

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATLI İNCE FİLMLERDE
KAYDIRMA (EXCHANGE BIAS) ETKİSİ

AHMET YAĞMUR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATLI İNCE FİLMLERDE
KAYDIRMA (EXCHANGE BIAS) ETKİSİ

AHMET YAĞMUR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. NUMAN AKDOĞAN

GEBZE

2013



GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13/06/2013 tarih ve 2013/31 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 01/07/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ahmet Yağmur'un tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Numan AKDOĞAN
ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Sinan KAZAN
ÜYE : Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR

N. Akdoğan
Sinir Kazan
M. Özdemir

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada Si üzerine büyütülmüş Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt manyetik malzemelerin yapısal ve manyetik özellikleri incelendi.

Yüksek vakum koşullarında magnetron saçtırmalı tekniği kullanılarak büyütülen örneklerin tabaka kalınlığı, yoğunluğu ve pürüzlükleri XRR tekniği ile belirlendi. XRD tekniği ile örneklerin polikristal yapıda olduğu ve Pt katmanının zayıf (111) yönelimine sahip olduğu görüldü.

Örneklerin manyetik özelliklerini belirlemek için VSM sistemi kullanıldı. Oda sıcaklığında örneklerin kolay eksenini belirlemek için örnek düzlemine dik ve paralel manyetik alan uygulanarak histeresis eğrileri ölçüldü. Çıkan sonuçlara göre Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneklerin dik manyetik anizotropiye sahip olduğu belirlendi. Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneğinin ise örnek düzleminde kolay eksene sahip olduğu görüldü. Ölçülen histeresis eğrilerinden örneklerin M_r/M_s oranları karşılaştırıldı ve Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğinin daha güçlü dik manyetik anizotropiye sahip olduğu gözlemlendi. VSM tekniği ile T_N değerinin altındaki sıcaklıklarda, her seferinde tekrar oda sıcaklığı üzerine çıkılıp manyetik alan ile soğutma yapılarak histeresis ölçümleri alındı. Güçlü dik manyetik anizotropiye sahip Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğinde Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğine göre daha büyük bir kaydırma alanı görüldü. Farklı sıcaklık değerlerinde histeresis ölçümleri yapılarak engelleme sıcaklıkları belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Kaydırma Etkisi; Manyetik Anizotropi; Dik Manyetik Anizotropi; Ferromanyetik Malzemeler; Antiferromanyetik malzemeler; Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM); İnce Film; X-ışını Yansıması (XRR); X-ışını Kırınımı (XRD)

SUMMARY

In this study, we investigate the structural and magnetic properties of Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt and Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt samples grown on Si substrate by magnetron sputtering system.

Thin films thickness, density and surface or interface roughness are determined by using XRR technique. The XRD is used to analyze the crystal structure of thin films and revealed that samples are polycrystalline and exhibited a weak (111) texture for Pt layer.

Magnetic properties have been measured by VSM system. 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/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt and Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt samples have perpendicular magnetic anisotropy, but Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt sample has easy axis in the film plane. M_r/M_s values of out-of-plane hysteresis curve indicate that Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt sample has stronger perpendicular magnetic anisotropy than Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt sample. Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt has greater exchange bias field than Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt because of having strong perpendicular magnetic anisotropy. Hysteresis curves are measured at different temperatures by VSM to determine the blocking temperature of samples.

Keywords: Exchange Bias; Magnetic Anisotropy; Perpendicular Magnetic Anisotropy; Ferromagnetic Material; Antiferromagnetic Material; Vibrating Sample Magnetometer (VSM); Thin Film; X-ray Reflectivity (XRR); X-ray Diffraction (XRD)

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, beni destekleyen, bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, bilgisini ve zamanını öğrencilerinden esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Numan AKDOĞAN'a çok teşekkür ederim.

Araştırmalarımızı yapabilmemiz için gerekli laboratuvar koşullarını sağlayan Fizik Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Bekir AKTAŞ'a teşekkür ederim.

Tez örneklerinin hazırlanmasında emeği geçen Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK ve Dr. Mustafa ERKOVAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her türlü yardımda bulunan grup arkadaşlarım Mustafa ÖZTÜRK'e ve Erdem DEMİRCİ'ye teşekkür ederim.

112T857 nolu proje çerçevesinde yüksek lisans tez çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Eğitimimde desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv

1. GİRİŞ	1
2. İNCE FİLMLERDE MANYETİK ANİZOTROPI	4
2.1. Giriş	4
2.2. Manyetik Anizotropinin Kaynağı	4
2.3. Etkin Manyetik Anizotropi	5
2.4. Ara Yüzey Yapısının Manyetik Anizotropiye Etkisi	8
2.5. Örnek Düzlemine Dik Manyetik Anizotropi	9
2.6. Manyetik Anizotropiye Bağlı Histeresis Eğrileri	10
3. KAYDIRMA ETKİSİ (EXCHANGE BIAS)	12
3.1. Giriş	12
3.2. Kaydırma Etkisinin Mekanizması	13
3.3. Meiklejohn ve Bean Modeli	15
3.4. Zorlayıcı Alanlar	17
3.5. Kaydırma Etkisine Sıcaklığın Etkisi	17
3.6. Dik Manyetik Anizotropili Örneklerde Kaydırma Etkisi	19
3.6.1. Dik Manyetik Anizotropili Sistemlerde Meiklejohn-Bean Modeli	19
4. DENEYSEL TEKNİKLER	23
4.1. X-ışını Kırınımı (XRD)	23
4.2. X-ışını Yansıması (XRR)	24
4.3. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)	27
5. DENEYSEL SONUÇLAR	31
5.1. Örneklerin hazırlanması	31
5.2. X-ışını Yansıması Ölçümleri (XRR)	32

5.3. X-Işını Kırınımı Ölçümleri (XRD)	34
5.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Ölçümleri	35
5.4.1. Kaydırma Etkisi Ölçümleri	38
6. SONUÇLAR	43
 KAYNAKLAR	 44
ÖZGEÇMİŞ	50

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	:Yüzey Alanı
Å	:Angstrom
Au	:Altın
Co	:Kobalt
CoO	:Kobalt Oksit
Cr	:Krom
Cu	:Bakır
d	:Tabakalar arası mesafe
e	:Elektronun Yüğü
E_{int}	:Değiş-tokuş Etkileşme Enerjisi
Fe	:Demir
H	:Manyetik Alan
H_c	:Zorlayıcı Alan (Coercive field)
H_{EB}	:Kaydırma Etkisi Alanı
H_{FC}	:Soğutma Esnasında Uygulanan Manyetik Alan
I	:Akım
Ir	:İridyum
J_{EB}	:Değiş-tokuş İntegrali
K	:Kelvin
K_{AFM}	:Antiferromanyetik Malzemenin Anizotropi Sabiti
K_c	:Manyeto-kristal Anizotropi
K_d	:Şekil Anizotropisi
K_{etkin}	:Etkin Manyetik Anizotropi
K_{FM}	:Ferromanyetik Malzemenin Anizotropi Sabiti
K_y	:Manyeto-elastik Anizotropi
K_s	:Yüzey Anizotropisi
K_v	:Hacim Anizotropisi
M	:Mıknatıslanma
M_{AFM}	:Antiferromanyetik Malzemenin Mıknatıslanma Değeri

M_{FM}	:Ferromanyetik Malzemenin Mıknatıslanma Değeri
M_r	:Kalıcı Mıknatıslanma Değeri (Remanent magnetization)
M_s	:Doyum Mıknatıslanması (Saturation magnetization)
n	:Sarım Sayısı
Ni	:Nikel
O	:Oksijen
Oe	:Oersted
Pd	:Paladyum
Pt	:Platin
S	:Spin Kuantum Numarası
Si	:Silisyum
T	:Sıcaklık
t	:Zaman
t_{AFM}	:Antiferromanyetik Malzeme Kalınlığı
T_B	:Engelleme (Blocking) Sıcaklığı
T_C	:Curie Sıcaklığı
t_{FM}	:Ferromanyetik Malzeme Kalınlığı
T_N	:Néel sıcaklığı
ϵ	:Elektromotor Kuvveti
λ	:X-ışınının dalgaboyu
μ_0	:Serbest Uzayın Geçirgenliği
ϕ	:Manyetik Akı
AFM	:Antiferromanyetik
FM	:Ferromanyetik
GMR	:Dev Manyetodirenç (Giant Magnetoresistance)
MRAM	:Manyetik RAM
STT	:Spin Transfer Tork
TMR	:Tünelleme Manyetodirenç (Tunneling Magnetoresistance)
VSM	:Titreşimli Örnek Manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometer)
XRD	:X-ışını Kırınımı (X-Ray Diffraction)
XRR	:X-ışını Yansıması (X-Ray Reflectivity)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: GMR yapısında spinlerin yönünün paralel a) veya anti paralel b) olduğu durumlarda direnç değerinin davranışı gösterilmektedir.	1
1.2: Hitachi tarafından geliştirilmiş sabit disk okuyucu kafalarda kullanılan GMR yapısı.	2
1.3: Örnek düzleminde anizotropiye a) ve dik manyetik anizotropiye b) sahip sistemlerin kullanıldığı sabit disk okuyucu kafalar.	3
2.1: a) Kritik kalınlığın altında ara yüzey etkileşimi gösteren örneğin kolay eksenli örnek düzlemine dik olurken, b) hacim anizotropisinin baskın olduğu örnekte kolay eksenli örnek düzleminde görülmektedir.	6
2.2: İnce filmin anizotropisine katkı veren, hacim ve ara yüzey anizotropisine neden olan kısımlar gösterilmiştir.	6
2.3: Co(tÅ)/Pd(11Å) örneğinde K_{etkin} 'in Co kalınlığına bağlı değişimi gösterilmektedir.	7
2.4: Bruno'nun pürüzlüğün anizotropiye etkisini açıklamak için tasarladığı model gösterilmektedir. Ara yüzeydeki çukurun uzunluğu ξ , yüksekliği ise σ ile vermektedir.	8
2.5: Au/Co(t)/Au ince filmlerinde kolay ve zor eksenin Co kalınlığına bağlı histeresis eğrilerinin değişimi.	10
3.1: Kesik 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.	13
3.2: Kaydırma etkisi mekanizmasının manyetik alana bağlı gösterimi. i) durumunda, sistem TN sıcaklığının üstünde iken manyetik alan uygulanarak soğutulmaya başlanılır. Burada amaç FM malzemenin manyetik momentlerini bir düzene sokmaktır. AFM malzeme bu esnada paramanyetik fazdadır. ii) durumunda TN sıcaklığının altına giderken AFM malzemenin manyetik momentleri alan altında düzenli duruma geçecektir. iii) durumunda FM malzemenin manyetik momentleri uygulanan alan yönüne dönmek isteyecek ama değiş-tokuş etkileşmesinden dolayı zorlanacaktır.	

Ancak yeterli alan uygulandığında tüm manyetik momentler alan yönünde yönelebilecektir. iv) durumu FM malzemenin manyetik doyuma ulaştığı durumdur. Soğutma alanı yönünde manyetik alan uygulandığında v) AFM malzemenin manyetik momentleri ile değiş-tokuş etkileşimi sayesinde daha az bir enerji ile FM malzemenin manyetik momentleri alan yönünde yönelecektir.	14
3.3: Meiklejohn ve Bean modeline göre ifade edilen manyetik alan, FM ve AFM malzemelerin anizotropi ve mıknatıslanma yönleri gösterilmektedir.	15
3.4: Histeresis eğrisindeki zorlayıcı alanlar ve kaydırma alanı gösterilmiştir.	17
3.5: Grafikte zorlayıcı alanların ayrılmaya başladığı sıcaklık değeri (T_B) ok ile gösterilmiştir.	18
3.6: Dik anizotropili sistemler için Meiklejohn ve Bean'in modeline göre koordinatlar gösterilmektedir.	19
4.1: X-ışınının tabakalardan kırınımını göstermektedir.	24
4.2: Bir XRD sisteminin şematik çizimi gösterilmektedir.	24
4.3: X-ışınının yüzeyden yansıması için gerekli olan durum gösterilmiştir. a)'daki gibi kritik açıdan daha küçük bir açıyla gelirse yüzeyden direk yansır. b)'deki gibi kritik açığa eşit bir açıyla gönderilirse yüzeyde ilerler. Işının bir kısmının örnekten kırılması ve içerideki yüzeylerden yansıma yapabilmesi için c)'deki gibi kritik açı olarak tabir edilen açıdan daha büyük bir açıyla örneğe gönderilmesi gerekir.	25
4.4: a) aynı Si alttaşlar üzerindeki farklı kalınlıkta Au filmler, b) Si alttaşlar üzerinde aynı kalınlıkta büyütülmüş fakat farklı yoğunluğa sahip filmler, c) farklı ara yüzey pürüzlüğüne sahip 20 nm kalınlığında Au filmler ve d) farklı yüzey pürüzlüğüne sahip Si alttaşların XRR ölçümüne etkiler gösterilmiştir.	26
4.5: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü XRD cihazı.	27
4.6: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümündeki VSM sistemi.	29
4.7: Örneğe titreşim hareketi yaptıran VSM motor a) ile algılayıcı bobinler b) gösterilmektedir.	29
5.1: Tez çalışmasında hazırlanan a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örnek sistemleri.	31

5.2: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örnekleri için XRR ölçümleri ve simülasyon sonuçları gösterilmiştir.	32
5.3: Üzerine film büyütülmemiş Si alttaşın XRD grafiği gösterilmiştir.	34
5.4: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örnekleri için XRD grafikleri gösterilmiştir.	35
5.5: a) Örnek düzlemine paralel ve b) dik uygulanan manyetik alan gösterilmiştir.	36
5.6: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin 300K'da örnek düzlemine paralel ve dik ölçülen histeresis eğrileri gösterilmiştir.	36
5.7: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin kolay eksenleri gösterilmiştir.	37
5.8: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin 200 K'de kolay ekseninde ölçülen histeresis eğrileri gösterilmiştir.	39
5.9: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin farklı sıcaklıklarda ölçülen zorlayıcı alanları (H_{C1} ve H_{C2}) ve engelleme sıcaklıklarını (T_B) göstermektedir.	41
5.10: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin farklı sıcaklıklardaki zorlayıcı alan (H_C) ile kaydırma alanı (H_{EB}) değerleri gösterilmiştir.	42

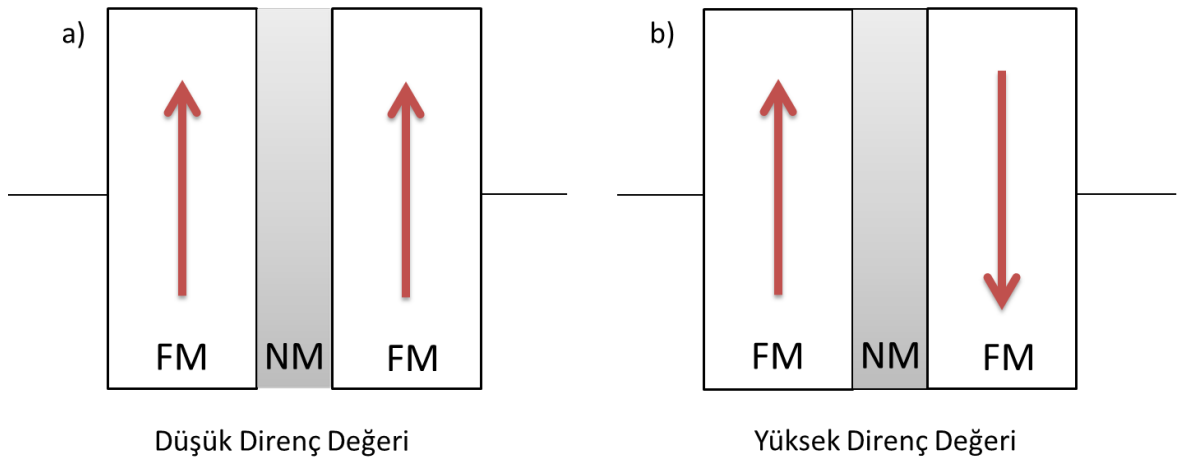
TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
5.1: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örnekleri için kalınlık, öz kütle ve pürüzlük sonuçları.	33
5.2: Dik geometride M_r/M_s oranları.	38
5.3: Zorlayıcı alanlar (H_{C1} ve H_{C2}) ile kaydırma alanının (H_{EB}) değerleri.	40

1. GİRİŞ

Manyetik malzemeler üzerine birçok araştırma yapılmış ve bu araştırmalar sayesinde modern bilim ve teknolojiye manyetik malzemeler ve bunlarla yapılan cihazlar önemli bir yer edinmiştir. En önemli çalışmalardan bir tanesi 1980'lerin sonlarına doğru Albert Fert ve Peter Grünberg'in bağımsız çalışmaları sonucu keşfedilen dev manyeto direnç (GMR) olarak gösterilebilir [1], [2]. Bu buluş bilim adamlarına elektronun spinini ve yükünü aynı anda araştırma düşüncesini doğurmuş ve spintronik adı verilen yeni bir alan açmıştır [3], [4], [5]. Öneminden dolayı bu keşif 2007 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür.

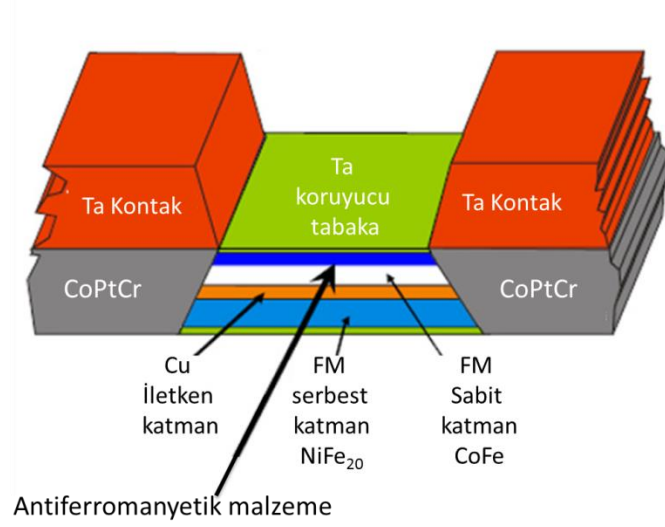
GMR sistemleri genel olarak iki adet ferromanyetik (FM) katman ve bir adet manyetik olmayan iletken katmandan oluşmaktadır. FM malzemelerin spinleri Şekil 1.1 a) gibi aynı yöne bakıyorlarsa iki FM tabaka arasında ölçülen elektriksel direnç değeri az olurken, spinler farklı yöne Şekil 1.1 b) bakıyorlarsa direnç değeri fazla olmaktadır.



Şekil 1.1: GMR yapısında spinlerin yönünün paralel a) veya anti paralel b) olduğu durumlarda direnç değerinin davranışı gösterilmektedir.

GMR etkisinin kullanıldığı spin vanalarında FM katmanlardan bir tanesinin spinleri antiferromanyetik (AFM) malzemenin etkileşmesiyle sabitlenir ve diğer FM malzemenin spinleri uygulanan alan ile farklı yönlerde döndürülerek FM yapılar paralel veya antiparalel duruma getirilir. Böylelikle sistemin direncinde değişiklik

yapılmış olur. Şekil 1.2’de Hitachi [6] tarafından geliştirilmiş GMR etkisinin kullanıldığı bir sabit disk okuyucu kafası görülmektedir.

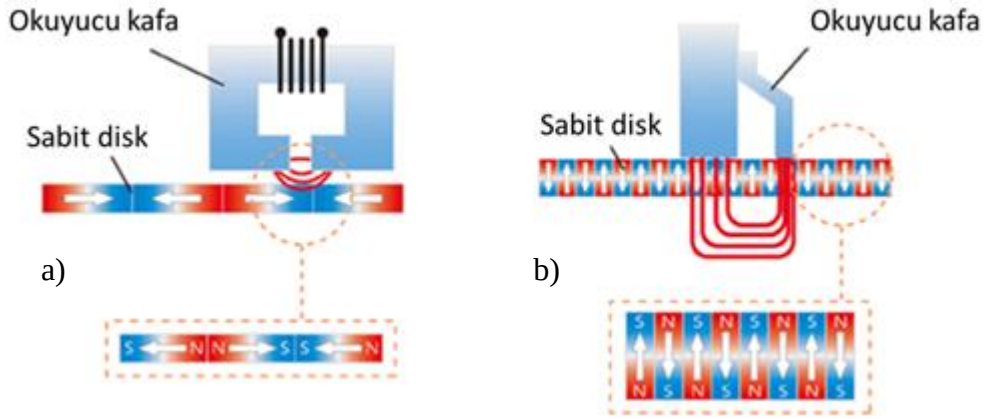


Şekil 1.2: Hitachi tarafından geliştirilmiş sabit disk okuyucu kafalarda kullanılan GMR yapısı.

Kaydırma etkisi ilk olarak 1956 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından FM Co parçacıkları ile çalışırken oksitlenen Co parçacıklarının diğer Co parçacıkları ile etkileşmesi sonucu gözlemlendi [7], [8], [9]. Sonraki yıllarda bu etkiyi anlamak için birçok çalışma yapıldı. Genelde yapılan çalışmalar örnek düzleminde mıknatıslanmaya sahip örnekler üzerine olmuştur [10], [11], [12], [13].

Dik manyetik anizotropiye sahip sistemler için de kaydırma etkisi görülmüş ve son zamanlarda bu sistemlerin fiziksel özelliğini anlamaya yönelik çalışmalar yapılmıştır [14], [15], [16]. Çalışmalar sonucunda dik manyetik anizotropiye sahip malzemeler bilgi depolama teknolojisi için önemli gelişmelere sebep olmuştur. Bu malzemeler daha küçük alana daha fazla bilgi kaydetme imkânı sağlamaktadır. 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. Yapılan çalışmalar sonucunda dik mıknatıslanmaya sahip sistemlerin termal ve manyetik dayanaklığı yüksek ve daha az enerji harcayan sistemler olduğu düşünülmektedir [17]. Şekil 1.3 a) örnek düzleminde ve Şekil 1.3 b) örnek düzlemine dik manyetik anizotropiye sahip sistemlerin sabit disklerdeki kullanımı gösterilmiştir [18]. Şekilde görüldüğü gibi dik

manyetik anizotropiye sahip sistem aynı alana daha fazla kayıt yapma imkânı sağlamaktadır.



Şekil 1.3: Örnek düzleminde anizotropiye a) ve dik manyetik anizotropiye b) sahip sistemlerin kullanıldığı sabit disk okuyucu kafalar.

Kaydırma etkisi her ne kadar teknolojik uygulama alanlarında kullanılıyor olsa da, bu etkinin fiziksel nedenleri net olarak anlaşılabilmiş ve olayı çözümleyen fiziksel teori tam olarak geliştirilebilmiş değildir [19], [20]. Bunun yanı sıra kullanım alanını artırmaya yönelik çalışmalar da devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında magnetron saçtırmalı kaplama yöntemiyle Silisyum üzerine büyütülen Pt/Co/M/CoO/Pt (M=Pt, Cr) ince filmlerin kaydırma etkisi özellikleri incelenmiştir. Büyütülen örneklerin yapısal ve manyetik özellikleri belirlenmiştir.

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde tezin önemi ve amacı anlatılmıştır. İkinci bölümde ince filmlerin anizotropisinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde tezin ana konusu olan kaydırma etkisi üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde örneklerin yapısal ve manyetik özelliklerini anlamaya yönelik kullanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise örneklerin yapısal ve manyetik özelliklerinin deneysel sonuçları anlatılmıştır. Son bölümde de tezin sonuçları verilmiştir.

2. İNCE FİLMLERDE MANYETİK ANİZOTROPİ

2.1. Giriş

Manyetik anizotropi, FM malzemelerin en önemli özelliklerinden birisidir. Deneysel çalışmalarla görülmüştür ki bazı FM malzemeler mıknatıslandığında histeresis eğrisi manyetik alanın uygulandığı eksene göre değişim göstermektedir [21]. Başka bir ifadeyle, malzemeyi doyuma ulaştırmak için gereken enerji kristalin yönüne bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu ifadeye göre FM malzemeyi manyetik alanla kolay ekseninde doyuma ulaştırmak için daha düşük manyetik alana, zor ekseninde doyuma ulaştırmak ise tersi olarak daha güçlü alana ihtiyaç duyulmaktadır.

İnce filmler, bulk yapıdan farklı manyetik anizotropiye sahip olmasından dolayı bilim adamlarının ilgisini çekmiştir. Teknolojik cihazlara uyarlanabilmesi ve bu sistemlerin geliştirilmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır [22], [23]. Günümüzde manyeto-optik kayıt cihazlarında, bilgi depolama sistemlerinde ve birçok spintronik cihazlarda ince filmler farklı anizotropi özelliklerinden dolayı 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 [24].

2.2. Manyetik Anizotropinin Kaynağı

Manyetik anizotropi malzemenin şekli, kristal simetrisi, malzemedeki stres ya da komşu atomların etkileşmesinden kaynaklanmaktadır. Temel ifadelerle manyetik anizotropinin kaynağı manyetik dipolar etkileşim ve spin-orbit etkileşimidir. Bu iki etkileşimin olmadığı durumlarda elektronların ve spinlerin toplam enerjisi mıknatıslanmanın yönüne bağlı değildir.

Dipolar etkileşim örneğin şekli ile ilişkili olduğundan şekil anizotropisi olarak da bilinir. Spin-orbit etkileşiminin ise anizotropiye çok farklı şekillerde katkısı vardır. Filmin kristal yapısının simetrik olması ve spin ile orbital momentlerin toplam katkısı manyeto-kristal anizotropi olarak bilinir. Ara

yüzeylerde, kristal simetrisinin bozulması ile farklı özellikteki atomların etkileşmesi sonucu orbital manyetik momentlerin değişimi ara yüzey anizotropiye sebep olur. Son olarak, manyeto-elastik anizotropi komşu atomların etkileşmesiyle spin-orbit etkileşimindeki değişiminden kaynaklanmaktadır. Bu değişimin sebebi ise gerilmeler ve örgü parametrelerin uyumsuzluğudur.

2.3. Etkin Manyetik Anizotropi

Manyetik anizotropinin örnek düzleminde ya da dışında olmasında etkili olan parametreler etkin manyetik anizotropi adı altında ele alınabilir. 1954 yılında Néel ince filmlerde anizotropinin hangi parametrelerle ilişkili olduğunu etkin anizotropi ile açıkladı [25]. Etkin anizotropiyi (K_{etkin}), hacim anizotropisi (K_v) ve yüzey anizotropisinin (K_s) katkısı olarak tanımladı. Néel bu çalışmalarında K_v 'nin kalınlıktan bağımsız olduğunu ve K_s 'nin ise kalınlığa bağlı olduğunu söyledi. K_v 'yi tanımlarken manyeto-kristal anizotropi (K_c), şekil anizotropisi (K_d) ve manyeto-elastik anizotropinin (K_γ) toplamıyla ifade etmiştir.

Denklem (2.1)'de K_{etkin} ve Denklem (2.2)'de K_v ayrıntılı bir şekilde yazılmıştır.

$$K_{etkin} = K_v + \frac{2}{t} K_s \quad (2.1)$$

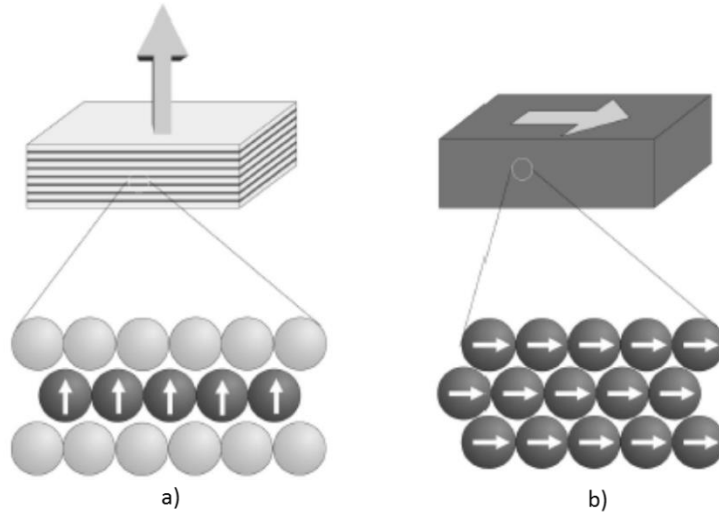
$$K_v = K_c + K_d + K_\gamma = K_c + 2\pi M_s^2 - \frac{3}{2} \gamma \delta \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'deki M_s doyum mıknatıslanmasını, γ doyum mıknatıslanma sabitini, δ stres faktörünü ve t kalınlığı ifade eder.

K_v terimi genel olarak ince filmin kolay ekseninin örnek düzlemine paralel olmasını isteyen bir anizotropidir ve kalınlıktan bağımsızdır. K_s ise atomların yüzey etkileşimlerinden kaynaklanan yüzey anizotropisini vermektedir ve anizotropinin örnek düzlemi dışında olmasını arzu eder. Denklem (2.1)'de görüldüğü gibi kalınlığın büyük olması K_s değerinin K_{etkin} 'e katkısını azaltır. K_s 'in 2 ile çarpılmasının nedeni ince filmin aynı özelliklere sahip katmanla ara yüzeyde etkileşim göstermesidir. K_v ve K_s 'in birbirlerine baskın gelmesine göre ince filmin

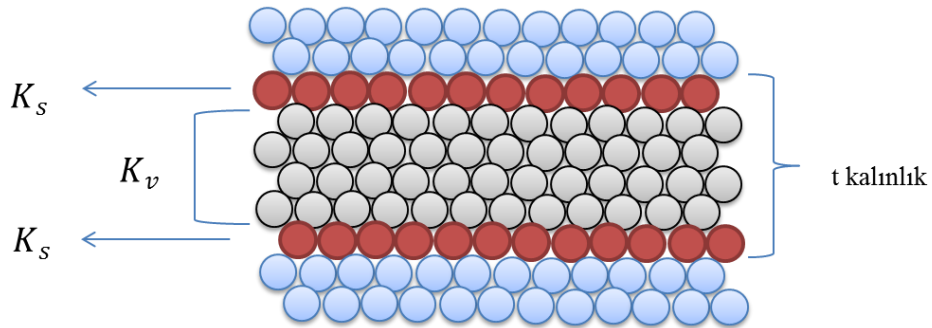
anizotropi yönünün örnek düzleminde olduğu ya da örnek düzlemine dik olduğu durum ortaya çıkar.

Şekil 2.1’de yüzey etkileşmesinin olduğu ve olmadığı durumun anizotropiye etkisini şekil olarak gösteren bir figür verilmiştir. Şekil 2.1 a)’ya iki ara yüzeye sahip çok ince FM malzeme dik mıknatıslanmaya sahip olurken, Şekil 2.1 b) durumunda ara yüzey etkileşmesi olmadığından K_v ’nin baskın ve anizotropinin örnek düzleminde olduğu görülmektedir [26].



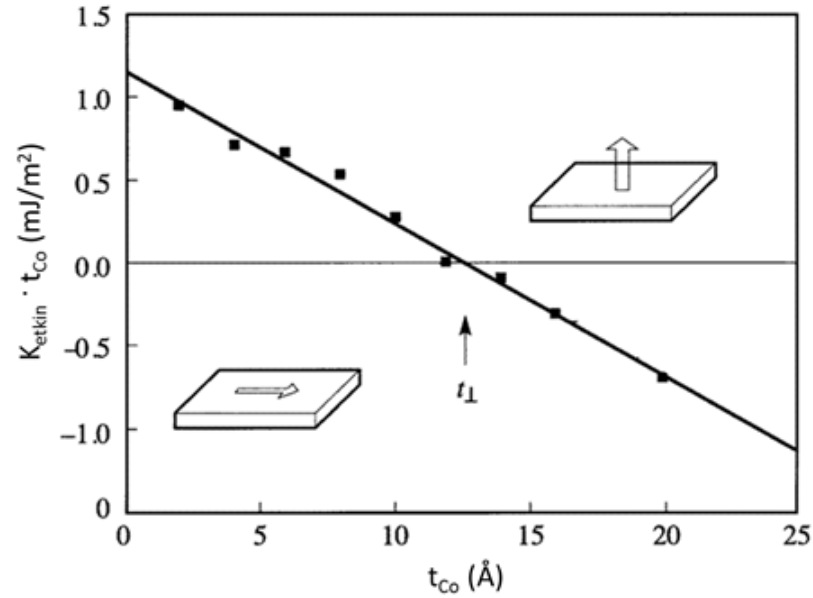
Şekil 2.1: a) Kritik kalınlığın altında ara yüzey etkileşimi gösteren örneğin kolay eksenini örnek düzlemine dik olurken, b) hacim anizotropisinin baskın olduğu örnekte kolay eksen örnek düzleminde görülmektedir.

Şekil 2.2’de K_v ve K_s değerlerinin ince filmin hangi kısmından kaynaklandığı gösterilmektedir.



Şekil 2.2: İnce filmin anizotropisine katkı veren, hacim ve ara yüzey anizotropisine neden olan kısımlar gösterilmiştir.

Şekil 2.3’de deneysel çalışmalar sonucu farklı kalınlıklardaki Co ile 11 Å kalınlığındaki Pd’nin ara yüzey etkileşmesi ve hacim anizotropisine bağlı değişen etkin manyetik anizotropi değerleri verilmiştir [27]. Çıkan sonuçlar şekildeki gibi doğrusal fit edilirse eğimi K_v olan bir doğru çıkar.



Şekil 2.3: Co(t Å)/Pd(11 Å) örneğinde K_{etkin} ’in Co kalınlığına bağlı değişimi gösterilmektedir.

Denklem (2.3), Şekil 2.3’de verilen grafikteki doğrunun denklemidir.

$$K_{etkin} \cdot t = K_v \cdot t + 2K_s \quad (2.3)$$

Bu doğrunun y-eksenini kestiği nokta $2K_s$ değeri, x-eksenini kesen nokta ise kritik kalınlıktır. Kritik kalınlık değerinin altında ince film dik manyetik anizotropiye sahip olurken daha kalın olan FM malzeme örnek düzleminde anizotropiye sahip olur. Kritik kalınlık aynı zamanda K_{etkin} ’in pozitif değerden negatif değere geçiş kalınlığını göstermektedir.

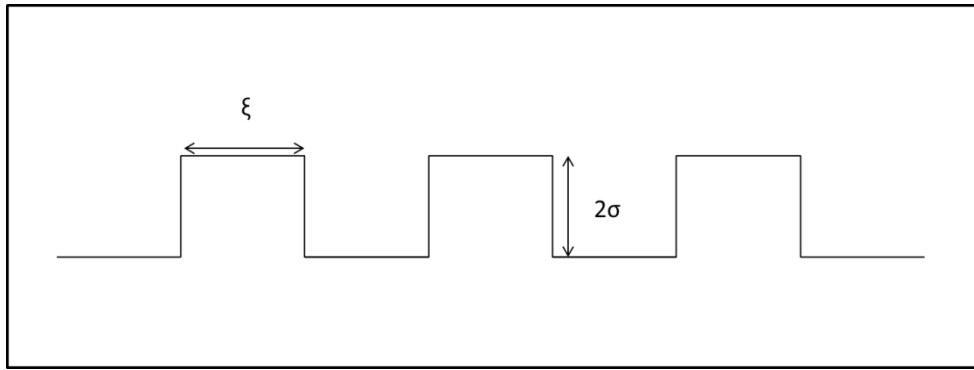
Şekil 2.3’de görüldüğü gibi K_v negatif, K_s ise pozitif değer almaktadır. K_{etkin} ’in pozitif değer alması için K_s ’nin K_v ’ye baskın gelmesi gerekir. Bunun anlamı ince filmin örnek düzlemine dik manyetik anizotropiye sahip olmasıdır. K_{etkin} ’in negatif olması ise hacim anizotropisinin baskın hale geldiği ve kolay eksenin örnek düzleminde olduğu durumunu belirtir.

Sonuç olarak, K_v ince filmlerde mıknatıslanmayı örnek düzlemine paralel tutmak isterken, K_s örnek düzleme dik tutmak istemektedir.

2.4. Ara Yüzey Yapısının Manyetik Anizotropiye Etkisi

İnce filmlerde ara yüzey yapısı çok önemlidir ve bu yapıyı etkileyen birçok faktör vardır. Büyütme tekniği, hazırlama koşulları (alttaş sıcaklık, büyütme hızı, vakum şartları), kullanılan elementin türü, kalınlık, örgü uyumu ve alt taş kalitesi ara yüzey yapısını etkilemektedir. Saydığımız bu etkenler yüzeyde pürüzlüğe ve tabakalar arasında difüzyona sebep olabilmektedir.

Pürüzlük, manyetik anizotropinin ana kaynaklarından olan dipolar etkileşimi doğrudan etkilemektedir. Bruno bu etkiyi teorik olarak incelemiş ve bununla ilgili bir model tasarlamıştır. Şekil 2.4’de Bruno’nun tasarlamış olduğu model görülmektedir [28]. Bruno, modelinde pürüzlüğün yüzeyde girinti-çıkıntılar oluşturduğunu ve bu girinti-çıkıntıların örnek düzleminde lokal demanyetizasyon alanına sebep olduğunu, fakat bu lokal demanyetizasyon alanının K_v ’nin toplamına zıt olacak şekilde etkidiğini belirtmiştir. Pürüzlüğün K_v ’ye pozitif yönde bir etki yapması dolaylı yoldan dik manyetik anizotropiye katkı yapacağını belirtiyor.



Şekil 2.4: Bruno’nun pürüzlüğün anizotropiye etkisini açıklamak için tasarladığı model gösterilmektedir. Ara yüzeydeki çukurun uzunluğu ξ , yüksekliği ise σ ile verilmektedir.

Bruno başka bir çalışmasında pürüzlüğün ara yüzey anizotropisine de negatif etkisinin olduğunu ifade ediyor. Bu çalışmasında teorik olarak K_s ’deki azalma oranını basit kübik yapının (100) yüzeyi için Denklem (2.4) ile açıklamaktadır [29].

Ara yüzeydeki çukurların yüksekliğine ve uzunluğu K_s değerinde Denklem (2.4)'deki orantıya göre azalmaya sebep olacaktır.

$$\frac{\Delta K_s}{K_s} = -\frac{2\sigma}{\xi} \quad (2.4)$$

İnce filmlerde pürüzlüğün anizotropi üzerine etkisinin gösteren deneysel çalışma da mevcuttur. Bruno'nun teorik olarak modellerinden birkaç yıl sonra yapılan Fe/Au ince filmlerinden elde edilen sonuçlar da modelle uyumlu çıkmıştır [30].

Ara yüzeydeki diğer bir durum ise tabakalar arası difüzyondur. Tabakalar arası difüzyon ince filmin büyütülmesi sırasında veya belli sıcaklık değerine ısıtıldığında görülen bir olaydır. Néel'in modeline göre yüzey anizotropisini olumsuz etkilemektedir [25]. Draaisma ve Jonge deneysel olarak tabakalar arası difüzyon bağlı olarak K_s 'nin değişimi üzerine bir çalışma yapmış ve Néel modeliyle uygunluğunu göstermişlerdir [31].

2.5. Örnek Düzlemine Dik Manyetik Anizotropi

Dik manyetik anizotropi mıknatıslanmanın örnek düzlemine dik olma isteğidir. Günümüzde ince filmin bu özelliği bilgi depolama sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu malzemeler daha küçük alana daha fazla bilgi kaydetme imkânı sağlamaktadır. Bu sayede bilgi yoğunluğu daha fazla olan sabit diskler elde edilmektedir. Bunun yanı sıra dik manyetik anizotropi, spin transfer tork cihazlarında daha düşük akımlar ile çalışma imkânı sağladığından tercih edilir. Yapılan çalışmalar sonucunda dik mıknatıslanmaya sahip sistemlerin yüksek termal ve manyetik dayanıklılığa sahip olduğu ve daha az enerji harcadığı belirtilmiştir.

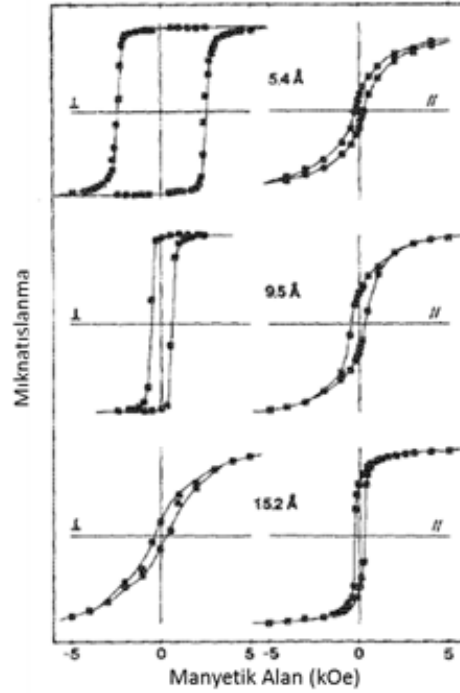
Kolay eksenin örnek düzlemine dik olduğu durumu deneysel olarak ilk kez 1968 yılında Gradman ve Muller Cu (111) üzerine büyütülmüş çok ince NiFe filmlerinde gösterdiler [34]. Çok katlı ince filmlerde dik manyetik anizotropi, 1985 yılında Carcia tarafından Co/Pd sistemlerinde gözlemlendi [35]. Daha sonrasında FM olan Fe, Ni ve Co elementlerinin ara yüzey etkileşmesi yapabileceği Pt, Au, Ir ve Cu elementleriyle farklı sistemler denenerek dik mıknatıslanma elde edildi [36],

[37], [38], [39], [40]. Bunun yanında TbFeCo, GdFeCo, CoFeB, CoCr, CoPt ve FeCo alaşımlı çok katlı ince filmlerde de dik manyetik anizotropi üzerine çalışmalar yapıldı [41], [42], [43].

Yapılan çalışmalar sonucunda dik anizotropinin bazı kritik parametrelere bağlı olduğu görülmüştür. Bu parametreler FM ve tampon malzemenin türü, kalınlığı, yüzeydeki pürüzlükler, tabakalar arası difüzyon ve çok katlı sistemlerde tekrar etme sayısıdır [18].

2.6. Manyetik Anizotropiye Bağlı Histeresis Eğrileri

Daha önce bahsedildiği gibi FM ince filmlerin kolay ve zor eksenlerine bağlı olarak malzemeyi doyuma ulaştırmak için gerekli olan minimum enerji ve manyetik alan farklılık göstermektedir. Bu farklılığı görmek için Şekil 2.5'i incelersek anizotropinin önemi daha iyi anlaşılabilir [44].



Şekil 2.5: Au/Co(t)/Au ince filmlerinde kolay ve zor eksenin Co kalınlığına bağlı histeresis eğrilerinin değişimi.

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi Co kalınlığı 5.4 Å ve 9.5 Å olan örneklerin kolay eksenini örnek düzlemine diktir. Örnek düzlemine dik uygulanan alan altında ölçülen

histeresis eğrisi dikdörtgen yapıda olurken, örnek düzlemine paralel manyetik alan uygulanarak ölçülen histeresis eğrisi ise oval yapılı görülmektedir. 5.4 Å ve 9.5 Å kalınlıklarındaki örnekleri doyuma götüren manyetik alanlara bakılırsa kolay yön olan dik ekseninde düşük alanda doyuma ulaşılırken, örnek düzleminde yani zor yönde daha kuvvetli alana ihtiyaç duyulmuştur. Kolay ekseninde örnek düzleminde olan 15.2 Å kalınlıktaki örnek için ise tam tersi durum geçerlidir.

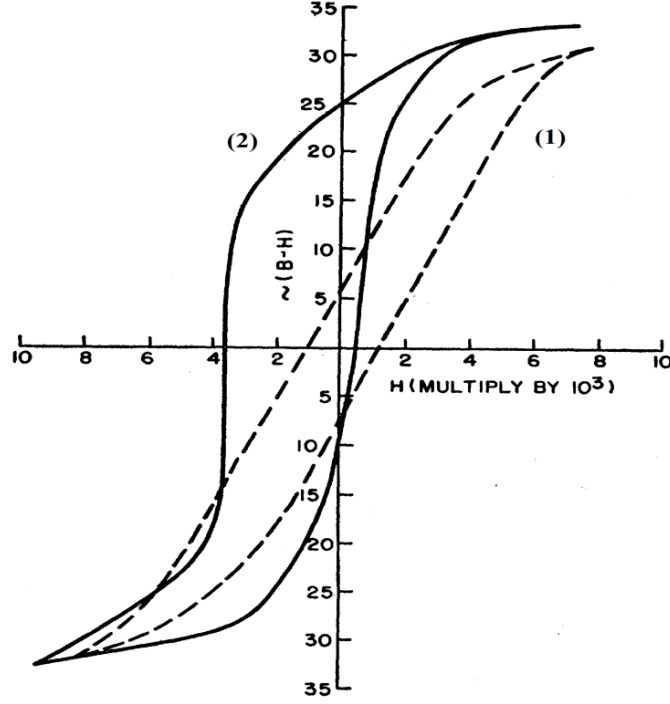
3. KAYDIRMA ETKİSİ (EXCHANGE BIAS)

3.1. Giriş

Kaydırma etkisi, ilk olarak Meiklejohn ve Bean tarafından Co/CoO parçacıkları üzerinde çalışırken 1956 yılında keşfedilmiştir [7], [8]. Kaydırma etkisinin keşfinden itibaren, bilim adamları bu etkinin fiziksel nedenlerini anlamak ve deneyi doğru temsil eden modeller oluşturmak için birçok çalışmalar yapmıştır. Ancak bu etkinin fiziksel nedenleri hala anlaşılamamıştır [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]. Bunun yanı sıra bilgi depolama teknolojisi gibi birçok alanda kullanıldığından dolayı önemini korumaktadır [10], [11].

Kaydırma etkisi, FM ve AFM malzemelerin ara yüzeyde etkileşmesi sonucu histeresis eğrisinin manyetik alan ekseninde kayması olarak bilinir. Bunun yanı sıra ferimanyetik malzemeler kullanılarak da kaydırma etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır [32], [33]. Bu tez çalışmasında FM ve AFM malzemelerin etkileşmesi sonucu görülen kaydırma etkisi üzerine durulacaktır.

FM-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.

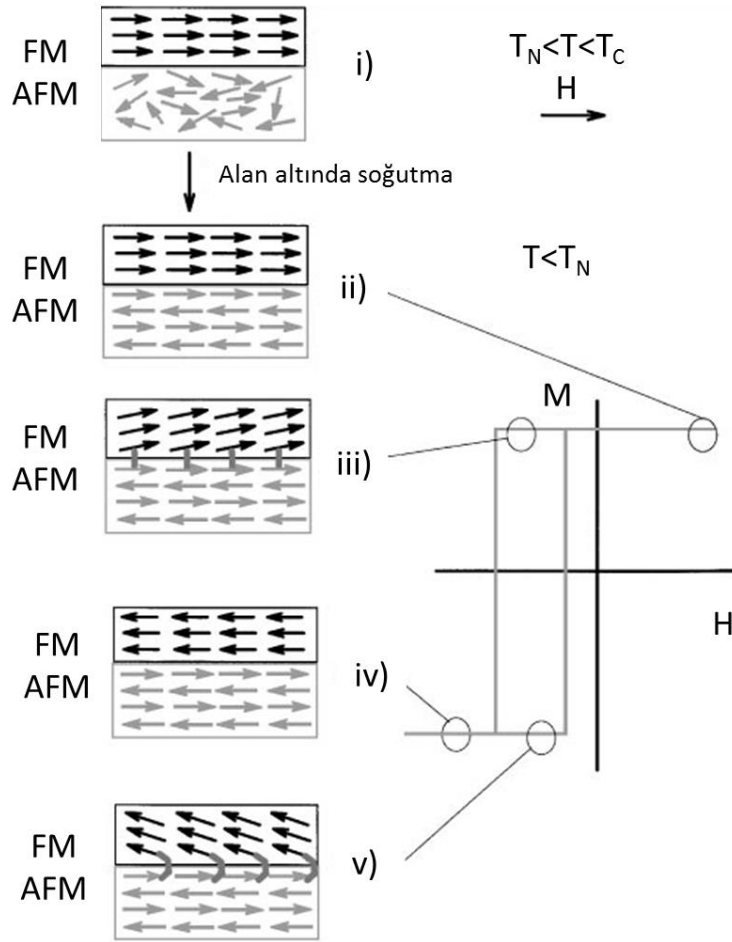


Şekil 3.1: Kesik çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi 1) 77 K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi 2) ise 77 K'e kadar 10 kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir.

Şekil 3.1'de Meiklejohn ve Bean'in Co/CoO için elde ettikleri histeresis eğrileri verilmiştir. Kesik çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi Şekil 3.1 1) 77 K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi Şekil 3.1 2) 77 K'e kadar 10 kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir [7]. Manyetik alan altında soğutulan örneğin histeresis eğrisinde kayma görülürken, alansız soğutulan örneğin histeresis eğrisinde herhangi bir kayma gözlenmemiştir.

3.2. Kaydırma Etkisinin Mekanizması

Kaydırma etkisi, FM ve AFM malzemelerin manyetik momentlerinin ara yüzeyde etkileşmesi sonucu gerçekleşir. AFM malzeme tarafından sıkıca tutulan FM malzemenin manyetik momentleri uygulanan manyetik alan yönünde dönemez. Kaydırma etkisinin mekanizmasını anlatan bu durum Şekil 3.2'de gösterilmiştir [19].

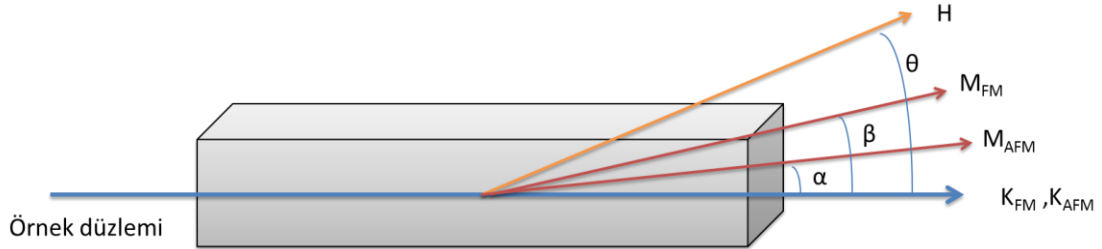


Şekil 3.2: Kaydırma etkisi mekanizmasının manyetik alana bağlı gösterimi. i) durumunda, sistem T_N sıcaklığının üstünde iken manyetik alan uygulanarak soğutulmaya başlanılır. Burada amaç FM malzemenin manyetik momentlerini bir düzene sokmaktır. AFM malzeme bu esnada paramanyetik fazdadır. ii) durumunda T_N sıcaklığının altına giderken AFM malzemenin manyetik momentleri alan altında düzenli duruma geçecektir. iii) durumunda FM malzemenin manyetik momentleri uygulanan alan yönüne dönmek isteyecek ama değiş-tokuş etkileşmesinden dolayı zorlanacaktır. Ancak yeterli alan uygulandığında tüm manyetik momentler alan yönünde yönelebilecektir. iv) durumu FM malzemenin manyetik doyuma ulaştığı durumdur. Soğutma alanı yönünde manyetik alan uygulandığında v) AFM malzemenin manyetik momentleri ile değiş-tokuş etkileşimi sayesinde daha az bir enerji ile FM malzemenin manyetik momentleri alan yönünde yönelecektir.

3.3. Meiklejohn ve Bean Modeli

Meiklejohn ve Bean, Co/CoO parçacıklarında gözlemledikleri kaydırma etkisinin sebebini ve kaydırma alanının büyüklüğünü açıklamak için model geliştirdiler. Bu modelde, kaydırma etkisinin görülebilmesi için sistem ile ilgili bazı varsayımlarda bulundular. Bu varsayımlara göre FM malzeme tekli domen yapıdadır ve FM malzemenin manyetik momentleri uygulanan manyetik alana bağlı olarak bir bütün olarak döner. AFM malzeme de tekli domen yapıdadır ve kuvvetli bir anizotropiye sahip olmalıdır. AFM malzemenin spinlerinin yönelimi uygulanan manyetik alanla değişmemektedir. FM ve AFM malzemelerin yüzeyleri pürüzsüzdür. AFM malzemenin FM malzemeyle temas eden yüzeyinde eşleşmemiş manyetik momentler olmalıdır ve bu eşleşmemiş spinlerin net bir mıknatıslanması vardır. FM ve AFM tabakalar ara yüzeyde değiş-tokuş etkileşimiyle etkileşirler [20], [45].

Meiklejohn ve Bean, modellerinde mıknatıslanmanın yönelimini açıklamak için Şekil 3.3’de görülen Stoner-Wohlfarth modelini kullandılar [46]. M_{FM} ile M_{AFM} sırasıyla FM ve AFM malzemenin mıknatıslanma yönünü, H uygulanan alanı, K_{FM} ile K_{AFM} ise FM ve AFM malzemelerin anizotropi yönlerini göstermektedir.



Şekil 3.3: Meiklejohn ve Bean modeline göre ifade edilen manyetik alan, FM ve AFM malzemelerin anizotropi ve mıknatıslanma yönleri gösterilmektedir.

Kaydırma etkisinin görüldüğü sistemlerde birim alana düşen toplam enerji Denklem (3.1) ile verilmiştir [9], [19].

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

H uygulanan manyetik alanı, K_{FM} ile K_{AFM} ise FM ve AFM malzemelerin anizotropi sabitlerini, t_{FM} ile t_{AFM} FM ve AFM malzemelerin kalınlığını ve J_{EB} ara yüzey değiş-tokuş sabitini vermektedir. α örnek düzlemi ile AFM malzemenin mıknatıslanma vektörü, β örnek düzlemi ile FM malzemenin mıknatıslanma vektörü ve θ örnek düzlemi ile uygulanan manyetik alanın arasındaki açıları vermektedir.

Örnek düzlemine paralel anizotropilerde, $K_{AFM}t_{AFM} \gg K_{FM}t_{FM}$ olduğundan enerji Denklemi (3.2)'deki gibi yazılabilir.

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

Sistemin toplam enerjisinin denge durumunu (minimum enerji) bulmak için α ve β 'ya göre birinci türev alınarak sıfıra eşitlenir. α 'ya göre türev alınırsa çıkan sonuç Denklem (3.3)'deki gibi olacaktır.

$$K_{AFM} t_{AFM} \sin 2\alpha = J_{EB} \sin(\beta - \alpha) \quad (3.3)$$

Denklem (3.3) teorik olarak analiz edilirse kaydırma etkisi gözlenebilmesi için kritik durum olarak $K_{AFM} t_{AFM} \geq J_{EB}$ ifadesi ortaya çıkar. Buna göre AFM malzemenin anizotropi enerjisi ara yüzey değiş-tokuş enerjisinden büyük olmalıdır. Eğer bu şartın tersi durum geçerli olursa, uygulanan alan ile AFM ve FM malzemenin spinleri beraber döner ve histeresis eğrisinde herhangi bir kayma söz konusu olamaz.

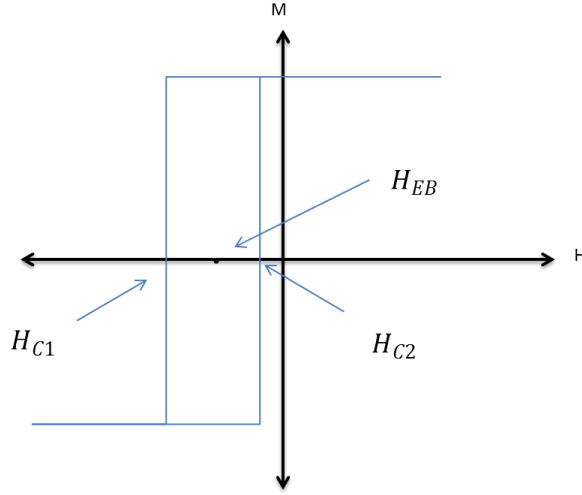
β 'ya göre türev alınırsa çıkan sonuç Denklem (3.4)'deki olacaktır.

$$H_{EB} = -\frac{J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (3.4)$$

Bu denklem histeresis eğrisindeki kayma alanını vermektedir. Buna göre, kayma alanının ara yüzeydeki değiş-tokuş etkileşimine, FM malzemenin mıknatıslanmasına ve kalınlığına bağlıdır. Çıkan sonuca göre kalınlık ile kayma alanı arasında ters orantı vardır.

3.4. Zorlayıcı Alanlar

Histeresis eğrisinde FM malzemenin mıknatıslanmasının, sıfır olduğu değerdeki manyetik alanlara zorlayıcı alan denir. Şekil 3.4’de bu alanlar (H_{C1} ve H_{C2}) ve kaydırma alan (H_{EB}) gösterilmiştir



Şekil 3.4: Histeresis eğrisindeki zorlayıcı alanlar ve kaydırma alanı gösterilmiştir.

Histeresis eğrisinden elde edilen H_{C1} ve H_{C2} değerlerinden kaydırma alanı (H_{EB}) ve zorlayıcı alan (H_C) hesaplanabilir. H_{EB} ve H_C değerleri Denklem (3.5)’de verilen formüller ile hesaplanır [20].

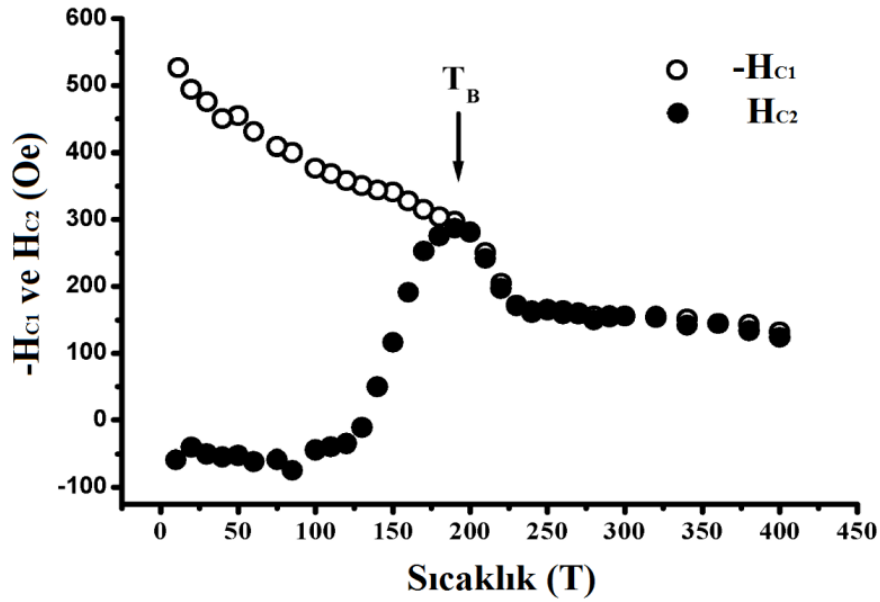
$$H_C = \frac{-H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (3.5)$$
$$H_{EB} = \frac{H_{C1} + H_{C2}}{2}$$

3.5. Kaydırma Etkisine Sıcaklığın Etkisi

Kaydırma etkisinde sıcaklık çok önemlidir. FM ve AFM malzemelerde manyetik düzen elde edebilmesi için kritik sıcaklıklar vardır. FM malzemeler Curie sıcaklığının (T_C) üstünde paramanyetik yapıdadır. FM spinlerin yönelimi kaydırma etkisinde önemli rol aldığından dolayı ölçümler T_C ’nin altında yapılmalıdır. AFM malzemeler için ise Néel sıcaklığı (T_N) kritik sıcaklıktır. T_N ’nin üstünde AFM

malzeme paramanyetik özellik gösterirken, T_N 'nin altında ise spinler anti paralel olarak dizilir. Kaydırma etkisinin sistemde görülebilmesi için örnekte AFM malzemelerin spinleri istenilen ekseninde anti paralel olarak dizilmelidir. AFM'nin spinlerini manyetik alanla istenilen doğrultuya çevirebilmek için T_N 'den daha yüksek sıcaklıklardan başlanılarak manyetik alan altında soğutulmalı ve ölçüm yapılmalıdır. Aksi takdirde AFM malzemenin manyetik momentlerini T_N 'nin altında istenilen doğrultuya yönlendirmek imkânsız olur.

Kaydırma etkisinin gözlenebilmesi beklenen sıcaklık AFM malzemenin T_N değerindedir. Birçok deneysel çalışmada T_N değerinin daha altında kaydırma etkisi görülmüştür [10], [11], [12], [47]. Bunun sebebi ince film yapısında olan AFM malzemenin bulk yapıdan farklı özellikte olması ya da içinde farklı fazların olmasıdır. Kaydırma etkisinin gözlemlendiği sıcaklık değeri engelleme (blocking) sıcaklığı (T_B) olarak adlandırılır. Şekil 3.5'de, AFM CoO tabakasına sahip bir FM/AFM sistemin T_B 'si gösterilmektedir [20].



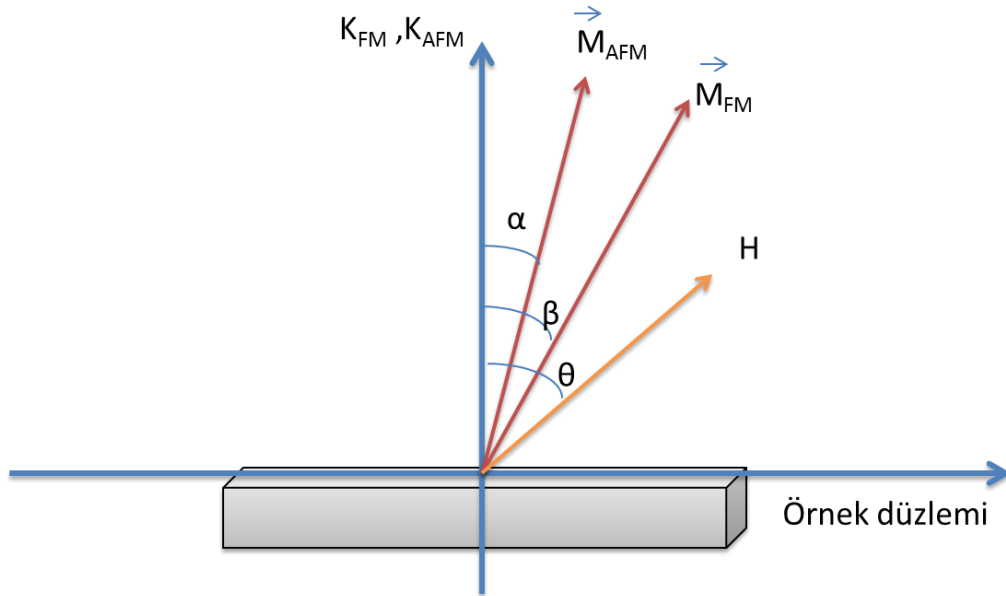
Şekil 3.5: Grafikte zorlayıcı alanların ayrılmaya başladığı sıcaklık değeri (T_B) ok ile gösterilmiştir.

3.6. Dik Manyetik Anizotropili Örneklerde Kaydırma Etkisi

Kaydırma etkisi, genelde örnek düzleminde mıknatıslanan sistemler için çalışılmıştır [8], [9], [10]. Daha sonrasında kaydırma etkisinin dik mıknatıslanmış sistemlerde de olabileceği görüldüncə, dik anizotropili örneklerin kaydırma etkisi bilim adamlarının ilgisini çekmiştir [48], [49]. Çünkü dik anizotropili örneklerin teknolojik cihazlarda kullanımına yönelik birçok çalışma yapılmıştır [16], [49], [50], [51], [52].

3.6.1. Dik Manyetik Anizotropili Sistemlerde Meiklejohn-Bean Modeli

Meiklejohn ve Bean modelinde, kaydırma etkisini açıklamak için anizotropi örnek düzlemine paralel düşünülmüştü [8], [9]. Daha sonraki çalışmalarda dik manyetik anizotropili sistemlerde kaydırma etkisi gözlemlenince Meiklejohn ve Bean'ın modeli dik manyetik anizotropili sistemler için de uyarlandı [53].



Şekil 3.6: Dik anizotropili sistemler için Meiklejohn ve Bean'ın modeline göre koordinatlar gösterilmektedir.

Şekil 3.6’da M_{FM} FM katmanın mıknatıslanmasını, M_{AFM} AFM katmanın eşleşmemiş spinlerinin mıknatıslanmasını, K_{FM} ve K_{AFM} FM ve AFM katmanların anizotropilerini ve H uygulanan manyetik alanın yönünü ifade etmektedir. K_{FM} ve K_{AFM} örnek düzlemine dik olarak gösterilmiştir. α örnek normali ile AFM malzemenin mıknatıslanma vektörü, β örnek normali ile FM malzemenin mıknatıslanma vektörü ve θ örnek normali ile uygulanan manyetik alanın arasındaki açıları vermektedir.

Buna göre kaydırma etkisinin görüldüğü dik anizotropili sistemlerde birim alan başına düşen toplam enerji Denklem (3.6)’da verilmiştir [7], [19], [53].

$$E = -\mu_0 H M_{FM} t_{FM} \cos(\theta - \beta) + K_{AFM} t_{AFM} \sin^2(\alpha) + K_{FM} t_{FM} \sin^2(\beta) - J_{EB} \cos(\beta - \alpha) \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)’daki H uygulanan manyetik alanı, M_{FM} FM katmanın mıknatıslanmasını, t_{FM} FM katmanın kalınlığını, M_{AFM} AFM katmanın ara yüzeydeki eşleşmemiş spinlerin mıknatıslanmasını, t_{AFM} AFM katmanın kalınlığını, K_{FM} ve K_{AFM} FM ve AFM anizotropi sabitlerini ve J_{EB} ara yüzeydeki değiş-tokuş sabitini vermektedir.

Denklem (3.6)’daki 1. terim manyetik alanın sisteme etkisini, 2. ve 3. terim FM ve AFM katmanların anizotropiden gelen etkisini ve 4. terim ise FM ve AFM tabakaların ara yüzeyinde meydana gelen etkileşmesinden kaynaklanan etkiyi göstermektedir.

Denklem (3.6)’da verilen toplam enerji ifadesinin dengede olduğu minimum enerji durumu α ve β açılara bağlıdır. α ve β ’ya göre birinci türevler alınıp sıfıra eşitlenirlerse dik mıknatıslanan sistemlerde kaydırma etkisinin hangi koşullara bağlı olduğu ve H_{EB} değerini etkileyen parametreler bulunur.

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial E}{\partial \beta} = 0, \quad (3.7)$$

α ’ya göre türev alındığında Denklem (3.8) sonucu çıkar.

$$K_{AFM} t_{AFM} \sin 2\alpha = J_{EB} \sin(\beta - \alpha) \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'ye göre kaydırma etkisi gözlenebilmesi için AFM malzemenin anizotropi enerjisi ara yüzey değiş-tokuş sabitinden büyük olmalıdır. Eğer bu şartın tersi durum geçerli olursa, uygulanan alan ile AFM ve FM malzemenin spinleri beraber döner ve histeresis eğrisinde herhangi bir kayma söz konusu olamaz.

Değiş-tokuş etkileşiminin kaydırma etkisi için çok önemli bir faktör olduğu örnek düzlemine paralel mıknatıslanan sistemlerde bahsedilmişti. AFM ve FM malzemelerin spinlerinin etkileşmesi ara yüzeyde sadece paralel olduğu varsayılmıştı. Bu yüzden enerji teriminde sadece FM ve AFM spinler arasındaki açı dikkate alınmıştı. Fakat dik mıknatıslanmaya sahip örneklerde örneğin anizotropisine bağlı olarak manyetik malzemelerin spinlerinin hem dik hem de paralel bileşenleri vardır.

Denklem (3.9)'de ara yüzey değiş-tokuş etkileşme enerjisi yazılmıştır [53].

$$\begin{aligned} E_{\text{int}} &= J_{EB} \vec{S}_{FM} \cdot \vec{S}_{AFM} \\ &= J_{EB} \cos(\beta - \alpha) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'de verilen enerji terimi için FM ve AFM malzemenin spinlerinin sadece dik bileşenlerinin enerjiye katkısı ele alınırsa Denklem (3.10) elde edilir.

$$\begin{aligned} E_{\text{int}} &= J_{EB} S_{FM\perp} S_{AFM\perp} \\ &= J_{EB} \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Çıkan bu sonuca göre Denklem (3.6)'daki toplam enerji tekrar yazılırsa Denklem (3.11) elde edilir.

$$\begin{aligned} E &= -\mu_0 H M_{FM} t_{FM} \cos(\theta - \beta) + K_{AFM} t_{AFM} \sin^2(\alpha) + K_{FM} t_{FM} \sin^2(\beta) \\ &\quad - J_{EB} \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Bu denklemin β 'ya göre türevini alıp, örneğe manyetik alan dik uygulandığından dolayı $\theta=0$ alırsak Denklem (3.12)'i buluruz.

$$H_{EB} = -\frac{J_{EB} \cos(\alpha) + 2K_{FM} t_{FM} \cos(\beta)}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'e göre AFM ve FM katmanların spin yönelimleri, FM malzemenin anizotropisi ve kalınlığı ile ara yüzey etkileşme sabiti H_{EB} 'yi etkilemektedir. Spinlerin örnek düzlemine dik yönelmesi H_{EB} değerinin artmasına neden olmaktadır. 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 [54], [55].

4. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu bölümde magnetron sıçratma yöntemiyle büyütülen örneklerin yapısal ve manyetik özelliklerini belirlemek için kullanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır.

4.1. X-ışını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı tekniği, örneğe gelen x-ışını açısının değişimiyle örneğin kristal yapısını analiz etmeyi sağlayan bir sistemdir. Diğer yapı analizlerine göre avantajı örneğin zarar görmemesi ve atmosfer ortamında ölçüm yapılabilmesidir. Bu yöntemle kristal yapının örgü parametresini, örgü gerilimini, kristal yönelimini ve kristalin tekli mi ya da çoklu kristal mi olduğu belirlenebilir.

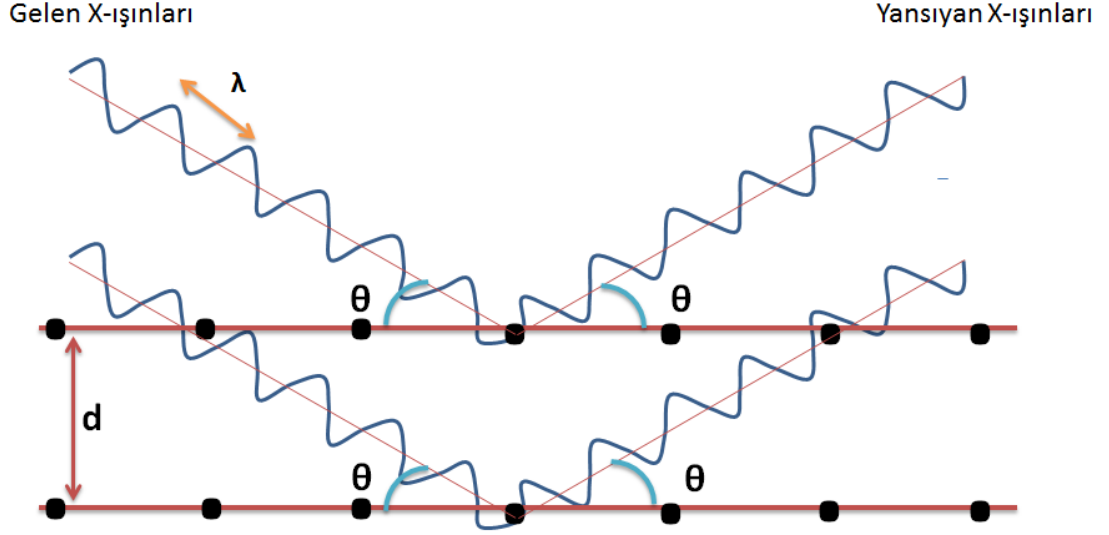
XRD sisteminin gelişimi, 1912’de Von Laue’nun öngördüğü kristaller düzenli dizilmiş atomlardan oluşuyorsa ve x-ışınlarının dalga boyları atomlar arası mesafeye eşit ise x-ışınlarının kristalden kırınabileceğini hipotezi ile başladı. Bu hipotezin doğruluğu Friedrich ve Knipping’in yaptığı deneylerle kanıtlandı.

Baba ve oğul Bragg’lar Von Laue’nun varsayımı çok daha basit bir matematiksel ifade haline getirerek kristal yapının belirlenmesinde çok önemli katkı da bulunmuşlardır.

Denklem (4.1)’de Bragg yasası verilmiştir [58]. d tabakalar arası mesafeyi, θ ve λ x-ışınının örneğe geliş açısını ve dalga boyunu vermektedir.

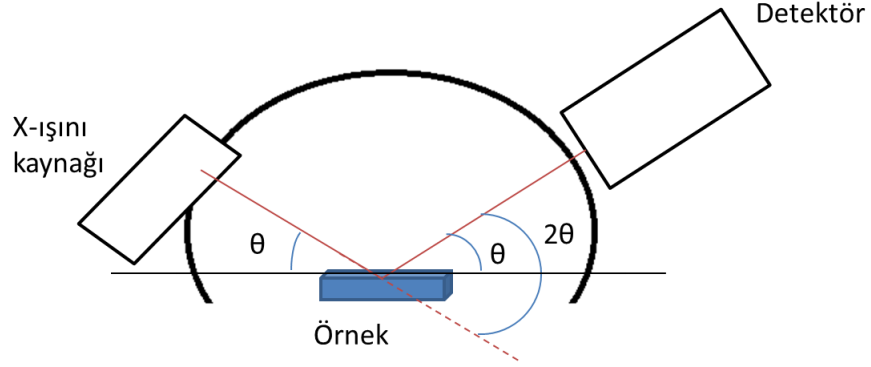
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4.1)$$

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi periyodik yapılı örneğe gelen x-ışınları iki farklı düzlemden yansımaktadır. Burada önemli olan örnekten yansıyan x-ışınlarının yokedici girişim değil de yapıcı girişim yapıyor olmasıdır.



Şekil 4. 1: X-ışınının tabakalardan kırınımını göstermektedir.

XRD cihazının ölçüm düzeneği Şekil 4.2’de görüldüğü gibidir. Kaynaktan çıkan x-ışınları örneğe gider ve örnekten yansıyarak detektöre gider. XRD ölçümlerinde tek dalga boyuna sahip bir x-ışını kaynağının kullanılması daha iyi çözünürlüğe sahip ölçümler yapılmasına imkân sağlamaktadır.

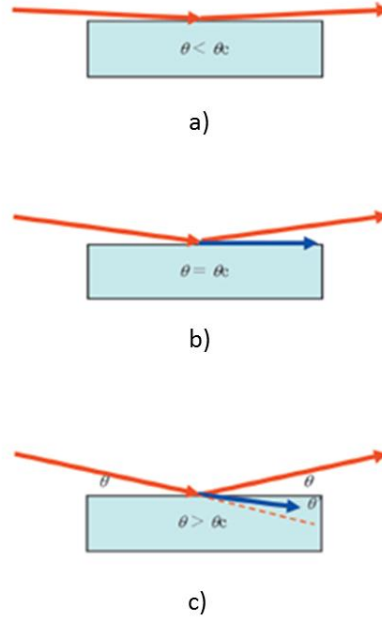


Şekil 4. 2: Bir XRD sisteminin şematik çizimi gösterilmektedir.

4.2. X-ışını Yansıması (XRR)

X-ışını yansıması tekniği, gelen x-ışınının yüzeyden yansıyarak şiddetindeki değişime göre örneğin kalınlığını, öz kütlesini ve pürüzlüğünü belirlemede kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde ölçüm atmosfer basıncında ve örnek zarar görmeden yapılmaktadır. Tek katlı, çok katlı ya da amorf yapılı ince filmler için uygun bir

ölçme yöntemidir. 1000 nm'ye kadar tabaka kalınlıkları ve 0 ile 2 nm arasındaki yüzey pürüzlükleri belirlenebilmektedir.

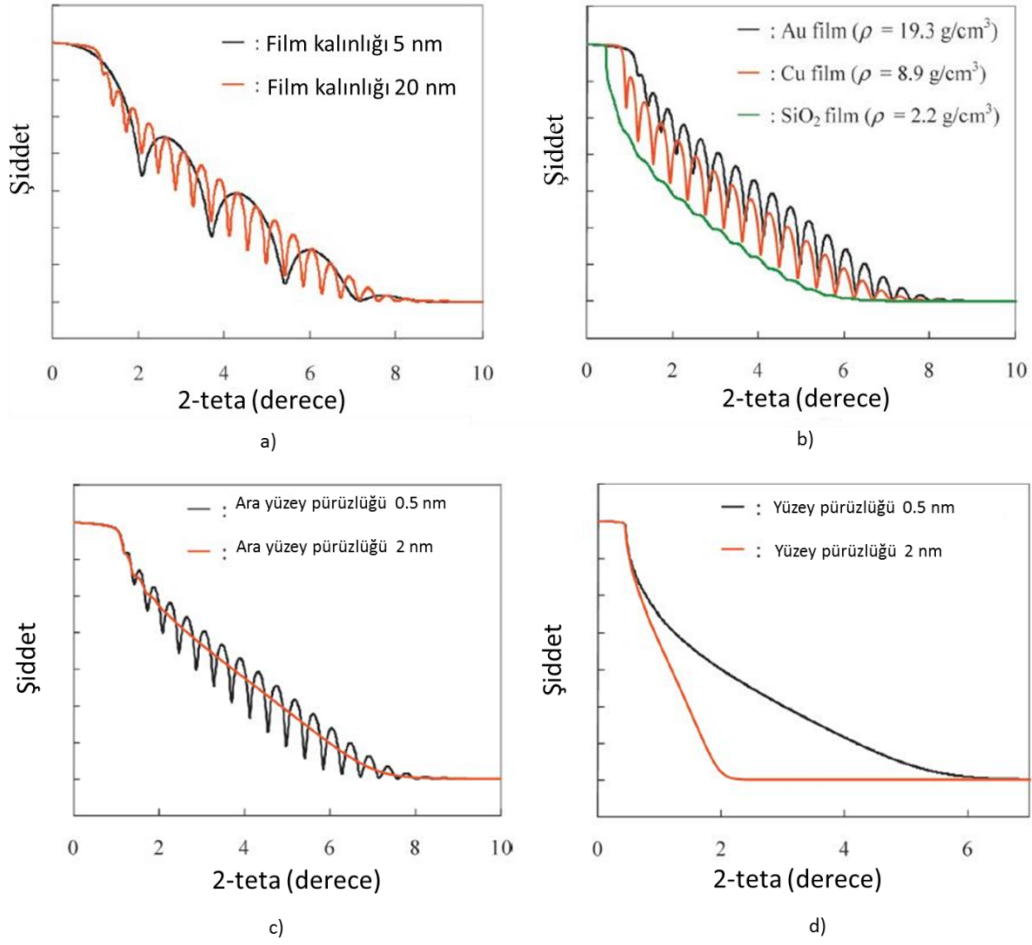


Şekil 4.3: X-ışınının yüzeyden yansıması için gerekli olan durum gösterilmiştir. a)'daki gibi kritik açıdan daha küçük bir açıyla gelirse yüzeyden direk yansır. b)'deki gibi kritik açıya eşit bir açıyla gönderilirse yüzeyde ilerler. Işının bir kısmının örnekten kırılması ve içerideki yüzeylerden yansıma yapabilmesi için c)'deki gibi kritik açı olarak tabir edilen açıdan daha büyük bir açıyla örneğe gönderilmesi gerekir.

Şekil 4.3'de bir x-ışınının yansıması için gerekli olan durum anlatılmıştır. Görüldüğü gibi gelen x-ışınının geliş açısı önemlidir [56]. Geliş açısı gelen ışının yüzeyle yaptığı açı olarak tanımlanır. Eğer ışın Şekil 4.3 a)'daki gibi kritik açıdan daha küçük bir açıyla gelirse yüzeyden direk yansır ve örneğin içerisinden herhangi bir bilgi almak imkânsız olur. Eğer Şekil 4.3 b)'deki kritik açıya eşit bir açıyla gönderilirse şekilde görüldüğü gibi yüzeyde ilerler. Dolayısıyla, ışının bir kısmının örnekten kırılması ve içerideki yüzeylerden yansıma yapabilmesi için Şekil 4.3 c)'deki gibi kritik açı olarak tabir edilen açıdan daha büyük bir açıyla örneğe gönderilmesi gerekir.

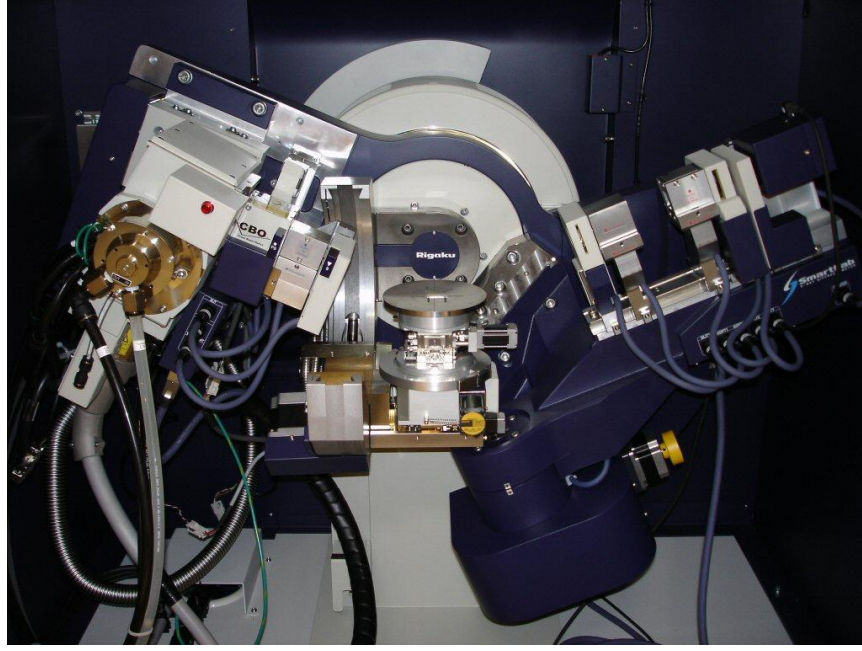
XRR tekniği ile açıya bağlı x-ışını şiddetindeki değişim grafik olarak çizildiğinde grafikte saçaklar görülecektir. Bunlar Kiessing saçakları olarak bilinmektedir [57]. Bu saçakların davranışına göre örnek hakkında bilgi edinmek mümkündür. Yüzeyden yansıma yapan x-ışınının yansıma oranını belirleyen etkenler

vardır. Şekil 4.4’de x-ışını yansıması eğrisinin kalınlık, öz kütle ve pürüzlükten nasıl etkilendiği gösterilmiştir.



Şekil 4. 4: a) aynı Si altaşlar üzerindeki farklı kalınlıkta Au filmler, b) Si altaşlar üzerinde aynı kalınlıkta büyütülmüş fakat farklı yoğunluğa sahip filmler, c) farklı ara yüzey pürüzlüğüne sahip 20 nm kalınlığında Au filmler ve d) farklı yüzey pürüzlüğüne sahip Si altaşların XRR ölçümüne etkiler gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, XRR ve XRD ölçümleri için Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümünün laboratuvarında bulunan SmartLab XRD cihazı kullanılmıştır. Kalınlık, öz kütle ve pürüzlüklerin belirlenmesi için ise “Globalfit” programı kullanılmıştır.



Şekil 4. 5: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü XRD cihazı.

4.3. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)

VSM örneğin mıknatıslanmasını ölçmeye yarayan bir sistemdir. Titreşim hareketi yapan mıknatıslanmış örnek algılayıcı bobinlerde akım meydana getirir. Bu oluşan akım ile örneğin mıknatıslanması orantılı olduğundan farklı sıcaklık ve manyetik alan altında malzemenin manyetik özellikleri belirlenmektedir.

VSM ölçümleri ilk kez Simon Foner tarafından 1956 yılında MIT’te yapılmıştır [59]. VSM ölçüm cihazları araştırma merkezleri tarafından kendi ihtiyaçlarına göre tasarlanabilirken, ticari olarak da satılmaktadır.

VSM sistemi Faraday yasası prensibi ile çalışır. Bir telin üzerine birim zamanda değişen manyetik alan uygulandığında telde bir akım indüklenir. Manyetik alanla oluşan akımın değeri Denklem (4.2)’deki Faraday yasasıyla belirlenir.

$$\phi_H = \int \vec{H} \cdot d\vec{A} \quad (4.2)$$

Manyetik akının (ϕ) zamana bağlı değişimi ise Denklem (4.3)’deki elektromotor kuvvetini (ε) verir.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (4.3)$$

Algılayıcı bobinlerin n tane sarıma ve A yüzey alanına sahip olduğu durumu için Denklem (4.2)'i Denklem (4.3)'te yerine yazarsak Denklem (4.4) elde edilir.

$$\varepsilon = -nA\frac{dH}{dt} \quad (4.4)$$

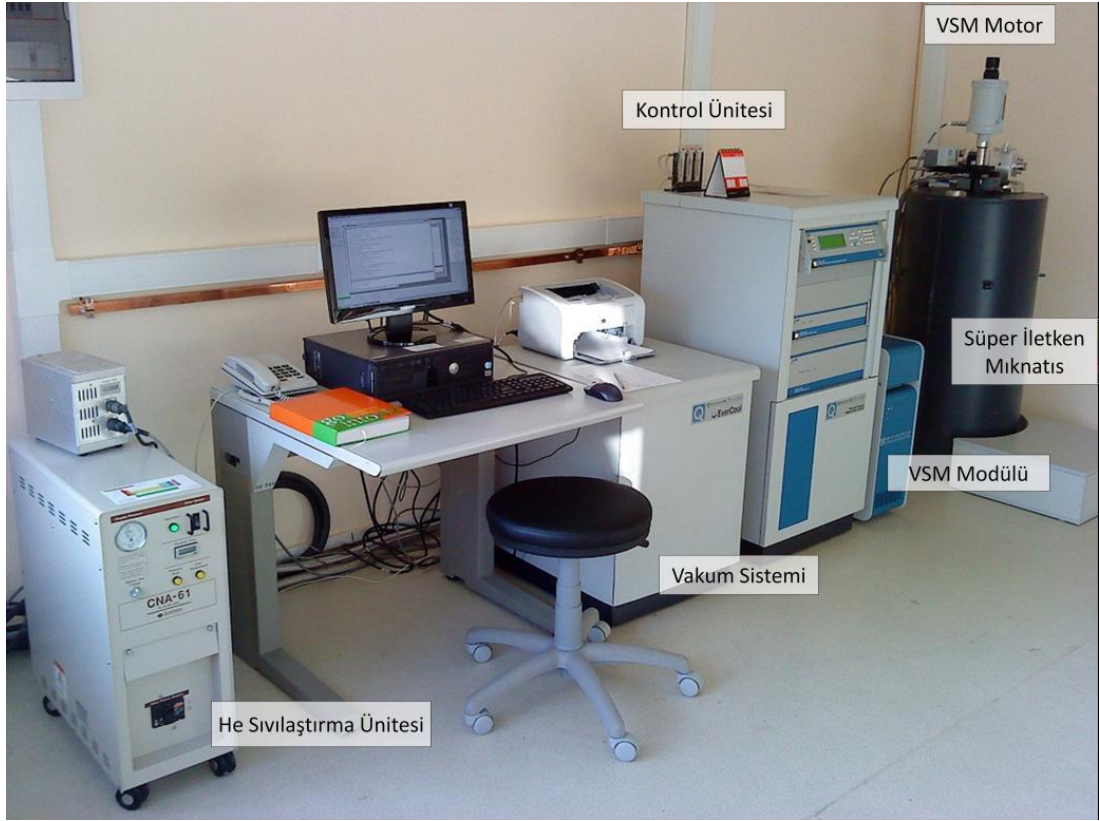
Daha öncede belirtildiği gibi VSM sisteminde algılayıcı bobinlerde manyetik alan değişimini manyetik örnek sağlıyordu. Burada önemli olan örneğin mıknatıslanma değeridir. Bu mıknatıslanma değeri ise bobindeki manyetik alan değişimi ile orantılıdır. Bu orantı Denklem (4.5) ile verilmektedir.

$$\Delta H = \mu_0 M \quad (4.5)$$

Denklem (4.4) ve Denklem (4.5) kullanılarak indüksiyon elektromotor kuvveti ile örneğin mıknatıslanma değerinin ilişkisi Denklem (4.6)'da verilmiştir.

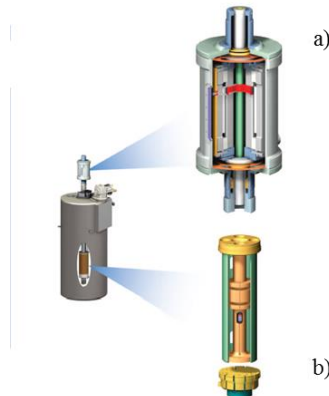
$$\varepsilon \cdot dt = -na\mu_0 M \quad (4.6)$$

Bu tez çalışmasında, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü laboratuvarında bulunan Quantum Design firması tarafından üretilmiş PPMS9T cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.6: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümündeki VSM sistemi.

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi sistem 6 ana parçadan oluşmaktadır [60]. Sistemde örneği mıknatıslamak için bir süperiletken bir mıknatıs a ihtiyaç duyulmaktadır. Bu mıknatıs örneğe 9 Tesla’ya kadar manyetik alan uygulayabilmektedir. Bu sistem ile 2K-1000K arasında VSM ölçümleri yapılabilmektedir.



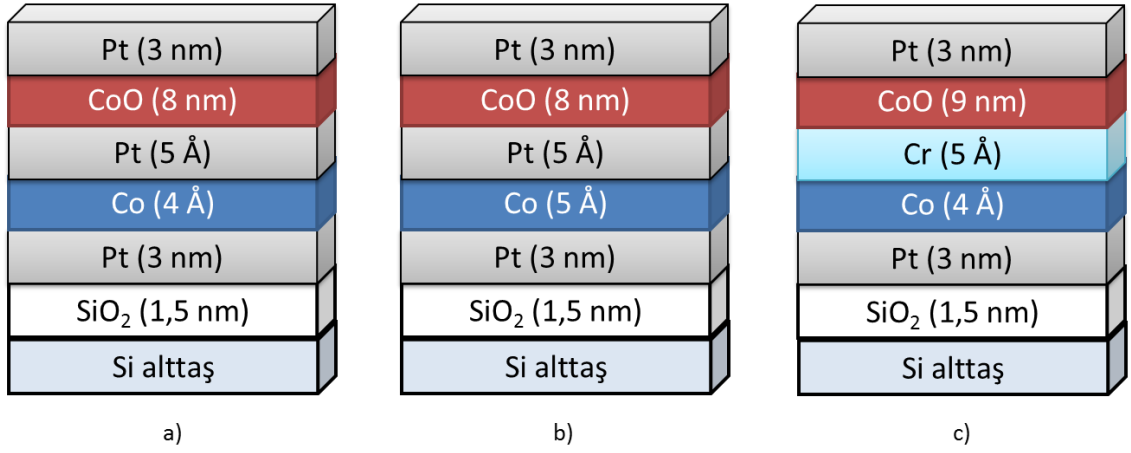
Şekil 4.7: Örneğe titreşim hareketi yaptıran VSM motor a) ile algılayıcı bobinler b) gösterilmektedir.

Şekil 4.7 a)'daki VSM motor, örneğe titreşim hareketini yaptıran parçadır [61]. Örnek uzun bir çubuk vasıtasıyla tankın içindeki süperiletken mıknatısın ortasına konulur. Böylece örnek uygulanan alan ile mıknatıslanır ve mıknatıslanan örnek 40 Hz'lik titreşim frekans değeriyle 1-3 mm aralığında algılayıcı bobinler Şekil 4.7 b) arasında hareket eder. Sistem 10^{-6} erg/Oe hassasiyetine kadar manyetik alan değişimini ölçebilmektedir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Örneklerin hazırlanması

Bu tez çalışmasında 3 adet örnek, oksitlenmiş Si üzerine yüksek vakum altında, magnetron saçtırmalı kaplama tekniği ile büyütüldü. Şekil 5.1’de büyütülen örnekler gösterilmektedir.



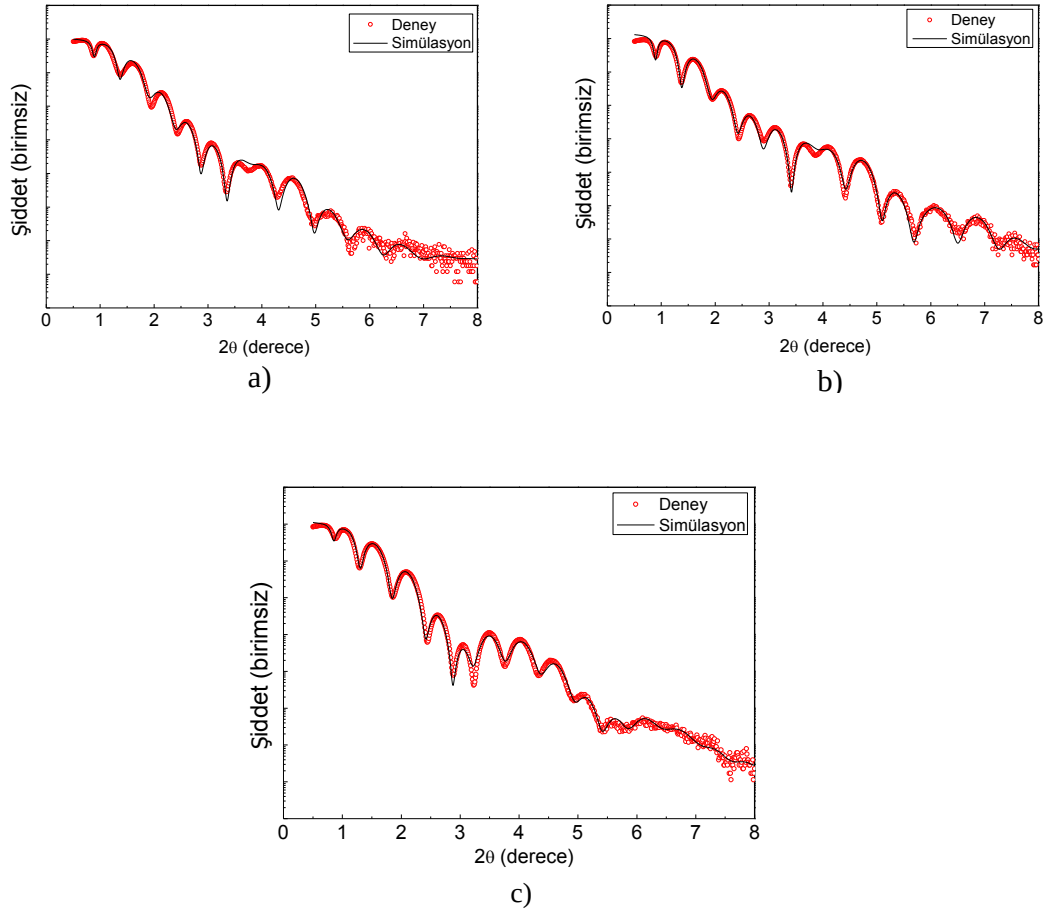
Şekil 5.1: Tez çalışmasında hazırlanan a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örnek sistemleri.

Tez çalışmasında, Bölüm 2’de anlatıldığı gibi, dik manyetik anizotropinin nedenlerinden olan pozitif K_{etkin} elde etmek için FM malzeme olarak çok ince Co kullanıldı. Yüzey anizotropisi katkısını artırmak için Co tabakası Pt üzerine büyütüldü ve üzerine Şekil 5.1’de görüldüğü gibi Pt veya Cr katmanları büyütüldü.

Kaydırma etkisinin gözlelenebilmesi için bu tabakaların üzerine CoO büyütüldü. AFM malzeme olarak CoO seçilmesinin sebebi oda sıcaklığına yakın T_N sıcaklığının (293K) olmasıdır. Kaydırma etkisinin ana nedenlerinden olan Co ile CoO spinlerinin etkileşmesini engellemek için Co ve CoO katmanlarının arasına konulan Pt ve Cr katmanları çok ince olarak büyütüldü. En üsteki Pt tabakası ise atmosfer ortamında dışarıdan bir katkı olmaması için koruyucu katman olarak büyütüldü.

5.2. X-Işını Yansıması Ölçümleri (XRR)

Örneklerin kalınlığını, öz kütlesini ve ara yüzey pürüzlüğünü belirlemek için XRR tekniği kullanıldı. XRR ölçümlerini fit edebilmek için “GlobalFit” programı kullanıldı. Şekil 5.2’de yapılan ölçümlerin deney ve fit sonuçlarının grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.2: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örnekleri için XRR ölçümleri ve simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 5.1: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örnekleri için kalınlık, öz kütle ve pürüzlük sonuçları.

Tabaka	Kalınlık(nm)	Öz kütle(g/cm ³)	Pürüzlük(nm)
Pt	3.3	23.1	0.61
CoO	8.8	5.9	0.65
Pt	0.5	21.44	0.64
Co	0.4	8.83	0.44
Pt	3.4	21.44	0.84
SiO ₂	1.5	2.2	0.66
Si alttaş	0	2.33	0

a)

Tabaka	Kalınlık(nm)	Öz kütle(g/cm ³)	Pürüzlük(nm)
Pt	3.29	22.43	0.46
CoO	8.46	5.9	0.48
Pt	0.5	21.44	0.50
Co	0.5	8.83	0.43
Pt	3.36	21.44	0.93
SiO ₂	1.5	2.2	0.55
Si alttaş	0.0	2.33	0

b)

Tabaka	Kalınlık(nm)	Öz kütle(g/cm ³)	Pürüzlük(nm)
Pt	3.2	24.07	0.43
CoO	9.3	5.9	0.49
Cr	0.5	6.64	0.32
Co	0.4	8.83	0.66
Pt	3.15	21.44	0.61
SiO ₂	1.5	2.22	0.57
Si alttaş	0	2.33	0

c)

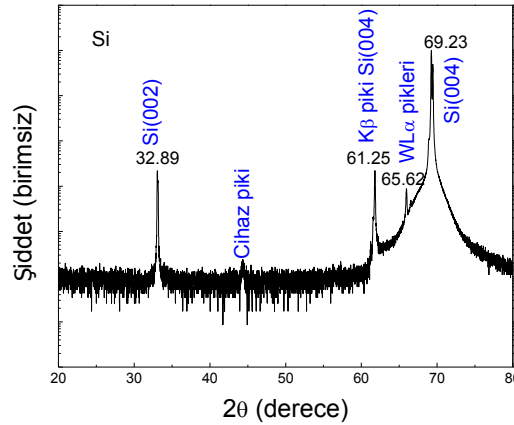
Yapılan fit sonucunda elde edilen kalınlık, öz kütle ve pürüzlük değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Co kalınlıkları 4 Å ve 5 Å olarak ölçülmüştür. FM ve AFM malzemeler arasına konulan Pt ve Cr kalınlıkları 5 Å olarak ölçüldü. Bu 5 Å

kalınlığındaki ara tabakanın kaydırma etkisini engellemediği daha önce yapılan çalışmalarda görülmüştür [54].

Fit sonucunda ortaya çıkan en önemli sonuçlardan birisi de CoO yoğunluğunun $5,9 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edilmesidir. Bu sonucu bulk yapıdaki CoO'nin öz kütlesinden ($6,4 \text{ g/cm}^3$) farklı çıkmasının sebebi büyütme sırasında CoO'nin farklı fazlarının oluşması, yani CoO'nin süpersitokiyometrik yapıda olmasıdır.

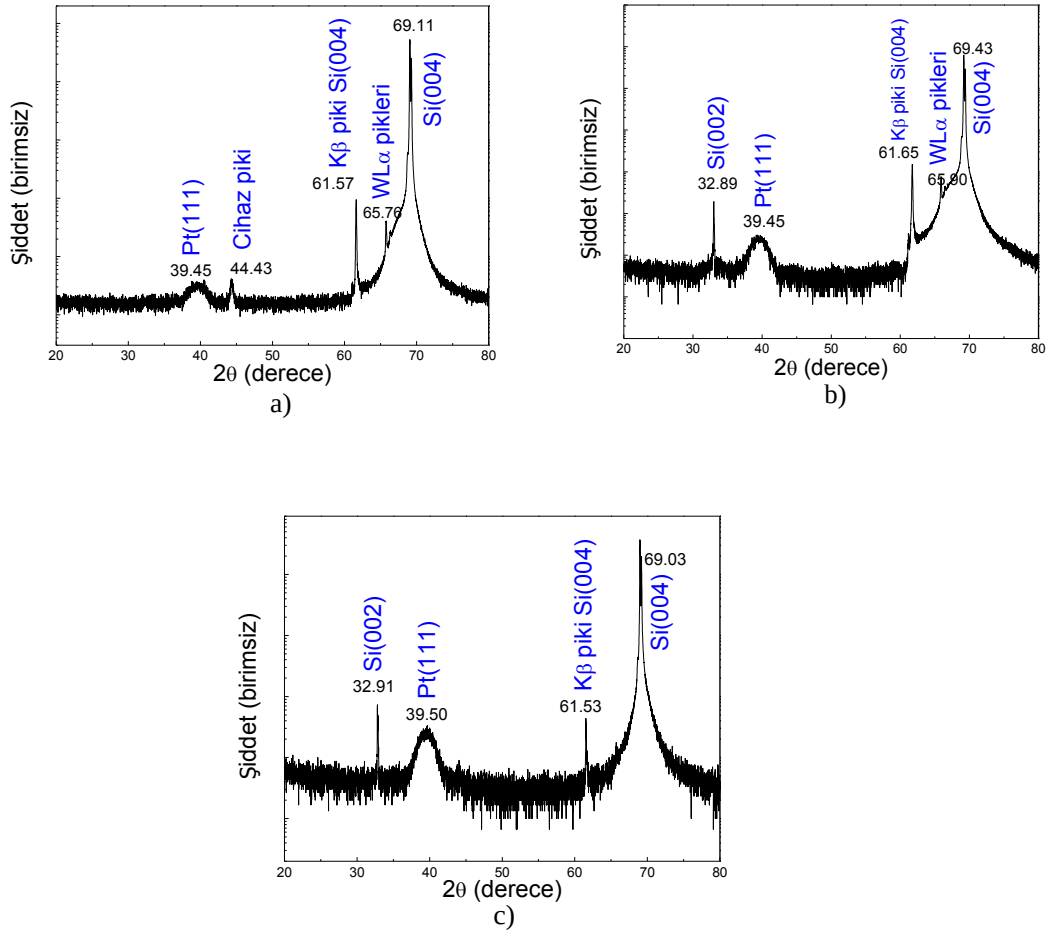
5.3. X-Işını Kırınımı Ölçümleri (XRD)

X-ışını kırınımı tekniği, büyütülen örneklerin kristal yapısını analiz etmek için kullanıldı. XRD ölçümlerinde önce üzerine film kaplanmamış Si alttaşı ölçüldü. Şekil 5.3'de sadece Si alttaşa ait XRD ölçümü vardır. Grafikte görülen piklerin hangi tabakadan kaynaklandığı şekil üzerinde belirtilmiştir. Cu K_α ışınının ($1,54 \text{ Å}$) kullanıldığı ölçümlerde 32° 'de Si alttaşın (002) piki ölçülürken, Si alttaşın (004) tabakasının piki 69° 'de gözlenmiştir. Ayrıca Cu K_β ışınından kaynaklanan Si (004) piki 61° 'de ölçülmüştür. 65° 'de Si alttaşın (004) yüzeyinden gelen iki adet düşük şiddette pik çıkmıştır ve bunlar katottan kopup anoda yapışan Tungsten (W) elementinin $L_{\alpha 1,2}$ ışımasından kaynaklanmaktadır. 44° 'de ölçülen pik ise XRD cihazının örnek tutucusundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.3: Üzerine film büyütülmemiş Si alttaşın XRD grafiği gösterilmiştir.

Si alttaşa ait pikler belirlendikten sonra, büyütülen örnekler için XRD ölçümleri yapıldı. Şekil 5.4'de örneklerin XRD ölçüm sonuçları verilmiştir.

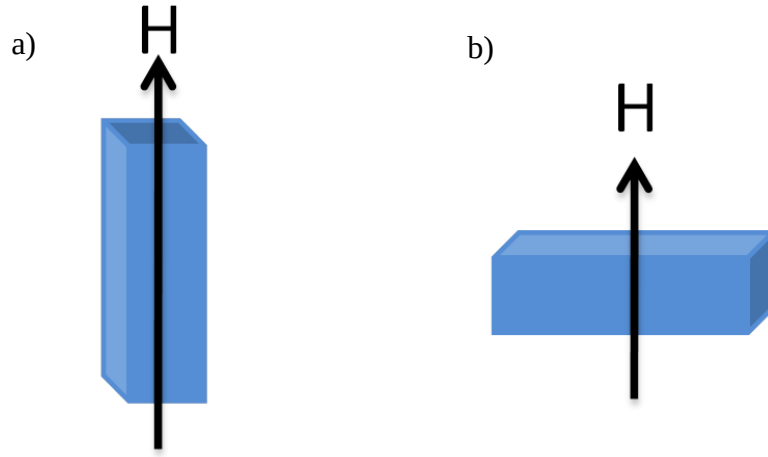


Şekil 5.4: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örnekleri için XRD grafikleri gösterilmiştir.

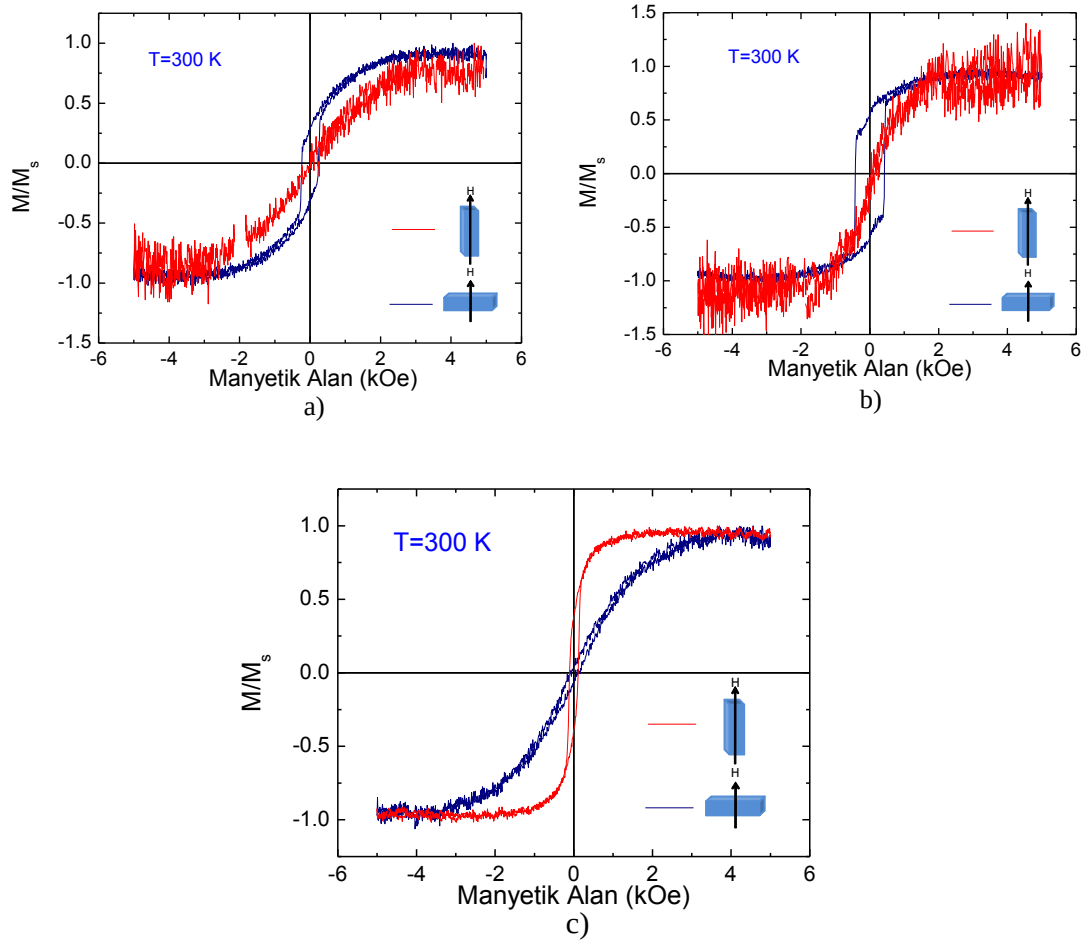
Şekil 5.4’de görüldüğü gibi üzerine film büyütülmemiş Si alttaştan farklı olarak üç örnekte de 39°’de pik vardır. Bu pikler Si üzerine büyütülen Pt tampon tabakadan kaynaklanmaktadır. Bu pik Pt’nin (111) yöneliminde büyüdüğünü göstermektedir. Fakat pikin geniş çıkması (111) yöneliminin zayıf olduğunu söyler. Pt katmanının ince (~3 nm) olması, bunun yanında büyüme hızı ve büyütme tekniği pikin geniş çıkmasına neden olabilmektedir [62].

5.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Ölçümleri

Bu tez çalışmasında büyütülen örneklerin manyetik özelliklerini ve kaydırma etkisini gözlemlemek için VSM tekniği kullanıldı. Şekil 5.5 a)’da uygulanan manyetik alanın örneğe paralel ve Şekil 5.5 b) dik olduğu durum gösterilmiştir.



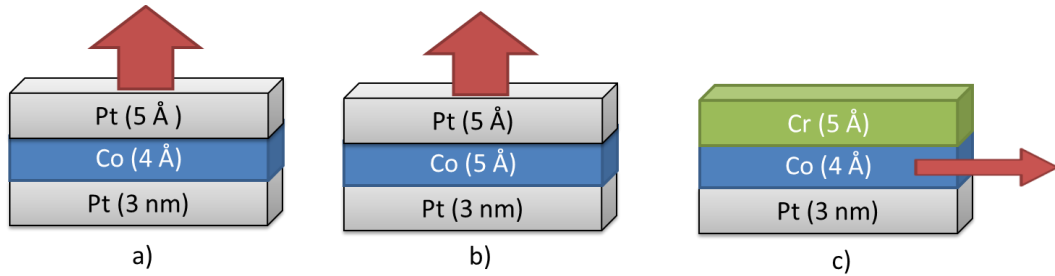
Şekil 5.5: a) Örnek düzlemine paralel ve b) dik uygulanan manyetik alan gösterilmiştir.



Şekil 5.6: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin 300K'da örnek düzlemine paralel ve dik ölçülen histeresis eğrileri gösterilmiştir.

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneklerin yüzeyine düzlemlerine dik manyetik alan uygulandığında daha düşük alanlarla doyuma ulaşırlarken, örnek düzleme paralel manyetik alan uygulandığında ise daha fazla manyetik alan ile doyuma ulaşmışlardır. Buradan çıkan sonuca göre Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örnekleri için kolay eksenin örnek düzlemine dik zor eksenin ise örnek düzleminde olduğu anlaşılmıştır. Bu durum Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneği için geçerli değildir. Bu örnek için kolay eksen örnek düzleminde, zor eksen ise örnek düzlemine diktir.

Bölüm 2'de anlatıldığı gibi etkin manyetik anizotropinin belirlenmesinde hacim anizotropisi ve ara yüzey anizotropisi etkilidir. Bu tez çalışmasında FM malzeme olarak kullanılan Co katmanı ilk iki örnekte iki yüzeyinden Pt ile etkileşirken, diğer örnekte bir yüzeyi Pt bir yüzeyi Cr ile etkileşmektedir. Sonuç olarak Şekil 5.7'de görüldüğü gibi iki yüzeyden Pt ile etkileşen Co dik manyetik anizotropiye sahip olurken bir yüzeyi Pt diğer yüzeyi Cr ile etkileşen örnek inplane manyetik anizotropiye sahip olmaktadır.



Şekil 5.7: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin kolay eksenleri gösterilmiştir.

Yapılan çalışmalarda Co ile Pt'nin ara yüzey etkileşmesi sonucu, Co kalınlığının kritik kalınlık değerinden küçük olduğu durumlarda, örneğin dik manyetik anizotropiye sahip olduğu görülmüştür [16], [40]. 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 [26], [54], [63]. Sonuç olarak ekstra spin-orbit eşleşmesi oluşur ve bu da dik manyetik anizotropiye sebep olur. Yapılan bu çalışmada

büyütülen Co tabakasının iki yüzeyi de Pt ile etkileştiğinde, dik manyetik anizotropi elde edildi.

Fakat bir yüzü Pt ile diğer yüzü Cr ile etkileşen Co tabakasının örnek düzleminde manyetik anizotropiye sahip olduğu görüldü. Buradan çıkarılan sonuç, bu çalışmada tek bir Pt ara yüzeyinin dik anizotropiye neden olamadığıdır. Yapılan başka çalışmalarda da Cr'un ara yüzey etkileşmesinde dik manyetik anizotropiye sebep olmadığı görülmüştür. Shiratsuchi yaptığı çalışmalarda her iki ara yüzeyde de Cr etkileşmesi olduğu durumda dik manyetik anizotropinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Buna sebep olarak Cr'un ara yüzeyde interdifüzyona neden olması gösterilmiştir [64], [65], [66], [67].

Dik anizotropiye sahip örneklerin anizotropisini karşılaştırmak için M_r/M_s oranlarını incelersek Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğinin Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğine göre daha güçlü dik anizotropiye sahip olduğu görülmektedir. Buradan çıkan sonuca göre, iki Pt katmanının arasındaki Co kalınlığı fazla olanın ara yüzey anizotropisi daha baskın hale gelmektedir. Bir yüzü Pt diğer yüzü Cr ile etkileşen örnek için ise hacim anizotropisi daha baskın hale gelmiştir.

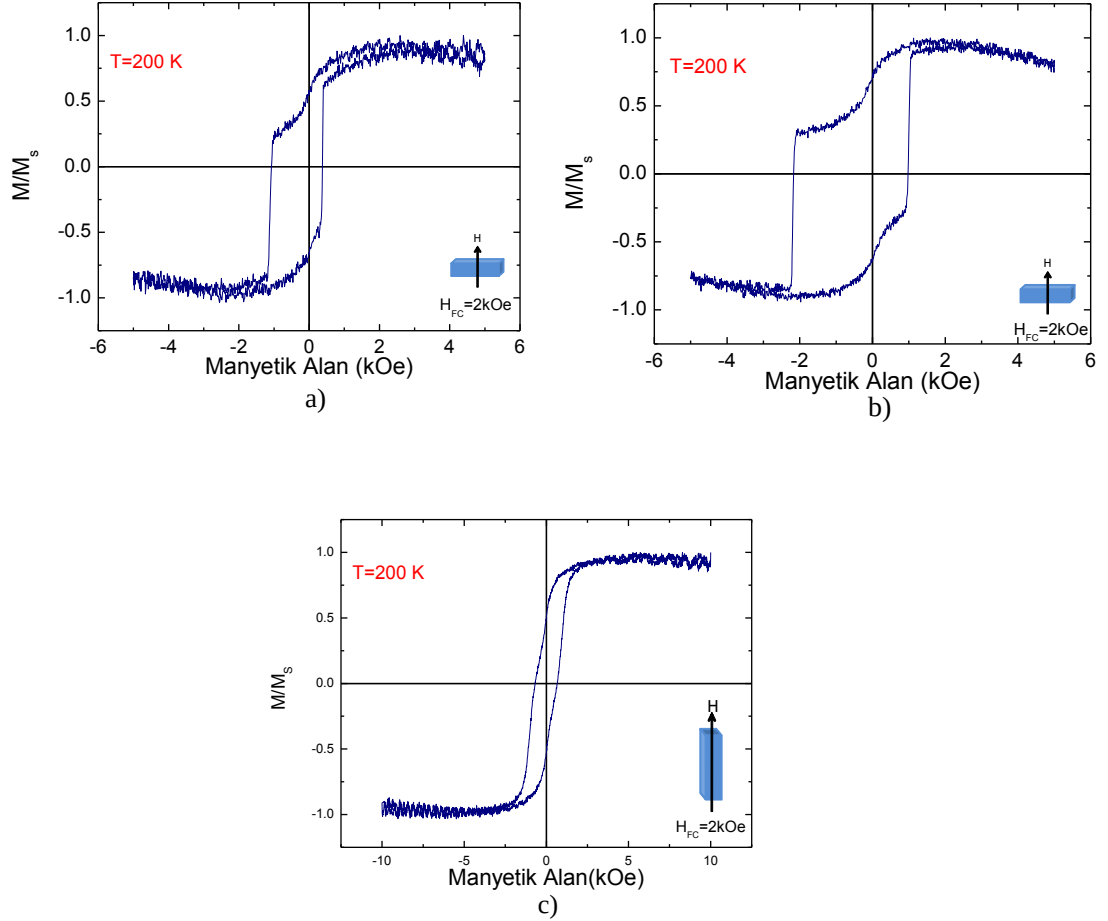
Tablo 5.2: Dik geometride M_r/M_s oranları.

Örnek	Örnek Düzlemine dik ölçüm için M_r/M_s
Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt	0,86
Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt	0,92
Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt	0,05

5.4.1. Kaydırma Etkisi Ölçümleri

Örneklerin anizotropisi belirlendikten sonra kaydırma etkisini gözlemlemek için VSM ile ölçümler yapıldı. AFM malzeme olarak kullanılan bulk CoO'nin T_N değeri 293 K olduğundan, AFM malzemenin spinlerini düzenli duruma getirmek için, önce örnekler 320 K'e kadar ısıtılıp 2 kOe alan uygulanarak soğutuldu ve farklı sıcaklıklarda histeresis eğrileri ölçüldü. Her sıcaklık değeri için bu alan altında soğutma işlemi tekrarlandı.

Her bir örnek için kolay eksen yönünde kaydırma etkisi ölçümleri yapıldı. Şekil 5.8’de 320K’den 2kOe alan uygulanarak 200 K’e soğutulan örneklerin histeresis eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.8: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin 200 K’de kolay ekseninde ölçülen histeresis eğrileri gösterilmiştir.

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi üç örnekte de kaydırma etkisi görülmüştür. FM ile AFM malzeme arasına konulan 5 Å kalınlığındaki Pt ya da Cr’un kaydırma etkisine engel olmadığı görülmüştür.

Tablo 5.3: Zorlayıcı alanlar (H_{C1} ve H_{C2}) ile kaydırma alanının (H_{EB}) değerleri.

Örnek	300 K		200 K		
	$-H_{C1}$ (Oe)	H_{C2} (Oe)	$-H_{C1}$ (Oe)	H_{C2} (Oe)	$-H_{EB}$ (Oe)
Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt	240	240	384	116	366
Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt	424	424	2192	989	601
Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt	126	126	742	690	26

Tablo 5.3’de 300K ve 200K’de ölçülen histeresis eğrilerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Beklenildiği gibi oda sıcaklığında zorlayıcı alanlar eşit çıkmıştır. Düşük sıcaklıklara gidildikçe zorlayıcı alanlarda artma görülmüştür. Alan altında soğutulurken 200K’de ölçülen histeresislerde kayma görülmüştür. Bölüm 2’de verilen Denklem (3.5) ile Tablo 5.3’de verilen H_{EB} değerleri hesaplanmıştır.

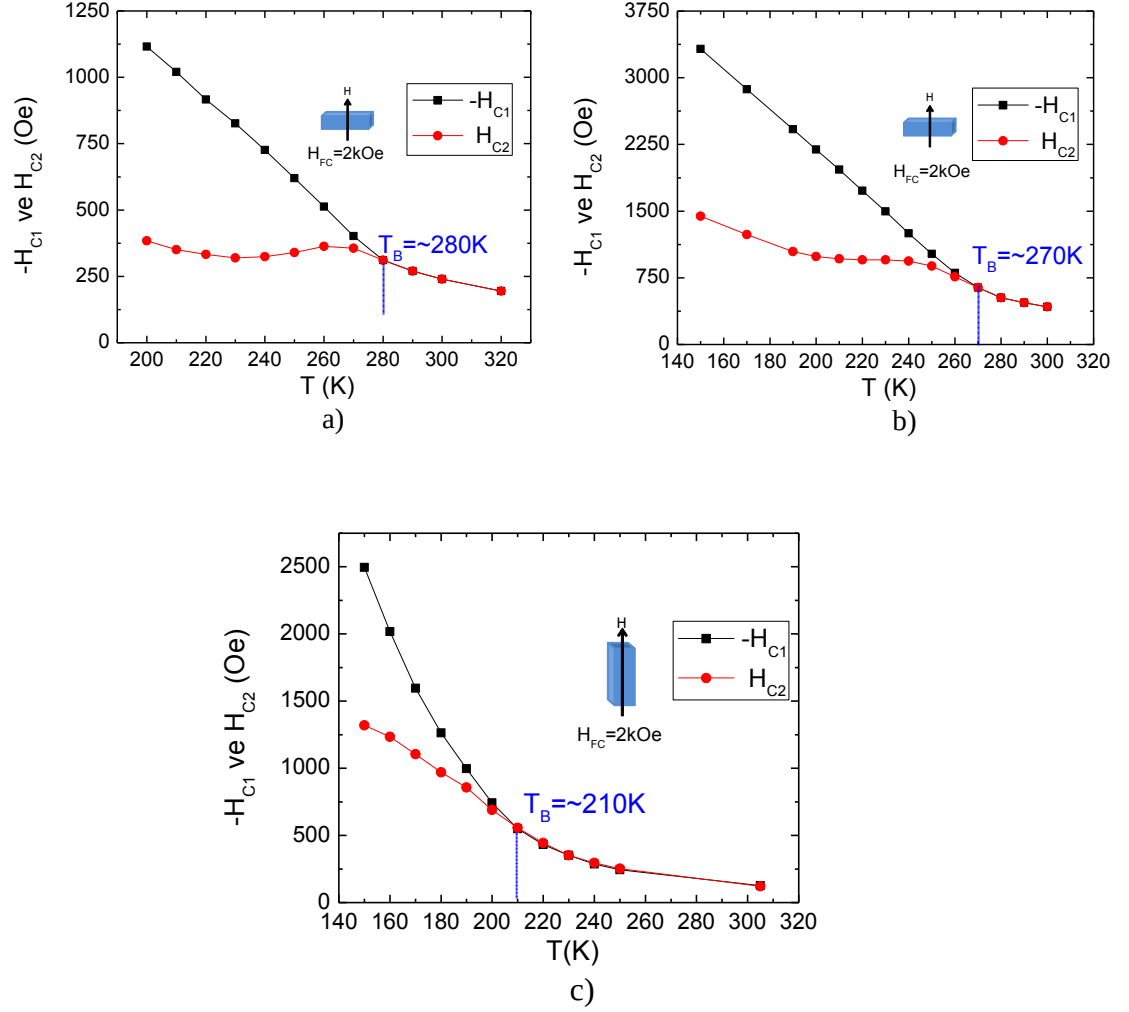
Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ile Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt için elde edilen H_{EB} değerlerini karşılaştırınca Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt için hesaplanan H_{EB} değeri daha büyük çıkmıştır. Bölüm 5.4.1’de Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğinin daha güçlü bir dik manyetik anizotropiye sahip olduğu görülmüştür. Buna göre Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğinin spinlerinin paralel bileşeni daha az olacaktır. Spinlerin örnek düzleminin normaliyle yaptığı açı daha küçük olacaktır. Şekil 3.6 ve Denklem (5.1)’de görüldüğü gibi Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt’in β açısı daha küçük olur ve $\cos(\beta)$ ifadesi daha büyük olacağından daha güçlü bir kaydırma alanı görülecektir.

$$H_{EB} = - \frac{J_{EB} \cos(\alpha) + 2K_{FM} t_{FM} \cos(\beta)}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (5.1)$$

Kaydırma etkisini daha ayrıntılı bir şekilde incelemek için farklı sıcaklık değerlerinde de ölçümler alındı. Şekil 5.9’da farklı sıcaklıklarda alınan histeresis eğrilerinin zorlayıcı alanlarının (H_{C1} ve H_{C2}) sıcaklık ile değişimi gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi sıcaklık değeri düştükçe zorlayıcı alan değerleri artmıştır.

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi belirli sıcaklık değerinde zorlayıcı alan (H_{C1} ve H_{C2}) değerleri farklılaşmaya başlamıştır. Bu ayrılmanın başladığı sıcaklığa engelleme sıcaklığı (T_B) denilmektedir. Bu sıcaklıktan itibaren histeresis eğrilerinde kayma görülmektedir. Bu T_B değerinin AFM malzemenin T_N değerine eşit olması

beklenir. Fakat AFM malzeme içinde farklı fazların olmasından ya da malzemenin ince film yapısında olmasından ya da diğer ara yüzey etkileşmelerinden dolayı T_N değeri beklenenin altında çıkabilir. İki yüzeyi Pt ile etkileşen örneklerin engelleme sıcaklıkları 280K ile 270K çıkmıştır. Fakat Cr'lu örnekte engelleme sıcaklığı 210K olarak gözlenmiştir. Buna Cr ile CoO arasındaki interdifüzyonun neden olduğu düşünülmektedir.



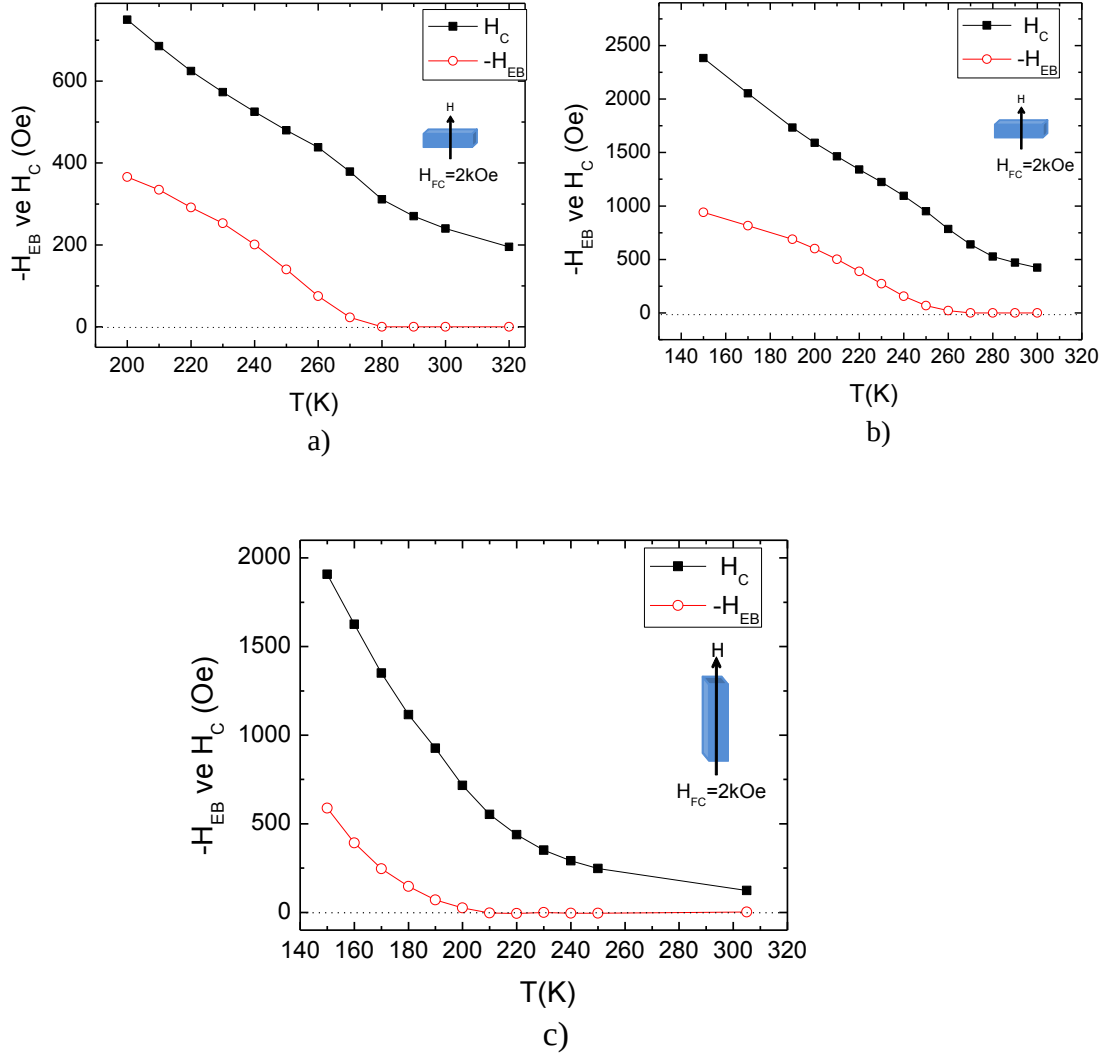
Şekil 5.9: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin farklı sıcaklıklarda ölçülen zorlayıcı alanları (H_{C1} ve H_{C2}) ve engelleme sıcaklıklarını (T_B) göstermektedir.

Şekil 5.9'da bulunan zorlayıcı alanlar yardımıyla Denklem (5.2) kullanılarak H_{EB} ve H_C değerleri hesaplanıp Şekil 5.10 elde edilirse, farklı sıcaklıklar için zorlayıcı alanlar ve kaydırma alanlarının nasıl değiştiği görülebilir.

$$H_{EB} = \frac{H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (5.2)$$

$$H_C = \frac{-H_{C1} + H_{C2}}{2}$$

Şekil 5.10'da kaydırma ve zorlayıcı alanların sıcaklık ile değişimi gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi T_B sıcaklığının üstünde kaydırma alan değeri sıfırdır. T_B değerinden daha düşük sıcaklıklara gidildikçe kaydırma alanı artmaktadır. En yüksek H_{EB} değeri Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneği için gözlenmiştir.



Şekil 5.10: a) Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, b) Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve c) Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneklerinin farklı sıcaklıklardaki zorlayıcı alan (H_C) ile kaydırma alanı (H_{EB}) değerleri gösterilmiştir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt, Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt manyetik malzemelerin yapısal ve manyetik özellikleri incelendi.

Yüksek vakum koşullarında magnetron saçtırma tekniği kullanılarak büyütülen örneklerin tabaka kalınlığı, yoğunluğu ve pürüzlükleri XRR tekniği ile belirlendi. XRD tekniği ile örneklerin polikristal yapıda olduğu görüldü. Pt katmanının zayıf (111) yönelimine sahip olduğu görüldü.

Örneklerin manyetik özelliklerini belirlemek için VSM sistemi kullanıldı. Oda sıcaklığında örneklerin kolay eksenini belirlemek için örnek düzlemine dik ve paralel manyetik alan uygulanarak histeresis eğrileri ölçüldü. Çıkan sonuçlara göre Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneklerin dik manyetik anizotropiye sahip olduğu belirlendi. Ölçülen histeresis eğrilerinden örneklerin M_r/M_s oranları karşılaştırıldı ve Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğinin daha güçlü dik manyetik anizotropiye sahip olduğu gözlemlendi. Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneğinin ise örnek düzleminde kolay eksene sahip olduğu görüldü.

VSM tekniği ile T_N değerinin altındaki sıcaklıklarda, her seferinde tekrar oda sıcaklığı üzerine çıkılıp manyetik alan ile soğutma yapılarak histeresis ölçümleri alındı. Düşük sıcaklıklara gidildikçe histeresis eğrilerinde kaydırma etkisi gözlemlendi. Bunun sonucu olarak zorlayıcı alan değerleri büyüdü ve soğutma için uygulanan manyetik alan yönünün tersine doğru bir kayma gözlemlendi.

Güçlü dik manyetik anizotropiye sahip Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğinde Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örneğine göre daha büyük bir kayma alanı görüldü. Engelleme sıcaklıkları Pt/Co(4Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt ve Pt/Co(5Å)/Pt(5Å)/CoO/Pt örnekleri için sırasıyla 280 K ve 270 K ölçülürken Pt/Co(4Å)/Cr(5Å)/CoO/Pt örneği için 210 K ölçüldü.

KAYNAKLAR

- [1] Baibich M. N., Broto J. M., Fert A., Nguyen Van Dau F., Petroff F., Eitenne P., Creuset G., Friederich A. and Chazelas J., (1988), "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices", Physical Review Letter, 61 (21), 2472-2475.
- [2] Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F. and Zinn W., (1989), "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange", Physical Review B, 39 (7), 4828-4830.
- [3] Prinz G. A., (1998), "Magnetoelectronics", Science, 282 (5394), 1660-1663.
- [4] Wolf S. A., Awschalom D.D., Buhrman R.A., Daughton J.M., von Molnar S., Roukes M.L., Chtchelkanova A.Y., and Treger D.M., (2001), "Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future", Science, 294 (5546), 1488-1495.
- [5] Fert A., (2008), "Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics" Reviews of Modern Physics, 80 (4), 1517-1530.
- [6] Thompson S.M., (2008), "The discovery, development and future of GMR: The Nobel Prize 2007", Journal of Physics D: Applied Physics, 41(9), 093001.
- [7] Meiklejohn W. H. and Bean C. P., (1956), "New Magnetic Anisotropy" Physical Review, 102 (5), 1413-1414.
- [8] Meiklejohn W. H. and Bean C. P., (1957), "New Magnetic Anisotropy" Physical Review, 105 (3), 904-913.
- [9] Meiklejohn W. H., (1962), "Exchange Anisotropy---A Review" Journal of Applied Physics, 33 (3), 1328-1335.
- [10] Öztürk M., Demirci E., Topkaya R., Obaida M., Westerholt K., Kazan S. and Akdoğan N., (2012), "Effect of Exchange Bias on Magnetic Anisotropies in Fe/CoO Bilayers", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 25, (8), 2597-2603.
- [11] Demirci E., Öztürk M., Topkaya R., Obaida M., Westerholt K., Kazan S. and Akdoğan N., (2012), "Thickness and Temperature Dependence of Exchange Bias in Co/CoO Bilayers bilayers", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 25 (8), 2591-2595.
- [12] Ozturk M., Sinir E., Demirci E., Erkovan M., Ozturk O. and Akdogan N., (2012), "Exchange bias properties of [Co/CoO]_n multilayers", Journal of Applied Physics, 112 (9), 093911.

- [13] Akdoğan N., Kazan S., Aktaş B., Özdemir M., Inam H., Obaida M., Dudek J. and 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.
- [14] Sort J., Rodmacq B., Auffret S. and Dieny B., (2003), "Pinned synthetic ferrimagnets with perpendicular anisotropy and tuneable exchange bias", *Applied Physics Letters*, 83 (9), 1800-1802.
- [15] Binek Ch., Borisov P., Chen X., Hochstrat A., Sahoo S., and Kleemann W., (2005), "Perpendicular exchange bias and its control by magnetic, stress and electric fields", *The European Physical Journal B*, 45, 197.
- [16] Garcia F., Sort J., Rodmacq B., Auffret S. and 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.
- [17] Johnson M. T., Bloemen P. J. H., den Broeder F. J. A., and de Vries J. J., (1996), "Magnetic anisotropy in metallic multilayers", *Reports on Progress in Physics*, 59, 1409.
- [18] Web 1, (2013), http://www.spring8.or.jp/en/news_publications, (Erişim tarihi: 01/06/2013).
- [19] Nogués J., Schuller Ivan K., (1999), "Exchange bias", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 192 (2), 203–232.
- [20] Radu F., (2005), "Fundamental Aspects of Exchange Bias Effect in AF/F Bilayers and Multilayers", *Doktora Tezi, Ruhr Üniversitesi*.
- [21] Bland J. A. C. and Heinrich B., (1997), "Ultrathin Magnetic Structures", *Springer* 9, (10), 844–845.
- [22] Himpsel F. J., Ortega J. E., Mankey G. J., and Willis R. F., (1998), "Magnetic nanostructures", *Advances in Physics*, 47 (4), 511-597.
- [23] Grundy P. J., (1998), "Thin film magnetic recording media", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31 (21), 2975-2990.
- [24] Kurt H., Rode K., Venkatesan M., Stamenov P., and Coey J. M. D., (2011), "Material Advances in Spintronics and Magnetic Recording", *Physics Status Solidi B*, 248 (10), 2338–2344.
- [25] Neel L., (1954), "L'approche à la saturation de la magnétostriction", *J. Phys. Rad*, 15, 376.

- [26] Stöhr J., (1999), "Exploring the microscopic origin of magnetic anisotropies with X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) spectroscopy", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200, 470-497.
- [27] den Broeder F. J. A., Hoving W. and Bloemen P. J. H., (1991), "Magnetic anisotropy of multilayers", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 93 (0), 562-570.
- [28] Bruno P., (1988), "Dipolar magnetic surface anisotropy in ferromagnetic thin films with interfacial roughness", *Journal of Applied Physics*, 64 (6), 3153-3156.
- [29] Bruno P., (1988), "Magnetic surface anisotropy of cobalt and surface roughness effects within Neel's model", *Journal of Physics: F*, 18 (6), 1291-1298.
- [30] Beauvillain P., Chappert C., Grolier V., Mégy R., Ould-Mahfoud S., Renard J. P. and Veillet P., (1993), "Magnetic interface anisotropy in ultrathin cobalt films Au/Co/M/Au, with M = Au, Cu, Pd or Pt", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 121 (1), 503-505.
- [31] Draaisma H. J. G. and Jonge W. J. M. d., (1988), "Surface and volume anisotropy from dipole-dipole interactions in ultrathin ferromagnetic films", *Journal of Applied Physics*, 64 (7), 3610-3613.
- [32] Radu F., Abrudan R., Radu I., Schmitz D. and Zabel H., (2012), "Perpendicular exchange bias in ferrimagnetic spin valves", *Nature Communication*, 3, 715.
- [33] Romer S., Marioni M. A., Thorwarth K., Joshi N. R., Corticelli C. E., Hug H. J., Oezer S., Parlinska-Wojtan M. and Rohrmann H., (2012), "Temperature dependence of large exchange-bias in TbFe-Co/Pt", *Applied Physics Letters*, 101 (22), 222404.
- [34] Gradmann U., Muller M., (1968), "Flat Ferromagnetic, Epitaxial 48Ni/52Fe(111) Films of few Atomic Layers ", *J Phys. Status Solidi*, 27 (1), 313-24.
- [35] Carcia P. F., Meinhaldt A. D. and Suna A., (1985), "Perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co thin film layered structures", *Applied Physics Letters*, 47 (2), 178-180.
- [36] Kim G., Sakuraba Y., Oogane M., Ando Y. and Miyazaki T., (2008), "Tunneling magnetoresistance of magnetic tunnel junctions using perpendicular magnetization L1₀-CoPt electrodes", *Applied Physics Letters*, 92 (17), 172502.

- [37] Thiagarajah N., Bae S., Joo H. W., Han Y. C. and Kim J., (2008), "Effects of perpendicular anisotropy on the interlayer coupling in perpendicularly magnetized [Pd/Co]/Cu/[Co/Pd] spin valves", *Applied Physics Letters*, 92 (6), 062504.
- [38] Seki T., Mitani S., Yakushiji K. and Takanashi K., (2006), "Spin-polarized current-induced magnetization reversal in perpendicularly magnetized L1₀-FePt layers", *Applied Physics Letters*, 88 (17), 172504.
- [39] Mangin S., Ravelosona D., Katine J. A., Carey M. J., Terris B. D. and Fullerton E. E., (2006), "Current-induced magnetization reversal in nanopillars with perpendicular anisotropy", *Nature Mater*, 5 (3), 210-215.
- [40] Van Dijken S., Besnier M., Moritz J. and Coey J. M. D., (2005), "IrMn as exchange-biasing material in systems with perpendicular magnetic anisotropy", *Journal of Applied Physics*, 97 (10), 10K114.
- [41] Ikeda S., Miura K., Yamamoto H., Mizunuma K., Gan H. D., Endo M., Kanai S., Hayakawa J., Matsukura F. and Ohno H., (2010), "A perpendicular-anisotropy CoFeB–MgO magnetic tunnel junction", *Nature Material*, 9 (9), 721-724.
- [42] Yildiz F., Przybylski M., Ma X. D. and Kirschner J., (2009), "Strong perpendicular anisotropy in Fe_{1-x}Co_x alloy films epitaxially grown on mismatching Pd(001), Ir(001), and Rh(001) substrates", *Physical Review B*, 80 (6), 064415.
- [43] Yildiz F., Przybylski M. and Kirschner J., (2009), "Perpendicular anisotropy and oscillatory interlayer coupling in Fe_{0.5}Co_{0.5}/Rh/Fe_{0.5}Co_{0.5} bilayers on Rh(001)", *Journal of Applied Physics*, 105 (7), 07C312.
- [44] Chappert C. and Bruno P., (1988), "Magnetic anisotropy in metallic ultrathin films and related experiments on cobalt films (invited)", *Journal of Applied Physics*, 64 (10), 5736-5741.
- [45] Berkowitz A. E. and Takano K., (1999), "Exchange anisotropy — a review", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200 (1–3), 552-570.
- [46] Gruyters M. and 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.
- [47] Ambrose T. and Chien C. L., (1998), "Dependence of exchange coupling on antiferromagnetic layer thickness in NiFe/CoO bilayers", *Journal of Applied Physics*, 83 (11), 6822-6824.
- [48] Hatori T., Ohmori H., Tada M., Nakagawa S., (2007), "MTJ Elements With MgO Barrier Using RE-TM Amorphous Layers for Perpendicular MRAM", *IEEE Transactions on Magnetics*, 43 (6), 2331-2333,

- [49] Mangin S., Ravelosona D., Katine J. A., Carey M. J., Terris B. D. and Fullerton E. E., (2006), "Current-induced magnetization reversal in nanopillars with perpendicular anisotropy", *Nature Material*, 5 (3), 210-215.
- [50] Suzuki T., Fukami S., Ohshima N., Nagahara K. and Ishiwata N., (2008), "Analysis of current-driven domain wall motion from pinning sites in nanostrips with perpendicular magnetic anisotropy", *Journal of Applied Physics*, 103 (11), 113913.
- [51] Shi Z., Fan X. X., He P., Zhou S. M., Hu H. N., Yang M. and Du J., (2013), "Exchange bias of perpendicularly magnetized [Co/Pt]₃/IrMn multilayer on porous anodized alumina", *Journal of Applied Physics*, 113 (17), 17D722-723.
- [52] Ji X. and Krishnan K. M., (2006), "Competing magnetic interactions in perpendicular exchange-biased [Co/Pt]_y/FeMn multilayers", *Journal of Applied Physics*, 99 (8), 08C105.
- [53] Lin L., Thiyagarajah N., Joo H. W., Heo J., Lee K. A. and 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.
- [54] Sort J., Baltz V., Garcia F., Rodmacq B. and Dieny B., (2005), "Tailoring perpendicular exchange bias in [Pt/Co]-IrMn multilayers", *Physical Review B*, 71 (5), 054411.
- [55] Ashida T., Sato Y., Nozaki T. and 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.
- [56] Yasaka M., (2010), "X-ray thin-film measurement techniques V", *The Rigaku Journal*, 26, 2.
- [57] Kiessig H., (1931), "Interferenz von Röntgenstrahlen an dünnen Schichten", *Annalen der Physik*, 407 (7), 715-768.
- [58] Kittel C., (2005), "Introduction to Solid State Physics", 8th Edition, John Wiley.
- [59] Foner S., (1959), "Versatile and sensitive vibrating sample magnetometer", *Review Science Instrument*, 30 , 548-557.
- [60] Öztürk M., (2011), "Manyetik Malzemelerde Kaydırma (Exchange Bias) Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [61] Quantum Design, (2009), "VSM option user manual", San Diego.

- [62] Castro G. M. B., Geshev J., Schmidt J. E., Saitovich E. B. and 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.
- [63] Nakajima N., Koide T., Shidara T., Miyauchi H., Fukutani H., Fujimori A., Iio K., Katayama T., Nývlt M. and 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.
- [64] Tang Y. J., Wong C. Y. and Zhou X., (2001), "Magnetic and magneto-optical properties of Pd/Cr/Co multilayers", *Journal of Applied Physics*, 89 (11), 7062-7064.
- [65] Shiratsuchi Y., Kawahara S.I., Noutomi H. and Nakatani R., (2010), "Interface Magnetism of Epitaxial Film With Perpendicular Magnetic Anisotropy and Perpendicular Exchange Bias", *IEEE Transactions on Magnetics*, 46 (6), 1618-1621.
- [66] Reith T., Shaw J. M. and Falco C. M., (2006), "Effect of very thin Cr films on the magnetic behavior of epitaxial Co", *Journal of Applied Physics*, 99 (8), 08N506.
- [67] Zabel H., (1999), "Magnetism of chromium at surfaces, at interfaces and in thin films", *Journal Physics: Condensed Matter*, 11, 9303–9346.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Hollanda’da doğdu. İlkokulu Yavuz Sultan Selim ve orta öğrenimi Ceyhan İÖO’da tamamladı. Liseyi Özel Kahramankent Lisesi’nde tamamladı. 2004 yılında Koç Üniversitesi Fizik Bölümü’nü burslu okumaya hak kazandı. 2009 yılında mezun oldu. 2011 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE) Fizik Bölümü’nde yüksek lisansa başladı ve “Dik Mıknatıslanmaya Sahip Pt/Co/CoO ve Pt/Co/IrMn İnce Filmlerde Exchange Bias Etkisinin Elektrik Alan ile Manipülasyonu” adlı projede araştırmacı olarak yer aldı.