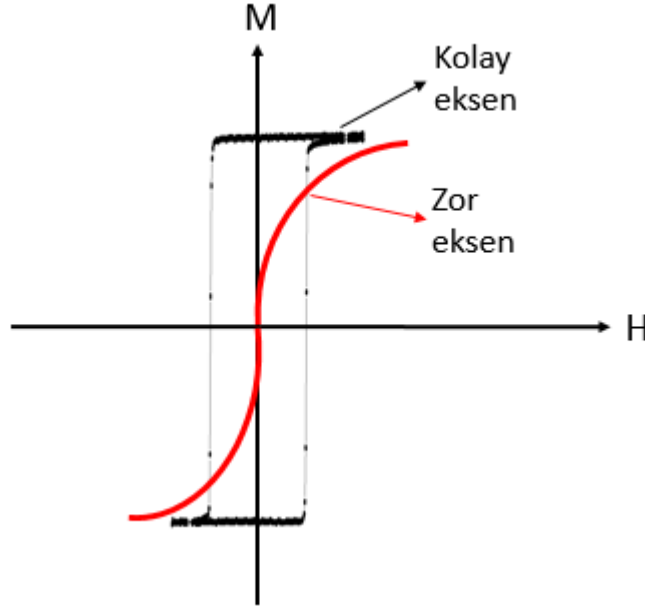
Bu tez çalışmasında magnetron saçtırmalı kaplama yöntemiyle Si (111) alttaş üzerine büyütülen Pt/IrMn/Pt/Co/Pt/MgO ince filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Bundan sonraki bölümde manyetik anizotropi hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde kaydırma etkisinin mekanizması, Meiklejohn ve Bean modeli ile kaydırma etkisinin sıcaklığa ve kalınlığa bağlı davranışı incelenmiştir. Dördüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan deneysel teknikler anlatılmıştır. Tezin beşinci bölümünde dik mıknatıslanmaya sahip örneklerin deneysel sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise tez çalışması genel olarak değerlendirildikten sonra, bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalarla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

2. İNCE FİLMLERDE MANYETİK ANİZOTROPİ

2.1. Anizotropi Kavramı ve Manyetik Anizotropinin Kaynağı

Anizotropi, yöne bağımlılığı ifade eden bir kavramdır. Manyetik anizotropi ise manyetik malzemelerin histeresis eğrilerinin yöne bağlı davranışını ifade etmektedir. Manyetik anizotropi, malzemenin şekli, kristal yapısı, malzemedeki gerilme ya da yüzey gibi farklı etkilerden meydana gelmektedir. Anizotropiye sahip FM malzemeler mıknatıslandığında histeresis eğrileri manyetik alanın uygulandığı yöne göre değişim göstermektedir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, FM malzemeyi manyetik alanla kolay ekseninde doyuma ulaştırmak için daha düşük manyetik alana, zor ekseninde doyuma ulaştırmak için ise daha güçlü manyetik alana ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2.1. Bir FM malzemenin kolay (siyah) ve zor (kırmızı) eksenlerinde ölçülen histeresis eğrileri.

İnce filmler farklı anizotropi özelliklerinden dolayı bilgi depolama sistemleri, kayıt cihazları ve birçok spintronik cihazda kullanılmaktadır. Örneğin, spin transfer tork (STT) sistemleri için güçlü zorlayıcı alanlı filmler tercih edilirken, bilgi depolama sistemleri için zayıf zorlayıcı alana sahip malzemeler tercih edilmektedir (Kurt ve ark., 2011).

2.2. Etkin Manyetik Anizotropi

Manyetik ince filmlerin mıknatıslanması anizotropiye bağılı olarak örnek düzleminde veya örnek düzlemine dik olabilir. Anizotropinin örnek düzleminde veya örnek düzlemine dik yönde olup olmamasında belirleyici olan parametreler etkin manyetik anizotropi adı altında incelenebilir. İnce filmlerde anizotropinin ilişkili olduğu parametreler Nèel tarafından etkin anizotropi olarak açıklanmıştır (Nèel, 1954). Nèel etkin anizotropiyi (K_{etkin}), hacim anizotropisi (K_V), şekil anizotropisi (K_d), gerilme anizotropisi (K_γ) ve yüzey anizotropisinin (K_S) toplamı olarak tanımlamıştır. Bu durum “Eş. 2.1”de verilmiştir.

$$K_{etkin} = K_V + K_d + K_\gamma + \frac{2K_S}{t_{FM}} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki terimler açılarak yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilir.

$$K_{etkin} = K_V + 2\pi M_S^2 - \frac{3}{2}\gamma\delta + \frac{2K_S}{t_{FM}} \quad (2.2)$$

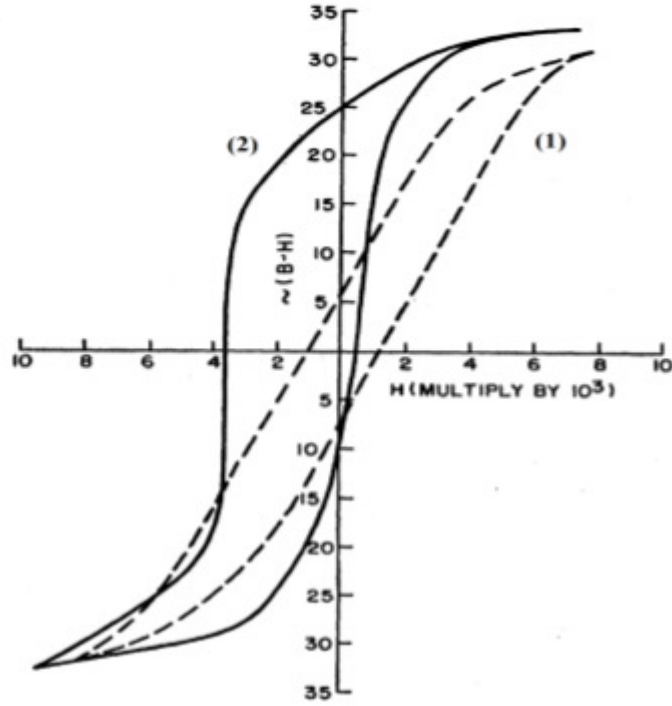
“Eş. 2.2”deki M_S , FM malzemenin doyum mıknatıslanmasını, γ doyum mıknatıslanma sabitini, δ gerilme faktörünü, t_{FM} ise FM tabakasının kalınlığını ifade etmektedir. FM tabakasının çok ince olduğu durumlarda ($t_{FM} < 1$ nm), K_{etkin} içerisindeki K_S değeri çok baskın hale gelmektedir. Böyle bir durumda, K_S 'nin işareti de pozitif (+) olursa FM tabakasının mıknatıslanmasının kolay eksenini örnek düzlemine dik olmak isteyecektir (den Broeder ve ark., 1991; Öztürk ve ark., 2016).

3. KAYDIRMA ETKİSİ (EXCHANGE BIAS)

3.1. Kaydırma Etkisinin Mekanizması ve Hesaplanması

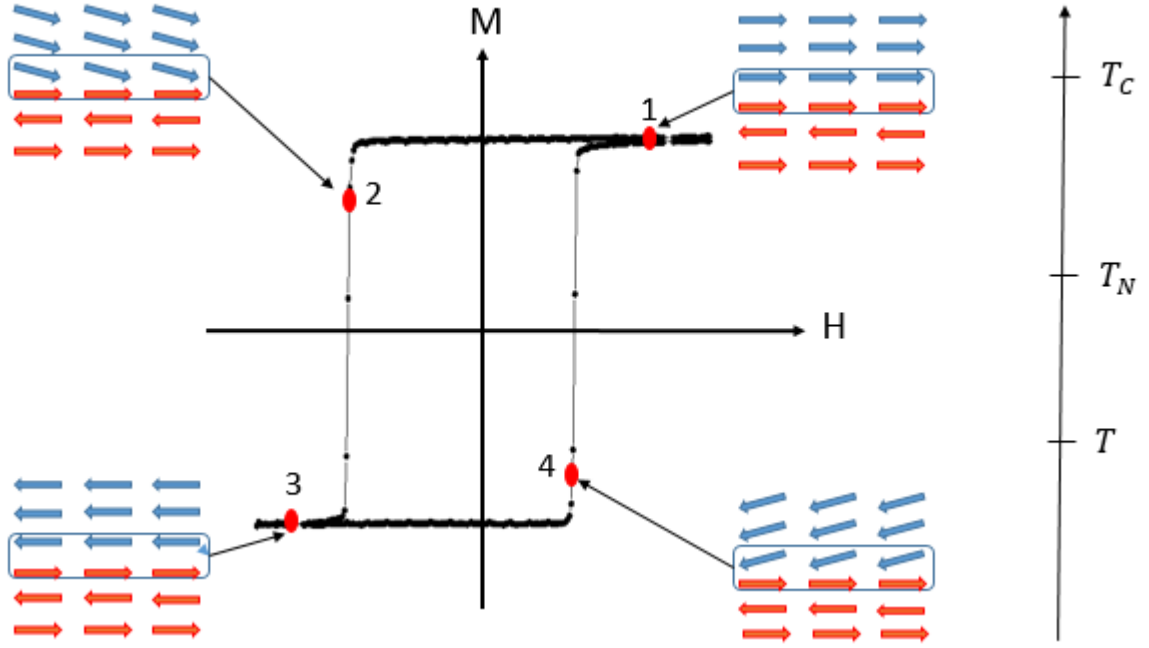
Kaydırma etkisi, 1956 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından Co/CoO parçacıkları üzerinde çalışırken keşfedilmiştir (Meiklejohn ve Bean, 1956; 1957). Bu tarihten itibaren, bilim insanları bu etkinin fiziksel nedenlerini anlamak ve doğru modeli oluşturmak için birçok çalışmalar yapmıştır. Ancak bu etkinin fiziksel nedenleri hala tam olarak anlaşılammıştır (Johnson ve ark., 1996; Noguès ve Schuller, 1999; Sort ve ark., 2003; Garcia ve ark., 2003; Binek ve ark., 2005; Akdoğan ve ark., 2011). Bunun yanı sıra bilgi depolama teknolojisi gibi birçok alanda kullanıldığından dolayı önemini korumaktadır (Sort ve ark., 2005; Öztürk ve ark., 2012; Demirci ve ark., 2012).

Kaydırma etkisi, FM ve AFM malzemelerin ara yüzeyde etkileşmesi sonucu histeresis eğrisinin manyetik alan ekseninde kayması olarak bilinir. FM ve AFM ara yüzeye sahip örnek sistemleri, manyetik alan altında FM malzemenin Curie sıcaklığının (T_C) altında ve AFM malzemenin Néel sıcaklığının (T_N) üstünde bir sıcaklıktan itibaren soğutulduğunda T_N 'nin altında histeresis eğrisinde bir kayma gözlemlenir. Manyetik alan ekseninde olan bu kayma genellikle soğutma esnasında uygulanan alana zıt yönde olmaktadır.



Şekil 3.1. Kesikli çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi (1) 77 K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi (2) ise 77 K'e kadar 10 kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir (Meiklejohn ve Bean, 1956).

Şekil 3.1'de Meiklejohn ve Bean'in Co/CoO için elde ettikleri histeresis eğrileri verilmiştir. Kesikli çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi 77 K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi 77 K'e kadar 10 kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir (Meiklejohn ve Bean, 1956). Manyetik alan altında soğutulan örneğin histeresis eğrisinde kayma görülürken, alansız soğutulan örneğin histeresis eğrisinde herhangi bir kayma gözlenmemiştir. Şekil 3.2'de kaydırma etkisi, tabakaların spin yönelimlerine bağlı olarak gösterilmektedir.



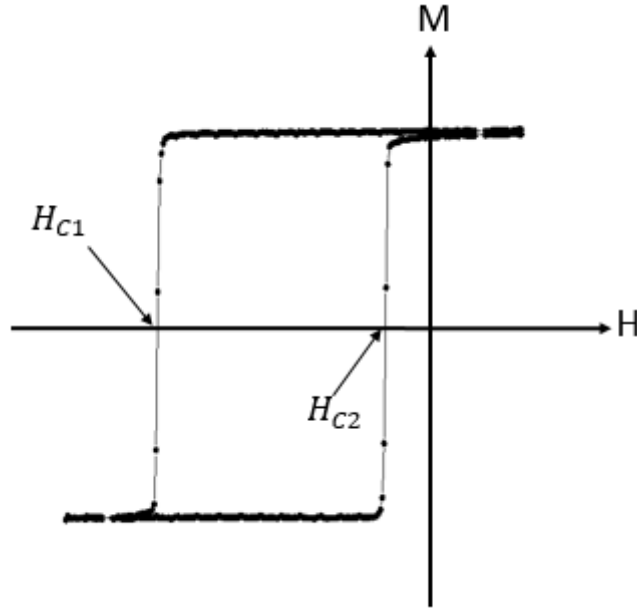
Şekil 3.2. Kaydırma etkisi mekanizmasının manyetik alana bağlı gösterimi.

Alan altında soğutma işlemi sonrasında, x-ekseni boyunca uygulanan manyetik alan taraması esnasında histeresis eğrisinde tabakaların manyetik spin yönelimleri aşağıda adım adım anlatılmıştır.

- Adım 1: Sistem Néel sıcaklığı altına soğutulunca, ferromanyetik ve antiferromanyetik tabakaların manyetik momentleri kendi manyetik düzenlerindedirler. Ferrromanyetik ve antiferromanyetik tabakaların ara yüzeyinde kaydırma etkisi gözlenmekte ve zorlayıcı alan değerleri farklılaşmaktadır. Manyetik alan taramasının pozitif yönde yapıldığı bu durumda, ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri uygulanan alan yönünde yönelmiştir.
- Adım 2: Manyetik alan taramasının ters yönde yapıldığı bu durumda, ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri uygulanan alan yönünde dönmeye başlar. Bu esnada, AFM/FM ara yüzeyindeki kaydırma etkisi ferromanyetik tabakanın momentlerini uygulanan alana ters yönde tutmaya çalışır.
- Adım 3: Ters yönde yeterince büyük bir alanın uygulanmasıyla ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri uygulanan alan yönünde döner ve ferromanyetik tabaka negatif yönde doyuma ulaşır. Ferrromanyetik tabakanın manyetik momentleri uygulanan alana ters yönelmiştir.

- Adım 4: Uygulanan alanın yön değiştirmesiyle ferromanyetik tabakanın manyetik momentleri ilk durumlarına dönmeye başlarlar ve bu işlem malzeme doyuma ulaşıncaya kadar devam eder.

Histeresis eğrisinde FM malzemenin mıknatıslanmasının sıfır olduğu değerdeki manyetik alanlar zorlayıcı alanlar (H_{C1} ve H_{C2}) olarak adlandırılmaktadır. Bu durum Şekil 3.3’de gösterilmektedir. Histeresis eğrisinden elde edilen zorlayıcı alan değerleri ile “Eş. 3.1”de verildiği gibi kaydırma alanı (H_{EB}) hesaplanabilmektedir (Radu, 2005).



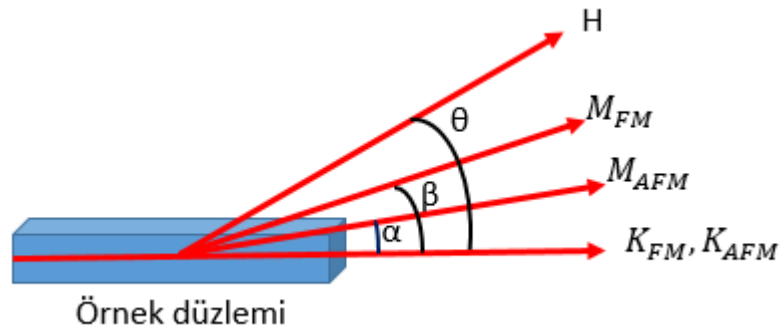
Şekil 3.3. Histeresis eğrisindeki zorlayıcı alan değerleri.

$$H_{EB} = \frac{H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (3.1)$$

3.2. Meiklejohn ve Bean Modeli

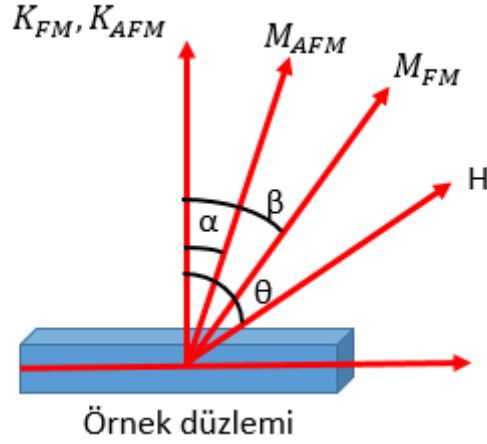
Meiklejohn ve Bean, kaydırma etkisini açıklamak için bazı varsayımlara dayalı model geliştirmişlerdir. Bu varsayımlara göre AFM ve FM malzemeler tekli domen yapıda olup yüzeyleri pürüzsüzdür. Uygulanan manyetik alana bağlı olarak AFM malzemenin spinlerinin yönelimi değişmezken FM malzemenin spinleri bir bütün olarak dönmektedir. FM ve AFM tabakalar ara yüzeyde değiş-tokuş etkileşimiyle etkileşmekte ve bu esnada AFM malzemenin FM malzemeye temas eden yüzeyinde eşleşmemiş manyetik momentler bulunmaktadır. Dolayısıyla ara yüzeyin net manyetik momentli vardır (Berkowitz ve Takano, 1999; Radu, 2005).

Meiklejohn ve Bean, Şekil 3.4'te gösterilen modeli kullanarak mıknatıslanmanın yönelimini açıklamışlardır (Gruyters ve Riegel, 2000). Şekilde belirtildiği gibi, H uygulanan manyetik alanı, M_{FM} ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma yönünü, M_{AFM} antiferromanyetik malzemenin mıknatıslanma yönünü, K_{FM} ile K_{AFM} ise ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemelerin anizotropi yönlerini göstermektedir.



Şekil 3.4. Meiklejohn ve Bean modeline göre FM ve AFM malzemelerin mıknatıslanma yönleri.

Meiklejohn ve Bean modelinde Şekil 3.4'te gösterildiği gibi ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemelerin anizotropi yönleri örnek düzlemine paraleldir (Meiklejohn ve Bean, 1957; Meiklejohn, 1962). Ancak daha sonra dik manyetik anizotropili sistemlerde kaydırma etkisi gözlenmiş ve bu model dik manyetik anizotropili sistemlere de uyarlanmıştır (Lin ve ark., 2010).



Şekil 3.5. Dik manyetik anizotropili sistemler için Meiklejohn ve Bean modeli.

Şekil 3.5'te K_{FM} ve K_{AFM} örnek düzlemine dik olarak gösterilmiştir. α örnek düzleminin normali ile AFM malzemenin mıknatıslanma vektörü arasındaki açıyı, β örnek düzleminin normali ile FM malzemenin mıknatıslanma vektörü arasındaki açıyı ve θ ise örnek düzleminin normali ile uygulanan manyetik alan arasındaki açıyı göstermektedir.

Meiklejohn ve Bean modeline göre kaydırma etkisinin görülebilmesi için FM ve AFM malzemeler ara yüzeyde değiş-tokuş etkileşmesi ile çift oluşturmaktadır ve J_{EB} ile temsil edilen ara yüzey değiş-tokuş integrali tanımlanmaktadır. Dolayısıyla Şekil 3.5'te gösterilen dik manyetik anizotropiye sahip sistemler için toplam enerji ifadesi aşağıdaki eşitlikle verilmektedir (Noguès ve Schuller, 1999; Meiklejohn ve Bean, 1956; Lin ve ark., 2010).

$$E = -\mu_0 H M_{FM} t_{FM} \cos(\theta - \beta) + K_{AFM} t_{AFM} \sin^2(\alpha) + K_{FM} t_{FM} \sin^2(\beta) - J_{EB} \cos(\beta - \alpha) \quad (3.2)$$

“Eş. 3.2”deki ilk terim Zeeman enerjisini, ikinci terim AFM tabakanın anizotropi enerjisini, üçüncü terim FM tabakanın anizotropi enerjisini, son terim ise değiş-tokuş çiftlenim enerjisini ifade etmektedir. Toplam enerji ifadesinin minimum enerji durumu α ve β açılara bağlıdır. α ve β 'ya göre birinci türevler alınıp sifıra eşitlenirlerse, dik mıknatıslanmaya sahip sistemlerde kaydırma etkisinin hangi koşullara bağlı olduğu ve H_{EB} değerini etkileyen parametreler aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial \beta} = 0 \quad (3.3)$$

α 'ya göre türev alındığında “Eş. 3.4” sonucu çıkar.

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \frac{K_{AFM}t_{AFM}}{J_{EB}} \sin(2\alpha) - \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad (3.4)$$

“Eş. 3.4”e göre kaydırma etkisi gözlenebilmesi için AFM malzemenin anizotropi ve kalınlık değerlerinin çarpımı ara yüzey değiş-tokuş integralinden büyük ya da eşit olmalıdır ($K_{AFM}t_{AFM} \geq J_{EB}$). Ters durumlarda ($K_{AFM}t_{AFM} < J_{EB}$) ise H_{EB} değeri sıfır olmaktadır.

Toplam enerji ifadesinin β 'ya göre türevini alıp sıfıra eşitlersek;

$$\frac{\partial E}{\partial \beta} = \mu_0 H M_{FM} t_{FM} \sin(\beta) + K_{FM} t_{FM} \sin(2\beta) + J_{EB} \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilmektedir. “Eş. 3.5” $\beta = 0$ ve π için çözümlerse sıfırlayıcı alan değerleri;

$$H_{C1} = -\frac{2K_{FM}t_{FM} + J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (3.6)$$

$$H_{C2} = \frac{2K_{FM}t_{FM} - J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (3.7)$$

olarak bulunur. Sonuç olarak “Eş. 3.1” kullanılırsa H_{EB} değeri;

$$H_{EB} = -\frac{J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (3.8)$$

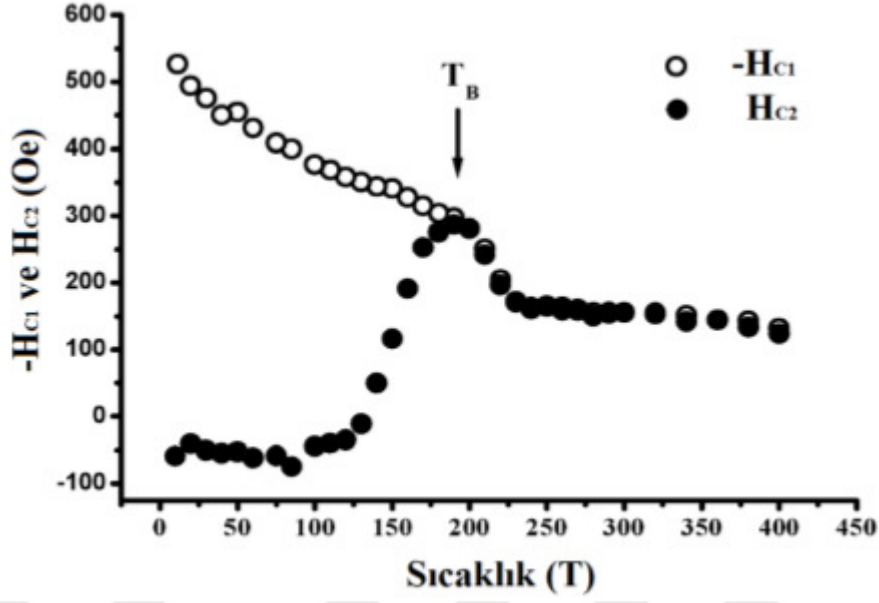
elde edilir. “Eş. 3.8”e göre FM malzemenin mıknatıslanması ve kalınlığı ile ara yüzey değiş-tokuş integrali H_{EB} 'yi etkilemektedir. Güçlü dik mıknatıslanmaya sahip örneklerde spinlerin yönelimi uygulanan manyetik alanla küçük açı yapmaktadır. Yani α ve β açıları küçük değerlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarla görülmüştür ki kuvvetli dik

mıknatıslanan örneklerin H_{EB} 'si daha büyük çıkmaktadır (Sort ve ark., 2005; Ashida ve ark., 2013).

3.3. Kaydırma Etkisinin Sıcaklığa Bağlı Davranışı

Kaydırma etkisi, FM ve AFM malzemelerin ara yüzeyde etkileşmesi ve alan altında soğutulması ile histeresis eğrisinde meydana gelen kayma olarak tanımlanmıştır. Kaydırma etkisini sıcaklık ile FM ve AFM malzemelerin tabaka kalınlıkları etkilemektedir.

FM ve AFM malzemelerde manyetik düzen elde edebilmek için belirli sıcaklık değerleri vardır. FM malzemeler Curie sıcaklığının (T_C) üzerinde paramanyetik düzende iken AFM malzemeler Néel sıcaklığının (T_N) üzerinde paramanyetik düzendedirler. Kaydırma etkisi görebilmek için AFM malzemenin spinleri istenilen ekseninde anti paralel olarak dizilmelidir. Bunun için T_N 'den daha yüksek sıcaklıklardan başlanılarak manyetik alan altında soğutma işlemi yapılmalıdır. Sistem yüksek sıcaklıklardan Néel sıcaklığına soğutulurken antiferromanyetik tabakanın kendi spin düzeninde olmaması nedeniyle tabakalar arasında herhangi bir etkileşme gerçekleşmemekte ve bu nedenle kaydırma etkisi gözlenmemektedir. Sistem sıcaklığının Néel sıcaklığı civarında olduğu durumda kaydırma etkisi görülmesi beklenirken, AFM malzemenin içerisinde farklı fazların olmasından dolayı T_N sıcaklığının altında kaydırma etkisi görülmüştür (Ambrose ve Chien, 1998; Öztürk ve ark., 2012a; 2012b; Demirci ve ark., 2012; Akdoğan ve ark., 2015). Bu durum antiferromanyetik tabakanın tam olarak Néel sıcaklığı civarında manyetik düzene girmediğinin önemli bir göstergesidir. Kaydırma etkisinin gözlemlendiği bu sıcaklık değerine engelleme (blocking) sıcaklığı adı verilmiş ve T_B ile gösterilmiştir. Şekil 3.6'da, AFM CoO tabakasına sahip bir FM/AFM sisteminin T_B 'si gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Zorlayıcı alanların sıcaklığa bağlı değişimi (Radu, 2005).

Exchange bias ölçümlerinde zorlayıcı alan değerleri (H_{C1} ve H_{C2}) şekilde görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla birlikte birbirlerine yaklaşmakta ve engelleme sıcaklığına (T_B) gelindiğinde zorlayıcı alan değerleri birbirlerine eşit olmaktadır.

3.4. Kaydırma Etkisinin FM ve AFM Kalınlığına Bağlı Davranışı

Kaydırma etkisinin bağlı olduğu etkenlerden birisi de FM ve AFM malzemelerin kalınlıklarıdır (Hagedorn, 1967; Mınaru ve ark., 1980; Jungblut ve ark., 1994; Noguès ve ark., 1996; Sang ve ark., 1999; Xu ve ark., 2011). FM ve AFM tabakalardan oluşan sistem için H_{EB} alanı “Eş. 3.8”de verilmektedir. “Eş. 3.8” incelendiğinde H_{EB} alanı ile ferromanyetik malzemenin kalınlığı (t_{FM}) arasındaki ilişki “Eş. 3.9”da gösterilmiştir.

$$H_{EB} \approx \frac{1}{t_{FM}} \quad (3.9)$$

“Eş. 3.9”a göre, FM ve AFM tabakalardan oluşan sistem için H_{EB} alanı ferromanyetik tabaka kalınlığı ile ters orantılıdır. H_{EB} alanı ile AFM tabaka kalınlığı arasında ise herhangi bir bağıntı bulunmamakla beraber yapılan çalışmalar AFM tabakanın kalınlığının artışı ile H_{EB} alanının hacimsel (bulk) değerlere kadar arttığını

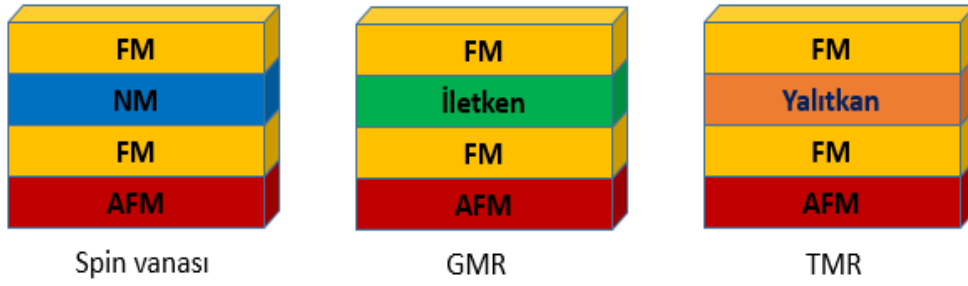
göstermektedir (Sang ve ark., 1999; Shi ve ark., 2014). Ayrıca konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalar AFM tabaka kalınlığı ile H_{EB} alanı arasında “Eş. 3.10”da gösterildiği gibi bir ilişki daha olduğunu göstermektedir (Florin, 2005; Shiratsuchi ve ark., 2010; 2011).

$$H_{EB} = \begin{cases} \neq 0, & K_{AFM}t_{AFM} > J_{EB} \\ = 0, & K_{AFM}t_{AFM} < J_{EB} \end{cases} \quad (3.10)$$

“Eş. 3.10”da K_{AFM} terimi antiferromanyetik malzemenin anizotropisini, t_{AFM} terimi antiferromanyetik malzemenin tabaka kalınlığını ve J_{EB} terimi ise ara yüzey değiş-tokuş integralini ifade etmektedir. Buna göre AFM’nin manyetik anizotropisi ile AFM tabaka kalınlığının çarpımı ara yüzey değiş-tokuş integralinden büyükse exchange bias alanı gözlenmektedir.

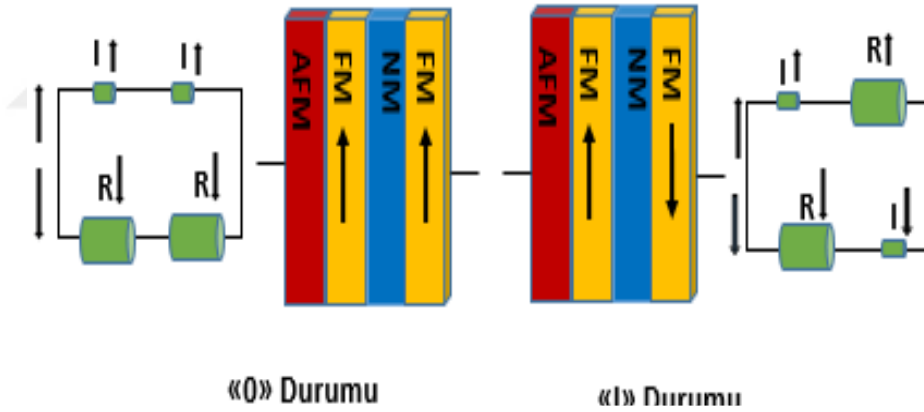
3.5. Kaydırma Etkisinin Teknolojik Uygulamaları

Kaydırma etkisi teknolojik açıdan spin vanalarında, manyetik sensörlerde, sabit disk okuyucu başlıklarında, MRAM’lerde, bilgi depolama ve kayıt cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür cihazların üretilmesinde rol oynayan temel özellik ise kendilerini oluşturan nano boyuttaki tabakalar arası etkileşimlerdir. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi ferromanyetik tabakalar arasına manyetik olmayan bir malzeme konulduğunda spin vanası, iletken bir malzeme konulduğunda Dev manyeto-direnç (GMR) yapısı, yalıtkan bir malzeme konulduğunda ise Tünelleme manyeto-direnç (TMR) yapısı elde edilmektedir (Baibich ve ark., 1988; Binasch ve ark., 1989; Moodera ve ark., 1995; Daughton, 1997; Jeong ve ark., 2004; Yıldız, 2004). Bu yapılardaki antiferromanyetik tabakanın işlevi, kendisiyle temas halinde olan ferromanyetik tabakanın mıknatıslanmasını sabit tutmaktır. Diğer ferromanyetik tabakanın mıknatıslanması ise serbesttir.



Şekil 3.7. Spin vanası, GMR ve TMR yapılarının temsili gösterimleri.

Spin vanalarında manyeto-direnç etkisi kullanılmakta ve bu etki Şekil 3.8’de gösterildiği gibi ferromanyetik tabakaların mıknatıslanmalarının birbirlerine göre paralel veya anti paralel olması durumunda değişiklik göstermektedir. Ferromanyetik tabakaların mıknatıslanmaları birbirlerine paralel ise ölçülen elektriksel direnç azalmakta (“0” durumu), anti paralel ise sistemin elektriksel direnci artmaktadır (“1” durumu).



Şekil 3.8. Spin vanalarında düşük “0” ve yüksek “1” direnç durumu.

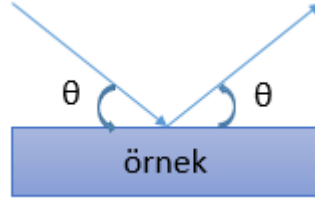


4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde büyütülen ince filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerini belirlemek için kullanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır.

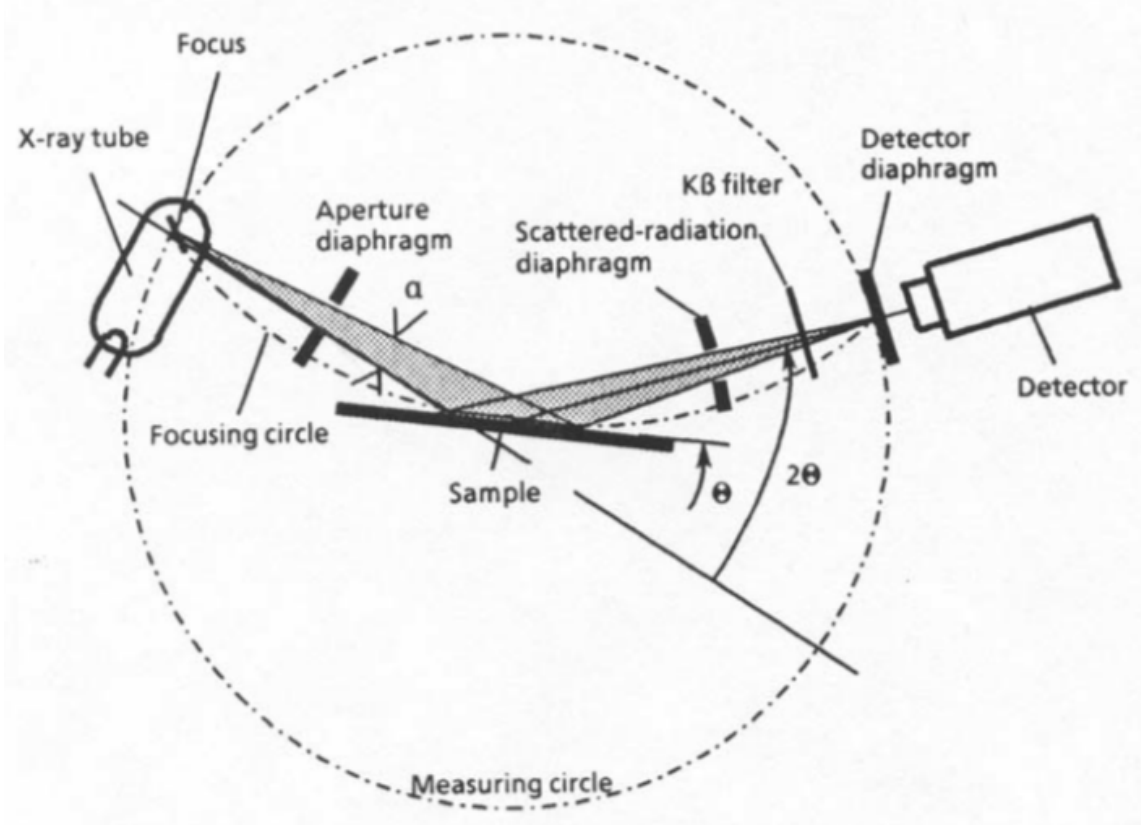
4.1 X-ışını Yansıması (XRR) Tekniği

X-ışını yansıması tekniği, tek katlı ve çok katlı ince filmlerde her bir tabakaya ait elektron yoğunluğunun (density), tabaka kalınlıklarının (layer thickness), tabakalar arası ve yüzey pürüzlüklerinin (roughness) belirlenmesinde kullanılan, gelen x-ışınının yüzeyden yansıtılarak şiddetindeki değişim esasına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemle tek katlı, çok katlı veya amorf yapıları ince filmler zarar görmeden ölçülebilmekte, 5 Å ile 400 nm arasındaki tabaka kalınlıkları ve 0 Å-20 Å arası pürüzlükler belirlenebilmektedir. Bu yöntemde örneğe gelen x-ışınının örneğin yüzeyi ile yaptığı açı (geliş açısı) çok önemlidir (Yasaka, 2010). Bu durum Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



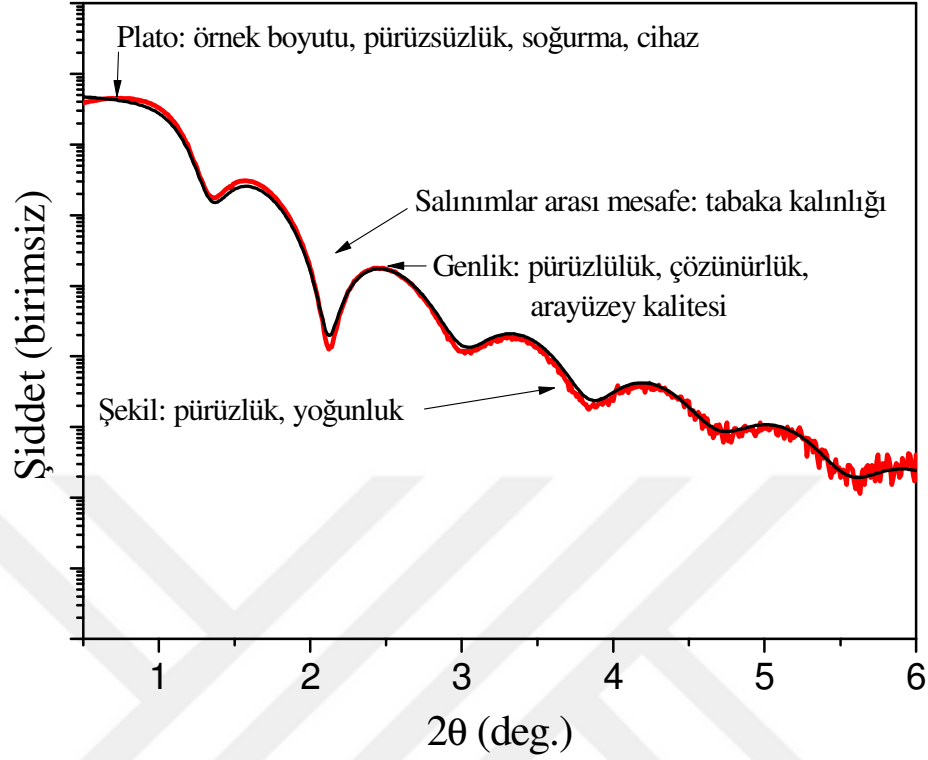
Şekil 4.1. X-ışınının örnekten yansıma durumu.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi ışığın geliş açısı θ , kritik açı olarak tabir edilen açıdan daha küçük ise gelen ışın örnek yüzeyinden direk olarak yansıma yapar. Bu durumda örneğin içerisinden bir bilgi almak imkânsız olur. Eğer geliş açısı θ , kritik açıya eşit ise yansıyan ışın örnek yüzeyinde ilerler. Dolayısıyla örnekle ilgili bilgi alabilmek için gelen ışının bir kısmının kırılması ve örnek içerisindeki yüzeylerden yansıma yapabilmesi gereklidir. Bunun için ise gelen ışığın, kritik açıdan daha büyük bir açıyla örneğe gönderilmesi gerekmektedir. Şekil 4.2’de XRR ölçüm düzeneği şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Bruker AXS D5000 difraktometresinin şematik görünümü (Anonim, 2017a).

XRR tekniği ile x-ışını şiddetindeki değişimin açığa bağlı grafiği çizdirilirse grafikte saçaklar görülecektir. Bunlar Kiessig saçakları olarak bilinmektedir (Kiessig, 1931). Bu saçakların davranışına göre örnek hakkında bilgi edinmek mümkündür. Bu durum Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



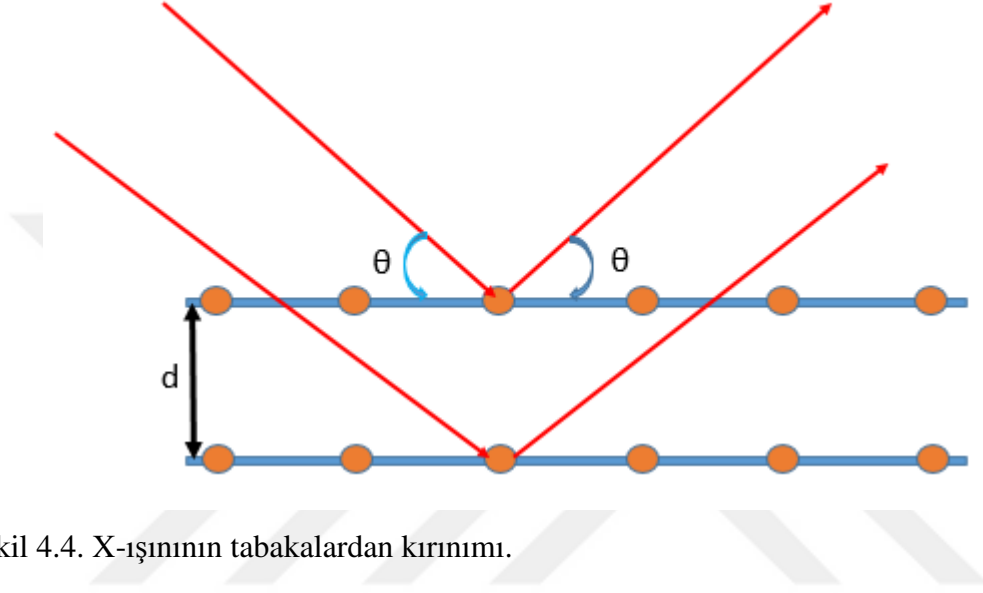
Şekil 4.3. Yansıma eğrisi ve verdiği bilgiler.

4.2. X-ışını Kırınımı (XRD) Tekniği

X- ışını kırınımı tekniği, örneğe gelen x-ışını açısının değişimiyle örneğin kristal yapısını analiz etmeye yarayan bir tekniktir. Bu teknikle kristal yapının örgü parametresi, kristal yönelimi ve kristalin tekli ya da çoklu kristal olup olmadığı belirlenebilir.

X-ışını, kısa dalgaboyuna sahip elektromanyetik bir ışımadır. 1895 yılında Alman Fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından keşfedilmiştir. Keşfedildiğinde mahiyeti tam olarak açıklanamadığı için X ışını olarak adlandırılmıştır. 1901 yılında Röntgen'e X-ışınlarını keşfinden dolayı Nobel Fizik Ödülü verilmiştir. Daha sonra 1912 yılında Max Von Laue, kristaller düzenli dizilmiş atomlardan oluşuyorsa ve X-ışınlarının dalga boyları atomlar arası mesafeye eşit ise X-ışınlarının kristalden kırınımının mümkün olabileceğini öne sürmüştü ve bu teorisinin Friedrich ve Knipping tarafından ispatlanmasıyla 1914 yılında Nobel ödülü almıştır.

Bu süreçle birlikte başlayan XRD sisteminin gelişimi, baba ve oğul Bragglar'ın çok önemli katkılarıyla devam etmiştir (Kittel, 2005). Bragglar kristallerin paralel atom düzlemlerinden oluştuğunu göz önüne alarak gelen her bir elektromanyetik dalganın geldikleri düzlemden yansımaya uğradığını ifade etmişlerdir. Şekil 4.4'te Braggların açıkladıkları kırınım olayı şematik olarak gösterilmektedir.



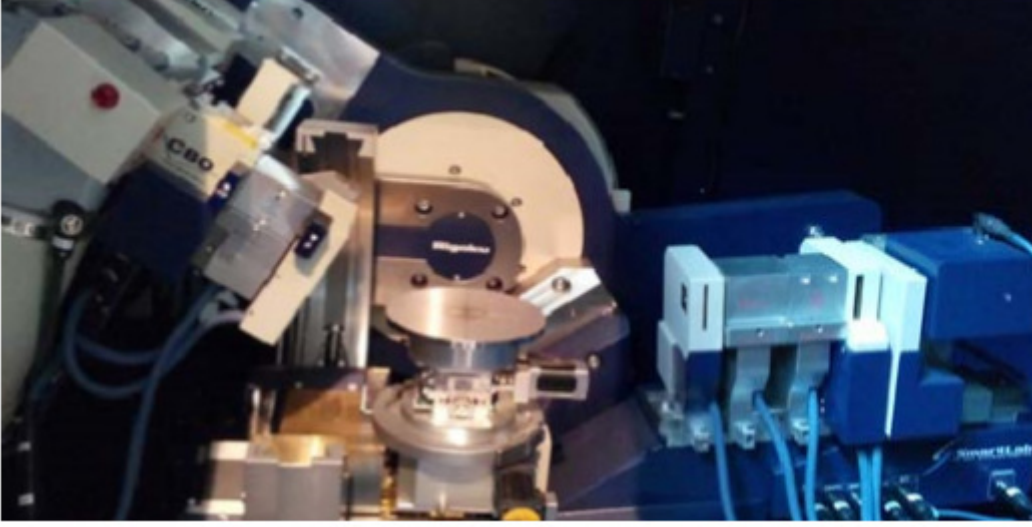
Şekil 4.4. X-ışınının tabakalardan kırınımı.

“Eş. 4.1”de Bragg yasası verilmiştir. Buradaki d düzlemler arası mesafeyi, θ , X-ışınının örneğe geliş açısını ve λ , X-ışınının dalga boyunu vermektedir.

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

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi periyodik yapıya gelen X-ışınları iki farklı düzlemden yansımaktadır. Burada önemli olan örnekten yansıyan X-ışınlarının yapıcı girişim yapıyor olmasıdır.

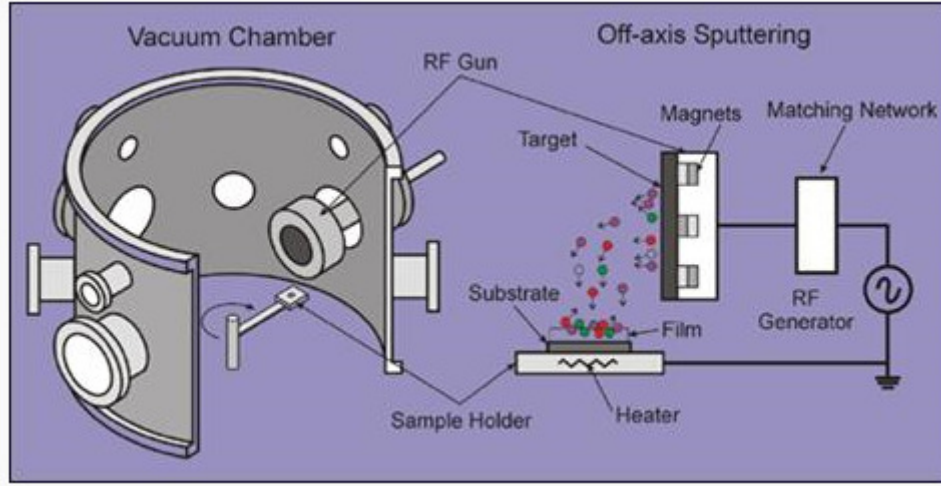
Bu tez çalışmasında Şekil 4.5'te gösterilen, Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Nanomanyetizma ve Spintronik Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku Smartlab X-ışını Kırınımı cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerde tek dalga boyuna sahip ($1,54 \text{ \AA}$) Cu- K_{α} X-ışını kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan XRD cihazı.

4.3. Magnetron Saçırma Tekniği

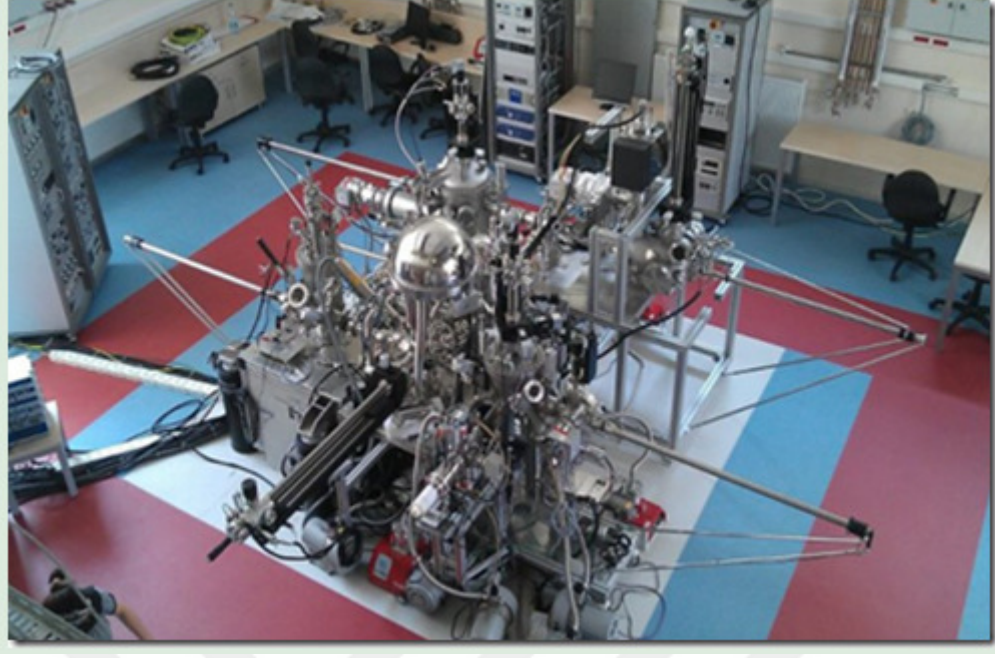
Magnetron saçırma tekniği, iyon tabancası veya plazma yardımıyla hedef malzeme (target) yüzeyinin yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilmesi, bunun sonucunda koparılan atomların buhar fazında istenilen altyaş üzerine kaplanması esasına dayanmaktadır. İlk defa 1852 yılında Grove tarafından doğru akım (dc) parıltı deşarj (glow discharge) tüpü ile yapılmıştır. İlk zamanlarda, katodun bozulmasına sebep olduğu için benimsenmemesine rağmen günümüzde ince film büyütme, yüzey temizleme ve yüzey aşındırma gibi kullanım alanlarına sahiptir. Ayrıca optik özelliklerinden dolayı girişim filtreleri ve optik diskler gibi alanlarda da kullanılmaktadır (Smallman ve Ngan, 2007). Şekil 4.6'da magnetron saçırma sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Magnetron saçırma sisteminin şematik gösterimi (Anonim, 2017b).

Magnetron saçırma tekniği ile kaplama, basınç değeri $\sim 10^{-8}$ mbar civarında olan vakuma alınmış bir hazne içerisinde yapılmaktadır. Sisteme Ar gazı verildiğinde ise bu değer $\sim 10^{-3}$ mbar seviyesine kadar yükselmektedir. Sistem istenilen basınç değerine ulaşıncaya, hedef malzemeye dc veya radyo frekans (rf) gerilim uygulanır. Uygulanan gerilim altında anoda doğru hızlandırılan elektronlar, Ar atomlarıyla çarpışarak Ar atomlarının iyonize olmasına neden olurlar. İyonize olan Ar atomları hedef malzemenin altında bulunan mıknatıslarla hedef malzemeye yakın bölgelerde tutulurlar.

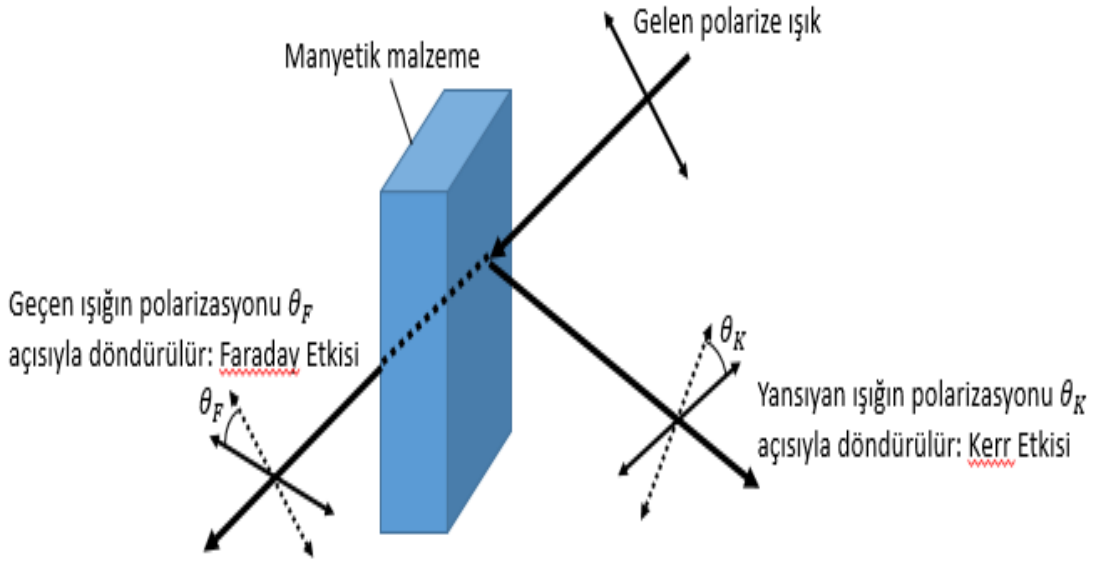
Bu kaplama tekniğinde alttaş yüzeyine kontrolsüz bir şekilde iyon çarpmasını engellemek için magnetron kullanılmaktadır. Böylelikle düşük ısı sığalı plazma elde edilerek örneklerin bozulması engellenmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan ince filmler Şekil 4.7’de görülen Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü’nde bulunan ince film hazırlama ve analiz sisteminde büyütülmüşlerdir.



Şekil 4.7. Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan ince film hazırlama ve analiz sistemi.

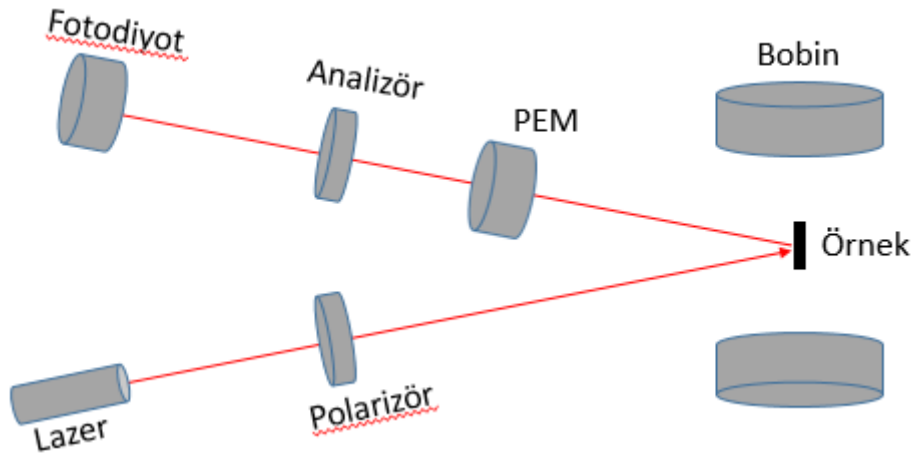
4.4. Manyetik-Optik Kerr Etkisi (MOKE) Tekniği

Işık ve manyetizma arasındaki etkileşim ilk defa 1845 yılında Faraday tarafından deneysel olarak gözlenmiştir. Buna göre manyetik alan etkisindeki bir örneğin içinden geçen ışığın polarizasyonundaki değişimin, malzemenin mıknatıslanması ile doğru orantılı olduğu belirlenerek Faraday etkisi olarak isimlendirilmiştir (Faraday, 1846). Daha sonra 1876 yılında Kerr tarafından, manyetik alan etkisindeki malzemeden yansıyan ışığın polarizasyonundaki değişim ile malzemenin mıknatıslanmasının doğru orantılı olduğu gösterilmiş ve Kerr etkisi adı verilmiştir (Kerr, 1877). Şekil 4.8'de Faraday ve Kerr etkileri gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Işığın manyetik malzemeyle etkileşmesi: Faraday ve Kerr etkileri.

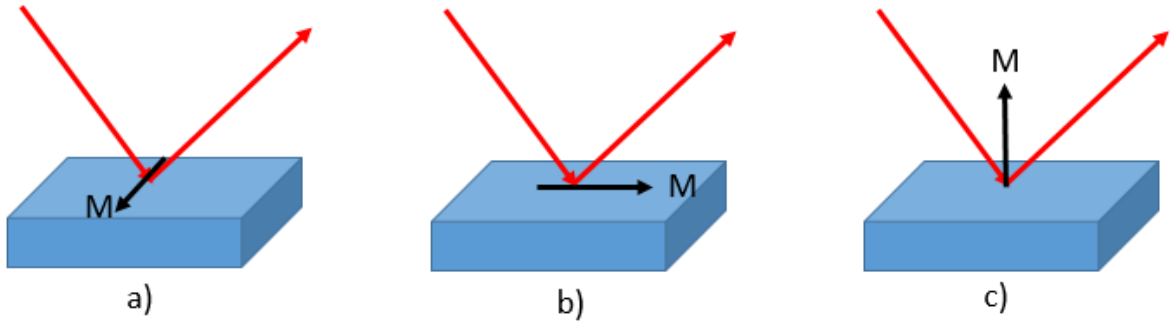
Manyetik-optik Kerr etkisi tekniği, manyetik alan etkisi altında bulunan manyetik özelliğe sahip bir örneğe polarize ışığın gönderilmesi ve örnekten yansıyan ışığın polarizasyonundaki değişimin belirlenmesi esasına dayanan bir tekniktir. Çünkü örnekten yansıyan ışının polarizasyonundaki değişim, malzemenin mıknatıslanmasının bir ölçüsüdür (Akdoğan, 2004). Bu teknikle manyetik bir malzemenin histeresis eğrisinin elde edilişi Şekil 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. MOKE ölçüm düzeneği.

Şekil 4.9’da gösterildiği gibi manyetik bir malzeme, manyetik alan oluşturan bobinler arasında yerleştirilmekte ve üzerine polarize lazer ışığı düşürülmektedir. Örnekten yansıyan ışın analizörden geçirilerek detektöre düşürülmekte ve bilgisayar yardımıyla histeresis eğrisi elde edilmektedir (Li, 2010).

Manyetik-optik Kerr etkisi tekniğinde malzemenin mıknatıslanma yönüne göre enine, boyuna ve polar olmak üzere üç türlü ölçüm yapmak mümkündür. Eğer örneğin mıknatıslanması, Şekil 4.10.a)’da gösterildiği gibi örnek düzleminde y-ekseni boyunca ise enine (Transverse) manyetik-optik Kerr etkisi (T-MOKE), Şekil 4.10.b)’de gösterildiği gibi mıknatıslanma örnek düzleminde x-ekseni boyunca ise boyuna (Longitudinal) manyetik-optik Kerr etkisi (L-MOKE) ve Şekil 4.10.c)’de gösterildiği gibi mıknatıslanma örnek düzlemine dik yönde ise kutupsal (Polar) manyetik-optik Kerr etkisi (P-MOKE) olarak adlandırılmaktadır.



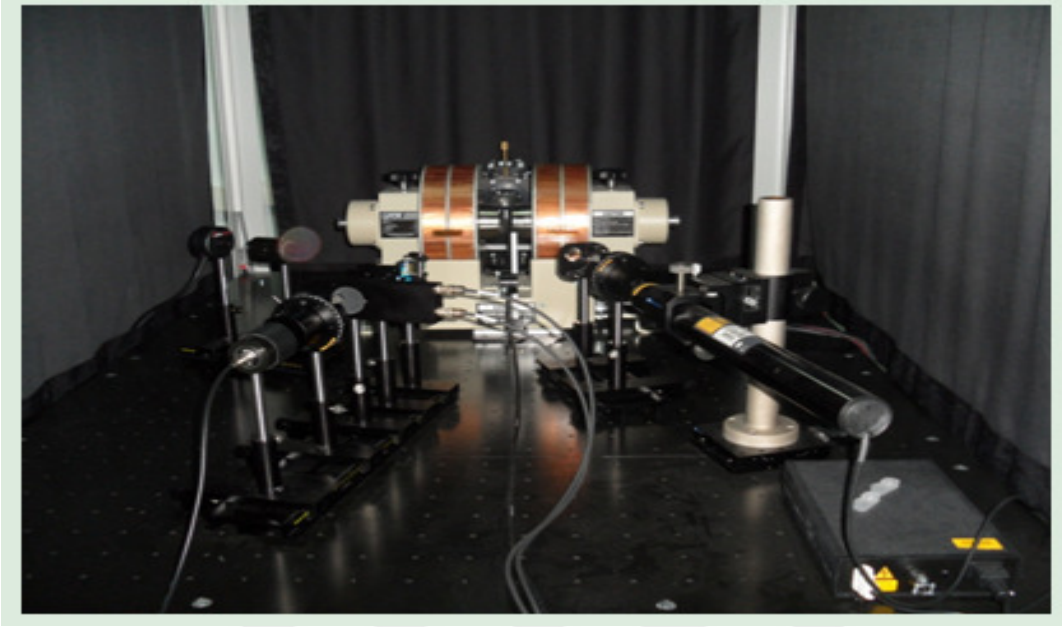
Şekil 4.10. Manyetik-optik Kerr etkisi ölçüm geometrileri. a) T-MOKE, b) L-MOKE, c) P-MOKE ölçüm geometrileri.

Manyetik-optik Kerr etkisi tekniğinde, yukarıda belirtilen ölçüm çeşitlerinden en çok kullanılanları polar ve boyuna Kerr etkileridir.

Manyetik-optik Kerr etkisi ölçümlerinde lazer ışını metallerde yaklaşık 15-20 nm derinliğe girebilmekte ve diamanyetik katkıların olmadığı histeresis eğrisi elde edilebilmektedir (Erskine ve Stern, 1973; Demirci ve ark., 2015). Ayrıca bu ölçüm tekniği sayesinde manyetik domenleri görüntüleme imkânı da bulunmaktadır (McCord ve ark., 1995; Jeffrey, 2015).

Bu tez çalışmasında, Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü’nde bulunan Manyetik-optik Kerr etkisi (MOKE) ölçüm sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.11’de

gösterilen Manyetik-optik Kerr etkisi sistemiyle oda sıcaklığında L-MOKE ve P-MOKE ölçümleri yapılabilmektedir.



Şekil 4.11. Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan MOKE sistemi.

4.5. Anormal Hall Etkisi (AHE)

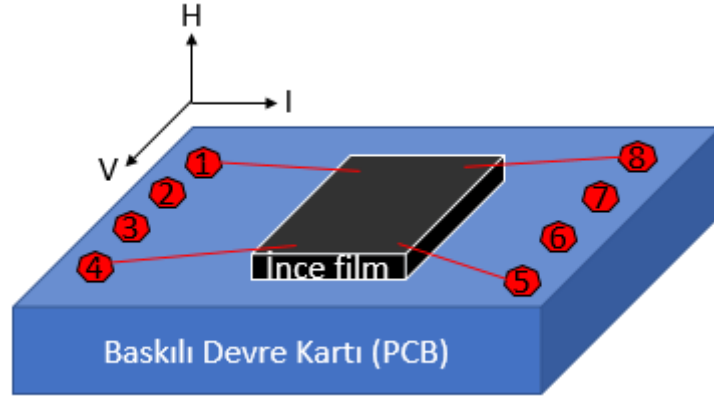
İçerisinden akım geçirilen bir iletkende, akıma ve örnek düzlemine dik yönde bir manyetik alan uygulandığında, akıma ve uygulanan manyetik alana dik yönde bir elektrik alan oluşmakta ve elektrik alan etkisiyle yükler kenarlarda toplanmaktadır. Kenarlarda biriken bu yükler arasındaki potansiyel fark Hall voltajı olarak bilinmektedir. Normal Hall olayı olarak tanımlanan bu durum 1879 yılında Edwin Herbert Hall tarafından keşfedilmiştir (Hall, 1879; Kittel, 2005).

Anormal Hall Etkisi yönteminde, normal Hall olayına ek olarak ferromanyetik malzemenin mıknatıslanması da hesaba katılmaktadır (Nagaosa ve ark., 2010). Anormal Hall Etkisi ilk defa 1881 yılında yine Hall tarafından keşfedilmiştir (Hall, 1881). Ferromanyetik malzemelerde Hall voltajı ifadesi “Eş. 4.2”deki gibidir (Haan ve ark., 1991). Eşitlikte I uygulanan akımı, H uygulanan manyetik alanı, M malzemenin mıknatıslanmasını, t filmin kalınlığını, R_A anormal Hall katsayısını, μ_o boşluğun

geçirgenliğini, θ uygulanan alanın örnek yüzeyinin normalinden sapma açısını ve β mıknatıslanmanın örnek yüzeyinin normalinden sapma açısını göstermektedir.

$$V_H = \left(\left(\frac{R_O I}{t} \right) H \cos \theta + \left(\frac{R_A \mu_O I}{t} \right) M \cos \beta \right) \quad (4.2)$$

Bu tez çalışmasında Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan MOKE sistemine entegre edilmiş transport sistemi kullanılmıştır (Demirci, 2016). Sıcaklığa bağlı AHE ölçümleri için, büyütülen ince filmler baskılı devre (PCB) kartı üzerine Şekil 4.12'de gösterildiği gibi çift taraflı bant ile yerleştirilmektedir. PCB üzerindeki 1, 4, 5 ve 8 numaralı kontak noktalarından ince film yüzeyine iletken bakır teller, gümüş pasta yardımıyla sabitlenmektedir.



Şekil 4.12. AHE ölçümü için kontakların gösterimi.



5. BULGULAR

Bu bölümde 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. XRR ile örneklerin kalınlık, yoğunluk ve ara yüzey pürüzlülük değerleri belirlendi. Daha sonra örneklerin manyetik özellikleri manyeto-optik Kerr etkisi (MOKE) ve AHE metotları ile incelendi. AHE ile elde edilen sonuçlar MOKE ile ölçülen sonuçlarla karşılaştırıldı.

5.1. Giriş

Günümüz teknolojik cihazlarında exchange bias etkisi için, antiferromanyetik malzeme olarak Nèel sıcaklığı oda sıcaklığının üzerinde olan IrMn tercih edilmektedir (Kohn ve ark., 2013; Vinai ve ark., 2013). Bununla birlikte Ir elementi ile Mn elementinin karışım oranları Nèel sıcaklığını (T_N) ve engelleme sıcaklığını (T_B) değiştirebilmektedir. Bu tez çalışmamızda antiferromanyetik malzeme olarak kullanılan IrMn bileşiğindeki Ir ve Mn karışım oranları, yüksek exchange bias etkisi göz önüne alınarak % 20 Ir elementi ile % 80 Mn elementi olarak belirlenmiştir (Tsunoda ve ark., 2006; Aley ve O'Grady, 2011). Antiferromanyetik malzeme olarak IrMn tercih edilmesinin sebebi sadece yüksek engelleme sıcaklığı ve Nèel sıcaklığının oda sıcaklığı üzerinde oluşu değildir. Düşük kritik kalınlığı ve oksitlenmeye karşı göstermiş olduğu yüksek direnç de IrMn kullanımını teşvik etmektedir (van Dijken ve ark., 2005; Vinai ve ark., 2013).

Ferromanyetik malzeme olarak Co elementinin, antiferromanyetik malzeme olarak IrMn bileşiğinin kullanıldığı dik mıknatıslanmaya sahip örneklerle yapılan çalışmalarda, antiferromanyetik IrMn tabakası genellikle ferromanyetik Co tabakasının üzerine büyütülmüştür (Sort ve ark., 2004; 2005a; 2005b; van Dijken ve ark., 2005; Romanens ve ark., 2005; Malinowski ve ark., 2007; Czapkiewicz ve ark., 2007; Kim ve ark., 2007; Lechevallier ve ark., 2009; Tsai ve ark., 2014; 2015). Ancak çok az çalışmada IrMn tabakası ferromanyetik katmanın altında büyütülmüş ve dik

mıknatıslanma ile exchange bias etkisi gözlenmiştir (Ali ve ark., 2003; van Dijken ve ark., 2005; Sort ve ark., 2005; Castro ve ark., 2011).

Bu tez çalışması kapsamında büyütülen örneklerde antiferromanyetik IrMn tabakası, ferromanyetik Co tabakasının altında büyütülmüştür. Çünkü van Dijken ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada yüksek sıcaklıklara kadar ısıtma ($T < 500$ K) ve yüksek manyetik alan altında (5 T) soğutma işlemlerinde IrMn tabakasının üstte olduğu durumda dik exchange bias etkisinde azalma görülürken, IrMn tabakasının altta olduğu örnekte dik exchange bias etkisinde artış gözlenmiştir (van Dijken ve ark., 2005).

Bu tez çalışmasında Si (111) alttaş üzerine büyütülen Pt/Co/IrMn ince film sistemi üzerine yoğunlaşıldı. Çünkü bugüne kadar yapılan çalışmalarda alttaş üzerine büyütülen Pt/Co/IrMn ince filmlerinde Pt ve Co tabakaları tekrarlı yapıdan (multilayer) oluşmaktaydı (Sort ve ark., 2004; 2005a; 2005b; van Dijken ve ark., 2005; Lechevallier ve ark., 2009; Kim ve ark., 2007; Czapkiewicz ve ark., 2007; 2008; Tsai ve ark., 2014; 2015; Romanens ve ark., 2005; Malinowski ve ark., 2007; Castro ve ark., 2011; Laval ve ark., 2007; Chen ve ark., 2008; 2014; Wang ve ark., 2012).

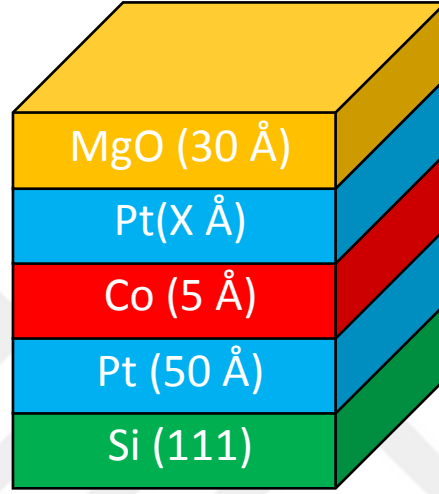
5.2. Örneklerin Büyütülme Şartları

Örnekler, yüzeyi oksitlenmiş Si (111) alttaş üzerine yüksek vakum altında ($< 10^{-8}$ mbar) magnetron saçtırmalı kaplama tekniği ile büyütüldü. Filmlerin büyütülmesi esnasında sistemin basıncı Ar gazı ile 1.3×10^{-3} mbar civarında tutuldu. Büyütme öncesi Si (111) alttaşı 320 °C sıcaklıkta yarım saat ısıtıldıktan sonra Pt, IrMn, Co ve MgO tabakaları oda sıcaklığında (RT) sırasıyla 10 W DC, 30 W DC, 10 W RF ve 20 W RF güçler kullanılarak hazırlandı. Örnekleri koruyucu yalıtkan MgO tabakası, ince filmlerin büyütülmesi esnasında dışarıdan sisteme oksijen verilmeyerek, saçtırma sisteminde var olan MgO hedef malzemesi kullanılarak kaplandı.

5.3. Pt Katmanı Üzerine Yapılan Çalışmalar

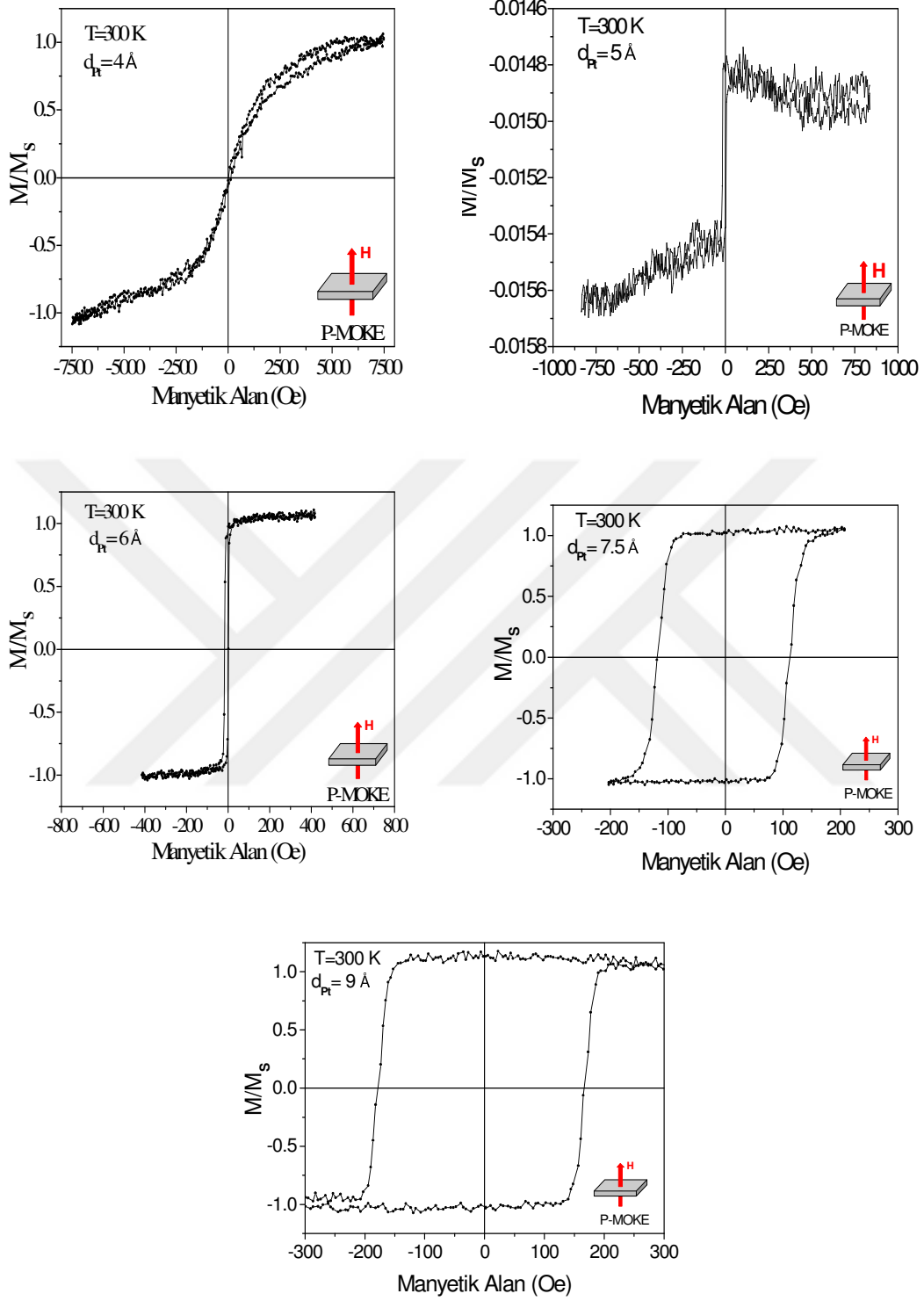
İstenilen film yapısına geçilmeden önce ferromanyetik Co tabakasının ince olması ve üzerine konulacak koruyucu MgO tabakadaki oksijen ile bağ yaparak manyetik özelliğini kaybetmesi olasılığı bulunmaktadır. Bundan dolayı Co ile MgO

tabaka arasına Pt katman eklenmiş, Co tabakasının zamanla oksitlenmemesi için kullanılacak Pt katmanının kalınlığı üzerine çalışılmıştır. Bunun için Si (111) alt taşlar üzerine Şekil 5.1’de gösterilen Pt kalınlığının sırasıyla $x=4 \text{ \AA}$, 5 \AA , 6 \AA , 7.5 \AA ve 9 \AA olduğu Pt (50 \AA) / Co (5 \AA) / Pt (x) / MgO (30 \AA) ince filmleri büyütüldü. Örnek düzlemine dik olarak uygulanan manyetik alan altında MOKE yöntemiyle büyütülen ince filmlerin histeresis eğrileri elde edildi.



Şekil 5.1. Co tabakasının oksitlenmesini önlemek için Pt kalınlığına bağlı olarak büyütülen ince filmler.

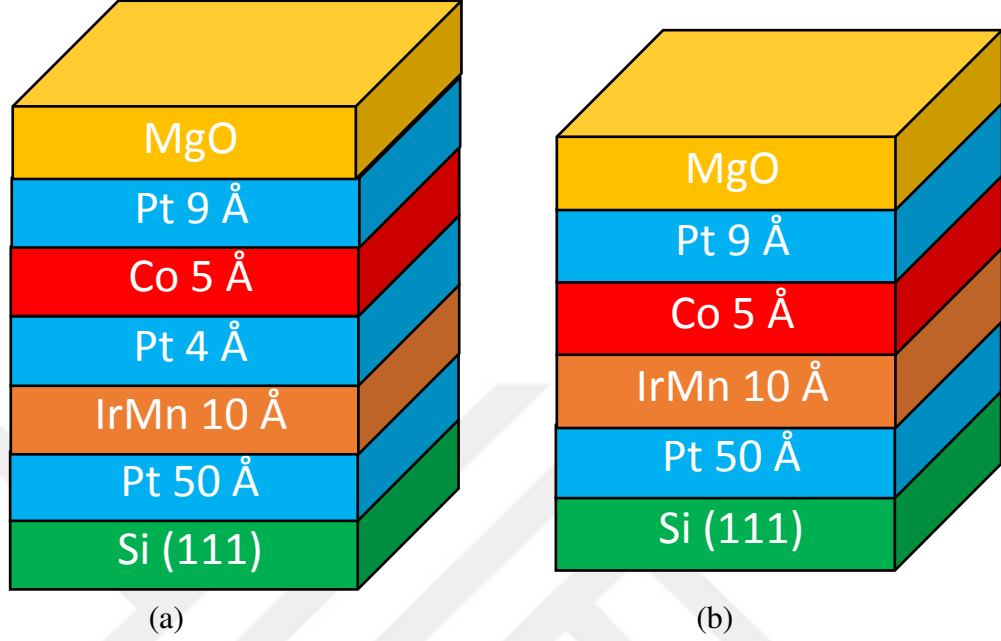
Büyütülen ince filmlerin MOKE yöntemiyle elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Pt kalınlığına bağlı olarak en iyi sonuç Pt kalınlığının 9 \AA olması durumunda elde edilmektedir. Pt kalınlığının 4 \AA , 5 \AA , 6 \AA ve 7.5 \AA olması durumunda film düzlemine dik yönde uygulanan manyetik alan altında MOKE ölçümleri sonrası yapılan AHE ölçümlerinde histeresis eğrilerinin giderek daraldığı ve 2-3 gün içinde kaybolduğu gözlenmiştir. Pt kalınlığının 9 \AA olması durumunda ise Co tabakanın oksitlenmesini engellediği, bir gün sonra ve üç gün sonra yapılan mıknatıslanma ölçümlerinde histeresis olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2. Co tabakasının oksitlenmesini önlemek için Pt tabakasının kalınlığına bağlı olarak büyütülen ince filmlerin MOKE ölçüm sonuçları.

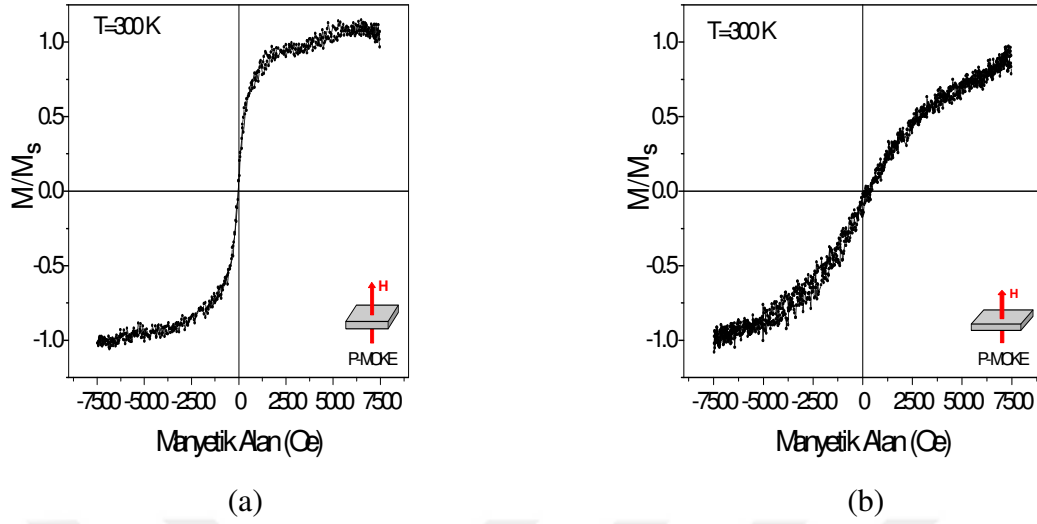
İstenilen film yapısına geçilmeden önce Pt katmanı üzerine yapılan diğer bir çalışma ise antiferromanyetik IrMn tabakası ile ferromanyetik Co tabakası arasında Pt

tabaka eklenmesi üzerine olmuştur. Bunun için Si (111) alttaşlar üzerine Şekil 5.3'te gösterilen ince filmler büyütüldü.



Şekil 5.3. Antiferromanyetik IrMn tabakası ile ferromanyetik Co tabakası arasında (a). Pt tabaka eklendiği, (b). Pt tabaka eklenmediği durumda büyütülen ince filmler.

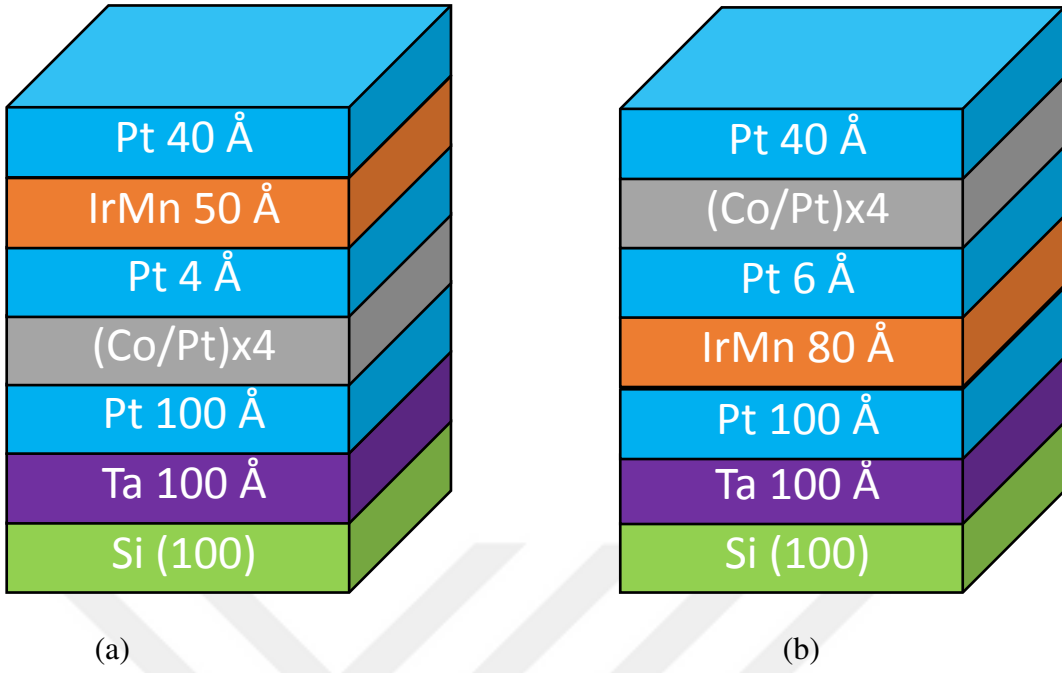
Antiferromanyetik IrMn tabakasının üzerinde Pt tabakasının olup olmaması ile ilgili büyütülen ince filmlerin örnek düzlemine dik yönde uygulanan manyetik alan altında MOKE yöntemiyle mıknatıslanma eğrileri elde edilmiş ve elde edilen histeresis eğrileri Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde antiferromanyetik IrMn tabakası üzerinde Pt katmanının olması örnek düzlemine dik yönde mıknatıslanmaya katkı sağladığı görülmektedir.



Şekil 5.4. Antiferromanyetik IrMn tabakası ile ferromanyetik Co tabakası arasında (a). Pt tabaka eklendiği, (b). Pt tabaka eklenmediği durumda MOKE ölçüm sonucu.

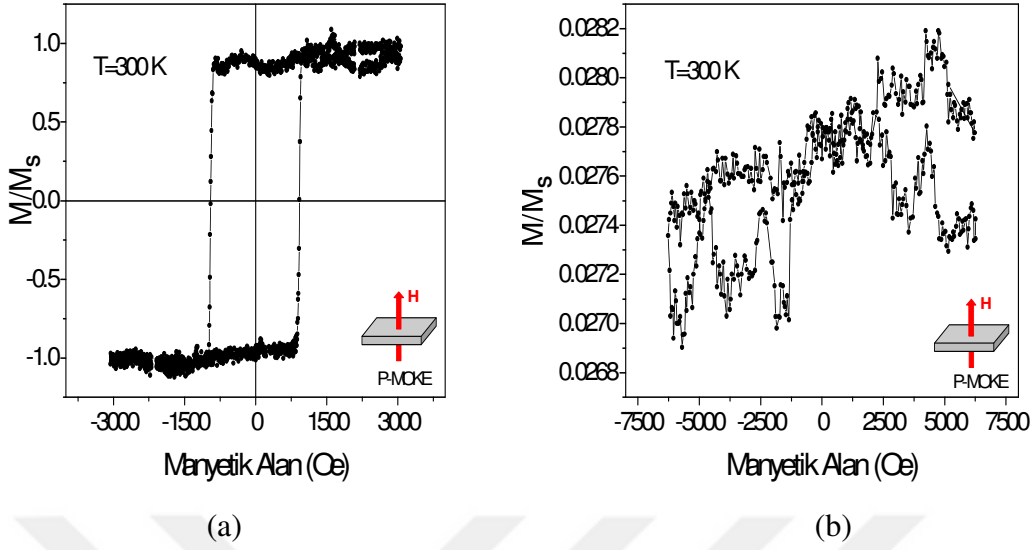
5.4. Antiferromanyetik IrMn Tabakası Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bu kısımda istenilen film yapısına geçilmeden önce antiferromanyetik IrMn tabakasının ferromanyetik Co tabakasının üstünde veya altında olması durumu üzerine çalışıldı. Bunun için Si (100) alttaşlar üzerine Şekil 5.5'te gösterilen ince filmler büyütüldü.



Şekil 5.5. Antiferromanyetik IrMn tabakasının, ferromanyetik Co tabakasının a) üzerinde, b) altında olduğu durum.

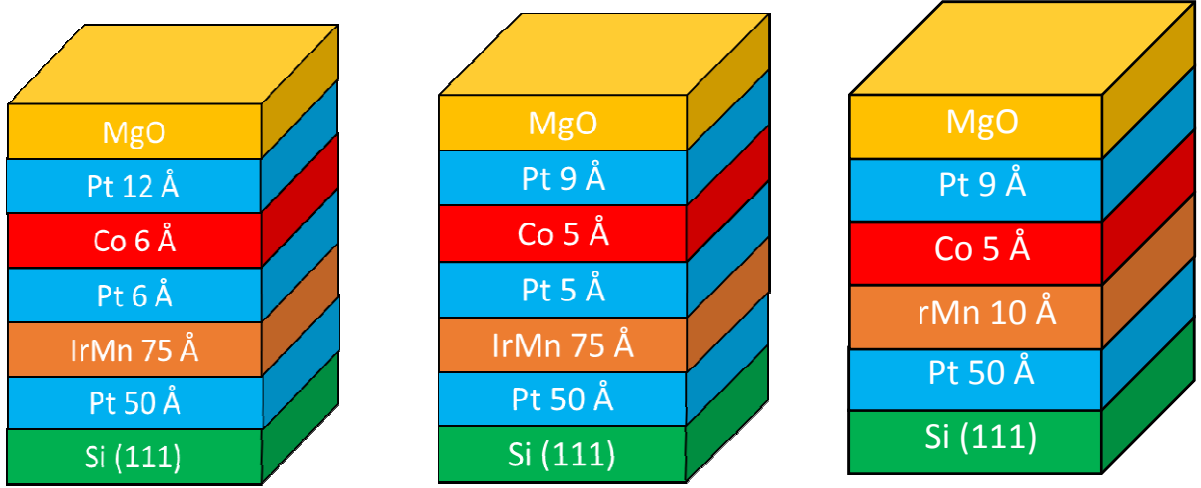
Şekil 5.5'te gösterilen ince filmlerin örnek düzlemine dik yönde uygulanan manyetik alan altında MOKE yöntemiyle mıknatıslanma eğrileri elde edilmiş ve elde edilen histeresis eğrileri Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, oda sıcaklığında antiferromanyetik IrMn tabakasının ferromanyetik Co tabakasının üzerinde olduğu durumda mıknatıslanma eğrisi görülmekte, tersi durumda ise mıknatıslanma eğrisi görülmemektedir.



Şekil 5.6. Antiferromanyetik IrMn tabakasının ferromanyetik Co tabakası a) üzerinde, b) altında olduğu durumda MOKE ölçüm sonuçları.

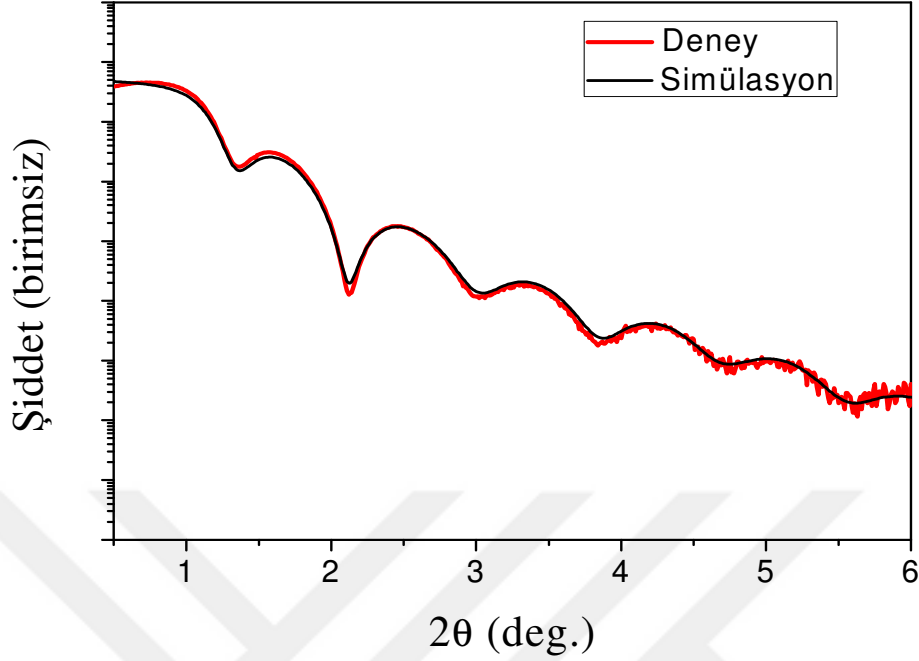
5.5. En İyi Büyütme Şartları Belirledikten Sonra Yeni Örneklerin Hazırlanması ve Analizi

Yukarıda bahsedildiği gibi ara katmanlar üzerine yapılan çalışmalardan sonra istenilen film yapısına geçildi. Bunun için hazırlanan üç farklı örnek sisteminin şematik gösterimi Şekil 5.7’de verilmiştir. Her üç örnek için de önce Si alttaş üzerine 50 Å kalınlığında Pt tabaka büyütüldü. Ardından antiferromanyetik IrMn tabakası 75 Å ve 10 Å kalınlığında hazırlandı. Daha sonra IrMn üzerine sırasıyla Pt, Co ve Pt tabakaları büyütüldü. Co tabakasının her iki yüzeyinde bulunan Pt katmanı ile dik mıknatıslanmaya katkı sağlayacak yüzey anizotropisinin artırılması hedeflendi. Ayrıca antiferromanyetik IrMn tabakası ile ferromanyetik Co tabakası arasındaki Pt tabakası Co tabakasının oksitlenmesini de engellemektedir. Son olarak, büyütülen ince film sistemini atmosfer ortamından korumak için en üste yalıtkan MgO tabakası büyütüldü.



Şekil 5.7. Çalışılan örnek sisteminin şematik gösterimi.

Çalışmanın ilerleyen kısımlarında her üç örneğin tanımlamasında kolaylık olması açısından Co kalınlığı 6 Å olan örnek M1 şeklinde, Co kalınlığı 5 Å olan örnek M2 şeklinde ve IrMn kalınlığı 10 Å olan örnek ise M3 olarak isimlendirilmiştir. Şekil 5.8’de M3 örneğine ait XRR ölçüm sonucu ve “GlobalFit” programı ile yapılan simülasyon verilmiştir. Bu simülasyon ile alttaş üzerine büyütülen her bir tabakanın yoğunluğu, kalınlığı ve pürüzlülüğü hesaplanmış ve Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. M3 örneği için Şekil 5.7’de gösterilen tahmini kalınlık değerleri ile XRR fit sonucunda elde edilen ve Çizelge 5.1’de gösterilen gerçek kalınlık değerleri arasında exchange bias etkisini etkileyecek şekilde bir fark bulunmamaktadır. Bu nedenle tez içerisinde tahmini kalınlık değerleri kullanılacaktır.

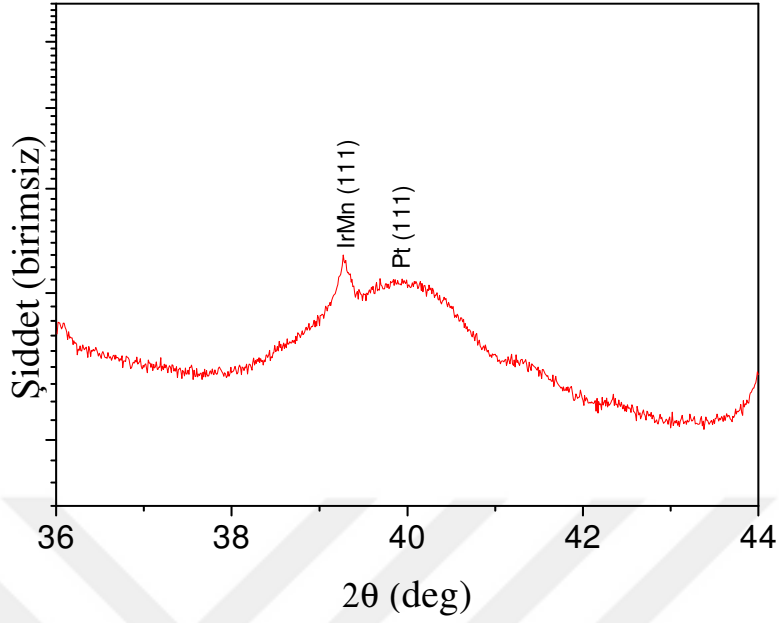


Şekil 5.8. M3 örneğinin XRR ölçümü ve simülasyon sonucu.

Çizelge 5.1. XRR yöntemi kullanılarak yapılan fit sonucunda M3 örneği için elde edilen yoğunluk, kalınlık ve pürüzlülük değerleri

M3	Yoğunluk (g/cm^3)	Kalınlık (Å)	Pürüzlülük (Å)
MgO	3.6	10	4.1
Pt	21.4	9	9.9
Co	8.8	4	9.0
IrMn	12.0	9	9.3
Pt	21.4	51	9.9
Si	2.3	-	3.4

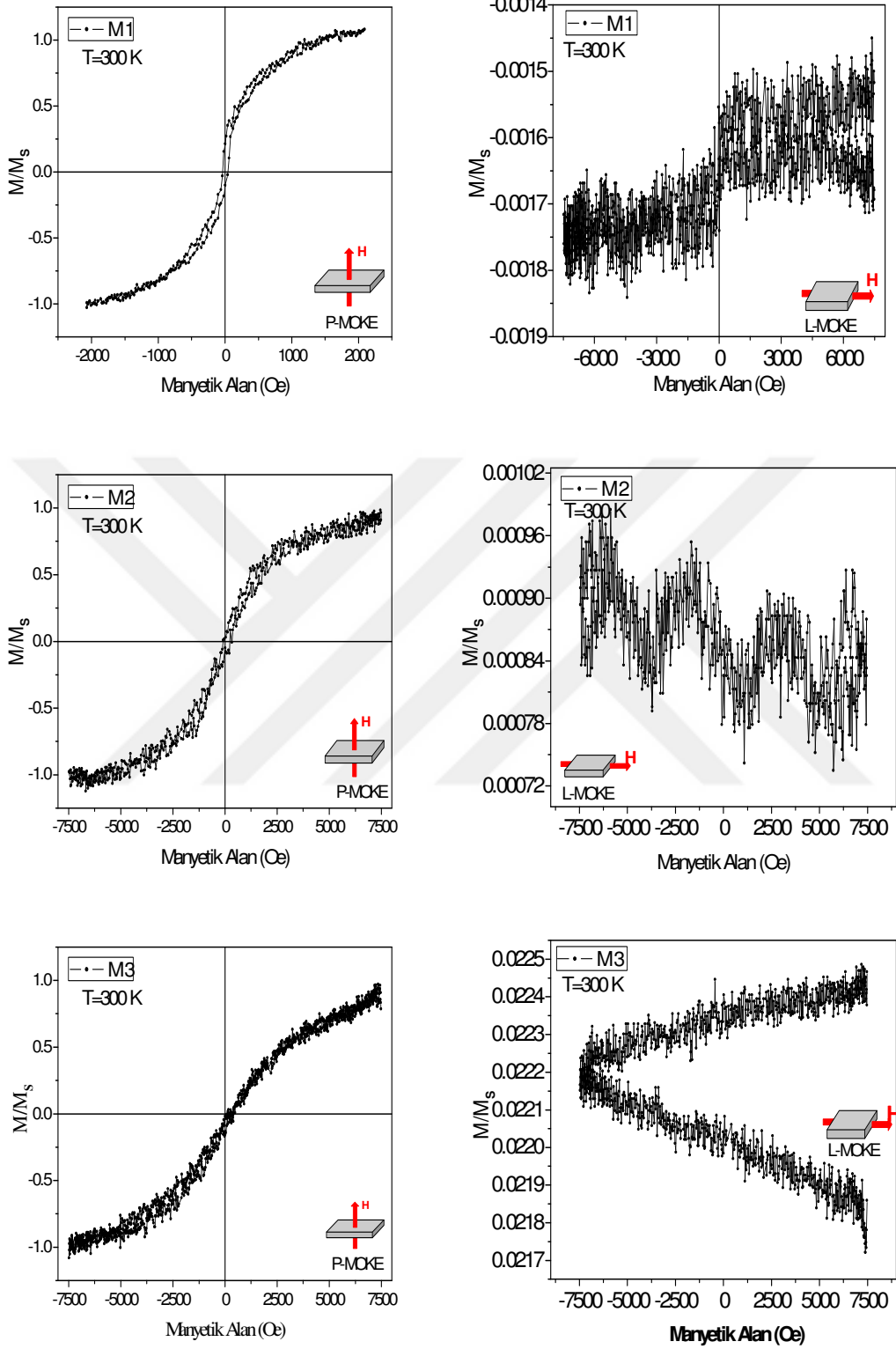
Büyütülen M1, M2 ve M3 ince filmlerine ait kristal yönelimleri belirlemek için Şekil 5.9'da gösterildiği gibi XRD ölçümü yapıldı. Çoklu kristal yapıya sahip M1, M2 ve M3 ince filmleri için Şekil 5.9'da gösterildiği gibi, 39.25° 'de IrMn (111) yansıma düzlemi x-ışını kırınım piki ve 39.91° 'de Pt (111) yansıma düzlemi x-ışını kırınım piki gözlenmiştir.



Şekil 5.9. Büyütülen ince filmlerin XRD ölçüm sonucu.

5.6. En İyi Büyütme Şartları Belirledikten Sonra Hazırlanan Örneklerin Mıknatıslanma Ölçümleri

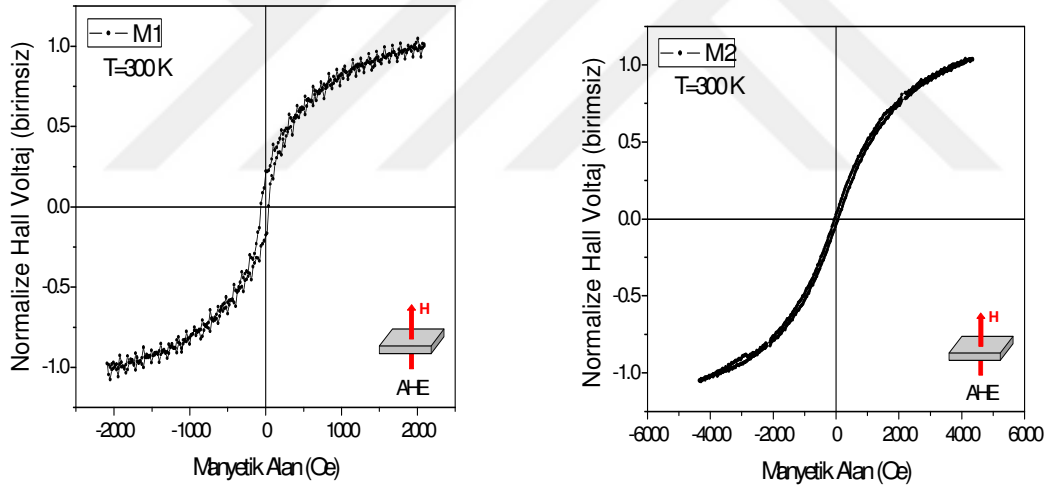
Büyütülen M1, M2 ve M3 örneklerinin oda sıcaklığında mıknatıslanma yönelimlerini belirlemek için örnek düzleminde (in-plane) ve örnek düzlemine dik yönde (out-of-plane) uygulanan manyetik alan yardımıyla MOKE ölçümleri yapıldı. MOKE ile elde edilen sonuçlar Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. M1, M2 ve M3 örneklerinin oda sıcaklığında MOKE ile örnek düzlemine dik geometride (P-MOKE) ve örnek düzleminde (L-MOKE) alınan histeresis ölçümleri.

Büyütülen M1, M2 ve M3 örneklerinin oda sıcaklığında mıknatıslanma yönelimleri ayrıca AHE yöntemiyle de belirlendi. Bunun için M1, M2 ve M3 örnekleri çift taraflı bant ile PCB (Printed circuit board) üzerine yapıştırıldı. Karesel geometriye dikkat edilerek iletken bakır tel ile kontaklar alındı. Bakır telleri, PCB üzerindeki kontak yerlerine ve ince film yüzeyine tutturmak için gümüş pasta kullanıldı. Kontaklar alındıktan sonra yarım saat gümüş pastanın kuruması beklendi. Örnek düzlemine dik yönde uygulanan manyetik alan değerine karşılık gelen Hall voltajı (gerilim) ile iletken ferromanyetik Co tabakasının mıknatıslanma eğrisi (M-H) elde edildi.

Şekil 5.11’de sırasıyla M1 ve M2 örnekleri için oda sıcaklığında ($T=300$ K) AHE yöntemi ile ölçülen mıknatıslanma eğrileri gösterilmiştir. Co kalınlığı 6 \AA olan M1 örneği için oda sıcaklığında sıfırlayıcı alan değeri 51 Oe , Co kalınlığı 5 \AA olan M2 örneği için 52 Oe olarak ölçülmüştür.

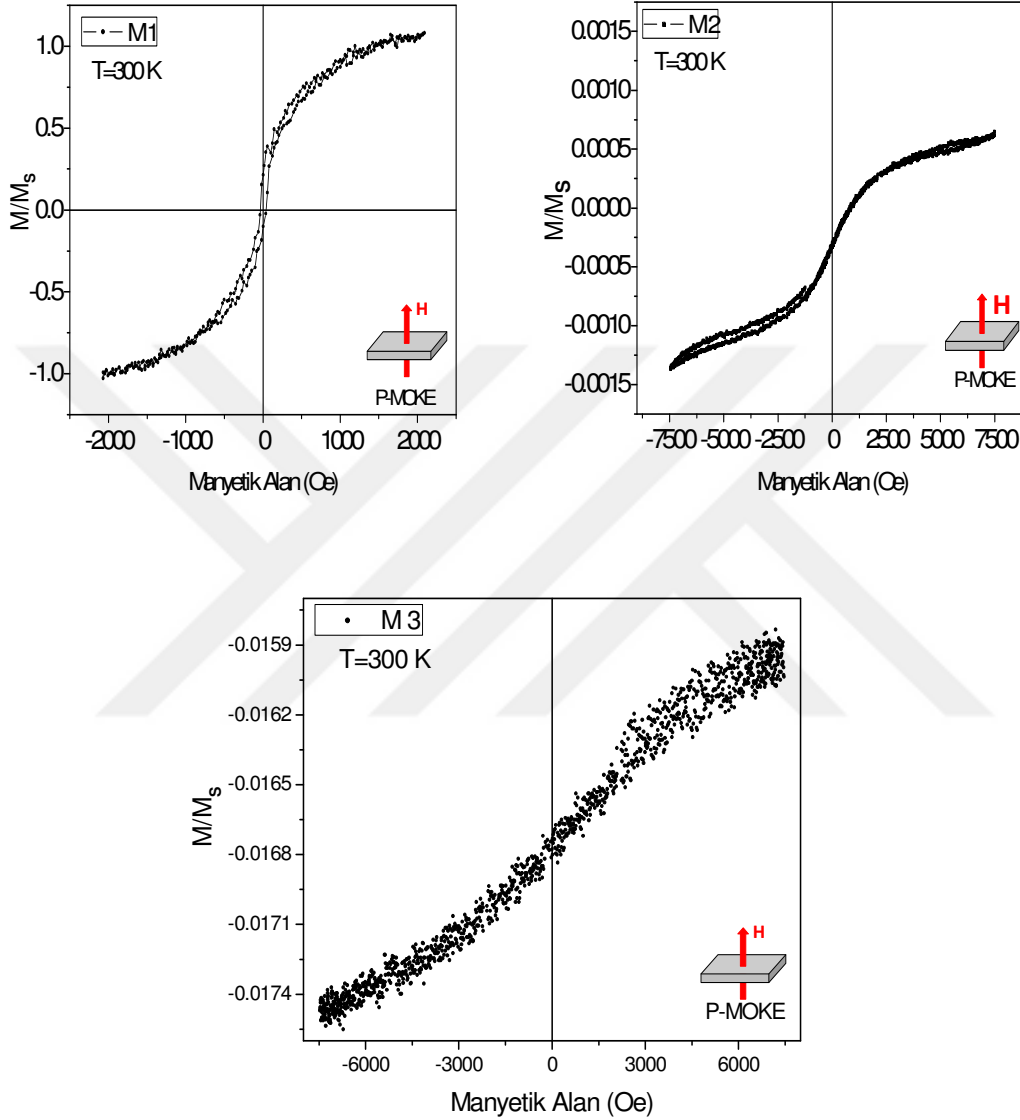


Şekil 5.11. M1 ve M2 örneklerinin oda sıcaklığında AHE ile alınan histeresis ölçümleri.

5.7. En İyi Büyütme Şartları Belirlendikten Sonra Hazırlanan Örneklerin Sıcaklığa Bağlı Exchange Bias Ölçümleri

Oda sıcaklığı exchange bias etkisi ölçümleri için, örnekler 8 kOe 'lik manyetik alan altında 400 K sıcaklık değerine kadar ısıtıldı. Bu sıcaklık değerinde yine aynı alan altında bir saat bekletildi (tavlama işlemi). Daha sonra yine 8 kOe 'lik manyetik alan altında oda sıcaklığına inilerek histeresis ölçümleri yapıldı. Sonuç olarak her üç örnekte

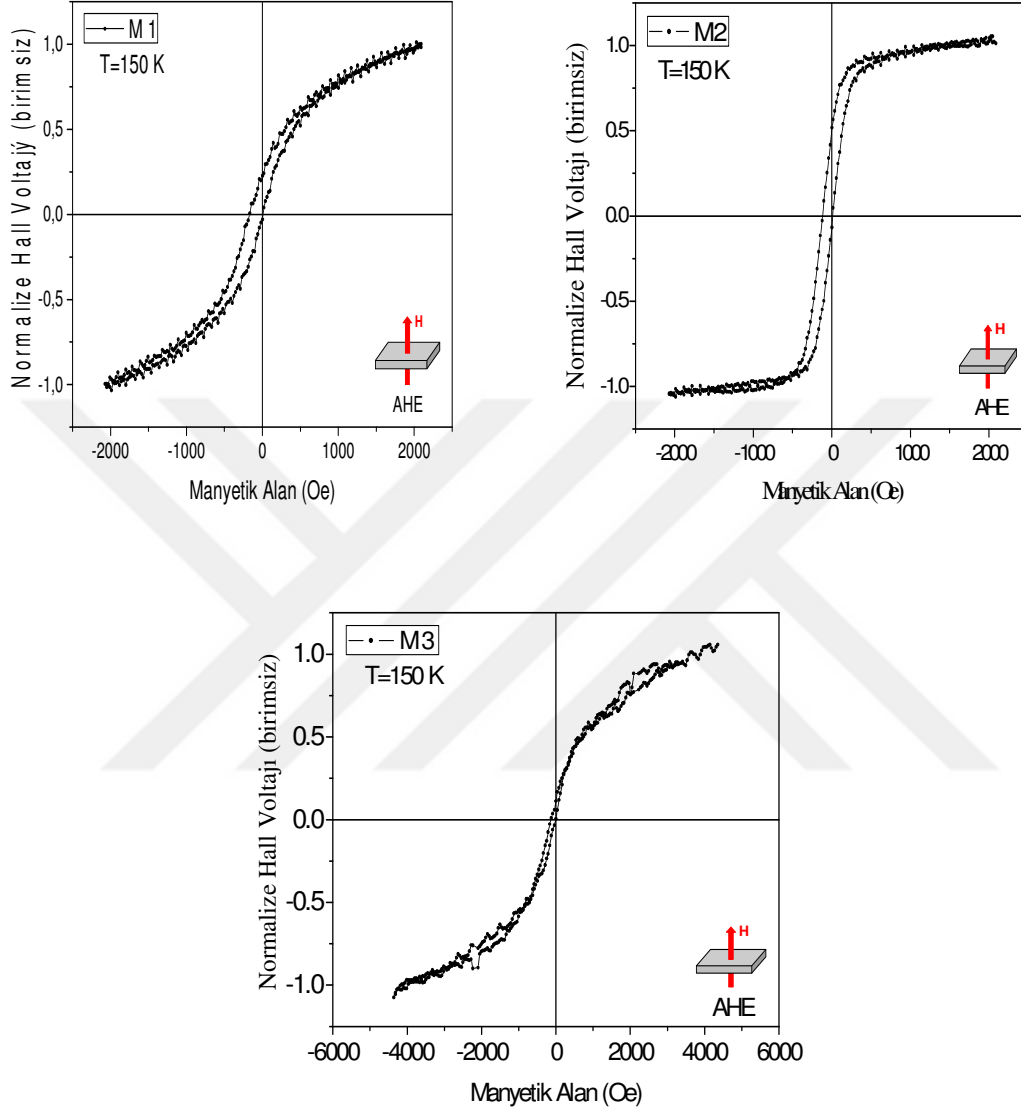
oda sıcaklığında exchange bias etkisi görülmemiştir. Bu durum Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. M1, M2 ve M3 örneklerinin manyetik alan altında tavlama işleminden sonra oda sıcaklığında MOKE ile dik geometride alınan histeresis ölçümleri.

Düşük sıcaklık exchange bias etkisi ölçümleri için, örnekler 8 kOe’lik manyetik alan altında 400 K’e ısıtıldı. Bu sıcaklık değerinde yine aynı alan altında bir saat bekletildi. Ardından 8 kOe’lik manyetik alan altında hedef sıcaklıklara soğutuldu. T_N ’nin altındaki hedef sıcaklıklarda her üç örnekte exchange bias etkisi görüldü. Şekil 5.13’te 150 K’de alınan histeresis eğrileri gösterilmiştir. Co kalınlığı 6 Å olan örnek

(M1) için exchange bias alanı değeri 78 Oe olarak, Co kalınlığı 5 Å olan örnek (M2) için 53 Oe ve IrMn kalınlığı 10 Å olan örnek (M3) için 70 Oe olarak belirlendi.



Şekil 5.13. M1, M2 ve M3 örneklerinin 150 K'de AHE ile ölçülen ve exchange bias etkisi gözlenen mıknatıslanma eğrileri.



6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Özellikle spintronik (spine dayalı elektronik) alanında son yıllarda büyük yol kat edilmesinde önemli rol oynayan exchange bias (kaydırma etkisi), manyetik sabit disklerdeki okuyucu kafalarda ve manyetik RAM'lerde (MRAM) kullanılan spin vanalarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Exchange bias etkisi ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve kullanım alanını arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir. Ancak yapılan çalışmaların çoğu örnek düzleminde mıknatıslanmaya sahip örnekler üzerine olmuştur. Daha küçük alana daha fazla bilgi kaydetme imkânı verdiği için dik manyetik anizotropiye sahip örnekler için de bu etkiyi incelemek önem arz etmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında dik manyetik anizotropiye sahip örnek sistemlerinde exchange bias etkisinin sıcaklığa ve ferromanyetik malzemenin kalınlığına bağlı davranışı araştırılmaya çalışılmıştır.

Dik mıknatıslanmaya sahip ferromanyetik ince filmlerde kaydırma etkisinin sıcaklığa ve ferromanyetik malzemenin kalınlığına bağlı davranışını incelemek üzere magnetron saçtırma tekniği kullanılarak, yüksek vakum koşullarında Si (111) alttaşlar üzerine Pt/IrMn/Pt/Co/Pt/MgO ince filmlerinin büyütülmesine odaklanıldı. Bunun için dört aşama takip edildi. İlk aşama olarak Ferromanyetik Co tabakasının, ince filmi atmosfer ortamından korumak için en üste kaplanacak yalıtkan MgO tabakasındaki oksijen atomlarıyla bağ yapmaması için araya konulacak Pt tabaka kalınlığı üzerine çalışılmıştır. Pt tabaka kalınlığının 9 Å olması durumunda Co tabakasının oksitlenmediği gözlenmiştir.

İkinci aşama olarak AFM IrMn tabakası ile FM Co tabakası arasına Pt tabaka eklenilmesi üzerine çalışıldı. AFM IrMn ile FM Co tabakası arasına Pt tabaka eklenmesinin dikte mıknatıslanmaya katkı sağladığı görüldü.

Üçüncü aşama olarak antiferromanyetik IrMn tabakasının ferromanyetik Co tabakası üzerine veya altına konulması üzerine çalışıldı. AFM IrMn tabakasının FM Co tabakası üzerinde olduğu durumda histeresis eğrisi görülmektedir. Ancak exchange bias etkisi için, yüksek sıcaklıklara ($T < 500$) ısıtma ve yüksek manyetik alan altında soğutma işlemlerinde AFM IrMn tabakasının FM Co tabakasının altında olması durumunda daha iyi sonuç alınmaktadır. Bundan dolayı bu tez çalışmasında AFM IrMn tabakası FM Co tabakası altında büyütülmüştür. Son aşama olarak bütün bu yapılan çalışmalar

sonucunda en iyi büyütme şartları belirlenerek, Si (111) alttaş üzerine üç adet Pt/IrMn/Pt/Co/Pt/MgO ince filmleri büyütüldü.

İnce filmlerin büyütülmesinden sonra XRR ve XRD ölçümleri yapıldı. Tabaka kalınlıklarının fit sonucu elde edilen gerçek değerlerle uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca AFM IrMn (111) yansıma düzlemi x-ışını kırınım piki 39.25° 'de ve Pt (111) yansıma düzlemi x-ışını kırınım piki 39.91° 'de tespit edildi.

Exchange bias etkisi için büyütülen ince filmler 0.8 T manyetik alan altında 400 K sıcaklığında 1 saat tavlama işlemine tabi tutuldu ve ardından yine 0.8 T manyetik alan altında hedef sıcaklık değerlerine soğutuldu. Oda sıcaklığında yapılan AHE ölçüm sonuçlarında exchange bias etkisi gözlenmezken 150 K sıcaklık değerinde yapılan AHE ölçümlerine göre M1 örneği için 78 Oe, M2 örneği için 53 Oe ve M3 örneği için 70 Oe olarak belirlenen exchange bias alanları tespit edilmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında IrMn tabanlı ince filmler başarılı bir şekilde büyütülerek ölçümleri yapılmıştır. Oda sıcaklığında alınan MOKE ve AHE ölçüm sonuçları incelendiğinde dik eksende mıknatıslanma görülüyor olsa da doyum değerleri yüksek olduğundan kolay eksen olarak adlandırmak zordur. Her iki yöntemle elde edilen histeresis eğrilerinin ve sıfırlayıcı alan değerlerinin birbirleri ile hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Ancak oda sıcaklığında exchange bias etkisi gözlenmemiştir. Düşük sıcaklık ($T=150$ K) ölçüm sonuçları incelendiğinde ise sıcaklığın azalmasıyla örneklerin sıfırlayıcı alan değerlerinin arttığı görülmekte ve buna bağlı olarak exchange bias etkisi görülmektedir. Oda sıcaklığında exchange bias etkisinin görülmeşiinin sebebi olarak IrMn tabakasının pürüzlülüğünün yüksek olmasıdır. Ayrıca çok ince olan Co tabakasının sürekli bir film yapısına sahip olamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle dik mıknatıslanmaya sahip IrMn/Pt/Co filmlerle ilgili tabakalar arası pürüzlülüğü azaltmak için sistematik çalışmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- Akdoğan, N., 2004. *İnce Filmlerde Manyeto-optik Ölçümler* (yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akdoğan, N., Kazan, S., Aktaş, B., Özdemir, M., Inam, H., Obaida, M., Dudek, J., Westerholt, K., 2011. Field Cooling-Induced Magnetic Anisotropy in Exchange Biased CoO/Fe Bilayer Studied by Ferromagnetic Resonance. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **323** (3-4): 346-350.
- 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**: 120-123.
- Aley, N. P., O'Grady, K., 2011. Compositional dependence of antiferromagnetic anisotropy in IrMn/CoFe exchange bias systems. *Journal of Applied Physics*, **109** (7): 07D719.
- Ali, M., Marrows, C. H., Hickey, B. J., 2003. Onset of exchange bias in ultrathin antiferromagnetic layers. *Physical Review B*, **67**: 172405.
- Ambrose, T., Chien, C. L., 1998. Dependence of exchange coupling on antiferromagnetic layer thickness in NiFe/CoO bilayers. *Journal of Applied Physics*, **83** (11): 6822-6824.
- Anonim,2017a.http://anibal.gyte.edu.tr/hebe/AbIDrive/79354043/w/Storage/218_2010_2_515_79354043/Downloads/x7-xrr.pdf?, Erişim Tarihi: 16.06.2017.
- Anonim,2017b.<https://yusufbilgen.wordpress.com/2015/01/16/ince-film-teknikleri>, Erişim Tarihi: 09.05.2017.
- Ashida, T., Sato, Y., Nozaki, T., Sahashi, M., 2013. Effect of the Pt buffer layer on perpendicular exchange bias based on collinear/non-collinear coupling in a Cr₂O₃/Co₃Pt interface. *Journal of Applied Physics*, **113** (17): 17D711.
- 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.
- Berkowitz, A. E., Takano K., 1999. Exchange anisotropy – a review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **200** (1-3): 552-570.
- 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.
- Binek, Ch., Borisov, P., Chen, X., Hochstrat, A., Sahoo S., Kleemann W., 2005. Perpendicular exchange bias and its control by magnetic, stress and electric fields. *The European Physical Journal B*, **45**: 197.
- Bruno, P., 1988. Dipolar magnetic surface anisotropy in ferromagnetic thin films with interfacial roughness. *Journal of Applied Physics*, **64** (6): 3153-3156.
- 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.
- Chen, Y. T., Jen, S. U., Yao, Y. D., Wu, J. M., Liao, J. H., Wu, T. B., 2008. Exchange biasing observed in the Co/Ir₂₀Mn₈₀ System. *Journal of Alloys and Compounds*, **448**: 59-63.

- Chen, J., Y., Thiagarajah, 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.
- Czapkiewicz, M., Stobiecki, T., Rak, R., Zoladz, M., van Dijken, S., 2007. Exchange bias energy in Co/Pt/IrMn multilayers with perpendicular and in-plane anisotropy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **316** (2): 151-154.
- Czapkiewicz, M., Stobiecki, T., van Dijken, S., 2008. Thermally activated magnetization reversal in exchange-biased [Pt/Co]₃/Pt/IrMn multilayers. *Physical Review B*, **77**: 024416.
- Daughton, J. M., 1997. Magnetic tunneling applied to memory. *Journal of Applied Physics*, **81** (8): 3758-3763.
- Demirci, E., Öztürk, M., Topkaya, R., Obaida, M., Westerholt, K., Kazan, S., Akdoğan, N., 2012. Thickness and Temperature Dependence of Exchange Bias in Co/CoO Bilayers. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **25** (8): 2591-2595.
- Demirci, E., Öztürk, M., Sınır, E., Ulucan U., Akdoğan, N., Öztürk, O., Erkovan M., 2014. Temperature –dependent exchange bias properties of polycrystalline PtxCo1-x/CoO bilayers. *Thin Solid Films*, **550**: 595-601.
- 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.
- Demirci, E., 2016. *Manyetoelektrik Cr₂O₃ Tabanlı İnce Film Sistemlerinde Dik Exchange Bias Etkisinin İncelenmesi* (doktora tezi). GTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, Kocaeli.
- Den Broeder, F. J. A., Hoving, W., Bloemen, P. J. H., 1991. Magnetic anisotropy of multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **93**: 562-570.
- Erskine, J. L., Stern, E. A., 1973. Magneto-optic Kerr Effect in Ni, Co, and Fe. *Physical Review Letters*, **30** (26): 1329-1332.
- Faraday, M., 1846. Experimental Researches in Electricity. Nineteenth Series. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **136**: 1-20.
- Florin, R., 2005. *Fundamental Aspects of Exchange Bias* (PhD Thesis). Ruhr Universität, Bochum, Germany.
- 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.
- Gruyters, M., Riegel D., 2000. Strong exchange bias by a single layer of independent antiferromagnetic grains: The CoO/Co model system. *Physical Review B*, **63** (5): 052401.
- 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**: 349-354.
- Hagedorn, F. B., 1967. Exchange Anisotropy in Oxidized Permalloy Thin Films at Low Temperatures. *Journal of Applied Physics*, **38** (9): 3641-3645.
- Hall, E. H., 1879. On a New Action of the Magnet on Electric Currents. *American Journal of Mathematics*, **2** (3): 287-292.
- Hall, E. H., 1881. On the “Rotational Coefficient” in nickel and cobalt. *Philosophical Magazine Series 5*, **12** (74): 157-172.

- Jeffrey, M., 2015. Progress in magnetic domain observation by advanced magneto-optical microscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **48** (33): 333001.
- Jeong, W. C., Kim, H. J., Park, J. H., Jeong, C. W., Lee, E. Y., Oh, J. H., Jeong, G. T., Koh, G. H., Koo, H. C., Lee, S. H., Lee, S. Y., Shin, J. M., Jeong, H. S., Kim, K., 2004. A new reference signal generation method for MRAM using a 90-degree rotated MTJ. *IEEE Transactions on Magnetics*, **40** (4): 2628-2630.
- Johnson, M. T., Jungblut, R., Kelly, P. J., den Broeder, F. J. A., 1995. Perpendicular magnetic anisotropy of multilayers: recent insights. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **148** (1-2): 118-124.
- Johnson, M. T., Bloemen, P. J. H., den Broeder, F. J. A., de Vries, J. J., 1996. Magnetic anisotropy in metallic multilayers. *Reports on Progress in Physics*, **59**: 1409.
- Jungblut, R., Coehoorn, R., Johnson, M. T., Aan de Stegge, J., Reinders, A., 1994. Orientational dependence of the exchange biasing in molecular-beam-epitaxy-grown Ni₈₀Fe₂₀/Fe₅₀Mn₅₀ bilayers (invited). *Journal of Applied Physics*, **75** (10): 6659-6664.
- Kerr, J., 1877. XLIII. On rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet. *Philosophical Magazine Series 5*, **3** (19): 321-343.
- Kiessling, H., 1931. Interferenz von Röntgenstrahlen an dünnen Schichten. *Annalen der Physik*, **407** (7): 715-768.
- Kim, S. S., Hwang, J. Y., Rhee, J. R., 2007. Characteristics of perpendicular exchange bias in [Pt/Co]-IrMn multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **310** (2): 2310-2312.
- Kittel C., 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th Edition. John Wiley, Cambridge University Pres.
- 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. *Scientific Reports*, **3**: 2412.
- Kurt, H., Rode, K., Venkatesan, M., Stamenov, P., Coey, J. M. D., 2011. Material Advances in Spintronics and Magnetic Recording. *Physics Status Solidi B*, **248** (10): 2338-2344.
- Laval, M., Lüders, U., Bobo, J. F., 2007. Exchange bias and perpendicular anisotropy study of ultrathin Pt-Co-Pt-IrMn multilayers sputtered on float glass. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **316**: 147-150.
- Lechevallier, L., Zarefy, A., Lardè, R., Chiron, H., Le Breton, J. M., Baltz, V., Rodmacq, B., Dieny, B., 2009. Structural analysis and magnetic properties of (Pt/Co)₃/Pt_(tPt)/IrMn multilayers. *Physical Review B*, **79** (17): 174434.
- Li, W., 2010. *Magneto-optical Kerr Effect Spectroscopy Study of Ferromagnetic Metal/Organic Heterostructures* (Doctoral Thesis). Technische Universtat Chemnitz.
- Lin, L., Thiagarajah, N., Joo, H. W., Heo, J., Lee, K. A., Bae, S., 2010. A physical model of exchange bias in [Pd/Co]₅/FeMn thin films with perpendicular anisotropy. *Journal of Applied Physics*, **108** (6): 063924.
- 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.
- McCord, J., Brendel, H., Hubert, A., Parkin, S. S. P., 1995. Hysteresis and domains in magnetic multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **148** (1-2): 244-246.

- Meiklejohn, W. H., Bean, C. P., 1956. New Magnetic Anisotropy. *Physical Review*, **102** (5): 1413-1414.
- Meiklejohn, W. H., Bean, C. P., 1957. New Magnetic Anisotropy. *Physical Review*, **105** (3): 904-913.
- Meiklejohn, W. H., 1962. Exchange Anisotropy --- A Review. *Journal of Applied Physics*, **33** (3): 1328-1335.
- Minaru, T., Akio, Y., Shinji, T., Takao, S., 1980. A Study of Exchange Anisotropy in Co-CoO Evaporated Thin Films. *Japanese Journal of Applied Physics*, **19** (6): 1093.
- 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.
- Nagaosa, N., Sinova, J., Onoda, S., MacDonald, A. H., Ong, N.P., 2010. Anomalous Hall effect. *Reviews of Modern Physics*, **82** (2): 1539-1592.
- Nèel, L., 1954. L'approche à la saturation de la magnètostriction. *J. Phys. Rad*, **15**: 376.
- Noguésa, J., Schuller, I.K., 1999. Exchange Bias. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **192** (2): 203-232.
- Nogués, J., Lederman, D., Moran, T. J., Schuller, I. K., Rao, K. V., 1996. Large exchange bias and its connections to interface structure in FeF₂-Fe bilayers. *Applied Physics Letters*, **68** (22): 3186-3188.
- Öztürk, M., Demirci, E., Topkaya, R., Obaida, M., Westerholt, K., Kazan, S., Akdoğan N., 2012. Effect of Exchange Bias on Magnetic Anisotropies in Fe/CoO Bilayers. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **25**, (8): 2597-2603.
- Öztürk, M., Sinir, 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.
- 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.
- Radu, F., 2005. *Fundamental Aspects of Exchange Bias Effect in AF/F Bilayers and Multilayers* (Doktora Tezi). Ruhr Üniversitesi.
- 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 Pt/Co multilayers studied by time-resolved Kerr microscopy. *Physical Review B*, **72** (13): 134410.
- Sang, H., Du, Y. W., Chien, C. L., 1999. Exchange coupling in Fe₅₀Mn₅₀/Ni₈₁Fe₁₉ bilayer: Dependence on antiferromagnetic layer thickness. *Journal of Applied Physics*, **85** (8): 4931-4933.
- Shi, Z., Du, J., Zhou, S. M., 2014. Exchange bias in ferromagnet/antiferromagnet bilayers. *Chinese Physics B*, **23** (2): 027503.
- Shiratsuchi, Y., Fujita, T., Oikawa, H., Noutomi, H., Nakatani, R., 2010. High Perpendicular Exchange Bias with a Unique Temperature Dependence in Pt/Co/ α -Cr₂O₃ (0001) Thin Films. *Applied Physics Express*, **3** (11): 113001.
- Shiratsuchi, Y., Noutomi, H., Oikawa, H., Fujita, T., Nakatani, R., 2011. Competition of perpendicular magnetic anisotropy and exchange magnetic anisotropy in a Pt/Co/ α -Cr₂O₃(0001) thin film. *Journal of Applied Physics*, **109** (7): 07C101.

- Smallman, R. E., Ngan, A. H. W., 2007. *Physical Metallurgy and Advanced Materials*. 7th Edition. Elsevier.
- Sort, J., Rodmacq, B., Auffret, S., Dieny, B., 2003. Pinned synthetic ferrimagnets with perpendicular anisotropy and tuneable exchange bias. *Applied Physics Letters*, **83** (9): 1800-1802.
- 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.
- 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.
- Sort, J., Dieny, B., Noguès, J., 2005. Exchange bias in antiferromagnetic-ferromagnetic-antiferromagnetic structures with out-of-plane magnetization. *Physical Review B*, **72** (10): 104412.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Yasaka, M., 2010. X-ray thin-film measurement techniques V. *The Rigaku Journal*, **26**: 2.
- Yıldız, F., 2004. *Bazı Manyetik Malzemelerde (Cu-Co, Ti_{1-x}CoxO₂ İnce Filmler ve Mikroteller) Dev Manyeto Empedans İncelemeleri* (Doktora Tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli.
- Wang Y. Y., Song C., Cui B., Wang G. Y., Zeng F., Pan F., (2012), “Room-temperature perpendicular exchange coupling and tunneling anisotropic magnetoresistance in an antiferromagnet-based tunnel junction”, *Physical Review Letters*, **109** (13), 137201.
- Xu X., Gao Y., Wang Y., Hu J., (2011), “Thickness dependence of positive exchange bias in ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers”, *Solid State Communications*, **151** (13), 952-955.



ÖZGEÇMİŞ

Selahattin Çelik 1977 yılında Karabük'te doğdu. 2000 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fizik Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Milli Eğitim Bakanlığı'nda öğretmen olarak çalışmaya başladı. 2007 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini bitirdi. 2010 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Halen Milli Eğitim Bakanlığı'nda fizik öğretmeni olarak çalışmaktadır.





T.C
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 27/11/2017

Tez Başlığı / Konusu:

DİK MIKNATISLANMAYA SAHİP FERROMANYETİK İNCE FİLMERDE KAYDIRMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 52 sayfalık kısmına ilişkin, 28/11/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından "Turn-it in" intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3 (üç) dir.

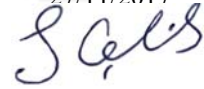
Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

Tarih ve İmza
27/11/2017



Adı Soyadı: Selahattin ÇELİK

Öğrenci No: 2010444

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Yoğun Madde

Statüsü: Y. Lisans

Doktora

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR

ENSTİTÜ ONAYI
UYGUNDUR

Prof. Dr. Ali İhsan DEMİREL



Doç. Dr. Numan AKDOĞAN



(Unvan, Ad Soyad, İmza)

(Unvan, Ad Soyad, İmza)