T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK İNCE FİLMLERİN MANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

FİGEN AY
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2016

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK İNCE FİLMLERİN MANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

FİGEN AY
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. BULAT RAMİ

GEBZE
2016

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

THE INVESTIGATION OF MAGNETIC and ELECTRICAL PROPERTIES OF MAGNETIC THIN FILMS

FIGEN AY

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. BULAT RAMI

GEBZE

2016

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/06/2016 tarih ve 2016/43 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20/07/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Figen Ay'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI)	: Prof. Dr. Bulat Rami
ÜYE	: Prof. Dr. Bekir Aktaş
ÜYE	: Doç. Dr. Hüseyin Kavas
ÜYE	: Doç. Dr. Georgy Mozzhukhin
ÜYE	: Yrd. Doç. Dr. Cengiz Okay

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

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

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada Si/SiO_2 alttaş üzerine büyütülmüş $Fe/SiO_2/Ni$ ve $Fe/SiO_2/Co$ ve IrMn/Co/Pt ile IrMn/Co/Cu/Py/Pt çok katlı ince film örneklerinin manyetik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Birinci grup çok katlı örnekler iki aşamalı kaplama işlemiyle hazırlanmıştır. Birinci aşamada, yon demeti kaplama ikinci aşamada ise puls lazer kaplama tekniği kullanılmıştır. Kaplanan tabakaların kalınlığı Rutherford geri saçılma (Rutherford Back Scattering-RBS) ile ölçülmüştür. Ferromanyetik iki tabakalıların manyetik özellikleri oda sıcaklığında FMR ve VSM teknikleriyle incelenmiştir. Standart 4-nokta manyeto-transport ölçümleri çeşitli sıcaklıklarda gerçekleştirildi. $Fe/SiO_2/Ni$ ve $Fe/SiO_2/Co$ örneklerinin örnek düzlemiçi (in-plane) histerezis döngülerinde iki adımlı değişim gözlendi. İki örneğin de histerezis döngülerinin ortasındaki kesişme ince filmin manyetik tabakaları arasında zayıf bir antiferromanyetik etkileşme olduğuna işaret etmektedir. Manyeto-transport ölçümleri hem oda hem de düşük sıcaklıkta anizotropik manyetik rezistansın baskın katkısını göstermektedir. FMR çalışmaları $Fe/SiO_2/Ni$ ve $Fe/SiO_2/Co$ örneklerinde üst ve alt ferromanyetik tabakalar arasında zayıf bir antiferromanyetik ara tabaka etkileşimi olduğunu ortaya çıkarmıştır. Antiferromanyetik etkileşmenin kaynağı da tartışılmıştır. Ayrıca GTÜ'de hazırlanan IrMn/Co/Pt tek katlı ince film örneğinin manyetik özellikleri incelenmiş ve IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneğinin elektriksel algılamayla FMR ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde örneğin kendisi mikrodalga iletim hattı olarak kullanılmıştır. Mikrodalga ışınımı ile birlikte örnek manyetik alan içine konulduğunda FMR olayı esnasında spin doğrultma/diyot/rektifikasyon etkisinden (Spin Rectification Effect) dolayı örnek üzerinde FMR eğrisini yansıtan DC voltaj elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok katlı ince filmler, FMR, SWR, MOKE, VSM, manyeto-transport, elektriksel olarak algılanmış FMR.

SUMMARY

In this work, the magnetic and transport properties of $Fe/SiO_2/Ni$ and $Fe/SiO_2/Co$ and IrMn/Co/Pt and IrMn/Co/Cu/Py/Pt multilayer thin films on the Si/SiO_2 substrates were studied. The first group of multilayers samples were prepared by two-stage deposition process. Ion beam deposition technique was used at the first stage and PLD technique at the second stage.The thickness of deposited layers were measured by Rutherford back scattering (RBS). Magnetic properties of ferromagnetic bilayers were investigated by room-temperature FMR and VSM techniques. Standard 4-point magneto-transport measurements at various temperatures were performed. Two-step switching in the in-plane hysteresis loops of $Fe/SiO_2/Ni$ and $Fe/SiO_2/Co$ samples was observed. A crossing in the middle of hysteresis loops of both samples points to a weak antiferromagnetic interaction between the magnetic layers of the stacks. Magneto-transport measurements showed the predominant contribution of anisotropic magnetic resistance both at room and low temperatures. FMR studies revealed a weak antiferromagnetic interlayer interaction between the top and bottom ferromagnetic layers in $Fe/SiO_2/Ni$ and $Fe/SiO_2/Co$ samples. An origin of the antiferromagnetic interaction was also discussed. Additionally the magnetic properties of the IrMn/Co/Pt sample, prepared at GTU, were investigated and electrically detected FMR measurements of the IrMn/Co/Cu/Py/Pt sample were performed. In these measurements, the sample itself was used as a transmission line. During these measurements, when the sample placed under the effect of microwave radiation together with the external magnetic field, a FMR phenomenon results in a DC voltage, reflecting the FMR curve, due to the Spin Rectification Effect.

Key Words: Multilayer thin film, FMR, SWR, MOKE, VSM, magneto-transport, electrically detected FMR.

TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora eğitimimde desteğini hiçbir zaman esirgemeyip engin bilgisi sebebi ile kendisinden çok şey öğrendiğim ve bu çalışmanın oluşmasında büyük emeği olan danışmanım Prof. Dr. Bulat RAMİ (RAMEEV)'ye, bütün çalışmam boyunca laboratuvarda bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve bana her zaman yardımcı olan değerli hocalarım Doç. Dr. Georgy MOZZHUKHIN, Dr. Ali Cemil BAŞARAN ve Prof. Dr. Bekir AKTAŞ'a, çalışmalarımı yapabilmem için bana izin konusunda anlayış gösteren Fizik Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Rauf SÜLEYMANLI'ya, aynı laboratuvarı paylaştığım yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Dr. Dmitriy SHULGİN ve Ayşe MARAŞLI'ya, bilgisayar programı yazma konusundaki yardımları için Dr. Serkan BÜYÜKKÖSE'ye, Elektriksel FMR deneylerinde yardımcı olan Morteza VAFADAR'a ve doktoram süresince bana yardımcı olan başta Bayram KOCAMAN ve Hasan PİŞKİN olmak üzere Fizik Bölümü'ndeki tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım..

Ayrıca her konuda her zaman desteğini hissettiğim sevgili eşim Murat AY ile canım kızım Zeynep Nehir AY'a, her zaman yanımda olan annem Hidaye ve babam Hasan İRKİN'e, ablam Firdevs GÜRE ve ailesine, son olarak tüm AY ailesine çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	
2. NANOMANYETİZMA KONUSUNDA GENEL BİLGİLER	3
2.1. Dev Manyetorezistans (GMR) Etkisi	3
2.2. Tünelleme Manyetorezistans (TMR) Etkisi	4
2.3. Spin Transfer Tork	6
3. FERROMANYETİK REZONANS (FMR) TEKNİĞİ	8
3.1. Geleneksel Ferromanyetik Rezonans	8
3.1.1. Mıknatıs Sistemi	10
3.1.2. Mikrodalga Köprüsü	10
3.1.3. Kavite	11
3.1.3. Sinyal Algılama Sistemi	11
3.2. Geniş Band (broad-band) FMR	12
3.2.1. Mikro Çubuk ve Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu	13
3.3. Elektriksel Olarak Ölçülen FMR	14
4. SİLİKON ALTTAŞ ÜZERİNDE BÜYÜTÜLEN $Fe/SiO_2/Ni$ VE $Fe/SiO_2/Co$ ÇOK KATMANLI MANYETİK İNCE FİLM YAPILARINDA MANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ	20
4.1. Numunelerin Hazırlanması	20

4.2. EDX (Energy-Dispersive X-ray) Ölçüm Sonuçları 21
4.3. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) 23
4.3.1. Ölçüm Sonuçları 25
4.4. Manyeto-transport Ölçümleri 28
4.4.1. Ölçüm Sonuçları 29
4.5. FMR Ölçüm Sonuçları 31
4.6. Sonuçlar 40
5. SİLİKON ALTTAŞ ÜZERİNDE BÜYÜTÜLEN IrMn/Co/Pt VE IrMn/Co/Cu/Py/Pt ÇOK KATMANLI İNCE FİLM YAPILARINDA MANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ 41
5.1. Numunelerin Hazırlanması 41
5.2. XRR Sonuçları 43
5.3. MOKE Ölçümleri 44
5.4. FMR Ölçümleri 46
5.5. Elektriksel Ferromanyetik Rezonans Ölçümleri 49
5.5.1. Ölçüm Sistemi Örneğin Hazırlanması 49
5.5.2. Deneysel Sonuçlar 51
5.6. Sonuçlar 57
6. SONUÇLAR ve YORUMLAR 58

KAYNAKLAR 60
ÖZGEÇMİŞ 63
EKLER 64

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
γ	:	Jiromanyetik oran
μ	:	Manyetik moment
ω	:	Frekans
AC	:	Alternatif Akım (Alternative Current)
AF	:	Antiferromanyetik
AMR	:	Anizotropik Manyetodirenç (Anisotropic Magnetoresistance)
AP	:	Antiparalel
Ar	:	Argon
B	:	Manyetik alan
Co	:	Kobalt
CPW	:	Eş düzlemli dalga kılavuzu (CoPlanar Waveguide)
DC	:	Doğru Akım (Direct Current)
E	:	Voltaj
EDX	:	Enerji Ayırıcı X-ışını (Energy-Dispersive X-ray)
ESR	:	Elektron Spin Rezonans
F	:	Manyetik akı
Fe	:	Demir
FMR	:	Ferromanyetik Rezonans
g	:	Spektroskopik yarılma faktörü
GHz	:	Giga Hertz
GMR	:	Dev Manyetodirenç (Giant Magneto Resistance)
H	:	Manyetik alan
I	:	Akım
Ir	:	İridyum
Mn	:	Mangan
MOKE	:	Manyeto Optik Kerr Etkisi (Magneto-Optic Kerr Effect)
MR	:	Manyetorezistans

MRAM		Manyetorezistiv rastgele-erişim hafıza (Magnetoresistive random-access memory)
MS	:	Mikro şerit (microstripe)
MTJ	:	Magnetic Tunnel Junction
Ni	:	Nikel
NM	:	Manyetik olmayan (Non Magnetic)
O	:	Oksijen
Oe	:	Oersted
P	:	Paralel
PLD	:	Darbeli Lazer Kaplama (Pulse Laser Deposition)
PPMS	:	Fiziksel Özellik Ölçüm Sistemi (Physical Property Measurement System)
RBS	:	Rutherford geri saçılma (Rutherford Back Scattering)
rf	:	radyo frekans
SI	:	Yüzey türdeşsizliği (Suface Inhomogeneity) modeli
Si	:	Silisyum
STT	:	Spin Transfer Tork (Spin Transfer Torque)
SWR	:	Spin Dalga Rezonans (Spin Wave Resonance)
TEM	:	Enine Elektromanyetik Mod (Transverse Electromagnetic Mod)
TMR	:	Tünelleme Manyetodirenç (Tunneling Magnetoresistance)
VSM	:	Titreşimli Örnek Manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometer)
VNA	:	Vektör Network Analizörü
XRR	:	X-Işını Yansıması (X-Ray Reflectivity)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	GMR Etkisi.	4
2.2:	Ferromanyetik tabakaların mıknatıslanma yönelimine bağlı olarak elektronların tünellemeyle geçişi.	5
2.3:	Spin Transfer Tork'un (STT) şematik gösterimi.	6
3.1:	Elektron Spin Rezonans Sistemi'nin Blok Diyagramı.	9
3.2:	Bruker EMX ESR spektrometresi.	9
3.3:	VNA-FMR'ın taslağı:VNA, koaksiyel (coax) kablolar, mikrodalga probları ve eşdüzlemli dalga kılavuzu (coplanar waveguide) ve onun üzerine yerleştirilmiş bir ince manyetik film. Rf-manyetik alan çizgileri şematik olarak Larmor şartını sağlayan arajmanda olduğunu göstermek için çizilmiştir.	13
3.4:	Bir CPW şematik diyagramıdır. Alttaki diyagram manyetik (düz çizgiler) ve elektrik (kesikli çizgiler) alan çizgilerinin sinyal ileticinin (S) etrafında dolanmasını göstermektedir.	14
3.5:	Oda sıcaklığında mıknatıslanma yöneliminin manyetik alan ve spin transfer tork uygulayarak ayarlanmasının karşılaştırılması.	15
3.6:	Üç temsili cihaz yapısının kesiti; a) metalik noktasal kontak b) litografiyle şekillendirilmiş noktasal kontak c) nanosütun yapısı.	16
3.7:	Oda sıcaklığınsa spin akımının indüklediği mıknatıslanma tersine dönüşünün tipik deneysel sonuçları. a) ölçüm prob konfigürasyonuyla beraber nanosütunun şematik gösterimi; b) üretilen nanosütunun üst görünüşünün taramalı elektron mikroskobu görüntüsü; c) dış manyetik alanın bir fonksiyonu olarak dört-terminal rezistansı; d) enjekte dc akımın bir fonksiyonu olarak diferansiyel rezistans.	17
3.8:	Spin transfer tork diyot efektin prensibinin kavramsal resmi. RF akım verilmesi cihaz rezistansının modülasyonunu indükler. Sonuç olarak indüklenen voltaj doğrultulur.	18
4.1:	$Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni$ örneği için EDX sonuçları.	21
4.2:	$Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Co$ örneği için EDX sonuçları.	22

4.3: VSM-örnek tutucu ve dedeksiyon mekanizması. 23
4.4: GTÜ Fizik Bölümü PPMS Sistemi. 24
4.5: $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Ni$ örneği için histerezis döngüsü. 25
4.6: $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co$ örneği için histerezis döngüsü 25
4.7: Tabakalar arasındaki antiferromanyetik etkileşim durumunun şematik gösterimi (üstte) ile $Fe/SiO_2/Ni$ (sol altta) ve $Fe/SiO_2/Co$ (sağ altta) örnekleri için deneysel döngülerin karşılaştırılması. 26
4.8: $Fe/SiO_2/Ni$ örneği için Histerezis döngüsü (üstte) ve film yüzeyine dik uygulanan DC manyetik alanla ölçülen histerezis döngüsünün birinci türevi (*dM(H)/dH*) (altta). 27
4.9: $Fe/SiO_2/Co$ örneği için Histerezis döngüsü (üstte) ve film yüzeyine dik uygulanan DC manyetik alanla ölçülen histerezis döngüsünün birinci türevi (*dM(H)/dH*) (altta). 28
4.10: Magnetotransport ölçümleri için örnek üzerine yapılan kontakların şematik gösterimi ve kontaklar arasındaki dirençlerin ölçülen büyüklükleri. 29
4.11: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni$ örneği için (sol) ve $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Co$ örneği için (sağ) oda sıcaklığında (305 K'de) yapılan manyeto-transport ölçümleri sonuçları. 30
4.12: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni$ örneği için (sol) ve $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Co$ örneği için (sağ) düşük sıcaklıkta (10 K'de) yapılan manyeto-transport ölçümleri sonuçları. 30
4.13: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni$ örneği için FMR spektrumun açıya bağlılığı. 32
4.14: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni$ örneği için FMR rezonans alanının açıya bağlılığı. Rezonans alanı için teorik modelleme sonuçları çizgilerle gösterilirken deneysel data sembollerle sunulmuştur. 32
4.15: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Co$ örneği için FMR spektrumun açıya bağlılığı. 35
4.16: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Co$ örneği için FMR rezonans alanının açıya bağlılığı. Rezonans alanı için teorik modelleme sonuçları çizgilerle gösterilirken deneysel data sembollerle sunulmuştur. 36
4.17: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni$ örneği için katı (bulk) SWR modları. 38
4.18: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Co$ örneği için yüzey (surface) SWR modları. 38
5.1: Si/SiO_2(200nm)/IrMn(20nm)/Co(6nm)/Pt(3nm) örneğinin kesidi. 41

5.2: Si/SiO_2(200nm)/IrMn(20nm)/Co(6nm)/Cu(3nm)/Py(6nm)/Pt (3nm) örneğinin kesidi. 42
5.3: GTÜ Nanoteknoloji Enstitüsündeki film büyütme sistemi. 42
5.4: Sputter sisteminin şematik gösterimi. 43
5.5: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için XRR ölçüm sonucu (üstte) ve programla hesaplanan parametre değerleri (altta). 44
5.6: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlemde geometride açıya bağlı MOKE ölçüm sonuçlarında açıya bağlı histerezis eğrileri. 45
5.7: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlemde geometride MOKE ölçüm sonuçlarında kalıcı mıknatıslanmanın açıya bağlı değişimi. 45
5.8: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlem dışı geometrideki FMR spektrumun açıya bağlılığı. 46
5.9: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlem dışı geometrideki FMR rezonans alanının açıya bağlılığı. 47
5.10: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlemde geometrideki FMR spektrumun açıya bağlılığı. 48
5.11: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlemde geometrideki FMR rezonans alanının açıya bağlılığı. 48
5.12: Elektriksel FMR ölçüm sisteminin şematik gösterimi. 49
5.13: Elektriksel olarak ölçülen FMR ölçüm düzeneği 50
5.14: Elektriksel FMR ölçümü deneyinde kullanılan Labview programının ön panelinin bilgisayar ekranındaki görüntüsü. 50
5.15: Si/SiO_2(200nm) / IrMn(20nm) / Co(6nm) / Pt(3nm) örneğinin RF ekranlama kutusu içindeki görüntüsü. 51
5.16: Si/SiO_2(200nm) / IrMn(20nm) / Co(6nm) / Cu(3 nm) / Py(6 nm) / Pt(3nm) örneğinin RF ekranlama kutusu içindeki görüntüsü. 52
5.17: Si/SiO_2/IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneğinde 200 MHz'te elektriksel FMR sinyali. 53
5.18: Si/SiO_2/IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneğinde 3GHz'te elektriksel FMR sinyali. 54
5.19: Si/SiO_2/IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneği için 2GHz'te kaydedilen elektriksel FMR sinyalinin eğrisine tarama yönünün etkisi. 55
5.20: Si/SiO_2/IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneği için 2GHz mikrodalga frekansında elde edilen FMR sinyali üzerine modülasyon frekansının etkisi. 56

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No: **Sayfa**

3.1: Fe ve Ni katmanlarının FMR şiddetleri. 33

1. GİRİŞ

Elektronun spin ve yük özelliğinin birlikte kullanılmasından doğan teknoloji spintronik olarak adlandırılmaktadır.

Spintronik birçok fiziksel prensibe dayanarak çok hızlı şekilde gelişmeye devam eden bir araştırma ve teknoloji alanıdır. Spintronik cihazlar arasında ilk ve çok önemli türü manyetorezistans (MR) olayına dayalı olanlardır. MR, bir malzemenin direncinin dış manyetik alan etkisi altında değişmesi özelliğidir. Bu özelliğin birçok türü bulunmaktadır. [1]. Bunlardan anizotropik MR (AMR) ile ilgili deneysel çalışmaların ilki 1856 da W. Thomson tarafından yapılırken, iki ferromanyetik tabakanın arasına yalıtkan bir malzeme koyarak oluşturulan MTJ (Magnetic Tunnel Junction)'lerde gerçekleşen Tünelleme MR (TMR) 1975'de M. Julliere tarafından gözlemlendi [2]. Manyetorezistans etkisine dayalı manyetik sensörler, hard disklerin okuma kafalarında, kalıcı hafıza elemanlarında ve diğer spintronik cihazlarda kullanılmaktadır [3]. MTJ'ler konusunda farklı ara tabaka kullanılarak tünelleme bariyeri için birçok çalışma yapılmıştır [4-6]. Teorik ön görülerin [7,8] çok yüksek TMR oranının MgO temelli MTJ'lerle deneysel olarak doğrulanmasıyla [9,10] birçok araştırmacı bu sistem üzerine çalışmalarını yoğunlaştırdı. 1987’de ise iki ferromanyetik tabakanın arasına çok ince iletken ve manyetik olmayan bir malzeme koyarak oluşturulan spin valf yapısındaki Giant (dev) MR etkisinin Albert Fert ve Peter Grünberg tarafından keşfedilmesiyle spintroniğe olan ilgi artmıştır. Teknojide devrim denebilecek bu çalışma onlara 2007 yılında Nobel Ödülü getirmiştir [11,12].

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmada bilim dünyasında büyük ilgi gören TMR ve GMR yapısındaki çok katlı manyetik ince film örnekleri ile tek katlı manyetik ince film örneğinin manyetik ve elektriksel özelliklerini çeşitli tekniklerle incelemeye çalıştık. Bunlar Ferromanyetik Rezonans (FMR), Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM), Manyeto Optik Kerr Etkisi (MOKE), manyeto-transport ölçümleri ve elektriksel FMR ölçümleri olup sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Literatüre bu

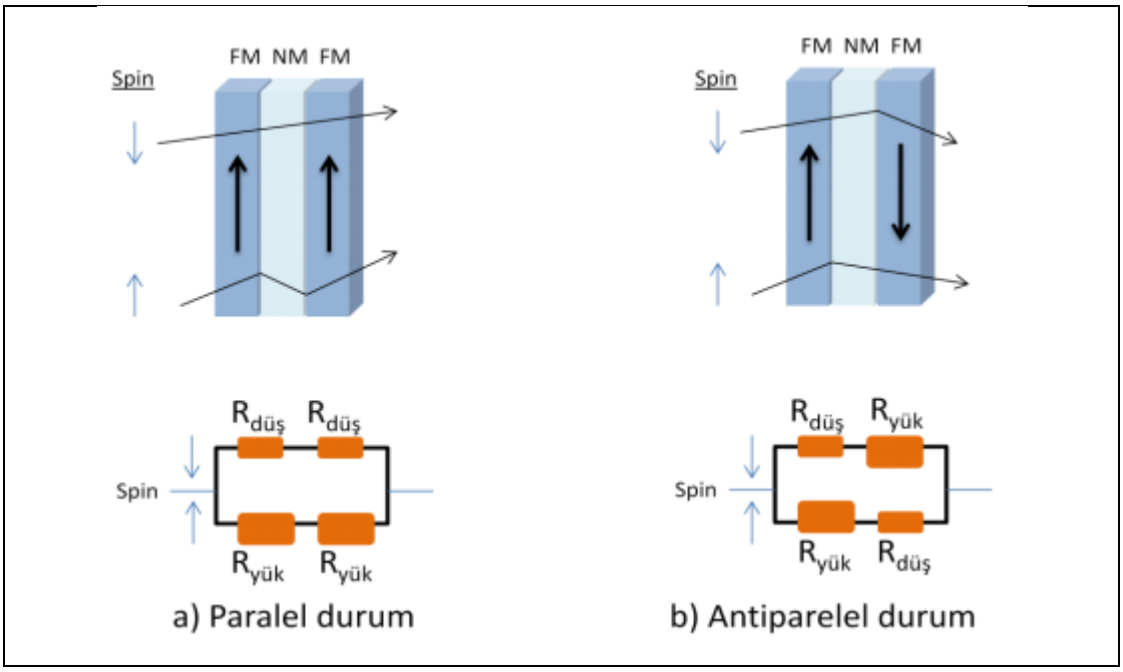
örneklere ait bilgiler kazandırılmış olup sonraki çalışmalara ışık tutacak veriler elde edilmiştir.

Tezin içeriği 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş kısmı yer alırken ikinci bölümde manyetizmanın önemli konularından olan GMR etkisi, TMR etkisi ve spin transfer tork açıklanmaya çalışılmıştır. Üçüncü bölümde ise tezde önemli bir yer tutan ferromanyetik rezonans tekniğinin türleri üzerinde durulmuş, geleneksel FMR ve elektriksel olarak ölçülen FMR açıklanmaya çalışılmıştır. Dördüncü ve beşinci bölümde deneysel verilere yer verilmiştir. Dördüncü bölümde $Fe/SiO_2/Ni$ ve $Fe/SiO_2/Co$ çok katmanlı manyetik ince film yapılarında manyetik ve elektriksel özelliklerin farklı tekniklerle incelenmesi, beşinci bölümde ise IrMn/Co/Pt ve IrMn/Co/Cu/Py/Pt çok katmanlı ince film yapılarında manyetik ve elektriksel özelliklerin farklı tekniklerle incelenmesine yer verilmiştir. Altıncı bölümde genel sonuçlar ve yorumlarla tez sonlandırılmıştır.

2. NANOMANYETİZMA KONUSUNDA GENEL BİLGİLER

2.1. Dev Manyetodirenç (GMR) Etkisi

GMR (Giant Magnetoresistance) efekt, yani dev manyetodirenç etkisi, bazı malzemelere manyetik alan uygulanmasıyla bu malzemelerin elektriksel direncinde meydana gelen büyük değişikliği ifade eder. Ferromanyetik tabakaların birkaç nanometre kalınlığında iletken bir manyetik olmayan (non-manyetik) tabakayla ayrıldığı sandviç yapılar da denilen ince film yapılarında gözlemlenir. Bu etki komşu ferromanyetik tabakaların mıknatıslanmalarının paralel ya da antiparalel uzanmasına bağlı olarak elektriksel dirençte büyük bir değişimin gözlenmesidir. Eğer ferromanyetik tabakaların mıknatıslanmaları paralel ise direnç düşük, antiparalel ise direnç büyük olmaktadır. Bu durum Şekil 2.1' de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.1.a)' da görüldüğü gibi ferromanyetik tabakaların mıknatıslanması paralel yönelimli ise spin-aşağı elektronlar, manyetik momentleri ferromanyetik tabakanın mıknatıslanmasıyla aynı yönelime sahip olduğundan yapıdan kolayca geçmekte ve direnç düşük olmaktadır. Öte yandan spin-yukarı elektronlar, manyetik momentleri ferromanyetik tabakayla zıt yönelime sahip olduğundan saçılmaya uğramakta ve direnç daha büyük olmaktadır. Ancak Şekil 2.1.b)'de gösterildiği gibi ferromanyetik tabakaların mıknatıslanması antiparalel yönelimli ise her iki spin durumundaki elektronlar da saçılmaya uğrarlar ve direnç çok daha yüksek olur [13].



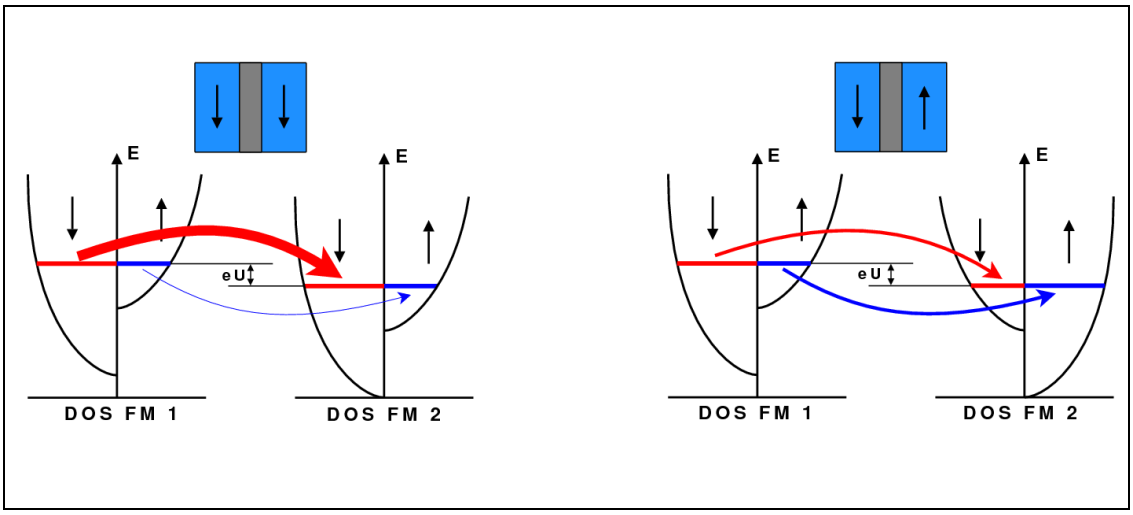
Şekil 2.1: GMR Etkisi.

2.2. Tünelleme Manyetodirenç (TMR) Etkisi

T. Miyazaki ve J. S. Moodera grupları tarafından 1995'de [4, 5] *oda sıcaklığında* tünelleme manyetodirenç (Tunneling Magnetoresistance) yani TMR etkisinin de keşfiyle spintronik çalışmaları daha da hız kazanmıştır. TMR (Tunneling Magnetoresistance) etkisi ise GMR etkisine benzer bir etkidir. Ancak bu etkinin görüldüğü manyetik tünel eklem (Magnetic Tunnel Junction-MTJ) yapılarında, ferromanyetik tabakaların arasındaki malzeme elektriksel olarak yalıtkan bir malzemedir. Burada yalıtkan tabaka bariyer gibi davranır. Elektron bir ferromanyetik tabakadan diğer ferromanyetik tabakaya kuantum mekaniksel bir durum olan tünellemeyle geçer. Yine ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanmaları birbirine paralel olduğunda elektronun tünelleme yaparak diğer tabakaya geçme olasılığı yüksektir, yani sistemin elektriksel direnci düşüktür. Tabakaların mıknatıslanmaları antiparalel yöneliyorsa elektronun tünelleme yapma olasılığı düşüktür, yani sistemin elektriksel direnci yüksektir.

TMR etkisinin temelini basit bir şekilde açıklamak için Julliere Modeli kullanılmaktadır. Bu modelde iki varsayım yapılmıştır. Birincisi tünelleme boyunca elektronun spini korunur. Böylelikle iletim, spin-yukarı elektronlarının tünellemesi

ve spin-aşağı elektronların tünellemesinin toplamı olur. Bu varsayıma göre; paralel durum (P) için, ferromanyetik tabakaların mıknatıslanmaları paralel olduğunda elektronlar majoriti (çoğunluk) spin-durumundan majoriti spin-durumuna, minoriti (azınlık) spin-durumundan minoriti spin-durumuna tünelleme yapmaktadır. Konfigürasyon antiparalel (AP) olduğunda ise, elektronlar majority spin-durumundan minority spin-durumuna ve tam tersi de geçerli olacak şekilde tünelleme yapmaktadır (Şekil 2.2) [14].



Şekil 2.2: Ferromanyetik tabakaların mıknatıslanma yönelimine bağlı olarak elektronların tünellemeyle geçişi.

Julliere Modeli'ndeki ikinci varsayım ise belirli bir spin yönelimi için iletkenlik, iki ferromanyetik elektrodun iletkenlik elektronlarının durum yoğunluklarının çarpımıyla orantılıdır. Buna göre P durumundaki tünelleme akımı ile AP durumundaki aynı değildir. İletkenlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\text{P durumu;} \quad I_{\uparrow\uparrow} \propto N_l^{\uparrow} N_r^{\uparrow} + n_l^{\downarrow} n_r^{\downarrow} \tag{2.1.}$$

$$\text{AP durumu;} \quad I_{\uparrow\downarrow} \propto N_l^{\uparrow} n_l^{\uparrow} + N_r^{\downarrow} \tag{2.2.}$$

Burada N ve n, Fermi seviyesindeki spin-yukarı ve spin-aşağı elektronların sayısını belirtmektedir. Yani N majoriti spin durumunun elektron enerji durum yoğunluğunu, n ise minoriti spin durumunun durum yoğunluğunu temsil etmektedir. Ayrıca l (left) sol elektrotu, r (right) ise sağ elektrotu temsil etmektedir. Paralel

durum için akımın daha yüksek olduğu açıktır. Sonuç olarak TMR oranı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [14].

$$TMR = \frac{I_{\uparrow\uparrow} - I_{\uparrow\downarrow}}{I_{\uparrow\downarrow}} \tag{2.3}$$

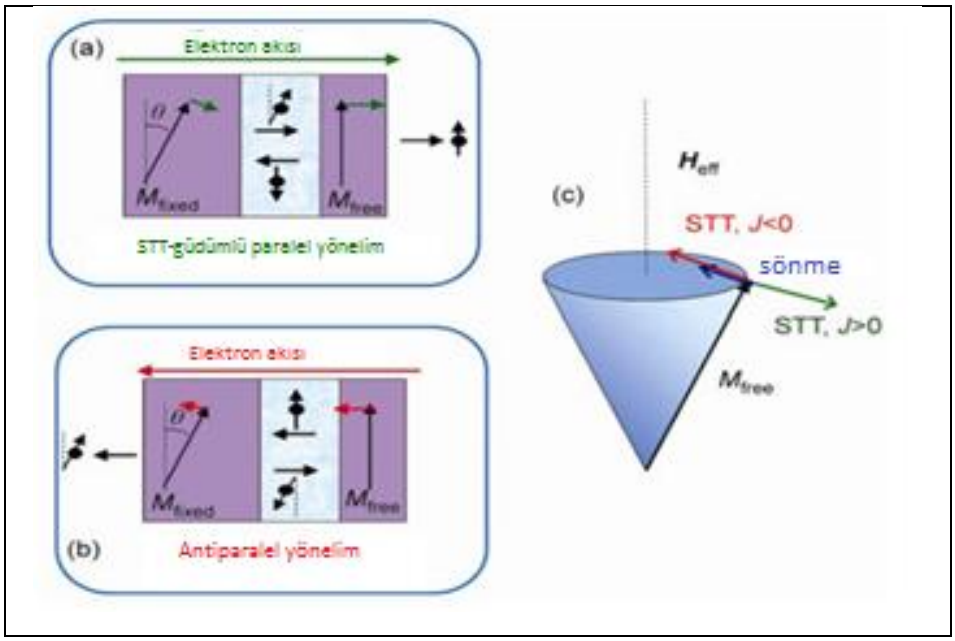
Bu oranı spin polarizasyonu cinsinden aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$TMR = \frac{2P_l P_r}{1 - P_l P_r} \quad \text{, burada} \tag{2.4.}$$

$$P_l = \frac{N_l^{\uparrow} - n_l^{\downarrow}}{N_l^{\uparrow} + n_l^{\downarrow}} \text{ ve } P_r = \frac{N_r^{\downarrow} - n_r^{\downarrow}}{N_r^{\downarrow} + n_r^{\downarrow}} \quad \text{dir.} \tag{2.5.}$$

2.3. Spin Transfer Tork

Spin açısal momentum (tork) transferi (Spin Transfer Torque, STT), iletken ortamda spin polarize akım ile manyetik momentler arasındaki bir etkileşmedir. Bu durum açısal momentumun, serbest (yük taşıyıcı) elektronların spinleri ve manyetik momentleri arasında değiş-tokuş etkileşmesinden kaynaklanır [15].



Şekil 2.3: Spin Transfer Tork'un (STT) şematik gösterimi.

Bu olay 1970 ve 1980'lerden beri akım indüklü domain duvarı hareketi üzerine bir çalışmada araştırılmaktaydı [16, 17]. 1996'da J. C. Slonczewski ve L. Berger teorik çalışmalarında, yeterince yüksek akım yoğunluğundaki spin-polarize akımın, çok katlı sistemlerdeki manyetik momentler üzerine büyük bir tork oluşturabileceğini ve manyetik uyarımları veya bütün bir tabakanın mıknatıslanmasını tersine dönecek şekilde indükleyebilir olduğunu öne sürmüşlerdir [18, 19]. Bu ilk teorik çalışmalar ışığında yapılan deneysel çalışmalarla spin-transfer tork olayını ispatladılar ve şu ana kadar yapılan birçok araştırma neticesinde artık STT uygulamalarının düşünülmesi mümkün hale geldi [20-23].

STT uygulamalarından spin-transfer tork osilatöründe manyetik momentler kararlı bir presesyon yaparlar, böylece geniş frekans aralığına bir mikrodalga kaynağı olarak kullanılabilir. STT osilatörleri küçük ebatlara ve hızlı modülasyon yeteneğine sahiptirler. Spin transfer tork, manyetik depolama aygıtlarındaki okuma kafaları için de önemli bir fenomen. Ayrıca kablosuz iletişim sisteminde veri transferinde referans osilatör olarak kullanılabileceği gibi MRAM denilen hafıza elemanlarında da kullanılarak STT-MRAM'ler işlem hızını çok daha fazla arttırarak geleceğin umut vadeden kalıcı hafızaları olabilirler. 1998'deki bir çalışmayla elektrik akımının ferromanyetik bir malzemenin manyetik durumunu etkileyebileceği gösterildi [20].

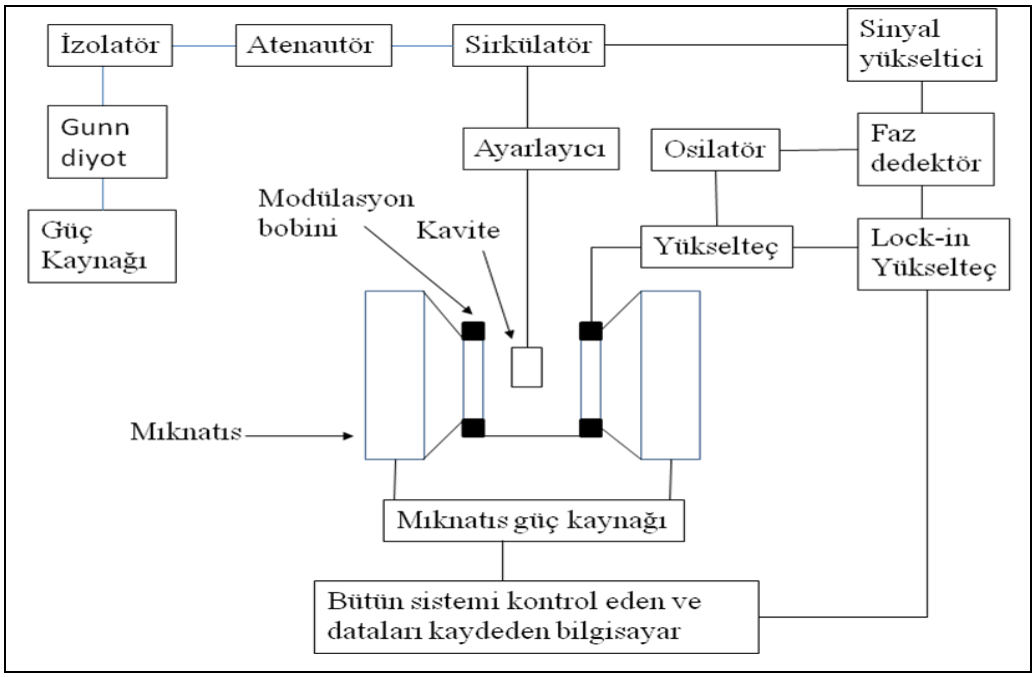
3.FERROMANYETİK REZONANS TEKNİĞİ

FMR ince filmlerin manyetik özelliklerinin incelenmesinde en güçlü deneysel tekniklerden biridir. İnce filmlerin manyetik özelliklerini tanımlayan manyetik anizotropi, manyetik moment, Curie sıcaklığı, manyeto-elastik etkileşme katsayıları ve mıknatıslanmanın durulma mekanizması gibi tüm parametreler ölçülebilir [24].

3.1. Geleneksel Ferromanyetik Rezonans

Geleneksel FMR tekniği ESR (Elektron Spin Rezonans) spektrometresiyle uygulanmaktadır. ESR sisteminin ana bileşenleri 4 başlık altında toplanabilir. Bunlar mıknatıs sistemi, mikrodalga köprüsü, kavite ve sinyal algılama sistemi şeklinde olacaktır. Şekil 3.1. de bir ESR sisteminin blok diyagramı görülmektedir.

FMR tekniğinin teorisine bakacak olursak, dış bir manyetik alan etkisindeki ferromanyetik malzemenin manyetik momentleri alana paralel olacak şekilde yönlenir ve alan vektörünün çevresinde ω_o öz frekansıyla presesyon (topaç) hareketi yaparlar. Bu frekansa Larmour frekansı da denir. Malzeme üzerine, radyofrekansı (mikrodalga) ışınımı uygulanır ve bu ışınımın titreşen (salınımlı) manyetik alan bileşeni mutlaka statik alanın yönüne dik olur. Gönderilen mikrodalganın ω frekansı, Larmor frekansına yaklaştığında enerji absorbe edilmeye başlanır ve frekanslar eşit olduğunda ($\omega=\omega_0$) yani rezonans durumu gerçekleştiğinde maksimum mikrodalga enerjisi absorpsiyonu (soğrulması) olur. Deneylerde kullanılan ESR cihazlarında mikrodalganın frekansı (ω) sabitken manyetik alan (ve dolayısıyla Larmour frekansı, ω_0) değişken olup alan bazlı (field domain) bir teknik olarak adlandırılır ve maksimum absorpsiyonun olduğu manyetik alana rezonans alanı ($H_0=\omega_0/\gamma$) denir. İşte bu rezonans alanı, bilgisayar ekranında görülen ESR spektrumunda pik olarak gözlemlenir [13].



Şekil 3.1: Elektron Spin Rezonans Sistemi'nin Blok Diyagramı.

Şekil 3.2: Bruker EMX ESR spektrometresi.

Tez kapsamında gerçekleştirdiğimiz çalışmalarda Fizik Bölümünde ESR laboratuvarında bulunan *Bruker EMX* ESR spektrometresini (Şekil 3.2) kullandık. Genel olarak baktığımız ESR spektrometre bileşenlerini aşağıdaki altbölümlerde daha ayrıntılı bakalım.

3.1.1. Mıknatıs Sistemi

Geleneksel olarak daha çok *elektro*mıknatıs şeklinde kullanılan bu ESR bileşeni 0'dan 2 T'laya kadar değişen manyetik alan sağlar. Mıknatısa güç sağlayan güç kaynağının iyi bir şekilde ayarlanmasıyla stabilize akım elde edilerek örnek üzerinde çok düzgün (homojen) ve sabit manyetik alan elde edilir. Güç kaynağı elektromıknatısa verilen akımı çok kontrollü şekilde değiştirir ve böylece manyetik alan bir değerden başka değere taranır. Manyetik alan Hall prob vasıtasıyla gaussmetre tarafından ölçülür ve özel bir geri bildirim sistemi sayesinde akım kaynağından verilen akım doğru manyetik alan ve istenilen tarama hızı verecek şekilde ayarlanır.

3.1.2. Mikrodalga Köprüsü

Genel olarak mikrodalga kaynağı, zayıflatıcı, sirkülatör, detektör ve ön yükselteç ana kısımlarından oluştuğu söylenebilir. Eskiden mikrodalga kaynağı genelde klystron olup modern ESR spektrometrelerinde Gann diyotu olmaktadır. Kullanılan X-bant spektrometresi için oda sıcaklığı ölçümlerinde 9.8 GHz veya düşük sıcaklık sistemi takıldığında 9.5 GHz frekansa sahip mikrodalga oluşturur. Örnek üzerine düşen mikrodalganın gücünü doğru bir şekilde ayarlamak için değişken güç azaltıcı (atenüatör, zayıflatıcı) bulunmaktadır. Zayıflatıcıdan sonra mikrodalga ışınımı sirkülatörden geçerek dalga kılavuzu sayesinde içine örnek konulmuş kaviteye yönlendirilir. Detektör ise üzerine düşen mikrodalga gücüne bağlı bir DC (modüle edilen manyetik alan için ise düşük frekanslı) voltaj veren yarıiletken diyottur ve bir sirkülatör vasıtasıyla kaviteden geri dönen mikrodalga ışınımın genliğini dedekte eder. Yarıiletken diyot çıkışından düşük frekanslı (modülasyon frekanslı) AC voltaj ön yükselteçten geçerek ESR spektrometresinin elektronik konsolunda bulunan lock-in (kilitlemeli) yükseltece (senkro-detektöre) gönderilir.

3.1.3. Kavite

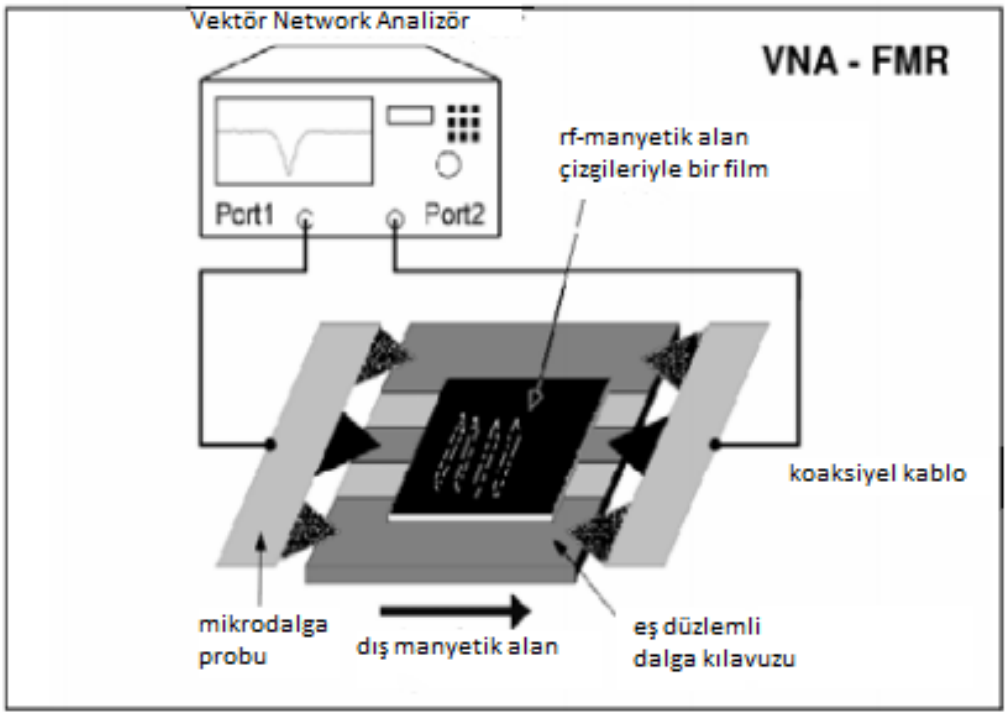
Kavite en basit tanımıyla dikdörtgen veya silindirik şekle sahip metal bir kutudur. Örnek bu bölüme yerleştirilir. Rezonans durumunda kavitenin içinde bir duran dalga oluşur. Kavitenin merkezinde oluşan bu duran dalganın maksimum manyetik alan ve minimum elektrik alan bileşeni olduğundan, örnek buraya yerleştirildiğinde sadece manyetik bileşene duyarlı manyetik rezonans sinyali elde edilir. Ayrıca kavite veya diğer değişle rezonatör sayesinde metal duvarlardan yansıyan elektromanyetik dalgalarının pozitif girişimi sayesinde duran dalganın genliği kavitenin kalite faktörü (Q) kadar 1000-5000 kat daha yüksek olur ve böylece hassasiyet $\sqrt{Q}$ ile orantılı olarak artar. Mikrodalga kılavuzu ve kavite arasındaki bağı iris sağlar. Mikrodalga ışınımın ne kadarının kavite içine girip çıkacağını kontrol eder. Böylelikle iris, kavite ve mikrodalgayı ileten dalga kılavuzu arasındaki empedans uyumunu sağlar ve (rezonans durumu dışında) detektör üzerine kaviteden yansıyan mikrodalga gücü 0 olur.

3.1.4. Sinyal Algılama Sistemi

Kilitlemeli yükselteç düşük seviyeli sinyalleri gürültüden ayırma işini yapar. DC (Direct Current=Doğru Akım) voltaj ölçümlerinin ortam gürültüsünden arındırarak yapılması çok zor bir iştir. Çünkü düşük frekanslarda 1/f şeklinde frekans ile ters orantılı artan gürültü etkisi, ölçümleri çok olumsuz etkiler. Bu nedenle manyetik alanı modüle ederek ESR sinyali DC yerine 6-100kHz frekans aralığında bir sabit frekanslı AC (Alternative Current=Alternatif Akım) sinyal olarak işlenir. Böylece faz duyarlı senkro-algılayıcı (kilitlemeli yükselteç) ve manyetik alan modülasyonu sayesinde ESR sisteminin duyarlılığı 10^3 kat arttırabilir. Ancak modülasyon şiddeti, frekansı ve lockin yükseltecinin zaman sabitini dikkatli bir şekilde seçmek gerekir. Aksi takdirde ESR sinyalinin şekli bozulabilir ve yorumlanmasını zorlaşabilir. Yukarıda bahsedilen sinyal işlemi algoritması neticesinde kaydedilen veya bilgisayara aktarılarak monitörde gözlemlenen ESR spektrumu soğurma çizgisinin 1. türevi şeklinde olur.

3.2. Geniş Bant (broad-band) FMR

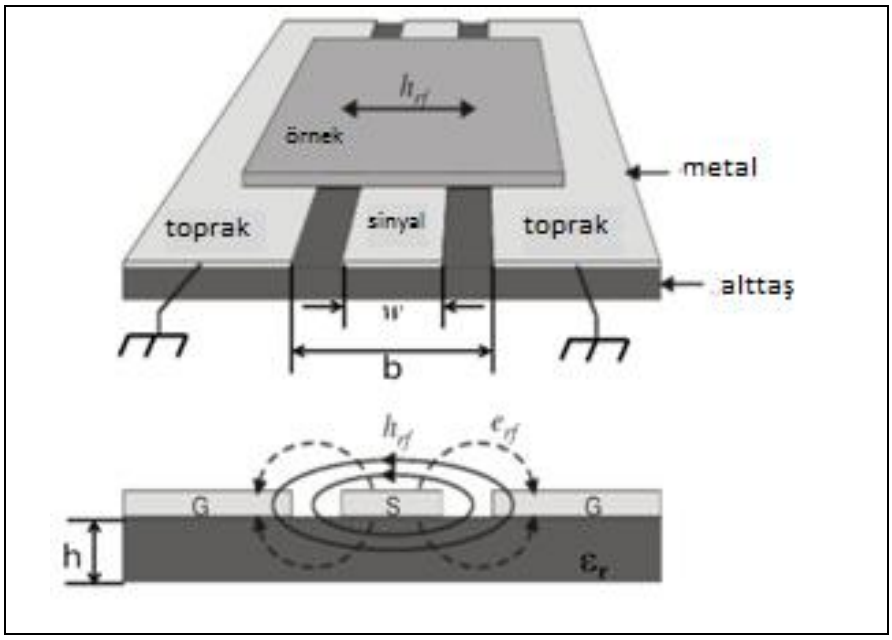
Geniş bant FMR ya da Vektör Network Analizör (VNA) FMR tekniği; VNA, sensör olarak eş düzlemli dalga kılavuzu (coplanar waveguide, CPW) veya şerit (stripe) ve koaksiyel kablolardan oluşan bir sistemle uygulanmaktadır. Bu tekniğin birçok avantajı vardır. Öncelikle çok geniş bir frekans aralığında FMR ölçümlerinin yapılmasını sağlamaktadır. İkinci olarak da FMR spektrumları hem DC manyetik alana hem de frekansa göre taranarak kaydedilebilmektedir [25]. Üstelik standart fotolitografi kullanılarak bir alttaş üzerinde üretilmiş bir CPW veya şerit sayesinde özellikle ince film örneklerde FMR ölçümlerinin yapılmasına olanak vermektedir [26]. Ayrıca, uygulanan alan taramasından kaynaklanan herhangi bir manyetik denge durumu (faz) değişikliğini önlemek için *sabit bir alan* içinde frekansa bağlı rezonans eğrilerinin elde edilmesi ve böylece manyetik anizotropilerinin daha iyi karakterizasyonu, mıknatıslanma dinamiklerinin incelenmesi ve malzemelerin yüksek frekans tepkisi çalışılması için uygun ve çok amaçlı bir araçtır [27]. CPW bazlı VNA tekniği aşağıda şematik olarak gösterilmektedir [28]. Daha önce bahsettiğimiz özelliği tekrar vurgulamakta yarar vardır: bu teknikte hem geleneksel teknikte gibi frekans sabit olup manyetik alan taranabilir hem de dış manyetik alan sabit tutulurken mikrodalga uyarım frekansı (ω) değiştirilerek tarama yapılır, yani frekans bazlı (frequency domain) bir teknik olarak ta uygulanabilmektedir.



Şekil 3.3: VNA-FMR'ın :VNA, koaksiyel (coax) kablolar, mikrodalga probları ve eşdüzlemli dalga kılavuzu (coplanar waveguide) ve onun üzerine yerleştirilmiş bir ince manyetik film. RF-manyetik alan çizgileri şematik olarak çizilmiştir.

3.2.1. Mikro Çubuk ve Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu

Mikro şerit (microstripe-MS) ve eş düzlemli dalga kılavuzu (CPW) aslında geniş frekans aralığında mikrodalga tekniğinde yaygın bir şekilde kullanılan iletim hatlarıdır. Geniş bant FMR tekniğinde örnek mikro şerit veya eş düzlemli dalga kılavuzunun sinyal hattının üzerine yerleştirilir (Şekil 3.4), ve mikrodalga VNA'nın Port1'i vasıtasıyla MS veya CPW'ye iletilir ve ya yansıtılan ya da iletilen sinyaldeki manyetik alana veya frekansa göre değişiklik analiz edilir. VNA cihazı frekans domaininde çalıştığı için normalde sabit alanda frekans taranmaktadır, FMR şartları gerçekleştiğinde mikrodalga soğurması oluşur. MS veya CPW alttaşının kalınlığı mikrodalga boyunda çok daha küçük ($h \ll \lambda$) olduğu için, mikrodalga bu iki hatta yarı-TEM mod gibi yayılır. 50Ω'luk impedansla uyumlu olmak için MS veya CPW hatlarının boyutları belli geometrik sınırlar içinde olmalıdır [29].

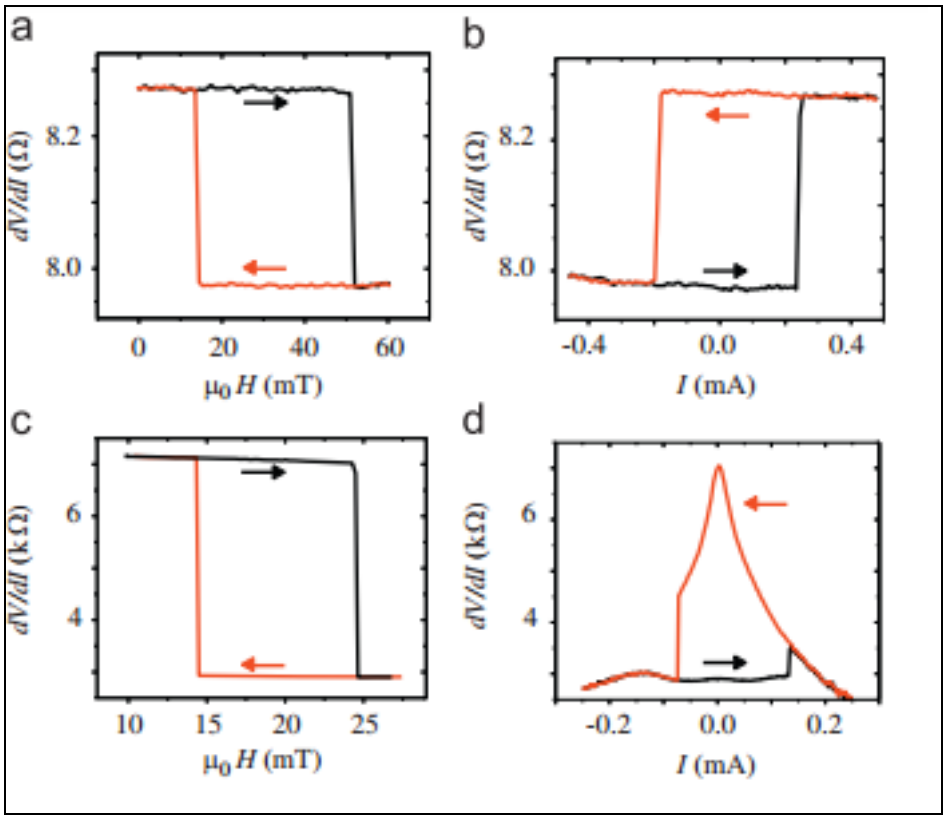


Şekil 3.4: Bir CPW şematik diyagramıdır. Alttaki diyagram manyetik (düz çizgiler) ve elektrik (kesikli çizgiler) alan çizgilerinin sinyal (S) ve toprak (G) hatlarının etrafında nasıl dağıldığını göstermektedir.

3.3. Elektriksel Olarak Ölçülen FMR

Manyetik malzemelere elektrik akımı uygulayarak açısal momentum yani torktransferi (Spin Transfer Torque, STT) son yıllarda bilim insanlarının odak noktalarından biridir. 1996'da J. C. Slonczewski ve L. Berger teorik çalışmalarında, yeterince yüksek akım yoğunluğundaki spin-polarize akım, çok katlı sistemlerdeki manyetik momentler üzerine büyük bir tork oluşturabilir ki bu etki manyetik salnımları indükleyebilir ya da bütün bir tabakanın mıknatıslanmasının yönünü değiştirebilir şeklinde bir iddiada bulunmuşlardır.[16,17]. Akabinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla iddiaları doğrulandı ve spin-transfer tork bir çok çalışmada çeşitli uygulamalar için incelenmeye devam etti [30-32].

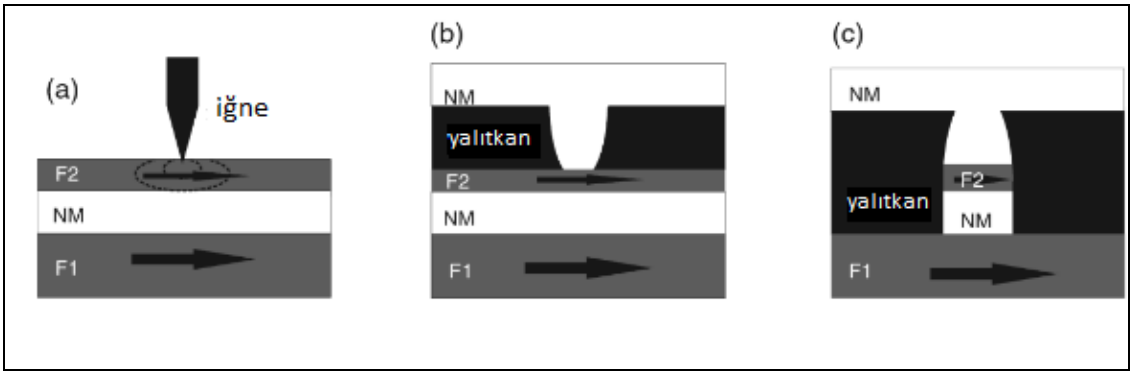
1998'deki bir çalışmayla elektrik akımının ferromanyetik bir malzemenin manyetik durumunu etkileyebileceği gösterildi [20]. Bu çalışmada çok katlı örnek üzerine yüksek akım yoğunluğunu enjekte etmek için mekanik noktasal kontak kullanıldı.



Şekil 3.5: Oda sıcaklığında $Ni_{81}Fe_{19}$ /Cu / $Ni_{81}Fe_{19}$ nano sütun örneğinin a) ve b) ve PtMn/$Co_{70}Fe_{30}$/Ru/$Co_{60}Fe_{20}B_{20}$/MgO/$Co_{60}Fe_{20}B_{20}$ nano sütun örneğinin c) ve d) serbest (ince) manyetik tabaka mıknatıslanma yöneliminin hem manyetik alan hem de bias akım (= spin transfer tork) uygulayarak kontröl edilmesi.

Şekil 3.5 a)'da $Ni_{81}Fe_{19}$ (20 nm)/Cu (12 nm)/ $Ni_{81}Fe_{19}$ (4,5 nm) dan oluşan metal bir nano sütun örneği için uygulanan manyetik alan vasıtasıyla ince manyetik tabakanın mıknatıslanmasının kalın manyetik alana paralel ve antiparalel olarak yönlenmesinin değişimi görülürken b)'de aynı cihaza akım uygulayarak spin transfer tork vasıtasıyla sabit bir manyetik alanda yönelim değişimi görülmektedir. Şekil 3.5 c)'de ise PtMn (15 nm)/$Co_{70}Fe_{30}$ (2.5 nm)/Ru (0.85 nm) / $Co_{60}Fe_{20}B_{20}$ (3 nm)/MgO (1.25 nm) /$Co_{60}Fe_{20}B_{20}$ (2.5 nm) den oluşan MTJ nano sütun örneğinin $Co_{70}Fe_{30}$ (2.5 nm) serbest tabakasının mıknatıslanmasının manyetik alanla çevirilmesi görülürken d)'de ise aynı MTJ örneğine akım uygulanarak spin transfer tork ile sabit bir manyetik alan uygulayarak aynı mıknatıslanma yöneliminin değişimi görülmektedir [33,34]. GMR/MTJ yapılarda spin polarize elektronlarının akımı mıknatıslanma yönü fiks ("pinned") bir manyetik tabakadan yalıtkan veya iletken bir ara tabakadan geçerek mıknatıslanma yönü serbest ("free") başka bir manyetik tabakaya enjekte edilerek, mıknatıslanmanın tersine dönmesini sağlıyorlar. Tekrar iki manyetik

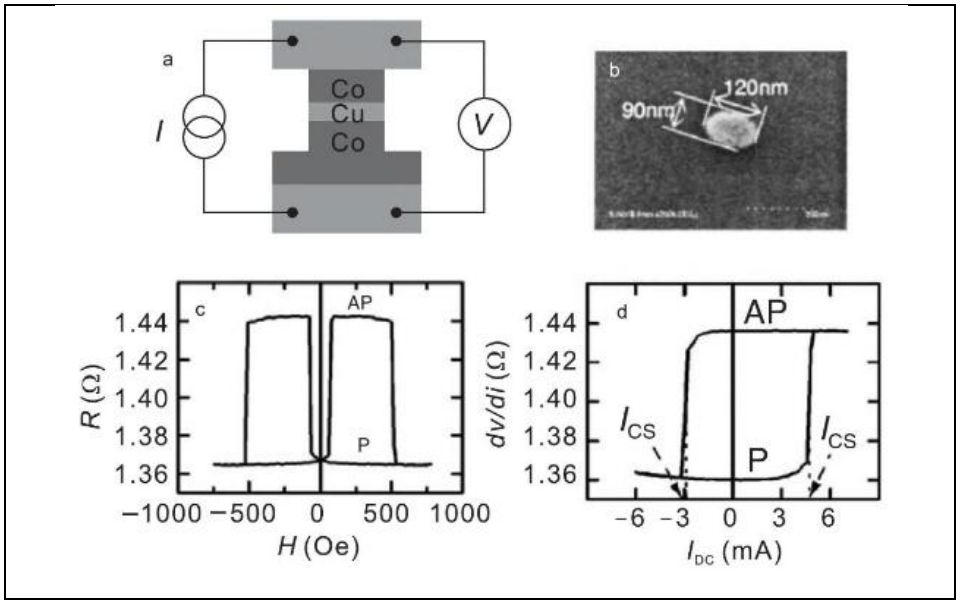
tabakanın paralel dönmesi için ise akım yönünü değiştiriyorlar. STT deneylerinde manyetik tünelleme ekleminin alanı yeteri kadar küçük olması gerekir. Bunun iki temel sebebi vardır. Birincisi mıknatıslanmanın uyarılması için gerekli akım yoğunluğunun oldukça büyük olması ki bunun sonucunda toplam akımı azaltmak için alanın küçük olması gerekir. Diğeri ise akan akımın indüklediği Oersted alanı etkisinin spin transfer tork (STT) etkisine nazaran azaltılması gerekir. Akım dikey olarak filmden geçerken dairesel bir Oersted alanı oluşur ve bu farklı bir kararlı mıknatıslanma durumu oluşturabilir. Teorik ve deneysel sonuçlar göstermiştir ki STT düzlem içi boyutları 100 nm mertebesinde olmalıdır. Spin transfer tork deneyleri gerçekleştirmek için genellikle üç tip manyetik çok katlı yapı konfigürasyonu kullanılmaktadır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi ilki metalik noktasal kontak, ikincisi litografiyle şekillendirilmiş noktasal kontak üçüncüsü ise litografi ve Ar iyonu aşındırmasıyla üretilen nanosütun yapısıdır [35].



Şekil 3.6: Üç temsili cihaz yapısının kesiti; a) metalik noktasal kontak b) litografiyle şekillendirilmiş noktasal kontak c) nanosütun yapısı.

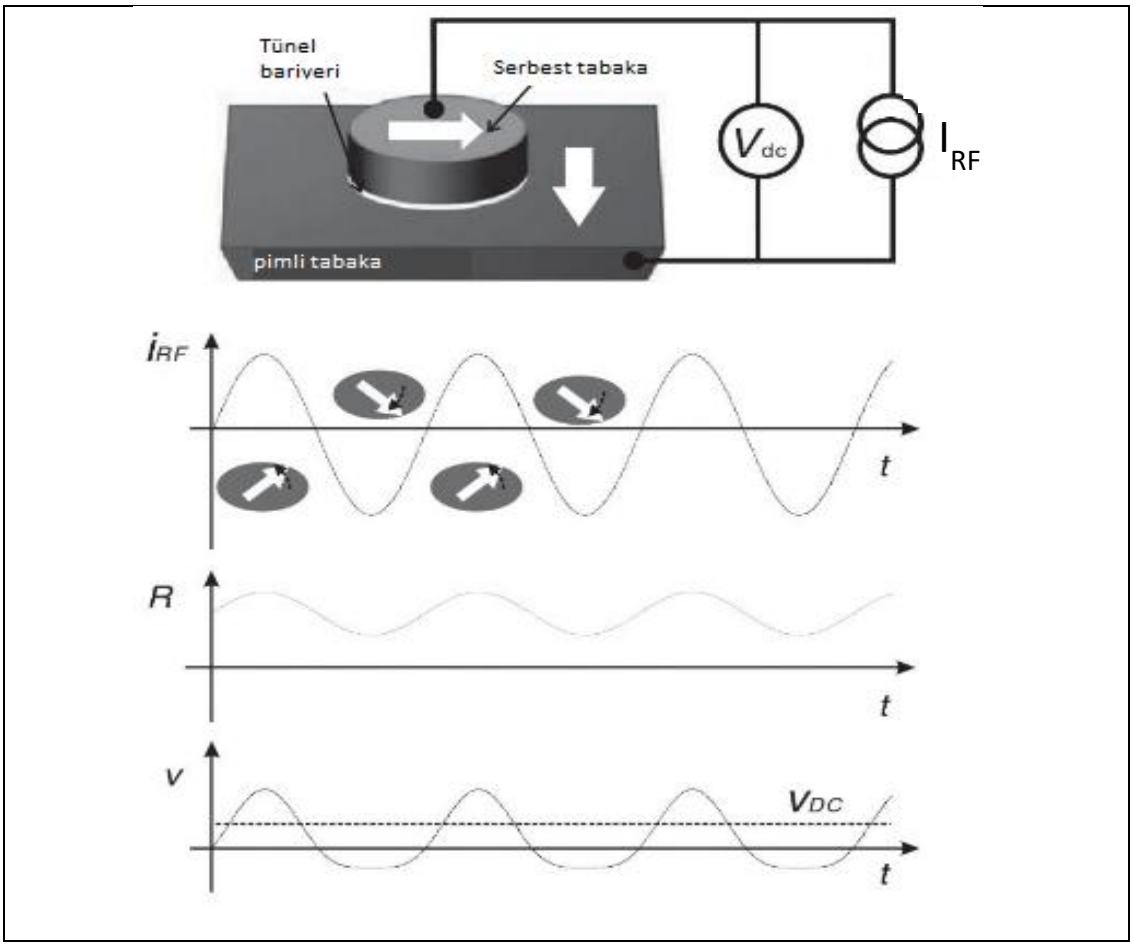
Örnek olarak Şekil 3.7'de görüldüğü gibi nanosütun yapısını ele alalım. Burada yapıdan bir DC akım geçirdiğimizde STT etkisinde dolayı F2 tabakanın mıknatıslanma yönü bir salınımlı harekete girer ve yeterli kadar yüksek akım için F1 tabakanın mıknatıslanmasına göre tersine döner. İki tabakanın mıknatıslanmalarının bir birine nasıl yöneldiğine bağlı olarak GMR etkisinden dolayı tabaklar arasındaki rezistans (sabit akım verdiğimizde voltaj) ölçülerek dedekte edilebilir. Yapıdan geçen DC akımı düşük frekansta modüle ettiğimizde nanosütunun diferansiyel direnci bir lock-in yükseltici (amplifier) kullanılarak standart dört-terminal metoduyla ölçülebilir. GMR bazlı STT-eklemlerde manyetodirenç değişimi iki tabakanın mıknatıslanmaları bir birine paralel ve antiparalel yönelmesiyle en düşük

ve en yüksek direnç değerleri arasında %8'lik fark oluşturabilir. 4-prob yöntemiyle elde edilen manyetik alana göre nanosütün rezistans değişimi ve lock-in tekniğiyle enjekte edilen DC akım fonksiyonu olarak ölçülen diferansiyel direnç eğrisi Şekil 3.7 (c,d) verilmiştir [37] Şekilde paralel ve antiparalel durumlar arasında keskin bir mıknatıslanma dönüşü olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.7: Oda sıcaklığında GMR nanosütün için manyetik alan ve enjekte edilen spin akımın etkisiyle mıknatıslanma yönlerinin dönüşünü gösteren tipik deneysel sonuçları. a) ölçüm prob konfigürasyonuyla beraber nanosütunun şematik gösterimi; b) üretilen nanosütunun üst görünüşünün taramalı elektron mikroskobu görüntüsü; c) dış manyetik alanın bir fonksiyonu olarak dört-terminal rezistansı; d) enjekte DC akımın bir fonksiyonu olarak diferansiyel rezistans.

Bu tip nanoyapılar/nanokontaklarda ferromanyetik rezonans, RF (radyo frekans) akımı verilerek de uyarılabilir. Bu network analizör vasıtasıyla RF güç soğurması gözlemlenerek elektriksel olarak ölçülebilir. Rezonans sonucunda meydana gelen serbest tabakanın mıknatıslanmasının presesyonu nanoyapının GMR direncini aynı frekansta değişmesine neden olur. Mıknatıslanma açısına göre direnç asimetrik (non-linear) bir şekilde değiştiğinden dolayı RF akımının etkisiyle GMR nanoyapı diyotlara benzer bir şekilde doğrultulmuş sabit bir voltaj meydana getirir. Buna da bazen gibi "homodyne detection" denilir. Bu spin tork diyot efekti bilinmektedir ve aslında daha geniş bir olay olan spin rektifikasyon etkiler kapsamında da bakılmaktadır.



Şekil 3.8: Spin transfer tork diyot efektin prensibinin kavramsal resmi. RF akım verilmesi cihaz rezistansının modülasyonunu indükler. Sonuç olarak indüklenen voltaj doğrultulur.

Spin tork diyot efektin şematik gösterimi Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Denge durumunda serbest tabakanın mıknatıslanması sabitlenmiş ("pinned", pimli) tabakanın mıknatıslanma yönüne diktir. RF uyarı verdiğimizde negatif akım uygulandığında serbest tabakanın mıknatıslanması spin transfer tork nedeniyle sabitlenmiş tabakanın yönüne paralel olacak şekilde döner. Sonuç olarak eklemin rezistansı küçülür ve eklem verilen akım karşılığında üzerinde negatif ve genliği küçük bir voltaj indükler. Diğer taraftan, pozitif akım uygulandığında serbest tabakanın mıknatıslanması antiparalel duruma yönelik döner. Bu nedenle eklem rezistansı yükselir ve verilen akım karşılığında pozitif ve genliği büyük bir voltaj indüklenir. Akım yönünün yüksek hızda değiştirilmesiyle eklemde ortalama olarak pozitif bir voltaj indüklenir. Bu bir tür homodin (evreuyumlu) algılama (homodyne detection). Sonuç olarak, verilen RF akım ile spin transfer tork etkisiyle uyarılan mıknatıslanma salınımı, serbest tabakanın FMR rezonans frekansında en şiddetli olur

ve RF akımını doğrultmasıyla manyetik rezonansı yansıtan bir DC voltaj olarak kaydedilebilir [35]. Bu da muhtemel birçok spintronik/elektronik uygulamalara, örneğin manyetik alan ile algılama frekansı ayarlanabilen bir detektör diyot aygıtlara da yol açmaktadır [36].

4. SİLİKON ALTTAŞ ÜZERİNDE BÜYÜTÜLEN $Fe/SiO_2/Ni$ VE $Fe/SiO_2/Co$ ÇOK KATMANLI MANYETİK İNCE FİLM YAPILARINDA MANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

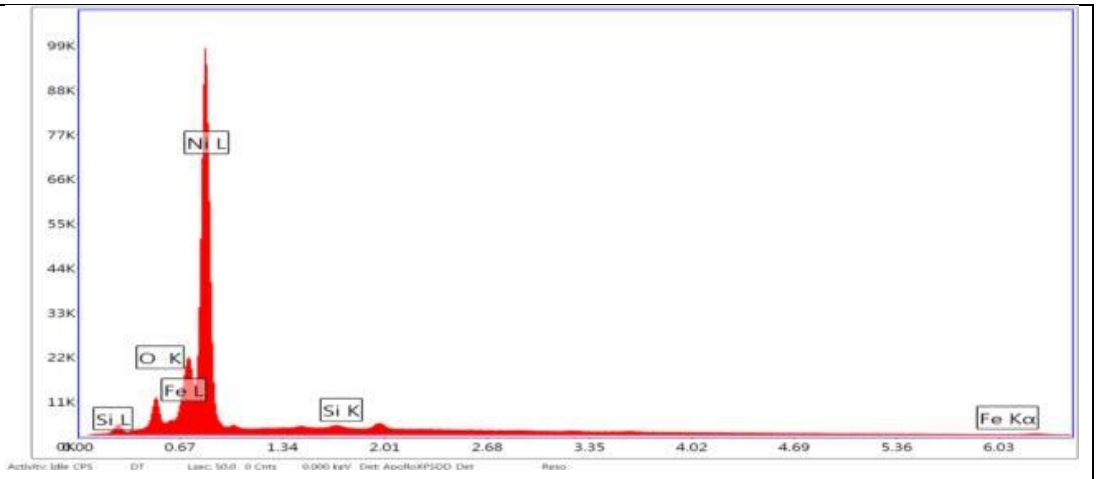
4.1. Numunelerin Hazırlanması

$Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Ni$ örneği Fe ve Ni katmanları ile SiO_2 ara katmanı oda sıcaklığında iyon demeti kaplama tekniğiyle Baltik Federal Üniversitesinde (Prof. G. Kupriyanova gurubu, Kaliningrad, Rusya) hazırlanmıştır. Vakum odasının basıncı ~6x10-5 Pa (3x10-7 Torr) olup saçtırma demeti olarak 1 keV enerjiye sahip Ar iyonları kullanılmıştır. Kaplanan tabakaların kalınlığı Rutherford geri saçılma (Rutherford back scattering, RBS) tekniğiyle Moskova Federal Üniversitesi'nin Skobeltsyn Nükleer Fizik Enstitüsü'nde (Prof. N.G.Chechenin gurubu, Moskova, Rusya) ölçülmüştür. Fe tabakası 108 nm, SiO_2 ara tabakası 2 nm ve Ni tabakası 123 nm bulunmuştur.

$Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co$ örneği Fe ve SiO_2 ara katmanı oda sıcaklığında iyon demeti kaplama tekniğiyle Baltik Federal Üniversitesinde (Prof. G. Kupriyanova gurubu, Kaliningrad, Rusya) hazırlanmıştır. Vakum odasının basıncı ~ 6x10-5 Pa (3x10-7 Torr) olup saçtırma demeti olarak için 1 keV enerjiye sahip Ar iyonları kullanılmıştır. Daha sonra örnek Co katmanını kaplamak üzere bu vakum odasından alınıp bir diğer vakum odasına koyulmuştur. Kaplama işlemine başlamadan önce yüzeyinin temizlenmesi için 150 ^{0}C'ye kadar tavlanmış ve ardından darbeli lazer kaplama (Pulse Laser Deposition, PLD) tekniğiyle Co katmanı örneğin üzerine kaplanmıştır. PLD odasının basıncı 2×10-8 Torr olup sistemde λ =355 nm dalga boyunda Nd-YAG lazerin üçüncü harmoniği kullanılmıştır. Kaplanan tabakaların kalınlığı Rutherford geri saçılma (Rutherford back scattering, RBS) tekniğiyle Moskova Federal Üniversitesi'nin Skobeltsyn Nükleer Fizik Enstitüsü'nde (Prof. N.G.Chechenin gurubu, Moskova, Rusya) ölçülmüştür. Fe tabakası 86 nm, SiO_2 ara tabakası 1 nm ve Co tabakası 59 nm bulunmuştur.

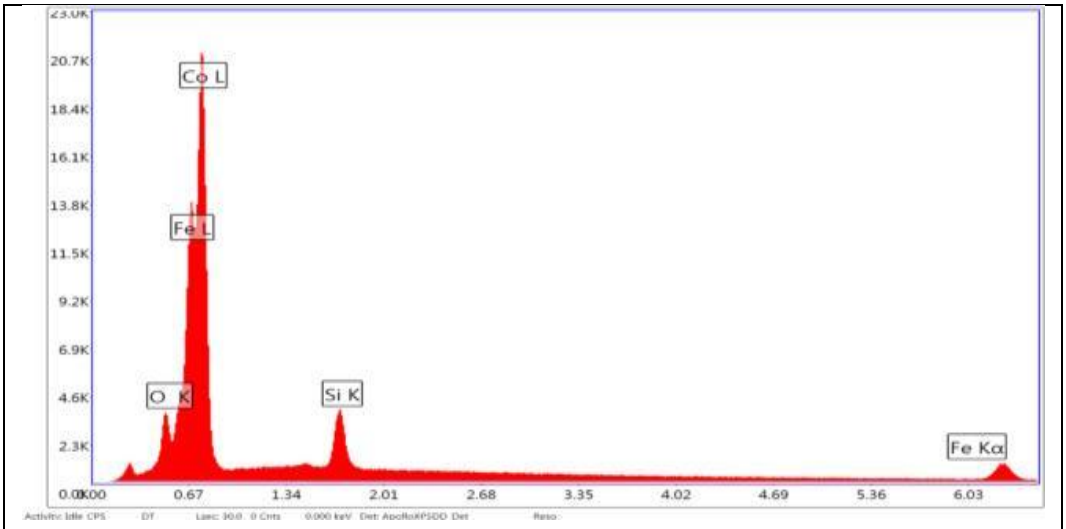
4.2. EDX (Energy-Dispersive X-ray) Ölçüm Sonuçları

EDX ölçümleri ile $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Ni$ ve $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co$ örneklerinin içeriği Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'deki gibi belirlendi.



Element	%Ağırılk	%Atomik	Net Şiddet	Net Şid. hatası
O K	5.21	16.63	1146.91	0.01
FeL	5.58	5.11	646.57	0.01
NiL	88.54	77.05	11175.32	0
SiK	0.67	1.22	166.99	0.02

Şekil 4.1: $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Ni$ örneği için EDX sonuçları.



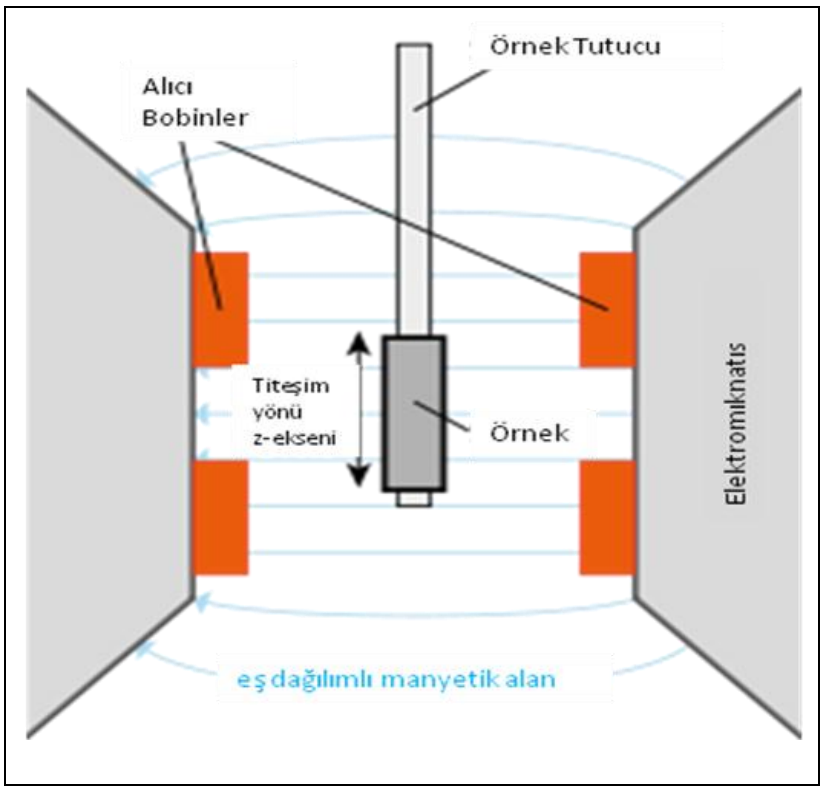
Element	% Ağırlık	%Atomik	Net Şiddet	Şid. hatası
O K	5.13	15.65	697.52	0.01
FeL	21.44	18.74	1380.83	0.01
CoL	68.15	56.44	3494.47	0
SiK	5.28	9.17	801.4	0.01

Şekil 4.2: $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co$ örneği için EDX sonuçları.

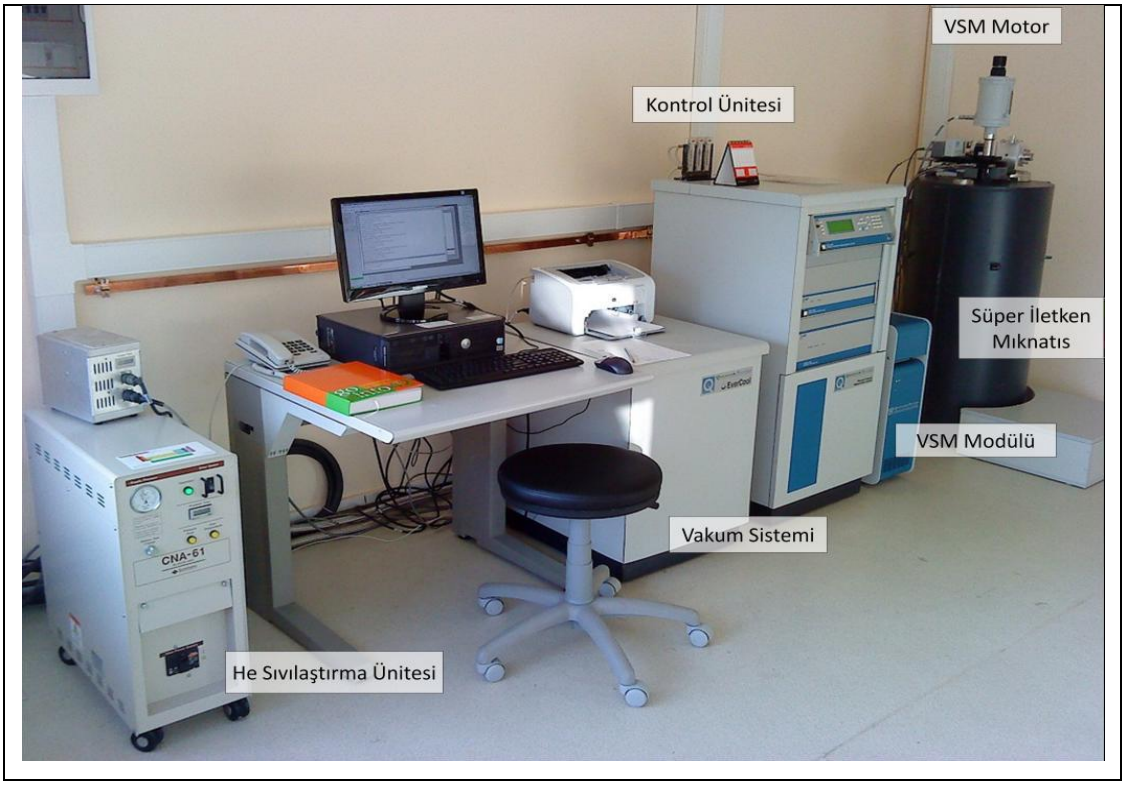
Yapılan EDX ölçümleri sonucunda numunelerin kimyasal yapılarının oluştuğu elementler doğrulanmıştır. Atomik yüzdelere bakılacak olursa RBS sonuçlara göre farklı gözükmesi elektron demetinin sonlu nüfuz derinliğinden (~100 nm) kaynaklanmaktadır.

4.3. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)

VSM (Vibrating Sample Magnetometer) örneğin manyetik momentini ölçmek için kullanılmaktadır. Bu cihazla 10^{-5} ila 10^{-6} emu kadarlık küçüklükteki değişimler dedekte edilmektedir. Bu cihaz diğer yöntemlerde bulunan hata kaynaklarını tamamen elimine etmekte ya da minimize etmektedir [37]. Bu sistemde, örnek manyetize edilmek üzere eş dağılımlı bir manyetik alana yerleştirilir. Örnek sinüzodial bir şekilde titreştirilir. Bunun sonucunda manyetik akı değişimi dedeksiyon bobinleri üzerinde bir voltaj üretir. Bu voltaj ise örneğin manyetik momentiyle orantılıdır. VSM kullanarak DC manyetik moment; sıcaklık, manyetik alan, açı ve zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülebilir. Böylece duygunluk ve mıknatıslanma çalışmaları yapmaya olanak sağlar. En yaygın ölçümlerden bazıları: histerezis çevrimi (loop); sıcaklığın bir fonksiyonu olarak duygunluk veya doyum mıknatıslanması (termomanyetik analiz), diğerleri de mıknatıslanma eğrileri; açının bir fonksiyonu olarak (anizotropi) ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak mıknatıslanma şeklindedir [38-40].



Şekil 4.3: VSM-örnek tutucu ve dedeksiyon mekanizması.



Şekil 4.4: GTÜ Fizik Bölümü PPMS Sistemi.

Bu çalışmada Şekil 4.4'de görülen Quantum Design PPMS9T VSM Sistemi kullanılmıştır. Bu sistemle örneğe, 9 Tesla'ya kadar manyetik alan uygulanabilmekte, 1-3 mm aralığında titreşim genliği, 40 Hz'lik frekans ve 10^{-6} emu (erg/Oe) hassasiyetiyle 1 Hz'lik veri oranında mıknatıslanma değişimleri belirlenebilmektedir.

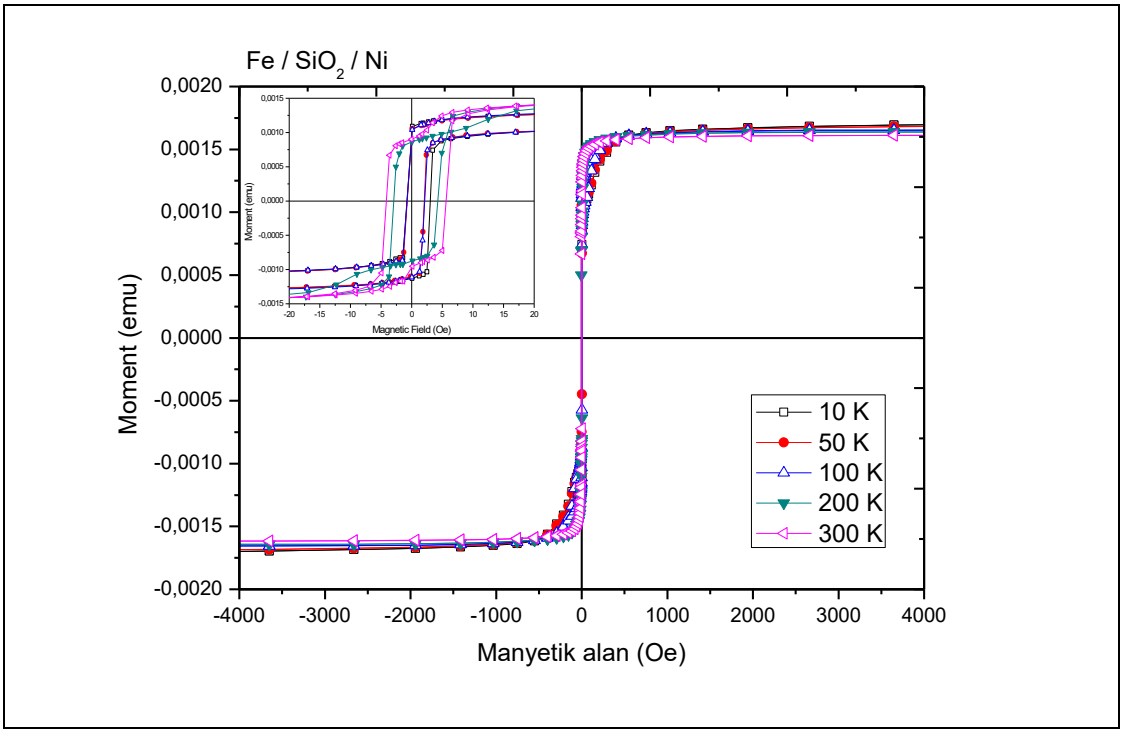
Örneğin yer değiştirmesiyle oluşan manyetik akı (F) aşağıdaki gibidir. Burada B bobinlerde dolaşan akımın oluşturduğu manyetik alandır. I ise akımdır [41].

$$F = \left(\frac{B}{I}\right)\mu \tag{4.1.}$$

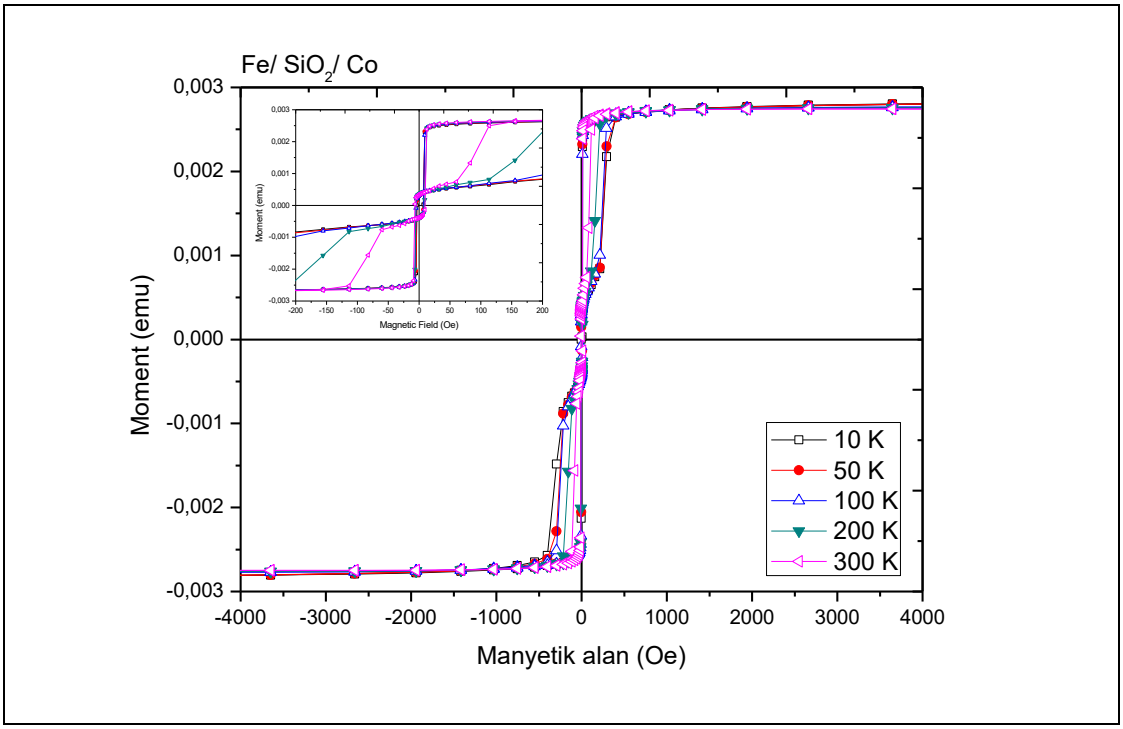
Bu ifade aşağıdaki voltaj (E) denkleminde yerine yazılarak manyetik moment ile voltaj arasındaki ilişki elde edilir.

$$E = -\frac{dF}{dt} = -\mu\frac{d(\frac{B}{I})}{dz}.\frac{dz}{dt} \tag{4.2.}$$

4.3.1. Ölçüm Sonuçları



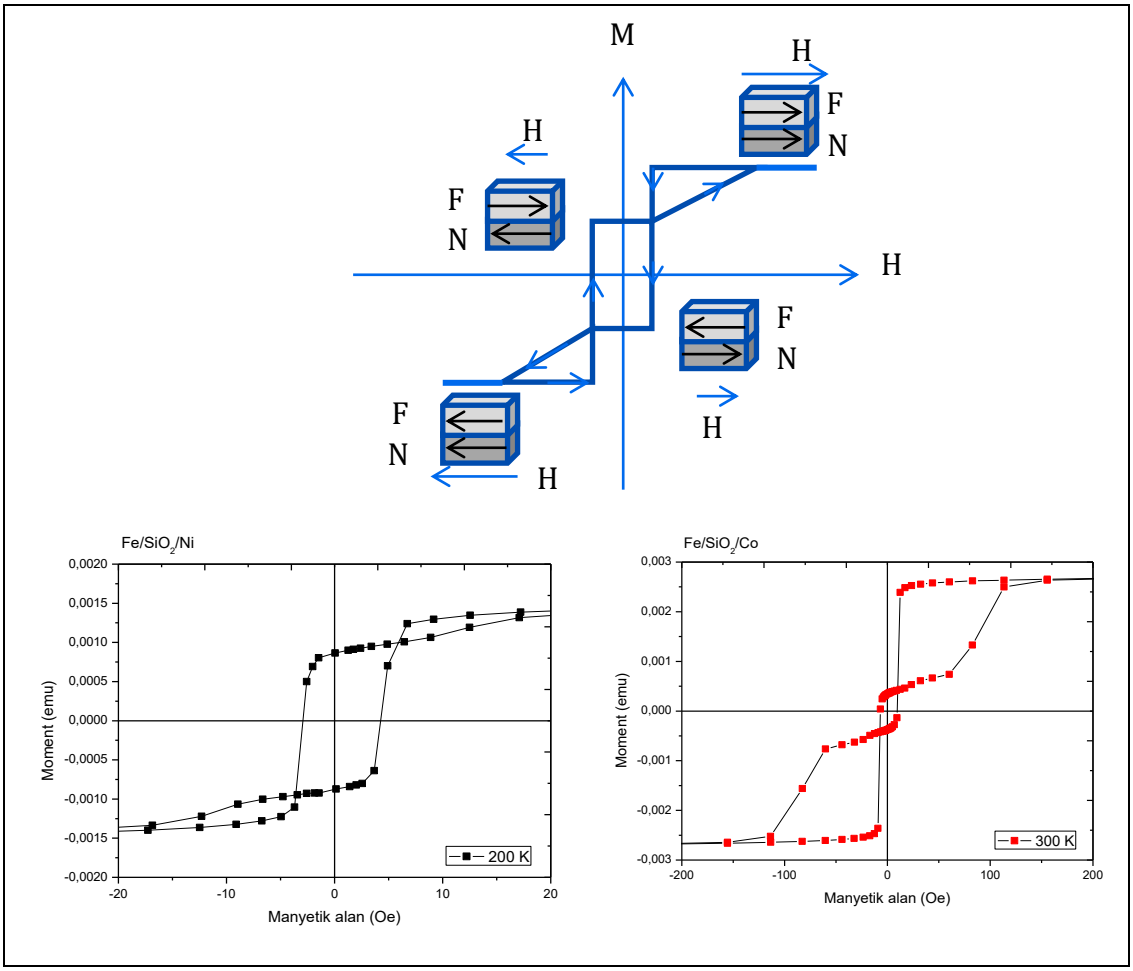
Şekil 4.5: Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Ni örneği için histerezis döngüsü.



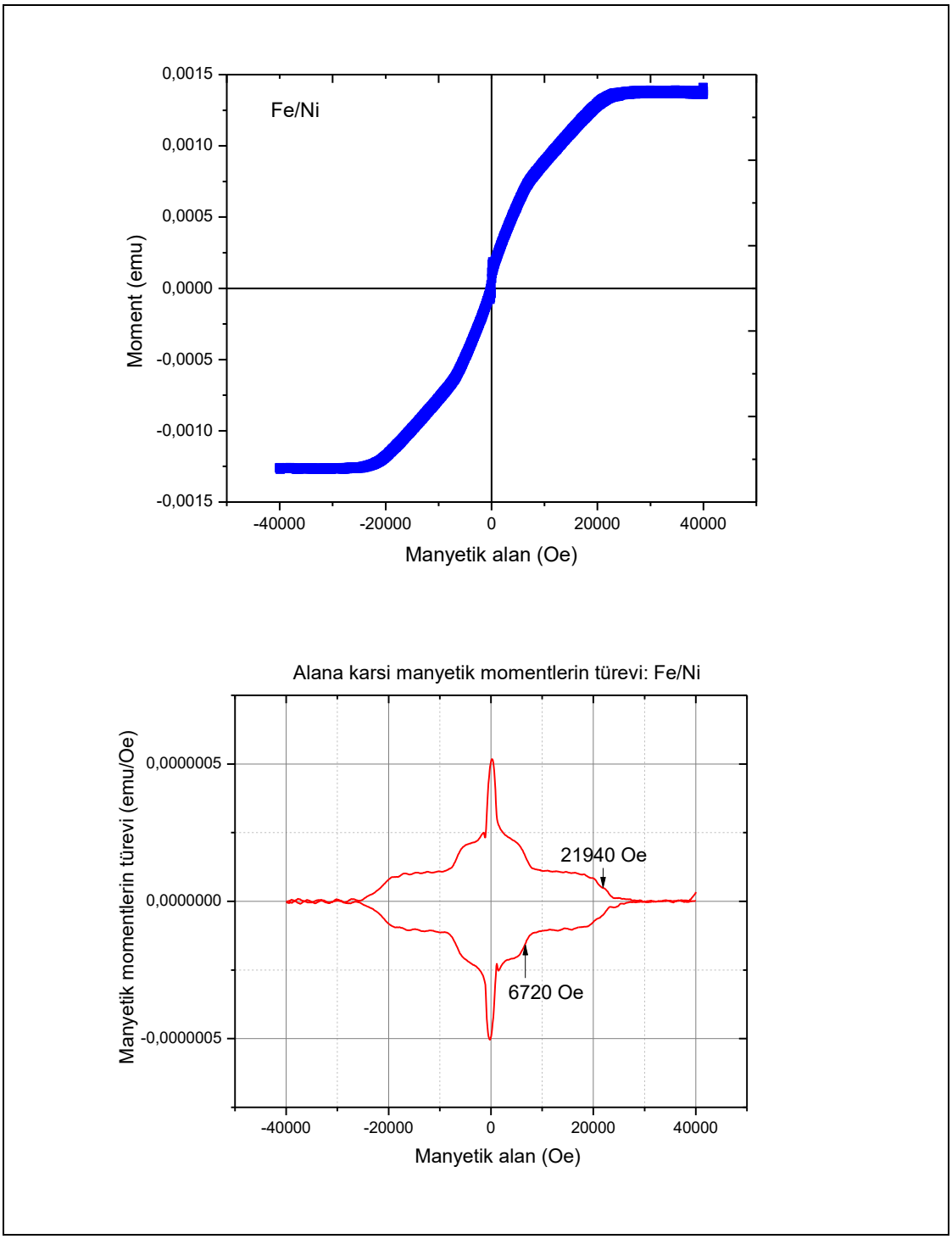
Şekil 4.6: Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co örneği için histerezis döngüsü.

$Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Ni$ örneği için 10-300 K aralığında çeşitli sıcaklıklarda histerezis döngüleri elde edildi. Manyetik alan -5000 Oe'ten 5000 Oe'e kadar sıfır alan etrafında detaylı veri elde etmek için logaritmik skalada 11 Oe'lik adımlarla tarandı. Koersif alan 10 K'de 3,775 Oe ve 300 K'de 9,754 Oe bulundu.

$Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co$ örneği için de 10-300 K aralığında çeşitli sıcaklıklarda histerezis döngüleri elde edildi. Manyetik alan -5000 Oe'ten 5000 Oe'e kadar sıfır alan etrafında detaylı veri elde etmek için logaritmik skalada 11 Oe'lik adımlarla tarandı. Koersif alan 10 K'de 10,439 Oe ve 300 K'de 16,254 Oe bulundu. Örneğin histerezis eğrisinin merkez kısmında çizgilerin çapraz olarak biri birini kesmesi Fe ve Co arasında antiferromanyetik etkileşme olduğunu göstermektedir.



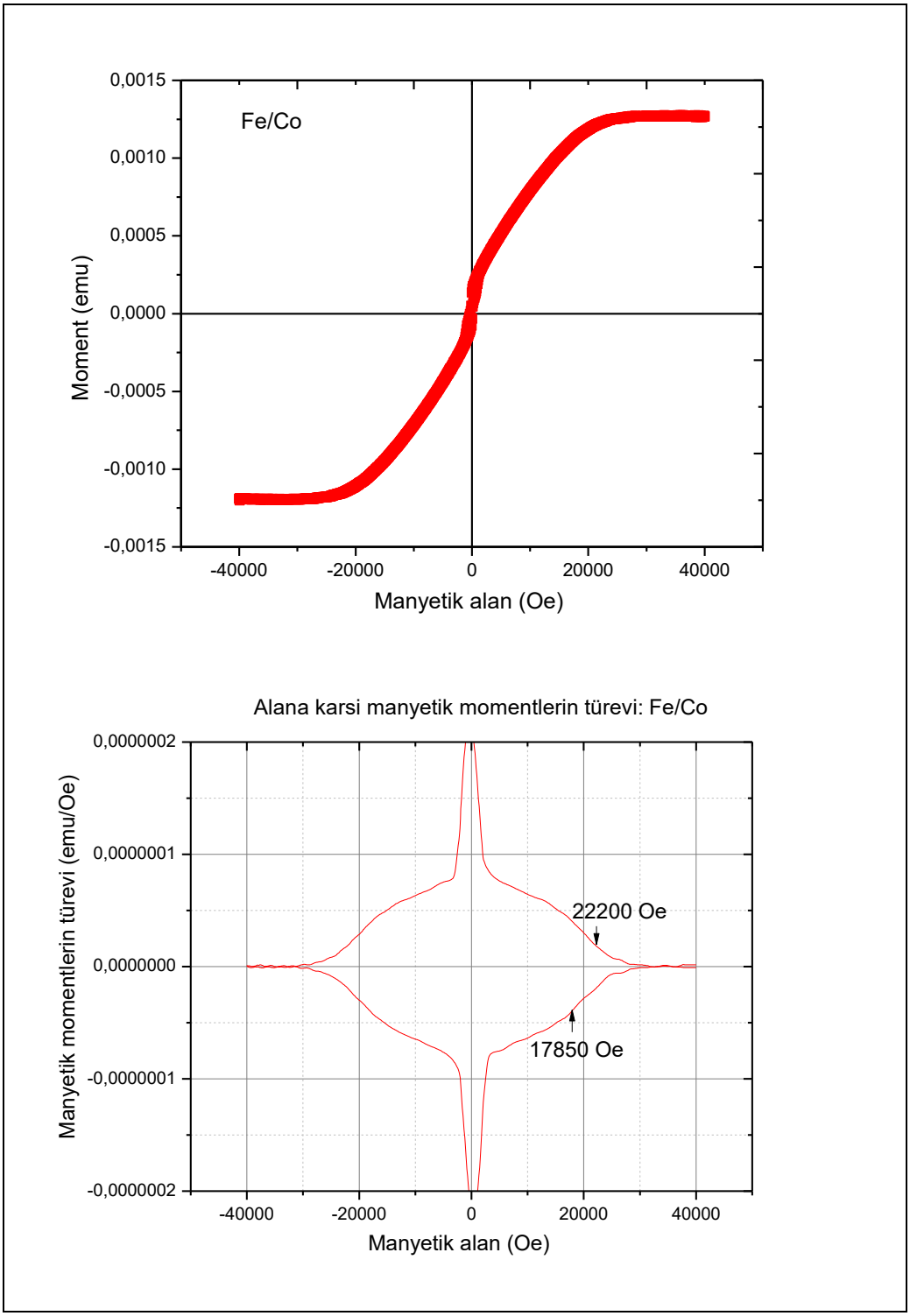
Şekil 4.7: Tabakalar arasındaki antiferromanyetik etkileşim durumunun şematik gösterimi (üstte) ile $Fe/SiO_2/Ni$ (sol altta) ve $Fe/SiO_2/Co$ (sağ altta) örnekleri için deneysel döngülerin karşılaştırılması.



Şekil 4.8: Fe/SiO_2/Ni örneği için Histerezis döngüsü (üstte) ve film yüzeyine dik uygulanan DC manyetik alanla ölçülen histerezis döngüsünün birinci türevi (*dM(H)/dH*) (altta), (Not: dM/dH üzerindeki pozitif ve negatif kollar sırasıyla artan ve azalan manyetik alana bağlıdır.)

Oda sıcaklığında almış olduğumuz bu ölçümde Fe/Ni örneği için mıknatıslanmanın 28970 Oe'lik manyetik alanda doyuma ulaştığı ayrıca kalıcı

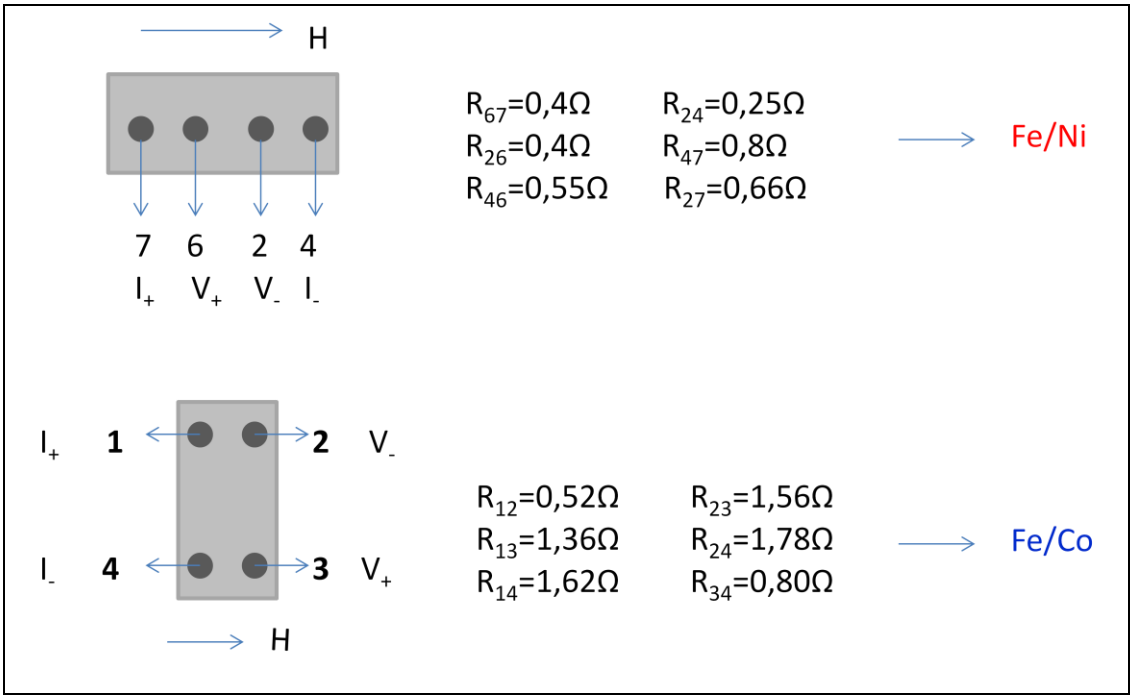
(remanent) mıknatıslanmanın 10 K'de 9,509x10^{-4} emu 300 K'de ise 9,032x10^{-4} emu olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.9: Fe/SiO_2/Co örneği için Histerezis döngüsü (üstte) ve film yüzeyine dik uygulanan DC manyetik alanla ölçülen histerezis döngüsünün birinci türevi (*dM(H)/dH*) (altta), (Not: dM/dH üzerindeki pozitif ve negatif kollar sırasıyla artan ve azalan manyetik alana bağlıdır.)

Oda sıcaklığında almış olduğumuz bu ölçümde Fe/Co örneği için mıknatıslanmanın 28142 Oe'lik manyetik alanda doyuma ulaştığı ayrıca kalıcı (remanent) mıknatıslanmanın 10 K'de $2{,}989 \times 10^{-4}$ 300 K'de ise $3{,}462 \times 10^{-4}$ emu olduğu gözlemlendi.

4.4. Manyeto-Transport Ölçüm Sistemi

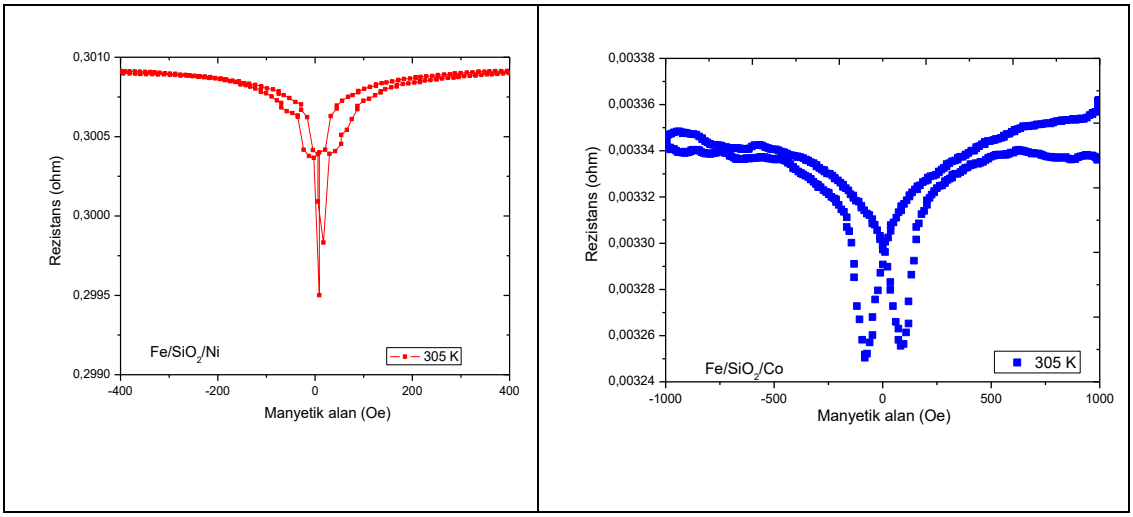


Şekil 4.10: Magneto-transport ölçümleri için örnek üzerine yapılan kontakların şematik gösterimi ve kontaklar arasındaki dirençlerin ölçülen büyüklükleri.

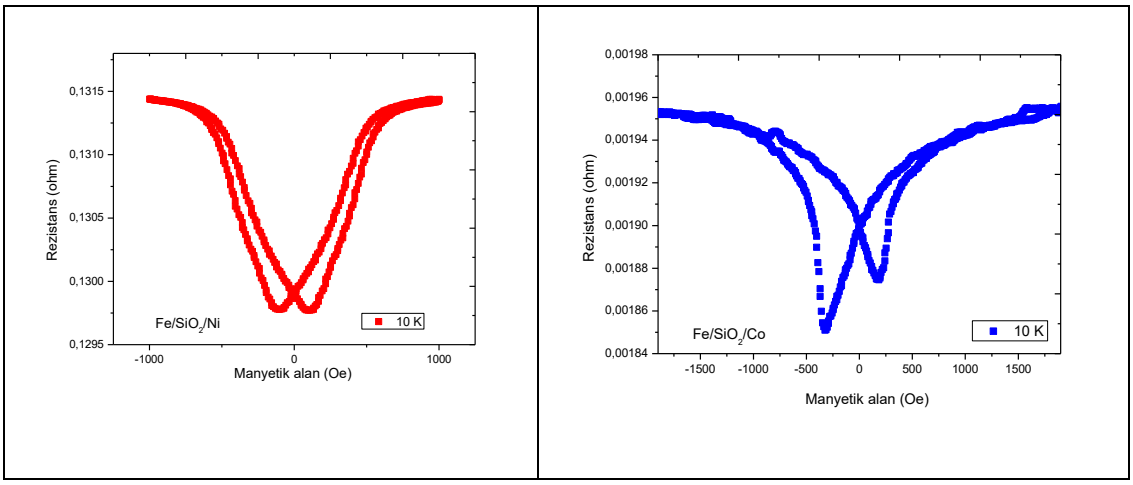
Magneto-transport ölçümlerini örnek üzerine Şekil 4.10'da gösterildiği gibi indiyum/gümüş (90:10) alaşım kullanarak düşük dirençli bakır telleri film yüzeyine tutturmak suretiyle oluşturulan standart dört-nokta geometrisinde PPMS sistemine akım kaynağı ve voltmetre ekleyerek gerçekleştirdik. Direnç ölçümlerindeki mesafeyle orantılı büyüklüklerdeki küçük farklılıklar kontakların kendi dirençlerinden kaynaklanmaktadır. Ama genel olarak dirençler ölçülen mesafenin büyüklüğüyle doğru orantılıdır.

4.4.1. Ölçüm Sonuçları

Magnetotransport ölçümleri örnek sisteme manyetik alana paralel olacak şekilde yerleştirilerek iki sıcaklık için gerçekleştirildi. Manyetik alan pozitif maksimumdan negatif maksimuma 11 Oe/s'lik hızla tarandı. Yukarıdaki şekillerde iki örnek için 10 K ve 305 K de magnetorezistans değişimleri gösterilmiştir. Eğriler tipik anizotropik magnetorezistans (AMR) davranışı göstermektedir.



Şekil 4.11: $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Ni$ örneği için (sol) ve $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co$ örneği için (sağ) oda sıcaklığında (305 K'de) yapılan manyeto-transport ölçümleri sonuçları.



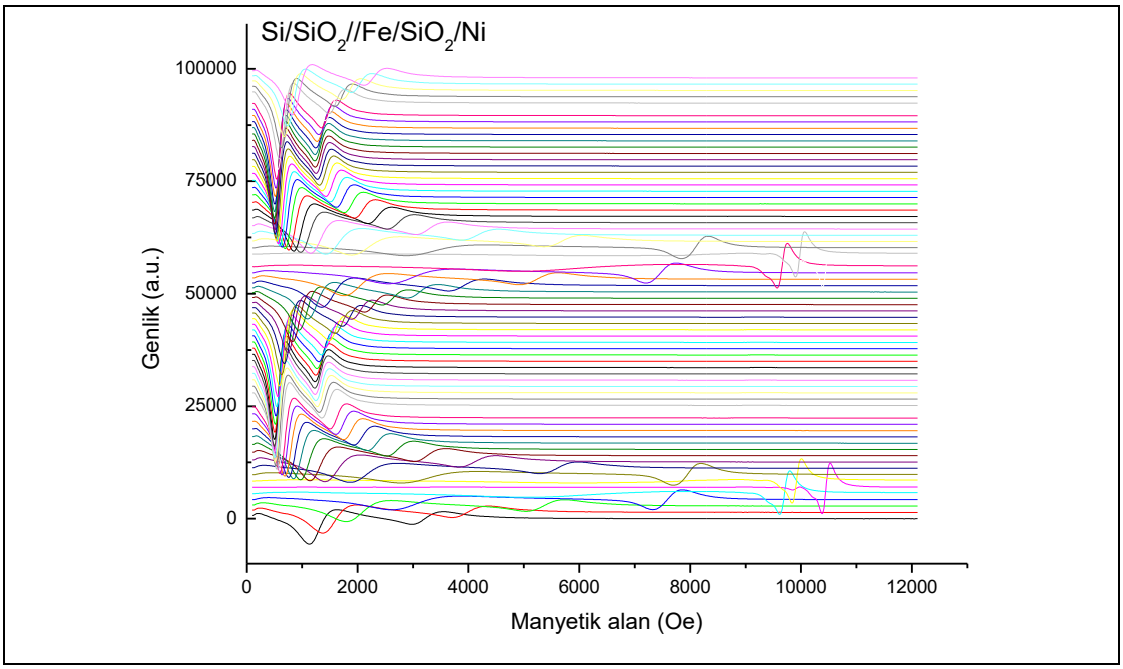
Şekil 4.12: $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Ni$ örneği için (sol) ve $Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co$ örneği için (sağ) düşük sıcaklıkta (10 K'de) yapılan manyeto-transport ölçümleri sonuçları.

Oda sıcaklığında yapılan manyeto-transport ölçümleri sonuçlarında Şekil 4.11'de görüldüğü gibi Fe/Co örneği rezistanstaki yavaş değişim ile geniş bir histerik davranış göstermektedir ki bu geri dönüş sırasında mıknatıslanma rotasyonuna işaret eder. Artan ve azalan kollar arasındaki fark muhtemelen ölçüm sistemindeki sıcaklık sürüklenmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu örnekteki direnç değişimi diğer örneğe nazaran çok daha az olduğundan sistemsel gürültüden gelen katkılar sonuçlarda çok daha belirgin olarak kendini gösteriyor diyebiliriz. Fe/Ni örneği Ni tabakasının soft manyetik anizotropisi nedeniyle rezistansta daha hızlı değişimler ve göreceli olarak ani zıplamalar göstermektedir.

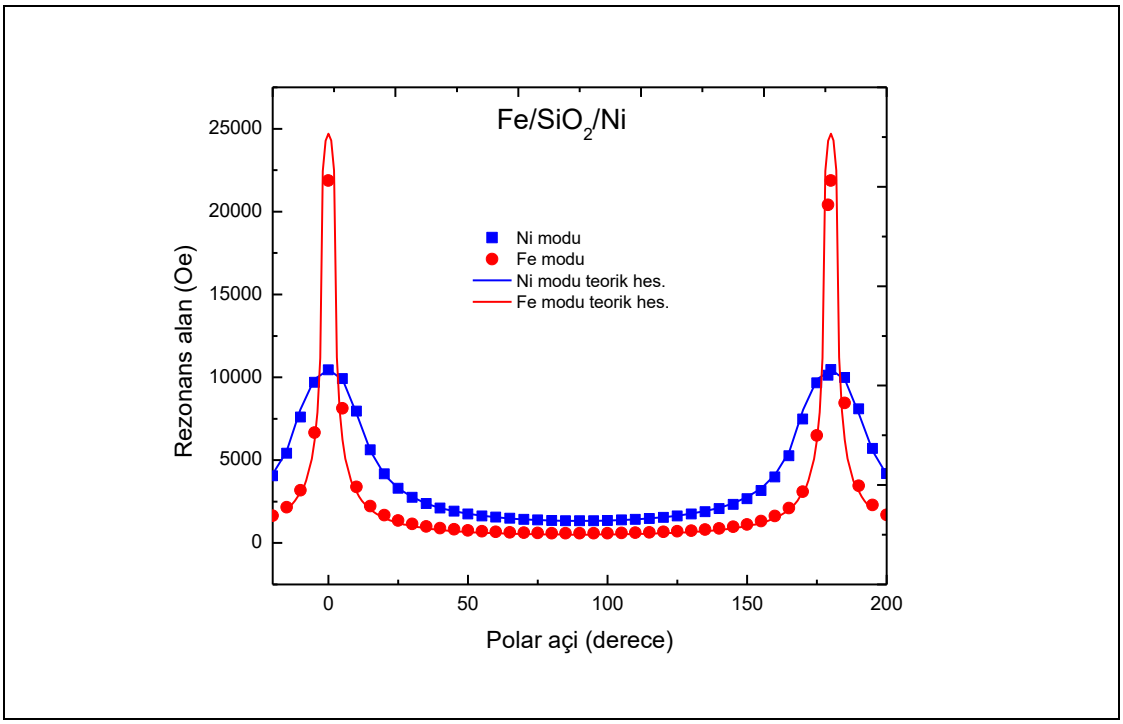
Düşük sıcaklıkta manyeto-transport ölçümleri sonuçlarında Şekil 4.12'de görüldüğü gibi iki örnekte de manyetik etkileşmeler ve geri dönüş mekanizması hakkında daha fazla detay ortaya koymaktadır. Fe/Co örneği asimetrik kollara sahip ayrıca VSM ölçümlerine karşılık ikili histerezis döngü transportta belirgin bir şekilde görünmüyor. Bunun sebebi, bizim ölçüm geometrimizde iki ferromanyetik tabakanın oldukça yalıtkan olan SiO_2 tarafından iyi bir şekilde ayrılmış ve tünelleme rezistans katkısından hiç katkı gelmiyor olabileceği gibi ölçüm sistemimizin makroskobik boyutta olması nedeniyle tünelleme efekti olsa bile görmemiz mümkün olmuyor olabilir. Fe/Ni örneği için ise artan ve azalan kollar oldukça simetrik ve göreceli olarak daha yüksek manyetik alanlarda doyum değerlerine ulaşmaktadır. Böylece düşük sıcaklıkta mıknatıslanmanın yönünün değişim mekanizması her iki örnekte de ağırlıklı olarak iki doyum yönü arasındaki mıknatıslanma rotasyonu ile açıklanabilir.

4.5. FMR Ölçüm Sonuçları

Düzlemde (in-plane) geometrideki FMR ölçümlerinde Fe/Co ve Fe/Ni örneklerinin ikisi için de dikkate değer bir anizotropi ortaya çıkmadı. Bu örneklerin polikristal yapısı nedeniyle beklediğimiz bir şeydi. Buna karşılık her iki örnek için de düzlem dışı (out-of-plane) geometrideki ölçümlerde yüksek bir anizotropik davranış gözlemledik. Fe/Ni örneği için FMR sinyali, tüm manyetik alan yönelimleri için iki ana moda ayrılmış olup (Şekil 4.13) Fe/Co örneği için sadece manyetik alanın filmin yüzeyine dik olduğu civarda iki ana moda ayrıldığı gözlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.13: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni$ örneği için FMR spektrumun açıya bağlılığı.



Şekil 4.14: $Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni$ örneği için FMR rezonans alanının açıya bağlılığı. Rezonans alanı için teorik modelleme sonuçları çizgilerle gösterilirken deneysel data sembollerle sunulmuştur.

FMR sinyalinin iki moda ayrılması durumunda iki farklı manyetik tabaka arasında zayıf ya da sıfır ara tabaka etkileşmesi olduğu beklenir. Sıfır etkileşme

durumunda bir tabakanın rezonans presesyonu diğer tabakadan bağımsız demektir ve iki FMR modunun şiddetinin Fe ve Ni filminin manyetik momentleriyle (mıknatıslanma ve tabaka kalınlığının çarpımıyla orantılı) uyumlu olması gerekir ki bu oran 3:1 olması demektir.

Ancak bu basit tahminde nüfuz kalınlığı (skin depth) dikkate alınmamıştır. Bu hususa özellikle dikkat çekmemiz gerekir ki FMR'da çalışan araştırmacılarının çoğu X-band frekans nüfuz derinliğini 1 μm mertebesinde olduğunu kabul etmektedir. Ancak, bu *ferromanyetik veya spin-dalga rezonans* deneylerinde *doğru değildir*, ki onlarda elektriksel deri kalınlığı yerine manyetik (efektif) deri kalınlığı kullanılmalıdır. Gösterilmiştir ki bu parametre ince filmin manyetik parametrelerine kuvvetli bir şekilde bağlıdır [42,43]. Örneğin, efektif bir deri kalınlığı Fe'de 40 nm ve FeNiB'da 127 nm [44,45] olduğu bildirilmiştir. Basit hesaplamalar Ni deri kalınlığı yaklaşık 100 nm olduğunu gösterir. Bu nedenle, hesap nüfuz derinliğini dikkate alınarak yapıldığında, bağımsız Fe ve Ni tabakaların FMR modlarının şiddeti (mıknatıslanma*deri kalınlığı) 3:2 oranında beklenir. Ancak deneyde FMR modu şiddeti (I ~ Genlik * $dHpp^2$) yaklaşık $I_{Fe}:I_{Ni}=2:1$ oranında olduğu buşunmuştur (Tablo 4.1'e bakınız).

Tablo 4.1: Fe ve Ni katmanlarının FMR şiddetleri.

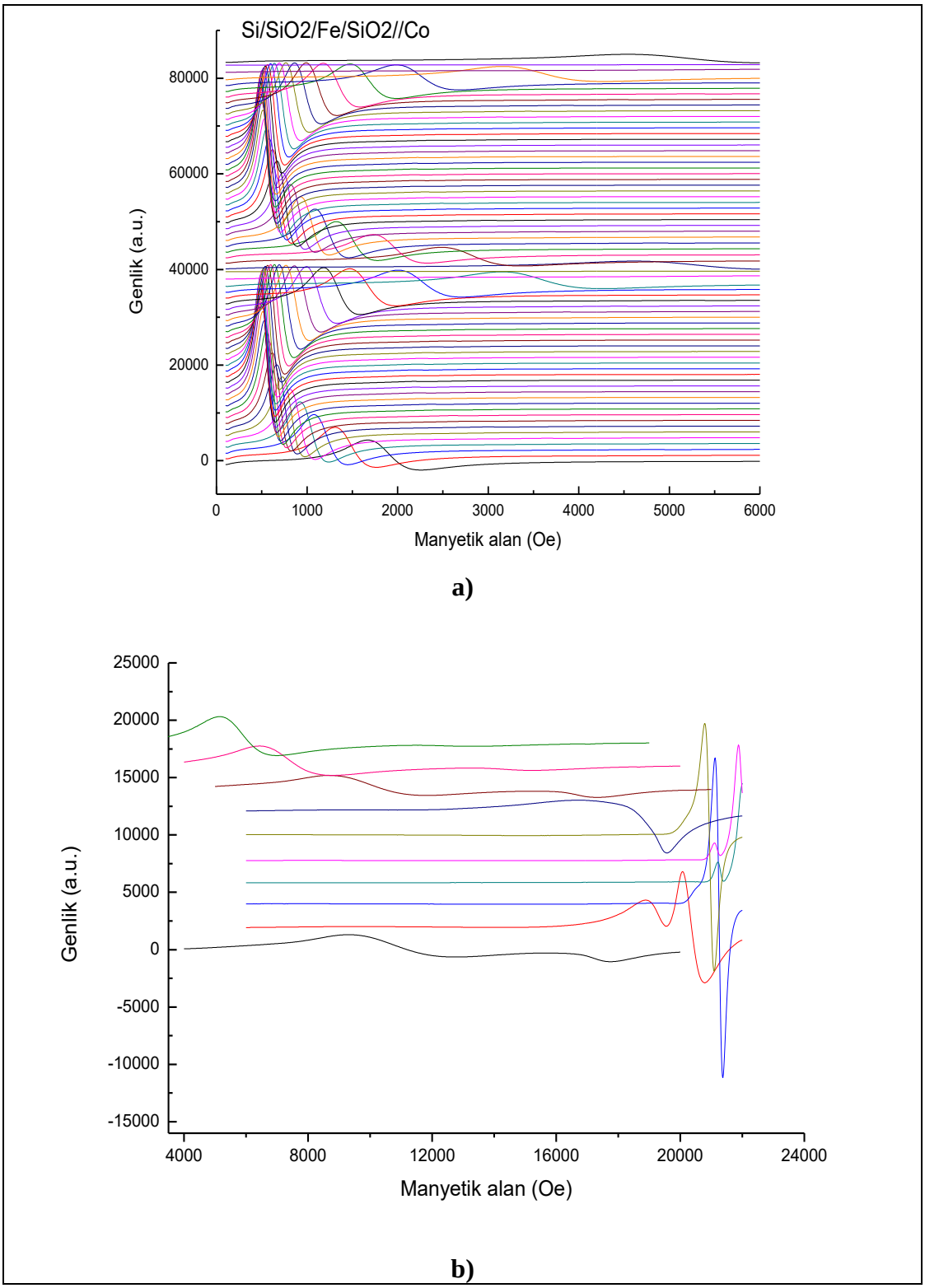
Şiddet / Tabaka	$M_{bulk}\cdot t_{layer}$ (emu·nm/cm^3)	Şiddet (0°), a.u.	Şiddet (45°), a.u.	Şiddet (150°), a.u.	Şiddet (180°), a.u.
Fe	$1707\cdot108 = 1.84\cdot10^5$	955	1270	1250	849
Ni	$485\cdot123 = 0.6\cdot10^5$	516	582	594	502

Bu durum Fe ve Ni tabakaları arasında zayıf bir antiferromanyetik etkileşmeye işaret etmektedir. Aslında ara tabaka üzerinden etkileşiminin ferromanyetik etkileşme olması durumunda, modların pozisyonunun paralel ve dik her iki oryantasyonda da daha düşük manyetik alanlara, antiferromanyetik etkileşme durumunda ise daha yüksek alanlara doğru kayması şeklinde olması beklenir. Maalesef dik oryantasyonda demir tabakasının presesyonundan kaynaklanan modun pozisyonu ESR spektrometrenin ulaşabileceği maksimum manyetik alanın üzerine

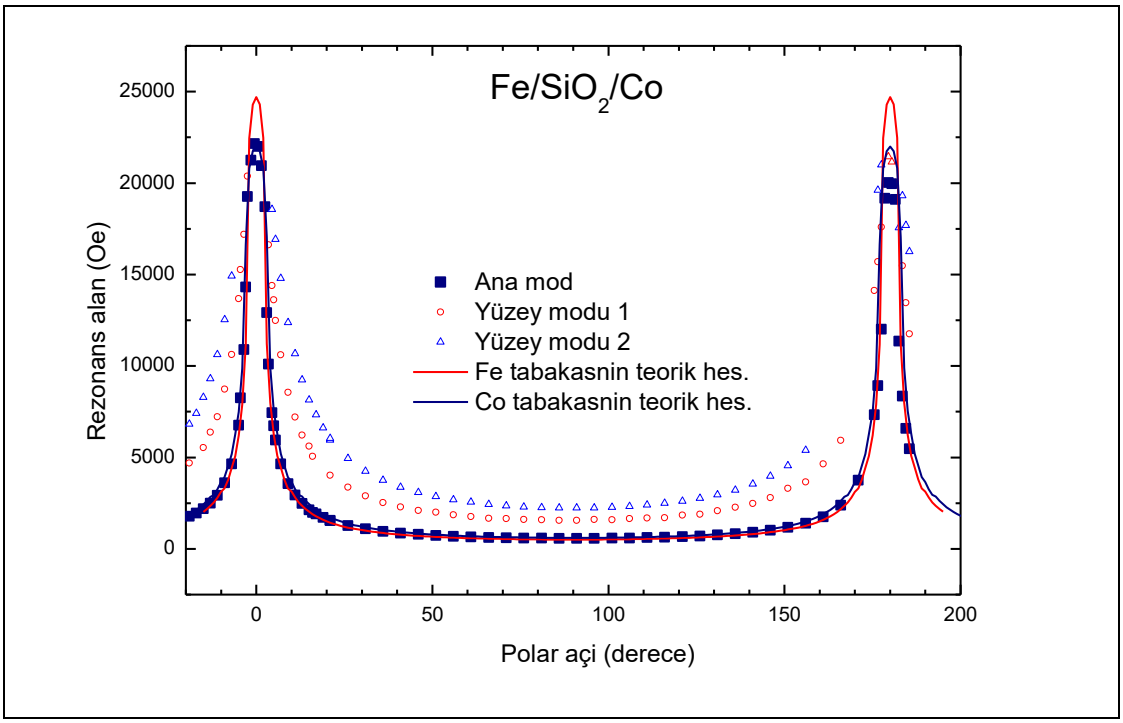
çıkmaktadır. Dik oryantasyon civarında deneysel veri olmadan ara tabaka etkileşmesini hesaba katarak *hassas* bir teorik hesaplama yapmak mümkün değildir. Ancak tabakalar arası etkileşimi ihmal ederek en basit model sayesinde mıknatıslanma ve g-faktör değerlerinde meydana gelebilecek değişimleri takip edersek tabakalar arası etkileşmenin varlığını ve işaretini (antiferromagnetik/fero-romagnetik) niteliksel olarak kontrol edilmesi mümkündür. FMR simulasyonu için geliştirilen özel bir bilgisayar programı [46] ile FMR rezonans alanının açıya bağlılığı modellenmiştir. Simulasyonda elde edilen efektif g-faktörler (g_{effNi}=2.08 ve g_{effFe}≈2.00) ise beklenen katı (bulk) metal Ni ve Fe (g_{Ni}=2.21 ve g_{Fe}=2.10) değerlerinden bir miktar daha küçüktür.

Efektif mıknatıslanma değerlerine bakacak olursak katı Fe (1700 emu/cm^3) teorik modellemede sabit parametre olarak kullanılarak yalnızca Ni için hesaplanabildi. Simülasyonumuz gösterdi ki elde ettiğimiz efektif mıknatıslanma değerleri "bulk" malzemenin mıknatıslanmasından daha büyüktür (katı Ni'deki 485 emu/cm^3 yerine 565 emu/cm^3). Kalın filmlerde bizim durumumuzdaki fark yüzey anizotropisine atfedilmesi düşük ihtimaldir. Dik kristal manyetik anizotropi nedeniyle mümkün olan bir başka katkının ise filmin polikristal mikroyapısı nedeniyle küçük olması beklenir ki düzlemde (in-plane) FMR sonuçları bunun ispatıdır. Çünkü orada göz ardı edilebilecek bir düzlemde anizotropi gözlemlenmiştir. Ayrıca Ni'in kristal manyetik anizotropisi Co ve Fe gibi diğer 3d ferromanyetik metalleriyle kıyaslandığında genelde küçüktür. Diğer taraftan örneğin dik yönelimdeki VSM ölçümlerinden elde edilen doyum mıknatıslanmasının değeri M_{sNi}=535 emu/cm^3 FMR'daki efektif mıknatıslanmaya yakındır ve de katı (bulk) değerinden daha yüksektir. Aslında VSM'deki AF etkileşme etkisi FMR'dakine benzerdir: komşu manyetik tabaka tarafından indüklenen bir değiş-tokuş alanı VSM döngüsünün büküm noktası için manyetik alan değerini arttırır.

Böylece tabakalar arasındaki etkileşmenin antiferromanyetik karakterli olduğu histerezis döngülerinin şekilleriyle ortaya çıkmıştır, üstelik Fe/Ni sisteminin FMR sonucundaki iki deneysel gözlemle de doğrulanmıştır: FMR rezonans modlarının göreceli şiddetlerindeki değişiklik ve rezonans modlarının pozisyonlarının yüksek alanlara doğru bir kayma olmasının sonucu olarak Ni tabakasının efektif mıknatıslanması artar.



Şekil 4.15: Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co örneği için FMR spektrumun açıya bağlılığı: a) – tüm açılarda 0-6 kOe aralığı spektrumlar, b) örneğin dış manyetik alana dik orientasyonuna yakın 4-22 kOe aralığındaki spektrumlar.



Şekil 4.16: Si/SiO_2//Fe/SiO_2/Co örneği için FMR rezonans alanının açıya bağlılığı. Rezonans alanı için teorik modelleme sonuçları çizgilerle gösterilirken deneysel veriler ise sembollerle sunulmuştur.

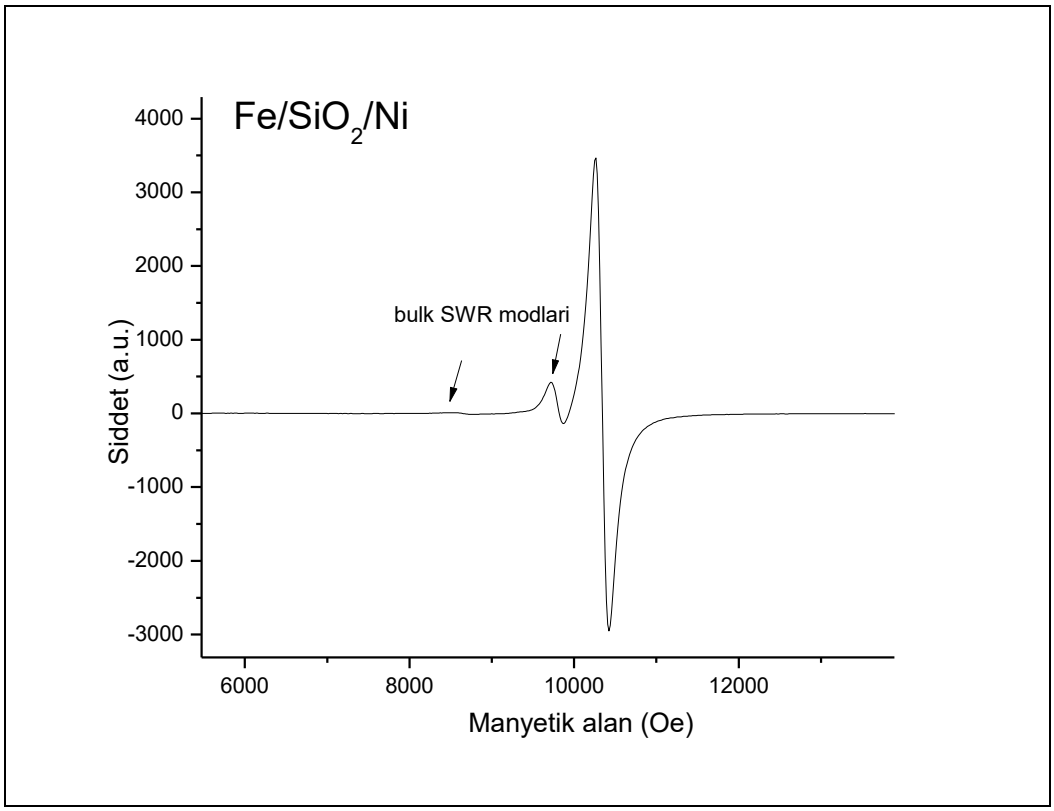
Maalesef Fe/Co örneğinde FMR mod şiddetleri için doğru tahmin yapmak güçlükle mümkün olmaktadır. Çünkü sadece film normaline yakın çok dar bir manyetik alan oryantasyonunda iki ayrı ana mod çözümlenebilir. Bu örnekteki tabakaların FMR sinyallerinin üst üste binmesi Fe ve Co'ın mıknatıslanmasının Fe/Ni örneğine kıyasla birbirine çok daha yakın olmasıyla ilişkilidir. Ancak biz deneyde ESR spektrometrenin en yüksek ulaşabileceği manyetik alanın (22 kOe) ötesinde sadece Co FMR sinyalinin sol kanadını (Şekil 4.15) görürken polikristal Co filmi için dik oryantasyondaki rezonans sinyalinin 21.8 kOe alanında olması beklenmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere iki rezonans modunun daha yüksek alanlara doğru kayması AF etkileşmenin karakteristik özelliğidir.

Biz aynı FMR simülasyon programını kullanarak Fe/Co örneği için deneysel sonuçları modellemeye çalıştık (Şekil 4.16). FMR modlarının düzlem dışında (out-of-plane) açısal ölçümlerinde neredeyse tüm aralıkta üst üste binmesi nedeniyle deneysel veriler modellenerek demir tabakasının efektif parametrelerini çıkarmak mümkün değildir. Bu sebeple g-faktör (g_{Fe}=2.10) ve mıknatıslanma (M_{eff} = 1700) katı ("bulk") metal Fe için olarak kabul edildi ve teorik modellemede sabit parametre olarak kullanıldılar. Efektif g-faktör ve mıknatıslanma değeri sadece Co tabakası için

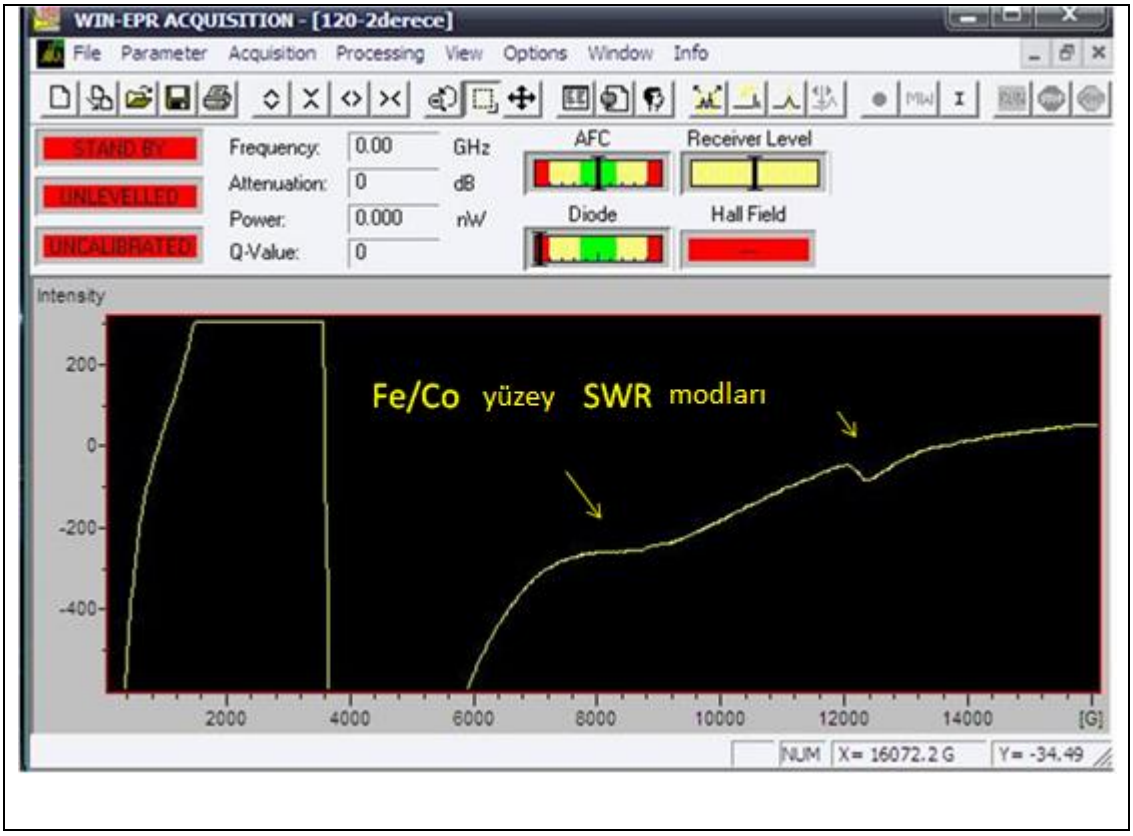
elde edildi. Modelleme sonuçları Şekil 4.16'da düz çizgiler olarak veilmektedir. İki tabaka için H_{res}'ın teorik açısal bağlılığı, çok geniş açı aralığında bir birine paralel gider ve onlar arasındaki fark dik yönelimi dışında FMR çizgi genişliğinin altında beklenir. Kobalt tabakasının g-faktör değeri g_{effCo}=2.05-2.1 aralığında iken (katı kobaltınki g_{Co}=2.2'den oldukça düşüktür) M_{eff} değeri 1500 civarında ("bulk" kobalt değerinden biraz yüksek) elde edildi. Bu gözlemler Fe ve Co tabakası arasında AF etkileşmeye işaret etmektedir.

Örneklerimizde Fe ve Ni (ya da Co) tabakasının AF etkileşmesinin kaynağı net değil. Genelde çeşitli mekanizmalar manyetik tabakalar arasındaki etkileşmeye katkı sağlayabilir. Bunları şu şekilde gruplandırabiliriz: 1) dipolar (manyetostatik ya da dolaşan alan) etkileşme, portakal kabuğu (Néel) etkileşmesi olarak da isimlendirilir [47] ve 2) tünelleme bariyeri vasıtasıyla spin-polarize elektronların tünellemesi nedeniyle değiş-tokuş etkileşmesi. Manyetik tabakanın oldukça büyük olan kalınlığı dikkate alınarak bariyer vasıtasıyla değiş-tokuş etkileşmesinin küçük olması beklenir. Bu nedenle manyetik tabakalar arasında gözlenen etkileşme için manyetostatik bir etkileşme orijini daha uygun bir açıklama gibi görünüyor. Ancak çoğu durumda (manyetik tabakaların ilişkili pürüzlülüğü gibi) Néel etkileşmesinin katkısı ferromanyetik bir işaret taşır. Ayrıca bu tür etkileşmeler sıcaklıkla çok az değişirken (tabakaların mıknatıslanmasıyla doğru orantılıdır) bizim VSM deneylerinde etkileşmenin büyüklüğünün (histerezis döngülerin merkezi kesişen kısımlarının genişliğiyle yansıtılır) sıcaklığa fark edilir şekilde bağlılığı mevcut. Sıcaklığa bağlılık Fe/Co örneğinde zayıf, Fe/Ni örneğinde ise oldukça büyüktür. Bu nedenle silikon dioksit tabaka üzerinden bir AF işaretli tünellemeli değiş-tokuş etkileşmesi katkısını tümüyle göz ardı etmemiz mümkün değildir. Bu durumda tabakalar arasındaki AF etkileşmesinin büyüklüğünün sıcaklıkla artması ince (1 nm Fe/Co örneğinde ve 2 nm Fe/Ni örneğinde) SiO_2 bariyeri vasıtasıyla oluşan tünelleme etkileşim mekanizmasının sıcaklığa bağlı (uyarılma) bir etkileşmeya işaret etmektedir [48].

SiO_2 bariyeriyle sistemdeki etkileşme mekanizmasını belirlemek hem yalıtkan tabaka hem de manyetik tabakaların kalınlarını değiştirerek daha sistematik bir çalışma yapmayı gerektirdiği açıktır.



Şekil 4.17: Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Ni örneği için katı (bulk) SWR modları.



Şekil 4.18: Si/SiO_2/Fe/SiO_2//Co örneği için yüzey (surface) SWR modları.

Bu örneklerdeki bir başka ilginç özellik de Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da görülen ana modun yüksek alan tarafında iki yüzey modun görünmesidir. Bu modlar dik pozisyon civarındaki çok dar bir aralık dışında neredeyse tüm başka açılarda gözlenmektedir. Dik yönelime yaklaşırken bu modlar maksimum DC manyetik alanın (22 kOe) ötesine geçerler. Birinci yüzey modunun şiddeti dik pozisyonuna yaklaşırken artar. Bu gözlem, genellikle spin dalga rezonans uyarımlarının görünümünün teorik analizini yapmak için kullanılan yüzey homojensizliği (suface inhomogeneity – SI) modeliyle uyumludur [49]. Buna göre yüzey sabitleme (surface pinning) parametresi $A(\theta)$'nın, DC manyetik alanın filme paralelden dike dönmesine göre büyüklüğü değişir. Bizim durumumuzda, yani dik yönelimi dışında (bu oryantasyonda $A(\theta)<1$ olur) geniş açı aralığında yüzey modlarının gözlenmesi DC manyetik alanının filme paralel pozisyonda bu parametre $A(\theta)>1$ olduğunu göstermektedir. Bu model tam dik pozisyonda yüzey modlarının ortadan kaybolduğunu öngörür. Çünkü bu modlar yüzey sabitleme şartlarındaki değişiklik nedeniyle bu oryantasyonda hacimli spin dalga rezonans (spin wave resonance=SWR) uyarımlarına dönüşür. Maalesef, bizim spektrometremizin DC manyetik alan aralığı sınırlı kaldığından deneysel olarak bunu gözlemlememiz mümkün olmamıştır. Ancak SI modelinde öngörüldüğü gibi ana ve yüzey modları arasındaki göreceli ayırımın dik oryantasyona doğru azalmasıyla yüzey modunun şiddetinde bir artış gözlenmektedir. Bunun fiziksel sebebi çok basit: bir yüzeye yakın yerleşmiş modun efektif kalınlığı normale doğru artar ve dik oryantasyonda Fe tabakasının yüzey modu sonunda "bulk" düzenli ya da düzensiz (birinci hacimli spin dalga) moduna dönüşür. Bu nedenle bu modu Fe tabakası ve alttaş arasındaki arayüz bölgesine atfetmekteyiz. Ayrıca aslında SI teorisi tarafından öngörüldüğü gibi hacimli SWR modlarının bazıları filme normal oryantasyonunda gözlemlendi. Onların Co tabakasının ana moduna olan yakınlığı bu modların Co tabakasının SWR uyarımları olduğu ihtimaline işaret eder (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18).

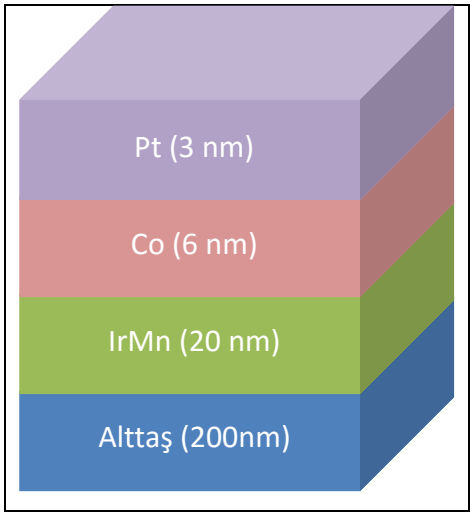
4.6. Sonuçlar

Silikon alttaş üzerinde büyütülen $Fe/SiO_2/Ni$ ve $Fe/SiO_2/Co$ çok katmanlı manyetik ince film yapılarının manyetik ve elektriksel özellikleri VSM, FMR ve manyeto-transport teknikleriyle incelendi. VSM ve FMR ölçümlerinde MTJ yapısındaki örneklerin ikisinin de manyetik tabakları arasında antiferromanyetik etkileşme gözlemlendi. Ölçüm sonuçlarından efektif mıknatıslanma ve g faktörleri hesaplandı. Antiferromanyetik etkileşmenin kaynağı tartışıldı. FMR sonuçlarında yüzey ve katı spin dalga modları gözlemlendi. Manyeto-transport ölçümlerin de ise tipik anizotropik manyetorezistans (AMR) davranışı gözlendi. Manyeto-transport ölçümlerde antiferromanyetik etkileşme, makroskobik bir 4-problu ölçüm sistem kullandığımızdan ya da aradaki yalıtkan tabakanın çok iyi bir şekilde iki manyetik tabakayı yalıtmasından dolayı gözlemlenemedi.

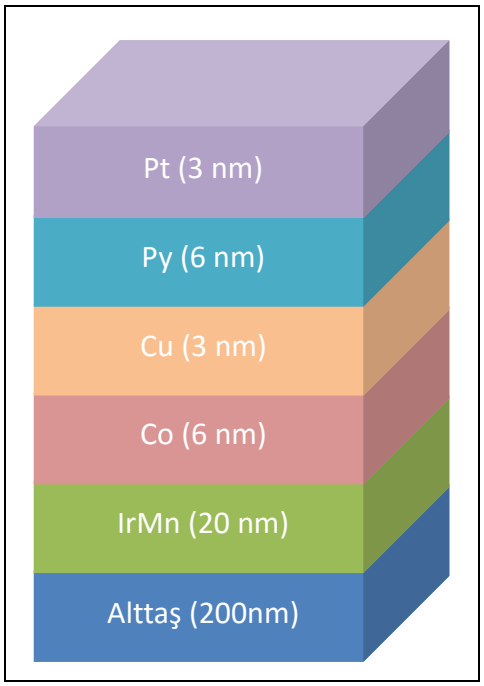
5. SİLİKON ALTTAŞ ÜZERİNDE BÜYÜTÜLEN IrMn/Co/Pt VE IrMn/Co/Cu/Py/Pt ÇOK KATMANLI İNCE FİLM YAPILARINDA MANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

5.1. Numunelerin Hazırlanması

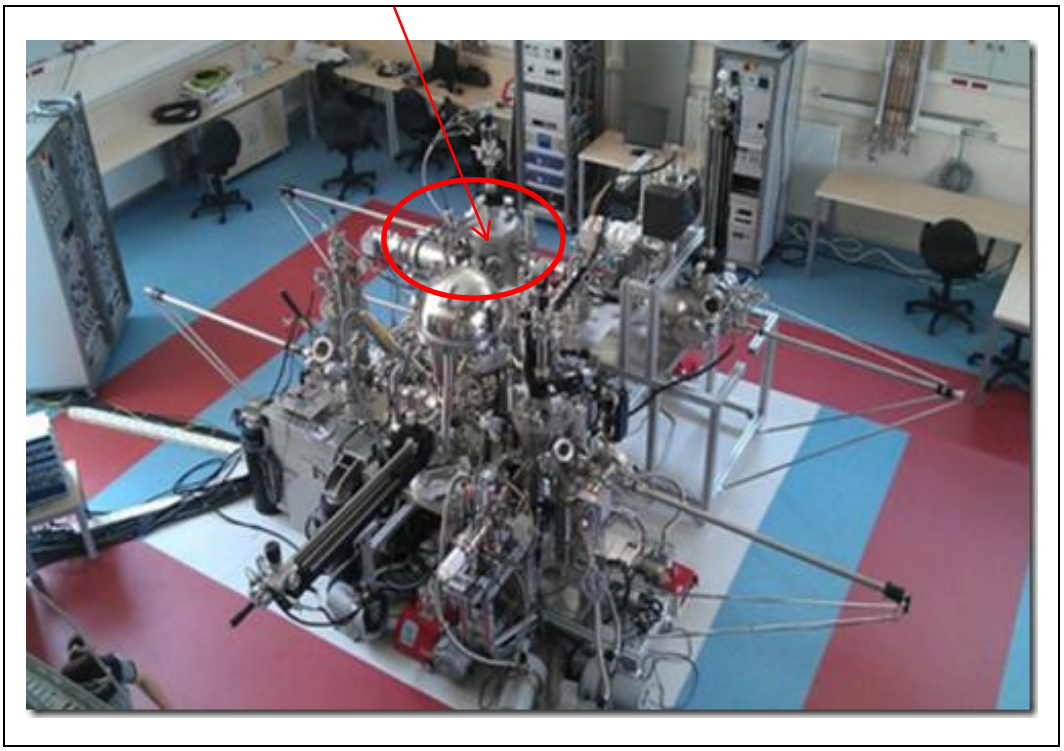
Si/SiO_2(200nm)/IrMn(20nm)/Co(6nm)/Pt(3nm) örneği (örneğinin kesidi Şekil 5.1 verilmiştir) ve Si/SiO_2/IrMn(20nm)/Co(6nm)/Cu(3nm)/Py(6nm)/Pt(3nm) örneği (örneğinin kesidi Şekil 5.2 verilmiştir) GTÜ Nanoteknoloji Enstitüsünde bulunan ince film büyütme sisteminde hazırlandı (Şekil 5.3). Film hazırlama süreci ise sırasıyla şöyledir: önce temiz odada içinde aseton bulunan bir beher içinde 10 dakika ultrasonik banyoda tutalarak alttaşı temizleme işlemi yapıldı. Daha sonra içinde izopropil bulunan başka bir beher içine konulmuş ve 10 dakika ultrasonik banyoda temizlenmiş ve azot tabancası ile kurutuldu. Büyütmeye başlarken vakum odasının basıncı (base pressure) $1*10^{-7}$ mbar (IrMn/Co için) ve $5*10^{-8}$ mbar (IrMn/Co/Cu/Py/Pt için), Ar akış hızı 20 sccm (Standard Cubic Centimeters per Minute), büyütme sırasındaki basınç ise $5*10^{-3}$ ve hedef açısı 14 derece idi. Ayrıca büyütmeden önce her katman için temizlemek maksadıyla 5 dakika ön saçtırma (pre-sputtering) yapıldı.



Şekil 5.1: Si/SiO_2(200nm)/IrMn(20nm)/Co(6nm)/Pt(3nm) örneğinin kesidi.

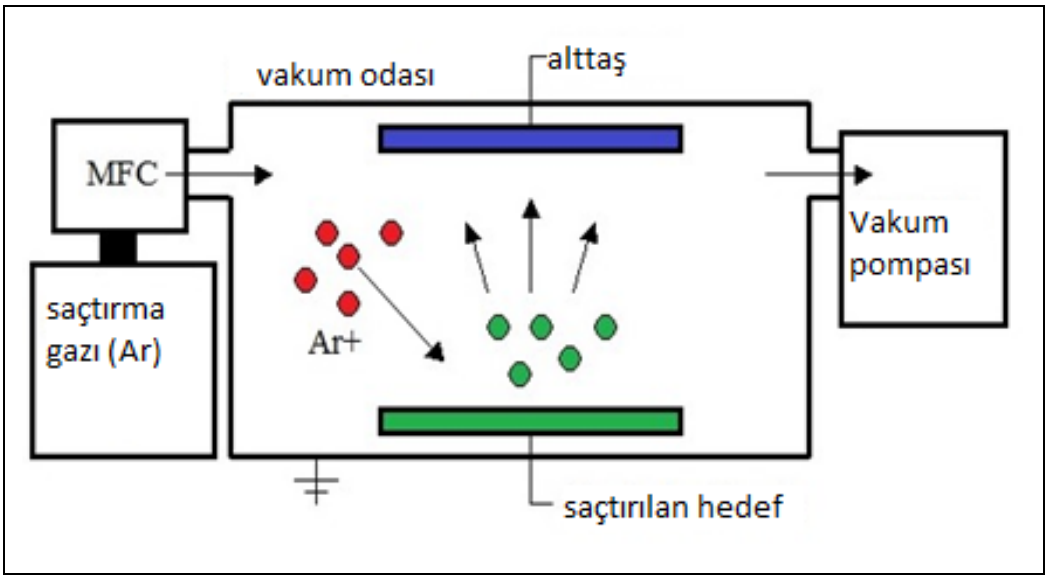


Şekil 5.1: Si/SiO_2(200nm)/IrMn(20nm)/Co(6nm)/Cu(3nm)/Py(6nm)/Pt(3nm) örneğinin kesidi.



Şeki 5.3. GTÜ Nanoteknoloji Enstitüsündeki film büyütme sistemi (kırmızı ovalle işaretlenen bölüm sputter yapılan yer).

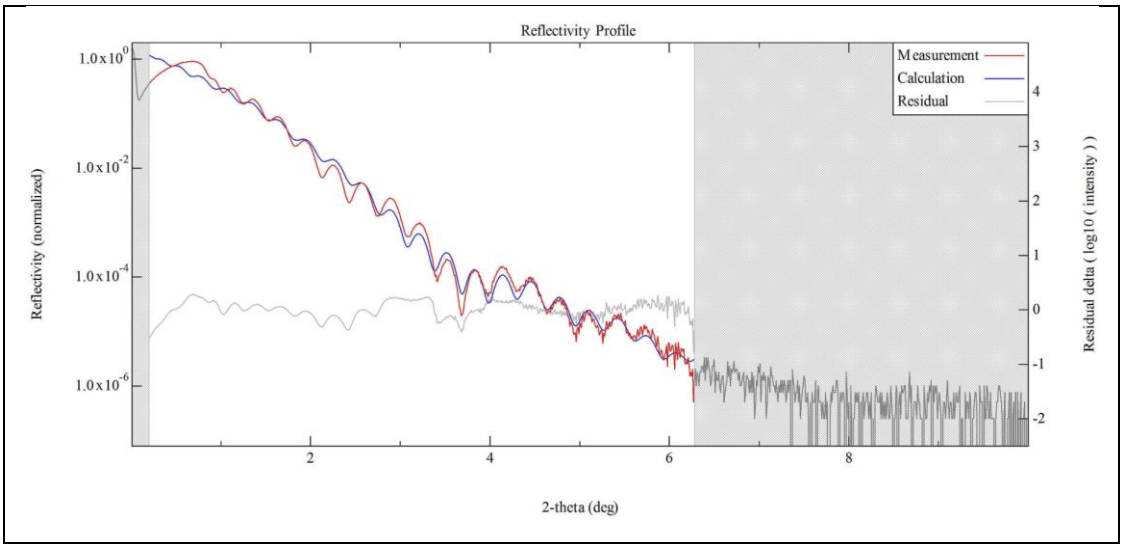
Saçtırma (sputter) sisteminden bahsedilecek olursa yüksek vakum ortamında hızlandırılan Ar moleküllerinin hedefe çarptırılması sonucunda oradan ayrılan hedef moleküllerinin alttaş üzerine birikmesiyle filmin yüzeyinin kaplandığı sistemdir. Bu sistem Şekil 5.4'de şematik olarak gösterilmiştir



Şekil 5.4: Sputter sisteminin şematik gösterimi.

5.2. XRR (X-Ray Reflectivity) Sonuçları

Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için XRR ölçüm sonucuyla uyumlu, programla hesaplanan kalınlık, yoğunluk, pürüzlülük parametrelerinin değerleri Şekil 5.5'de verilmiştir. Kalınlıkların beklenen değerlerle oldukça yakın olduğu görülmektedir.

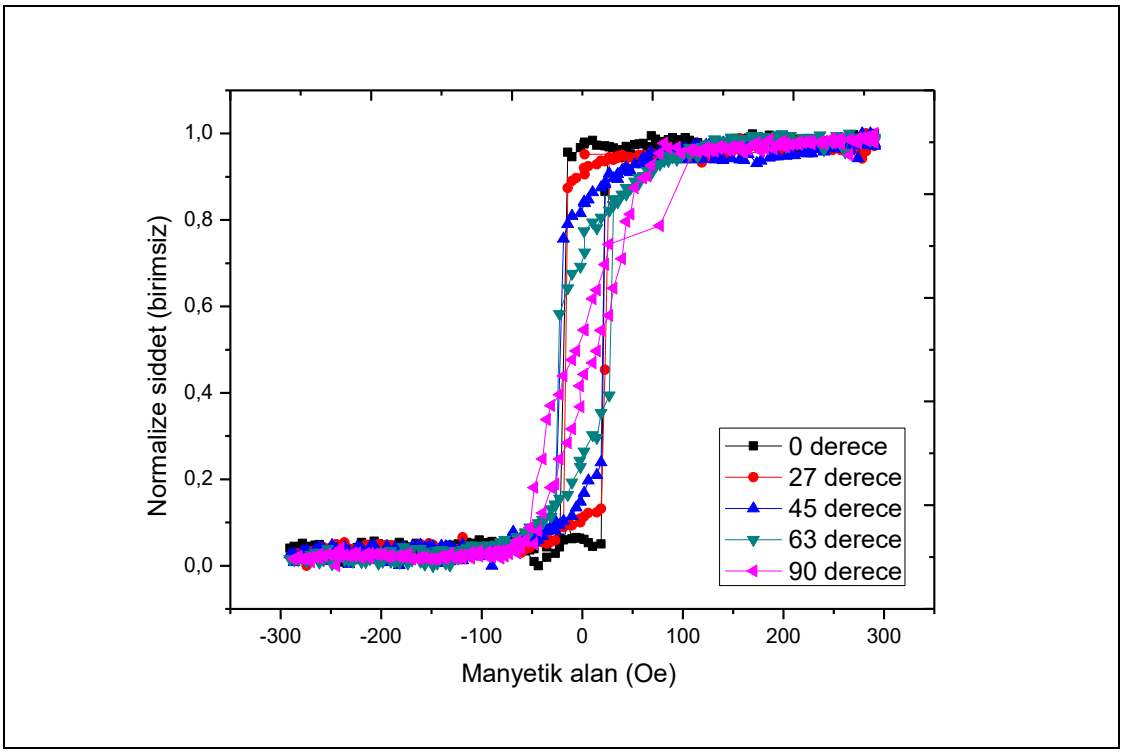


Tabaka		Kalınlık (nm)	Yoğunluk (g/cm3)	Pürüzlülük (nm)
3	Pt	2.206(17)	41.6(11)	0.495(4)
2	Co	6.05(6)	10.8(11)	0.641(8)
1	IrMn	18.94(8)	11.11(18)	0.000(4)
Sub.	SiO2	0.0[--]	0.0(12)	0.478[--]

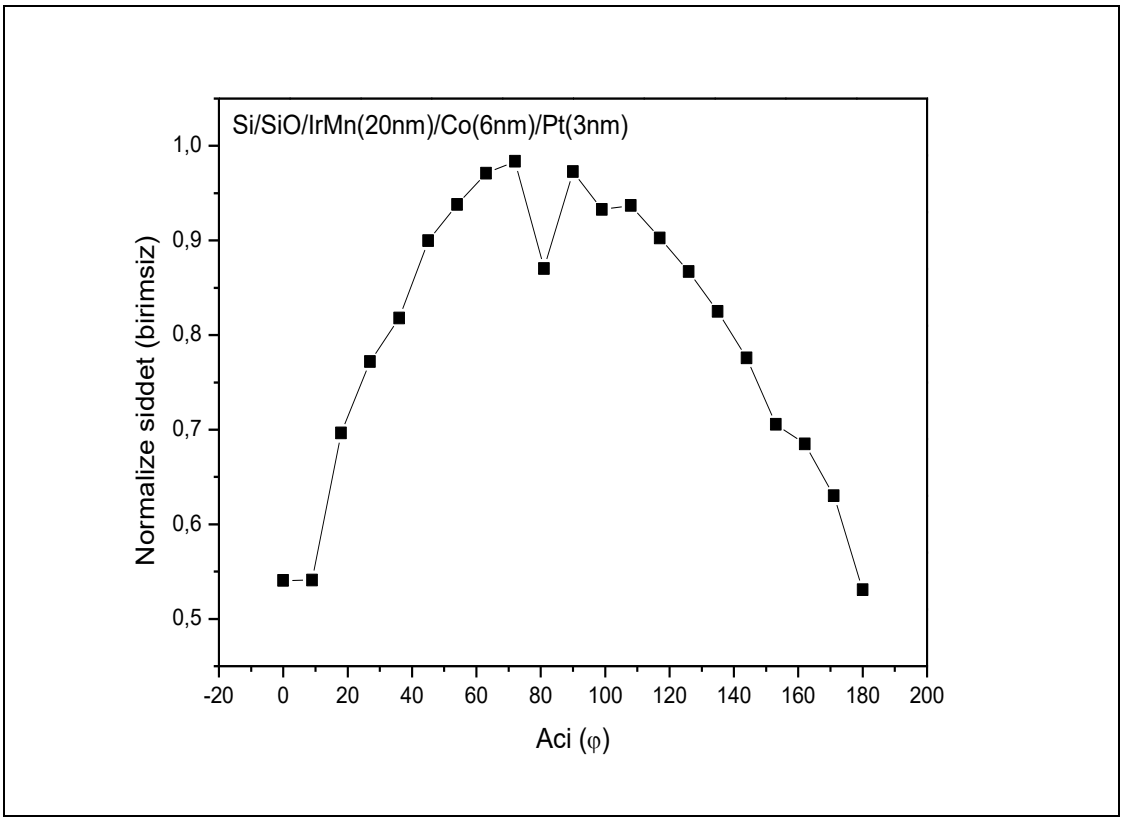
Şekil 5.5: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için XRR ölçüm sonucu (üstte) ve programla hesaplanan parametre değerleri (altta).

5.3. MOKE (Magneto-optic Kerr Effect) Sonuçları

Düzlemde geometride yapılan MOKE ölçümlerinde Şekil 5.4'de görüldüğü gibi anizotropi olduğu gözlemlenmiştir.



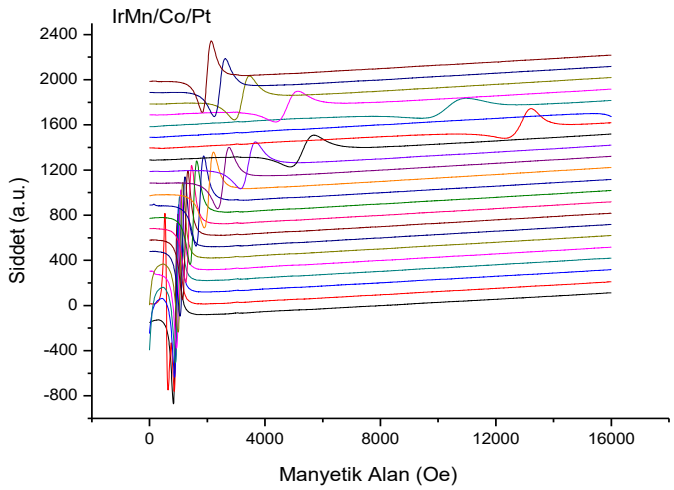
Şekil 5.6: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlemde geometride açıya bağlı MOKE ölçüm sonuçlarında açıya bağlı histerezis eğrileri.



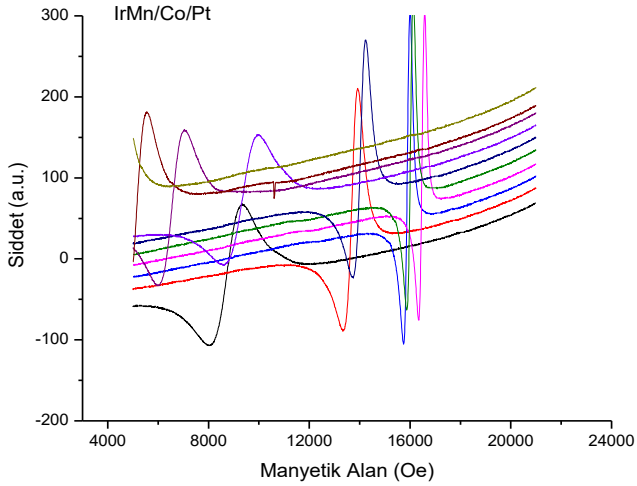
Şekil 5.7: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlemde geometride MOKE ölçüm sonuçlarında kalıcı mıknatıslanmanın açıya bağlı değişimi.

5.4. FMR Sonuçları

Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlem dışı geometrideki Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'daki FMR ölçüm sonuçlarına bakıldığında yüksek bir anizotropi görülmektedir.

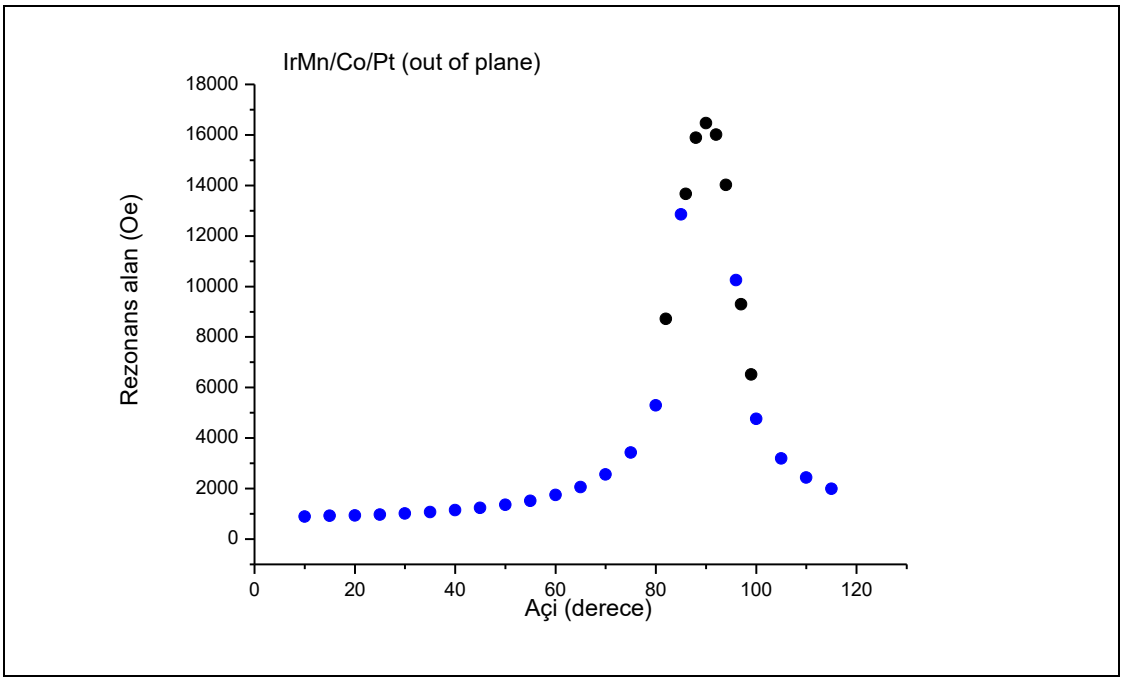


a)



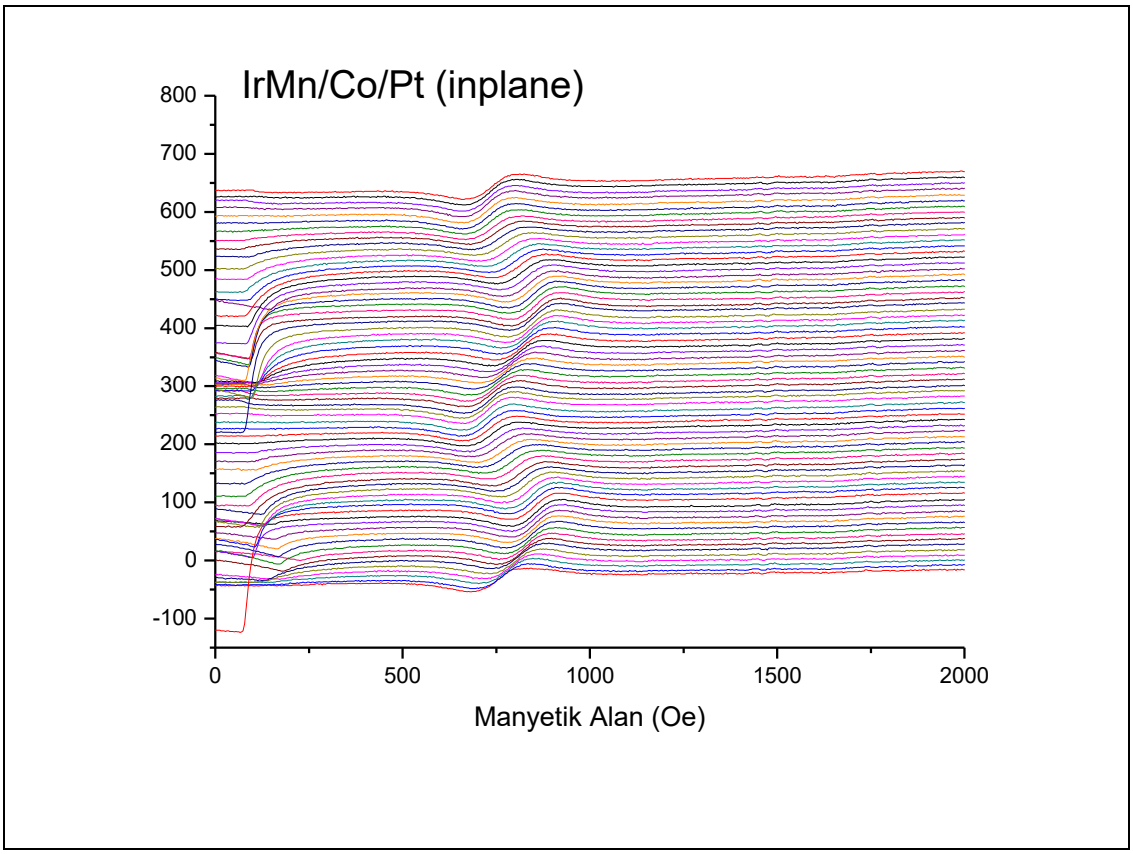
b)

Şekil 5.8: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlem dışı geometrideki FMR spektrumun açıya bağlılığı: b) – tüm açılarda 0-16 kOe aralığı spektrumlar, b) örneğin dış manyetik alana dik orientasyonuna yakın 4-22 kOe aralığındaki spektrumlar.

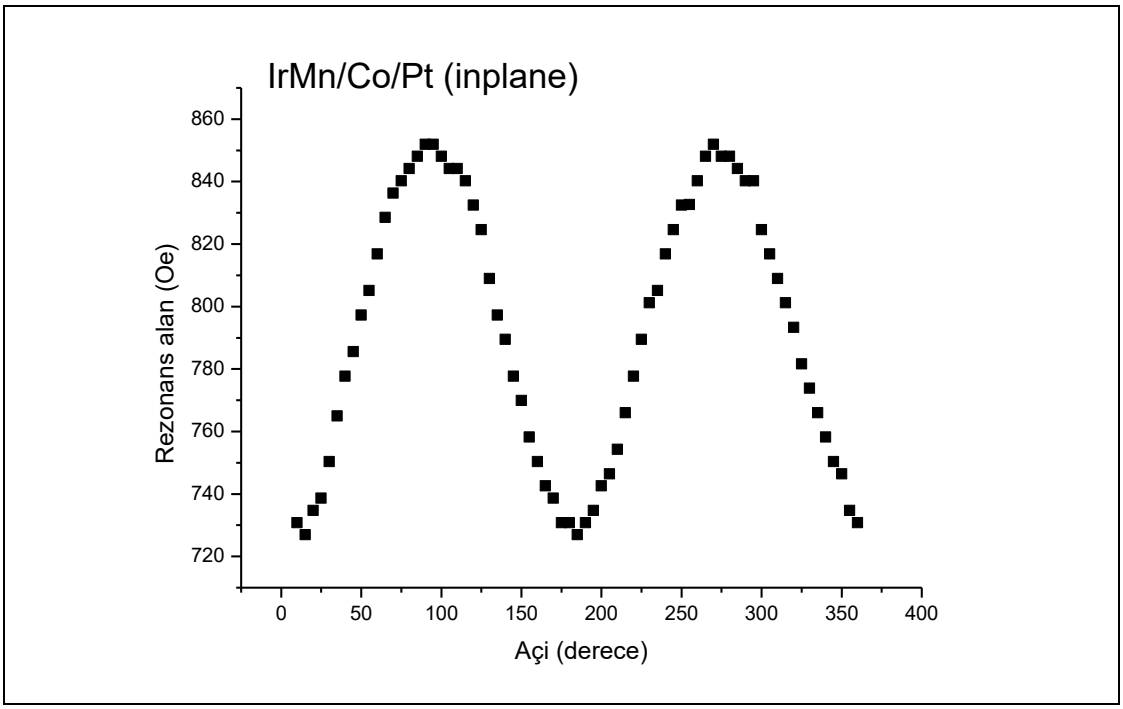


Şekil 5.9: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlem dışı geometrideki FMR rezonans alanının açıya bağlılığı.

Ayrıca aynı örnek için düzlemde geometrideki Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'deki FMR ölçüm sonuçlarına bakıldığında ise 100 Oe'lik bir anizotropi görülmektedir. Buna büyümenin tetiklediği (growth-induced) anizotropi denilmektedir



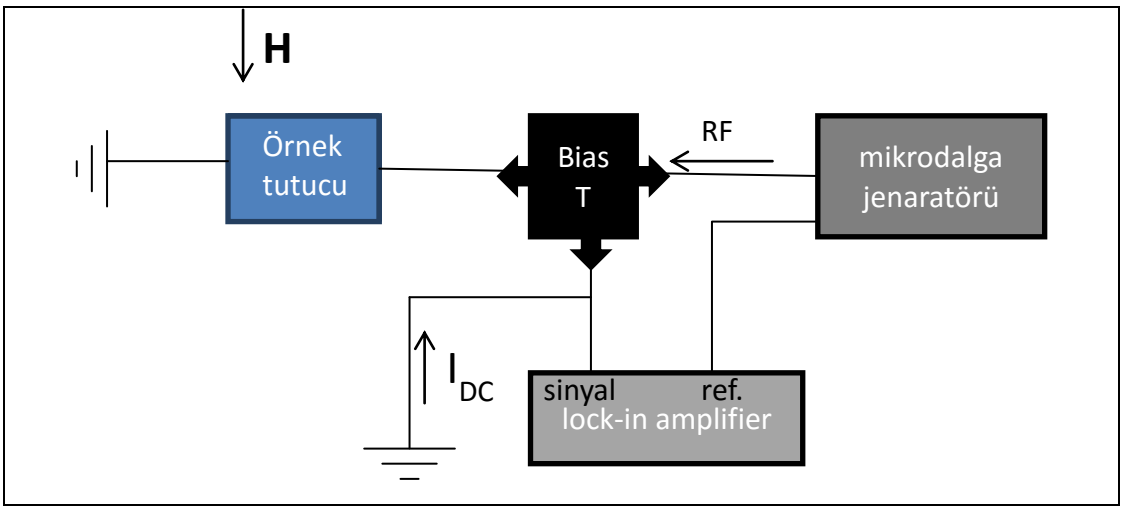
Şekil 5.10: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlemde geometrideki FMR spektrumun açıya bağlılığı.



Şekil 5.11: Si/SiO_2/IrMn/Co/Pt örneği için düzlemde geometrideki FMR rezonans alanının açıya bağlılığı.

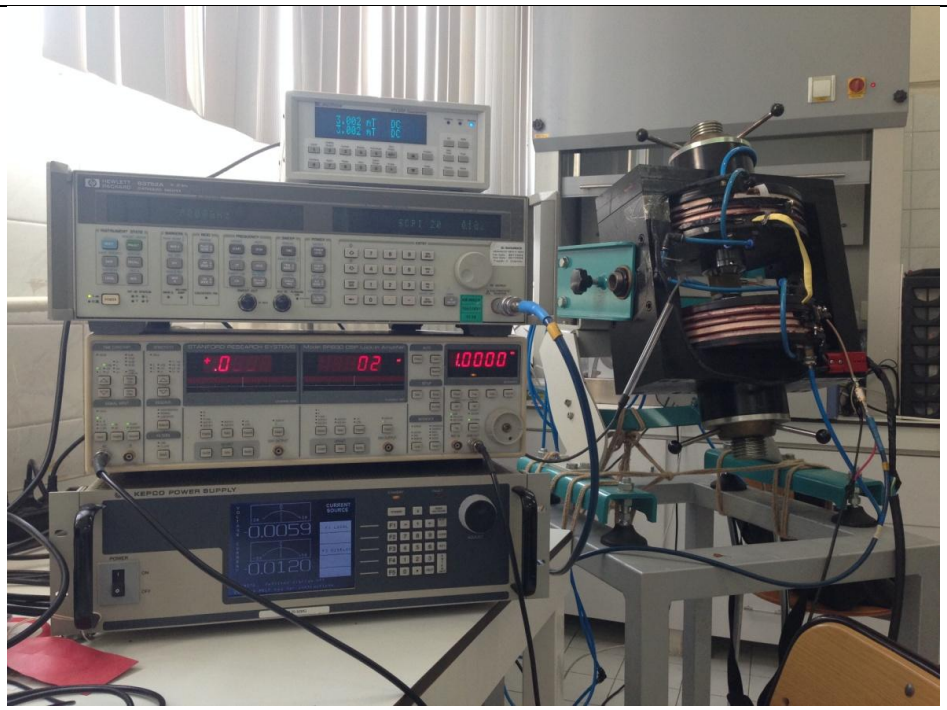
5.5. Elektriksel Ferromanyetik Rezonans ölçümleri

5.5.1 Ölçüm Sistemi

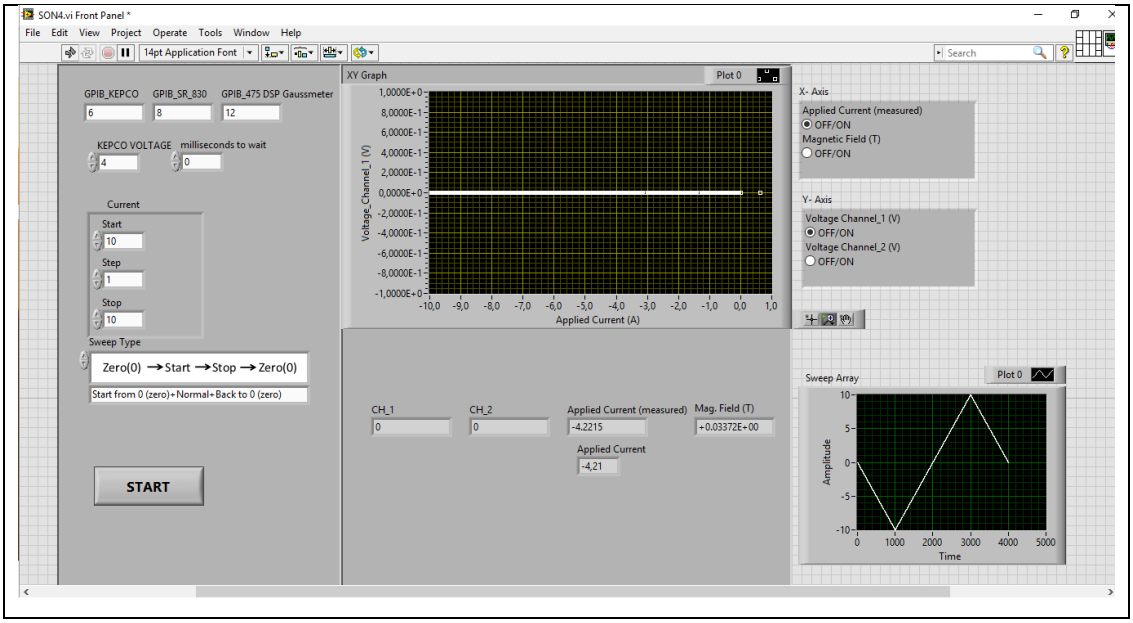


Şekil 5.12: Elektriksel FMR ölçüm sisteminin şematik gösterimi.

Elektriksel FMR ölçümü deneyinde kullanılan sistem *KEPCO BOP 20-50MG* güç kaynağı, *Standford Research SR-830 DSP* lock-in amplifier, *HP 83752B* sinyal jeneratorü, *Lakeshore 475 DSP* gausmetre, elektromıknatıs, bias-tee, örnek tutucu ve masa üstü bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 5.13). Sistem Labview programıyla (Şekil 5.14) bilgisayardan kontrol edilebilmektedir.



Şekil 5.13: Elektriksel olarak ölçülen FMR ölçüm düzeneği



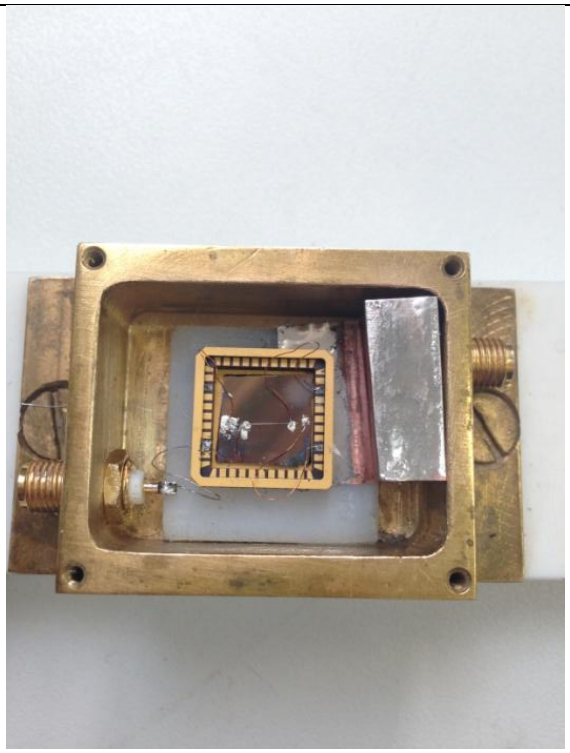
Şekil 5.14: Elektriksel FMR ölçümü deneyinde kullanılan Labview programının ön panelinin bilgisayar ekranındaki görüntüsü.

Çalışmalarımızda şekilde görüldüğü gibi Labwiev programında KEPCO güç kaynağının voltajı, bekleme süresi, akım aralığı ve akım adımı gibi parametreleri belirlenip girilerek program çalıştırılmaktaydı (Şekil 5.14). Lock-in'de okunan voltaj

değerleri, uygulanan akım miktarı ve manyetik alan gibi parametreler ise programla okunup kaydedilerek gerekli veriler elde edilmekteydi. Bunun haricinde modülasyon frekansı ise manuel olarak değiştirilmekteydi.

5.5.2 Deneysel sonuçlar

Elektriksel FMR deneyleri ilk etapta Si/SiO2(200nm)/IrMn(20nm)/ Co(6nm)/Pt(3nm) örneği üzerinde denendi. Örnek kimyasal litografi yöntemiyle enine yaklaşık 300 μm ve uzunluğu 10 mm olan şerit haline getirildi. Daha sonra örnek pirinçten yapılmış RF ekranlama kutusu içine yerleştirildi. Kutuya mikrodalga girişi bir SMA konektörü sayesinde verildi ve bu konektöre lehimlenen kontaklarının (bakır tel veya şerit şeklinde) diğer ucu gümüş pasta ile örneğe temas ettirildi.



Şekil 5.15: Si/SiO2(200nm)/IrMn(20nm)/ Co(6nm)/Pt(3nm) örneğinin RF ekranlama kutusu içindeki görüntüsü.

Farklı konfigürasyonlar (akım ve şerit yönü DC manyetik alana hem paralel hem de dik olarak) denememize rağmen Si/SiO_2(200nm)/IrMn(20nm)/ Co(6nm)/Pt(3nm) şeridi üzerinde elektriksel FMR deneylerinde bir sonuç alınamadı.

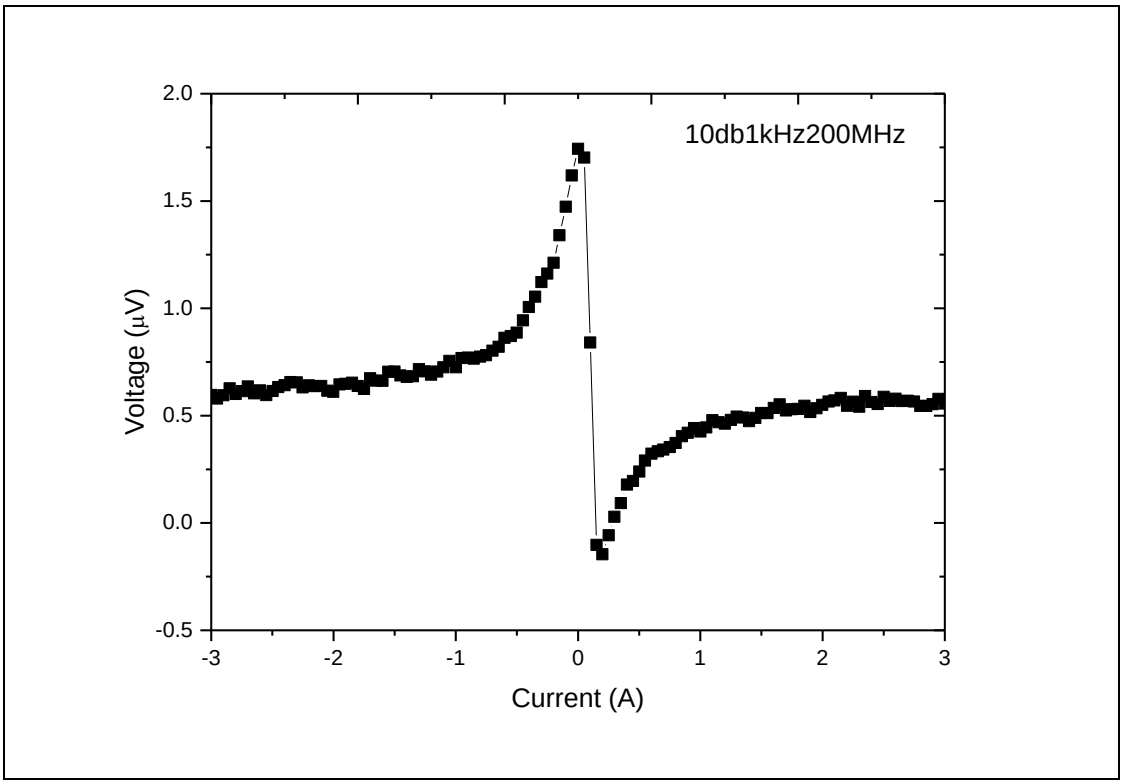
Bunun başlıca nedeni olarak empedans uyumsuzluğuna bağlamaktayız. Kutu içine yerleştirilen şerit örnek ve kontaklardan oluşan sisteminin multimetre ile ölçtüğümüz rezistansın yaklaşık 3kOm'dur ve dolayısıyla yüksek frekans ölçümlerinde ideal 50 Om'luk rezistanstan oldukça uzaktır. Diğer yandan spin-valf yapısında olmayan örnekte elektriksel FMR'nın ortaya çıkmasına katkıda bulunabilecek fiziksel olaylar (ters Spin Hall etkisi gibi) daha zayıf olabileceği de elektriksel FMR eğrisinin gözlemlenememesi için bir başka ihtimaldir.

Bu yüzden sonraki denemede yine şerit şeklinde hazırlanmış Si/SiO_2/IrMn(20nm)/Co(6nm)/Cu(3nm)/Py(6nm)/Pt(3nm) örneğini kullandık (Şekil 5.16).

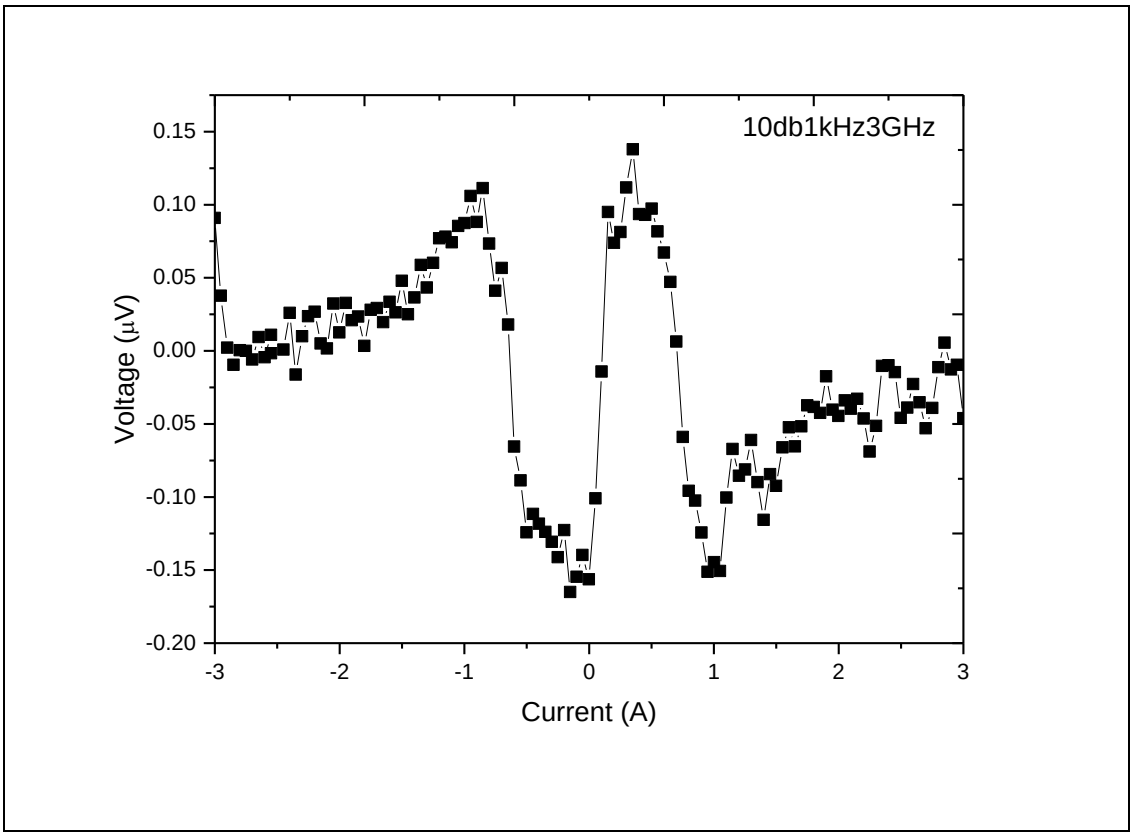
Şekil 5.16: Si/SiO2(200nm)/IrMn(20nm)/Co(6nm)/Cu(3nm)/Py(6nm)/Pt(3nm) örneğinin RF ekranlama kutusu içindeki görüntüsü.

Kutu içine yerleştirilen şerit örnek ve kontaklardan oluşan sisteminin SMA girişinde multimetre ile ölçülen toplam rezistansın yaklaşık 380 Om'dur ve dolayısıyla istenilen 50 Om'luk rezistansta çok daha yakındır. Bu örnek üzerinde elde edilen ölçümler aşağıda Şekil 5.17-Şekil 5.20'de verilmiştir.

Kullandığımız mikrodalga kaynağında en düşük frekans 100 MHz başlayarak yaklaşık 3 GHz'e kadar elektriksel FMR sinyali görünmektedir. Daha yüksek frekanslarda sinyal/gürültü oranı çok düşük olduğundan sinyali gözlemek mümkün olmamıştır. Ölçümlerde farklı konfigürasyonlar (akım ve şerit yönü DC manyetik alana hem paralel hem de dik olarak) denenmiştir. Elektriksel FMR sinyali sadece akım ve şerit yönü DC manyetik alana paralel olduğunda gözlemlenmiştir.

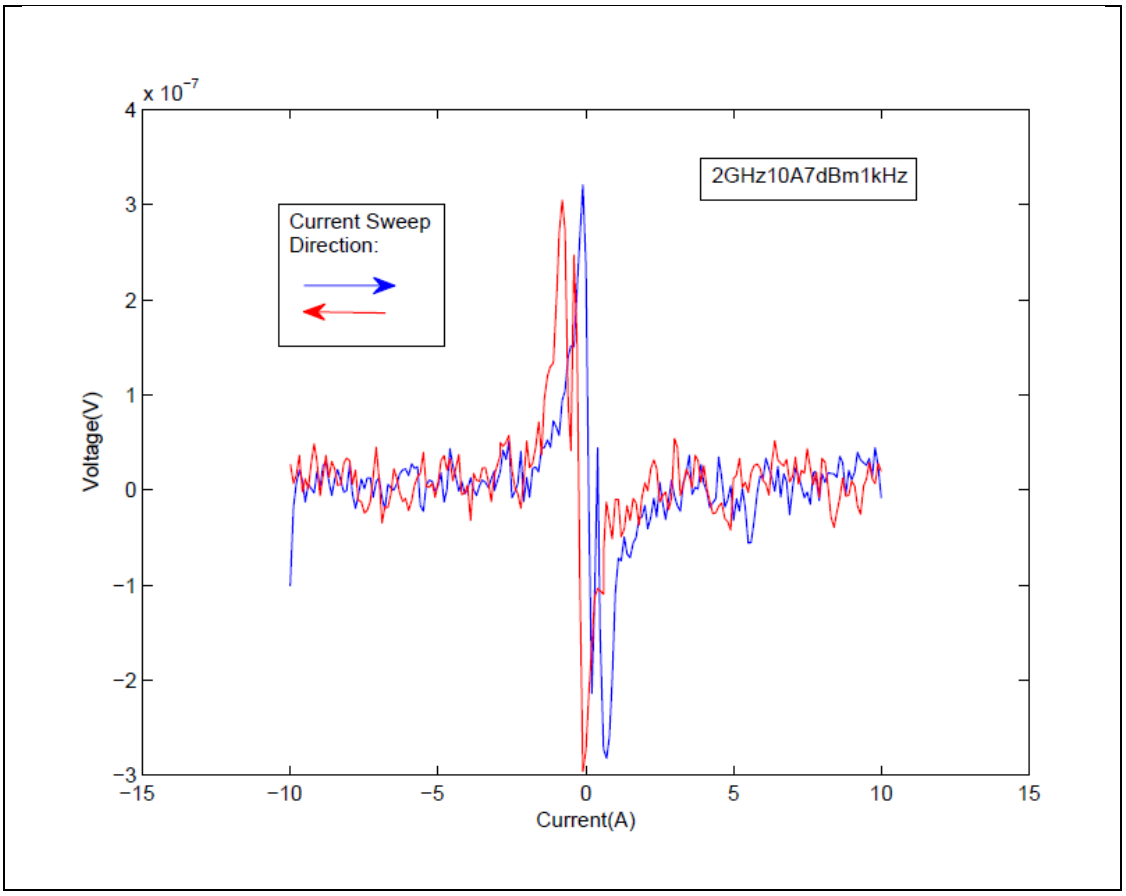


Şekil 5.17: Si/SiO_2/IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneğinde 200 MHz'te elektriksel FMR sinyali.



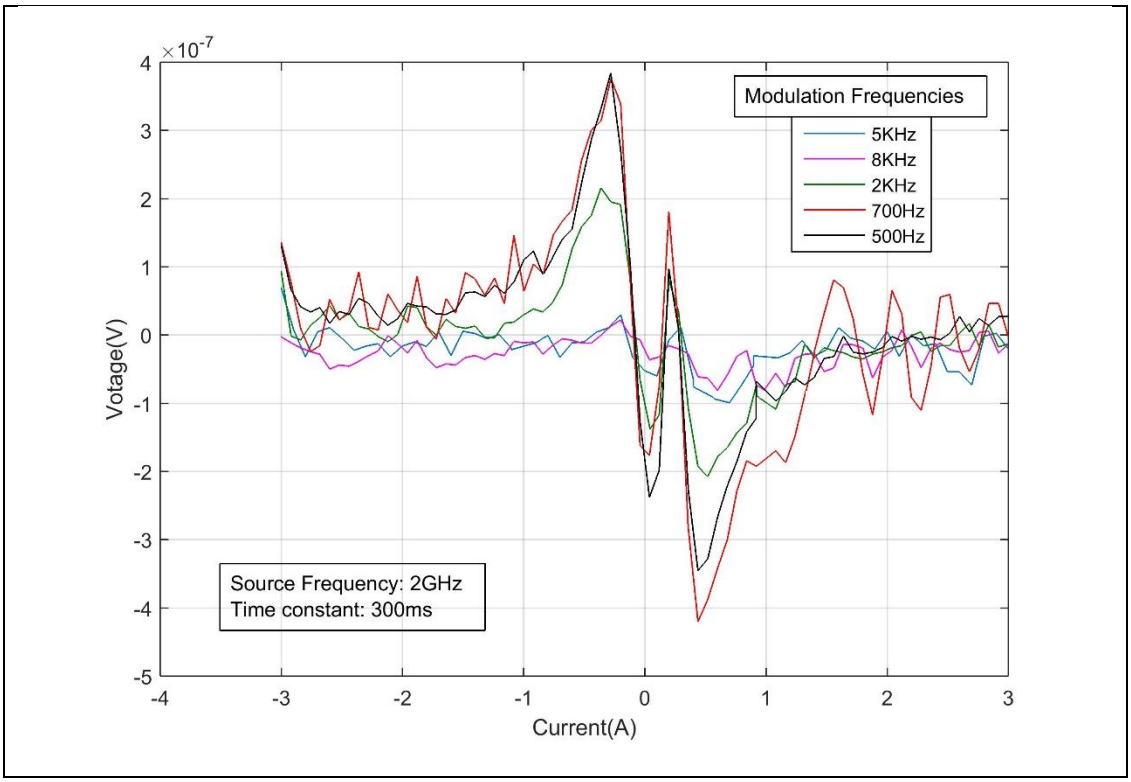
Şekil 5.18: Si/SiO_2/IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneğinde 3GHz'te elektriksel FMR sinyali.

Elde edilen elektriksel FMR sinyalinin eğri şekline ve genliğine deneysel şartlarının etkisini aşağıda verilen Şekil 5.19 ve 5.20'de araştırılmıştır. Şekil 5.19 lock-in cihazında (entegrasyon) zaman sabiti τ noktalar arası bekleme zamanına (t_d) göre yeterli küçük (<1/3) olmadığında tarama yönüne göre eğri pozisyonu ve asimetrisi değişmektedir.



Şekil 5.19: Si/SiO_2/IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneği için 2GHz'te kaydedilen elektriksel FMR sinyalinin eğrisine tarama yönünün etkisi.

Şekil 5.20 ise sinyal kaynağına verilen modülasyon frekans etkisinin elektriksel FMR genliğini nasıl etkilediği görünmektedir. 500Hz-1kHz arasında olan düşük modülasyon frekanslarında daha şiddetli FMR sinyali elde edildiği görünmektedir.



Şekil 5.20: Si/SiO_2/IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneği için 2GHz mikrodalga frekansında elde edilen FMR sinyali üzerine modülasyon frekansının etkisi.

Böylece, yapılan deneylerde belirli frekanslarda uygulanan MW akımı etkisindeki örnek üzerinde manyetik alan taranarak örnekten gelen cevap olan FMR sinyali lock-in yükselticide DC voltaj olarak gözlemlendi. Manyetik alan şerit ve akım doğrultusuna paralel olarak uygulanmıştır. Elektriksel olarak algılanan FMR konusunda son zamanlarda birçok çalışma ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalarda farklı teknikler çalışılmış, örneğin kısa devre yapmış mikro çubuk geçiş hattı (shorted microstripe transmission line) ismi verilen bir teknikten [50]. Bahsedilen çalışmadan farklı olarak yaptığımız ölçümlerde microstripe veya coplanar waveguide gibi ayrı bir mikrodalga ışınım elemanı kullanmadık. Kullandığımız teknikte Tsoi ve arkadaşları [51,52] tarafından teklif edilen tekniği kullandık. Bu teknikte örnek kendisi mikrodalga iletim hattı olarak çalışmaktadır. Mikrodalga ışınımı ile birlikte örnek manyetik alan içine de konulduğunda FMR olayı esnasında spin doğrultma/diyot/ rektifikasyon etkisinden (Spin Rectification Effect) dolayı örnek üzerinde FMR eğrisini yansıtan DC voltaj meydana gelmektedir. Böylece bu teknik sayesinde geleneksel sabit frekanslı FMR yöntemine göre çok geniş frekans bandında ve prensipte çok daha hassas FMR ölçümlerinin yapılması mümkün hale

gelmektedir. Ayrıca bu teknik sayesinde hem temel fizik hem de spintronik uygulamalar açısından çok ilginç deneyler yapılabilir duruma gelmektedir. Böylece tezinin son kısmında bu tip deneylerinin çok basit bir düzenek sayesinde yapılabilirliğini göstermiş olduk.

5.6. Sonuçlar

Silikon alttaş üzerinde Gebze Teknik Üniversitesi Nanoteknoloji Enstitüsünde saçtırma tekniğiyle büyütülen IrMn/Co/Pt ve IrMn/Co/Cu/Py/Pt çok katmanlı ince film yapılarında manyetik ve elektriksel özellikler MOKE, Gelenkesel FMR ve elektriksel olarak ölçülen FMR teknikleriyle incelendi. Düzlemde MOKE ölçümlerinde ve geleneksel FMR ölçümlerinde anizotropi gözlemlendi. Geleneksel sabit frekanslı FMR'a göre çok geniş frekans bandında ve çok daha hassas ölçüm yapılabilen elektriksel olarak ölçülen FMR deneylerinde, uygulanan akımın yönünün ve modülasyon frekansının büyüklüğünün değiştirilmesiyle, elde edilen FMR sinyalinin genliğinin ve asimetrisinin nasıl değiştiği incelendi.

6. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada Si/SiO_2 alttaş üzerine büyütülmüş $Fe/SiO_2/Ni$ ve $Fe/SiO_2/Co$ çok katlı ince filmlerin manyetik ve geçiş özellikleri incelenmiştir. Örnekler iki aşamalı kaplama işlemiyle hazırlandı. Ferromanyetik iki tabakalıların manyetik özellikleri oda sıcaklığında ferromanyetik rezonans (FMR) ve titreşimli örnek manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometer-VSM) teknikleriyle araştırılmıştır. Standart 4-nokta manyeto-transport ölçümleri çeşitli sıcaklıklarda gerçekleştirildi. $Fe/SiO_2/Ni$ ve $Fe/SiO_2/Co$ örneklerinin örnek düzlemindeki (in-plane) histerezis döngülerinde iki adımlı değişim gözlendi. İki örneğin de histerezis döngülerinin ortasındaki kesişme filmin manyetik tabakaları arasında zayıf bir antiferromanyetik etkileşme olduğuna işaret etmektedir. Doyum mıknatıslanmaları film yüzeyine dik DC manyetik alan uygulanmasıyla VSM ölçümlerinden elde edilmiştir. Manyeto-transport ölçümleri hem oda hem de düşük sıcaklıkta anizotropik manyetik rezistansın baskın katkısını göstermektedir. FMR çalışmalarında yüzey ve katı spin dalga rezonans (SWR) modları gözlemlendi. $Fe/SiO_2/Ni$ ve $Fe/SiO_2/Co$ örneklerinde üst ve alt ferromanyetik tabakalar arasında zayıf bir antiferromanyetik ara tabaka etkileşimi olduğunu hem FMR çalışmaları hem de kesişen VSM histerezis döngüleri kanıtladı. Antiferromanyetik etkileşmenin kaynağı da tartışıldı.

Silikon alttaş üzerinde büyütülen IrMn/Co/Pt ve IrMn/Co/Cu/Py/Pt çok katmanlı ince film yapılarının manyetik ve elektriksel özellikleri incelendi. MOKE ve geleneksel FMR sonuçlarından düzlemde geometride 100 Oe'lik bir anizotropi olduğu gözlemlendi. Ayrıca yine silikon alttaş üzerinde büyütülen IrMn/Co/Pt ve IrMn/Co/Cu/Py/Pt örnekleri için elektriksel olarak ölçülen FMR deneyleri de gerçekleştirildi. Bu çalışmada kullanılan teknikte örneğin kendisi mikrodalga iletim hattı olarak kullanıldı. Mikrodalga ışınımı ile birlikte örnek manyetik alan içine de konulduğunda FMR olayı esnasında spin doğrultma/diyot/ rektifikasyon etkisinden (Spin Rectification Effect) dolayı örnek üzerinde FMR eğrisini yansıtan DC voltaj elde edildi. İlk örnekte farklı konfigürasyonlar (akım ve şerit yönü DC manyetik alana hem paralel hem de dik olarak) denememize rağmen IrMn/Co/Pt şeridi üzerinde elektriksel FMR deneylerinde bir sonuç alınamadı. Bunun başlıca nedeni olarak empedans uyumsuzluğu olduğu düşünüldü. IrMn/Co/Cu/Py/Pt örneği için empedans beklenen değerle daha uyumlu bir büyüklükte elde edilmiş olup

kullandığımız mikrodalga kaynağında en düşük frekans 100 MHz başlayarak yaklaşık 3 GHz'e kadar elektriksel FMR sinyali elde edildi. Ölçümlerde farklı konfigürasyonlar (akım ve şerit yönü DC manyetik alana hem paralel hem de dik olarak) denendi. Elektriksel FMR sinyali sadece akım ve şerit yönü DC manyetik alana paralel olduğunda gözlemlendi. Böylece bu teknik sayesinde geleneksel sabit frekanslı FMR yöntemine göre çok geniş frekans bandında ve prensipte çok daha hassas FMR ölçümlerinin yapılması mümkün hale gelmektedir. Ayrıca bu teknik sayesinde hem temel fizik hem de spintronik uygulamalar açısından çok ilginç deneyler yapılabilir duruma gelmektedir. Böylece tezin son kısmında bu tip deneylerin çok basit bir düzenek sayesinde yapılabilirliği gösterilmiş oldu.

KAYNAKLAR

[1] Konovalenko A., (2008), “Spin transfer torques and spin dynamics in point contacts and spin-flop tunnel junctions”, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology Roslagstullsbacken.

[2] Julliere M., (1975), “Tunneling between ferromagnetic films”, PhysicsLettersA, 54, 225– 226.

[3] Reiss G., Meyners D., (2006), “Reliability of field programmable magnetic logic gate arrays”, Applied Physics Letters, 88, 043505.

[4] Moodera J.S., Kinder L.S., Wong T.M. and Meservey, R., (1995), “Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin films tunnel junctions”, Physical Review Letters, 74, 3273-3276.

[5] Miyazaki T., Tezuka N., (1995), “Giant magnetic tunneling effect in $Fe/Al_2O_3/Fe$ junction”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 139, L231–L234.

[6] Bowen M., Bibes M., Barthélémy A., Contour J.-P., Anane A., Lemaître Y. and Fert A., (2003), “Nearly total spin polarization in La2/3Sr1/3MnO3La2/ 3Sr1/3MnO3 from tunneling experiments”, Applied Physics Letters, 82, 3269–3271.

[7] Butler W., Zhang X., Schulthess T., MacLaren J., (2001), “Spin-dependent tunneling conductance of Fe|MgO|Fe sandwiches”, Physical Review B, 63, 054416.

[8] Mathon J., Umerski A., (2001), “Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction”, Physical Review B, 63, 220403.

[9] Parkin S. S. P., Kaiser C., Panchula A., Rice P. M., Hughes B., Samant M., Yang S., (2004), “Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers”, Nature Materials, 3, 862–867.

[10] Yuasa S., Nagahama T., Fukushima A., Suzuki Y., K Ando., (2004), “Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions”, Nature Materials, 3, 868–871.

[11] Baibich M. N., Broto J. M., Fert A., Nguyen Van Dau F., and Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., and Chazelas J., (1988), “Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices”, Physical Review Letters, 61(21), 2472–2475.

[12] Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., and Zinn W., (1989), “Enhanced magnetoresistance inlayered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange”, Physical Review B, 39(7),4828–4830.

[13] Ay F., (2012), “Metal İnce Filmlerin ve İyon İmplante Edilen Oksit Alttaşların FMR Tekniği ile İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

[14] Web 1, (2016), http://www.powershow.com/view1/1fac70-ZDc1Z/MRAM_Giant_and_Tunneling_Magnetoresistance_Phenomena_powerpoint_ppt_presentation, (Erişim Tarihi: 20/09/2016).

[15] Wei Zhen, (2008), “Spin-Transfer-Torque Effect in Ferromagnets and Antiferromagnets”, Doctoral Thesis, The University of Texas at Austin.

[16] Berger L., (1984), “Exchange interaction between ferromagnetic domain wall and electric current in very thin metallic films”, Journal of Applied Physics, 55, 1954.

[17] Hung C. –Y., and Berger L., (1988), “Exchange forces between domain wall and electric current in permalloy films of variable thickness”, Journal of Applied Physics, 63, 4276.

[18.]Slonczewski J. C, (1996), “Current-driven excitation of magnetic multilayers”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 159, L1-L7.

[19] Berger L., (1996), “Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current”, Physical Review B, 54, 9353.

[20] Tsoi M., Jansen A. G. M., Bass J., Chiang W. –C., Seck M., Tsoi V., and Wyder, (1998), “Excitation of a Magnetic Multilayer by an Electric Current”, P. Physical Review Letters, 80, 4281.

[21] Myers E. B., Ralph D. C., Katine J. A., Louie R. N., and Buhrman R. A., (1999), “Current-Induced Switching of Domains in Magnetic Multilayer Devices”, Science, 285, 867.

[22] Katine J. A., Albert F. J., Buhrman R. A., Myers E. B., and Ralph D. C., (2000), “Current-driven magnetization reversal and spin-wave excitations in Co /Cu /Co pillars”, Physical Review Letters, 84, 3149.

[23] Diao Z., Li Z., Wang S., Ding Y., Panchula A., Chen E., Wang L. C., and Huai Y., (2007), “Spin-transfer torque switching in magnetic tunnel junctions and spin-transfer torquerandom access memory”, Journal of Physics: Condensed Matter, 19, 165209.

[24] Weber R. T., Jiang J., Barr D. P., (1998), “EMX User's Manual”, 6130858, Bruker Instruments, Inc.

[25] Bilzer C., Devolder T., Crozat P., Chappert C., Cardoso S., and Freitas P. P., (2007), “Vector network analyzer ferromagnetic resonance of thin films on coplanar waveguides: Comparison of different evaluation methods”, Journal of Applied Physics, 101, 074505.

[26] Neudecker I., Perzlmaier K., Hoffmann F., Woltersdorf G., Buess M., Weiss D., and Back C. H., (2006), “Modal spectrum of permalloy disks excited by in-plane magnetic fields”, Physical Review B, 73, 134426.

[27] He S., Panagopoulos C. , (2016), “A broadband ferromagnetic resonance dipper probe for magnetic damping measurements from 4.2 K to 300 K”, Review of Scientific Instruments, 87, 043110.

[28] Dubowik J., Głowiński H., (2010) “Broad-Band Ferromagnetic Resonance in Thin Magnetic Films and Nanostructures”, Current Topics in Biophysics, 33, 43-45.

[29] Lo C. K., (2013), “Ferromagnetic Resonance-Theory and Applications”, 978-953-51-1186-3, InTech.

[30] J. Z. Sun, (1999), “Current-driven magnetic switching in manganite trilayer junctions”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 202, 157.

[31] Wegrowe J.-E. et al., (1999), “Current-induced magnetization reversal in magnetic nanowires”, Europhysics Letters, 45, 5.

[32] Tsoi M. et al., (2000), “Generation and detection of phase-coherent current-driven magnons in magnetic multilayers”, Nature, 406, 46.

[33] Ralph D.C., Stiles M.D., (2008), “Spin transfer torques”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320, 1190–1216.

[34] Braganca P.M., Krivorotov I.N., Ozatay O., Garcia A.G.F., Emley N.C., Sankey J.C., Ralph D.C., Buhrman R.A., (2005), “Reducing the Critical Current for Short-Pulse Spin-Transfer Switching of Nanomagnets”, Applied Physics Letters, 87, 112507.

[35] Kimura T., (2012), “Spin Current”, ISBN 978-0-19-960038-0 311-336, Oxford Science Publications.

[36] Suzuki Y. and Kubota H., (2008), “Spin-torque diode and its application”, Journal of the Physical Society of Japan, 77, 031002.

[37] Foner S., (1959), “Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer”, Review of Scientific Instruments, 30, 548.

[38] Web 2, (2016), http://www.nanomagnetics.org/instrumentation_and_characterization/ Vibrating Sample Magnetometers_vsm.php, (Erişim Tarihi: 20/09/2016).

[39] Web 3, (2016), http://en.wikipedia.org/wiki/ Vibrating_sample_magnetometer, (Erişim Tarihi: 20/09/2016).

[40] Öztürk M., (2011), “Manyetik Malzemelerde Exchange Bias (kaydırma) Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.

[41] Web 4, (2016), http://iramis.cea.fr/en/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php? id_ast =498, (Erişim Tarihi: 20/09/2016).

[42] Kittel C.,Herring C., (1950), "Effect of Exchange Interaction on Ferromagnetic Microwave Resonance Absorption", Physical Review, 77, 725.

[43] Farit Z. and Fraitova D., (1988), "Spin-wave resonance in metals, Spin Waves and Magnetic Exitations Part 2", 0 444 87078 4 North-Holland Physics Publishing.

[44] Frait Z., D Fraitova., (1995), "Spin Waves and Magnetic Excitations", 2, North-Holland, Amsterdam.

[45] Fraitova D., (1983), "An Analytical Theory of FMR in Bulk Metals (Parallel Configuration) II. Penetration Depths", Physica Status Solidi, 120, 341.

[46] Aktaş B., Heinrich B., Woltersdorf G., and Urban Simon R., Tagirov L. R., Yıldız F., Özdoğan K., Özdemir M., Yalçin O., and Rameev B. Z., (2007), "Magnetic anisotropies in ultrathin iron films grown on the surface-reconstructed GaAs substrate", Journal of Applied Physics, 102, 013912.

[47] L. Neél, (1962), "Magnetisme—sur un nouveau mode de couplage entre les aimantations de deux couches minces ferromagnetiques", Comptes Rendus del' Académie des Sciences, 255, 1676.

[48] Varalda J., Milano J., A. de Oliveira J. A., Kakuno E. M., Mazzaro I., Mosca D. H., Steren L.B., Eddrief M., Marangolo M., Demaille D., Etgens V. H., (2006), "Thermal enhancement of the antiferromagnetic exchange coupling between Fe epilayers separated by a crystalline ZnSe spacer", Journal of Physics: Condensed Matter, 18, 9105–9118.

[49] Puszkarski H, Tomczak P. (2014) "Spin-Wave Resonance Model of Surface Pinning in Ferromagnetic Semiconductor(Ga,Mn)As Thin Films", Scientific Report, 28, 4, 6135.

[50] Soh W. T. , Peng B. , Chai G. and Ong C. K., (2014), "Note: Electrical detection and quantification of spin rectification effect enabled by shorted microstrip transmission line technique", Review of Scientific Instruments, 85, 026109.

[51] Staudacher T., Tsoi M., (2011), "Ferromagnetic Resonance Driven by Spin Transfer Torque, Thin Solid Films", 519, 8260-8262.

[52] Wang Q., Zhang W. , Peng B. , Zhang W., (2016), "Separation of inverse spin hall effect and spin rectification effect by inverting spin injection direction in NiFe/ta bilayers film", Solid State Communications, 245 , 15–19.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında İzmir'de doğdu. İlkokulu Osman Nuri Ersezgin İlkokulu'nda, orta okulu Bergama Cumhuriyet Lisesi'nde okuyup liseyi aynı okulun Yabancı Dil Ağırlıklı (Süper Lise) kısmında tamamladı. 2000 yılında Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği'ni kazandı. 2005 yılında mezun olduktan sonra bir yıl dershanede Fizik ve Fen Bilgisi Öğretmeni olarak çalıştı. 2006 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Memur ve daha sonra Bilgisayar İşletmeni kadrosuna atandı. 2007 yılında aynı Enstitü'de Yüksek Lisans'a başladı. Yüksek Lisans'ını da başarıyla tamamladıktan sonra 2012 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora'ya başladı. Ayrıca Figen Ay evli ve bir kız çocuğu annesidir.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Ay F., Rameev B. Z., Basaran A. C., Kupriyanova G. S., Goikhman A. Yu., Aktas B., (2016), “Magnetic Properties of Fe/Ni and Fe/Co multilayer thin films”, Applied Magnetic Resonance.