

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

NANO ÖLÇEKLİ MANYETİK
TEK VE ÇOK KATMANLI FİLMLERİN
SICAKLIK VE BOYUTA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

ŞAHİN ÜNLÜER

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

NANO ÖLÇEKLİ MANYETİK
TEK VE ÇOK KATMANLI FİLMLERİN
SICAKLIK VE BOYUTA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

ŞAHİN ÜNLÜER

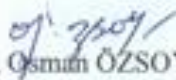
Doktora Tezi

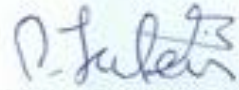
Danışman

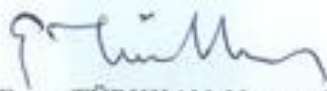
Doç. Dr. Orhan YALÇIN

Haziran 2014

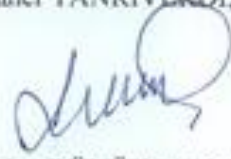
Şahin ÜNLÜER tarafından Doç.Dr. Orhan YALÇIN danışmanlığında hazırlanan "Nano Ölçekli Manyetik Tek ve Çok Katmanlı Filmlerin Sıcaklık ve Boyuta Bağlı Olarak İncelenmesi" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr., , Osman ÖZSOY, Erciyes Üniversitesi

Üye : Doç.Dr., , Orhan YALÇIN, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç.Dr., , Ercan TÜRKKAN, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Üye : Yrd.Doç.Dr., , Taner TANRIVERDİ, Niğde Üniversitesi

Üye : Yrd.Doç.Dr., , Selva BÜYÜKAKKAŞ, Niğde Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20....

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel 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.

Şahin ÜNLÜER

ÖZET

NANO ÖLÇEKLİ MANYETİK TEK VE ÇOK KATMANLI FİLMLERİN SICAKLIK VE BOYUTA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

ÜNLÜER, Şahin
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Ana Bilim Dalı

Danışman :Doç.Dr. Orhan YALÇIN

Haziran 2014, 96 sayfa

Bu doktora tezinde, titreşimli örnek manyetometre (VSM) ve ferromanyetik rezonans (FMR) teknikleri nano ölçekli tek ($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$), çift ($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$) ve çok katmanlı (Cu/Co)_{60/Fe} yapılarının manyetik özelliklerini incelemek amacıyla kullanıldı. Tek ve çift katmanlı bu filmlerin dış dc manyetik alan ve kalınlığa bağlı olarak ölçülen manyetik histerezis eğrileri sıcaklığın fonksiyonu olarak elde edildi. Tek ve çift katmanlı filmler için spin-valf, özel değişim (training), değiş-tokuş ve Barkhausen etkilerinin kaynağı değişen sıcaklık, kalınlık ve altaşığa göre farklı düzende analiz edildi. Çok katmanlı filmin FMR sinyalleri paralel ve dik her iki geometri için kaydedildi. X-bant (~9.5 GHz) FMR sinyalleri ve bunların rezonans alanları, Bloch–Bloembergen tipi sönüm terimi varlığında manyetik alınganlığın sanal kısmı ve dispersiyon bağıntısı kullanılarak analiz edildi. Çok katmanlı film için manyetik parametrelerin sıcaklıkla değişimi ve FMR sinyallerinin rezonans alanlarının frekans değişimi ortalama bir teorik model ile deneysel verilerden elde edildi.

Anahtar Sözcükler: Manyetik ince filmler, değiş-tokuş etkisi, döngü etkisi, manyetostatik mod, FMR tekniği, VSM tekniği

SUMMARY

INVESTIGATION OF SIZE AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF NANOSCALE MAGNETIC SINGLE AND MULTILAYER FILMS

ÜNLÜER, Şahin

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assoc.Prof.Dr. Orhan YALÇIN

June 2014, 96 pages

In this PhD thesis, vibrating sample magnetometer (VSM) and ferromagnetic resonance (FMR) techniques were used to investigate the magnetic properties of nanoscale monolayers ($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$), bilayers ($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$) and multilayer (Cu/Co)_{60/Fe} structures. The magnetic hysteresis loops of the monolayers and bilayers were measured as a function of external dc magnetic field and the thickness dependence of these films were plotted as a function of temperature. The origin of the spin valve, training, exchange-bias and Barkhausen effects for monolayers and bilayers were analyzed at various temperatures, thicknesses and different orientations according to the substrate. The FMR spectra of multilayer were recorded for both parallel and perpendicular geometry. The X-band (~ 9.5 GHz) FMR spectra and their resonance fields were analyzed by using the imaginary part of the magnetic susceptibility and dispersion relation with the Bloch–Bloembergen type damping term. The temperature evolution of magnetic parameters and frequency evolution of the FMR resonance field for multilayer were obtained from experimental data by means of a theoretical model.

Keywords: Magnetic thin films, exchange-bias effect, training effect, magnetostatic mode, FMR techniques, VSM techniques

ÖN SÖZ

Bu doktora çalışmasında, nano ölçekli tek, çift ve çok katmanlı filmlerin sıcaklık ve büyüklüğe bağlı manyetik özellikleri araştırılmıştır. Çift katmanlı filmlerin alttaşlığa göre konumu değiştiğinde düşük sıcaklıkta küçük, orta ve büyük histerezis eğrileri detaylıca araştırıldı. Çift katmanlı filmin kritik kalınlığın altında sert/yumuşak manyetik davranışı araştırıldı. Çok katmanlı filmin oda sıcaklığı ve düşük sıcaklıklardaki FMR çalışmaları incelendi. Ayrıca FMR sinyallerinin rezonans alanlarının frekansa göre değişimi incelendi.

Doktora tez çalışmasının yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Doç.Dr. Orhan YALÇIN' a en içten teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez çalışması esnasında beni motive eden, eleştirel ve insancıl yapısıyla büyük desteğini gördüğüm Prof.Dr. Osman ÖZSOY ve Doç.Dr. İbrahim KARACA' ya, deneysel sonuçlar üzerinde teorik çalışma yaparken desteğini esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Sinan KAZAN' a şükran duygularımı belirtmek isterim. Ayrıca tezdeki örneklerin teminine yardımcı olan Prof.Dr. A. Fert ve Prof.Dr. M.R.J. Gibbs' e teşekkür ederim.

Öğretim hayatımın çeşitli kademelerinde yaşadığım sıkıntılı durumlarımda maddi ve manevi her türlü desteğini esirgemeyen, bugünlere gelmemde yegâne emeğe sahip babam, annem ve kardeşlerime, doktora çalışması süresince göstermiş oldukları sabır ve özveriden dolayı eşime, çocuklarım Zeynep ve Sefa' ya ithaf ediyorum.

Bu çalışmaya FEB2012/3 numaralı proje ile finansal destek sağlayan Niğde Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II KURAMSAL BİLGİ.....	7
2.1 Manyetik Düzen.....	7
2.2 Manyetik Momentin Kaynağı.....	8
2.3 Manyetik Rezonans.....	10
2.4 Elektron Paramanyetik Rezonans.....	12
2.5 Tek ve Çok Katmanlı Filmlerde Ferromanyetik Rezonans.....	15
2.6 Yumuşak/Sert (Soft/Hard) İnce Film Yapısı.....	26
2.7 Anizotropi Kavramı ve Bazı Anizotropi Türleri.....	29
2.7.1 Şekil anizotropisi.....	29
2.7.2 Manyeto-kristal anizotropisi.....	30
2.7.3 Manyeto-elastik anizotropi.....	30
2.8 Mıknatıslanmanın Sıcaklığa Bağlılığı.....	30
BÖLÜM III MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1 Ölçümü Yapılan Numuneler.....	32
3.2 Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Yöntemi.....	32
3.3 Elektron Spin Rezonans (ESR) Yöntemi.....	36
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
4.1 Nano Ölçekli Tek ve Çift Katmanlı İnce Filmler.....	40
4.1.1 Tek katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin sıcaklık ve kalınlığa bağlı incelenmesi.....	40
4.1.2 Tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin sıcaklık ve kalınlığa bağlı incelenmesi.....	45
4.1.3 Çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ve $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmlerinin sıcaklık ve kalınlığa bağlı olarak incelenmesi.....	48
4.2 Nano Ölçekli Çok Katmanlı Filmin FMR ve VSM Çalışmaları.....	55

4.2.1 Çok katmanlı (Cu/Co)60/Fe filmine ait mıknatıslanmanın sıcaklık gelişimi..	56
4.2.2 Çok katmanlı (Cu/Co)60/Fe filminin manyetik histerezis eğrilerinin sıcaklık gelişimi.....	58
4.2.3 Çok katmanlı (Cu/Co)60/Fe filmine ait Hs, Hc, Mr ve Ms ifadelerinin sıcaklık gelişimi.....	59
4.2.4 Çok katmanlı (Cu/Co)60/Fe filmine ait FMR spektrumlarının sıcaklık gelişimi.....	63
4.2.5 Çok katmanlı (Cu/Co)60/Fe filminin FMR spektrumlarının açısal bağımlılığı	66
4.2.6 Çok katmanlı (Cu/Co)60/Fe filmine ait FMR sinyallerinin frekans gelişimi..	71
BÖLÜM V SONUÇLAR.....	73
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	95
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER.....	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Değişik kalınlıklara sahip ölçümü yapılan tek, çift ve çok katmanlı numuneler	32
--	----

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	(a) Bir akım ilmeğindeki elektronun spin ve yörünge hareketlerinin temsili gösterimi (b) bunların manyetik momentlerinin vektör temsilleri	9
Şekil 2.2.	(a) Sıfır alan ve artan manyetik alanda serbest elektronun rezonans ve enerji seviyeleri (b) Numunenin soğurduğu güç (P) (c) gücün manyetik alana göre türevi (dP/dH), b ve c ' deki düşey eksenler keyfî birimlerdir	15
Şekil 2.3.	İnce filmlerde, örnek geometrisi, denge manyetizasyonu $\vec{M}$ ' nin bağıl yönelimi ve dış manyetik alan $\vec{H}$ ' ın dc bileşenlerinin gösterimi.....	16
Şekil 2.4.	Bloch-Bloembergen tipi denkleme göre efektif manyetik alan $\vec{H}_{eff}$ çevresinde manyetizasyon $\vec{M}$ nin sönümlü presesyonu	18
Şekil 2.5.	Üç (iki manyetik bir manyetik olmayan) tabakalı filmin temsili gösterimi ve örnek geometrisi	24
Şekil 2.6.	Manyetik 60 tabakadan ve manyetik olmayan (59) tabakadan oluşan sistemin dış manyetik alan $\vec{H}$ ' ın dc bileşeni ve denge manyetizasyonu $\vec{M}$ ' nin bağıl yöneliminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.7.	(a) Dış manyetik alan altında değiş-tokuş etkileşmeli yumuşak/sert sistemdeki yumuşak bölge mıknatıslanma yönelimlerinin atomik düzeyde temsili gösterimi (b) Dış manyetik alan altında yumuşak tabakanın ortalama bir yöneliminin temsili gösterimi	27
Şekil 2.8.	(a) Deneysel EPR, (b) teorik SPR, (c) teorik nanotel FMR, (d) teorik ince film FMR (e) deneysel çok katmanlı ince film FMR sinyalleri.....	28
Şekil 3.1.	Manyetik histerezis eğrilerinin ölçümünün yapıldığı VSM cihazında titreşimi sağlayan VSM motoru.....	33
Şekil 3.2.	Manyetik histerezis eğrilerinin ölçümünün yapıldığı VSM cihazı ve bileşenleri.....	34
Şekil 3.3.	Temsili manyetik histerezis eğrisi ve eğriye ait kritik noktalar.....	35
Şekil 3.4.	ESR spektrometresinin blok diyagramı.....	37
Şekil 3.5.	Sinyallerin belirli açılarda alınmasını sağlayan gonyometre.....	38
Şekil 3.6.	EPR deneylerinde birbirine dik üç eksenin seçimi.....	39
Şekil 4.1.	8 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 305 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi.....	41

Şekil 4.2. 8 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 10 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi	41
Şekil 4.3. 6 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 305 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi	43
Şekil 4.4. 6 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 10 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi	44
Şekil 4.5. Tek katmanlı 5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin 305 K sıcaklığındaki manyetik histerezis eğrisi	45
Şekil 4.6. Tek katmanlı 5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin 10 K sıcaklığındaki manyetik histerezis eğrisi	46
Şekil 4.7. Tek katmanlı 2.5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin 305 K sıcaklığındaki manyetik histerezis eğrisi	47
Şekil 4.8. 305 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 5 nm olan çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmine ait histerezis eğrisi	48
Şekil 4.9. 305 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 2 nm olan çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmine ait histerezis eğrisi	49
Şekil 4.10. 305 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numuneye ait histerezis eğrisi	50
Şekil 4.11. 10 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmine ait histerezis eğrisi	51
Şekil 4.12. Tabaka kalınlıkları 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K'deki küçük (minor) histerezis eğrisinin zamanla gelişimi	52
Şekil 4.13. Tabaka kalınlıkları 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K'deki küçük (minör, kırmızı) ve orta (middle, mavi) histerezis eğrisinin zamanla gelişimi	53
Şekil 4.14. Tabaka kalınlıkları 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K'deki küçük (minör, kırmızı), orta (middle, mavi) ve büyük (majör, yeşil ve siyah) histerezis eğrisinin zamanla gelişimi	54
Şekil 4.15. Ferromanyetik rezonans deneyleri için, uygulanan H manyetik alanın dc-bileşeni, M denge manyetizasyonunun bağlı yönelimleri ve çok katmanlı sistemin örnek geometrisi	55
Şekil 4.16. Normalize edilmiş deneysel manyetizasyon eğrilerinin 1 T (FC) ve 200 G (FC, ZFC) soğutma altında sıcaklığa göre değişimi ve 200 G (FC) deki deneysel	

manyetizasyon verilerinin teorik olarak fit edilmesiyle elde edilen kesikli eğrinin sıcaklık gelişimi	56
Şekil 4.17. Çok katmanlı (Cu/Co) ₆₀ /Fe filmin bazı seçilmiş sıcaklıklardaki manyetik histerezis eğrilerinin azalan sıcaklıkla gelişimi	58
Şekil 4.18. Deneysel doyum alanı (H _s)' nin sıcaklık gelişimi	59
Şekil 4.19. Deneysel Koersif alan (H _c)' nin sıcaklık gelişimi ve bunun teorik hesaplanması	60
Şekil 4.20. Deneysel kalıcı mıknatıslanma (M _r)' nin sıcaklık gelişimi	61
Şekil 4.21. Deneysel doyum mıknatıslanması (M _s)' nin sıcaklık gelişimi ve bunun teorik hesaplanması	62
Şekil 4.22. Çok katmanlı (Cu/Co) ₆₀ /Fe numunenin paralel ve dik doğrultuda elde edilen FMR sinyallerinin azalan sıcaklıkla gelişimi ve bunların teorik hesaplamaları	63
Şekil 4.23. Çok katmanlı (Cu/Co) ₆₀ /Fe numunenin oda sıcaklığından başlayarak düşük sıcaklığa kadar dik ve paralel doğrultularda deneysel FMR sinyallerinin rezonans alan değerlerinin sıcaklık gelişimi	64
Şekil 4.24. Bazı seçilmiş sıcaklıklara ait dik pozisyonda elde edilen FMR sinyalleri ve bunların teorik fitleri	65
Şekil 4.25. Dik doğrultuda farklı sıcaklıklarda deneysel FMR sinyallerinin teorik fitinden elde edilen yüzey anizotropi sabitinin sıcaklıkla değişimi	66
Şekil 4.26. Çok katmanlı (Cu/Co) ₆₀ /Fe numunenin 278 K' de FMR sinyallerinin açısal bağımlılığı	67
Şekil 4.27. Çok katmanlı (Cu/Co) ₆₀ /Fe numunenin 278 K' de rezonans alan değerleri ve bunların teorik hesaplaması	68
Şekil 4.28. Çok katmanlı (Cu/Co) ₆₀ /Fe numunenin 35 K' de FMR sinyallerinin açısal bağımlılığı	69
Şekil 4.29. Çok katmanlı (Cu/Co) ₆₀ /Fe numunenin 35 K' de rezonans alan değerleri ve bunların teorik hesaplaması	70
Şekil 4.30. Çok katmanlı (Cu/Co) ₆₀ /Fe numunenin oda sıcaklığında K- ve Q-bandına ait FMR sinyallerinin frekans gelişimi	71
Şekil 4.31. Oda sıcaklığında 9.5-36 GHz frekans aralığında X-, K- ve Q-bandına ait deneysel FMR sinyallerinin rezonans alan değerlerinin frekans bağımlılığı ve bunların teorik hesabı	72

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
μ	Dipol manyetik momenti
$\vec{L}$	Yörünge açısal momentumu
$\vec{S}$	Spin–açısal momentumu
γ	Jiromanyetik oran
$\vec{H}$	Dış manyetik alan vektörü
$\vec{\tau}$	Tork
ω	Larmor frekansı
ν	Mikrodalga frekansı
$\vec{H}_{eff}$	Etkin alan
$\vec{M}$	Mıknatıslanma vektörü
T_2	Spin-spin durulma zamanı
T_1	Spin-örgü durulma zamanı
λ	Sönüm parametresi
α	Boyutsuz Gilbert tipi sönüm katsayısı
$\hat{H}$	Hamiltoniyen
g	Landé g -faktörü
μ_B	Bohr manyetonu
H_{res}	Rezonans alan
Δ_{pp}	Çizgi genişliği
E_Z	Zeeman enerjisi
E_a	Manyetokristal anizotropi enerjisi
E_d	Demanyetizasyon enerjisi
E_{ex}	Ferromanyetik değiş-tokuş enerjisi
K_{u1}	Birinci derece anizotropi enerji sabiti

K_{u2}	İkinci derece anizotropi enerji sabiti
K_{eff}	Etkin tek eksenli anizotropi terimi
χ	Manyetik alınganlık
χ_2	Yüksek frekans alınganlığının sanal kısmı
P	Soğrulan güç
Δ_H	Çizgi genişliği
$L(x)$	Langevin fonksiyonu
V	Parçacık hacmi
M_s	Doyum mıknatıslanması
M_r	Kalıcı mıknatıslanma
H_s	Doyum alanı
H_c	Koersif alan
H_r	Rezonans alanı

Kısaltmalar

(SSD)

T_C

T_N

MR

NMR

NQR

EPR

ESR

SWR

FMR

AFMR

CESR

VSM

GMR

BLS

MBE

LLG

Açıklama

Katı Hal Disk

Curie Sıcaklığı

Néel Sıcaklığı

Manyetik Rezonans

Nükleer Manyetik Rezonans

Nükleer Kuadrupol Rezonans

Elektron Paramanyetik Rezonans

Elektron Spin Rezonans

Spin Dalga Rezonansı

Ferromanyetik Rezonans

Antiferromanyetik Rezonans

İletken Elektron Spin Rezonans

Titreşimli Örnek Manyetometresi

Dev Manyeto Direnç

Brillouin Işık Saçılması

Moleküler Demet Biriktirme

Landau–Lifshitz–Gilbert

SP	Süper Paramanyetik
XRD	X-Işını Kırınımı
ZFC	Sıfır Alan Soğutması
FC	Alan Soğutması
(SQUID)	Süper İletken Kuantum Girişim Cihazı
(MOKE)	Manyeto-Optik Kerr Etkisi
OPG	Düzlem Dışındaki Geometri
IPG	Düzlem Yüzeyindeki Geometri

BÖLÜM I

GİRİŞ

Tek ve çok katmanlı ince filmlerin teknolojik uygulamalar için fonksiyonel özellikleri spintronik ile ortaya konmuştur. Böylece ince filmler fizik, malzeme bilimi ve biyoloji gibi alanlarda giderek ilgi çekmektedir. Bu tür filmlerin boyutu nanometre (nm) ölçeğine doğru yaklaştıkça kuantum etkilerin aktif hale gelmesiyle yeni ve ilginç fiziksel, kimyasal ve termal özellikler ortaya çıkmaktadır (Aktaş vd., 2007; Kartopu ve Yalçın, 2010, 2011). Tek ve çok katmanlı filmlerin manyeto-sensör, bio-sensör, manyeto-elektronik, veri depolama ortamı, bilgisayar hard diskleri, nanotransistörler ve mikrodalga elektronik aletler gibi geniş uygulamaları vardır (Babin vd., 2003).

Ferromanyetizma, kalıcı mıknatıslanmaya sahip numunelerin özelliklerini inceler. Numunelerdeki kalıcı spinler mıknatıslanmanın asıl kaynağını oluşturur. Manyetik sistemler manyetik dipollerin yönelimlerine göre ferromanyetik, antiferromanyetik, diamanyetik ve paramanyetik olarak sınıflandırılır. Ferromanyetik sistemlerde Curie sıcaklığının (T_C), antiferromanyetikte ise Néel sıcaklığının (T_N) üzerinde numuneler paramanyetiktir.

Rezonans yani Zeeman Etkisi, belirli frekans ya da manyetik alan değerlerinde kuantumlu elektron ya da çekirdek spinlerinin enerji seviyeleri arasındaki geçişlerde sistemin enerji soğurması olarak gerçekleşir.

Rezonans olayı genellikle manyetik rezonans (MR) ve çekirdek (nükleer) manyetik rezonans (NMR) olmak üzere iki ana başlık altında toplanır. Rezonans türleri NMR, nükleer kuadropol rezonans (NQR), elektron paramanyetik (elektron spin) rezonans (EPR/ESR) ve ferromanyetik rezonans (FMR) olarak temel gruplara ayrılır (Yalçın, 2013). Bu rezonans yöntemleri katı, sıvı, biyolojik ve medikal malzemelerin yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenmesinde önemli rol oynar. Ayrıca MR deneyleriyle numunelerdeki elektronik nokta kusurları, spin veya çevresinin çizgi genişliği ve spin

uyarılmaları gibi bilgiler elde edilebilir (Farle, 1998).

EPR yöntemi özellikle çiftlenmemiş elektron sistemine sahip numunelerde iyi sonuçlar verir. FMR yöntemi ise hacimsel (bulk) numuneler için daha uygundur. FMR tekniği numunenin geometrisine de bağlı olan demanyetizasyon alanı gibi özellikleri incelemeye fırsat verir (Aktaş, 1993, 1994; Yalçın vd., 2008). FMR tekniği malzemenin hem üç boyutta incelenmesine hem de numunenin yapısına zarar vermemeye gibi bazı avantajlara sahiptir.

EPR sinyalleri FMR sinyallerine göre daha düşük manyetik alanda gözlenir. Ayrıca FMR sinyalinin çizgi genişliği ESR sinyalinden daha büyüktür. Değiş-tokuş etkileşmesinden dolayı FMR sinyallerin çizgi genişliğine ek bir katkı da gelir.

EPR 1945 yılında keşfedilmiştir. İlk EPR çalışmaları belli numuneler üzerinde yapılsa da zamanla fizik, kimya, malzeme bilimi ve sentetik numuneler gibi geniş bir yelpazeye yayılmıştır (Zavoisky, 1945; Kittel, 1946; Sparks, 1969). Numunelerin anizotropik, değiş-tokuş enerjisi ve spinler arası durulma zamanı gibi ilgilerin elde edilmesinden dolayı son yıllarda ferromanyetik nano numuneler üzerindeki FMR çalışmaları dikkate değer şekilde artış göstermiştir (Artman, 1979; Vounyuk vd., 1991; Puzskarski, 1992; Weiss, 1955; Wigen, 1984; Wolfram ve De Wames, 1971; Frait ve Fraitova, 1998; Skomski, 2008; Coey, 2009).

Ayrıca FMR yöntemi tekli, ikili ve çok tabakalı ince filmlerin manyetik özelliklerinin; yönelime, frekansa ve sıcaklığa bağlılığının incelenmesinde ve numunelerin homojen olmayan durumlarının araştırılmasında da kullanılmıştır (Celinski vd., 1997; Farle, 1998; Heinrich, 2005(a); Schmool ve Barandiarán, 1998; Schreiber ve Frait, 1996; Grünberg vd., 1982; Cochran ve Kambersky, 2006). Bu yöntem numunelerin teknolojik uygulamalarının ortaya çıkmasına fırsat verdiği için tek kristallerin, polikristallerin, alaşım filmlerinin, sıcaklık bağımlılığı, ısı çift (thermocouple) ve benzer manyetik özelliklerin araştırılmasında da kullanılır hale gelmiştir (Parkin vd., 1994; Yıldız vd., 2004(a); Grünberg, 2001; Aktaş vd., 2004; Kuanr vd., 2005; Sun vd., 2012(a); Richard vd., 2012).

Manyeto-optik, nano-kristal yapılar, nano ölçekli $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ filmler, voltaj kontrollü manyetik anizotropi, dev manyeto direnç (GMR), hibrit spintronik yapılar, Heusler

alaşım filmleri, polarize yapılar ve spin transferleri FMR tekniği ile araştırılan konular arasındadır (Paz vd., 2012; Maklakov vd., 2012; Raita vd., 2012; Kartopu vd., 2011; Zhu vd., 2012; Huang vd., 2012; Kudryavtsev vd., 2007; Rahman, 2008; Krebs vd., 1989). EPR yöntemi; FMR sinyallerin çizgi genişliğinin araştırılmasında, süper iletken çift yapılar, bazı nano-sistemlere de uygulanmıştır (Yeh vd., 2009; Richard vd., 2012; Sun vd., 2012; Poole ve Owens, 2003; Parvatheeswara vd., 2006; Mills ve Bland, 2006; Schmool ve Schmalzl, 2007; Vargas vd., 2007; Seemann vd., 2009; Wang vd., 2011; Patel ve Owens, 2012; De Biasi vd., 2013).

Tek domenli nano noktalar, nanoteller, mikro teller ve nanokompozitler başarılı bir şekilde FMR tekniği ile incelenmiştir (Sun, 2012; Miyake vd., 2012; Adeyeye vd., 1997; Wegrowe vd., 2000; Jung vd., 2002; Raposo vd., 2011; Boule vd., 2011; Kraus vd., 2012; Klein vd., 2012; Arias ve Mills, 2003). FMR çalışmalarının uygulandığı diğer alanlardan bazıları; termal özellikli nanoparçacıklar, katalist parçacıklar ve medikal uygulamaları olan çok küçük süperparamanyetik özellik gösteren nanoparçacıklardır (Marin, 2006; de Biasi ve Gondim, 2006; Vargas, 2007; Duraia ve Abdullin, 2009).

Geçiş metallerinin (Fe, Co ve Ni gibi) farklı birleşimleri kullanılarak üretilen numunelerden; $Ni_{81}Fe_{19}$, $CoFeSiO/SiO$, $NiFe/CoFe/Cu/CoFe$, $NiO/NiFe$, $NiFe$, $CoFe$, $Co_{90}Fe_{10}$, $Co_{50}Fe_{50}$, $Co_{35}Fe_{65}$, $CoFe$, $NiFe/FeCoBSi$ ve $CoFe/NiFe$ FMR tekniği ile incelenmektedir (Ikeda vd., 2009; Larson vd., 2000; Xie vd., 2012; Zhai vd., 2003; Güner vd., 2006, Hung vd., 2000; Xu vd., 2003; Lamy ve Viala, 2005; Babu vd., 2012; Baibich vd., 1988; Gerber vd., 2007).

$CoFe/Al_2O_3$, $NiFe/Al_2O_3$, $CoFe/PtMn/CoFe$, $NiFe/FeMn/NiFe$, Co/Pt , Co/Pd , $NiFe/SiO_2$, $NiFeCo$, $CoFe$, $NiFeCr$, $Ni_{0.8}Fe_{0.2}$, $Fe-Cr-Fe$ ve $NiO/NiFe$ numunelerinin manyetik ve spin-valf gibi popüler özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca bu tür numuneler için asimetrik şekilli, küçük ve büyük histerezis eğrileri çalışılmıştır (Windsor vd., 2012; Takahashi vd., 2001, 2011; Hwang vd., 2004; Gall vd., 2002; Zhou vd., 2011; Appelbaum vd., 2003; Hosomi vd., 2002; Mao vd., 2002; Katti vd., 2001; Yang vd., 2010; Benatmane vd., 2009; Ren vd., 2009; Gnatchenko vd., 2006; Nascimento vd., 2008; Berger vd., 2010).

Bileşenleri Co ve Ni den oluşan Co/Ni numunenin yüzeyine dik olarak uygulanan manyetik alan altında FMR tekniği ile çalışılmıştır (Macià vd., 2012). Nano ölçekli

manyetik numunelerin sıcaklığa bağı olarak manyetik özellikleri Schmool ve arkadaşları tarafından çalışarak bunların teorik modellemeleriyle uyum içinde oldukları gösterilmiştir (Schmool vd., 2004, 2006). Çok katmanlı Fe/Ti filminde FMR sinyalleri, film düzlemine paralel durumdan film düzlemine dik duruma kadar uygulanan manyetik alanın yöneliminin fonksiyonu olarak Lassri ve arkadaşları tarafından elde edilmiş ve teorik olarak manyetik anizotropiyi belirlemek için ayrıca teorik modelleme yapılmıştır. Ek olarak Lassri ve arkadaşları elektrodpozisyon tekniğiyle hazırlanan Ni/Cu çok katmanlı filmlerin manyetik özelliklerini incelemişlerdir (Lassri vd., 2001, 2004).

Kakazei ve arkadaşları çok katmanlı CoFe/Al₂O₃ (30 Å) numunenin FMR çalışmasını yaparak manyeto transport, süper paramanyetik (SP) durumdan ferromanyetik (FM) duruma geçiş ve granüllü yapıdan sürekli yapıya geçişleri incelemişlerdir (Kakazei vd., 2001). Morales ve arkadaşları Fe/Zn numunenin yapısal ve manyetik özelliklerini sırasıyla x-ışını kırınımı (XRD) ve titreşimli örnek manyetometre (VSM) ile incelemişlerdir (Morales vd., 2003). Tek Au/Fe/GaAs (001) ve çift Au/Fe/Au/Fe/GaAs (001) katmanlı yapılar kullanılarak FMR yardımıyla durulma süreçleri Heinrich ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (Heinrich vd., 2003). Farklı kalınlıklardaki CoFe/Al₂O₃ numunenin sıfır-alan soğutmalı (ZFC) ve alan soğutmalı (FC) mıknatıslanma eğrileri incelenmiştir (Kakazei vd., 2003). MgO alttaş üzerine büyütülen, nanometre ölçekli Fe₃O₄ numune FMR yöntemiyle incelenmiştir (van der Heijden vd., 1998). Çok katmanlı ve farklı kalınlıklardaki Co/Pd numunelerin anizotropileri sıcaklığa bağı olarak FMR ve VSM yöntemleriyle araştırılmıştır (Romano vd., 1999).

NiFe₂O₄ numunenin yapısal özellikleri FMR tekniği ile (Schäfer vd., 2012), Co/Pt üç katmanlı numunenin manyetik özellikleri ise spin-dalga uyarma yöntemi ile (Salhi vd., 2011) incelenmiştir. Sandviç yapılı ince filmin kolay ve zor eksen boyunca çok küçük koersivitelere sahip ve hassas manyetik özellikleri olduğu tespit edilmiştir (Liu vd., 2012). (111) düzlemi üzerine büyütülen NiFe/CoFe/Cu/CoFe, değış-tokuş etkileşmeli NiO/NiFe ve tanecik yapılı (granüler) CoFeSiO/SiO filmlerin manyetik özellikleri çalışılmıştır (Ikeda vd., 2009). Manyetik histerezis kayma etkisinin, manyetik alan ve sıcaklık gibi dış etkenlerden kaynaklandığı bilinmektedir (Meiklejohn ve Bean, 1957; Nogues vd., 2005; Mangin vd., 2003). Bu tür histerezis eğrilerinde manyetik alana göre pozitif ve negatif bölgeye doğru kaymanın FM/AFM, FM/spin-glass (Mannan vd., 2007), AFM/ferrimanyetik (fM) (Jammalamadaka vd., 2012; Magnin vd., 1999) ve FM/FM

yapılarda da gözleendiği bulunmuştur. FM/FM değiş-tokuş etkileşmeli etkilerde tekrar eden halkalar şeklinde (training effects) eğriler de gözlenmesi, değiş-tokuş etkileşmesi, tekrar eden halkalar şeklindeki histerezis eğrilerinin katmanlı filmlerde gözlenmesi spin-valf yapılar, manyeto-direnç, dev manyeto direnç ve manyetik kayıt için gelecek vaat etmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında ikili numunede gözlenen manyetik histerezis eğrilerinden bazıları 10 K Sıcaklığında detaylıca araştırıldı.

Çok katmanlı numunelerin manyetik özellikleri titreşimli örnek manyetometre (VSM) (Morales vd., 2003; Kakazei vd., 2003; Morley vd., 2004; Tong vd., 1998; Gubbiotti vd., 2012; Romano vd., 1999), dev manyeto direnç (GMR) (Hecker vd., 2002; Stankowski vd., 2003; Belozorov vd., 2001; Endean vd., 2011), manyeto-optik Kerr etkisi (MOKE) (Kuanr, 2003), süper iletken kuantum girişim cihazlı (SQUID) manyetometre (Spasova vd., 2001; Drovosekov vd., 2006), dc mikrodalga/manyetron sıçratma (Biondo vd., 2004), ve Brillouin ışık saçılması (BLS) (Grünberg, 1980) yöntemleriyle analiz edilmektedir.

FMR yöntemi numuneye zarar vermediği için malzemeciler, kimyacılar ve biyologlar için de tercih edilen yöntemlerden birisidir (Yalçın, 2013). Bu yöntem ile numunelerin X-, K-, Q-, U- ve V-bant FMR sinyalleri kaydedilerek rezonans/tınlışım alanların frekansa karşı bağılılıkları da incelenmektedir (Fujita vd., 2008; Drovosekov vd., 1999, 2006; Layadi, 2012).

Bu doktora tez çalışmasında; termal okside Si alttaş üzerine saçtırma tekniğı ile büyütölen farklı kalınlıklarda tek katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ve $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunelerin kalıcı mıknatıslanma, doyum mıknatıslanma, koersif alan ve doyum manyetik alan özellikleri VSM tekniğı ile incelendi. Tek ve çift katmanlı filmlerin simetrik ve asimetrik histerezis eğrileri araştırıldı. Çift katmanlı filmlerden histerezis eğrilerindeki pozitif ve negatif kaymaların nedenleri incelendi. Değiş-tokuş etkileşmesine sahip yumuşak ve sert domen bölgelerine sahip numunelerin düşük sıcaklıklarda gözlenen küçük ve büyük histerezis eğrileri detaylıca araştırıldı.

Çok katmanlı $(\text{Cu}/\text{Co})_{60}/\text{Fe}/\text{Si}$ numunenin sıcaklığa bağılı olarak manyetik özellikleri FMR ve VSM tekniğı ile detaylıca araştırıldı (Yalçın vd., 2014). Bu numune için mıknatıslanma eğrileri manyetik alan varlığında ve manyetik alan yokken sıcaklığa göre

gelişimi tespit edildi. Bu numunenin FMR rezonans alan değerlerinin frekansa göre değişimi de araştırıldı.

Giriş bilgilerinden sonra ikinci bölümde manyetizma hakkında gerekli bilgiler verildi. Bu bilgilerden tekli, çift katmanlı ve çok katmanlı numunelerin mıknatıslanma ve rezonans frekansları elde edildi. Üçüncü bölümde ise bu tez çalışmasında kullanılan numunelerin ölçümlerinin yapıldığı VSM ve FMR cihazlarının çalışma prensipleri anlatıldı. VSM ve FMR ölçümlerinde kullanılan numuneye ait geometrilerden bahsedildi. Ayrıca ESR spektrometrelerinde kullanılan mikrodalga frekans bantlarından ve bu bantlara karşılık gelen manyetik alan değerleri üzerinde duruldu. Dördüncü bölümde ise $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ve $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ bileşenli tek ve çift katmanlı numunelerin manyetik histerezis ölçüm sonuçları üzerinde duruldu. Ayrıca bu bölümde çift katmanlı filmlerden değiş-tokuş etkileşmesi, histerezislerdeki kaymalar ve sıcaklığa bağlı olarak gözlenen çoklu manyetik halkaların zamanla gelişimi araştırıldı. Ayrıca (001) düzleminde Si alttaş üzerine büyütülen ve kalınlıkları sırasıyla 9 Å (Cu) ve 19 Å (Co) olan $(\text{Cu/Co})_{60}/\text{Fe}$ çok katmanlı numunenin sıcaklıkla gelişimi araştırıldı. Bu numunenin frekans ile FMR rezonans alanları arasındaki deneysel ve teorik ilişki incelendi. Buradan numuneye ait iç alan değeri ve g-faktörü belirlendi.

BÖLÜM II

KURAMSAL BİLGİ

2.1 Manyetik Düzen

Bir numunedeki manyetik momentlerin yönelimlerine bağlı olarak malzemeler ferromanyetik, antiferromanyetik, ferrimanyetik, paramanyetik ve diamanyetik olarak gruplandırılır. Manyetizma bu manyetik gruplardaki malzemeleri inceleyen bilimdir. Diğer bir ifadeyle manyetizma için numunedeki manyetik momentleri üzerine inşa edilen bir bilim dalı da denir. Bu manyetik momentler numunenin mıknatıslanmasını oluşturur. Bu mıknatıslanmanın manyetik alana oranına manyetik alınganlık denir. Manyetik alınganlık değeri pozitif veya negatif gibi iki değer alır. Bu nedenle manyetik gruplandırmalar manyetik alınganlık değerinin pozitif veya negatif değerler almasına bağlı olarak da iki grup altında sınıflandırılabilir. Bu iki gruptan biri paramanyetik sistemdir. İkinci grup ise ferromanyetik, ferrimanyetik, antiferromanyetik ve diyamanyetik sistemlerdir. Paramanyetik ve diyamanyetik malzemeler bu şekilde manyetik alınganlığın alacağı değere göre birbirinden ayırt edilebilirler. Ayrıca paramanyetik sistemler dış manyetik alandan etkilenirken diyamanyetik malzemeler etkilenmezler.

Nanomalzemelerin nanobilim ve nanoteknolojideki önemi son bilimsel çalışmalarla birlikte önemli bir noktaya ulaşmıştır. Nanomalzemelerin; manyeto-elektronik aletler, biyosensörler, fotodedektörler, güneş pilleri, nanocihazlar ve plazmonik nano yapılar gibi çeşitli elektronik sistemlerde kullanımı giderek artmıştır. Çünkü manyetik nano yapılar nano ölçekli cihazların performanslarının ve güvenilirliğinin artmasına getirdiği yeniliklerden dolayı öne çıkmasına neden olmuştur. Her ne kadar 1000 nm civarında çalışmalar olsa da gerçekte 100 nm altı nano bölgenin aktif olduğu yerdir. Bu nedenle nano bölgenin çalışma alanları arasında nano-çubuklar, nanoparçacıklar, kuantum noktalar (dotlar) ve nanokristal yapılar sayılabilir (Yalçın, 2012; Kartopu ve Yalçın, 2010; Aktaş, 2007). Numunenin boyutu küçüldükçe çeşitli kuantum etkiler belirgin

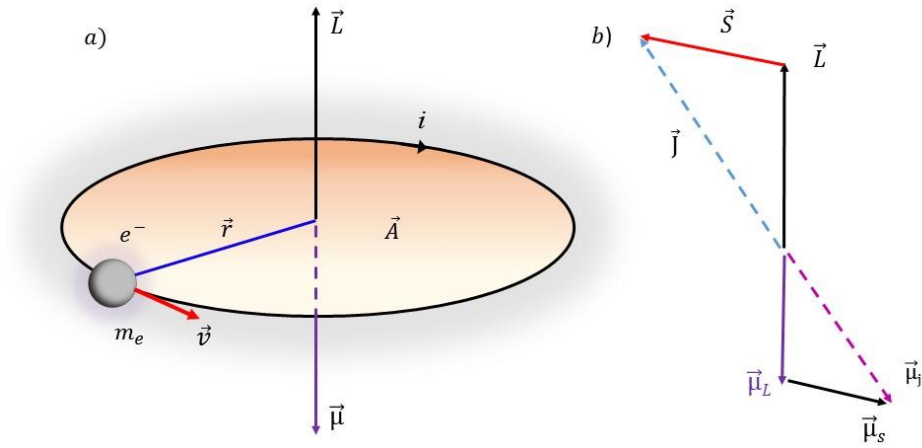
şekilde ortaya çıkacağından dolayı yeni ve ilginç özellikler de görülmeye başlayıp, teknolojik olarak yeni alanların açılmasına da neden olmaktadır.

2.2 Manyetik Momentin Kaynağı

Bir numunenin spin manyetik momenti elektronun kendi ekseninde dönmesinden, orbital manyetik momenti ise elektronun çekirdek etrafında (orbital) dönmesinden kaynaklanır. Numunenin mıknatıslanması ise elektronun çekirdek etrafındaki yörüngesel hareketinden kaynaklanır. Sistemin toplam manyetik momenti ise spin ve orbital manyetik momentlerinin toplamıdır. Bu durum genelde numunenin karakteristik özelliği olan g -faktörünün serbest elektronun g -faktöründen farklı olduğu durumlarda varlık gösterir.

Genel olarak numunelerdeki küçük manyetik momentler malzemede bulunan çiftlenmemiş elektronlardan ortaya çıkar. Gerçek manada tam olarak spinin kaynağı “şudur” demek güçtür. Bu nedenle, bir dış manyetik alan içine konulan elektronun hareketi disk hareketine benzetilip vektörel gösterimle temsil edilerek gerekli işlemler yapılır. Bu nedenle bir numunenin mıknatıslanması; spin açısal momentumu, yörünge açısal momentumu ve spin-orbital etkileşmesinden kaynaklanan toplam açısal momentum ile ilişkilidir.

Elektronun çekirdek etrafındaki yörünge hareketi, manyetik alan oluşturan küçük bir akım ilmeği olarak kabul edilir. Bir elektronun çekirdek etrafındaki bu yörünge hareketi, akım ilmeğindeki benzerliği göz önünde bulundurularak orbital açısal momentum elde edilebilir. Yörünge-açısal momentumdan ($\vec{L}$) dan elde edilen sonuçlar spin-açısal momentumuna ($\vec{S}$) na benzetilerek gerekli işlemler yapılır (Cullity ve Graham, 2009). Bu bağlamda bir elektronun spin ve yörünge hareketlerinin temsili gösterimi ve bunların momentlerinin vektör temsilleri Şekil 2.1’ de gösterildi. Çapı r olan dairesel yörüngede dolanan bir elektron akım (i) ilmeği oluşturur.



Şekil 2.1. (a) Bir akım ilmeğindeki elektronun spin ve yörünge hareketlerinin temsili gösterimi (b) bunların manyetik momentlerinin vektör temsilleri

Bir elektronun yörünge manyetik momentini akım ilmeğine benzetilerek aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\vec{\mu} = i \cdot \vec{A} \quad (2.1)$$

Burada $\vec{A}$, halka alanını göstermektedir. Akımın temel tanımı, ilmek için sabit hızla hareket eden elektronun yer değiştirmesi ifadesi ve açısal momentum tanımları kullanılarak gerekli düzenlemelerden sonra manyetik moment,

$$\vec{\mu} = \frac{e^-}{2m_e} \vec{L} \quad (2.2)$$

şeklinde elde edilir. Burada $\gamma = e^- / 2m_e$ jiromanyetik oran ve $\vec{L}$ ise yörünge-açısal momentumudur. Böylece $\vec{\mu}$ manyetik moment ifadesi denklem 2.2 'den aşağıdaki gibi bulunur.

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{L} \quad (2.3)$$

Bu ifadenin her iki tarafının zaman göre türevi ve dış manyetik alan ($\vec{H}$) içindeki elektronun manyetik momentini ($\vec{\mu}$) üzerinde $\vec{\mu} \times \vec{H}$ ile tanımlanan tork ($\vec{\tau}$) ifadesi

kullanılarak gerekli işlemler sonucunda; manyetik momentin hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir (Yalçın, 2013).

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{H} \quad (2.4)$$

Şekil 2.1’ deki gibi yörüngesel hareket eden elektrona düşey eksen boyunca uygulanan bir dış manyetik alan içinde elektron 2.4 denkleminde uygun olarak hareket eder. Bu hareket ifadesi manyetik moment ($\vec{\mu}$)’ in presesyon hareketi olup bu denklemin çözülmesiyle elektronun $\gamma H / 2\pi$ ’ lik bir frekansta dönme yaptığı bulunur. Bu değer Larmor frekansı olarak isimlendirilip $\omega = \gamma H$ biçiminde kullanılır.

2.3 Manyetik Rezonans

Bir numunenin manyetik özelliklerini araştıran bilim dalına manyetik rezonans (MR) denir. En genel anlamda bir atomun manyetik özellikleri çekirdek ve elektronlardan kaynaklanır. Daha detaylıca söylemek gerekirse çekirdek, spin ve orbital manyetik momentler bir maddenin etkin manyetik momentini oluşturur. Bu nedenle manyetik rezonans elektron paramanyetik rezonans (EPR) ve nükleer manyetik rezonans (NMR) olarak iki grupta incelenir.

Genelde EPR ve NMR çalışmalarında numuneler güçlü dış manyetik alan içerisine konularak incelenir. Genelde, EPR tekniğinde mikro dalga frekansında bir elektromanyetik dalga kullanılırken, NMR da ise düşük radyo frekans bölgesi kullanılır.

Elektronun toplam açısal momentumu sıfırdan farklı olduğu zaman enerji seviyeleri arasında fark oluşur. Başka bir ifadeyle, dolu yörüngelerdeki enerji seviyelerinde kayma oluşmaz. Bir dış manyetik alan içine konmuş paramanyetik bir numuneye ν -frekanslı mikrodalga alanı statik alana dik olarak uygulandığında dönme (ω_0) frekansı ile ν -frekansı aynı olduğunda güç soğrulması ortaya çıkar. Güç artışı her biri diğerine eşit oluncaya kadar devam eder ve bu değerinde maksimum soğurma gerçekleşir. Bu davranış MR olarak adlandırılır.

Numuneler genelde çok sayıda manyetik moment içermektedirler. Böylece numunelerin etkin toplam manyetik momenti $\vec{M} = N \vec{\mu}$ ile hesaplanır. Burada N , malzemedeki manyetik momentlerin sayısıdır. Bu nedenle numunenin karşılaştığı alan ise etkin alan olarak ($\vec{H}_{eff}$) adlandırılır. Bu şartlar altında bir manyetik numuneye etki eden mıknatıslanma hareket denklemi 2.4 ifadesinin yardımıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{M} \times \vec{H}_{eff} \quad (2.5)$$

Numunelerde mıknatıslanma bir süre sonra durağanlaşacaktır. Bu nedenle 2.5 numaralı denklem için sönüm terimi farklı yollar ile sisteme dâhil edilebilir. Mıknatıslanmanın hareket denklemi için farklı yaklaşık ifadeler önerilmektedir. Yaygın olarak kullanılan sönüm terimleri denklem 2.5' in sağ tarafına eklenmek üzere aşağıdaki gibi üç genel grup altında toplanır.

$$(i) \text{ Bloch-Bloembergen tipi} : -\frac{\vec{M}_{\theta,\phi}}{T_2} - \frac{\vec{M}_z - M_0}{T_1}$$

$$(ii) \text{ Landau-Lifshitz tipi} : \frac{-\lambda}{|\vec{M}|^2} \vec{M} \times \vec{M} \times \vec{H}$$

$$(iii) \text{ Gilbert tipi} : \frac{\alpha}{|\vec{M}|} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}$$

Bu ifadelerdeki T_2 , T_1 , λ ve α sırasıyla spin-spin durulma zamanı, spin-örgü durulma zamanı, fenomenolojik sönümlenme parametresi ve boyutsuz Gilbert tipi sönüm katsayılarıdır. Bloch-Bloembergen tipi sönüm terimi doğrudan M içermediğinden, M 'nin küçük sapmalarında ve α 'nın da küçük değerinde Landau-Lifshitz ve Gilbert tipine karşılık gelir. Bloch-Bloembergen sönüm terimi spin-spin durulma zamanı içerdiği için, bu tez çalışmasında FMR sinyallerin teorik modellemeleri için bu ifade kullanılmıştır.

Ayrıca spin-spin durulma zamanı FMR sinyallerin çizgi genişliği ile de ilgilidir. Ancak sadece çizgi genişliği çalışılmak istendiğinde Landau-Lifshitz tipi sönüm terimi de tercih edilir. Gilbert tipi sönüm terimi (Gilbert, 1955), aslında Landau ve Lifshitz (Landau ve Lifshitz, 1935) tarafından ilk kez önerilen orjinal biçiminin uyarlanmış halidir. Bloch-Bloembergen (Bloembergen, 1950) tipi sönüm terimi korunmazken, Landau-Lifshitz ve Gilbert tipi sönüm terimleri korunur. Callen (Callen, 1958) spin dalgalarını ve kuantum etkileri de göz önünde bulundurarak yeni bir dinamik ifade kullanmıştır. Fletcher, Le Craw ve Spencer (Fletcher, 1960) enerji yoğunlaşmasını kullanarak benzer denklemi yeniden yazmışlardır.

2.4 Elektron Paramanyetik Rezonans

Dış manyetik alan içinde bulunan bir atomun elektron manyetik momentinin belli yönelimlere sahip olduğu deneysel olarak ilk kez Gerlach ve Stern tarafından gösterildi (Gerlach ve Stern, 1922). Uhlenbek ve Goudsmit spin momentini ile yörünge açısal momentumu arasındaki bağlantıyı gösterdi (Uhlenbek ve Goudsmit, 1925). Dış alan içindeki atomun enerji seviyeleri arasındaki geçiş Rabi tarafından bulundu (Rabi vd., 1938). Böylece ilk manyetik rezonans olayı gözlenmiş oldu. Zavoisky, dış manyetik alan içindeki $\text{CuCl}_2\text{H}_2\text{O}$ numunenin ilk EPR sinyalini kaydetti (Zavoisky, 1945).

EPR çalışmalarında Abragam, Bleaney ve Van Vleck önde gelen önemli kişilerdir. 1985 yılına kadar bu alanda yapılan çalışmalar Ramsey tarafından özetlendi (Ramsey, 1985). NMR deneyleri ise Purcell ve diğerleri tarafından yapıldı (Purcell vd., 1946). Bu yöntem günümüzde tıp alanında manyetik rezonans görüntüleme (MRI, 1970) olarak sağlık alanında kullanılmaktadır. Ayrıca MR yöntemi kliniklerde teşhis ve tedavi amacıyla da kullanılmaktadır.

EPR spektrometresi dört kısımdan oluşur. Bunlar; kaynak (1–100 GHz mikrodalga), kavite-grid, manyet ve dedektör/modülasyon sistemleridir. Özelde EPR MR' ın paramanyetik sistemlere uygulanmasıdır. Serbest elektron dış manyetik alan içine konulduğunda elektronun enerji seviyelerinde yarılmalar gözlenir. Bu yarılmaların sebebi dış manyetik alan ile elektronun manyetik momentinin etkileşmesidir. Bu tür bir duruma karşılık gelen hamiltoniyen aşağıdaki gibidir.

$$\hat{H} = g_e \mu_B \vec{H} \cdot \hat{S} \quad (2.6)$$

Bu bilinen Zeeman ifadesidir. Eğer uygulanan dış manyetik alan z-ekseni doğrultusunda yönelmiş ise enerji seviyelerini verecek enerji ifadesi aşağıdaki gibi verilir.

$$E_{Ms} = g_e \mu_B H \cdot m_s \quad (2.7)$$

Burada g_e , Landé g -faktörü, $\mu_B = (eh/4\pi m_e) = 9.2740 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ Bohr manyetonu ve m_s manyetik spin kuantum sayısıdır. H ise dış manyetik alanı göstermektedir. Serbest elektron için bu değer 2.0023193'dür. Bu değer serbest elektronun değerinden büyük veya küçük olabilir. Küçük olması göreceli kuantum etkilerin olduğu durumlarda ortaya çıkar. Bu konu üzerinde çok kısıtlı çalışmalar olup oda sıcaklığında küçük Landé g -faktörünün izaha ihtiyacı bulunmaktadır. Diğer bir ifadeyle bu alan üzerinde daha fazla çalışılmayı gerektirir. Bu değer serbest elektronun değerinden büyük olması ise doğrudan spin-orbit etkileşmesi kaynaklıdır. Bu nedenle buradan da açıkça görüldüğü üzere g -faktörü numuneler için parmak izi niteliğinde öneme sahiptir. Spin-orbit etkileşmesi MR sistemlerinin EPR yansımalarında daha net anlaşılır. Şekil 2.1' de görüldüğü üzere spin ve orbital etkilerin aktif olduğu sistemlerde numunenin toplam manyetik momenti spin ve orbital manyetik momentlerin toplamına eşittir. Bu şartlar altında şekil 2.1.b' deki

$$\vec{\mu}_J = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S \quad (2.8)$$

ifadesi kullanılarak spin-orbit etkileşmelerinin olduğu sistemler için Landé g -faktörü

$$g_J = \frac{S(S+1) - L(L+1) + 3J(J+1)}{2J(J+1)} = 2 \left(\frac{\mu_L}{\mu_S} - 1 \right) \quad (2.9)$$

şeklinde türetilir. Eğer atomun çekirdeğinden de sistemin manyetik momentine katkı gelirse o zaman 2.9 ifadesi çekirdek momentinin katkısını da içerecek şekilde yeniden türetilir. Çekirdek manyetik momentinin katkısı bu tez çalışmasında tek, ikili ve çoklu sistemlerde gözlenmediğinden sistemin en genel Landé g -faktörü için buradaki ifadeyle yetinildi. 2.9 ifadesi elektronun yörünge açısal momentumu sıfırdan büyük olması

durumunda geçerlidir. Bu ifadeden de açıkça görüleceği üzere yörünge açısal momentum sıfır olursa serbest elektronun g -değeri elde edilir.

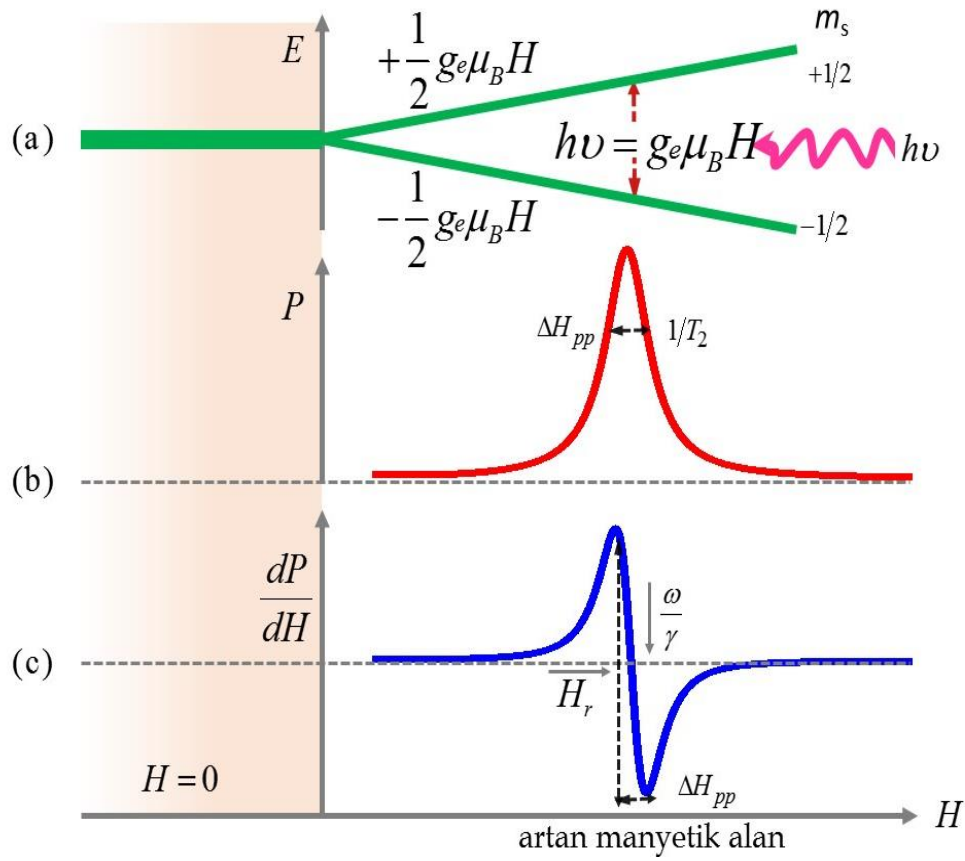
2.9 ifadesine göre spin ve orbital manyetik momentin katkısı görülmektedir. Bu şartlar altında toplam manyetik moment aşağıdaki gibi yazılır.

$$\mu_{eff} = g_e \mu_B \sqrt{J(J+1)} \quad (2.10)$$

Dış manyetik alan içinde elektron iki farklı yönelime sahip olur. Bunlar alana paralel ya da anti paraleldir. Bu iki durum ve elektron için için $m_s = \pm 1/2$ kullanılarak bu elektron için enerji farkı aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Delta E = E_{+1/2} - E_{-1/2} = g_e \mu_B H = h \nu \quad (2.11)$$

Burada ν bir elektron sistemine uygulanan elektromanyetik radyasyon frekansını göstermektedir. Bu ifadeye göre numune uygulanan elektromanyetik radyasyondan enerji soğurur. Bu soğurma ifadenin eşitliği sağlandığında en yüksek değere ulaşır. Bu durum rezonans etkisi olarak adlandırılır. 2.11 numaralı ifadeye göre dış manyetik alan sabit tutularak uygulanan frekans değiştirilir ya da uygulanan frekans sabit bir değerde tutularak manyetik alan değiştirilir. Bu iki durumda da rezonans gözlenir. Uygulanan frekansın sabit tutulup manyetik alanın değiştirildiği durumun temsili gösterimi şekil 2.2' de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. (a) Sıfır alan ve artan manyetik alanda serbest elektronun rezonans ve enerji seviyeleri (b) Numunenin soğurduğu güç (P) (c) gücün manyetik alana göre türevi (dP/dH), b ve c' deki düşey eksenler keyfi birimlerdir

Şekil 2.2.(b)' de numunenin soğurduğu gücün manyetik alana göre değişimi, (c)' de ise EPR soğurma spektrumunun alana göre türevinin (dP/dH) manyetik alanla değişim eğrisi görülmektedir. Burada, ΔH_{pp} ve $1/T_2$ çizgi genişliği, H_r rezonans alan, ω/γ ise rezonans frekansıdır.

2.5 Tek ve Çok Katmanlı Filmlerde Ferromanyetik Rezonans

Genel olarak manyetik rezonansın paramanyetik numunelere uygulanmasıyla EPR, ferromanyetik malzemelere uygulanmasıyla da FMR sinyalleri gözlenir. FMR soğurma sinyalleri genellikle EPR spektrumlarından daha geniş alan yelpazesinde gözlenir.

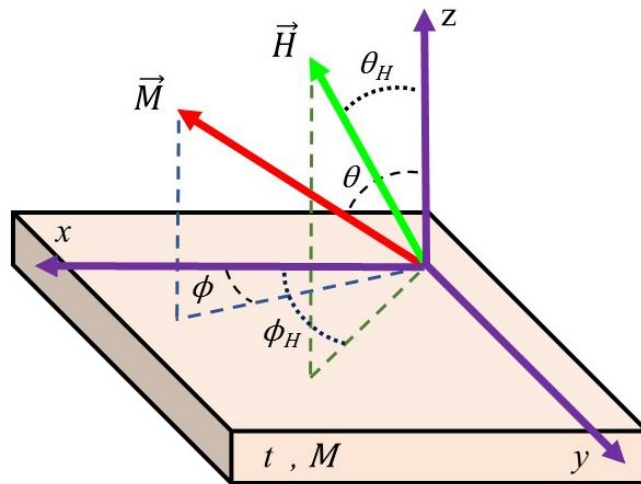
Şekil 2.2' deki temsili rezonans soğurma gösteriminde rezonans şartından biri olan uygulanan elektromanyetik radyasyon frekansının farklı değerler alabileceği yukarıda ifade edilmişti. Manyetik alanın değiştirilip bu frekansın sabit değerde tutularak yapılan FMR deneylerinde frekanslar 1-100 GHz aralığında değiştirilebilir. FMR sinyallerinin

rezonans alanının frekans ile doğrusal bağımlılığı bu aralıkta (L-, S-, C-, X-, K-, Q-, V-, E-, W-, F- ve D-bant) hesaplanabilir.

Rezonans frekansı, durulma süresi, çizgi genişliği, Landé g -faktörü, zorlayıcı kuvvet, anizotropi alanı, numune şekli, kristal simetri eksenleri ve sıcaklık gibi durumlar FMR sinyalleri ile analiz edilebilir. FMR sinyalinin çizgi genişliği Bloch-Bloembergen tipi sönüm teriminde bulunan spinler arası durulma süresiyle de ilintilidir.

FMR sinyalleri ve bunların alana göre türevlerinin teorik benzetişimi yapılmak istendiğinde Bloch-Bloembergen tipi sönüm terimi içeren mıknatıslanma hareket denklemi tercih edilmektedir. FMR deneylerinde; FMR sinyalleri, bunların rezonans alanlarının frekans ve açısal bağılılığı, FMR sinyallerin çizgi genişliği gibi ifadeler numunenin manyetik parametrelerinin bulunmasında kullanılır. Genelde ferromanyetik numunelerde anizotropik yapı olacağından FMR sinyallerinde düzensiz modlar görülebilir.

Bu tez çalışmasındaki numunelerin hepsi nano ölçekte olup ince film olarak isimlendirilirler. Bu numunelerin manyetik özellikleri FMR yöntemiyle incelenirken üç doğrultuda etkiler görülebilir. Bu nedenle numunenin dış manyetik alan, mıknatıslanma ve örnek geometrisine bağlı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bunun için numunenin incelenmesini sağlayacak küresel koordinatlardaki temsili sistem şekil.2.3' te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. İnce filmlerde, örnek geometrisi, denge manyetizasyonu $\vec{M}$ 'nin bağıl yönelimi ve dış manyetik alan $\vec{H}$ 'in dc bileşenlerinin gösterimi

Burada t ve M ifadeleri sırasıyla numunenin kalınlığını ve numunenin mıknatıslanmasını göstermektedir.

İnce filmlerde FMR çalışmalarında yaygın biçimde kullanılan enerji ifadeleri aşağıda verilmiştir. Buradaki ifadeler her bir numune için değişebileceğinden bunların genel bir ifade olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu enerji ifadeleri numunenin şekline, kristal yapısına ve diğer anizotropik davranışına bağlı olarak şekillenir.

$$\begin{aligned}
E_T &= E_Z + E_a + E_d + E_{ex} + \dots \\
E_Z &= -\vec{M} \cdot \vec{H} \\
E_a &= K_{u1} \sin^2 \theta + K_{u2} \sin^4 \theta + \dots \\
E_d &= -2\pi M^2 \sin^2 \theta \\
E_{ex} &= -JS_i S_j
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Burada E_Z, E_a, E_d, E_{ex} sırasıyla Zeeman enerjisi, manyetokristal anizotropi enerjisi, demanyetizasyon enerjisi ve ferromanyetik değiş-tokuş enerjisidir. Açılar ise küresel koordinatlarda manyetizasyon ve uygulanan manyetik alan vektörüne ait açılardır. Manyetik anizotropi enerjisi, spin-yörünge çiftlenimli örgü ile elektron spin manyetik momentlerinin etkileşiminden kaynaklanır. Diğer bir ifadeyle, anizotropi enerjisi yerel atomik örgüden kaynaklanır. Anizotropi enerjisinde bulunan θ , manyetik anizotropinin kolay eksen ve manyetizasyon yönelimi arasındaki açıdır. K_{u1} ve K_{u2} birinci ve ikinci derece anizotropi enerji sabitleridir. Demanyetizasyon alanı ise manyetik serbest kutup yoğunluğu yani malzemenin şekli ve örgü yapısıyla ilgilidir. Manyetik ince film için değiş-tokuş enerjisi genellikle ihmal edilebilir. Çünkü bu enerji diğer enerjiler yanında küçüktür. Fakat bu değiş-tokuş enerjisi çok katmanlı yapılar için ihmal edilmez. Bu enerji manyetik katmanlar arasında olduğu için katmanlar arası değiş-tokuş enerjisi olarak da adlandırılır. Ayrıca anizotropi enerjileri manyetik ince filmlerde çok önemli bir yere sahip olduklarından aşağıda ayrı bir başlık altında detaylıca verildi. $K_{eff} = \pi M^2 + K_U$ ifadesi efektif tek eksenli anizotropi terimidir. Burada K_U teriminde bazı ilave ikinci mertebe tek eksenli anizotropi hesaba katılır. $H_{eff} = 2\pi M_s + (2K_u/M_s)$ ifadesi ise tek bir manyetik film için efektif alandır. Manyetizasyon vektörü $\vec{M}$ için polar θ açılarının denge

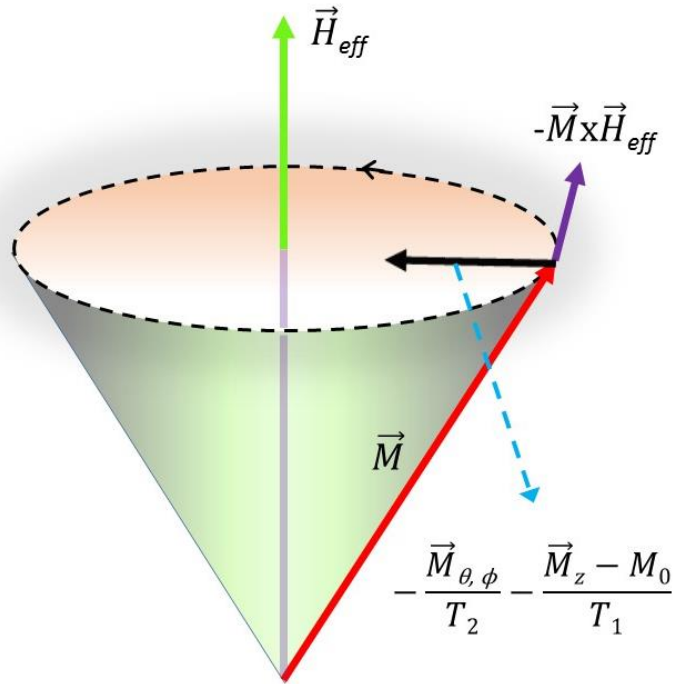
değerleri statik denge şartlarından elde edilir. E_θ , E_ϕ , $E_{\theta\theta}$ ve $E_{\phi\phi}$ denklem 2.12 kullanılarak hesaplanabilir.

Sönüm terimi (R) içeren mıknatıslanma hareket denklemi 2.5 ifadesinin yardımıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{M} \times \vec{H}_{eff} + R = \tau \quad (2.13)$$

Burada $\vec{H}_{eff}$, anizotropi enerjisinden kaynaklanan iç alan ve uygulanan dış manyetik alanı içeren efektif manyetik alandır. Bu ifadenin en sağındaki τ ise torku göstermektedir.

2.13 denkleminde sönüm terimi için özel olarak Bloch-Bloembergen tipi sönüm terimi seçilirse manyetizasyon için dinamik hareket denklemi 2.14 deki gibi yazılır. 2.14 ifadesinin ince filme uygulanmasının temsili gösterimi ise şekil 2.4' teki gibidir.



Şekil 2.4. Bloch-Bloembergen tipi denkleme göre efektif manyetik alan $\vec{H}_{eff}$ çevresinde manyetizasyon $\vec{M}$ nin sönümlü presesyonu

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\vec{M}}{dt} = \frac{\vec{M}}{|\vec{M}|} \times \vec{\nabla} E - \frac{\vec{M}_{\theta,\phi}}{\gamma T_2} - \frac{\vec{M}_z - M_0}{\gamma T_1} \quad (2.14)$$

Burada T_1 spin-örgü durulma zamanını ve T_2 spin-spin durulma zamanı göstermektedir.

Bu ifadede $\vec{\nabla} E$ aşağıdaki enerji yoğunluğu ifadesinden elde edilir.

$$\vec{\nabla} E = -\left(\frac{\partial E}{\partial \theta}\right) \hat{e}_\theta + \frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{\partial E}{\partial \phi}\right) \hat{e}_\phi \quad (2.15)$$

Denge yönelimindeki küçük bir sapma için, manyetizasyon vektörü $\vec{M}$ yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$\vec{M} = M_s \hat{e}_r + m_\theta \hat{e}_\theta + m_\phi \hat{e}_\phi. \quad (2.16)$$

Burada, dinamik enine bileşenler, yeterince küçük olduğu varsayılarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{aligned} m_\theta(z,t) &= m_\theta^0 \exp i(\omega t \pm kz) \\ m_\phi(z,t) &= m_\phi^0 \exp i(\omega t \pm kz) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Denklem 2.14 ve 2.15' de, denklem 2.17 çözümlerini kullanarak filmler için dağılım ilişkisi türetilebilir. Diğer taraftan, ince filmlerin öz frekans modu statik efektif alan yardımıyla belirlenir ve manyetik sistemler için toplam serbest enerjiden türetilebilir (Smit, 1955; Artman, 1957; Wigen, 1984, 1992; Baseglia vd., 1988; Layadi ve Artman, 1990; Farle, 1998). m_θ ve m_ϕ nin matris formları denklem 2.15, 2.16, 2.17 ile denklem 2.14 kullanılarak hesaplanır.

$$\begin{pmatrix} i\frac{\omega}{\gamma} + \frac{1}{\gamma T_2} + \frac{E_{\theta\phi}}{M_s \sin \theta} & \frac{E_{\phi\phi}}{M_s \sin^2 \theta} \\ -\frac{E_{\theta\theta}}{M_s} & i\frac{\omega}{\gamma} + \frac{1}{\gamma T_2} - \frac{E_{\phi\phi}}{M_s \sin \theta} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_\theta \\ m_\phi \end{pmatrix} = 0 \quad (2.18a)$$

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M^2 \sin^2 \theta} (E_{\theta\theta} E_{\phi\phi} - E_{\theta\phi}^2) + \left(\frac{1}{\gamma T_2}\right)^2 \quad (2.18b)$$

Burada (ω/γ) harici *dc* efektif manyetik alandaki manyetizasyonun Larmour frekansıdır. Koordinat sisteminde, $E_{\theta\phi}$ simetriye paralel olmadığı zaman ortaya çıkar ve son terim denklem 2.18 deki durulma teriminden kaynaklanır (Sparks, 1964; Morrish, 1965; Vittoria, 1993; Gurevich ve Melkov, 1996).

Numunenin birim hacminin, radyo-frekans (*rf*) alanından soğurduğu güç aşağıdaki gibi verilir.

$$P = \frac{1}{2} \omega \chi_2 h_1^2 \quad (2.19)$$

Bu ifadenin sağ tarafı teorik hesaplamalar, sol tarafı ise numunenin soğurduğu güçle ilintilidir. Bu nedenle deneysel sonuçların teorik olarak fit edilmesinde 2.19 numaralı denklemin sağ tarafı kullanılır. Burada ω mikrodalga frekansı, h_1 manyetik alan bileşeninin genliği ve χ_2 yüksek-frekans alınganlığının sanal kısmıdır. Numunenin soğurduğu gücün alana göre türevi (dP/dH) $d\chi_2/dH$ ile orantılı olup manyetik alınganlık χ aşağıdaki gibi verilir.

$$\chi = 4\pi \left(\frac{m_\phi}{h_\phi} \right)_{\phi=0} \quad (2.20)$$

Teorik soğurma eğrileri, uygulanan alanın fonksiyonu olarak yüksek-frekans manyetik alınganlığın sanal kısmını kullanarak elde edilir (Öner vd., 1997; Min vd., 2006; Cullity ve Graham, 2009).

$$\chi = \chi_1 + i\chi_2 \quad (2.21a)$$

$$\chi_1 = \frac{4\pi E_{\theta\theta} \left(\left(\frac{\omega_0}{\gamma} \right)^2 - \left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^2 \right)}{\left(\left(\frac{\omega_0}{\gamma} \right)^2 - \left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{2\omega}{\gamma^2 T_2} \right)^2} \quad (2.21b)$$

$$\chi_2 = \frac{4\pi E_{\theta\theta} \left(\left(\frac{2\omega}{\gamma^2 T_2} \right) \right)}{\left(\left(\frac{\omega_0}{\gamma} \right)^2 - \left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{2\omega}{\gamma^2 T_2} \right)^2} \quad (2.21c)$$

Dispersiyon bağıntısı, (2.18) denkleminde (2.12) denklemini yerine koyarak türetilebilir (Aktaş, 1997; Yalçın vd., 2004(a), 2004(b), 2008; Güner vd., 2006; Kharmouche vd., 2007; Stashkevich vd., 2009).

$$\left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^2 = [H \cos(\theta - \theta_H) + H_{eff} \cos(2\theta)] \cdot [H \cos(\theta - \theta_H) + H_{eff} \cos^2 \theta] + \left(\frac{1}{\gamma T_2} \right)^2 \quad (2.22)$$

Bu ifade kısaltılmak istenirse $(\omega/\gamma)^2 + C_0 = 0$ formunda da yazılabilir. Burada C_0 katsayısı (2.22) numaralı ifadede görüldüğü gibi denklemin sağ tarafıdır. 2.22 nolu ifadede $\omega = 2\pi\nu$ dır. Düzlem dışı farklı açılarda (θ_H) ölçülen deneysel FMR ölçüm sonuçlarıyla denklem (2.22)' yi fit ederek efektif manyetizasyon için değerler elde edilebilir. FMR teorisi ince filmler için geliştirilmiş olsa da özellikle son yıllarda manyetik nano yapıların hemen hemen tamamına uygulanabilmektedir.

2.22 numaralı ifade de H_{eff} numunenin şekline göre değişir. Bu değişimin en açık görünümü nanotel dizili filmlerde ortaya çıkar. Çünkü nanotel dizili filmlerde efektif alan ifadesi $H_{eff} = 2\pi M_s(1-3P) + (2K_u/M_s)$ şeklinde yazılır. Burada ilk terim manyetostatik enerjisinden, ikinci terim ise eksenel anizotropiden gelen katkıdır. İlk ifadedeki P sembolü nanotellerin doluluk oranını gösterip bu değer 0 (sıfır) ile 1 (bir) arasında değişir. Doldurma faktörünün sıfır olması bir telin ya da izole bir telin durumuna

karşılık gelir. Doldurma faktörünün 1 olması ise ince filme karşılık gelir. Yani $P=1$ olması ince film demektir (Yalçın , 2013; Kartopu vd., 2011). Bu tez çalışmasında bu ifadenin verilmesi tek, ikili ve çok katmanlı numunelerin FMR sinyalleri arasındaki farkı görmek içindir.

Ayrıca FMR çalışmaları nanoparçacıklar (NP) için de önemli bilgilerin elde edilmesinde yardımcı olur. Nanoparçacıklar 100 nm' nin altında aktif olarak manyetik özelliklerini sergilerler. Daha küçük ölçekte (10 nm' nin altında) NP tek bölge (domen) olarak görülür. Bu durumlarda gözlenen FMR sinyallerinin yeni adı "süperparamanyetik rezonans sinyal (SPR)" dir. Çünkü burada sinyal tek pik olarak ESR sinyallerinden daha geniş ve FMR sinyallerinden daha dardır. İlaveten bu tür NP için teorik ifadelerde artık 2.14 ifadesinin NP için küresel simetri göz önünde bulundurularak yeniden düzenlenmesiyle 2.21c nin NP için karşılığı aşağıdaki formu alır (Yalçın, 2013).

$$\chi_2(H) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta_H (\Delta_H^2 + H^2 + H_r^2)}{(\Delta_H^2 + (H - H_r)^2) \cdot (\Delta_H^2 + (H + H_r)^2)} \quad (2.23)$$

Burada, $\Delta_H = 1/\gamma T_2$, $H_r = -(\omega/\gamma)$ dir. H ise uygulanan dış manyetik alandır. SPR sisteminde bu denklem süperparamanyetik parçacıklar için modifiye Bloch denklemi olarak adlandırılır. Süperparamanyetik nanoparçacıklar hidrojel, hafıza etkiler, biyolojik uygulamalar ve elektronik aletler için de kullanım alanı bulmaktadır (Raikher ve Stepanov, 2003; Sasaki vd., 2005; Heim vd., 2007; Sun vd., 2005; Zhang vd., 2008).

Buraya kadar olan ifadelerde ince filmler, nanoteller ve nanoparçacıklar için FMR teorisinin nasıl uygulandığı üzerinde duruldu. Bu tez çalışmasında ince film, çift katmanlı numune ve çok katmanlı filmler çalışıldığı için bunların teorisi üzerinde de duruldu. Bu tür çok katmanlı filmler için öncelikle enerji ifadesi daha sonra da mıknatıslanma hareket denklemi modifiye edildi. Burada M_s doyum manyetizasyon ve t_i kalınlıklı n adet manyetik katmandan oluşan bir sistem için birim yüzey alanı başına düşen enerji 2.12 ifadesinin yeniden düzenlenmesiyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

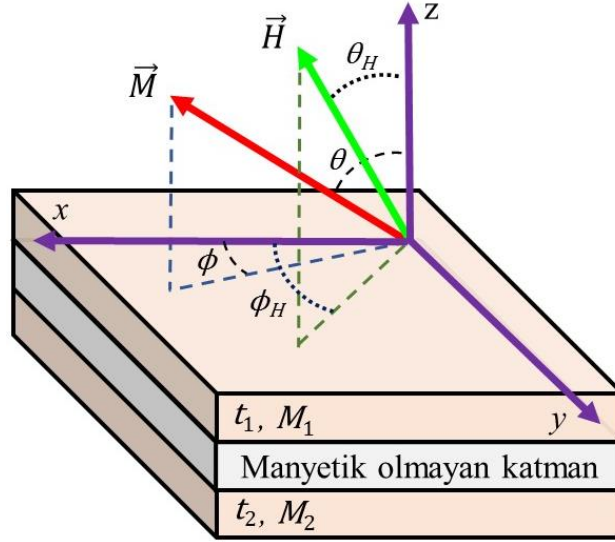
$$E = - \sum_{i=1}^n t_i \vec{M}_s \cdot \vec{H} - \sum_{i=1}^n t_i K_{u,i} \sin^2 \phi_i \cos^2 \theta_i - \sum_{i=1}^{n-1} A_{i,i\pm 1} \frac{\vec{M}_i \cdot \vec{M}_{i+1}}{M_i \cdot M_{i+1}} \quad (2.24)$$

Burada θ_i , z-eksenine göre manyetizasyon M_s 'nin polar açısı ve ϕ_i ise film düzlemi içerisinde kalan x eksenine göre azimuth açısıdır. Burada enerjiler sırasıyla Zeeman, birinci derece manyetokristal ve katmanlar arası etkileşme enerjilerine karşılık gelmektedir. Son enerji terimindeki $A_{i,i+1}$ bilineer çiftlenim sabitidir. Tek ve çok katmanlı ince filmler ile ilgili güncel literatür bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri ve tez ile ilgili olanlar üzerinde yoğunlaşıldı (Layadi ve Artman, 1990; Goryunov vd., 1995; Ando vd., 1997; Farle; 1998; Platow vd., 1998; Schmool ve Barandiarán, 1998; Lindner ve Baberschke, 2003).

Bloch-Bloembergen tipi sönüm terimi içeren n adet mıknatıslanma hareket denklemi küresel koordinatlarda aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\vec{M}}{dt} = \frac{1}{t_i} \frac{\vec{M}}{M_{i,s}} \times \vec{\nabla}_{M_i} E - \frac{\vec{M}_{\theta_i, \phi_i}}{\gamma T_2} - \frac{\vec{M}_{z,i} - M_{i,s}}{\gamma T_1}. \quad (i=1, n) \quad (2.25)$$

2.25 numaralı ifade birbiriyle 2.24 ifadesinin son terimine uygun olarak etkileşen iki katmanlı manyetik tabakalar için iki adet lineer bağımlı denklem sisteminin matris formu küresel koordinat sisteminde 2.26 numaralı ifade elde edilir. Bu tez çalışmasında ikili sistemler birbirleri üzerine büyütülmüşlerdir. Ancak bunlar kendi aralarında manyetik etkileşmeye girmektedirler. Bu nedenle aralarında manyetik olmayan tabakaların bulunduğu bu tezdeki $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 5' er nm kalınlıklı filmlerin 10 K' deki manyetik davranışları bu sistemle açıklandı. Bu nedenle bu tezdeki $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin FMR teorisi için temsili gösterim Şekil 2.5 ve bu sisteme karşılık gelen dispersiyon bağıntısı ise 2.27 ifadesiyle verildi. Şekil 2.5' de böyle bir sistem temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Üç (iki manyetik bir manyetik olmayan) tabakalı filmin temsili gösterimi ve örnek geometrisi

Her bir tabakanın $m_{\theta_1}, m_{\phi_1}, m_{\theta_2}, m_{\phi_2}$ için matris formu denklem 2.15, 2.16, 2.24 ile denklem 2.25 kullanılarak hesaplanır.

$$\begin{pmatrix} \Omega + \frac{E_{\theta_1\phi_1}}{t_1 M_s \sin \theta_1} & \frac{E_{\phi_1\phi_1}}{t_1 M_s \sin^2 \theta_1} & \frac{E_{\theta_2\phi_1}}{t_1 M_s \sin \theta_1} & \frac{E_{\phi_1\phi_2}}{t_1 M_s \sin \theta_1 \sin \theta_2} \\ -\frac{E_{\theta_1\theta_1}}{t_1 M_s} & \Omega - \frac{E_{\theta_1\phi_1}}{t_1 M_s \sin \theta_1} & -\frac{E_{\theta_1\theta_2}}{t_1 M_s} & -\frac{E_{\theta_1\phi_2}}{t_1 M_s \sin \theta_2} \\ \frac{E_{\theta_1\phi_2}}{t_2 M_s \sin \theta_2} & \frac{E_{\phi_1\phi_2}}{t_2 M_s \sin \theta_1 \sin \theta_2} & \Omega + \frac{E_{\theta_2\phi_2}}{t_2 M_s \sin \theta_2} & \frac{E_{\phi_2\phi_2}}{t_2 M_s \sin^2 \theta_2} \\ -\frac{E_{\theta_2\theta_2}}{t_2 M_s} & -\frac{E_{\theta_2\phi_1}}{t_2 M_s \sin \theta_1} & -\frac{E_{\theta_2\theta_2}}{t_2 M_s} & \Omega - \frac{E_{\theta_2\phi_2}}{t_2 M_s \sin \theta_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_{\theta_1} \\ m_{\phi_1} \\ m_{\theta_2} \\ m_{\phi_2} \end{pmatrix} = 0 \quad (2.26)$$

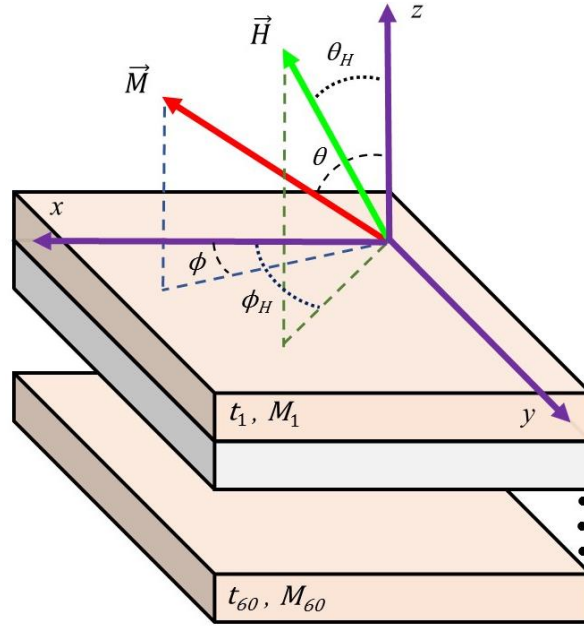
Denklem 2.26' daki 1 ve 2 rakamları sırasıyla birinci ve ikinci tabakalara karşılık gelir.

Burada $\Omega = i \left(\frac{\omega}{\gamma} \right) + \frac{1}{\gamma T_2}$ ' ye eşittir. Bu matris formu düzenlenirse

$$\left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^4 - C_1 \left(\frac{\omega}{\gamma} \right)^2 + C_0 = 0 \quad (2.27)$$

elde edilir. Bu ifadedeki C_0 , ve C_2 ise $t_i, M_s, E_{\theta_i\theta_i}, E_{\phi_i\phi_i}, E_{\theta_i\phi_i}$, $\sin \theta_i$ ve $\sin^2 \theta_i$ ile bağlı sabitlerdir. Bu ifadelerdeki i ve j ler 1 ve 2 sayılarını alır. Bu ifade ilk defa Zhang ve arkadaşları (Zhang vd., 1994(a), 1994 (b)) tarafından elde edilmiştir. Buraya kadar tek (2.22) ve üçlü (2.27) tabakalardan oluşan filmlerin dispersiyon bağıntıları elde edildi. Bu

duruma devam edildikçe 60 adet katmandan oluşan sistem için de benzer sonuçlar elde edilebilir. Bunun için aşağıda şekil 2.6’ da temsili olarak 119 katmanlı film (60 manyetik 59 manyetik olmayan) gösterilmiştir. Burada her bir manyetik tabakanın kalınlığı ve mıknatıslanması o tabaka üzerinde gösterilmiştir. (2.25) numaralı denklem 60 tane manyetik tabaka için yazılarak lineer/doğrusal denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sistemi birbirlerine bağlı olduklarından (2.26) numaralı ifadeye benzer bir matris formatında yazılır.



Şekil 2.6. Manyetik 60 tabakadan ve manyetik olmayan (59) tabakadan oluşan sistemin dış manyetik alan $\vec{H}$ ' ın dc bileşeni ve denge manyetizasyonu $\vec{M}$ ' nin bağlı yöneliminin şematik gösterimi

Ferromanyetik değiş-tokuş çiftlenimli 60 katman için dispersiyon bağıntısı denklem 2.26' nın sol tarafındaki (120x120) matrisi kullanılarak detaylı hesaplamalar sonucunda aşağıdaki biçimde elde edilir.

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^{120} - C_{59}\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^{118} + \dots - C_1\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 + C_0 = 0 \quad (2.28)$$

Burada da C_0 , C_1 , ve C_{59} , 2.27 numaralı ifadede olduğu gibi $t_i, M_s, E_{\theta_i\theta_i}, E_{\phi_i\phi_i}, E_{\theta_i\phi_i}$, $\sin\theta_i$ ve $\sin^2\theta_i$ ile ilgili sabitlerdir. Tek katman, üç katman ve 119 (60 manyetik 59 manyetik olmayan) katman için dispersiyon bağıntıları denklem 2.28' den elde edilebilir.

Şekil 2.6’ da tek 60 manyetik-katmanlı yapılar için dispersiyon bağıntısı en genel biçimde türetilmiştir.

2.6 Yumuşak/Sert (Soft/Hard) İnce Film Yapısı

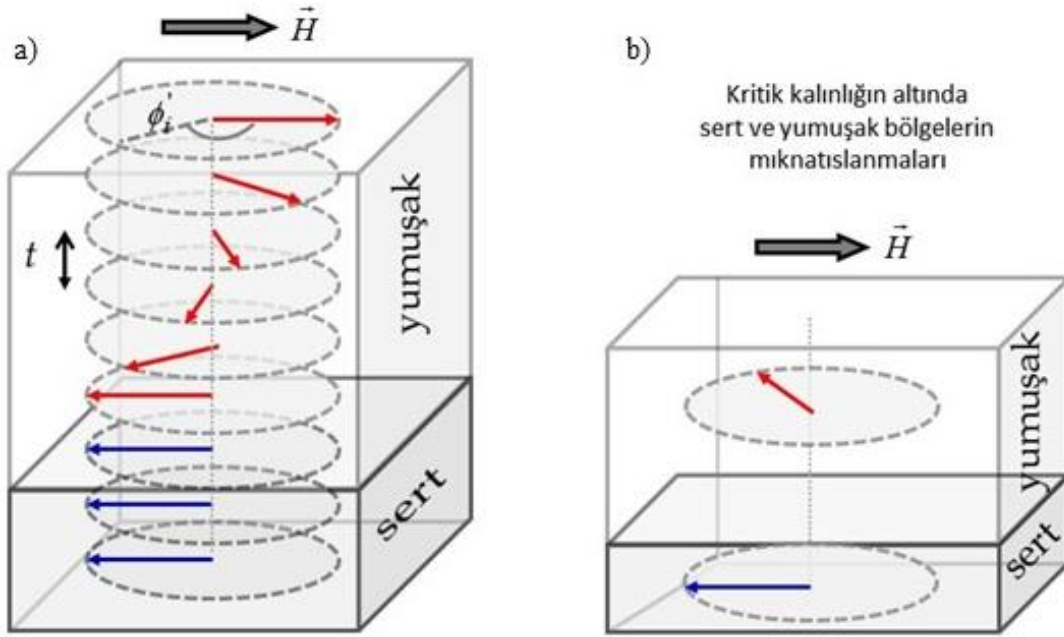
Numunelerin manyetik bölgeleri domenlerden oluşunca bunlar Bloch duvarı, Néel çizgisi ve manyetik vorteks olarak gruplanır. Çok katmanlı sistemler bilinen en iyi düzenli yapılar (tekrar eden) olduğundan son yıllarda bunun en iyi temsilcisi yumuşak/sert tabakalardan oluşan sistemlerdir. Bu tür sistemler hem ikili hem de çok katmanlı davranabilir. Bu sistemler üretilirken kullanılan alttaşlıklar da çok önemli bir yere sahiptir. Bu durum özellikle manyetik histerezis eğrilerinde kendini gösterir. Bu tür sistemlerin genel olarak iki türlü davranış sergiledikleri gözlenmiştir. Bunlardan ilki; sert tabakanın yumuşak bölge üzerindeki kuvvetli mıknatıslanma etkisinin yumuşak bölgenin her bir atomik düzeyine farklı etki etmesiyle ortaya çıkar (şekil 2.7a). İkincisi ise dış manyetik alan altında yumuşak tabakanın ortalama bir yönelim göstermesidir (şekil 2.7b). Birinci durum çok katmanlı film gibi ikinci durum ise ikili yapı gibi analiz edilmelidir. Gerçekte ise bu sistemler ikili yapılardır. Bu konuda ülkemizde çok kısıtlı çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasındaki her tabakasının kalınlığı 5 nm olan $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin ikinci tür sistem gibi davranmakta olduğu detaylı analizler sonucunda tespit edilmiştir (şekil 2.7b). Bu tez çalışmasında 2.23 numaralı denklem süperparamanyetik nanoparçacıklar için türetilmiştir. İkili yapı olan $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin davranışı da ince filmler için böyle bir özel konuma sahiptir. Bu ikili yapı ve SPR sistemleri arasındaki bağlantı konform dönüşümleriyle detaylıca irdelenebilir. Bu durum başka bir çalışma gerektirmektedir.

Sert ve yumuşak sistemlerden oluşan bu tür yapılar sırasıyla Meiklejohn (Meiklejohn ve Bean, 1956, 1957) ve Kneller (Kneller ve Hawing, 1991) tarafından kullanılmıştır. Daha sonra üzerinde çok çalışılan konulardan biri olmuştur (Skomski ve Coey, 1993; Coey, 1997; Szlaferek, 2004; Astalos ve Camley, 1998; Fullerton vd., 1998, 1999; Jiang vd., 1999, 2002, 2005; Grimsditch vd., 1999; Scholz vd., 2000; Hellwig vd., 2000; Pollmann

vd., 2001; Dumesnil vd., 2002; Wüchner vd., 1997; Yıldız vd., 2004(a), 2004(b); Schrefl vd., 1993(a), 1993(b), 1998, 2002; Mibu vd., 1997, 1998).

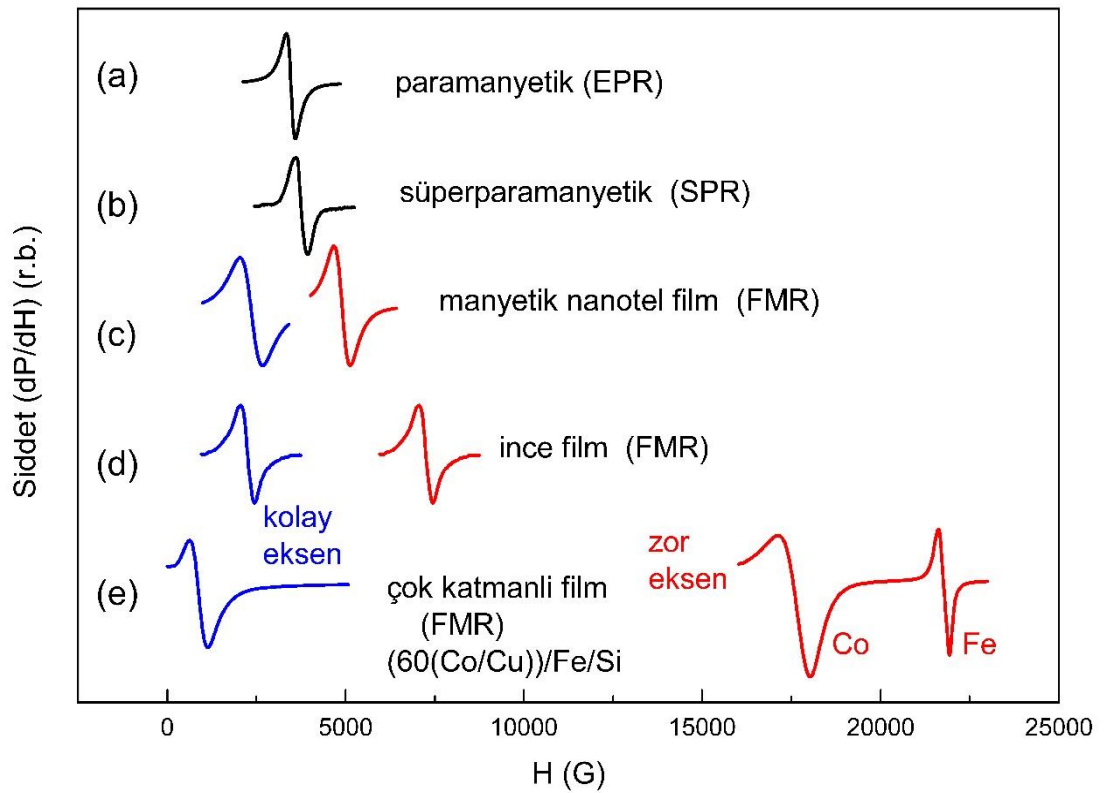
Bu tür yapılar genel olarak birbirlerinin mıknatıslanmasından etkilendikleri için mıknatıslanma yönleri çalışılan düzleme göre değişiklik sergiler. Burada yumuşak ve sert bölgelerin düzlemsel hareketi $\theta_{i,\pm 1} = \pi/2$ ve $\theta_H = \pi/2$ şartlarıyla sağlanır. Bu tür sistemler eğer çok katmanlı gibi davranırsa bu durumda her bir atomik tabakanın mıknatıslanma denge açıları (yönelim açıları) 2.24 numaralı enerji ifadesinin OPG ya da IPG açılarına göre minimize edilerek (türevi alınarak) elde edilebilir.



Şekil 2.7. (a) Dış manyetik alan altında değiş-tokuş etkileşmeli yumuşak/sert sistemdeki yumuşak bölge mıknatıslanma yönelimlerinin atomik düzeyde temsili gösterimi (b) Dış manyetik alan altında yumuşak tabakanın ortalama bir yöneliminin temsili gösterimi

Bu tez çalışmasında sert ve yumuşak tabakaların kalınlıkları 5 nm olan $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K sıcaklığındaki histerezis davranışı her tabakanın tek domen gibi davranmasına karşılık gelmektedir. Görüldüğü üzere değiş-tokuş etkileşmeli sistemlerde bu konuda hâlâ çalışma alanları bulunmaktadır. Yani daha sistematik bir şekilde bu malzemeler için kalınlığın detaylıca analiz edilmesi gerekmektedir. Sert bölgenin mıknatıslanması yumuşak bölgenin mıknatıslanmasından çok büyük olduğundan sert bölgeye çakılı tabaka (pinning layer) denir. Bu durumun tez çalışmasındaki deneysel karşılığı/veriler analiz edildi.

Buraya kadar çeşitli manyetik rezonans türleri anlatıldı ve bunların dış manyetik alan altındaki davranışları üzerinde duruldu. Ancak her konunun kendi içinde detaylı çalışmalar gerektirdiği bilinmelidir. Bu tez çalışmasının konusu olan tek, çift ve çok katmanlı filmlerin dış manyetik alan altındaki davranışları incelenmiştir. Burada elde edilen çok katmanlı filmin FMR sinyalinin diğer tür örneklerin FMR sinyalleri ile birlikte verilmesi konunun anlaşılmasını kolaylaştıracaktır. Bu nedenle bazı durumların EPR ve FMR sinyalleri aşağıda karşılaştırmalı olarak Şekil 2.8’ de verildi. Bu grafiğe dikkat edilirse sinyallerin düşük alandan yüksek alana doğru EPR, SPR, nanotel FMR ve ince film FMR sinyali olarak sıralandığı görülmektedir. Bu sıralanma malzemenin manyetik momentinin dış alana karşı sergilediği tutum olarak da düşünülebilir. Bu tez çalışmasındaki 60 manyetik katmandan oluşan numunenin yüzeyine dik doğrultuda uygulanan manyetik alan altındaki FMR sinyalinin diğerlerine göre en yüksek alanda çıktığına dikkat edilmelidir. Ayrıca $(\text{Cu/Co})_{60}/\text{Fe}$ numunenin düşük alandaki sinyaller tek pik olarak gözlenirken yüksek alandaki iki pike sahip olduğu gözlenmesi FMR yönteminin avantajlarından birisidir.



Şekil.2.8. (a) DeneySEL EPR, (b) teorik SPR, (c) teorik nanotel FMR, (d) teorik ince film FMR (e) deneySEL çok katmanlı ince film FMR sinyalleri

2.7 Anizotropi Kavramı ve Bazı Anizotropi Türleri

Herhangi bir yöntemle üretilmiş olan tek veya çok katmanlı bir filmin manyetik özelliği ortaya çıkarılırken izotropik veya anizotropik kavramları sıkça kullanılır. Eğer ölçüm yapılacak film, kristal eksenlerinin tamamında aynı değerde fiziksel özellikleri ortaya koyuyorsa izotropik durum söz konusudur. Aksine numune yönelime bağlı olarak davranış sergiliyorsa o film anizotropiye sahiptir denilir. Anizotropi genelde kristal şeklinde olan filmlerde görülür. Anizotropi filmin üretim şartlarına da bağlılık gösterir. Alaşım ve metal türlerinin büyük bir kısmında izotropik davranış görölse de bu malzemelerin anizotropik davranış sergiledikleri deneysel çalışmalarda bulunmaktadır. Bu tür anizotropik davranış sergileyen malzemelerin özellikleri VSM, MOKE ve FMR teknikleriyle incelenebilir. Bu tür çalışmalarda, manyetik alanın yönelimi, mıknatıslanmanın doyum değeri, mıknatıslanmanın kalıcı değeri ve filmin kolay/zor eksenleri de tespit edilir. VSM ile elde edilen manyetik histerezis eğrilerinde kalıcı mıknatıslanmanın doyum mıknatıslanma değerine oranı değişmez (karesellik) ise bu durum filmin kalitesini gösterir ve izotropik özelliğe karşılık gelir. Diğer durumda anizotropik durum görülür. Burada en temel olan bazı anizotropilerden kısaca bahsedildi.

2.7.1 Şekil Anizotropisi

Şekil anizotropisi, genel anlamda malzemenin şekline bağlı olarak şeklin manyetik alan karşısında izotropiklikten sapma gösterdiği durumlarda ortaya çıkar. Bu durumda malzeme dış manyetik alan altında bir kolay ve bir de zor eksene sahip olur. Bu durum manyetik rezonans ile açıklanırsa en düşük alanda gözlenen FMR sinyali kolay eksene, en yüksek alanda gözlenen FMR sinyali ise zor eksene karşılık gelir. Bu olay şekil anizotropisi olarak bilinir. Bu durum detaylı bir şekilde demanyetizasyon alanıyla da ilgilidir. Burada $B = \mu_0 (H + M)$ bağıntısı söz konusudur. Şekil anizotropisine sahip örnekler yüzeylerinde kutuplar varmış gibi davranırlar. Bu nedenle örneklerin içerisinde dış manyetik alanı zayıflatıcı yönde bir manyetik alan oluşur ve bu iç manyetik alan demanyetizasyon alanı olarak adlandırılır.

2.7.2 Manyeto-Kristal Anizotropisi

Manyetik sistemlerde en önemli anizotropilerden birisi hiç şüphesiz manyeto-kristal anizotropisidir. Bu anizotropi, elektronun spin-orbit (L-S) etkileşmesinden kaynaklanır. Bu etkileşim sonucunda, numunenin gözlemlenen g -değerleri serbest elektronun g -değerinden büyük veya küçük olur. Çünkü elektronların atom içerisinde konuşlanmaları aynılık esasına değil farklılık esasına göre şekillenir. Bu durum her bir elektron için n , l ve m kuantum sayılarıyla açıklanmaktadır. Elektronların orbital üzerinden kristalografik eksenler boyunca yönelmeyi tercih etmeleriyle de ilgilidir. Bu nedenle manyetik malzemelerde mıknatıslanma yönelimi bazı durumlarda kolay bazı durumlarda zor olabilir. Manyeto-kristal anizotropi enerjisi atomlar arası değiş-tokuş enerjisinden küçüktür. Bir manyetik sistemde değiş-tokuş enerjisinin etkisi olmadığı durumlarda bunu manyeto-kristal anizotropi enerjisi üstlenir. Çünkü mıknatıslanma yönelimiyle manyeto-kristal anizotropi ilgiliyken değiş-tokuş enerjisi bununla ilgilenmez.

2.7.3 Manyeto-Elastik Anizotropi

Manyeto-kristal anizotropinin gerilerek indüklenmesiyle ortaya çıkan anizotropi türü manyeto-elastik anizotropi olarak adlandırılır. İnce filmlerde bu tür gerilmelerin temel nedenleri arasında alt taşı ile örgü uyumsuzluğu bulunmaktadır. Bu tür gerilmeler aynı zamanda filmin kalınlığına da bağlıdır.

2.8 Mıknatıslanmanın Sıcaklığa Bağlılığı

Çalışılan manyetik örnekler için mıknatıslanma değerlerinin sıcaklıkla değişimi Brillouin fonksiyonu yardımıyla analiz edilebilir. Bunun için mıknatıslanma, sıcaklığa bağlılığı Brillouin fonksiyonu cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$M = Ng\mu_B B_j(x) \quad (2.29)$$

Burada $Ng\mu_B$, manyetizasyonun ulaşacağı maksimum doyum noktası olup M_s şeklinde tanımlanır. Bu durumda denklem

$$\frac{M}{M_s} = B_j(x) \quad (2.30)$$

şekline dönüşür. Burada N , g , μ_B , $B_j(x)$ sırasıyla manyetik moment sayısı, g -değeri (g -value), Bohr manyetonu ve Brillouin fonksiyonunu göstermektedir. Brillouin fonksiyonu ise

$$B_j(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{x}{2J}\right) \quad (2.31)$$

şeklinde yazılır. Bu ifade sıcaklığa $x = (gJ\mu_B\mu_o H/k_B T)$ şeklinde bağlıdır. Bu ifadenin yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık limitlerdeki değerleri gerekli olması durumunda detaylıca hesaplanabilir (Darby, 1967; Coey, 2009). Bu limit değerleri mıknatıslanma ifadesinin sıcaklıkla gelişiminde limit durumlarının karşılaştırması için kullanılır.

BÖLÜM III

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Ölçümü Yapılan Numuneler

Ölçümleri alınan numuneler nano-ölçekte olup manyetik tek, çift ve çok katmanlı yapılara sahiptir. Bu numuneler, kimyasal yapıları, yapıdaki katkı oranları ve katman kalınlıkları dikkate alınacak şekilde Tablo 3.1 de verilmiştir. Bu tablodaki tek ve çift katmanlı numuneler termal oksit silisyum (Si) alttaşı üzerine Gibbs tarafından Sheffield Üniversitesi malzeme mühendisliği bölümü laboratuvarlarında, çok katmanlı film ise Fert tarafından Paris Üniversitesi fizik bölümü laboratuvarlarında büyütülmüştür.

Çizelge 3.1. Değişik kalınlıklara sahip ölçümü yapılan tek, çift ve çok katmanlı numuneler

Numuneler	Tek Katmanlı Film	Çift Katmanlı Film	Çok Katmanlı Film
	$\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (6 nm - 8 nm)	$\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (2/2 nm-5/5 nm)	$(60x(\text{Co}/\text{Cu}))/\text{Fe}/\text{Si}$ $60x(19\text{\AA}/9\text{\AA})/50\text{\AA}/\text{Si}$
	$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (2.5 nm – 5 nm)	$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5/5 nm)	

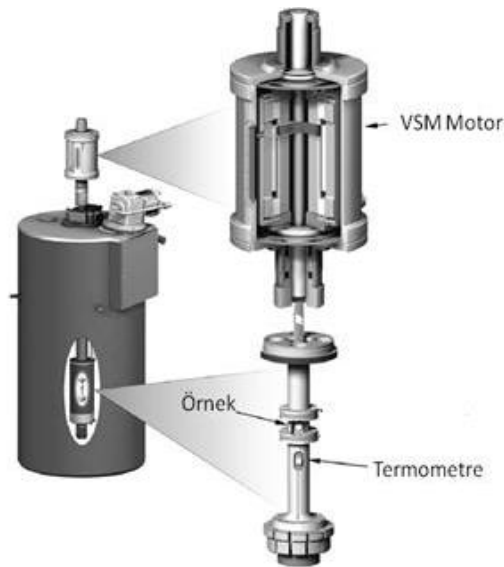
3.2 Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Yöntemi

Manyetik malzemelerin doyum alan, koersif alan, kalıcı mıknatıslanma ve doyum mıknatıslanma gibi özelliklerini belirlemek için kullanılan titreşimli örnek manyetometresi (VSM) en temelde elektromanyetik indüksiyon prensibine göre çalışan bir cihazdır. Bu indüksiyon prensibi Faraday indüksiyon yasasını esas alıp, kapalı bir devrede manyetik akı değişimi ile devrede bir elektromotor kuvvet (emk) oluşturur. Bu durum manyetik akı değişiminin indüklenen emk'ya eşit olmasıyla açıklanır. Bu indüklenmiş emk;

$$\varepsilon = -\mu_0 NA \frac{dH}{dt} \quad (3.1)$$

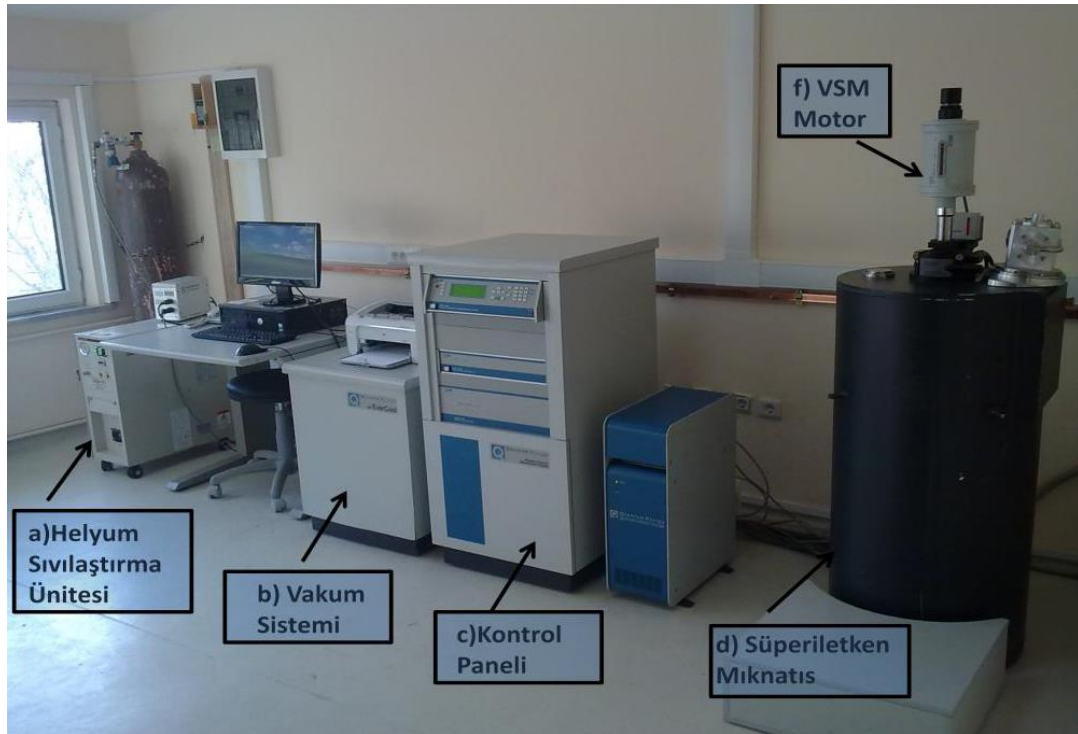
şeklinde ifade edilir. Bu ifade de, ε indüksiyon elektro motor kuvveti, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği ve N ise bobinin sarım sayısını göstermektedir. Bu ifadeye göre devrede oluşan akı yoğunluğu iki şekilde gerçekleşir. Bunlardan birincisi dış manyetik alan altında örnek titreştirilir. İkincisi ise zamanla değişim gösteren manyetik alan uygulanmasıdır. Buradan hareketle; indüklenen emk titreşim hareketi yapan malzemenin mıknatıslanmasıyla orantılı olduğundan bu tez çalışmasında kullanılan manyetik histerezis ölçüm cihazına titreşimli örnek manyetometresi (VSM) olarak isimlendirilmektedir.

Malzemelerin manyetik histerezis ölçümlerini VSM cihazı ile yaparken malzeme sabit bir manyetik alan içine konulur. Malzeme manyetik alandan etkileneceği için manyetik momentler belirli bir düzene girecektir. Bu nedenle dış manyetik alan değeri ne kadar kuvvetli olursa mıknatıslanma da o ölçüde kuvvetli olacaktır. Bu tez çalışmasında kullanılan VSM aletindeki motor aşağıda şekil 3.1’ de görülmektedir. VSM cihazıyla manyetik histerezis ölçümü yaparken malzemeye VSM motoru yardımıyla düşey doğrultuda hareket kazandırılır. Bu hareket sonucunda manyetik alan zamana bağlı olarak değiştirilmiş olur. Bunun sonucunda da indüklenmiş akım elde edilir.



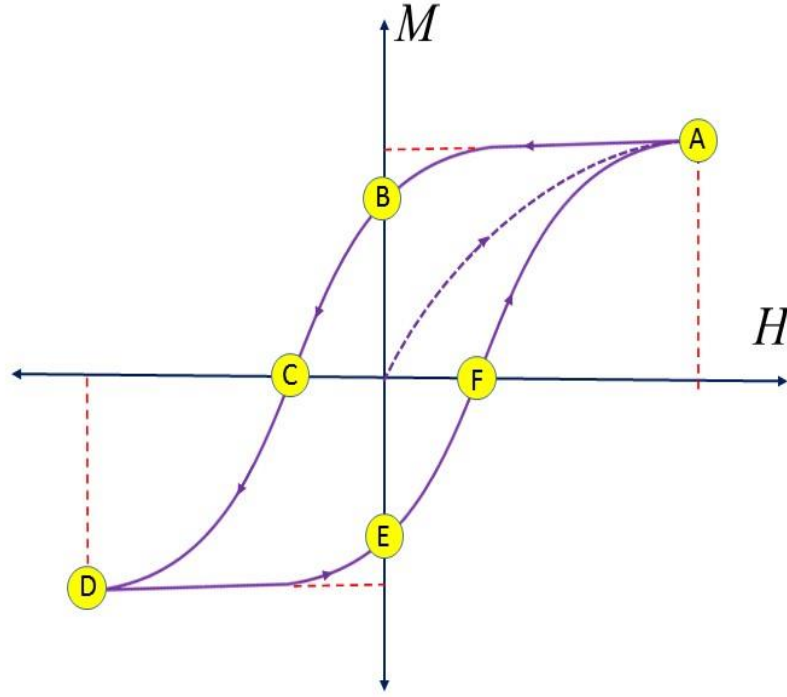
Şekil.3.1. Manyetik histerezis eğrilerinin ölçümünün yapıldığı VSM cihazında titreşimi sağlayan VSM motoru

VSM cihazı (PPMS9T) ile bir malzemenin ölçümü yapılırken kullanılan bütün bileşenler aşağıda şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Malzeme süperiletken mıknatısın bulunduğu helyum tankı içine yerleştirilir. VSM titreştirici motor ile sabit bir manyetik alan değerinde kaydedilir. Düşük sıcaklıklarda ölçüm yapılacağı zaman (2-1000 K) sıcaklık aralığında düzenli bir şekilde sıcaklığı kontrol edecek sıcaklık kontrol cihazı bağlanır. Bu sistem 9 Tesla’ya kadar manyetik alan uygulayabilen ve 1-3 mm aralığında bir titreşim genlikli 40 Hz’lik frekans değerine sahiptir. Bu cihaz (PPMS9T) 10^{-6} emu (erg/Oe) hassasiyetinde manyetik moment değeri ölçümü alabilmektedir.



Şekil.3.2. Manyetik histerezis eğrilerinin ölçümünün yapıldığı VSM cihazı ve bileşenleri

VSM cihazıyla alınabilecek bir histerezis eğrisinin temsili gösterimi şekil 3.3’ de verilmektedir. Bu eğride bir manyetik histerezis eğrisinde bulunan önemli noktalar gösterilmiştir.



Şekil.3.3. Temsili manyetik histerezis eğrisi ve eğriye ait kritik noktalar

Histerezis eğrileri malzemenin manyetik karakterini ortaya koyan ayırt edici bir özelliktir. Şekil 3.3’ de görüldüğü üzere histerezis eğrisinde önemli bazı kritik noktalar vardır. Başlangıçta mıknatıslanmaya sahip olmayan numune, dışarıdan uygulanan pozitif yönlü manyetik alan karşısında A noktasında M_s doyum mıknatıslanması ve H_s doyum alanına ulaşır. Ulaşılan bu noktadan sonra dış manyetik alan azaltılırsa malzeme B noktasında M_r kalıcı mıknatıslanmasına sahip olur. Bu duruma devam edilirse C noktasında malzemenin mıknatıslanması sıfırlanır ve bunu sıfırlayan ters alan değerine $-H_c$ Koersif alanı denir. Ters alanı uygulamaya biraz daha devam edilirse D noktasında malzemenin $-M_s$ tersine doyum mıknatıslanmasına eriştiği gözlenir. Malzemeyi bu ters doyuma ulaştıran $-H_s$ dış alanıdır. Bu D noktasından itibaren dış alan tekrar pozitif yönde uygulanırsa, histerezis kendisine farklı bir yol çizerek E noktasında $-M_r$ ters yönlü kalıcı mıknatıslanmaya sahip olur. Pozitif yönlü alan uygulamaya devam edilirse F noktasında malzemenin sahip olduğu tersine mıknatıslanma sıfırlanır. Bunu sıfırlayan F’ deki pozitif alan değeri H_c koersif alanı şeklinde tanımlanır. Sonunda malzeme tekrar A noktasında pozitif doyuma ulaşır.

3.3 Elektron Spin Rezonans (ESR) Yöntemi

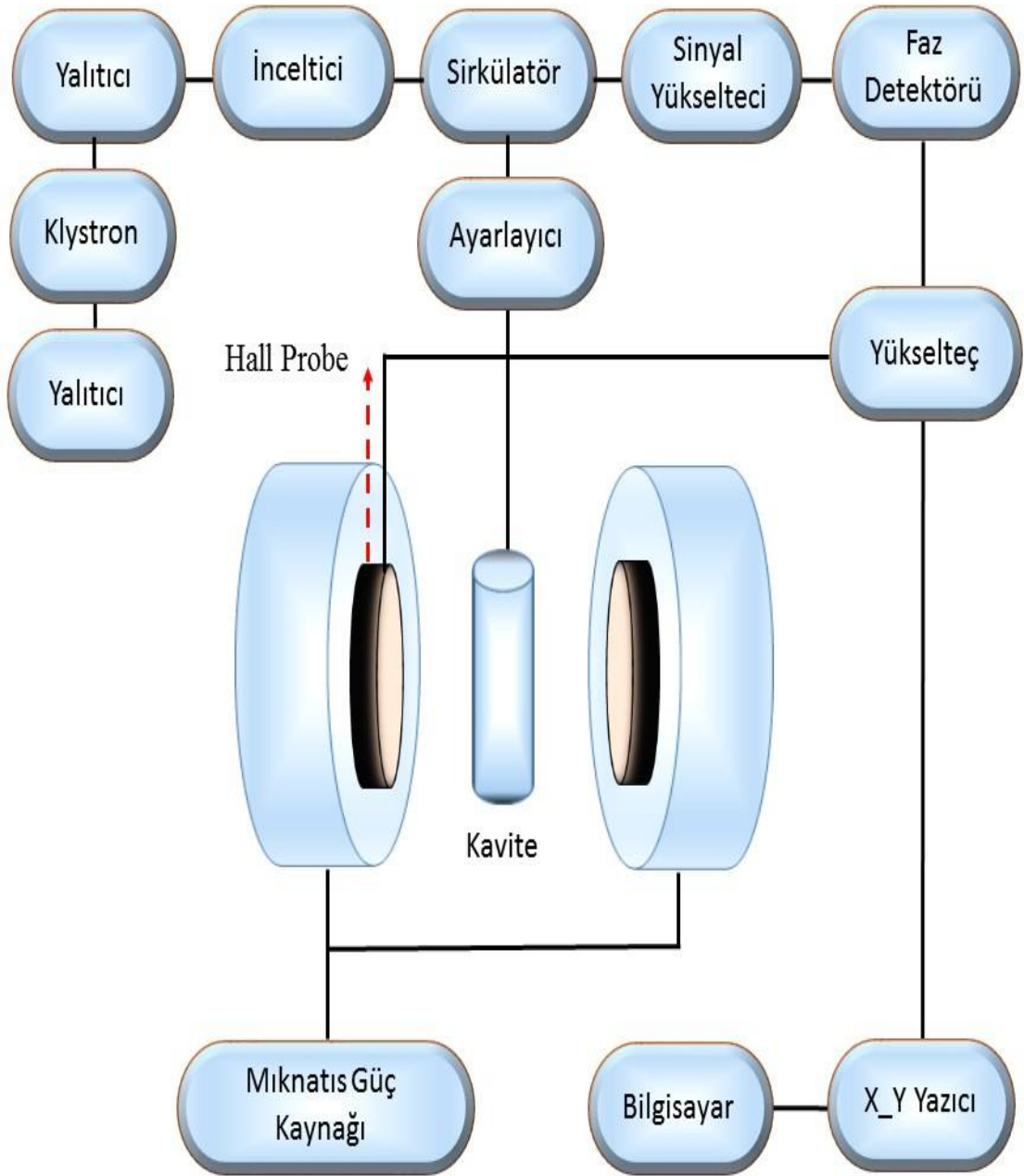
EPR, SPR ve FMR ölçümleri, Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi tekniği kullanılarak ESR cihazında yapılır. Temsili bir ESR spektrometresinin ana blok diyagramı şekil 3.4’ de görülmektedir. Bu cihaz kavite-kılavuz sistemi, mıknatıs sistemi, mikro dalga kaynak sistemi, modülasyon ve dedektör sistemi gibi dört ana kısımdan oluşur.

Kavite-kılavuz sistemi, malzeme üzerine mikrodalgayı taşıyan ve malzeme ile etkileşen dalgaların dedektöre ulaşmasını sağlayan dalga kılavuzu ile birlikte bir sistemdir. Ayrıca bu sistemde malzemenin de yerleştirildiği yer olduğu unutulmamalıdır. Dalga kılavuzu, iletkenliği yüksek ve genelde dikdörtgen yapıları uzun bir borudur. Son yıllardaki gelişmelerle birlikte bu kılavuz farklı geometrik şekillerde de yapılmaktadır. Özellikle kompozit malzemelerden olan nano-spinel yapılarıdaki soğurmalarla dikkat çekici sonuçlara imza atılmaktadır. Ayrıca kavitelerinde değişik şekillerde yapılması teknolojinin getirilerindendir. Sıcaklık çalışmalarında kapalı kaviteler kullanılırken, elektromanyetik alana duyarlı malzemeler için açık kavite sistemleride kullanılabilir. Dalga kılavuzu üzerindeki ayarlayıcı (iris) vasıtasıyla kılavuz ile kavite arasındaki empedans uyumunu sağlar.

Şekil 3.4’ te görüldüğü gibi mıknatıs sistemi, sabit ve güvenilir dış manyetik alan elde etmek için kullanılan çift bobinden oluşan kangal sistemidir. Malzemenin üzerinde oluşacak manyetik alan bu mıknatıslar sayesinde üretilir. Bu kangalları bir dc akım kaynağı besler. Bu sayede 2.2 Tesla değerine kadar manyetik alan üretilebilir. Bu dış manyetik alan değerinin kararlılığı ise güç kaynağı ile kontrol edilir.

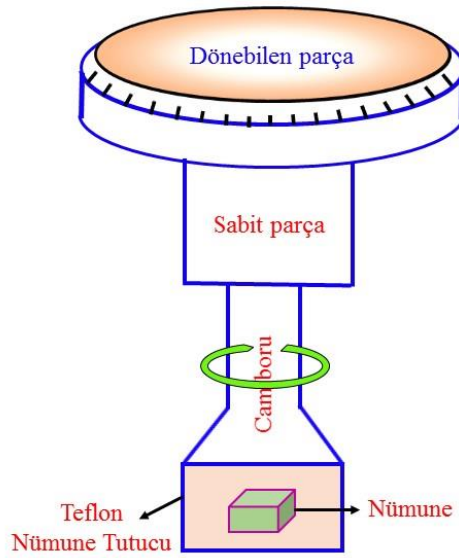
Mikrodalga kaynak sistemi rezonans oluşumuna katkı sağlar. Bu sistemin en önemli elemanlarından biri yüksek frekans üreticidir (klystron). Bu klystron mikrodalga kaynağı gibi çalışan bir çeşit elektron tüpüdür ve LC salınımları bu sayede gerçekleşir. Rezonans halinde mikrodalga üretim aşamasında paralel levhalar arasındaki elektrik alanının değişimi sağlanır. Yansıtıcı ve hızlandırıcı levhalar gerilim ayarlanmasıyla yüksek frekanslarda salınım yapılması sağlanır. Bu şekilde farklı frekanslarda ölçüm yapılması da sağlanır.

ESR cihazlarında en önemli işlemlerden birini yapan sistem ise modülasyon ve dedektör sistemidir. Bu sistem malzemenin soğurduğu mikro dalga enerjisini algılayarak bazı elektronik işlemlerden/aşamalardan sonra ESR sinyalinin oluşmasını sağlar. Bu sistem de kendi arasında iki kısımdan oluşur. İlk kısım olan dedektör kısmında, malzemenin soğurduğu mikrodalga enerjisi dedektörler ile tespit edilir. İkinci kısım ise modülasyon sistemi olup mikrodalgaları doğru akıma dönüştüren kristal dedektöründeki gürültü sinyalini azaltmaya yarayan sistemdir. Bu modülasyon 100 kHz'lik bir osilatör devresiyle sağlanır.



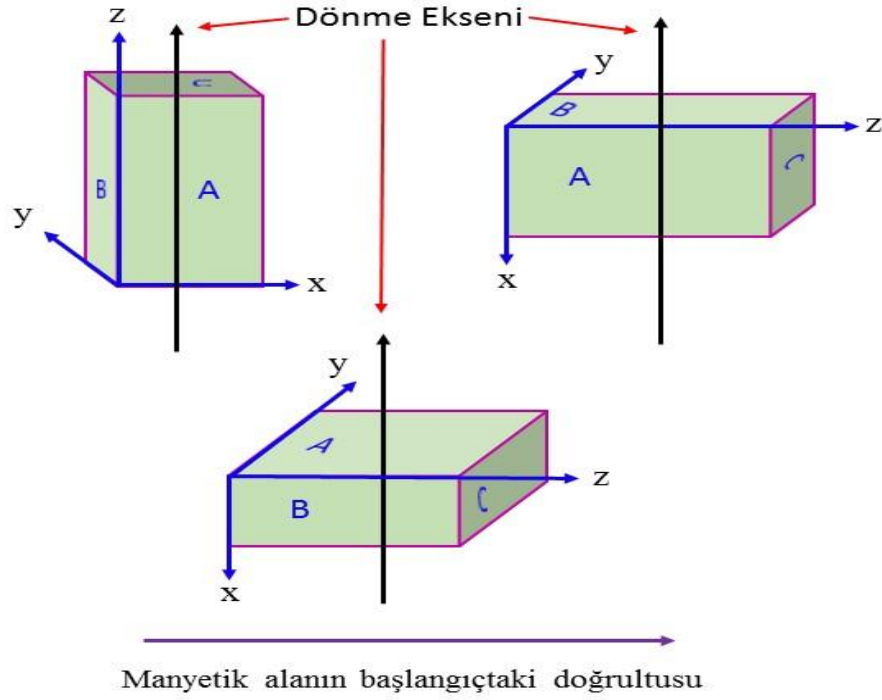
Şekil.3.4. ESR spektrometresinin blok diyagramı

Bu tez çalışmasında Bruker EMX spektrometresi kullanıldı. FMR sinyalleri iki farklı geometride alındı. Bunlardan biri dış manyetik alanın filme düzlem içinde kalan paralel durumdur (IPG). Diğeri ise dış manyetik alanın film düzleminin dışındaki durum (OPG) dur. Her iki durumda da dış manyetik alanın yönelimi gonyometre ile sağlanır. Bu işi yapan gonyometrenin temsili gösterimi Şekil 3.5’ te gösterilmiştir. Bunun sayesinde kavite içine konulan malzemelerin hem IPG hem de OPG sinyalleri istenilen her açıda doğru bir şekilde alınır. Bu gonyometre sisteme bağlı bilgisayar ile kontrol edilir.



Şekil 3.5. Sinyallerin belirli açılarda alınmasını sağlayan gonyometre

Özellikle tek kristal örnekler ölçülürken FMR sinyalleri hem IPG hem de OPG de ölçülmesi gerekir. Çünkü bu şekilde malzemenin anizotropileri ve bunların sisteme katkısı bu şekilde tespit edilebilir. Buna ilaveten, kavite üzerine sabit olarak tutturulmuş malzemenin ölçümünde eksen takımının temsili gösterimi Şekil 3.6’ da verilmiştir.



Şekil 3.6. EPR deneylerinde birbirine dik üç eksenin seçimi

Bu tez çalışmasında FMR sinyallerinin rezonans alan değerleri ile frekans bağımlılığının incelenebilmesi için malzemenin 9.5-37 GHz frekans aralığında ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler oda sıcaklığında sırasıyla x-bant (~9.5 GHz), k-band (20-27 GHz) ve q-banda (30-37 GHz) karşılık gelir. Düşük sıcaklı FMR sinyalleri ise tercihe bağlı olarak malzemenin önemli noktaları dikkate alınarak belirli bir doğrultuda yapıldı. Bu sıcaklık çalışmasında düşük sıcaklıklara inilmesi için Oxford Instruments tipi sürekli helyum gaz akışı sağlayan kriyostat kullanılmıştır. Sıcaklık değeri ise ticari Lake Shore 340 marka sıcaklık kontrol sistemi ile kontrol edilmiştir.

BÖLÜM IV

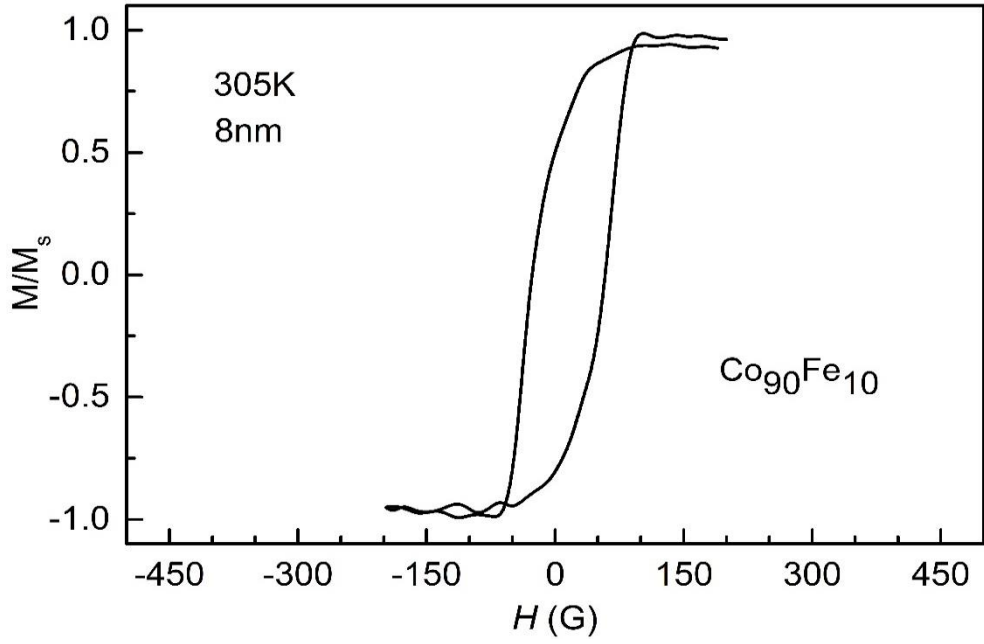
BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Nano Ölçekli Tek ve Çift Katmanlı İnce Filmler

Termal oksit silisyum (Si) alttaş üzerine büyütülen, her bir katmanın kalınlığı sırasıyla 8, 6, 5, 2.5 ve 2 nm olan tek ve çift katmanlı nano ölçekli $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ve $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ manyetik filmler kuantum dizayn titreşimli örnek manyetometre (VSM) kullanılarak hem oda hem de düşük sıcaklıkta kalınlık etkisi ve sıcaklık bağımlılığı incelenmiştir. Film yüzeyine dik doğrultuda uygulanan dış manyetik alan altında manyetik histerezis eğrileri kaydedilmiştir. 8 ve 6 nm kalınlıklı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmlerin 10 K ve 5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmin oda sıcaklıklarında asimetric histerezis eğrileri gözlemlendi. Her tabakasının kalınlığı 5 nm olan $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numune için küçük (minor), orta (middle) ve büyük (major) histerezis eğrilerinin düşük sıcaklıkta zamana göre gelişimi incelenmiştir. Küçük histerezis eğrileri sadece mıknatıslanmanın pozitif olduğu bölgede gözlemlenmiştir. Ayrıca tek ve çift katmanlı bu filmlerde değiş-tokuş (exchange-bias) etkisi gözlemlenmiştir.

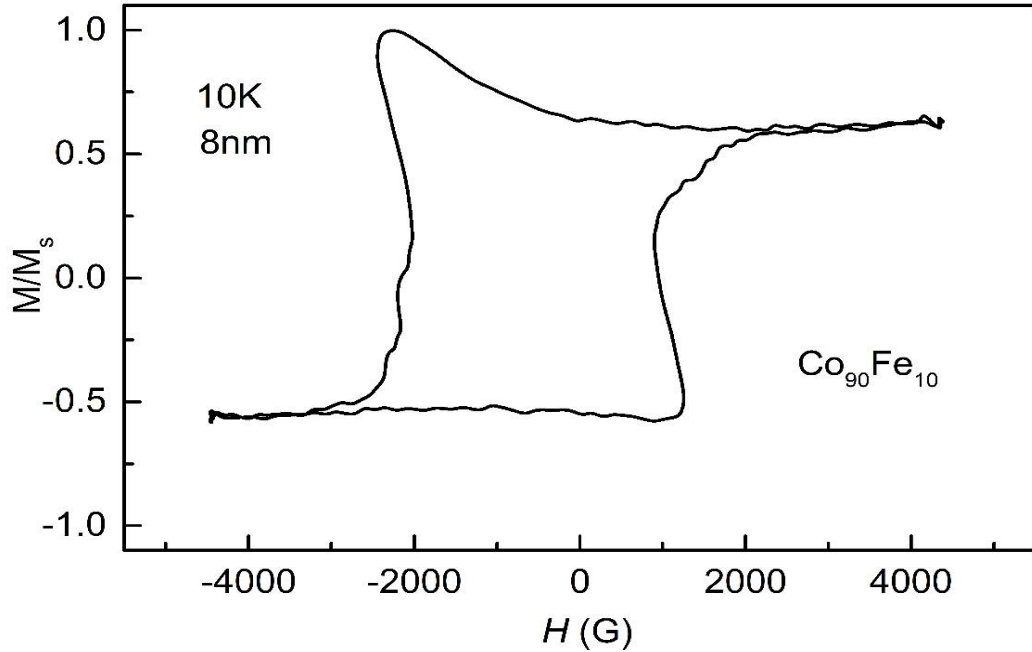
4.1.1 Tek katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin sıcaklık ve kalınlığa bağlı incelenmesi

Kimyasal gösterimi $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ olan ve 8 nm kalınlıklı tek katmanlı ince filmin 305 K ve 10 K sıcaklıklarında histerezis eğrileri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. Aynı kimyasal gösterimdeki 6 nm kalınlıklı numunenin de 305 K ve 10 K sıcaklıklarında ki histerezis eğrileri sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ te verildi.



Şekil 4.1. 8 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 305 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi

Kalınlığı 8 nm olan filmin 305 K’ deki histerezis eğrisi manyetik alanın yönelimine göre hemen hemen simetrik bir davranış sergilemektedir. Bu sıcaklıkta numunenin koersif (kalıcı) alan değeri manyetik alan yönelimiyle çok az değişmiştir. Histerezis eğrisinin doyum mıknatıslanma bölgelerinde küçük bozukluklar görülmektedir. Bunlar malzemenin durumuna ait özel değişimler olarak söylenebilir. Bu numunenin 10 K’ deki histerezis eğrisi Şekil 4.2’ de görülmektedir.

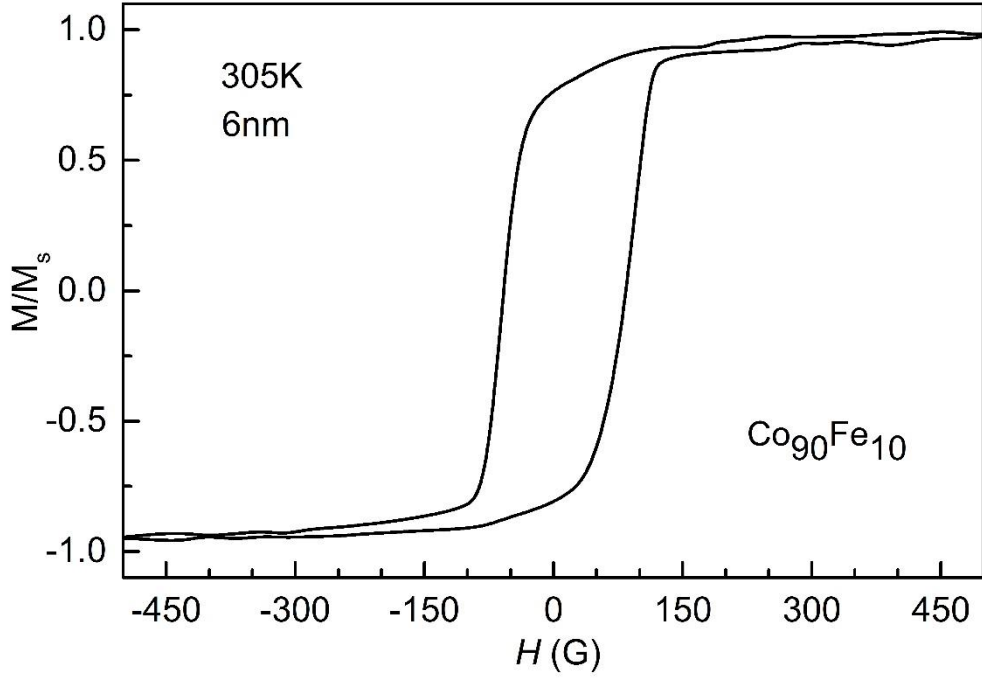


Şekil 4.2. 8 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 10 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi

Kalınlığı 8 nm olan numunenin 10 K sıcaklığındaki (düşük sıcaklık) histerezis eğrisinde asimetrik bir davranış gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta numunenin koersif/kalıcı alanının belli bir büyüklüğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir ifadeyle koersif alan değerinin genişlediği görülmüştür. Ayrıca 10 K’ da histerezis eğrisinin sola doğru kayma gösterdiği tespit edilmiştir.

Kalınlığı 8 nm olan numunenin 305 K (Şekil 4.1) ve 10 K (Şekil 4.2) sıcaklıklarındaki histerezis eğrileri karşılaştırıldığında düşük sıcaklıktaki koersif alanın oda sıcaklığındaki koersif alandan daha büyük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca düşük sıcaklıktaki histerezis eğrisi oda sıcaklığındakine göre asimetrik bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Böylece, malzeme düşük sıcaklıkta daha fazla kristalimsi davranış sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca bu davranış tek katmanlı bu filmin (8 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$) düşük sıcaklıkta koersivitesinin filmin manyeto-kristal anizotropisi için de bir ölçü olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, koersivitedeki artış, sadece manyetokristal anizotropisinin bir sonucu değil, aynı zamanda düşük sıcaklıklarda film yüzeyindeki spin düzensizliği nedeniyle oluşan değiş-tokuş anizotropisinden de kaynaklanabileceğini gösterdi. Düşük sıcaklıktaki histerezis eğrisinin genel görünümü bir dikdörtgeni anımsatmaktadır. Bu durum numunenin kristalleşme yönündeki kalitesiyle ilgilidir. Ayrıca düşük sıcaklıkta manyetik alan eksenine göre sola doğru bir kaymanın da olduğu gözlemlendi. Bu sola kayma davranışı değiş-tokuş etkisine atfedildi (Hovorka vd., 2006; Fitzsimmons vd., 2000). Bu sola kaymanın birinci derece faz geçişi ile ilgisinin olduğu da söylenilebilir (Sahoo vd., 2007). Bu histerezisin sağ kısmındaki içe doğru kaymanın ise Barkhausen etkisinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu histerezisdeki sol üst köşedeki çıkıntı ise numunenin alaşımdan tek kristale doğru geçişteki kusurlar olarak tespit edilmiştir (Gnatchenko vd., 2006).

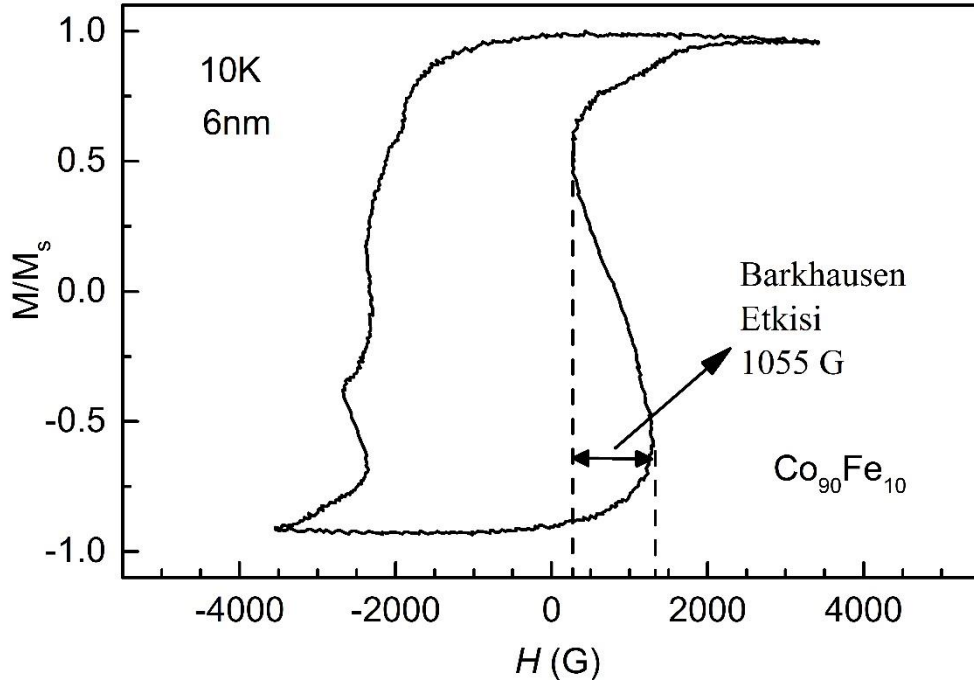
Şekil 4.3 ve 4.4’ te ise 6 nm kalınlıklı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin sırasıyla 305 K ve 10 K sıcaklıklarındaki histerezis eğrileri kaydedilmiştir.



Şekil 4.3. 6 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 305 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi

Kalınlığa 6 nm olan $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 305 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi (Şekil 4.3) manyetik alana göre simetrik bir davranış göstermiştir. Doyum mıknatıslanma bölgelerinde özel değişimler tespit edilmiştir. Benzer bir davranış 8 nm kalınlıklı numune için de aynı sıcaklıkta gözlenmişti. Kalınlığı 6 nm olan numunenin 305 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi, 8 nm kalınlıklı örneğin aynı sıcaklığındaki eğrisiyle benzer davranış sergilediği tespit edilmiştir. Ancak 6 nm ve 8 nm kalınlıklı filmlerin 305 K sıcaklığındaki eğrileri (Şekil 4.1) karşılaştırıldığında ise daha ince olan (6 nm) numunenin histerezis eğrisinin daha geniş ve büyük koersif alan değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Böylece tek katmanlı bu tür ince filmlerin oda sıcaklığında daha yüksek koersif alana sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buradan, kalınlıkla koersif alanın ters orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Kalınlığı 6 nm olan $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 10 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi Şekil 4.4' te gösterilmiştir. Burada eğri hem sola kaymış hem de şeklinde belirgin olarak bir bozulma gözlenmiştir. Dolayısıyla numunenin histerezis eğrisi asimetrik bir davranış göstermiştir. Asimetrik davranışa neden olan bozulmanın Barkhausen etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

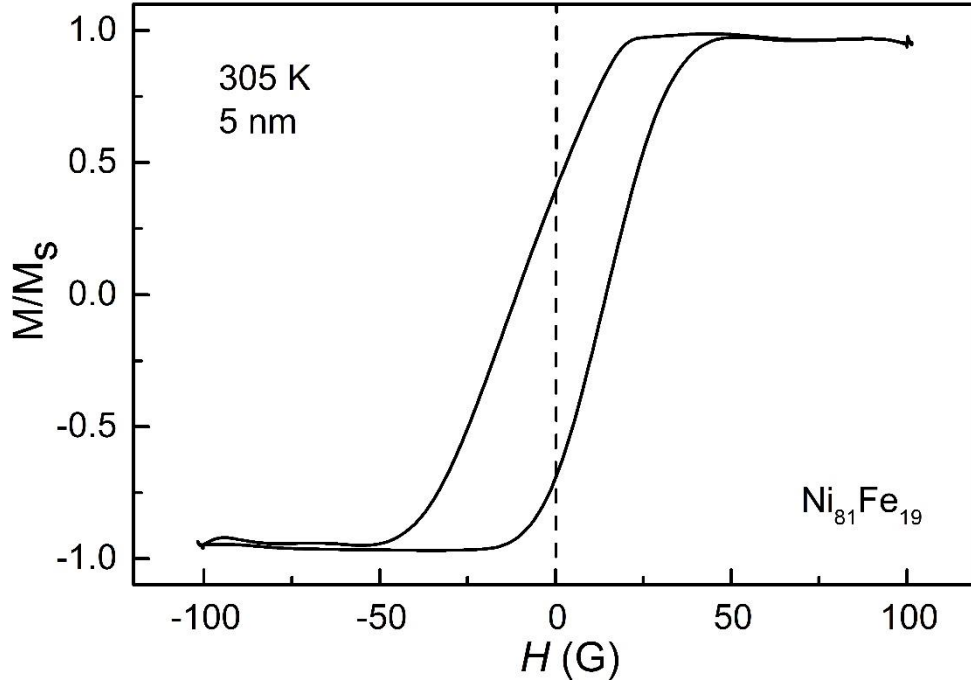


Şekil 4.4. 6 nm kalınlığa sahip $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin 10 K sıcaklığındaki histerezis eğrisi

Düşük sıcaklıktaki (10 K) 6 nm (Şekil 4.4) ve 8 nm (Şekil 4.2) kalınlığa sahip örneklerin histerezis eğrilerinin sıfır manyetik alan değerine göre sola kayması değiş-tokuş (exchange-bias) etkisinden kaynaklanmaktadır. Değiş-tokuş etkisinin de sistemin birinci derece faz geçişine meyilli olmasından kaynaklandığı görüldü. 305 K sıcaklığında 8 nm (Şekil 4.1) ve 6 nm (Şekil 4.3) kalınlıklı filmlerin eğrileri karşılaştırıldığında, 6 nm kalınlıklı numunenin koersivitesinin daha büyük değerde olması, 10 K deki eğrilerde de aynı sonuca ulaşmamızı öngörmüştür. Ancak görünüşte 10 K de 6 nm kalınlıklı ince filmin (Şekil 4.4) koersif alanının 8 nm kalınlıklı (Şekil 4.3) numunenin koersivitesinden düşükmüş gibi olduğu gözlemlendi. Dolayısıyla oda sıcaklığındaki ince filmin koersivitesindeki büyüklük düşük sıcaklıkta da devam etmektedir. Bu yanılmanın nedeninin Barkhausen etkisinin 6 nm kalınlıklı filmde daha yüksek olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Histerezis eğrilerindeki asimetric davranışın, tek katmanlı sistemlerin ilginç bir özelliği olduğu ve genel kabul gördüğü bilinmektedir. 10 K’ de asimetric davranışın tersine mıknatıslanmayı anlamaya katkıda bulunabileceği tespit edilmiştir. Ancak koersivitedeki artışa neden, sadece manyeto-kristal anizotropisi değil aynı zamanda, düşük sıcaklıklarda film yüzeyindeki spinlerin düzensizliğinden kaynaklanan değiş-tokuş (exchange) anizotropisi de olabileceği gözlenmiştir.

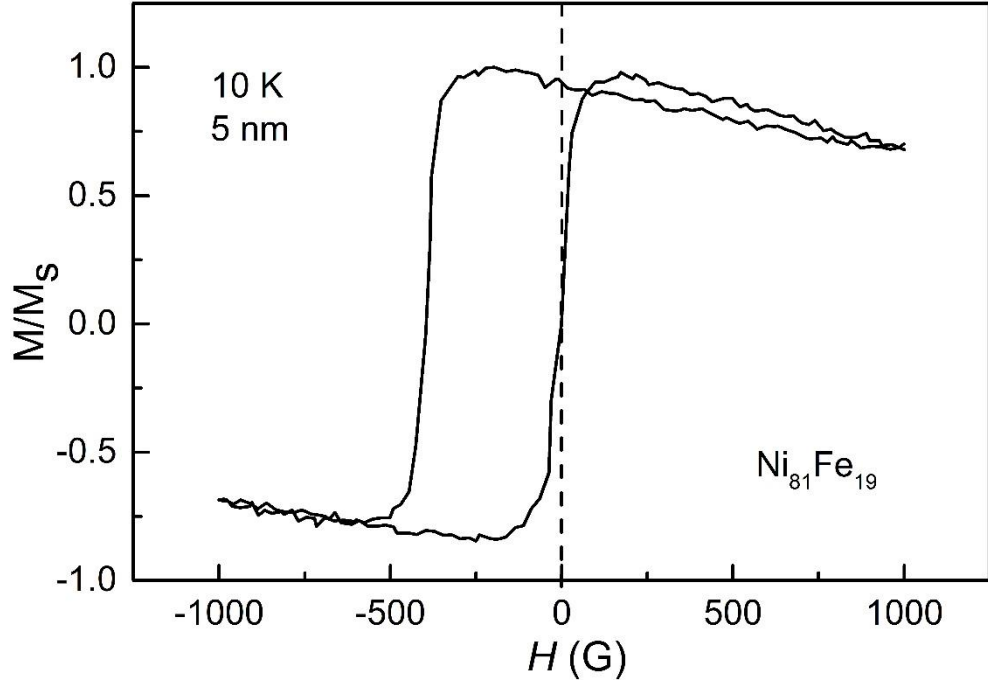
4.1.2 Tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin sıcaklık ve kalınlığa bağlı incelenmesi

Kalınlığı 5 nm olan tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmin 305 K sıcaklığındaki deneysel histerezis eğrisi Şekil 4.5’ te verilmiştir. Bu histerezis eğrisi asimetrik davranış göstermektedir. Bu asimetri, tersine manyetizasyon mekanizmasını göstermektedir.



Şekil 4.5 Tek katmanlı 5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin 305 K sıcaklığındaki manyetik histerezis eğrisi

Bu histerezis eğrisinin negatif doyum mıknatıslanma bölgesinde görülen küçük bozukluklar malzemenin durumuna ait özel değişimlere atfedilmektedir. Kalınlığı 5 nm olan tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmin 10 K sıcaklık değerindeki histerezis eğrisi Şekil 4.6’ da verilmiştir.

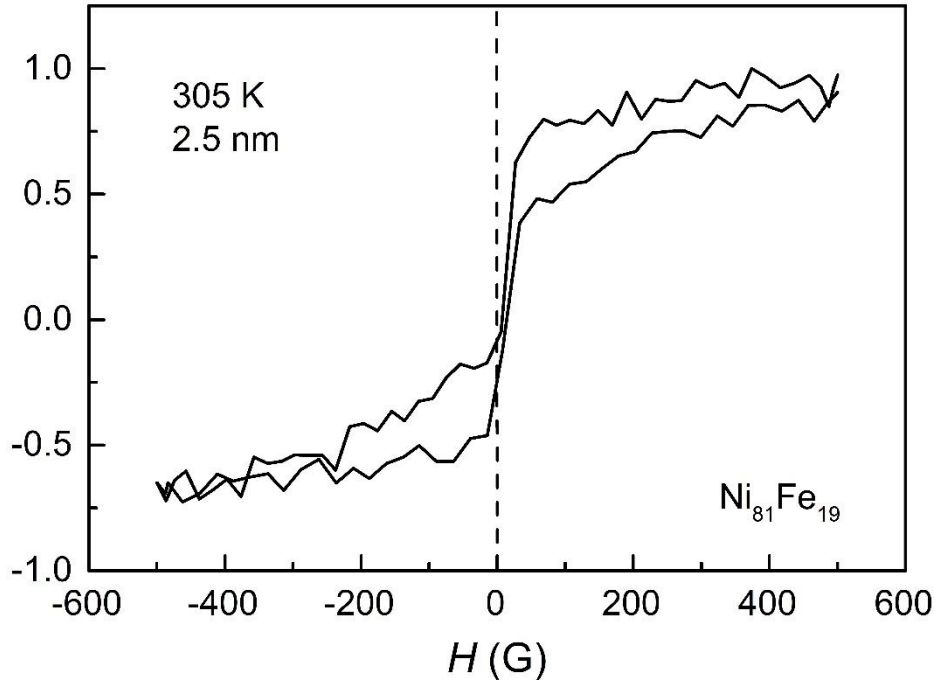


Şekil 4.6 Tek katmanlı 5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin 10 K sıcaklığındaki manyetik histerezis eğrisi

$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ numunenin 10 K sıcaklık değerindeki histerezis eğrisi 305 K değerindekinden farklılıklar göstermektedir. Burada eğri manyetik alan değerine göre sola kayma göstermiştir. Bu kaymanın nedeni yüzey spinleri arasındaki değiş-tokuş etkisinden kaynaklanmaktadır. Burada da doyum mıknatıslanma bölgelerinde görülen küçük bozukluklar numunenin düşük sıcaklıktaki (10 K) durumuna ait özel değişimlerin daha belirginleştiğini göstermektedir. Ayrıca bu numunenin 10 K'deki koersif alan değerinin 305 K' dekine göre çok genişlediği tespit edilmiştir. Bu genişleme numunenin sıcaklığa bağlı olarak manyetik malzemelerin belirgin özelliğinin burada da var olduğunu göstermiştir.

Kalınlığı 2.5 nm olan tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ numunenin 305 K sıcaklık değerindeki histerezis eğrisi şekil 4.7'da verilmiştir. Bu numunenin histerezis eğrisi manyetik alan yönelimine göre yaklaşık olarak simetrik olduğu görülmektedir. Çok az miktardaki pozitif bölgeye olan kayma eğiliminin varlığı görülmektedir. Ancak sıfır manyetik alan civarında numune koersif alan değerine sahip olmayan bir davranış sergilemiştir. Genel görünümde bu numuneye ait histerezis eğrisi iki bölmeye kuvvetli bir ayrılma eğilimi gösterdiği kaydedilmiştir. Bu davranış hayali spin-valf olarak adlandırılır. Bu spin-valf davranışı, 5 nm kalınlıklı filmle karşılaştırıldığında kalınlığın azalmasıyla birlikte ortaya

çıkıldığı tespit edilmiştir. Buradan film incelidikçe spin-valf (spin-valve) etkisinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.7 Tek katmanlı 2.5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin 305 K sıcaklığındaki manyetik histerezis eğrisi

Ayrıca bu tür filmlerdeki iki eğri tamamen birbirinden ayrılmış olarak ortaya çıkabilir. Bu durum numunenin tam kristal ve inceliğine bağlı olarak kendisini gösterir. Bu spin-valf yapılar, kayıt işlemlerinde ve manyetik hafıza uygulamaları gibi alanlarda tercih edilmektedir. İlave olarak bu davranış mikro manyetik araştırmalarda da önemli bir yere sahiptir. Eğer manyetik histerezis eğrilerindeki bu tür ikili yapılar tam olarak birbirinden ayrılmışlarsa buna spin-valf, burada olduğu gibi tam olarak ayrılmamış ise buna da hayali spin-valf davranış denir.

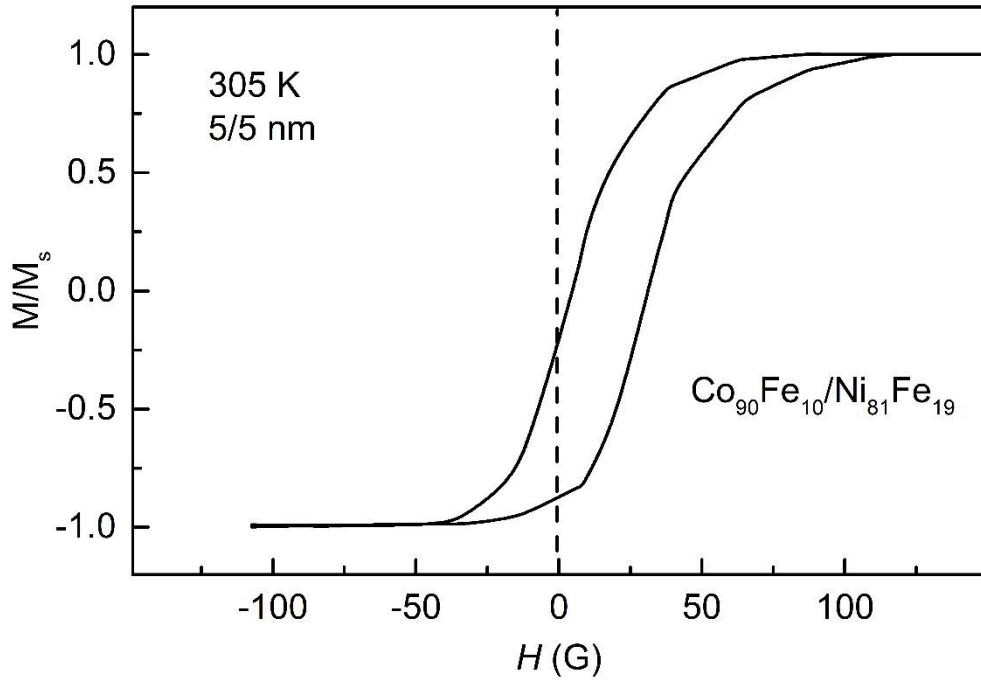
Kalınlığı 5 nm olan tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmin 10 K’ deki manyetik histerezis eğrisi alan yönelimine göre simetrik olmadığı kaydedilmiştir (Şekil 4.6). Bu filmin 10 K’deki histerezis eğrisi, 305 K dekinden tamamen farklı bir davranış sergileyerek negatif alan bölgesine kaydığı tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıkta (Şekil 4.6) 5 nm kalınlıklı filmin histerezis eğrisinin genişlediği gözlemlenmiştir. Bu negatif bölgeye kayma, değiş-tokuş etkisinden (exchange-bias) kaynaklanmaktadır. Genel olarak bu tür değiş-tokuş etkisine karşılık gelen anizotropi alan değeri, değiş-tokuş anizotropisidir. Bu anizotropi 10 K’ deki

$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ tek katmanlı film içerisindeki iki ferromanyetik bölge arasındaki antiferromanyetik etkileşmenin bir sonucudur.

Şekil 4.2 ve 4.4’ deki $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmin koersiviteleri, Şekil 4.6’ da $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ’ un koersif alan değerinden daha büyük olduğu gözlemlendi. Buradan çıkan sonuç; $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ’ in manyeto elektronik uygulamalar için daha uygun olduğu görüldü. Diğer bir ifadeyle manyeto elektronik sistemlerde $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ daha düşük dış manyetik alanla anahtarlama görevi yapabileceğini göstermiştir. Bunun nedeni $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filminin $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ’ e göre daha yumuşak numune olmasıdır.

4.1.3 Çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ve $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmlerinin sıcaklık ve kalınlığa bağlı olarak incelenmesi

Her tabakanın kalınlığı 5 nm olan termal okside silisyum (Si) alttaş üzerine büyütülen ferromanyetik çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ numunenin 305 K’ deki histerezis eğrisi Şekil 4.8’ de gösterilmiştir.

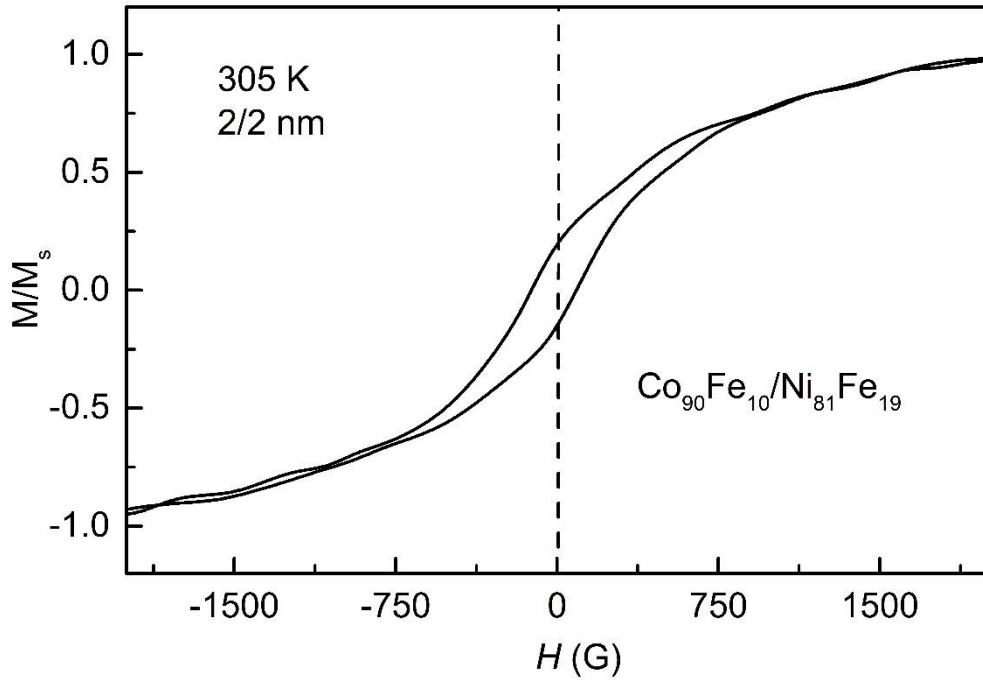


Şekil 4.8. 305 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 5 nm olan çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmine ait histerezis eğrisi

Bu histerezis eğrisi manyetik alanın pozitif bölgesine kaymaktadır. Bu pozitif manyetik alan bölgesine doğru kayma değiş-tokuş etkisinden (exchange-bias) ve sert $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ tabakadan kaynaklanmaktadır. Ayrıca her bir tabaka kalınlığı 5 nm olan

$\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ numunenin mıknatıslanmasının manyetik alan gelişimi dış manyetik alana göre duyarlı bir davranış sergilemektedir.

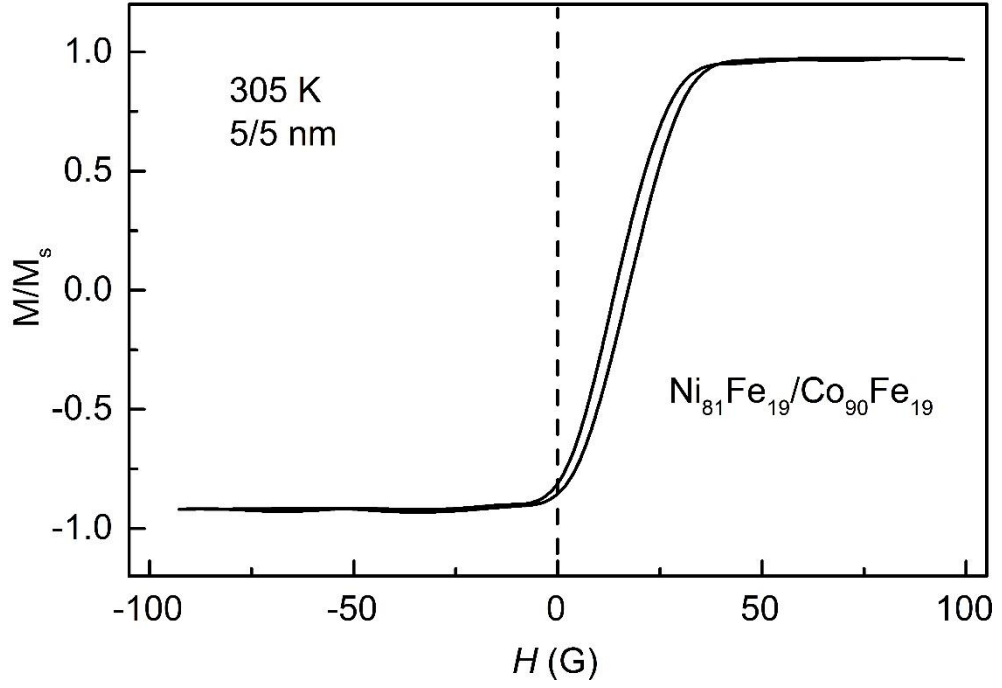
305 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 2 nm olan çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmine ait histerezis eğrisi Şekil 4.9’ da gösterilmiştir. Bu numunenin 305 K’ deki histerezis eğrisinin manyetik alan yönelimine göre simetrik davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 4.9. 305 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 2 nm olan çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmine ait histerezis eğrisi

Kalınlığı 2 nm olan çift katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ numunenin koersif alanı, doyum alanı ve doyum mıknatıslanma değerleri, kalınlığı 5 nm olan aynı malzemeninkine göre daha büyük olduğu gözlenmiştir.

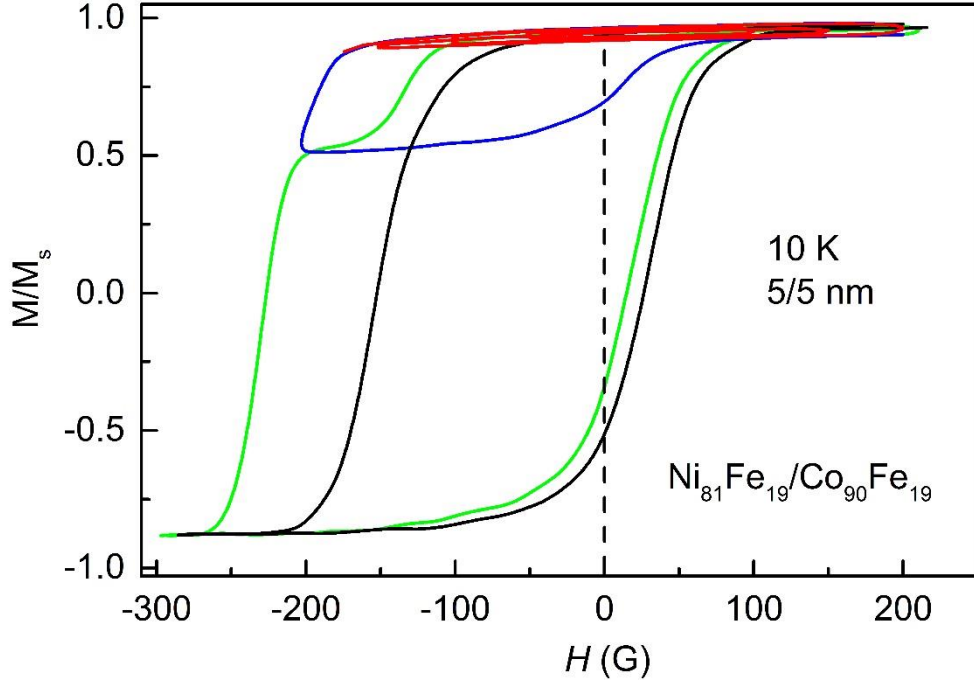
Şekil 4.10’ da katman kalınlıkları 5 nm olan çift tabakalı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numuneye ait 305 K sıcaklığındaki manyetik histerezis eğrisi görülmektedir. Burada numunenin 305 K’ deki koersif alanının küçük değerde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca aynı kalınlıktaki $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ numunede gözlenen sağa kayma davranışı burada da tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. 305 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numuneye ait histerezis eğrisi

Aynı kalınlıklı fakat alt taşığa göre sıra değiştiren filmin ($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) 305 K'deki koersif alan değerinin (Şekil 4.8) $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmin koersif alan değerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.10). Bu durum katmanlı film büyütülürken tercihe bağlı olarak üretilmesinde dikkat edilmesi gereken bir durum olarak tespit edilmiştir.

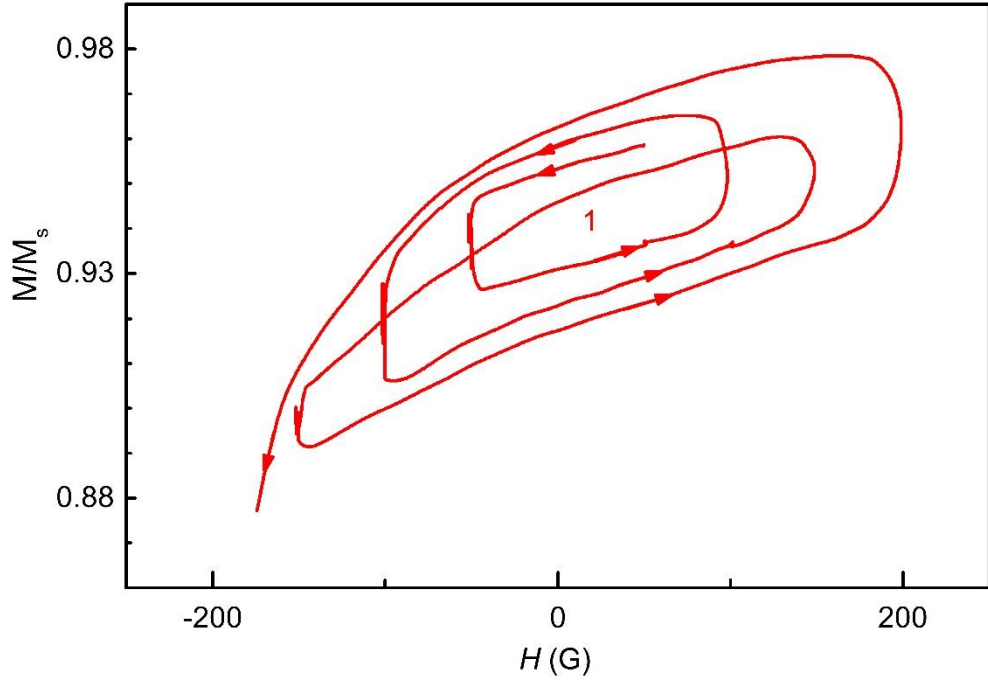
Şekil 4.10'daki numunenin 10 K' deki histerezis eğrisi ise Şekil 4.11'de görülmektedir. Buradaki histerezis eğrisinin 305 K' dekine göre daha geniş ve negatif manyetik alan bölgesine doğru kaydığı gözlenmiştir. 10 K' deki histerezis eğrisinin negatif alan bölgesine doğru kaymasına ek olarak koersif alanın da büyüdüğü gözlemlendi. Burada bahsedilen histerezis eğrisi siyah renkle gösterilen egridir. Diğer eğriler bir sonraki kısımda detaylıca anlatıldığı için burada bahsedilmemiştir.



Şekil 4.11. 10 K sıcaklığında her tabakanın kalınlığı 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmine ait histerezis eğrisi

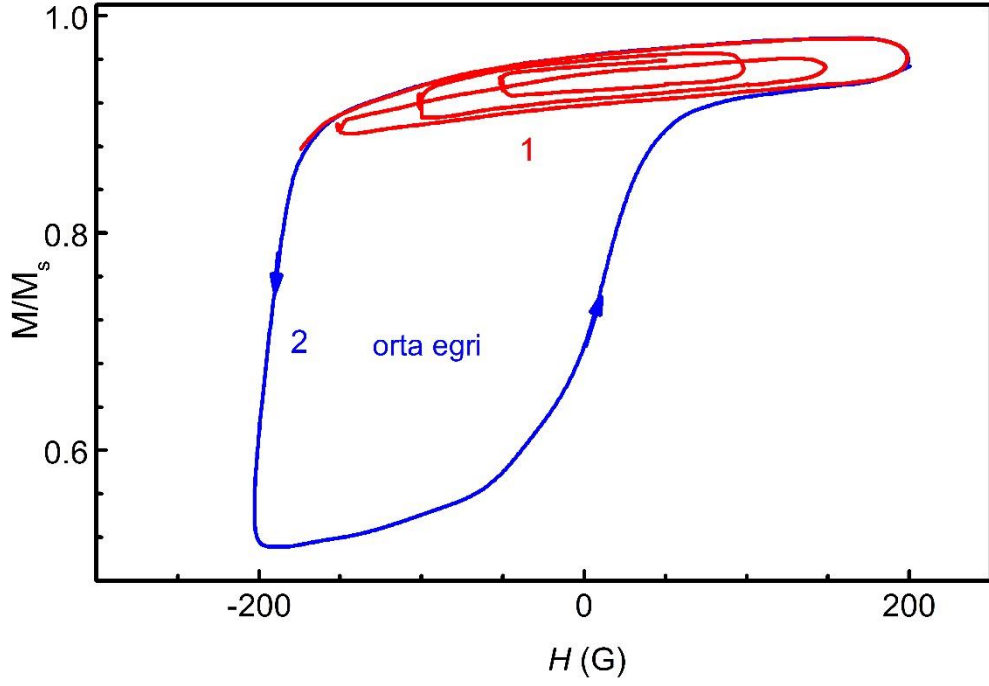
Negatif alana kayma değiş-tokuş etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu 10 K'deki değiş-tokuş etkisinin (exchange-bias) 305 K' deki etkisinden çok daha büyük olduğu görülmektedir. Bu numune için sırasıyla 305 K ve 10 K' deki pozitif ve negatif kaymalar sırasıyla değiş-tokuş ve alan soğutması (field cooling) altındaki etkiden kaynaklanmaktadır (Hong vd., 2012; Anandakumar vd., 2010). Bu kaymaların kaynağını mıknatıslanma açısından sert tabaka olan $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 'nun yumuşak olan $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ' u kilitlemesinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 4.11' de numunenin 10 K' deki histerezis eğrisinin daha açık şekli, literatüre uygun olacak şekilde küçük (kırmızı renkli eğri), orta (mavi renkli eğri) ve büyük (yeşil ve siyah renkli eğriler) histerezis eğrileri şeklinde isimlendirilip oluşum sırasına göre Şekil 4.12-13 ve 14' te detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Tabaka kalınlıkları 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K'deki küçük (minor) histerezis eğrisinin zamanla gelişimi

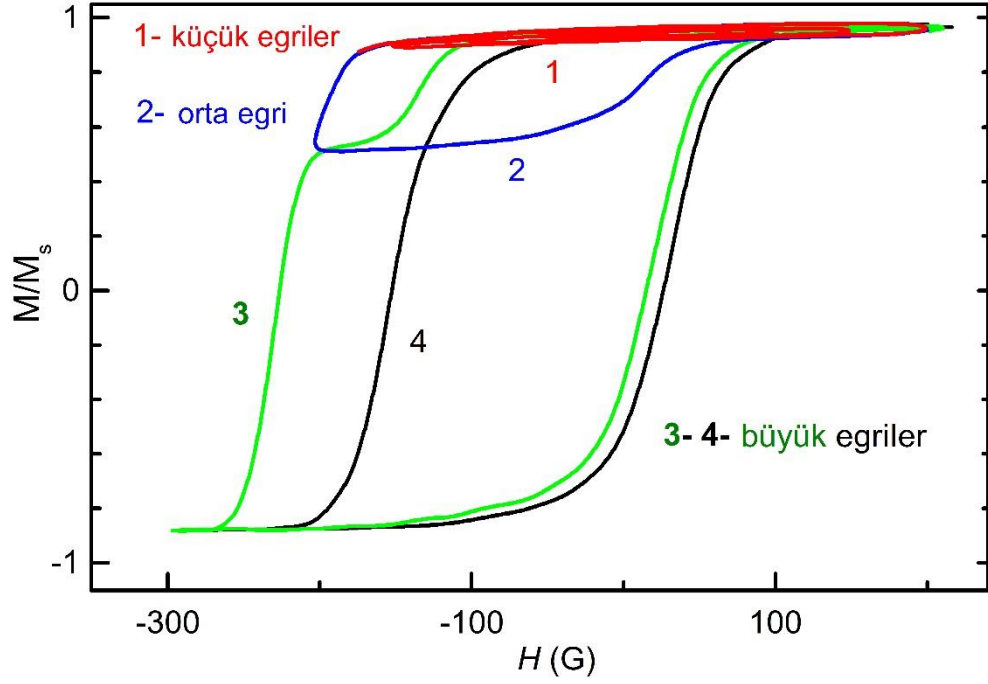
Şekil 4.12'de gözlenen küçük (minor) eğriler birbirini tekrar edecek şekilde genişleyerek bir orta (middle) eğriye kadar büyüdüğü gözlemlendi. Küçük manyetizasyon histerezis eğrisinin orta büyüklüğe ulaşana kadar birbirini tekrar etmesine özel değişiklikler (training effects) denir. Bu küçük (minor) eğrilerde manyetik alan eksenine göre bir kayma görülmemiştir. Ayrıca küçük histerezis eğrilerin mıknatıslanma ekseninin yukarısında kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.13. Tabaka kalınlıkları 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K’deki küçük (minör, kırmızı) ve orta (middle, mavi) histerezis eğrisinin zamanla gelişimi

Tabaka kalınlıkları 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K’deki küçük (minör, kırmızı) ve orta (middle, mavi) histerezis eğrisinin zamanla gelişimi Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Şekilde, küçük histerezis eğrilerinin bittiği yerde orta büyüklükteki histerezis eğrisinin başladığı gözlemlendi. Ayrıca belli bir erişkinliğe ulaşan bu küçük (minor) eğriler, orta büyüklüğe (middle) eriştiğinde eğrilerin birbirini tekrar etmesi bittiği gibi sola kayma da görülmüştür. Dikkatli bir şekilde bakılırsa küçük ve orta eğrilerin her ikisinin de mıknatıslanma ekseninin yukarısında kaldığı tespit edilmiştir.

Tabaka kalınlıkları 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K’deki histerezis eğrileri zamana bağlı olarak sırasıyla küçük, orta ve büyük döngüler olarak Şekil 4.14’te kaydedilmiştir. Bu küçük, orta ve büyük histerezis eğrilerinin zamana bağlı olarak oluşum sırası 1, 2, 3 ve 4 rakamlarıyla numaralandırılmıştır.

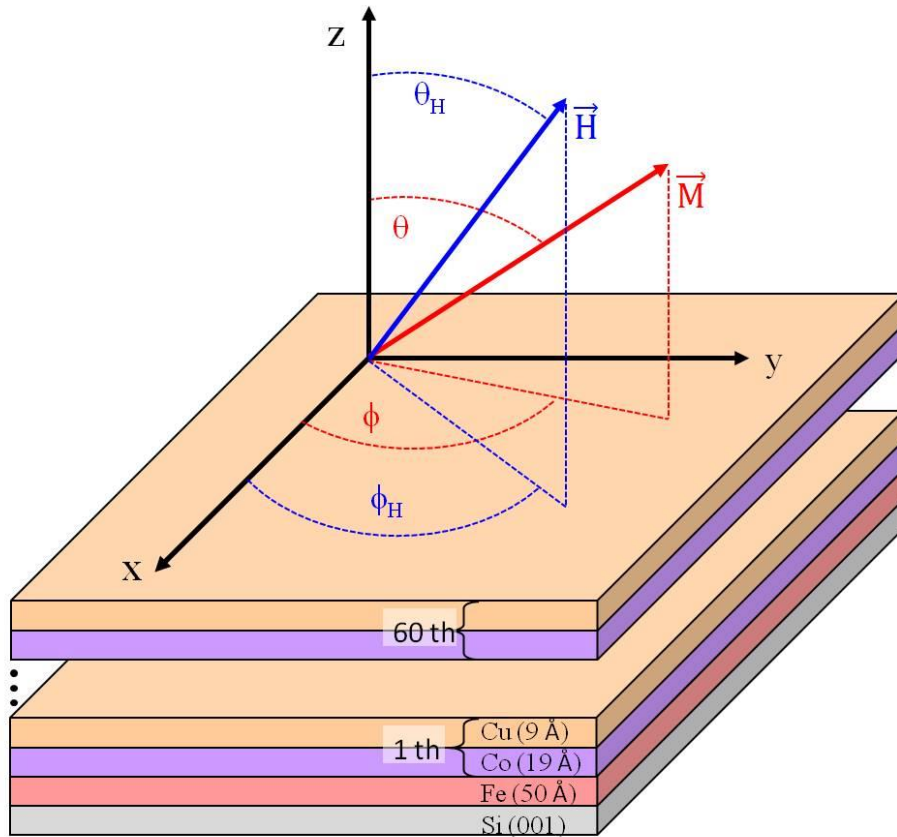


Şekil 4.14. Tabaka kalınlıkları 5 nm olan çift katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ numunenin 10 K'deki küçük (minör, kırmızı), orta (middle, mavi) ve büyük (majör, yeşil ve siyah) histerezis eğrisinin zamanla gelişimi

Zamanla orta büyüklükteki histerezis eğrisi (mavi) büyür ve artık tek bir eğri üzerinden geçecek şekilde konuşlanır. Mıknatıslanmanın bu konuşlanması büyük histerezis eğrisi olarak adlandırılır (yeşil, siyah). Orta büyüklükteki sola kaymanın, büyük histereziste de devam ettiği tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıkta (10 K) bu numunenin büyük histerezis eğrisinin sola kayması değiş-tokuş etkileşmesi ile ilgilidir. Daha açık bir ifadeyle bu durum sert ve yumuşak tabakalar arasındaki değiş-tokuş etkileşmesinin neden olduğu anahtarlama (switching) etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buradaki çift katmanlı filme düşük sıcaklıkta görülen sert ve yumuşak tabakalar arasındaki anahtarlama etkisi sıcaklık ve filmin tabakalarının kalınlıklarıyla ters orantılıdır. Burada yumuşak katman ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) sert katman ($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$) tarafından manyetik olarak kontrol edilmektedir. Bu tez çalışmasının teorik kısmında şematik olarak gösterilen Şekil 2.7' deki gibi bir yumuşak tabakada bütün atomik kalınlıklar değil de daha çok yumuşak tabakanın ortalama bir mıknatıslanma değeriyle uyumlu olduğu sonucuna ulaşılır. Bu durum değiş-tokuş etkileşmesinin çok özel durumu olan değiş-tokuş etkileşmeli yay malzemelerden (exchange spring magnets) ayrılır. Değiş-tokuş etkileşmeli yay malzemelerde tabakaların kalınlıkları belirli değerlerden küçük olmamalıdır (Yıldız vd., 2004).

Bu tip zamana bağılı olarak gelişen histerezis eğrilerinin manyetik hafıza ve kayıt teknolojisi için çok sayıda çalışmalar yapılmaktadır. Histerezis eğrileri zamanla (küçük ve orta) manyetik alanın yönelimine, büyük eğri ise hem manyetik alanın hem de mıknatıslanmanın yönelimine bağılı olduğu tespit edilmiştir. Manyetizasyondaki bu zamana bağılı değişimler, yerel etkileşme alanı tarafından yönlendirilmektedir. Nano ölçekli ince filmdeki bu zamana bağılı davranış El-Hilo ve arkadaşları (El-Hilo vd., 1993) tarafından geliştirilen formülasyon kullanılarak detaylı bir hesaplama yapılabilir. Ayrıca küçük ve orta histerezis eğrilerinin düşük sıcaklıktaki bu davranışları zamana bağılı manyetik viskozite etkileri ile ilişkili olduğu görülmüştür. Viskozite etkisi, mıknatıslanmanın geri dönüşü olmayan (geri dönülemez/tersinmez) bileşenindeki zamana bağılı olarak gelişiminden sorumlu olduğu gözlenmiştir.

4.2 Nano Ölçekli Çok Katmanlı Filmin FMR ve VSM Çalışmaları

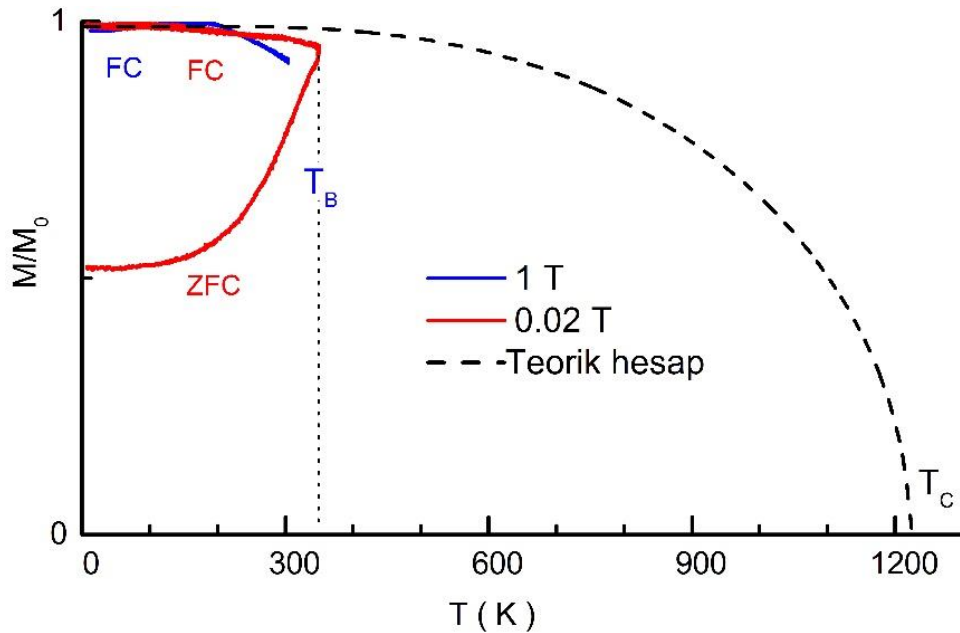


Şekil 4.15. Ferromanyetik rezonans deneyleri için, uygulanan H manyetik alanın dc-bileşeni, M denge manyetizasyonunun bağıl yönelimleri ve çok katmanlı sistemin örnek geometrisi

60 katmanlı Cu/Co tekrar eden ikili yapıdan oluşan $(60x(\text{Co/Cu}))/\text{Fe/Si}$ çok katmanlı film sıçratma tekniği ile hazırlanmıştır. Bu film, Si (001) alttaş üzerine depolanan ince bir Fe (50 Å) katman ve bu tampon katman üzerine büyütülmüştür. Bu Cu ve Co katmanının bireysel kalınlıkları sırasıyla yaklaşık 9 Å ve 19 Å dur.

4.2.1 Çok katmanlı $(\text{Cu/Co})_{60}/\text{Fe}$ filmine ait mıknatıslanmanın sıcaklık gelişimi

Çok katmanlı $(\text{Cu/Co})_{60}/\text{Fe}$ filmine ait normalize manyetizasyonunun sıcaklıkla değişimi Şekil 2 de gösterilmiştir. Manyetizasyon eğrileri 1 Tesla (FC) ve 200 Gauss (FC, ZFC) soğutma altında deneysel veriler kullanılarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.16. Normalize edilmiş deneysel manyetizasyon eğrilerinin 1 T (FC) ve 200 G (FC, ZFC) soğutma altında sıcaklığa göre değişimi ve 200 G (FC) deki deneysel manyetizasyon verilerinin teorik olarak fit edilmesiyle elde edilen kesikli eğrinin sıcaklık gelişimi

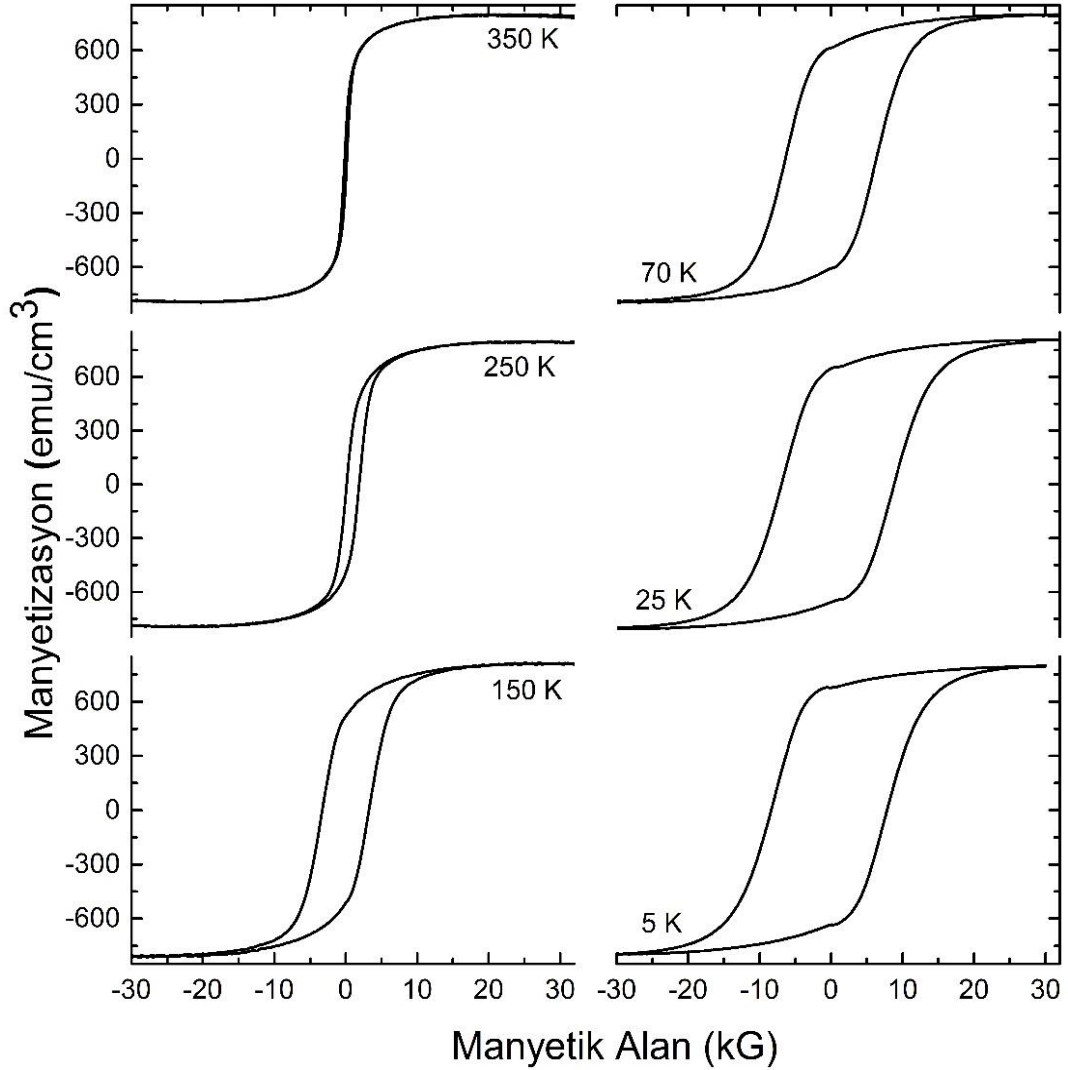
Şekil 4.6' da görüldüğü gibi farklı manyetik alan altındaki mıknatıslanmanın azalan sıcaklıkla gelişimi 300 K (oda sıcaklığı) bölgesinin altında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Manyetizasyon eğrilerinin manyetik alan altında soğutma (FC) eğrisi, sıfır manyetik alan altında soğutma (ZFC) değerine göre daha az değişme göstermiştir. FC ve ZFC soğutma altında manyetizasyon eğrileri azalan sıcaklıkla beraber yaklaşık 350 K' da ayrılma göstermektedir. Bu ayrılmanın başladığı değer engelleme sıcaklığı (Blocking

Temperature, T_B) değerine karşılık gelmektedir. Şekil 4.6' daki kesikli çizgi teorik hesaplamayı göstermektedir. Bu teorik manyetizasyon eğrisi, deneysel veriler üzerinde $J=1/2$ ve $g=3.33$ parametreleri Brillouin fonksiyonunda kullanılarak elde edildi. ZFC altında manyetizasyon eğrisi sıcaklık azalırken, T_B sıcaklığından itibaren çok katmanlı filmin manyetik momentlerinin kararlılığı nedeniyle düşüş göstermesinden kaynaklandığı görülmüştür. Manyetizasyonun bu özelliği T_B sıcaklığının altında ferromanyetik rejim olarak ifade edilir. Manyetizasyon değerinin sıcaklık artarken sıfır değerini aldığı sıcaklık Curie sıcaklığına (T_C) karşılık gelir. Bu sıcaklıkta film, ferromanyetik (FM) fazdan paramanyetik (PM) faza geçer. Filmin Curie sıcaklığı/ T_C , manyetizasyon-sıcaklık grafiğine ait deneysel verilerin teorik olarak fit edilmesiyle yaklaşık 1250 K olarak bulundu. Si (001) alttaş üzerindeki çok katmanlı $(Cu/Co)_{60}/Fe$ filminin, deneysel 0-350 K sıcaklık aralığındaki bu çok yavaş düşüşleri filmin çok kararlı yapıda olduğunu gösterir. Curie sıcaklığı (T_C), T_B den her zaman daha büyük olması durumu burada da gözlemlendi. Manyetizasyonun sıcaklık bağımlılığı $M(T)$, genel olarak $T < 0.5T_C$ için Bloch yasası ile açıklanır.

$$M(T) = M(0)(1 - \tilde{B}T^{3/2}) \quad (4.1)$$

Burada $\tilde{B}$ parametresi, $K^{-3/2}$ boyutunda spin dalga Bloch parametresidir (Spin wave Bloch Parameter). Efektif $T^{3/2}$ yasasının iki boyutlu sistemler için geçerli olduğu Posth ve arkadaşları (Posth vd., 2009) tarafından ortaya konulmuştur. Hacimsel yapıli malzemeler için manyetizasyonun $T^{3/2}$ ile sıcaklık bağımlılığı 5-300 K aralığında bütün çok katmanlılar için gözlenmiştir (Lassri vd., 2004).

4.2.2 Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe filminin manyetik histerezis eğrilerinin sıcaklık gelişimi



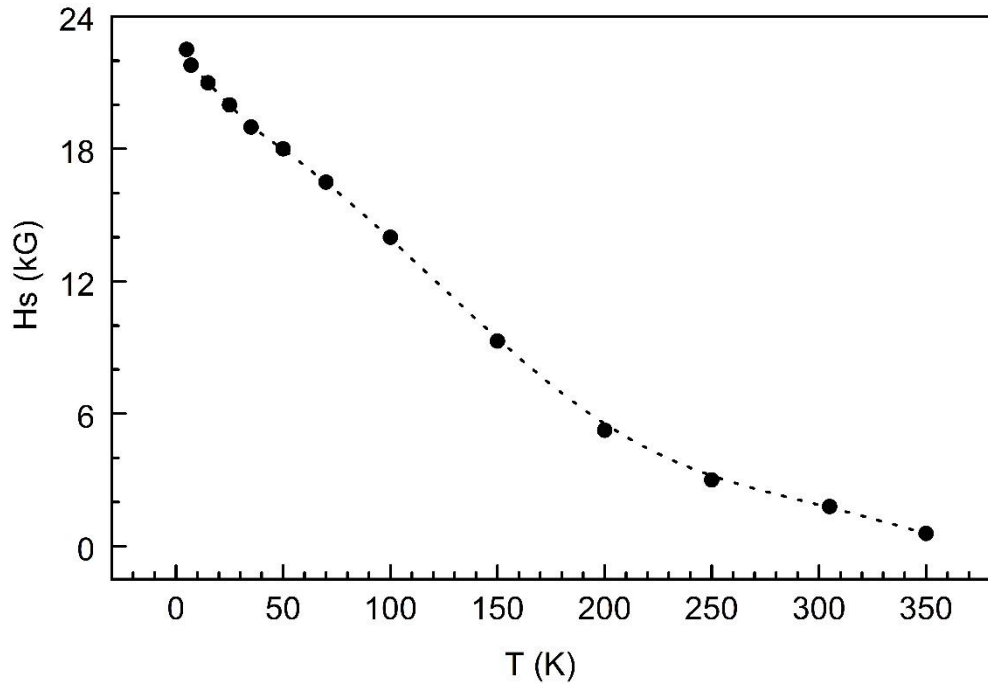
Şekil 4.17. Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe filmin bazı seçilmiş sıcaklıklardaki manyetik histerezis eğrilerinin azalan sıcaklıkla gelişimi

Şekil 4.17’ de (Cu/Co)₆₀/Fe filminin 350 - 5 K aralığında azalan sıcaklıkla birlikte bazı seçilmiş sıcaklıklar için manyetik histerezis eğrileri görülmektedir. Buradaki histerezis eğrileri 1 T FC altında kaydedilmiştir. Azalan sıcaklıkla birlikte histerezis eğrilerinin genişlediği de tespit edilmiştir. Çok katmanlı film 350 K de yaklaşık paramanyetik bir davranış sergilediği için bu zayıf ferromanyetik eğri olarak adlandırılmıştır. Buna karşın 5 K da ise histerezis eğrisinin son derece geniş koersif alanlı bir eğriye dönüştüğü görülmüştür. Bu düşük sıcaklıkta filmin en yüksek ferromanyetik özellik sergilediği tespit edilmiştir. Böylece bu çok katmanlı filmin histerezis eğrilerinin sıcaklığa etkin bir

bağımlılık gösterdiği görülmüştür. Ek olarak, farklı sıcaklıklardaki bütün histerezis eğrileri sıfır manyetik alana göre simetrik bir şekle sahip oldukları tespit edilmiştir. Histerezis eğrilerindeki genişleme kristal fazların oluşumuna atfedildi. Bu özelliğin de manyetik anizotropi ile bağlantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

4.2.3 Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe filmine ait H_s , H_c , M_r ve M_s ifadelerinin sıcaklık gelişimi

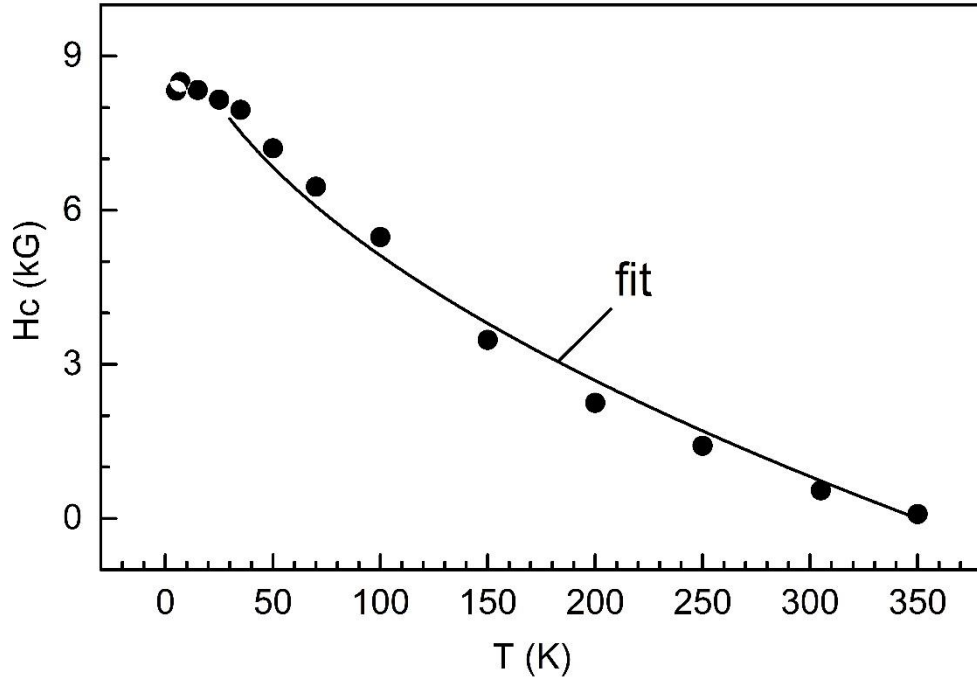
Deneysel doyum alan değerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Genel görünümde artan sıcaklıkla birlikte doyum alanın üstel olarak azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.18. Deneysel doyum alanı (H_s)' nin sıcaklık gelişimi

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi içi dolu yuvarlaklar deneysel histerezis eğrilerinden elde edilen verileri göstermektedir. Doyum alan (H_s) değerleri 350 K’ de en düşük, 5 K’ de ise en yüksek değerlere sahip olduğu bulunmuştur. Buradan doyum alanının sıcaklığa kuvvetli bağımlılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Koersif alanın sıcaklığa bağlı değişimi de şekil 4.19’da gösterilmiştir. Burada da koersif alan artan sıcaklıkla birlikte üstel olarak azalmaktadır.



Şekil 4.19. Deneysel Koersif alan (H_c)'nin sıcaklık gelişimi ve bunun teorik hesaplanması

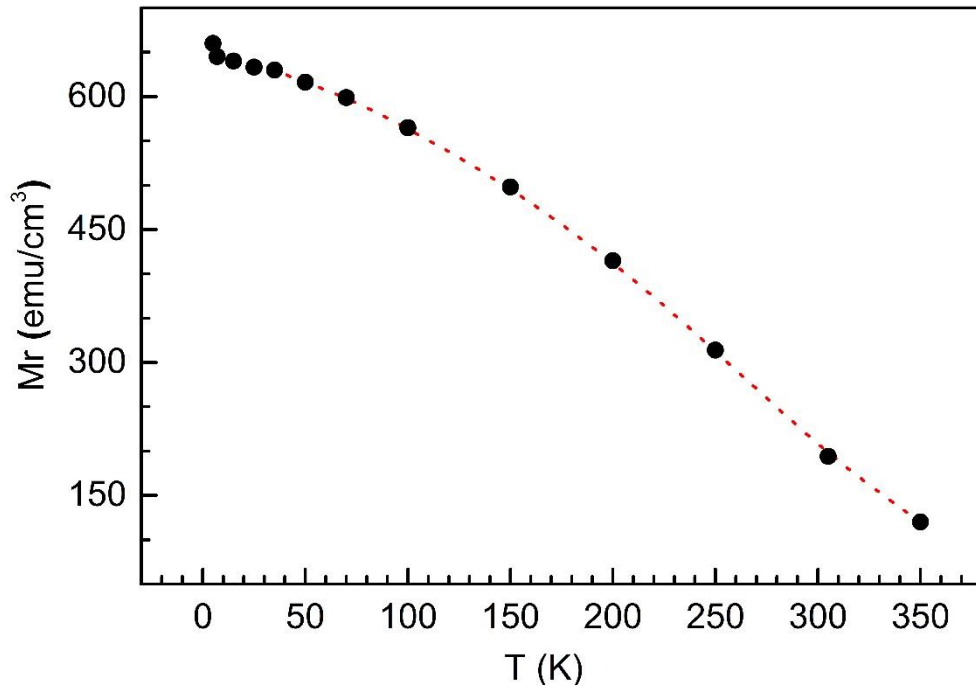
Şekil 4.19'da içi dolu yuvarlaklar deneysel histerezis eğrilerinden elde edilen verileri, sürekli çizgi ise Kneller yasasına göre teorik hesaplamayı göstermektedir. Burada da koersivitenin sıcaklığa kuvvetli bağlılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu alanların 350 K' de en düşük, 5 K' de ise en yüksek değerlere sahiptir. Doyum alan (H_s) ve koersif alan (H_c , koersivite) değerleri artan sıcaklıkla birlikte yaklaşık olarak benzer davranış sergilemektedirler. Düşük sıcaklıklardaki koersivitedeki bu artış sadece manyeto-kristal anizotropiden değil aynı zamanda film yüzeyindeki spin düzensizliğinden kaynaklı değiş-tokuş etkileşmesinden de etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Buradan hareketle filmin, yüksek sıcaklıkta termal dalgalanma enerjisinin manyetizasyon enerjisinden daha büyük olduğu böylece numunenin paramanyetik bir malzeme gibi davrandığı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak numunenin yine de küçük koersif alan değerinin olduğu gözlenmiştir. Numune içerisindeki termal aktivasyon enerjisi, belli bir sıcaklığın (T_B , Blocking) üzerinde dalgalanan manyetik domenlerin kohesif (yapışkan) enerjisinden daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu özelliğin, bir dış manyetik alanda film içerisindeki manyetik momentlerin düzeni için yeterli enerjiyi sağladığı görülmüştür. Böylece $T > T_B$ de, histeretik davranış bastırılarak sistemin güçlü bir paramanyet gibi davranmaya

zorlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 4.8 (b)' deki deneysel koersif alan (H_c) eğrisinin, Kneller yasasına

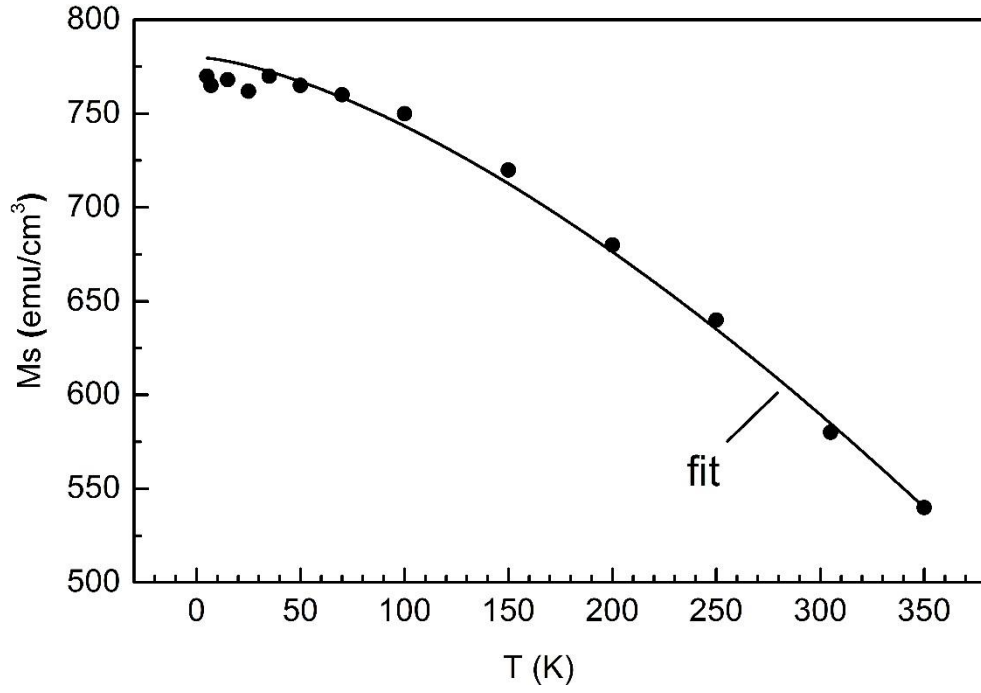
$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - (T/T_B)^{1/2} \right] \quad (4.2)$$

göre teorik fiti yapılmıştır. Bu fit sonucunda $H_c(0) = 11 \pm 0.02$ Oe ve $T_B = 350 \pm 5$ K parametreleri elde edildi. Burada deneysel ve teorik sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Ayrıca etkin değiş-tokuş etkileşme anizotropisi tersine manyetizasyona karşı koyma eğiliminde olduğu tespit edildi.

Şekil 4.20' de azalan sıcaklıkla birlikte kalıcı mıknatıslanmanın logaritmik bir artışı gözlemlendi. Bu davranış doyum mıknatıslanma davranışına benzemektedir. Bu nedenle doyum mıknatıslanmanın sıcaklıkla değişimi Şekil 4.21' de verilmiştir.



Şekil 4.20. Deneysel kalıcı mıknatıslanma (M_r)' nin sıcaklık gelişimi

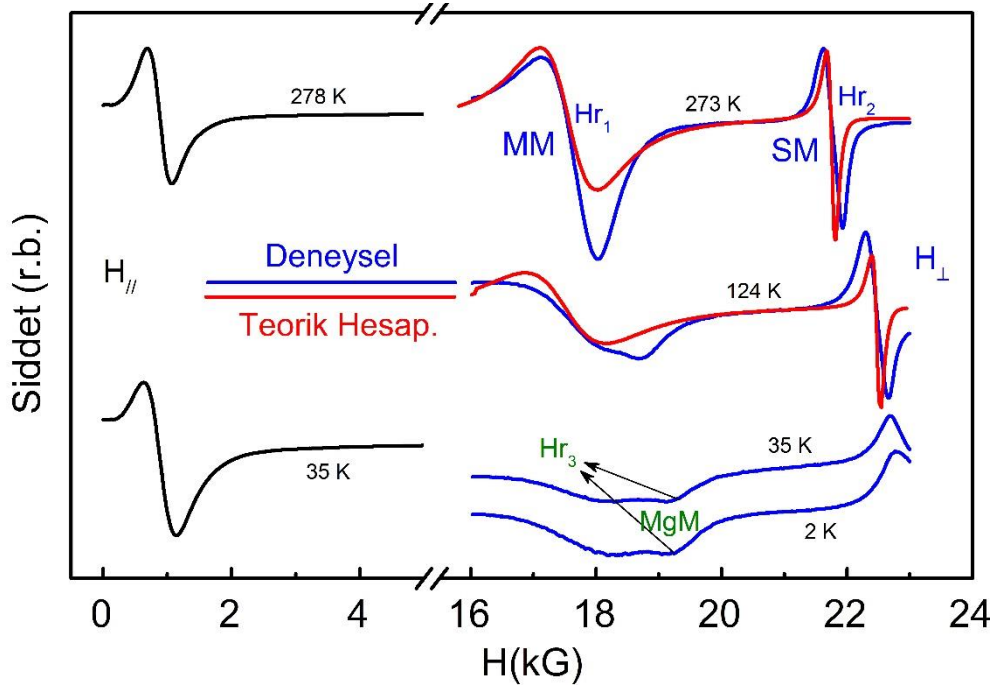


Şekil 4.21. Deneysel doyum mıknatıslanması (M_s)' nin sıcaklık gelişimi ve bunun teorik hesaplanması

Şekil 4.21'deki içi dolu yuvarlaklar deneysel verileri, sürekli çizgi ise fit değerini göstermektedir. 5 K civarındaki küçük değişim spin-valf davranışından kaynaklanmaktadır. 5-50 K sıcaklık aralığında kalıcı ve doyum mıknatıslanmasındaki değişim daha yavaştır. Doyum mıknatıslanma (M_s) eğrisi denklem 4.1 deki $M(T) = M(0) (1 - \tilde{B}T^{3/2})$ Bloch yasası ile fit edilmiştir. Bu fit sonucunda $M_s(0) = 1700 \pm 20$ emu/cm³ ve Bloch parametresi $\tilde{B} = (4.7 \pm 0.1) \times 10^{-5} \text{ K}^{-3/2}$ olarak elde edildi. Buradaki genel davranıştan spin-valf davranışının olduğu açıkça söylenemez. Fakat düşük sıcaklıkta (5 K) spin-valf davranış sergileme eğiliminde olduğu söylenebilir.

4.2.4 Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe filmine ait FMR spektrumlarının sıcaklık gelişimi

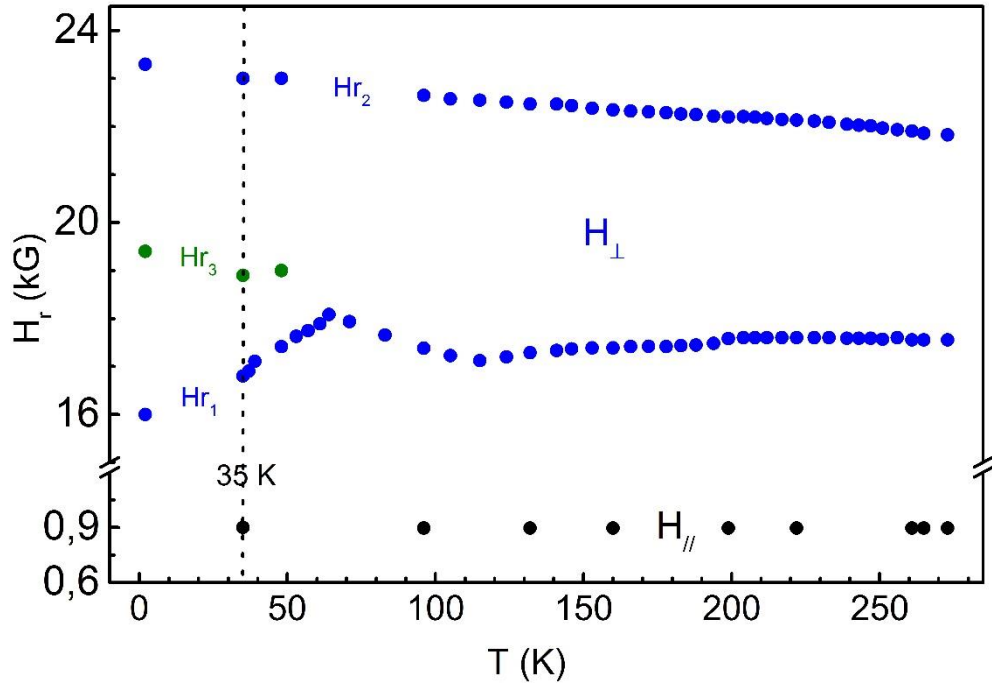
Şekil 4.22’de oda sıcaklığı civarından itibaren düşük sıcaklığa (~35 ve 2 K) kadar sırasıyla paralel ve dik pozisyonlarda FMR sinyallerinin sıcaklıkla gelişimi görülmektedir.



Şekil 4.22. Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe numunenin paralel ve dik doğrultuda elde edilen FMR sinyallerinin azalan sıcaklıkla gelişimi ve bunların teorik hesaplamaları

Şekil 4.22’de paralel pozisyonunda FMR sinyallerinde herhangi bir kayma görülmemektedir. Bunun nedeni, manyetik kolay eksenin (easy-axis) film yüzeyine paralel olmasıdır. Numunenin yüzeyine paralel ve düşük manyetik alanda filme ait tek FMR sinyali gözlenmiştir. Manyetik alanın numuneye paralel pozisyonunda 278 K ve 35 K sıcaklıklardaki rezonans alanda herhangi bir dikkate değer değişiklik görülmemektedir. Bu davranışın filmin kararlı kristal yapısından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Manyetik alanın film yüzeyine dik pozisyonunda 273 K, 35 K ve 2 K da sırasıyla iki ve üç FMR sinyali gözlenmiştir. Oysa paralel pozisyonunda tek sinyal gözlenmişti. Dik pozisyonadaki birden fazla FMR sinyalleri filmin yüzeyinden kaynaklanan yüzey spin dalga modları olduğu tespit edilmiştir. Bu sinyaller şekil 4.22’de Hr₁, Hr₂ ve Hr₃ olarak isimlendirilmiştir.

FMR sinyallerine ait rezonans alanlarının sıcaklık gelişimi, dış manyetik alanın film yüzeyine paralel ve dik yönelimine göre Şekil 4.23'te tüm detayı ile gösterilmiştir.

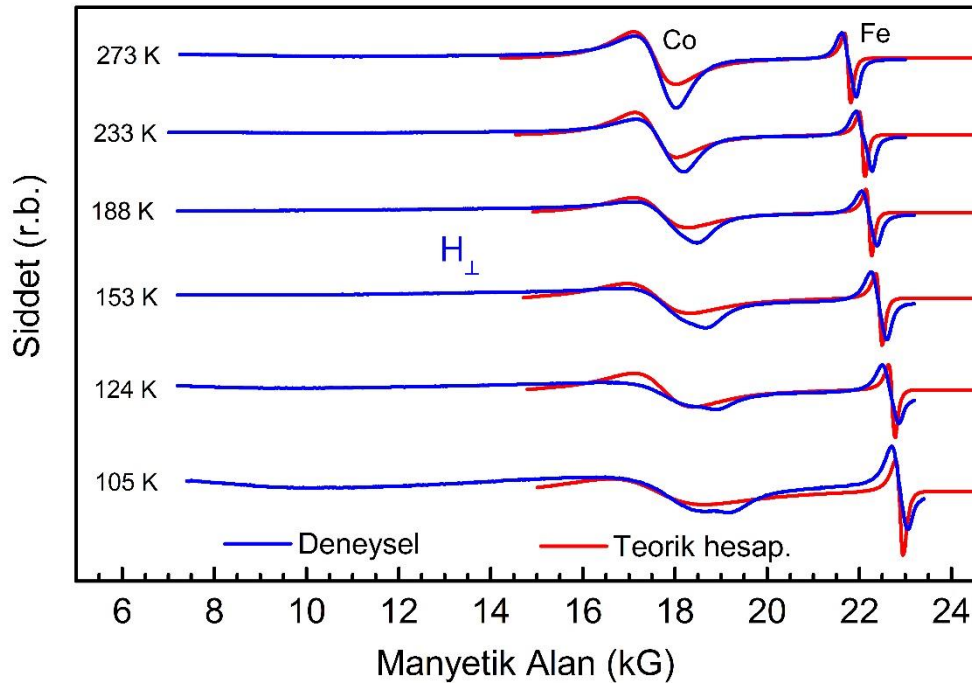


Şekil 4.23. Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe numunenin oda sıcaklığından başlayarak düşük sıcaklığa kadar dik ve paralel doğrultularda deneysel FMR sinyallerinin rezonans alan değerlerinin sıcaklık gelişimi

Şekil 4.23'te H_{r2} ile gösterilen dik doğrultudaki FMR sinyalinin ikinci rezonans alan değerinin azalan sıcaklıkla beraber doğrusal bir artış sergilemektedir. H_{r1} ve H_{r3} ile gösterilen rezonans alan değerleri birlikte düşünüldüğünde 100 K civarına kadar H_{r1} 'de yumuşak doğrusal bir azalma gözlenmiştir. H_{r3} 'te ise azalan sıcaklıkla birlikte bir artış vardır. 70 K civarında genel görünüme uymayan bir yapı tespit edilmiştir. Bu da 70 K'den itibaren sinyalin yarılarak ayrışmasından kaynaklanmaktadır. 60 K civarından sonra H_{r1} , azalan sıcaklıkla birlikte hızlı bir azalma sergilemektedir. Dik pozisyonda ana mod (main mode, MM) ve yüzey mod (surface mode, SM) ların çok katmanlı ince filmlerde gözlenen tipik bir özellik olduğu tespit edilmiştir. Bu tür etkiler şekil anizotropisi ve yüzey anizotropisine atfedilmiştir. Şekil 4.22'de, 35 K ve 2 K'de gözlenen düşük alandaki sinyallerin oda sıcaklığında üst üste binerek tek sinyal halinde görülmektedir. Manyetik alanın film yüzeyine dik pozisyonunda, azalan sıcaklıkla birlikte yüksek alandaki sinyaller adım adım daha yüksek alan bölgelerine kaydığı görüldü. Genel görünümde azalan sıcaklıkla birlikte H_{r2} ve H_{r1} birbirinden ayrışma eğilimindedir. 70 K'

dan sonra da ayrışma H_{r1} ve H_{r3} ’ le devam etmektedir. Bu tez çalışmasındaki sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu olduğu görüldü (Schmool vd., 2004, 2006 ; Guskos vd., 2013; Veinger vd., 2009). Sıcaklık gelişiminde 35-50 K civarında dik pozisyondaki değişiklikler, kritik film kalınlığı ve yüzey alanının hacime oranıyla da ilintilidir. Bu özellik filmin yüzey anizotropisiyle de ilgilidir. Eğer yüzey anizotropisi hacim anizotropisinden (kristal anizotropi) bağımsız olarak hareket etseydi tam olarak kritik film kalınlığı altında çalışıldığı sonucuna ulaşıldı.

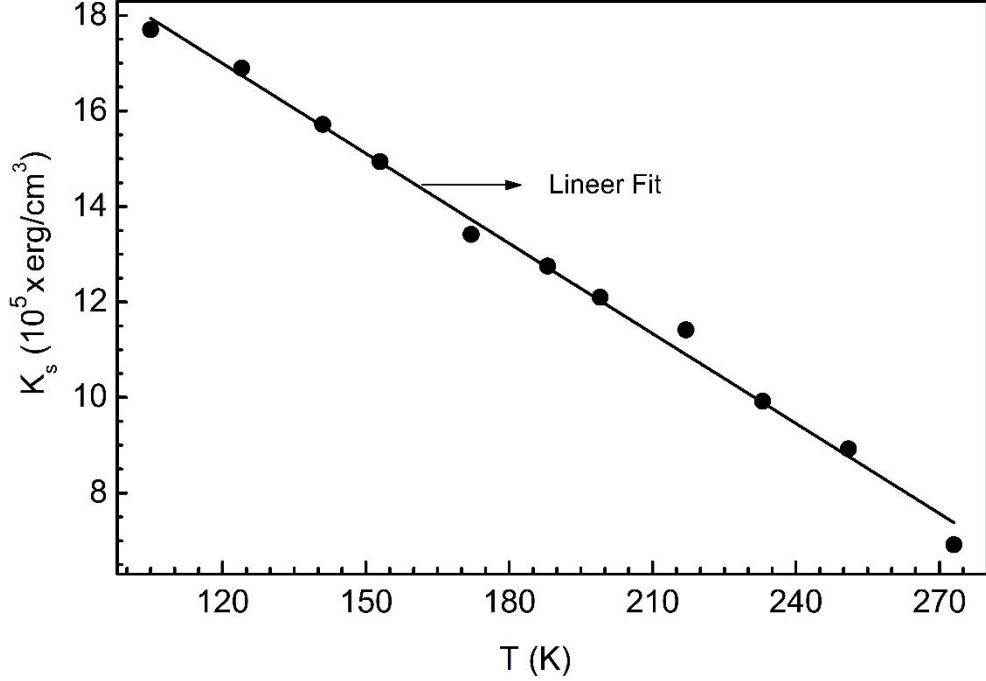
FMR sinyallerinin dik pozisyondaki sıcaklık gelişimi ve bunların teorik sinyalleri şekil 4.24 ve 273-105 K sıcaklık aralığında gösterilmiştir.



Şekil 4.24 Bazı seçilmiş sıcaklıklara ait dik pozisyonda elde edilen FMR sinyalleri ve bunların teorik fitleri

Şekil 4.24’ te teorik ve deneysel FMR sinyallerin iyi bir uyum içinde oldukları gözlenmektedir. 18 kG civarındaki ilk pik Co ve 23 kG’ daki ikinci pik Fe katmanlarından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Dik pozisyonda FMR sinyali oda sıcaklığı civarında rezonans alan değerlerine göre simetrik oldukları gözlemlendi. Co katmanlarından kaynaklanan FMR sinyali düşük sıcaklık bölgesinde açıkça iki sinyale ayrılmaktadır. 18 kG civarındaki iki pikten daha yüksek alandaki ikinci pik Co katmanlarının yüzey

bölgesindeki ya da Co-Fe katmanları arasındaki değiş-tokuş etkilerinden kaynaklanmaktadır.

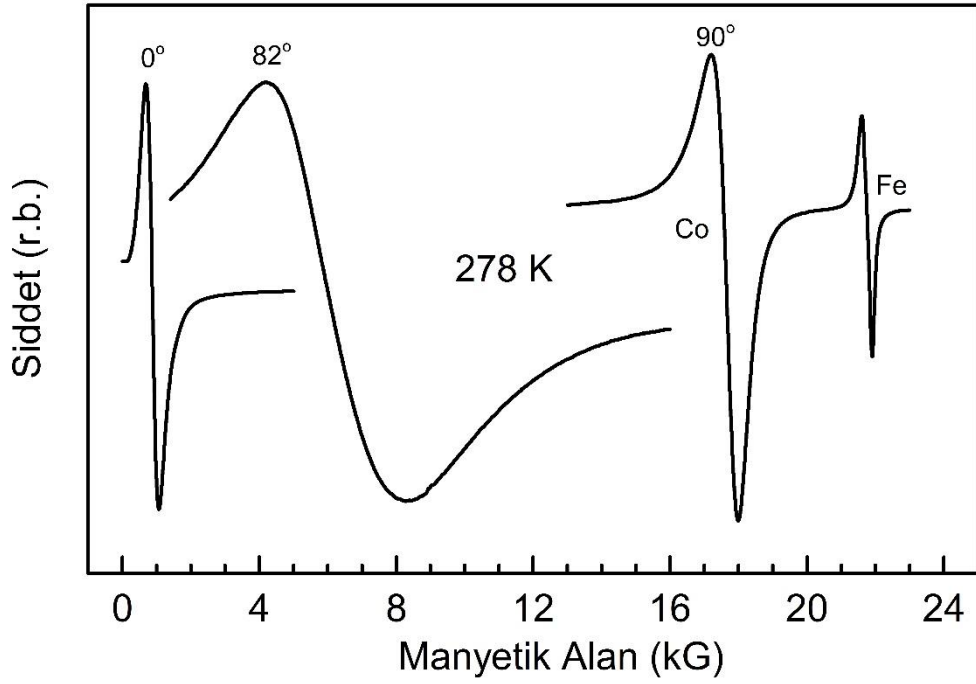


Şekil 4.25 Dik doğrultuda farklı sıcaklıklarda deneysel FMR sinyallerinin teorik fitinden elde edilen yüzey anizotropi sabitinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.25’ te yüzey anizotropi sabitinin (K_s) sıcaklık bağımlılığı teorik FMR sinyallerinin analizlerinden elde edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen yüzey anizotropi sabiti (K_s) 273 K den 105 K’e kadar azalan sıcaklıkla doğrusal/lineer olarak değiştiği gözlemlendi ve lineer olarak fit edilmiştir. Bu fitten düşük ve yüksek sıcaklıktaki yüzey anizotropi sabiti elde edilebilir. Bu tez çalışmasında yüzey anizotropi sabitinin deneysel verilerin olduğu bölgede kalınmasına özen gösterilmiştir.

4.2.5 Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe filminin FMR spektrumlarının açısal bağımlılığı

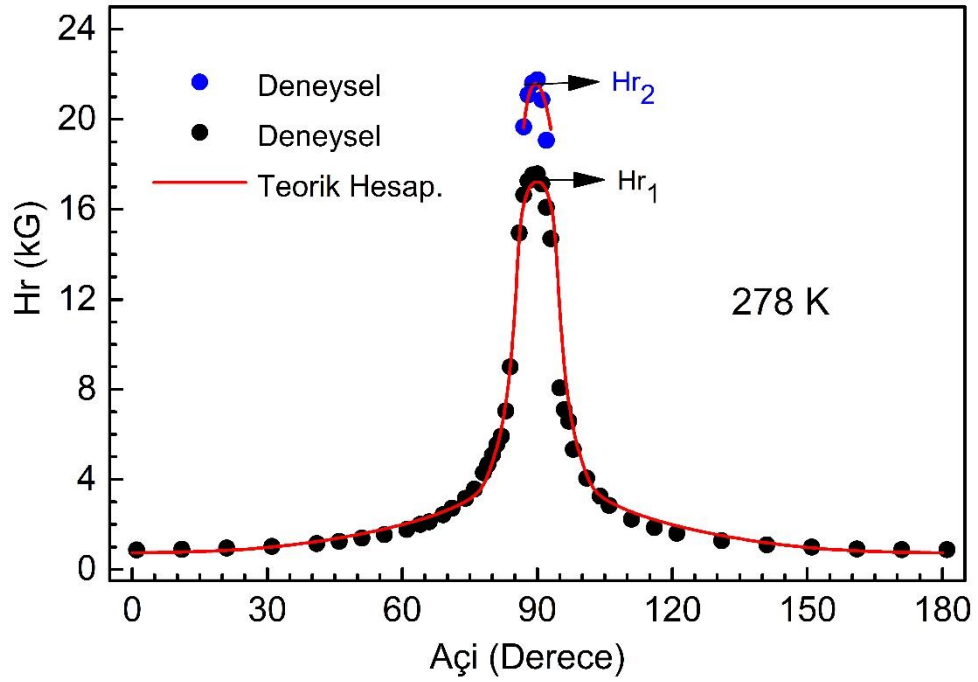
Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀Fe numunenin 278 K ve 278 K ve OPG’ de seçilmiş bazı açılardaki FMR sinyalleri Şekil 4.26’ da verilmiştir.



Şekil 4.26. Çok katmanlı $(\text{Cu/Co})_{60}/\text{Fe}$ numunenin 278 K’ de FMR sinyallerinin açısal bağımlılığı

Şekil 4.26’ da numunenin OPG’deki FMR spektrumları tek sinyal olarak gözlenmiştir. Bu FMR sinyalleri kuvvetli bir şekilde açısal bağımlılık göstermektedir. 278 K de FMR sinyallerinde 0° de tek pik gözlenirken, 90° de iki sinyal gözlenmiştir. 90° deki birinci sinyal ana mod (main mod, MM), ikinci sinyal ise yüzey modu (surface mod, SM) olarak atfedilmiştir. Buradaki FMR sinyallerin çizgi genişliklerinin 85° ye kadar arttığı gözlenmiştir. 86° den itibaren sinyallerin ayrılmaya başladığı gözlenmiştir. Dik pozisyondaki sinyaller paralel pozisyondakine göre iyice ayrıştığı görüldü.

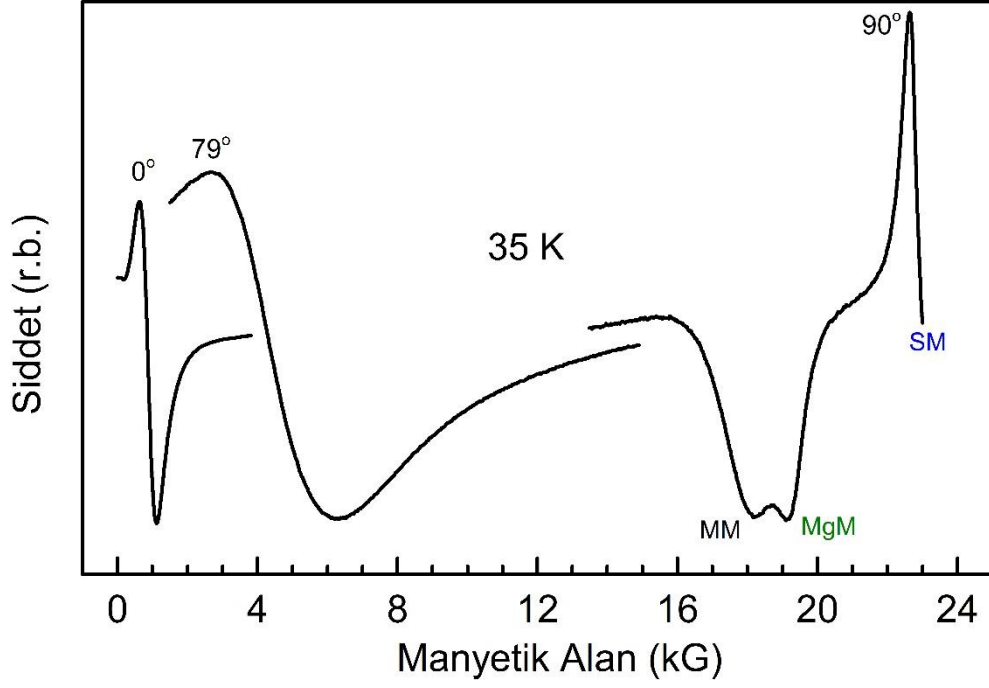
278 K’ deki (Şekil 4.26) FMR sinyallerin rezonans alanlarının açısal çalışması Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe numunenin 278 K’ de rezonans alan değerleri ve bunların teorik hesaplaması

Rezonans alan değerlerinin teorik olarak hesaplanması, kuramsal bilgi kısmında verilen teorik hesaplamalar temel alınarak bilgisayar modellemesi ile elde edildi. Rezonans alanlar OPG’ de çok güçlü anizotropik davranış sergilemektedir. Burada rezonans alanların periyodikliği tam olarak 180° dir. Deneysel ve teorik rezonans alan değerleri birbirleriyle iyi bir uyum içerisinde olduğu görüldü. FMR alanında teorik analizler gerçekleştirildi ve manyetik parametreler Bloch-Bloembergen tipi sönüm terimli içeren dispersiyon bağıntısına göre elde edildi. Bu tez çalışmasında teorik hesaplarda kullanılan spin-spin durulma zamanı, $T_2=(1\pm0.5)\times10^{-6}$ s aralığındadır.

Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀Fe numunenin 35K’da OPG’ deki FMR sinyallerinin açısal çalışması Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

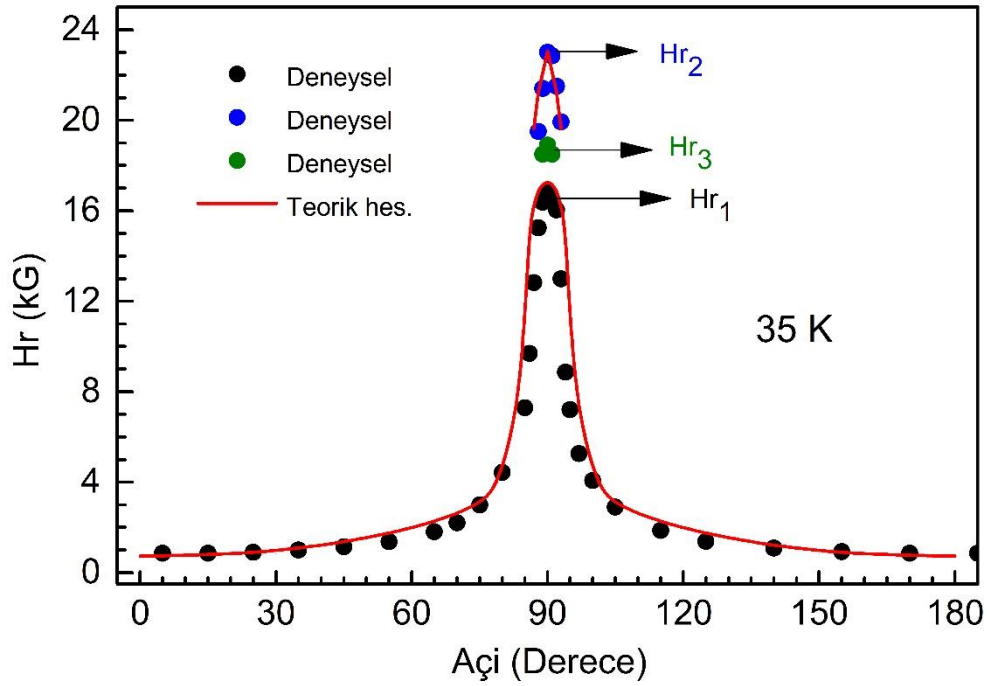


Şekil 4.28. Çok katmanlı $(\text{Cu/Co})_{60}/\text{Fe}$ numunenin 35 K’ de FMR sinyallerinin açısal bağımlılığı

Çok katmanlı $(\text{Cu/Co})_{60}\text{Fe}$ numunenin yüzeyine paralel geometride (OPG) her iki sıcaklıkta FMR spektrumların tek FMR sinyali gözlenmiştir. 35K’deki FMR sinyallerin kuvvetli bir şekilde açısal bağımlılığı görülmüştür. 35 K’ de 0° de tek pik gözlenirken, 90° de üç pikin birlikte yansması görülmüştür. 35 K’ de 90° deki bu üç pik sırasıyla ana mod, manyetostatik mod (magnetostatic mod, MgM) ve yüzey modu (surface mod, SM) olarak adlandırılmıştır. Bu manyetostatik modun 35 K’ de Co katmanlarının yüzeyindeki ya da Co-Fe katmanları arasındaki değiş-tokuş etkilerinden ortaya çıktığı tespit edilmiştir. İrdelemeler sonucunda 35 K’de çok yüksek alandaki pikin Fe katmanlarına ait uyarılmış yüzey modunu ortaya koyarken, daha düşük alandaki pikin Co katmanlarının ana soğurmasına ait olduğunu ortaya çıkarmıştır. 35K’da da rezonans alanların periyodikliği tam olarak 180° ’ dir. 35 K da 90° de rezonans alan değişiminin 278 K’ dekine göre daha yüksek alanlara kaydığı gözlenmiştir. Deneysel ve teorik rezonans alan değerlerinin birbirleriyle iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Rezonans alan değerlerinin teorik fitinden 19.2 kG’luk alan değeri 35 K’ de Co katmanlarının yüzey bölgesindeki ya da Co-Fe katmanları arasındaki değiş-tokuş etkilerinden kaynaklanmaktadır. Bu değiş-tokuş etkileri manyetostatik anizotropi etkileri ile ilişkilidir. Ayrıca FMR sinyallerin çizgi genişliği birçok fiziksel olaya katkıda bulunabilir. Bunlardan en sık karşılaşılanı uygulanan dış alanın yeterince homojen olmamasıdır. Bunun haricinde homojenlik

numunenin büyüklüğüne de bağlıdır. Buna ilaveten sönüm terimleri de (Landau-Lifshitz, Gilbert, Bloch-Bloembergen tipi gibi) çizgi genişliği üzerinde etkilidir.

Çok katmanlı $(\text{Cu/Co})_{60}/\text{Fe}$ numunenin 35 K' de FMR rezonans alanlarının açısall bağımlılığı Şekil 4.29'da verilmiştir.

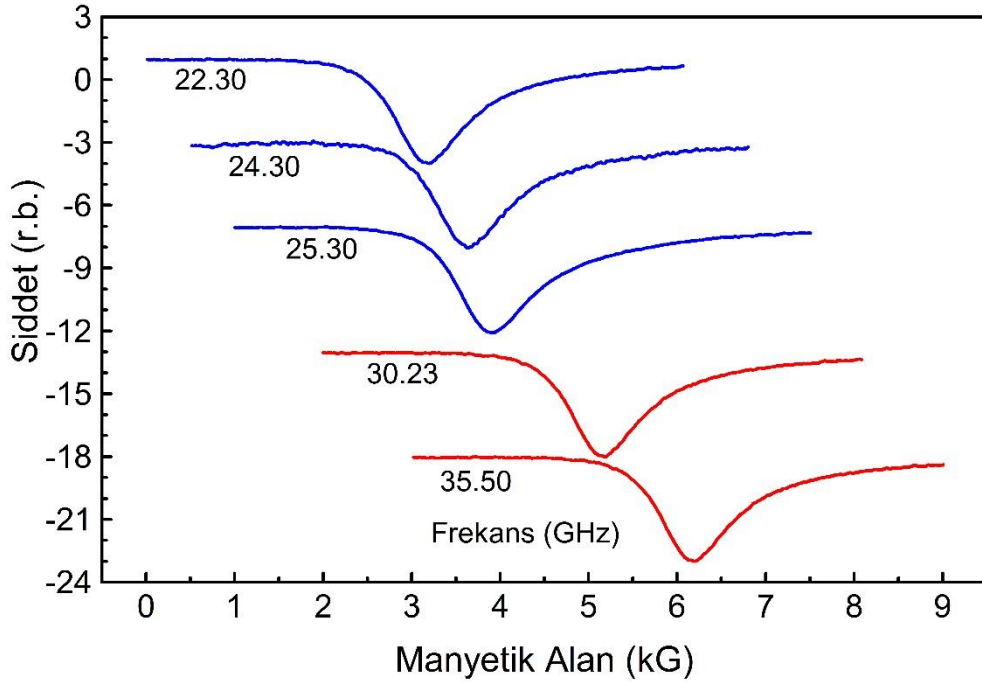


Şekil 4.29. Çok katmanlı $(\text{Cu/Co})_{60}/\text{Fe}$ numunenin 35 K' de rezonans alan değerleri ve bunların teorik hesaplaması

Şekil 4.29'daki rezonans alanların açıya bağıllığı teorik olarak da fit edilmiştir. Burada detaylıca görüldüğü gibi teorik ve deneysel sonuçlar iyi bir uyum içindedir ve 278 K' deki FMR çalışmasında gözlenmeyen manyetostatik modu burada açıkça gözlenmiştir. Genel olarak MR çalışmaları EPR sinyalleri dar çizgi genişliklerinde gözlenir. Diğer durumlarda (SPR, FMR, ..) genel olarak sinyaller EPR sinyallerine göre daha geniştir. Eğer tek, çift ve çoklu ince filmlerde özellikle zor eksen doğrultusunda dar FMR sinyalleri ölçülüyorsa bu filmin doğrudan kalitesiyle ilgilidir. Yani bu düzlemde film çoklu kristalden (polycrystal) ziyade tek kristal (single crystal) yapıdadır.

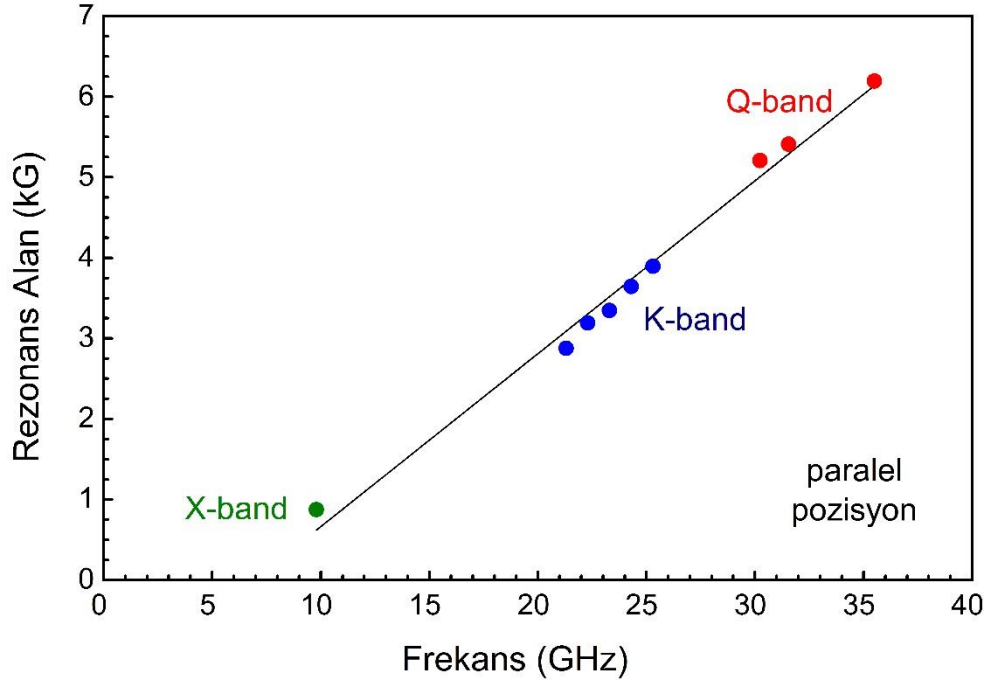
4.2.6 Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe filmine ait FMR sinyallerinin frekans gelişimi

Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe numunenin oda sıcaklığında K- ve Q- bantlarına ait FMR sinyallerinin frekans gelişimi Şekil 4.30’da verildi. Şekilde görüldüğü üzere, mikrodalga frekansı artarken, sinyallerin rezonans alanları da artmaktadır. Diğer bir ifadeyle frekansla birlikte rezonans alan değerleri daha yüksek alana kaydığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.30. Çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe numunenin oda sıcaklığında K- ve Q-bandına ait FMR sinyallerinin frekans gelişimi

Oda sıcaklığında X-, K- ve Q- bandına ait FMR sinyallerin rezonans alanlarının frekans bağımlılığı teorik hesaplamasıyla birlikte Şekil 4.31’ de gösterilmiştir. Teorik hesaplama $h\nu = g\beta(H_r + H_i)$ ifadesine göre yapılmıştır. Burada; h , ν , g , β , H_r ve H_i sırasıyla Plank sabiti, mikrodalga frekansı, spektroskopik yarıma faktörü, Bohr manyetonu, FMR alanı ve manyetik iç alana karşılık gelmektedir. Burada, rezonans alan ve mikrodalga frekansı arasında hemen hemen lineer bir ilişki tespit edilmiştir. Şekilde görüleceği üzere, rezonans alan ile frekans (GHz) gelişimi arasında doğrusal bir bağıllık olduğu açıktır. Bu doğrusal bağıllık teorik olarak hesaplamalardan hareketle ekstrapole edilirse X- bandını (9.5 GHz) yatay ekseninde sıfır olmayan bir değerde keseceği görülmüştür. Bu bağıllık $h\nu = g\beta(H_r + H_i)$ ifadesine fit edilmesi sonucunda iç alan 1.48 kG ve g -değeri 3.33 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.31. Oda sıcaklığında 9.5-36 GHz frekans aralığında X-, K- ve Q-bandına ait deneysel FMR sinyallerinin rezonans alan değerlerinin frekans bağımlılığı ve bunların teorik hesabı

Burada dikkat edilirse g -değerinin 3.33 olması mıknatıslanmanın sıcaklıkla gelişiminde de kullanılmıştır. Bu sonuç her iki durumun iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Buradan elde edilen ve daha önce de kullanılan bu 3.33 değerinin orbital ve spin momentlerine bağlı olduğu 10 numaralı denklem ile anlaşılır. Bunun için g -değerinin serbest elektronun 2.0023 ten daha büyük olması spin-orbit etkileşmesiyle mümkündür. Bu etkileşme (spin-orbit) herbiri birbirlerine paralel olacak şekilde spin ve yörüngeyi tercih ederse, toplam manyetik moment, sadece spinel taraflı kısımdan gelen manyetik momentten daha büyük olacaktır.

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Tek, çift ve çok katmanlı nano ölçekli ince filmlere ait histerezis eğrileri ve bunlar içinde küçük histerezis (minor) eğrilerinin dinamikleri, boyut etkileri ve sıcaklık bağımlılığı kuantum tasarım titreşimli örnek manyetometre (VSM) kullanılarak sırasıyla oda ve düşük sıcaklıkta incelenmiştir. Bütün numunelerin histerezis eğrilerinin düşük sıcaklıkta genişlediği görülmüştür. $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmi için 6 ve 8 nm kalınlıklarında 10 K' deki asimetric davranış değiş-tokuş etkisinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. 6 nm kalınlıklı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminde düşük sıcaklıkta (10 K) 1055 G kadarlık bir Barkhausen etkisi tespit edilmiştir. Aynı kompozisyonda 8 nm kalınlığındaki filmin histerezis eğrisinde bir sola kayma ve diz gözlenmiştir. Bu diz kristal yapısındaki kusurlara atfedildi. $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ tek ve çift katmanlı nano ölçekli ince filmlere ait çeşitli asimetric histerezis eğrilerinden bu numunelerin kuvvetli anizotropilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Nano ölçekli ince filmlerde asimetric histerezis eğrileri, anizotropi eksenlerine belli açılarda uygulanan manyetik alan içindeki kolineer tek eksenli ve tek yönlü anizotropiler ile kendini gösterebilir (Yalçın vd., 2008; Güner vd., 2006). Diğer bir ifadeyle asimetric histerezis eğrileri, filmlerin homojen olmayışına ve değiş-tokuş anizotropisine bağlanmaktadır (Gnatchenko vd., 2006). $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ tek ve çift katmanlı nano ölçekli filmlerdeki asimetric davranış tek katmanlı $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filminin kalınlığının azalmasıyla koersif alan değeri artmaktadır. Aksine tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (2.5 nm) filminin kalınlığının azalmasıyla koersif alan değeri azalmaktadır. 5 nm kalınlıklı tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmine ait asimetric durum değiş-tokuş sistemi ile ilgilidir. Fakat 2.5 nm kalınlığındaki aynı film için iki histerezis döngüsü ise hayali spin-valf (pseudo-spin valve) etkisi ile ilgilidir. $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ çift katmanlı filmin koersivitesi azalan film kalınlığı ile ters orantılı olarak genişlemiştir. Ayrıca $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ çift katmanlı filmlerine ait histerezis eğrileri, oda sıcaklığında $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ çift katmanlı filmlerine ait histerezis eğrilerine göre daha geniştir. Bu davranış altaş etkisinden kaynaklanmaktadır. 305 K' de 2.5 nm kalınlığındaki tek katmanlı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ filmine ait orta histerezis eğrilerinin alt ve üst sınırları zamanla sınırlı negatif ve pozitif alanda elde edilir. 5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ filmine ait 10 K' deki küçük histerezis döngüleri zamanla sıcaklık etkisiyle birbirini tekrar eden eğriler (training effects) şeklinde

gelişimini orta histerezis eğrisine (middle) bırakacaktır. Bu nedenle bu eğrilerde asimetriklik davranış gözlenmiştir. Küçük histerezis döngülerinin manyetik alan ile manyetik viskoziteye bağlı olduğu da bulunmuştur. Küçük histerezis döngülerinin zaman bağımlılığı, manyetizasyonun geri dönüşü olmayan (irreversible) bileşeniyle ilgilidir. Diğer yandan küçük histerezis döngüleri yerel etkileşme alanlarından da etkilenmektedir. Ek olarak, küçük histerezis döngüleri, 5 nm kalınlıklı $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ çift katmanlı ince filmi için baskın olarak çiftlenmiş dipolar (çift kutuplu) etkinin varlığı görülmüştür. Küçük histerezislerin zaman bağımlılığı uygulanan pozitif ve negatif alan bölgelerinde kendini göstermiştir. Bu etki bölgesel etkileşmedeki değiş-tokuş etkileşmesinden kaynaklanan anahtarlama etkisine atfedilmiştir. Küçük döngüler manyetizasyon yönüne göre zamanla genişler. Bu etki küçük histerezis eğri dinamiklerine karşılık gelir. Bu tür filmlerdeki anahtarlama etkisi sert ve yumuşak tabakaların kalınlıklarıyla ve sıcaklıkla ters orantılıdır. İkili filmlerde sert tabaka yumuşak tabakayı mıknatıslanma açısından kontrol eder. Yani yumuşak tabakanın mıknatıslanma yönelimi, sert tabakanın mıknatıslanma yönünü tercih etme eğilimindedir. Bu anahtarlama etkisi bu tür sert ve yumuşak tabakalar arasındaki değiş-tokuş etkileşmesinden kaynaklanır. Bu nedenle anahtarlama işlemi yumuşak tabakalar tarafından yapılır. Bu durum aslında yüksek sıcaklıklarda gözlenir. Bu tez çalışmasında bu etki 10 K’ de gözlemlendi.

$(\text{Cu}/\text{Co})_{60}\text{Fe}$ çok katmanlı filminde azalan sıcaklıkla beraber koersif alan ve doyum alanı üstel, kalıcı mıknatıslanma ve doyum mıknatıslanması logaritmik, FMR alan değerleri ve yüzey anizotropi sabiti lineer olarak artmaktadır. Bu yüzden, doyum alanı, koersivite, kalıcı manyetizasyon, doyum manyetizasyonu, rezonans alanı ve yüzey anizotropi sabiti kuvvetli şekilde sıcaklığa bağlıdır. $T > T_B$ (Blocking) sıcaklıklarında numune, paramanyetik malzeme gibi davranır. Çünkü termal dalgalanma enerjisi, yüksek sıcaklıklarda manyetizasyon enerjisinden daha büyüktür. Başka bir ifadeyle termal aktivasyon enerjisi, belli bir T_B üzerinde dalgalanan domenlerin kohesif enerjisinin üstesinden gelir. 5 K civarında spin-valf davranışından kaynaklanan bir miktar anomali mevcuttur. Diğer bir ifadeyle, spin-valf/tersine durum için enerji bariyeri, çok katmanlı sistemlerin toplam enerjisinin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farka eşittir. Si (001) alttaş üzerindeki $(\text{Cu}/\text{Co})_{60}\text{Fe}$ örneğine ait 70 K civarındaki rezonans alanın dramatik artışı, efektif kalınlıktan ya da daha da önemlisi yüzey alanı ve hacim oranından kaynaklanmaktadır.

Oda sıcaklığı ve düşük sıcaklık (35 K)'larda IPG de FMR spektrumlarında anizotropik davranış görülmemiştir. Buradan örneğe ait kolay eksenin film yüzeyine paralel doğrultuda olduğu sonucuna varıldı. Zor ekseninde yani OPG' de 278 ve 35 K' de FMR sinyalleri çok güçlü açısal bağımlılık göstermektedir. (Cu/Co)₆₀Fe filmi için 278 K' de iki sinyal, 35 K' de ise üç FMR sinyali gözlenmiştir. 35 K' deki Co-Fe çift katmanında daha düşük alandaki pik Co' tan gelen ana soğurmaya yani ana moda (MM) ve daha yüksek alandaki pik ise Fe' den gelen soğurmaya yani yüzey moduna (SM) aittir. Ana mod (MM) ve yüzey modu (SM) arasındaki ek pik manyetostatik moda (MgM) karşılık gelmektedir. Manyetostatik mod, termal enerjinin manyetostatik anizotropi enerjisine bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Bundan başka manyetostatik ve değiş-tokuş enerjileri çok katmanlı filmlerde film kalınlığı ile de ilişkilidir (Macia vd., 2012). Çok katmanlı yapılarda anizotropi, birbirini tekrarlayan çift katmanların sayısı ile hemen hemen sabit kalır. Dik manyetik anizotropi ve onun bağıl önemi, birbirini tekrarlayan Cu/Co çift katmanlarının artan sayısı ile azalması beklenir. Bu çalışmada elde edilen sonuç Macia ve diğerleri (Macia vd., 2012) nin sonucu ile uyum içerisindedir.

Si (001) alttaş üzerindeki çok katmanlı (Cu/Co)₆₀/Fe numuneden elde edilen efektif *g*-değeri (3.33), serbest elektronun *g*-değerinden (2.0023) daha büyük olduğu görülmektedir. Bu değer doğrudan orbital ve spin momentinin oranına bağlıdır. Spin-orbit etkileşmesi, birbirine paralel olan spin ve yörüngeyi tercih ederse, filmin toplam manyetik momenti spinel taraflı kısımdan kısmen daha büyük olacaktır. Dolayısıyla (Cu/Co)₆₀/Fe örneğine ait *g*-değeri serbest elektronun *g*-değerinden daha büyük olacaktır (Salhi vd., 2011). Deneysel FMR spektrumları, FMR alanının açısal bağımlılığı, rezonans alan-frekans ilişkisi ve bunların teorik hesaplamaları da iyi bir uyum içerisindedir.

KAYNAKLAR

Adeyeye, A.O., Bland, J.A.C., Daboo, C. and Hasko, D.G., “Magnetostatic interactions and magnetization reversal in ferromagnetic wires”, **Phys. Rev. B.** 56, 3265, 1997.

Aktaş, B., “Clear evidence for field induced unidirectional exchange surface anisotropy in NiMn alloys”, **Solid State Commun.** 87, 1067-1071, 1993.

Aktaş, B. and Özdemir, M., “Simulated spin-wave resonance-absorption curves for ferromagnetic thin-films and application to NiMn films”, **Physica B** 193, 125-138, 1994.

Aktaş, B., “FMR properties of epitaxial Fe₃O₄ films on MgO(100)”, **Thin Solid Films** 307, 250-259, 1997.

Aktaş, B., Yıldız, F., Rameev, B., Khaibullin, R., Tagirov, L. and Özdemir, M., “Giant room temperature ferromagnetism in rutile TiO₂ implanted by Co.”, **Phys. stat. sol. (c)**. 12, 3319, 2004.

Aktaş, B., Heinrich, B., Woltersdorf, G., Urban, R., Tagirov, L.R., Yıldız, F., Özdoğan, K., Özdemir, M., Yalçın, O. and Rameev, B. Z., “Magnetic anisotropies in ultra-thin iron films grown on the surface-reconstructed GaAs substrate”, **J. Appl. Phys.** 102, 013912(1)-013912(8), 2007.

Anandakumar, S., Sudha Rani, V., Oh, S. and Kim, C., “Positive and negative Exchange bias in IrMn/NiFe bilayers”, **Thin Solid Films** 519, 1020-1024, 2010.

Ando, Y., Koizumi, H. and Miyazaki, T., “Exchange coupling energy determined by ferromagnetic resonance in 80Ni-Fe/Cu multilayer films”, **J. Magn. Magn. Mater.** 166, 75, 1997.

Appelbaum, I., Monsma, D.J., Russell, K.J., Narayanamurti, V. and Marcus, C.M., “Spin-valve photodiode”, **Appl. Phys. Lett.** 83, 3737-3739, 2003.

Arias, R. and Mills, D. L., “Theory of collective spin waves and microwave response of ferromagnetic nanowire arrays”, **Phys. Rev. B.** 67, 094423, 2003.

- Artman, J. O., “Ferromagnetic resonance in metal single crystals”, **Phys. Rev.** 105, 74, 1957.
- Artman, J.O., “Domain mode FMR in materials with K_1 and K_u ”, **J. Appl. Phys.** Vol. 50, 2024, 1979.
- Astalos, R. J. and Camley, R.E., “Magnetic permeability for exchange-spring magnets: application to Fe/Sm-Co”, **Phys. Rev. B.** 58, 8646, 1998.
- Babin, V., Garstecki, P. and Holyst, R., “Multiple Photonic Band Gaps in the Structures Composed of Core-Shell Particles”, **J. Appl. Phys.** 94, 4244, 2003.
- Babu, S.N., Min, S.G., Yourdkhani, A., Caruntu, G. and Malkinski, L., “Magnetoelectric effect in AlN/CoFe bi-layer thin film composites”, **J. Appl. Phys.** 111, 07C720-3, 2012.
- Baibich, M.N., Broto, J.M., Fert, A., Nguyen, F., Dau, V., Petroff, F., Etienne, P., Creuzet, G., Friederich, A. and Chazelas, J., “Giant Magnetoresistance of (001)Fe(001) Cr Magnetic Snperlattices”, **Phys. Rev. Lett.** 61, 2472-2475, 1988.
- Baseglia, L., Warden, M., Waldner, F., Hutton, S.L., Drumheller, J.E., He, Y.Q., Wigen, P.E. and Maryško M., “Derivation of the resonance frequency from the free energy of ferromagnets”, **Phys. Rev. B.** 38, 2237, 1988.
- Belozorov, D.P., Derkach, V.N., Nedukh, S.V., Ravlik, A.G., Roschenko, S.T., Shipkova, I.G., Tarapov, S.I. and Yildiz, F., “High-Frequency Magnetoresonance and Magnetoimpedance in Co/Cu Multilayers with Variable Interlayer Thickness”, **Int. J. Infrared Milli.** 22, 1669-1682, 2001.
- Benatmane, N., Ambrose, T.F. and Clinton, T.W., “Magnetization dynamics and static properties of Ho-doped $\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}$ ”, **J. Appl. Phys.** 105, 07D314-3, 2009.
- Berger, A., Mangin, S., McCord, J., Hellwig, O. and Fullerton, E.E., “Cumulative minor loop growth in Co/Pt and Co/Pd multilayers”, **Phys. Rev. B** 82, 104423-9, 2010.
- Biondo, A., Nascimento, V.P., Lassri, H., Passamani, E.C., Morales, M.A., Mello, A., de Biasi, R.S. and Saitovitch, E.B., “Structural and magnetic properties of Ni 81Fe 19/Zr multilayers”, **J. Magn. Magn. Mater.** 277, 144-152, 2004.

- Bloembergen, B., “On the ferromagnetic resonance in nickel and supermalloy”, **Phys. Rev.** 78, 572, 1950.
- Boulle, O., Malinowski, G. and Kläui, M., “Current-induced domain wall motion in nanoscale ferromagnetic elements”, **Materials Science and Engineering R.** 72, 159, 2011.
- Callen, H.B., “A ferromagnetic dynamical equation”, **J. Phys. Chem. Solids.** 4, 256, 1958.
- Celinski, Z., Urquhart, B. and Heinrich, B., “Using ferromagnetic resonance to measure the magnetic moments of ultrathin films”, **J. Magn. Magn. Mater.** 166, 6, 1997.
- Cochran, J.F. and Kambersky, V., “Ferromagnetic resonance in very thin films”, **J. Magn. Magn. Mater.** 302, 348, 2006.
- Coey, J.M.D., “Permanent magnetism”, **Solid State Comm.** 102, 101, 1997.
- Coey, J.M.D., “Magnetism and magnetic materials”, **Cambridge University Press.** ISBN-13 978052181614-4, 2009.
- Cullity, B.D. and Graham, C.D., **Introduction to magnetic materials** 2nd Edition, 2009.
- Darby, M.I., “Tables of the Brillouin function and of the related function for the spontaneous magnetization”, **J. App. Phys.** 18, 1415-1417, 1967
- De Biasi, R.S. and Gondim, E.C., “Use of ferromagnetic resonance to determine the size distribution of γ -Fe₂O₃ nanoparticles”, **Solid State Commun.** 138, 271, 2006.
- De Biasi, E., Lima, Jr. E., Ramos, C.A., Butera, A. and Zysler, R.D., “Effect of thermal fluctuations in FMR experiments in uniaxial magnetic nanoparticles: Blocked vs. superparamagnetic regimes”, **J. Magn. Magn. Mater.** 326, 138, 2013.
- Drovosekov, A.B., Kholin, D.I., Kolmogorov, A.N., Kreines, N.M., Mescheriakov, V.F., Miliayev, M.A., Romashev, L.N. and Ustinov, V.V., “The observation of non-homogeneous FMR modes in multilayer Fe/Cr structures”, **J. Magn. Magn. Mater.** 198-199, 455-457, 1999.

Drovosekov, A.B., Kreines, N.M., Milyaev, M.A., Romashev, L.N. and Ustinov, V.V., “Magnetization and FMR studies of $[\text{Fe/Cr}]_n$ structures with ultrathin iron layers”, **Phys. Stat. Sol. (c)** 3, 109-112, 2006.

Dumesnil, K., Dufour, C., Mangin, Ph. and Rogalev, A., “Magnetic springs in exchange-coupled $\text{DyFe}_2/\text{YFe}_2$ superlattices: An element-selective x-ray magnetic circular dichroism study”, **Phys. Rev. B.** 65, 094401, 2002.

Duraia, E.M. and Abdullin, Kh.A., “Ferromagnetic resonance of cobalt nanoparticles used as a catalyst for the carbon nanotubes synthesis”, **J. Magn. Magn. Mater.** 321, 69, 2009.

El-Hilo, M., O’Grady, K. and Chantrell, R.W., “Reptation effects in particulate systems. I. Theoretical predictions”, **J. Appl. Phys.** 73, 6653, 1993.

Endean, D.E., Heyman, J.N., Maat, S., Dan Dahlberg, E., “Quantitative analysis of the giant magnetoresistance effect at microwave frequencies”, **Phys. Rev. B** 84, 212405(1)-212405(4), 2011.

Farle, M., “Ferromagnetic resonance of ultrathin metallic layers”, **Rep. Prog. Phys.** 61, 755, 1998.

Fitzsimmons, M.R., Yashar, P., Leighton, C., Schuller, I.K., Nogués, J., Majkrzak, C.F. and Dura, J.A. “Center of mass method for Exchange bias measurement” **Phys. Rev. Lett.** 84 3986 2000

Fletcher, R.C., Le Craw, R.C. and Spencer, E.G., “Electron spin relaxation in ferromagnetic insulators”, **Phys. Rev.** 117, 955, 1960.

Frait, Z. and Fraitova, D. “Low energy spinwave excitation in highly conducting thin films and surfaces, in Frontiers in Magnetism of Reduced Dimension Systems”, **Nato ASI Series**, Bar’yakhtar, V.G., Wigen, P.E. and Lesnik, N.A. (Eds.) (Kluwer, Dordrecht), 121, 1998.

Fujita, N., Inaba, N., Kirino, F., Igarashi, S., Koike, K. and Kato, H., “Damping constant of Co/Pt multilayer thin-film media”, **J. Magn. Magn. Mater.** 320, 3019-3022, 2008.

Fullerton, E.E., Jiang, J.S., Grimsditch, M., Sowers, C.H. and Bader, S.D., “Exchange-spring behavior in epitaxial hard/soft magnetic bilayers” **Phys. Rev. B.** 58, 12193, 1998.

Fullerton, E.E., Jiang, J.S. and Bader, S.D., “Hard/soft magnetic heterostructures: model exchange-spring magnets” **J. Magn. Magn. Mater.** 200, 392, 1999.

Gall, H.L., Youssef, J.B., Vukadinovic, N. and Ostorero, J., “Dynamics Over 4 GHz of Spring-Magnet Type NiFe–CoFe Bilayers With High Permeability”, **IEEE Trans. Magn.** 38, 2526-2528, 2002.

Gerber, A., McCord, J., Schmutz, C. and Quandt, E., “Permeability and Magnetic Properties of Ferromagnetic NiFe/FeCoBSi Bilayers for High-Frequency Applications”, **IEEE Trans. Magn.** 43, 2624-2626, 2007.

Gerlach, W. and Stern, O., “Dasmagnetische moment dessilber atoms”, **Zeitschrift für Physik.** 9, 353, 1922.

Gilbert, T.A., “Armour research foundation rept.”, **Armour Research Foundation**, Chicago, 1955.

Gnatchenko, S.L., Merenkov, D.N., Bludov, A.N., Pishko, V.V., Shakhayeva, Y.A., Baran, M., Szymczak, R. and Novosad, V.A., “Asymmetrically shaped hysteresis loop in exchange-biased FeNi/FeMn film”, **J. Magn. Magn. Mater.** 307, 263-267, 2006.

Goryunov, Yu.V., Garifyanov, N.N., Khaliullin, G.G., Garifullin, I.A., Tagirov, L.R., Schreiber, F., Mühge, Th. and Zabel, H., “Magnetic isotropies of sputtered Fe films on MgO substrates”, **Phys. Rev. B.** 52, 13450, 1995.

Grimsditch, M., Camley, R., Fullerton, E.E., Jiang, S., Bader, S.D. and Sowers, H., “Exchange-spring systems: Coupling of hard and soft ferromagnets as measured by magnetization and Brillouin light scattering (invited)”, **J. Appl. Phys.** 85, 5901, 1999.

Grünberg, P., “Brillouin scattering from spinwaves in thin ferromagnetic films”, **J. Magn. Magn. Mater.** 15, 766-768, 1980.

Grünberg, P., Mayr, C.M. and Vach, W. “Determination of magnetic parameters by means of brillouin scattering. Examples: Fe, Ni, Ni_{0.8}Fe_{0.2}”, **J. Magn. Magn. Mater.** 28, 319, 1982.

Grünberg, P., “Layered magnetic structures: history, facts and figures”, **J. Magn. Magn. Mater.** 226-230, 1688, 2001.

Gubbiotti, G., Carlotti, G., Tacchi, S., Madami, M., Ono, T., Koyama, T., Chiba, D., Casoli, F. and Pini, M.G., “Spin waves in perpendicularly magnetized Co/Ni(111) multilayers in the presence of magnetic domains”, **Phys. Rev. B** 86, 014401(1)-014401(9), 2012.

Gurevich, A.G. and Melkov, G.A. **Magnetization Oscillations and Waves**, CRC, Boca Raton, 1996.

Guskos, N., Dudek, M., Zolnierkiewicz, G., Typek, J., Berczynski, P., Lendzion-Bielun, Z., Sibera, D. and Narkiewicz, U., “Magnetic study of nanocrystalline 0.95MnO/0.05ZnO”, **J. Magn. Magn. Mater.** 326, 225-231, 2013.

Güner, S., Yalçın, O., Kazan, S., Yıldız, F. and Şahingöz, R., “FMR studies of bilayer Co₉₀Fe₁₀/Ni₈₁Fe₁₉, Ni₈₁Fe₁₉/Co₉₀Fe₁₀ and monolayer Ni₈₁Fe₁₉ thin films”, **Phys. Stat. Sol. (a)** 203, 1539-1544, 2006.

Hecker, M., Tietjen, D., Wendrock, H., Schneider, C.M., Cramer, N., Malkinski, L., Camley, R.E. and Celinski, Z., “Annealing effects and degradation mechanism of NiFe/Cu GMR multilayers”, **J. Magn. Magn. Mater.** 247, 62-69, 2002.

Heim, E., Harling, S., Pöhlig, K., Ludwig, F., Menzel, H. Schilling, M., “Fluxgate magnetorelaxometry of superparamagnetic nanoparticles for hydrogel characterization”, **J. Magn. Magn. Mater.** 311, 150, 2007.

Heinrich, B., Woltersdorf, G., Urban, R. and Simanek, E., “Role of spin current in magnetic relaxations of metallic multilayer films”, **J. Magn. Magn. Mater.** 258-259, 376-381, 2003.

Heinrich, B., “Ferromagnetic resonance in ultrathin film structures. In magnetic ultrathin films. Heinrich, B.; Bland, J.A.C. (Eds.)”, **Springer, Berlin, Heidelberg.** 2, 95, 2005(a).

Heisenberg, W., “Theory of ferromagnetism”, **Zeitschrift für Physik.** 49, 619, 1928.

- Hellwig, O., Kortright, J.B., Takano, K. and Fullerton, E.E., “Switching behavior of Fe-Pt/Ni-Fe exchange-spring films studied by resonant soft-x-ray magneto-optical Kerr effect”, *Phys. Rev. B.* 62, 11694, 2000.
- Hong, F., Cheng, Z., Wang, J., Wang, X. and Dou, S., “Positive and negative Exchange bias effects in the simple perovskite manganite NdMnO_3 ”, *Appl. Phys. Lett.* 101, 102411, 2012.
- Hosomi, M., Makino, E., Konishiike, I., Sugawara, N. and Ohkawara, S., “Film structure dependence of the magnetoresistive properties in current perpendicular to plane spin valves and its relation with current in plane magnetoresistive properties”, *J. Appl. Phys.* 91, 8099-8101, 2002.
- Hovorka, O., Berger, A. and Friedman G. “Asymmetric magnetization reversal in exchange-biased hysteresis loops”, *Appl. Phys. Lett.* 89 142513 2006
- Huang, Z.C., Hu, X.F., Xu, Y.X., Zhai, Y., Xu, Y.B., Wu, J. and Zhai, H.R., “Magnetic properties of ultrathin single crystal Fe_3O_4 film on InAs(100) by ferromagnetic resonance”, *J. Appl. Phys.* 111, 07C108, 2012.
- Hung, C.Y., Mao, M., Funada, S., Schneider, T., Miloslavsky, L., Miller, M., Qian, C. and Tong H.C., “Magnetic properties of ultrathin NiFe and CoFe films”, *J. Appl. Phys.* 87, 6618-6620, 2000.
- Hwang, J.Y., Kim, M.Y., Rhee, J.R., Lee, S.S., Hwang, D.G., Yu, S.C. and Lee, H.B., “Magnetoresistance of antiferromagnet CoFe/Ru/CoFe/IrMn top spin valve with thermal stability”, *J. Magn. Magn. Mater.* 272, 1875-1876, 2004.
- Ikeda, K., Suzuki, T. and Sato, T., “CoFeSiO/SiO Multilayer Granular Films With Very Narrow Ferromagnetic Resonant Linewidth”, *IEEE Trans. Magn.* 45, 4290-4293, 2009.
- Jammalamadaka, S.N., Vanackenand J. and Moshchalkov, V.V., “Exchange bias and training effects in antiferromagnetically coupled $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrRuO}_3$ superlattices”, *EPL*, 98, 17002, 2012.
- Jiang, J.S., Fullerton, E.E., Sowers, C.H., Inomata, A., Bader, S.D., Shapiro, A.J., Shull, R.D., Gornakov, V.S. and Nikitenko, V.I., “Spring magnet films”, *IEEE Trans. Magn.* 35, 3229, 1999.

- Jiang, J.S., Bader, S.D., Kaper, H., Leaf, G.K., Shull, R.D., Shapiro, A.J., Gornakov, V.S., Nikitenko, V.I., Platt, C.L., Berkowitz, A.E., David, S. and Fullerton, E.E., “Rotational hysteresis of exchange-spring Magnets”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, 2339, 2002.
- Jiang, J.S., Pearson, J.E., Liu, Z.Y., Kabius, B., Trasobares, S., Miller, D.J. and Bader, S.D., “A new approach for improving exchange-spring magnets”, *J. Appl. Phys.* 97, 10K311, 2005.
- Jung, S., Watkins, B., DeLong, L., Ketterson, J.B., Chandrasekhar, V., “Ferromagnetic resonance in periodic particle arrays”, *Phys. Rev. B.* 66, 132401, 2002.
- Kakazei, G.N., Pogorelov, Y.G., Sousa, J.B., Golub, V.O., Lesnik, N.A., Cardoso, S. and Freitas, P.P., “FMR in CoFe/Al₂O₃ multilayers: from continuous to discontinuous regime”, *J. Magn. Magn. Mater.* 226-230, 1828-1830, 2001.
- Kakazei, G.N., Pogorelov, Y.G., Santos, J.A.M., Sousa, J.B., Freitas, P.P., Cardoso, S., Lesnik, N.A. and Wigen, P.E., “Low-field magnetization study of CoFe–Al₂O₃ multilayers”, *J. Magn. Magn. Mater.* 266, 57-61, 2003.
- Kartopu, G. and Yalçın, O., “Electrodeposited Nanowires and Their Applications”, edited by: Nicoleta Lupu, *INTECH*, Croatia, 2010.
- Kartopu, G., Yalçın, O., Choy, K.-L., Topkaya, R., Kazan, S. and Aktaş, B., “Size effects and origin of easy-axis in nickel nanowire arrays”, *J. Appl. Phys.* 109, 033909, 2011.
- Katti, R.R., Arrott, A., Drewes, J., Larson, W., Liu, H., Lu, Y., Vogt, T. and Zhu, T., “Pseudo-Spin-Valve Device Performance for Giant Magnetoresistive Random Access Memory Applications”, *IEEE Trans. Magn.* 37, 1967-1969, 2001.
- Kharmouche, A., Ben Youssef, J., Layadi, A. and Chérif, S.M., “Ferromagnetic resonance in evaporated Co/Si(100) and Co/glass thin films”, *J. App. Phys.* 101, 13910, 2007.
- Kittel, C., “Theory of the structure of ferromagnetic domains in films and small Particles”, *Phys. Rev.* 70, 965, 1946.
- Klein, P., Varga, R., Infante, G., Vázquez, M., “Ferromagnetic resonance study of FeCoMoB microwires during devitrification process”, *J. Appl. Phys.* 111, 053920, 2012.

- Kneller, E.F. and Hawing, R., “The exchange-spring magnet: a new material principle for permanent magnets”, *IEEE Trans. Magn.* 27, 3588, 1991.
- Kraus, L., Frait, Z., Ababei, G., Chayka, O., Chiriac, H., “Ferromagnetic resonance in submicron amorphous wires”, *J. Appl. Phys.* 111, 053924, 2012.
- Krebs, J.J., Lubitz, P., Chaiken, A. and Prinz, G.A., “Magnetic resonance determination of the antiferromagnetic coupling of Fe layers through Cr”, *Phys. Rev. Lett.* 63, 1645, 1989.
- Kuanr, B.K., “Interlayer exchange coupling of epitaxial Fe/Al/Fe trilayer films: Dynamic and static measurements”, *J. Appl. Phys.* 93, 7232-7234, 2003.
- Kuanr, B.K., Camley, R.E., Celinski, Z., “Extrinsic contribution to Gilbert damping in sputtered NiFe films by ferromagnetic resonance”, *J. Magn. Magn. Mater.* 286, 276, 2005.
- Kudryavtsev, Y.V., Oksenenko, V.A., Kulagin, V.A., Dubowik, J. and Lee, Y.P., “Ferromagnetic resonance in Co₂MnGa films with various structural ordering”, *J. Magn. Magn. Mater.* 310, 2271, 2007.
- Lamy, Y. and Viala, B., “Combination of ultimate magnetization and ultrahigh uniaxial anisotropy in CoFe exchange-coupled multilayers”, *J. Appl. Phys.* 97, 10F910-3, 2005.
- Landau, E. and Lifshitz, E., “On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies”, *Physik Z. Sowjetunion*, 8, 153, 1935.
- Larson, D.J., Clifton, P.H., Tabat, N., Cerezo, A., Petford-Long, A.K., Martens, R.L. and Kelly, T.F., “Atomic-scale analysis of CoFe/Cu and CoFe/NiFe interfaces”, *Appl. Phys. Lett.* 77, 726-728, 2000.
- Lassri, H., Ouahmane, H., El Fanity, H., Bouanani, M., Cherkaoui, F. and Berrada, A., “Ferromagnetic resonance studies of electrodeposited Ni/Cu multilayers”, *Thin Solid Films* 389, 245-249, 2001.
- Lassri, H., Ouahmane, H., Berrada, A., Kaabouchi, A., Dinia, A. and Krishnan, R., “Ferromagnetic resonance studies in Fe/Ti multilayers”, *J. Magn. Magn. Mater.* 272-276, e973-e974, 2004.

- Layadi, A. and Artman, J.O., “Ferromagnetic resonance in a coupled two-layer System”, *J. Magn. Magn. Mater.* 92, 143, 1990.
- Layadi, A., “Exchange coupled bilayer thin films with tilted out-of-plane anisotropy easy axis”, *J. Appl. Phys.* 112, 073901(1)-073901(9), 2012.
- Lindner, J., and Baberschke, K., “In situ ferromagnetic resonance: an ultimate tool to investigate the coupling in ultrathin magnetic films”, *J. Phys.: Condens. Matter.* 15, 193, 2003.
- Liu, Y.H., Xu, M.C., Yan, S.S. and Huang, J., “Ferromagnetic Resonance in Co–Zr/Pd Multilayers”, *Phys. Status Solidi A* 161, 507-513, 1997.
- Liu, B., Yang, Y., Tang, D., Zhang, B., Lu, M. and Lu, H., “The contributions of intrinsic damping and two magnon scattering on the ferromagnetic resonance linewidth in $[\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}/\text{SiO}_2]_n$ multilayer films”, *Journal of Alloys and Compounds* 524, 69-72, 2012.
- Macià, F., Warnicke, P., Bedau, D., Im, M.Y., Fischer, P., Arena, D.A. and Kent, A.D., “Perpendicular magnetic anisotropy in ultrathin Co/Ni multilayer films studied with ferromagnetic resonance and magnetic x-ray microspectroscopy”, *J. Magn. Magn. Mater.* 324, 3629-3632, 2012.
- Magnin S., Marchal G. and Barbara B., “Evidence of Exchange-Bias-Like Phenomenon in GdFe/TbFe/GdFe Domain Wall Junctions”, *Phys. Rev. Lett.* 82, 4336, 1999.
- Maklakov, S.S., Maklakov, S.A., Ryzhikov, I.A., Rozanov, K.N. and Osipov, A.V., “Thin Co films with tunable ferromagnetic resonance frequency”, *J. Magn. Magn. Mater.* 324, 2108, 2012.
- Mangin S., MONTAIGNE F. and SCHUL A., “Interface domain wall and exchange bias phenomena in ferrimagnetic/ferrimagnetic bilayers”, *Phys. Rev. B*, 68, 140404, 2003.
- Mannan, A., Patrick, A., Christopher, H.M., Denis, G., Bryan, J.H. and Robert L.S., “Exchange bias using a spin glass”, *Nat. Mater.* 6, 70, 2007.
- Mao, M., Cerjan, C. and Kools, J., “Physical properties of spin-valve films grown on naturally oxidized metal nano-oxide surfaces”, *J. Appl. Phys.* 91, 8560-8562, 2002.

- Marin, C.N., “Thermal and particle size distribution effects on the ferromagnetic resonance in magnetic fluids”, **J. Magn. Magn. Mater.** 300, 397, 2006.
- Meiklejohn, W.H. and Bean, C.P., “New magnetic anisotropy”, **Phys. Rev.** 102, 1413, 1956.
- Meiklejohn, W.H. and Bean, C.P., “New magnetic anisotropy”, **Phys. Rev.** 105, 904, 1957.
- Mibu, K., Nagahama, T., Ono, T. and Shinjo, T., “Magnetoresistance of quasi-Bloch-wall induced in NiFe/CoSm Exchange”, **J. Magn. Magn. Mater.** 177-181, 1267, 1997.
- Mibu, K., Nagahama, T., Shinjo, T. and Ono, T., “Magnetoresistance of Bloch-wall-type magnetic structures induced in NiFe/CoSm exchange-spring bilayers”, **Phys. Rev. B.** 58, 6442, 1998.
- Mills, D.L. and Bland, J.A.C., “Nanomagnetism ultrathin films, multilayers and nanostructures”, **Elsevier B.V.** 2006.
- Min, J.H., Cho, J.U., Kim, Y.K., Wu, J.H., Ko, Y.D. and Chung, J.S., “Substrate effects on microstructure and magnetic properties of electrodeposited Co nanowire arrays”, **J. Appl. Phys.** 99, 08Q510, 2006.
- Miyake, K., Noh, S.M., Kaneko, T., Imamura, H. and Sahashi, M., “Study on high-frequency 3-D magnetization precession modes of circular magnetic nano-dots using coplanar wave guide vector network analyzer ferromagnetic resonance”, **IEEE T. Magn.** 48, 1782, 2012.
- Morales, M.A., Lassri, H., Fonseca Filho, H.D., Rossi, A.M. and Baggio-Saitovitch, E., “Magnetic studies in Fe/Zn multilayers”, **J. Magn. Magn. Mater.** 256, 100-105, 2003.
- Morley, N.A., Gibbs, M.R.J., Fronc, K. and Zuberek, R., “Orientation and layer thickness dependence on the longitudinal magnetization and transverse magnetization hysteresis loops of sputtered multilayer Fe/Si and Fe/Ge thin films”, **J. Phys.: Condens. Matter.** 16, 4121-4129, 2004.
- Morrish, A.H., “The physical principles of magnetism”, **Wiley**, New York, 1965.

- Nascimento, V.P., Passamani, E.C., Alvarenga, A.D., Pelegrini, F., Biondo, A. and Saitovitch, E.B., “Influence of the roughness on the exchange bias effect of NiFe/FeMn/NiFe trilayers”, **J. Magn. Magn. Mater.** 320, e272-e274, 2008.
- Nogués, J., Sort, J., Langlais, V., Skumryev, V., Suriñach, S., Muñoz, J.S., Baró, M.D., “Exchange bias in nanostructures Review Article” **Physics Reports** 422, 65-117, 2005.
- Öner, Y., Özdemir, M., Aktaş, B., Topaçlı, C., Haris, E.A. and Senoussi, S., “The role of Pt impurities on both bulk and surface anisotropies in amorphous NiMn films”, **J. Magn. Magn. Mater.** 170, 129, 1997.
- Parkin, S.S.P., Farrow, R.F.C., Marks, R.F., Cebollada, A., Harp, G.R. and Savoy, R.J., “Oscillations of interlayer exchange coupling and giant magnetoresistance in (111) oriented permalloy/Au multilayers”, **Phys. Rev. Lett.** 72, 3718, 1994.
- Parvatheeswara, R.B., Caltun, O., Dumitru, I. and Spinu, L., “Ferromagnetic resonance parameters of ball-milled Ni–Zn ferrite nanoparticles”, **J. Magn. Magn. Mater.** 304, 752, 2006.
- Patel, R. and Owens, F.J., “Ferromagnetic resonance and magnetic force microscopy evidence for above room temperature ferromagnetism in Mn doped Si made by a solid state sintering process”, **Solid State Commun.** 152, 603, 2012.
- Paz, E., Cebollada, F., Palomares, F.J., González, J.M., Martins, J.S., Santos, N.M. and Sobolev, N.A., “Ferromagnetic resonance and magnetooptic study of submicron epitaxial Fe(001) stripes”, **J. Appl. Phys.** 111, 123917, 2012.
- Platow, W., Anisimov, A.N., Dunifer, G.L., Farle, M. and Baberschke, K., “Correlations between ferromagnetic-resonance linewidths and sample quality in the study of metallic ultrathin films” **Phys. Rev. B.** 58, 5611, 1998.
- Pollmann, J., Srajer, G., Hakel, D. Lang, J.C. Maser, J., Jiang, J.S. and Bader, S.D., “Magnetic imaging of a buried SmCo layer in a spring magnet”, **J. Appl. Phys.** 89, 7165, 2001.
- Poole, C.P. and Owens J.F., “Introduction to nanotechnology”, **John Wiley & Sons, Inc.** ISBN: 0-471-07935-9, 2003.

- Posth, O., Hassel, C., Spasova, M., Dumpich, G., Lindner, J. and Mangin, S., “Influence of growth parameters on the perpendicular magnetic anisotropy of [Co/Ni] multilayers and its temperature dependence”, **J. Appl. Phys.** 106, 023919(1)-023919(5), 2009.
- Purcell, E.M., Torrey, H.C. and Pound, R.V., “Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid”, **Phys. Rev.** 69, 37, 1946.
- Puszkarski, H., “Spectrum of interface coupling-affected spin-wave modes in ferromagnetic bilayer films”, **Phys. Stat. Sol.** 171, 205, 1992.
- Quantum design, VSM option user manual, San Diego, 152, 2009.
- Rabi, I.I., Zacharias, J.R., Millman, S. and Kusch, P., “A new method of measuring nuclear magnetic moment”, **Phys. Rev. Vol.** 53, 318, 1938.
- Rahman, F., “Nanostructures in electronics and photonics”, **Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. Singapore**, 596224, 2008.
- Raikher, Yu.L. and Stepanov, V.I., “Nonlinear dynamic response of superparamagnetic nanoparticles”, **Microelectron. Eng.** 69, 317, 2003.
- Raita, O., Popa, A., Stan, M., Suci, R.C., Biris, A. and Giurgiu, L.M., “Effect of Fe concentration in ZnO powders on ferromagnetic resonance spectra”, **Appl. Magn. Reson.** 42, 499, 2012.
- Ramsey, N.F., “Molecular beams”, **Oxford University Press**, New York, 1985.
- Raposo, V., Zazo, M. and Iñiguez, J., “Comparison of ferromagnetic resonance between amorphous wires and microwires”, **J. Magn. Magn. Mater.** 323, 1170, 2011.
- Ren, Y.H., Wu, C., Gong, Y., Pettiford, C. and Sun, N.X., “Magnetic anisotropy and spin wave relaxation in CoFe/PtMn/CoFe trilayer films”, **J. Appl. Phys.** 105, 073910-6, 2009.
- Richard, C., Houzet, M. and Meyer, J.S., “Andreev current induced by ferromagnetic resonance”, **Appl. Phys. Lett.** 109, 057002, 2012.
- Romano, J.A., da Silva, E.C., Schelp, L.F., Schmidt, J.E., Meckenstock, R. and Pelzl, J., “Effects of Ar-ion implantation and thermal treatment on magnetic properties of Co/Pd multilayers: a ferromagnetic resonance study”, **J. Magn. Magn. Mater.** 205, 161-169, 1999.

Sahoo, S., Polisetty, S., Duan, C.G., Jaswal, S.S., Tsymbal, E.Y. and Binek, C., “Ferroelectric control of magnetism in BaTiO₃/Fe heterostructures via interface strain coupling”, **Phys. Rev. B** 76, 092108(1)-092108(4), 2007.

Salhi, H., Chafai, K., Msieh, O., Lassri, H., Benkirane, K., Abid, M., Bessais, L. and Hlil, E.K., “Spin-Wave Excitations in Evaporated Co/Pt Multilayers”, **J Supercond Nov Magn** 24, 1375-1379, 2011.

Sasaki, M., Jönsson, P.E., Takayama, H. and Mamiya, H., “Aging and memory effects in superparamagnets and superspin glasses”, **Rev. B.** 71, 104405, 2005.

Schmool, D.S. and Barandiarán, J.M., “Ferromagnetic resonance and spin wave resonance in multiphase materials: theoretical considerations”, **J. Phys.: Condens. Matter.** 10, 10679, 1998.

Schmool, D.S., Rocha, R., Sousa, J.B., Santos, J.A.M., Kakazeia, G.N., Garitaonandiab, J. S., Martín Rodríguez, D., Lezamac, L. and Barandiarán, J.M., “Ferromagnetic Resonance in Nanometric Magnetic Systems”, **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials** 6, 541-550, 2004.

Schmool, D.S., Rocha, R., Sousa, J.B., Santos, J.A.M. and Kakazei, G., “Evidence of surface anisotropy in magnetic nanoparticles”, **J. Magn. Magn. Mater.** 300, e331-e334, 2006.

Schmool, D.S. and Schmalzl, M., “Ferromagnetic resonance in magnetic nanoparticle assemblies”, **J. Non-Cryst.Solids.** 353, 738, 2007.

Scholz, W., Suess, D., Schrefl, T. and Fidler, J., “Micromagnetic simulation of structure-property relations in hard and soft magnets”, **Comp. Mater. Sci.** 18, 1, 2000.

Schrefl, T., Kronmüller, H. and Fidler, J., “Exchange hardening in nano-structured permanent magnets”, **J. Magn. Magn. Mater.** 127, 273, 1993(a).

Schrefl, T., Schmidts, H.F., Fidler, J. and Kronmüller, H., “The role of exchange and dipolar coupling at grain boundaries in hard magnetic materials”, **J. Magn. Magn. Mater.** 124, 251, 1993(b).

Schrefl, T. and Fidler, J., “Modelling of exchange-spring permanent magnets”, **J. Magn. Magn. Mater.** 177-181, 970, 1998.

- Schrefl, T., Forster, H., Fidler, J., Dittrich, R., Suess, D. and Scholz, W., “Magnetic hardening of Exchange spring multilayers”, **Proof XVII Rare Earth Magnets Workshop**, University of Delaware, ed: Hadjipanayis, G. and Bonder M.J., 1006, 2002.
- Schreiber, F. and Frait, Z., “Spinwave resonance in high conductivity films: The Fe–Co alloy system”, **Phys. Rev. B.** 54, 6473, 1996.
- Seemann, K., Leiste, H. and Klever, C., “On the relation between the effective ferromagnetic resonance linewidth Δf_{eff} and damping parameter α_{eff} in ferromagnetic Fe–Co–Hf–N nanocomposite films”, **J. Magn. Magn. Mater.** 321, 3149, 2009.
- Skomski, R. and Coey, J.M.D., “Giant energy product in nanostructured two-phase magnets”, **Phys. Rev. B.** 48, 15812, 1993.
- Skomski, R., “Simple models of magnetism”, **Oxford University Press**. ISBN 978–0–19–857075–2, 2008.
- Smit, J. and Beljers, H.G., “Ferromagnetic resonance absorption in $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, a high anisotropy crystal” **Philips Res. Rep.** 10, 113, 1955.
- Sparks, M., “Ferromagnetic Relaxation Theory”, **McGraw-Hill**, New York, 1964.
- Sparks, M., “Theory of surface spin pinning in ferromagnetic resonance”, **Phys. Rev. Lett.** 22, 1111, 1969.
- Spasova, M., Wiedwald, U., Ramchal, R., Farle, M., Jergel, M., Majkova, E., Luby, S. and Senderak, R., “Magnetization and Magnetic Anisotropy of Co/W Multilayers”, **Phy. Status Solidi (b)** 225, 449-457, 2001.
- Stankowski, J., Stobiecki, F. and Górska, M., “Application of magnetically modulated microwave absorption to study of giant magnetoresistance effect in the Ni–Fe/Cu multilayer system”, **Appl. Magn. Reson.** 24, 303-311, 2003.
- Stashkevich, A.A., Roussigné, Y., Djemia, P., Chérif, S.M., Evans, P.R., Murphy, A.P., Hendren, W.R., Atkinson, R., Pollard, R.J., Zayats, A.V., Chaboussant, G. and Ott, F., “Spin-wave modes in Ni nanorod arrays studied by Brillouin light scattering”, **Phys. Rev. B.** 80, 144406, 2009.

Sun, Y., Duan, L., Guo, Z., DuanMu, Y., Ma, M., Xu, L., Zhang, Y. and Gu, N., “An improved way to prepare superparamagnetic magnetite-silica core-shell nanoparticles for possible biological application”, *J. Magn. Magn. Mater.* 285, 65, 2005.

Sun, Y.; Song, Y.Y., Chang, H., Kabatek, M., Jantz, M., Schneider, W., Wu, M., Schultheiss, H. and Hoffmann, A., “Growth and ferromagnetic resonance properties of nanometer-thick yttrium iron garnet films”, *Appl. Phys. Lett.* 101, 152405, 2012(a).

Szlaferek, A., “Model exchange-spring nanocomposite”, *Status Solidi B*, 241, 1312, 2004.

Takahashi, H., Watanabe, K., Hoshino, K., Hoshiya, H., Yoshida, N., Kimura, H., Nakamoto, K., Hamakawa, Y. and Kawabe, T., “Nano-granular Metal/Insulator Multilayer for Reader Shielding Materials”, *IEEE Trans. Magn.* 37, 1758-1760, 2001.

Takahashi, F., Kobayashi, S., Murakami, T., Takahashi, S., Kamada, Y. and Kikuchi, H., “Analysis of Magnetic Minor Hysteresis Loops in Thermally Aged and Cold-rolled Fe-Cu Alloys”, *Journal of Physics: Conference Series* 266, 012056-5, 2011.

Tong, L.N., Du, J., Lu, M., Wu, X.S., Xia, K., Zhao, H.W., You, B., Zhai, H.R. and Xia, H., “Magnetic Anisotropy and Ferromagnetic Resonance in Co/Pb Multilayers”, *Phys. Stat. Sol. (a)* 165, 261-270, 1998.

Uhlenbeck, G.E. and Goudsmit, S., “Ersetzung der hypothese vom unmechanischen zwang durch eine forderung bezüglich des inneren verhaltens jedes einzelnen elektrons”, *Die Naturwissenschaften*. 13, 953, 1925.

van der Heijden, P.A.A., van Opstal, M.G., Swüste, C.H.W., Bloemen, P.H.J., Gaines, J.M. and de Jonge, W.J.M., “A ferromagnetic resonance study on ultra-thin Fe₃O₄ layers grown on (001) MgO”, *J. Magn. Magn. Mater.* 182, 71-80, 1998.

Vargas, J.M., Zysler, R.D. and Butera, A., “Order–disorder transformation in FePt nanoparticles studied by ferromagnetic resonance”, *Appl. Surf. Sci.* 254, 274, 2007.

Veinger, A.I., Zabrodskii, A.G., Tisnek, T.V. and Goloshchapov, S.I., “Spin-Peierls transition in the Ge:As semiconductor impurity system in the vicinity of the insulator–metal phase transition”, *Physica B* 404, 4537-4539, 2009.

- Vounyuk, B.P., Gusliencko, K.Y., Kozlov, V.I., Lesnik, N.A. and Mitsek, A.I., “Effect on the interaction of layers on a ferromagnetic resonance in two layer ferromagnetic films”, **Sov. Phys. Solid State. Vol. 33**, 250, 1991.
- Xie, H., Zhang, K., Li, H., Wang, Y., Li, Z., Wang, Y., Cao, J., Bai, J., Wei, F. and Wei, D., “The Role of Magnetoelastic Field Related to Underlayers on Magnetic Properties of FeCo Thin Films”, **IEEE Trans. Magn.** 48, 2917-2920, 2012.
- Xu, Q.Y., Wang, Z.M., Shen, F., Du, Y.W. and Zhang, Z., “High-resolution electron microscopy study of Ni₈₁Fe₁₉ film with Co₃₃Cr₆₇ buffer layer”, **J. Magn. Magn. Mater.** 260, 393-396, 2003.
- Wang, X., Deng, L.J., Xie, J.L. and Li, D., “Observations of ferromagnetic resonance modes on FeCo-based nanocrystalline alloys”, **J. Magn. Magn. Mater.** 323, 635, 2011.
- Wegrowe, J.E., Comment, A., Jaccard, Y. and Ansermet, J.Ph., “Spin-dependent scattering of a domain wall of controlled size”, **Phys. Rev. B.** 61, 12216, 2000.
- Weiss, M.T. and Anderson, P.W., “Ferromagnetic resonance in ferroxdure”, **Phys. Rev.** 98, 925, 1955.
- Wigen, P.E., “Microwave properties of magnetic garnet thin films”, **Thin Solid Films** 114, 135, 1984.
- Wigen P.E. and Zhang, Z., “Ferromagnetic resonance in coupled magnetic multilayer systems”, **Braz. J. Phys.** 22, 267, 1992.
- Windsor, Y.W., Gerber, A. and Karpovski, M., “Dynamics of successive minor hysteresis loops”, **Phys. Rev. B** 85, 064409-8, 2012.
- Vittoria, C., “Microwave Properties in Magnetic Films”, **World Scientific**, Singapore, 87, 1993.
- Wolfram, T. and De Wames, R.E., “Magneto-exchange branches and spin-wave resonance in conducting and insulating films: Perpendicular resonance”, **Phys. Rev. B.** 4, 3125, 1971.
- Wüchner, S., Toussaint, J.C. and Voiron, J., “Magnetic properties of exchange-coupled trilayers of amorphous rare-earth-cobalt alloys”, **J. Phys. Rev. B.** 55, 11576, 1997.

Yalçın, O., Yıldız, F., Özdemir, M., Aktaş, B., Köseoğlu, Y., Bal, M. and Tuominen, M.T., “Ferromagnetic resonance studies of Co nanowire arrays”, **J. Magn. Magn. Mater.** 272, 1684, 2004(a).

Yalçın, O., Yıldız, F., Özdemir, M., Rameev, B., Bal, M. and Tuominen, M.T., “FMR Studies of Co Nanowire Arrays, Nanostructures Magnetic Materials and Their Applications” **Kluwer Academic Publisher**, Nato, Science Series. Mathematics, Physics and Chemistry, 143, 347, 2004(b).

Yalçın, O., Kazan, S., Şahingöz, R., Yıldız, F., Yerli, Y. and Aktaş, B., “Thickness Dependence of Magnetic Properties of Co₉₀Fe₁₀ Nanoscale Thin Films”, **J. Nanosci. Nanotechnol.** 8, 841-845, 2008.

Yalçın, O., Erdem, R. and Demir, Z., “Magnetic properties and size effects of spin-1/2 and spin-1 models of core-surface nanoparticles in different type lattices, smart nanoparticles technology”, Abbass Hashim (Ed.), ISBN: 978-953-51-0500-8, **InTech**, DOI: 10.5772/34706, 2012.

Yalçın, O., “Ferromagnetic Resonance-Theory and Applications”, **InTech**, ISBN 978-953-51-1186-3, 2013.

Yalçın, O., Ünlüer, Ş., Kazan, S., Özdemir, M. and Öner, Y., “Temperature evolution of magnetic properties for (Cu/Co)₆₀/Fe multilayer”, **J. Magn. Magn. Mater.** (DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.04.033, ISSN-Electronic: 03048853).

Yang, P.Y., Zhu, X.Y., Chen, G., Zeng, F. and Pan, F., “Hysteretic giant magnetoresistance curves induced by interlayer magnetostatic coupling in [Pd/Co]/Cu/Co/Cu/[Co/Pd] dual spin valves”, **J. Appl. Phys.** 107, 083902-5, 2010.

Yeh, Y.C., Jin, J.D., Li, C.M. and Lue, J.T., “The electric and magnetic properties of Co and Fe films percept from the coexistence of ferromagnetic and microstrip resonance or a T-type microstrip”, **Measurement.** 42, 290, 2009.

Yıldız, F., Yalçın, O., Özdemir, M., Aktaş, B., Köseoğlu, Y. and Jiang, J.S., “Magnetic properties of SmCo/Fe exchange spring magnets”, **J. Magn. Magn. Mater.** 272–276, 1941, 2004(a).

Yıldız, F., Yalçın, O., Aktaş, B., Özdemir, M. and Jiang, J.S., “Ferromagnetic resonance studies on Sm-Co/Fe thin films” *MSMW’04 Symposium Proceedings*. Kharkov, Ukraine, 2004(b).

Zavoisky, E., “Spin-magnetic resonance in paramagnetics”, *J. Phys. USSR*. 9, 211, 1945.

Zhai, Y., Li, J., Yan, Y., Zhang, X.Y., Lu, M., Zhai, H.R. and Shi, J., “Nonuniform demagnetizing field and magnetization in element of patterned NiFe films”, *J. Appl. Phys.* 93, 7598-7600, 2003.

Zhang, Z., Zhou, L., Wigen, P.E. and Ounadjela, K., “Angular dependence of ferromagnetic resonance in exchange coupled Co/Ru/Co trilayer structures”, *Phys. Rev. B*. 50, 6094, 1994(a).

Zhang, Z., Zhou, L., Wigen, P.E. and Ounadjela, K., “Using ferromagnetic resonance as a sensitive method to study the temperature dependence of interlayer exchange coupling”, *Phys. Rev. Lett.* 73, 336, 1994(b).

Zhang, B., Cheng, J., Gong, X., Dong, X., Liu, X., Ma, G. and Chang, J. “Facile fabrication of multi-colors high fluorescent/superparamagnetic nanoparticles”, *J. Colloid Interf. Sci.* 322, 485, 2008.

Zhou, Y., Stickler, D., Du, Y., Ahmad, E., Lu, Z., Frömter, R., Oepen, H.P., Wilton, D. and Pan, G., “Size Effect on Magnetic Switching and Interlayer Magnetostatic Coupling in Spin-Valve Nanorings Exchange-Biased by Synthetic Antiferromagnets”, *IEEE Trans. Magn.* 47, 214-220, 2011.

Zhu, J., Katine, J.A., Rowlands, G.E., Chen, Y.J., Duan, Z., Alzate, J.G., Upadhyaya, P., Langer, J., Amiri, P.K., Wang, K.L. and Krivorotov, I.N., “Voltage-induced ferromagnetic resonance in magnetic tunnel junctions”, *Cond-mat. Mes-hall*. 1205-2835, 1, 2012.

ÖZ GEÇMİŞ

Şahin ÜNLÜER 03.02.1970 tarihinde Karaman’ da doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini Karaman’ da tamamladı. 1988 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü’ nden 1992’ de mezun oldu. Aynı yıl MEB Karaman Ayrancı Lisesi’ nde Fizik öğretmenliği görevine başladı. Bir yıl burada görev yaptıktan sonra 1993 yılı sonunda Niğde Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2007 yılından itibaren halen aynı üniversitenin Bor Meslek Yüksek Okulu’ nda Öğretim görevlisi olarak hizmet vermektedir.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale ve 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir.

Yalçın, O., Ünlüer, Ş., Kazan, S., Özdemir, M. and Öner, Y., “Temperature evolution of magnetic properties for (Cu/Co)60/Fe multilayer” *J. Magn. Magn. Mater.* (DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.04.033, ISSN-Electronic: 03048853).

Ünlüer, Ş., Yalçın, O., Fert, A., “Temperature Evolution of Magnetic Properties of Nanostructured Multilayer Films” *The 2nd International Conference on Computation for Science and Technology* 2012.