

ERZİNCAN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SENSÖR UYGULAMALARI İÇİN Au/Fe/GaAs YAPISININ MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Kübra Merve YILDIRIM

FİZİK ANABİLİM DALI

ERZİNCAN

2012

Her Hakkı Saklıdır

Doç. Dr. Recep POLAT danışmanlığında, Kübra Merve YILDIRIM tarafından hazırlanan bu çalışma 19.01.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Recep POLAT

İmza:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yunus AKALTUN

İmza:

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Ali YILDIRIM

İmza:

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Recep POLAT

Enstitü Müdürü

19.01.2012

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

Sensör Uygulamaları İçin Au/Fe/GaAs Yapısının Manyetik Özelliklerinin
İncelenmesi

Kübra Merve YILDIRIM

Erzincan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Recep POLAT

Bu çalışmada, FMR (Ferromanyetik Rezonans), VSM (Titreşimli Örnek Manyetometresi) teknikleri kullanılarak, mıknatıslanma ve manyetik anizotropi gibi manyetik özellikleri belirlemek için, manyetik anizotropi üzerinde demir katmanı örten altın katmanın etkisi araştırıldı. Çizgi genişliğinde demir katmanın üzerini örten altın katmanının etkisi 5–300 K sıcaklık aralığında spesifik kristalografik ekseninde araştırıldı. FMR ölçümleri IPG (düzlem içi geometri) ve OPG (düzlem dışı geometri) olmak üzere iki farklı geometride gerçekleştirildi. Düzlem dışı FMR ölçümleri spesifik kristalografik ekseninde gerçekleştirildi. Ayrıca numunelerin mıknatıslanma ölçümleri Quantum Design programıyla fiziksel ölçüm sisteminin (PPMS) seçeneği kullanılarak zor ve kolay ekseninde gerçekleştirildi. Zorlayıcı alan ve mıknatıslanma değerleri de oda sıcaklığında mıknatıslanma ölçümleriyle belirlendi.

2012, 64 sayfa

Anahtar Kelimeler: GaAs, VSM, FMR, PPMS, FMR, IPG, OPG

ABSTRACT
Master Thesis

The Investigation of Magnetic Properties Of Au/Fe/GaAs Structures For Sensor
Applications

Kübra Merve YILDIRIM

Erzincan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep POLAT

In this study, using FMR (Ferromagnetic Resonance) and VSM (Vibrating Sample Magnetometer) techniques, we investigated the effect of Au layer capped on Fe layer on magnetic anisotropy to determine magnetic properties such as magnetization, magnetic anisotropy etc. Particularly, the effect of Au layer capped on Fe layer on linewidth was investigated at some specific crystallographic axis in the temperature range of 5-300K. FMR measurements were carried out in two different geometries: IPG (in plane geometry) and OPG (out of plane geometry). Out of plane FMR measurements were carried out at some specific crystallographic axis. Also magnetization measurements of the samples were carried out at hard and easy axis by using VSM options of physical property measurement system (PPMS) by Quantum Design programme. The coercive field and magnetization values were determined from magnetization measurements at room temperature.

2012, 64 pages

Keywords: GaAs, VSM, FMR, PPMS, FMR, IPG, OPG

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşmasında yardımcı olan danışmanım Sayın Doç. Dr. Recep POLAT'a, araştırma laboratuvarında çalışmama imkân sağlayan Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Bekir AKTAŞ'a, Sayın Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR'e ve çok büyük yardım ve desteğini gördüğüm yine Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsün'de Arş. Gör. Ramazan TOPKAYA'ya çalışma sürecim boyunca ve daha sonrasında da yardımlarını esirgemediğinden ötürü teşekkürü borç bilirim.

Beni yetiştiren, hayatım boyunca desteğini esirgemeyen ve esirgemeyecek olan aileme minnettarım.

Son olarak destek olan hayat arkadaşşıma sonsuz teşekkürler.

Kübra Merve YILDIRIM

(Ocak, 2012)

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Manyetizma	3
2.2 Manyetizma Türleri	3
2.2.1. Diyamanyetizma	4
2.2.2. Paramanyetizma.....	5
2.2.3. Ferromanyetizma	6
2.2.4. Ferrimanyetizma	7
2.2.5. Antiferromanyetizma	8
2.2.6. Süperparamanyetizma.....	10
2.3.Manyetik Duygunluk	11
2.4. Manyetik Rezonans	11
2.4.1. İletkenlerde ferromanyetik rezonans	12
2.4.2. İnce filmlerde spin dalga rezonansı	13
2.5. Mıknatıslanma İçin Genel Hareket Denklemi	16
2.6. Domain Yapısı	18
2.7. Anizotropi	20
2.8. Curie Sıcaklığı ve Curie-Weiss Yasası.....	20
2.9. Manyetik Sensörler ve Uygulamaları	22
2.9.1. Manyetik alan detektörü manyetometre	24
2.9.2. Süperiletken manyetometreler	26
2.9.3.Büyük manyetorezistans GMR sensörler	27
2.10. Histerisis Eğrisi.....	28

3.MATERYAL VE YÖNTEM	32
3.1. Ultra İnce Au/Fe/GaAs Düşük Sıcaklık FMR Çalışması	32
3.2. Ferromanyetik Rezonans (FMR) Deney Tekniği	37
3.3. EPR Spektrometresinin Genel Yapısı	39
3.4. Elektron Spin Rezonans Deneyi Kaynak Sistemi	40
3.4.1. Dalga klavuzu ve kavite klavuz sistemi	43
3.4.2. ESR deneyinde mıknatıs sistemi	47
3.4.3. ESR deneyinde modülasyon ve dedeksiyon sistemi	48
3.5. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)	49
4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	64

SİMGELELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

B	Manyetik alan
Co	Kobalt
D	Spin sertlik sabiti
E	Enerji
f	Salınım frekansı
Fe	Demir
g	Yarılma faktörü
GaAs	Galyum arsenenid
h	Planck sabiti
H _{ax}	Anizotropi Alanı
H _{in}	Eksensel Anizotropi
H _r	Rezonans Alanı
ΔH _{pp}	Çizgi genişliği
J	Değiş-tokuş etkileşme sabiti
K	Kelvin sıcaklık
L _w	Çizgi Genişliği
M	Mıknatıslanma
M _s	Doyum mıknatıslanması
Ni	Nikel
Q	Kalite faktörü
T _c	Curie sıcaklığı
T _N	Neel sıcaklığı
v	Frekans
W _o	Lamour frekansı
χ	Manyetik duygunluk
δ	Yüzey kalınlığı
γ	Spektroskopik yarılma faktörü

Kısaltmalar

ESR	Elektron spin rezonans
EPR	Elektron paramagnetik rezonans
FMR	Ferrromanyetik rezonans
IPG	Inplane (düzlem içi)
OPG	Out of plane(düzlem dışı)
VSM	Vibrating sample magnetometer(titreşimli örnek manyetometresi)

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. FMR ın tarihi gelişimi	38

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Diyamanyetik malzemelerin bir dış manyetik alan etkisi altındaki ve sıcaklık ve manyetik uygunluğunun davranışları.....	4
Şekil 2.2. Paramanyetik malzemelerin bir dış manyetik alan etkisi altındaki ve sıcaklık değişimi karşısındaki manyetik davranışları.....	5
Şekil 2.3. Ferromanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi.....	6
Şekil 2.4. Ferrimanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi.....	7
Şekil 2.5. Antiferromanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi.....	8
Şekil 2.6. Antiferromanyetik sistemde manyetik uygunluğun sıcaklığa bağlılığı....	9
Şekil 2.7 Numunenin Antiferromanyetik davranışı.....	10
Şekil 2.8. L kalınlığında ferromanyetik ince bir filme göre seçilen eksen takımı...14	
Şekil 2.9. Ferromanyetik bir madde içinde birden çok domainin oluşturduğu spinlerin yönelimi ve manyetik alan altındaki davranışı.....	19
Şekil 2.10. Curie-Weiss yasası paramanyetik fazın varlığının ispatı.....	21
Şekil 2.11. Farklı manyetik sensörlerin hassasiyet değerlendirmesi.....	22
Şekil 2.12. Manyetik alan detektörü manyetometrelerin çalışma prensiplerinin gösterimi.....	24
Şekil 2.13. Farklı dış alanlar H için GMR spin valfde ferromanyetik katmanların mıknatıslanma oryantasyonu.....	28
Şekil 2.14. Histerisis eğrisi.....	29
Şekil 3.1. FMR çalışmalarında kullanılan örnek düzlemi ve örnek düzlemine dik geometrilerin gösterimi.....	33
Şekil 3.2. İki rezonans alanının açısal bağımlılığı.....	34
Şekil 3.3. (n)'nin 20, 80, 150, 200, 300 ML olarak Au katmanının kalınlığını gösterdiği yerde, Au(n)/Fe(16ML)/GaAs için sıcaklık fonksiyonu olarak FMR çizgi genişliği ΔH_{pp}	35
Şekil 3.4. (n)'nin 20, 80, 150, 200, 300 ML olarak Au katmanının kalınlığını gösterdiği yerde, Au(n)/Fe(16ML)/GaAs içinde Au katmanının kalınlığının fonksiyonu olarak sıcaklık fonksiyonu olarak FMR çizgi genişliği ΔH_{pp}	36

Şekil 3.5. ESR spektrometresinin blok diyagramı.....	41
Şekil 3.6. Çalıştığımız ESR labaratuvarından bir kare.....	41
Şekil 3.7. Ferromanyetik rezonans deneyinin temsili gösterimi.....	43
Şekil 3.8. Mikrodalganın dalga klavuzunda uyumlu hareketinin temsili gösterimi...44	
Şekil 3.9. Standart bir EPR kavitesinde manyetik ve elektrik alan çizimlerinin gösterimi.....	45
Şekil 3.10. TE ₁₀₂ modunda çalışan dikdörtgen mikrodalga kavitesinin temsili görünümü.....	46
Şekil 3.11. Bir kristalin eksenlerine göre ESR ölçümlerinin yapılışının temsili gösterimi.....	47
Şekil 3.12. VSM şematik gösterimi.....	51
Şekil 3.13. Çalıştığımız VSM labaratuvarı.....	52
Şekil 4.1. 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin IPG'de ve oda sıcaklığında alınan FMR spektrumlarından okunan rezonans alanlarının açığa bağımlılığı.....	53
Şekil 4.2. Oda sıcaklığında 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin IPG ve OPG'deki manyetik histeri eğrileri.....	54
Şekil 4.3. 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin OPG'de ve kolay ekseninde alınan FMR spektrumlarından okunan rezonans alanlarının açığa bağımlılığı.....	55
Şekil 4.4. 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin OPG'de ve kolay ekseninde alınan FMR spektrumlarından okunan çizgi genişliklerinin açığa bağımlılığı.....	56
Şekil 4.5. 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin OPG'de ve zor ekseninde alınan FMR spektrumlarından okunan rezonans alanlarının açığa bağımlılığı.....	57

1.GİRİŞ

Net bir spine sahip olan elektron ve çekirdek gibi yüklü parçacıklar makroskopik bir B (manyetik alanın) etkisi altında kalınca, manyetik moment ile alanın etkileşmesi nedeniyle dejenere olan enerji düzeyi ikili durumlara yarılr. Dolayısıyla atomun durumları arasındaki geçişler, $h\nu$ enerjisine sahip yüksek frekanslı bir fotonu soğurarak alt enerji durumundan üst enerji durumuna veya yayarak üst enerji durumundan alt enerji durumuna geçerler. Bu olay *Manyetik Rezonans* olarak adlandırılır (Apaydın 1991).

Yeniden düzenlenmiş GaAs parçaları yüzeyinde oluşmuş epitaksiyal, kristal demir içeren demir filmlerinin manyetik anizotropileri çalışıldı. Ferromanyetik rezonans teknik, 5–300 K sıcaklık aralığında çalışılan filmlerin manyetik parametrelerini belirlemek için kapsamlı bir şekilde kullanıldı. Gözlemlenen üç pikli FMR, deneysel verilerin bilgisayar simülasyonunu kullanarak manyetik anizotropilerin çıkarımına imkân sağladı. Ölçülen numuneler, Au/Fe/GaAs'te dik ve düzlem içi tek eksenli anizotropiler gösterdi. Yeniden düzenlenmiş GaAs parçaları yüzeyiyle uyarılmış düzlem içi tek eksenli anizotropi için en şartıcı davranış bulunur. Çift ferromanyetik katman yapısı gibi spin-valf manyetik anizotropilerin hazırlanması için, çok katmanlı yapılarda çeşitli maddelerin kombinasyonu ve GaAs parçalarının yeniden düzenlemesinin kullanılabilceği gösterildi.

Son yıllarda manyetik kayıt ve depolama teknolojisinde çığır açan gelişmeler olmakla birlikte, birim alana depolanan bilginin artmasına ve bilginin daha derinlere depolanmasına olanak sağlayan manyetik yapılara olan ilgi giderek artmaktadır. Birim alandan okunacak bilgi ise doğrudan manyeto direnç etkisi gösteren malzemelerin hassaslığı ile doğru orantılı olduğu bulunmuştur (Tapan 2004).

Bundan dolayı da manyeto direnç etkisi gösteren malzemelerde, ne kadar büyük manyeto direnci etkisi gözlemlenirse, bu hâlihazırda kullanılan manyetik okuma kafalarının bilgiyi manyetik kayıt ortamından daha hızlı sürede okunmasına ve birim alandan okunan bilginin arttırılmasına fırsat vermektedir (Demiray 2009).

Biz bu çalışmada, GaAs alttaş üzerinde ultra demir içeren filmlerin üzerine tavllanmış, 20ML, 80ML, 150ML, 200ML ve 300ML kalınlıklarındaki Au tabakasının manyetik özelliklerini inceledik. Bu numunelerin içerisinde, en iyi dataları elde edebildiğimiz 80Au/Fe/GaAs numunesini ele aldık.

Elde ettiğimiz sonuçlarla da bu numunelerin spin transistör verimliliğine katkısı olup olmadığı incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Manyetizma

Manyetizma, mıknatısları ve manyetik alanları tanımlamak için kullanılan bir terim olup mıknatıslanmış maddelere ilişkin özelliklerin tümünü ve mıknatısların özelliklerini, inceleyen fiziğin bir dalıdır. Manyetizmanın temelinde elektronun yörüngesel ve kendi eksenini etrafındaki hareketleri ve diğer komşu elektronlar ile etkileşimleri yatar.

Atomların manyetik dipol momenti iki kısımdan oluşur. Bunlar sırası ile elektronun çekirdek etrafındaki yörünge dipol momenti (\vec{l}) diğeri ise elektronun spin hareketinden kaynaklanan spin manyetik dipol momentidir (\vec{s}). Atomların son yörüngeleri tamamen dolu olan atomların, yörüngelerinde toplam spin momentini ve yörünge momentleri sıfır olup paramanyetik veya ferromanyetik özellik sergilemezlerken, elektronların yörüngesel hareketlerinden dolayı diyamanyetik bir özellik gösterirler. Bu nedenle diyamanyetizma bütün maddelerin ortak özelliği olup uygulanan dış bir manyetik alana karşı oluşur (Robert 2004).

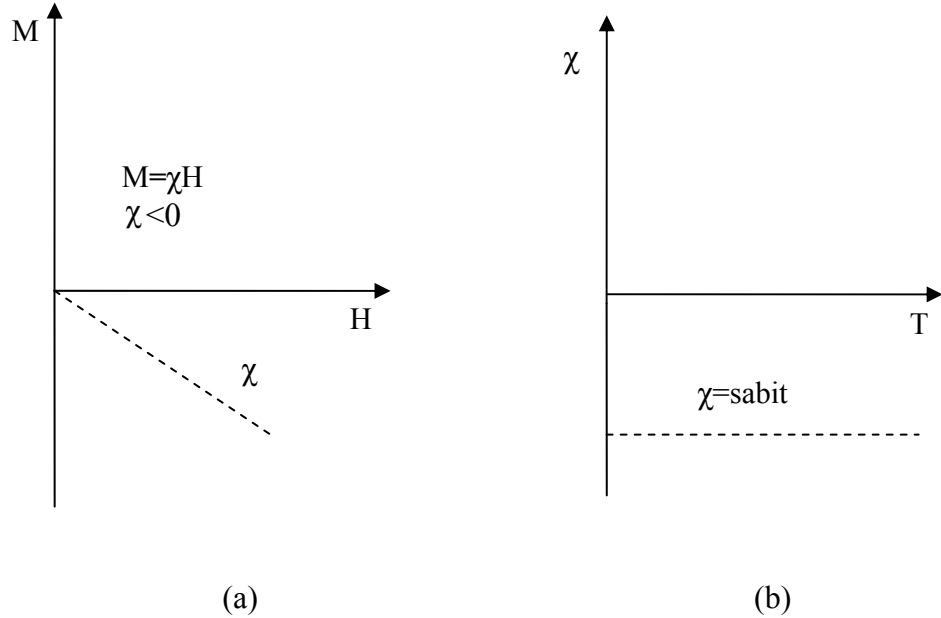
2.2 Manyetizma Türleri

Manyetik malzemeleri sınıflandırmanın en iyi yolu manyetik alanla olan etkileşimlerini incelemektir. Bütün maddeler manyetik özellik sergilerler fakat bazı maddeler diğerlerinden daha fazla özelliğe sahiptirler. Bunun en önemli sebebi bazı malzemelerde atomik manyetik momentler arasında hiçbir etkileşim olmazken bazılarında ise bu etkileşimin çok şiddetli olmasıdır. Manyetik özellik sergileyen maddeler manyetik davranışlarına göre genel olarak altı sınıfa ayrılırlar.

2.2.1. Diyamanyetizma

Her ne kadar diyamanyetizma tüm maddelerin ortak özelliği olup manyetik alan altında son yörünge elektronlarının ortak bir davranış sergileyememelerinden kaynaklanır. Diyamanyetik maddeler net bir manyetik momentine sahip olmayan atomlardan oluşur (tüm yörünge kabukları dolu ve çiftlenmemiş hiçbir elektronun olmadığı durum). Ancak manyetik alana maruz kaldıklarında negatif bir mıknatıslanmaya sahiptirler ve bunun sonucu olarak manyetik duygunlukları negatiftir (Şekil 2.1.a).

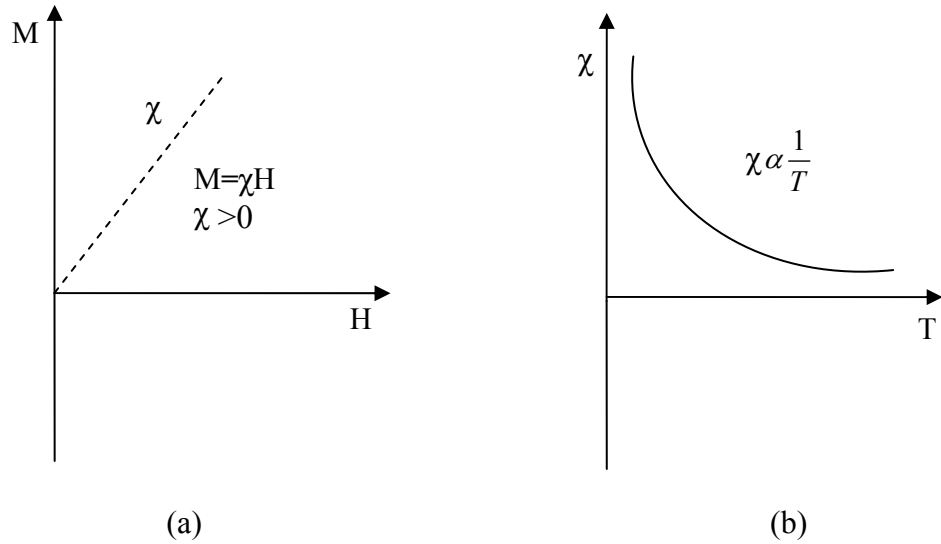
Diyamanyetik bir malzeme bir çubuk mıknatıs yakınına konulduğunda mıknatıs tarafından itilecektir. Bu etki Michael Faraday tarafından 1846'da malzemelerin çoğundan daha güçlü diyamanyetik özellik gösteren bizmut parçasını kullanarak bulunmuştur. Ayrıca diyamanyetik malzemelerin karakteristik özellikleri, atomların içyapısıyla ilgili olduğundan sıcaklıktan da bağımsız olduğu bulunmuştur (Chikazumi1994).



Şekil 2.1. Diyamanyetik malzemelerin bir dış manyetik alan etkisi altındaki(a) ve sıcaklık değişimi karşısındaki manyetik duygunluk davranışları(b)

2.2.2. Paramanyetizma

Malzeme içerisindeki atom veya iyonların son yörüngelerinde çiftlenmemiş elektronlarından dolayı net bir manyetik momente sahiptirler. En önemli çiftlenmemiş elektrona sahip atomlardan birisi demir atomudur. Birbirlerinden yeterince uzak net manyetik momente sahip iyonlara sahip malzemelerin sergilediği bu manyetizma tipinde iyonlar birbirleri ile herhangi manyetik etkileşme (exchange) sergilemezler. Manyetik alan uygulandığında da alanın yönünde bu bireysel manyetik momentlerin yönlendiği gözlenir. Net pozitif mıknatıslanmaya ve duyunluğa sahiptir.



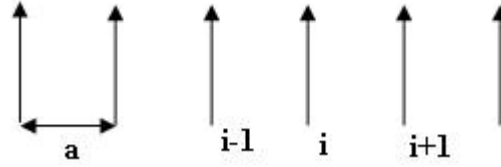
Şekil 2.2. Paramanyetik malzemelerin bir dış manyetik alan etkisi altındaki (a) ve sıcaklık değişimi karşısındaki (b) manyetik davranışları.

Alanın yokluğunda şekil 2.2.b'de manyetik momentler sıcaklığa bağlı olarak yönelim değişimlerine uğrayacaktır. Bu sonuç sıcaklığa bağlı Curie duyunluk yasası olarak bilinir. Oda sıcaklığında ve düşük alanlarda paramanyetik duyunluk küçüktür (şekil 2.2.b). Sıcaklık 100K altına düşmediği sürece çok yüksek paramanyetik duyunluk uygulanan alandan bağımsızdır.

Bu şartlar altında paramanyetik duyunluk toplam demir atomu sayısına bağlıdır. Çoğu demir katkılı mineral oda sıcaklığında paramanyetik özellik göstermektedir.

2.2.3. Ferromanyetizma

Kuantum mekaniğinden bilindiği gibi atomun bir özelliği için herhangi bir yön seçilmişse geriye kalan tüm özellikleride aynı eksen boyunca davranış gösterir (örnek; en dış kabuktaki elektronların davranışı). Katılarda komşu atomların en dış yörüngelerinde bulunan çiftlenmemiş elektronların aralarındaki değiş-tokuş etkileşmesi nedeniyle spinlerin aynı yönde düzgün yönelmesi aşağıdaki şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Ferromanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi

Ferromanyetik malzemelerdeki spinler arası elektriksel etkiden meydana gelen etkileşmeye değiş-tokuş (exchange) etkileşmesi adı verilir.

Heisenberg tarafından özdeş spinlerden oluşan ferromanyetik bir sistem için önerilen değiş-tokuş enerjisi

$$E_{ex} = -2J_{ex} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_{i+1} \quad (2.1)$$

biçiminde gösterilir. Burada J_{ex} değiş tokuş etkileşme sabitidir.

Ferromanyetik malzemelerde yakın komşu atomların şiddetli etkileşimleri (exchange) birbirlerini paralel hale getirirler. Antiferromanyetik malzemelerde ise en yakın komşu atomun manyetik momenti diğerine zıt yöndedir.

Bazı kritik sıcaklıkların altında ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemelerin paramanyetik malzemelere dönüştükleri ve manyetik duygunluklarının lineer olarak Curie yasasına uyduğu gözlemlenmiştir. Bu karakteristik sıcaklık ferromanyetik geçiş sıcaklığı veya basitçe Curie sıcaklığı olarak bilinir.

Curie sıcaklığının üzerinde manyetik momentler net manyetik momenti sıfır yapacak şekilde yönelmişlerdir. Curie sıcaklığı üzerindeki bölgede ise malzeme paramanyetikdir. Yüksek sıcaklıklarda ferromanyetik düzen bozulur ve malzeme paramanyetik davranış sergiler, manyetik alınganlık Curie-Weiss yasası ile biçiminde verilir.

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \quad (2.2)$$

Burada T_C ; kritik sıcaklık olup bu sıcaklığın üstünde ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçiş olur. Mesala demir için bu sıcaklık 1000K civarındadır.

2.2.4. Ferrimanyetizma

Kristal yapılarının bir sonucu olarak iyonik bileşiklerde, örneğin oksitlerde, manyetik yönelimin daha karmaşık bir formu ortaya çıkabilir. Kristal içerisindeki iyonların manyetik momentleri antiparalel yöneldiğinden birbirlerinin etkilerini tam olarak yok etmezler ve net manyetik momente sahiptirler. Ferrimanyetik-oksitli yapıda manyetik spinlerin temsili yönelimi şekil 2.4 te gösterilmiştir.



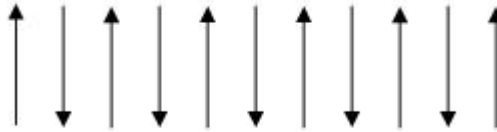
Şekil 2.4. Ferrimanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi

Ferrimanyetik malzelerde manyetik yapı aralarında oksijen atomu olan A ve B gibi iki manyetik alt örgüden oluşur. Değiş tokuş etkileşimleri arasındaki bu oksijen atomu tarafından gerçekleştirilir. Bu olay doğrusal olmayan etkileşime ya da süper değiş tokuş etkileşimi olarak isimlendirilir. En güçlü süper değiş tokuş etkileşmesi spinleri antiparalel olarak yönelmiş olan A ve B alt örgü atomları arasında meydana gelir. Ferrimanyetlerde A ve B alt örgüsüne ait manyetik momentler net bir manyetik momente sahip değildirler.

Ferrimanyetizma bu yönüyle ferromanyetizmaya benzemektedir. Ferrimanyetik malzemeler ferromanyetik malzemelerin sahip olduğu Curie sıcaklığı, kendiliğinden mıknatıslanma, histerizis eğrisi ve kalıcı mıknatıslanma özelliklerinin tümüne sahiptirler. Ancak ferro ve ferrimanyetler çok farklı manyetik yönelimlere sahiptirler. En iyi bilinen ferrimanyet manganit 1940'lı yıllara Neél ferrimanyetlerle ilgili teorik altyapıyı oluşturana kadar ferromanyet olarak bilinmekteydi.

2.2.5. Antiferromanyetizma

Antiferromanyetik malzemeler, ferromanyetizmada olduğu gibi kritik bir sıcaklığın altında manyetik momentlerin kendiliğinden yönelimine sahiptir. Ancak, bu yönelim antiferromanyetlerdeki en yakın komşu atomdaki spinlerin birbirlerine antiparalel yönelimleri şeklindedir.



Şekil 2.5. Antiferromanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi

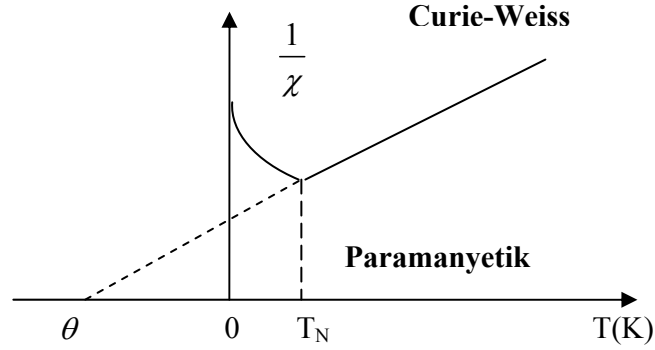
Gerçekte antiferromanyetik kristal, iç içe geçmiş A ve B gibi kendiliğinden mıknatıslanmaya sahip iki alt örgü gibi göz önüne alınabilir.

Antiferromanyetik malzemelerde spinlerin yönelimleri sonucu manyetik momentler birbirlerini yok eder ve net manyetik moment sıfır olur. Antiferromanyetik malzemeler Neél sıcaklığı T_N üzerinde paramanyetikler ve lineer olarak,

$$T = f \frac{1}{\chi}$$

yasasına uyarlar.

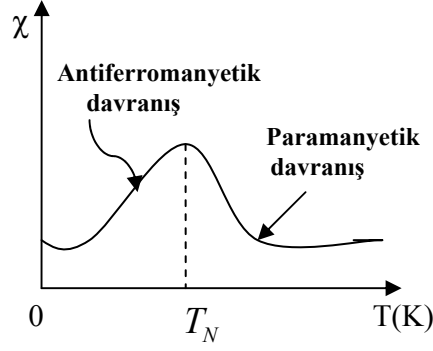
(2.4)



Şekil 2.6. Antiferromanyetik sistemde manyetik duygunluğun sıcaklığa bağlılığı

Antiferromanyetizma T_N sıcaklığına gelindiğinde manyetik duygunluğa karşı sıcaklığın keskin bir şekilde bir pik yapmasıyla gösterilebilir. Bu sıcaklıkta duygunluk en yüksek değerdedir. Eğer en yakın komşu atomdaki spinler az bir miktarda eğilme yaparsa çok küçük bir mıknastılanma elde edilebilir. Bu eğilmiş manyetizasyon (canted) olarak isimlendirilir.

Eğilmiş antiferromanyetler ferro ve ferrimanyetlerde gözlenen bütün özellikleri sergilerler (histeresis, artık mıknastılanma, Curie sıcaklığı).



Şekil 2.7. Numunenin antiferromanyetik davranışı

2.2.6. Süperparamanyetizma

Süperparamanyetizma manyetizma çeşitlerinden birisidir. Süperparamanyetik bir malzeme küçük ferromanyetik nanokristallerden oluşmaktadır. Bu nano boyutlu kristaller çok küçük olduklarından (1-10 nm) ısısal bir değişim olduğunda rastgele yönelime geçerler. Sonuçta, malzemenin toplam mıknatıslanması dışarıdan manyetik alan uygulanmadığı sürece yoktur.

Normalde, ferromanyetik malzemelerdeki etkileşimler en yakın komşu atomdaki momentlerin yönelimine neden olur ve bunun sonucu olarak çok büyük bir iç manyetik alan (*Biç*) oluşur. Bu ferromanyetik ve paramanyetik malzemeleri birbirinden ayıran temel unsurdur. Curie sıcaklığının üzerinde (veya antiferromanyetik malzemeler için Neél sıcaklığı), ısı enerjisi bu manyetik etkileşimlerin üzerinden gelebilecek kadar yeterlidir. Malzeme içerisinde artık manyetik bir düzen kalmadığı için, iç manyetik alan (*Biç*) artık yok olacaktır ve malzeme paramanyetik davranış sergilemeye başlayacaktır. Eğer malzeme homojen olmayan bir kristal yapısına sahipse, hem ferromanyetik hemde paramanyetik kümeciklerin aynı sıcaklıkta varlığı süperparamanyetik durum olarak açıklanmaktadır (Demiray 2009).

2.3. Manyetik Duygunluk

Manyetik duygunluk uygulanan manyetik alana karşılık malzemenin birim alanındaki mıknatıslanmasıdır. Uygulanan manyetik alana karşı verilen tepki olarak da isimlendirilir. Eğer M 'ye mıknatıslanma, H 'ye de uygulanan manyetik alan dersek, manyetik duygunluk,

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir.

χ Manyetik duygunluk olup, mıknatıslanmanın manyetik alana paralel olmadığı durumda χ herhangi bir tensördür. Paralel olduğu durumda ise basit bir sayı ile ifade edilebilir. Kristal yapıya sahip bir malzemede χ kristal yapıdaki anizotropi etkilerinden dolayı manyetik alanın yönüne bağlıdır.

2.4. Manyetik Rezonans

Ferromanyetik bir örnek statik bir manyetik alan içerisine yerleştirildiğinde, manyetik momentler malzemeye özgün karakteristik bir W_0 (Larmour Frekansı) frekansı ile presesyon hareketi yaparak denge durumuna geçerler. Eğer statik alana dik yönde W frekanslı mikrodalga alanı uygulanırsa, statik alanın artmasıyla W_0 öztitreşim frekansı ile aynı değeri aldığı anda bir güç soğurması olur. Bu güç her iki frekans değerinin birbirlerine yaklaşması ile artar ve frekanslar eşitlendiğinde maksimum olur. Bu olaya *manyetik rezonans* denir. Bu soğurulan güç malzemenin sadece iç manyetik yapısına bağlı olmayıp, aynı zamanda dış manyetik alanın büyüklüğüne ve yönelimine de bağlıdır. Spinlerin presesyon frekansı W_0 ile H arasında malzemenin yapısıyla da ilişkili olan bir bağıntı vardır.

Bu bağıntı kullanılarak malzemenin manyetik yapısını belirleyen değiş-tokuş (exchange) etkileşme parametresi, hacimsel (bulk) anizotropi enerji yoğunluğu, yüzey anizotropi enerji yoğunluğu, spektroskopik yarıлма faktörü, durulma zamanları ve benzeri parametreler elde edilebilir. Genelde sistem sonsuz dar bir manyetik alan bölgesinde değil de sonlu bir alan bölgesinde rezonansa gelir (Yilgin 1999).

2.4.1. İletkenlerde ferromanyetik rezonans

Ferromanyetik malzemelerde Ferromanyetik Rezonans (FMR) ölçümleri için Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi ve bunun için tasarlanmış ESR cihazları kullanılmaktadır.

ESR spektroskopisi elektromanyetik radyasyon ile malzeme içindeki elektronların manyetik momentlerinin ilişkisini inceleme temeline dayanır.

Ancak ESR tekniğinde atom içerisindeki elektronların manyetik momentleri ile etkileşme dikkate alınırken çekirdek etkileşmeleri incelenmez. Çekirdek etkileşmeleri ayrı bir rezonans tekniği olan Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) ile incelenir.

Elektromanyetik radyasyon klasik olarak hareket yönlerine dik elektriksel ve manyetik alan çifti olarak düşünülür. Elektromanyetik radyasyonu, foton adını verdiğimiz kütlesi ve net elektrik yükü olmayan elektromanyetik alana ve spin açısız momentuma sahip bir parçacık kaynağı olarak değerlendirmemiz gerekir.

Manyetik rezonans dışındaki çoğu spektroskopik çalışmada radyasyonun elektriksel bileşeni önemlidir. Manyetik rezonans çalışmalarında ise radyasyonun manyetik bileşeni ile malzemenin manyetik dipolleri etkileşimde bulunurlar. Bu deneylerde statik bir H alanı uygulanarak, malzemenin manyetik momentleri yönlendirilir ve enerji seviyelerinin arası açılır.

Açılan bu seviyeler arasında bir geçiş meydana gelebilmesi için manyetik rezonans spektroskopisinde örnek üzerine gönderdiğimiz mikrodalga radyasyonunun manyetik kısmı, örneğin manyetik momenti ile etkileşime girebilmelidir. Aynı zamanda gönderilen fotonun enerjisi, açılan enerji seviyeleri arasındaki farka eşit olmalıdır.

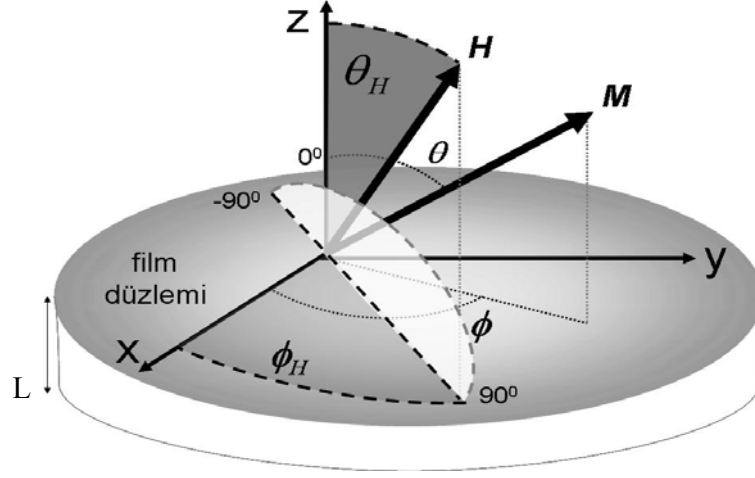
Ferromanyetik rezonans (FMR), ferromanyetik malzemelerin manyetik özelliklerini araştırmak için güçlü ve hasas bir yöntemdir. Diğer rezonans türlerinden farklı olarak FMR, değiş-tokuş etkileşmesi ile etkileşen eşleşmemiş elektironların manyetik momentlerinden kaynaklanan mıknatıslanmayı incelemektedir.

2.4.2. İnce filmlerde spin dalga rezonansı

Ferromanyetik örneklerde ve aynı zamanda perovskite yapıya sahip mangan oksitlerde değiş tokuş (exchange) etkileşmesinin çok kuvvetli olduğu bilinmektedir. Komşu spinlerin birbirlerine göre olan yönelimindeki küçük değişimler için bile dışardan uygulanan alanla oluşan manyetik etkileşmeler kadar büyük enerjiye ihtiyaç duyulur. İnce filmler için serbest enerji ifadesi,

$$E = -MH(\sin \theta \sin \theta_H \cos(\phi - \phi_H) + \cos \theta \cos \theta_H) - 2\pi M^2 \sin^2 \theta \quad (2.6)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Burada (θ, θ_H) sırasıyla mıknatıslanmanın (M) ve manyetik alanın (H) z-ekseni ile yaptıkları açıları, (ϕ, ϕ_H) ise sırasıyla bu vektörlerin film düzlemi üzerindeki izdüşümleri ile yaptıkları açıları göstermektedir.



Şekil 2.8. L kalınlığında ferromanyetik ince bir filme göre seçilen eksen takımı.

$$E_x = \frac{\partial E}{\partial \phi} = 0 \quad E_y = \frac{\partial E}{\partial \theta} = 0 \quad (2.7)$$

Spin dalgaları tümüyle klasik bir modelle de ele alınabilir. Bunun için küresel koordinatlarda enerjinin gradyenti;

$$\nabla E = -\left(\frac{\partial E}{\partial \theta}\right)\hat{\theta} + (1/\sin \theta)\left(\frac{\partial E}{\partial \phi}\right)\hat{\phi} \quad (2.8)$$

Şeklinde yazılarak işe başlanabilir. Etkin manyetik alan değiş tokuş (exchange) etkileşmesi dışındaki tüm manyetik etkileşmeleri gösteren enerjinin küresel koordinatlardaki gradyenti kullanılarak türetilir. Enerjinin gradyentini kullanarak Landau-Lifshitz dinamik mıknatıslanma denklemini Bloch-Blombergen tipi sönüm terimiyle birlikte ifadesi 2.9 eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\mathbf{M}}{dt} = \nabla E + \mathbf{M} \times \frac{2A}{M_s^2} \nabla^2 \mathbf{M} - \frac{\dot{M}_{\theta, \phi}}{\gamma T_2} - \frac{\mathbf{M}_z - \mathbf{M}}{\gamma T_1} \quad (2.9)$$

Burada γ , Jiromanyetik oran (gyromagnetic ratio), T_2 spin-spin durulma zamanı, T_1 spin-örgü durulma zamanını gösteren ifadelerdir. Spin değiş tokuş parametresinin (D), değiş tokuş sertlik parametresi (A) ile olan ilişkisi $D = 2A/M_s$ denklemiyle ifade edilebilir. M_s ince filmler için doyum mıknatıslanmasını temsil etmektedir.

Ferromanyetik ince filmlerin rezonans alanlarını tespit etmek için serbest enerji denklemi ve dinamik mıknatıslanma alanları için kullanılan Landau-Lifshitz eşitliğinin Bloch-Bloembergen tipi sönüm terimleriyle birlikte yazılan denklemi kullanılırsa, rezonans alanları için

$$\left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^2 = \left[\frac{\left(H \cos(\theta - \theta_H) + 4\pi M \cos 2\theta + Dk_n^2\right)}{\left(H \cos(\theta - \theta_H) + 4\pi M \cos^2 \theta + Dk_n^2\right)} \right] + \left(\frac{1}{\gamma T_2}\right)^2 \quad (2.10)$$

bağıntısı elde edilir, $\omega_0 = 2\pi\nu$ rezonans frekansı, $4\pi M$ ise ince filmin toplam mıknatıslanma değerleridir.

OPG (Out of Plane) geometrideki deneysel spin dalga spektrumları benzeştirildiğinde (fit edildiğinde) etkin mıknatıslanma değerleri, rezonans alanları ve g spektroskopik yarıma faktörü elde edilebilir. Eğer filmin yüzeyindeki spinlerin tamamının uyarıldığı varsayılırsa,

$$k = \frac{\pi n}{d} \quad (2.11)$$

formülü ile k yüzeyde oluşan spin dalga modları temsil edilebilir. d , ince filmin kalınlığı, n dalga sayısına karşılık gelen bir sabittir.

Homojen FMR $n = 0$ a karşılık gelir, buna karşın Spin Dalga Rezonansta (SDR) $n \neq 0$ olur.

OPG geometri için ($\theta_H = \theta = 0$) (2.10) denklemini yeniden yazdığımızda,

$$H_n - H_0 = H_a - \frac{\pi^2 n^2}{\gamma d^2} D \quad (2.12)$$

şekline dönüşür. Burada $H_0 = \frac{\omega}{\gamma}$ rezonans alanını, ω mikrodalga frekansını, D spin sertli sabitini göstermektedir. D 'yi belirlemek için örnek tarafından absorblanan mikrodalgaın manyetik alana bağıllığının ardaşık olarak değiştii görülecektir. Rezonans alanlarının analiz edilmesi ile 2.12 eşitliğinden n 'inci mod sayısı hesaplanır. n 'inci mod için rezonans frekansının n^2 ile arttığı yani n büyüdükçe rezonans alanının düşük alan değerine doğru kaydığı görülür. Ayrıca film kalınlığı d arttırılırsa, modların rezonans alan değerleri arasındaki fark azalır. H_n 'nin n^2 'ye olan lineer bağımlılığından yola çıkarak D hesaplanır.

Filmin kalınlığını belirleyen sınır şartlarıda, 2.13 şeklinde ifade edilebilir;

$$\delta d \pi \left[\frac{D}{\gamma(H_0 + H_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Burada δ yüzey kalınlığıdır.

Aslında etkin bir spin dalga uyarılması için filmin kalınlığının (d) yüzey kalınlığından (δ) çok çok küçük olması gerekmektedir.

2.5. Mıknatıslanma İçin Genel Hareket Denklemi

Ferromanyetik malzemelerde toplam (makroskopik) mıknatıslanma olan M , birim hacimdeki tüm manyetik momentlerin toplamından oluşur. Bu ifade 2.14 eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$M = \sum_i \mu_i \quad (2.14)$$

Manyetik momentlerin özdeş oldukları durumda spektroskopik yarıma faktörü olan γ tüm spinler için aynı olacaktır. Dolayısıyla H dış manyetik alanı içerisindeki M miknatıslanma vektörüne etki eden tork ile verilir (Soohoo1960).

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma [\vec{M}, \vec{H}] \quad (2.15)$$

Denklemi ile verilir. Burada sadece dış manyetik alan dikkate alınmıştır. Ancak gerçek sistemlerde spinler arası (spin-spin) manyetik etkileşmeler ile spin-örgü etkileşmeleri gibi daha birçok yerel etkileşme söz konusudur ve bu etkileşmeler de 2.15 denklemin sağına eklenmelidir. Bu terimler çeşitli biçimlerde verilen ve sönümü ifade eden terimlerdir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanlar;

- i) Landau-Lifshthitz tipi sönüm terimi (Heinrich 1985)

$$-\frac{\lambda}{M_0} M_x M_x H_{etkin} \quad (2.16)$$

- i) Gilbert tipi sönüm terimi (Frait 1985)

$$-\frac{\alpha}{M_0} M_x \frac{dM}{dt} \quad (2.17)$$

- ii) Bloch-Bloembergen tipi sönüm terimi (Bloembergen 1950)

$$-\frac{M_{x,y}}{T_2} - \frac{M_z - M_0}{T_1} \quad (2.18)$$

biçimindedir.

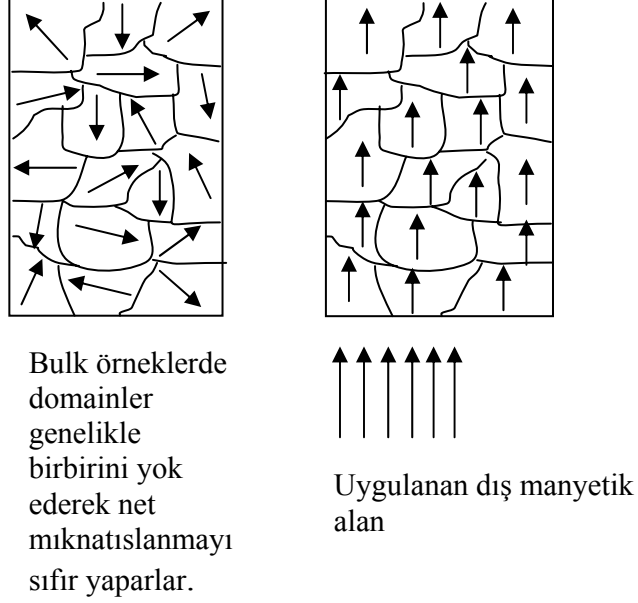
Burada λ , α , T_1 ve T_2 sönüm parametrelerine ve durulma zamanını karakterize ederler ve dolayısıyla rezonans eğrisinin çizgi genişliği üzerinde etkilidirler. Her üç sönüm terimi de soğurma enerjisinde yaklaşık olarak aynı etkiyi gösterirler. Dolayısıyla amaca göre herhangi birisi kullanılabilir.

Spin-örgü durulma zamanı T_1 (boyuna durulma zamanı) uyarılmış düzeydeki elektronların tekrar taban enerji seviyesine geçmeleri için geçen süredir. T_2 ise spin-spin etkileşmesi olup enine durulma zamanına karşılık gelmektedir. Ferromanyetik örnekler için spin-spin durulma zamanı magnon-magnon etkileşmelerini içerir. Ferromanyetik örneklerde spinler birbirlerine çok yakın oldukları için manyetik karakterli spin-spin etkileşmesi oldukça şiddetlidir. İlk bakışta bu etkinin eğri genişliğinde kendisini şiddetli bir biçimde göstermesi beklenir.

Hâlbuki ferromanyetik örneklerde soğurma eğrisi oldukça dardır. Örneğin Yittrium Iron Garnet (YIG) tek kristali için çizgi genişliği 1 Gauss civarındadır (Wigen 1998). Bunun nedeni, spinler arasındaki değiş-tokuş etkileşmesidir. Bu etkileşme elektriksel karakterli olup manyetik etkileşmeler ile kıyaslanamayacak kadar şiddetli olduğundan, bu etki çizgilerde bir daralmaya neden olarak spin-spin etkileşmelerinden kaynaklanan genişlemeyi bastırır. Bu olaya değiş-tokuş (exchange narrowing) denir.

2.6. Domain Yapısı

Kendiliğinden mıknatıslanma Weiss tarafından önerilen örnek içerisinde oluşan manyetik bölgelerle (domainlerle) açıklanmaktadır. Malzeme tüm hacmi üzerinden toplam enerjiyi minimum yapacak biçimde bölgelere ayırır.



Şekil 2.9. Ferromanyetik bir madde içinde birden çok domainin oluşturduğu spinlerin yönelimi ve manyetik alan altındaki davranışı.

Her bir domain M_s doyum mıknatıslanmasına kadar kendiliğinden mıknatıslanır. Bu durumda bölgelerin içerisindeki spinler birbirlerine paralel olacak şekilde yönelirler. Eğer bölgelerden oluşmuş ferromanyetik madde üzerine bir dış manyetik alan uygulanırsa, spinler dış alana paralel olma eğilimindedirler. Böylece alan yönündeki bölgeler diğer bölgelerin komşu spinlerini kendi doğrultusunda yöneltecek, enerjiyi minimumda tutacak biçimde büyür. Buna *domain duvar hareketi* denir.

Paramanyetik malzemelerin aksine bu malzemelerdeki atomların manyetik momentlerinin etkileşimi çok şiddetlidir. Bu etkileşimler atomik manyetik momentlerin antiparalel ve paralel yönelimlerinin sonucu olan elektriksel etkileşimlerden kaynaklanır. Bu değiş tokuş etkileşimleri atomik boyutta oldukça kuvvetlidir. Manyetik alanla karşılaştırıldığında 1000 teslalık alanın şiddetine eşit, ya da yaklaşık olarak dünyanın manyetik alanından 100 milyon kez daha kuvvetlidir (Ramadan 2004).

Değiş tokuş etkileşmesi iki elektronun birbirlerine göre göreceli yönelimlerine bağlı olarak değişen, kuantum mekaniksel bir olaydır. Fe, Ni ve Co ve bunların birçok bileşiği tipik ferromanyetik malzemelerdir. Ferromanyetik malzemeleri diğer malzemelerden ayıran iki temel fark, kendiliğinden mıknatıslanma özelliklerinin ve manyetik faz geçiş sıcaklığına sahip olmalarıdır (Demiray 2009).

2.7. Anizotropi

Manyetik malzemelerde mıknatıslanma belirli doğrultularda kalma eğilimi gösterir. Bu yön tercihinin sebebi, malzemenin toplam serbest enerjisinin mıknatıslanmanın malzeme içindeki yönelimine bağlı olmasıdır. Bu etkiye *manyetik anizotropi* denir. Manyetik olarak izotropik bir malzeme, manyetik alanın uygulanmadığı manyetik momentin yöneleceği bir doğrultuda olmayacaktır. Buna karşın manyetik alan uygulandığında ise manyetik momentler malzemenin kolay eksen (easy axis) doğrultusunda yönelecektir.

Farklı türde manyetik anizotropilerden bahsedebiliriz. Bunlardan birincisi manyetik malzemenin şeklinden kaynaklanan anizotropidir. Diğer anizotropi çeşitleri ise demanyetizasyon, değiş tokuş ve kristal anizotropidir (Demiray 2009).

2.8. Curie Sıcaklığı ve Curie-Weiss Yasası

Curie sıcaklığı kendiliğinden mıknatıslanma özelliğinin dış manyetik alan yokluğunda görüldüğü sıcaklıktır. Bu sıcaklığın üzerinde ferromanyetik bir madde paramanyetik olacaktır.

Curie-Weiss yasası ;

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.19)$$

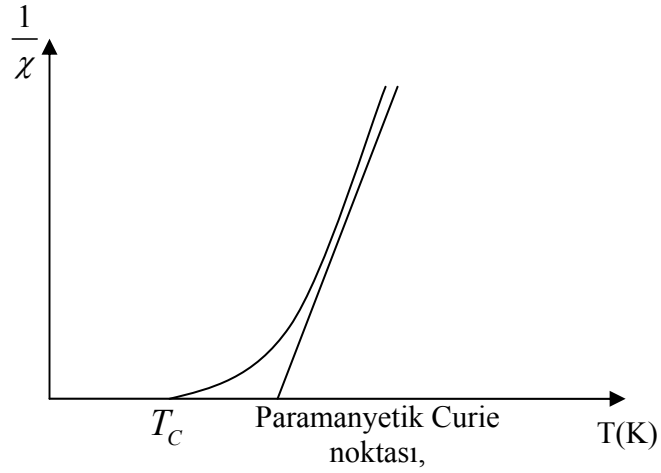
şeklinde ifade edilebilir.

Buradan χ aynı zamanda aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \quad (2.20)$$

χ , duygunluk, C her malzeme için değişen bir sabit, T sıcaklık, T_C Curie sıcaklığını göstermektedir. T_C 'deki C paramanyetik ve ferromanyetik durumlar arasındaki geçişi temsil eden sıcaklık değeri olduğu için böyle gösterilmiştir (Jiles 1994).

Curie sıcaklığının üzerinde ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemeler paramanyetik olurlar çünkü termal hareket manyetik dipollerin rastgele yönelimine sebep olacaktır. Sonuçta, T_C sıcaklığı üzerinde manyetik alan yok iken malzemelerde net bir manyetik moment olmayacaktır. Curie-Weiss yasası T_C sıcaklığının üzerindeki malzemelerin elektriksel ve manyetik davranışlarındaki bilinmeyen yönleri açığa kavuşturmuştur.



Şekil 2.10. Curie-Weiss yasası paramanyetik fazın varlığını ispatlamıştır.

Curie-Weiss davranışı genellikle en yakın komşudaki atomların manyetik dipollerinin aynı yönde yönelme eğilimi olarak açıklanabilir.

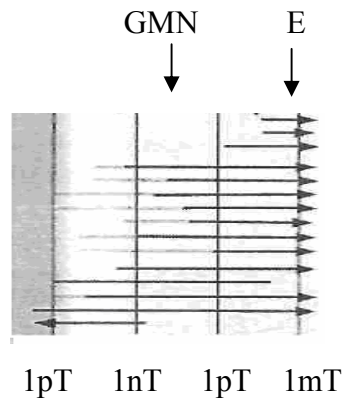
Bu nedenle Curie-Weiss yasası manyetik duygunluğun sıcaklığa bağlı davranışını açıklamada son derece önemlidir. T_C sıcaklığının çok üzerindeki bölgelerde, sıcaklıkla duygunluk karşılıklı lineer olarak artar.

2.9. Manyetik Sensörler ve Uygulamaları

Manyetik sensörler toplam manyetik alanı ya da manyetik alanın vektör bileşenlerini ölçmesine göre sınıflandırılır. Her iki tür manyetik sensörü üretmek için kullanılan teknikler fiziğin ve elektroniğin birçok alanını kapsar. Manyetik alanı algılama için kullanılan genel teknolojilerin çoğunu; test bobini, manyetik alan detektörü, nükleer devinim, Hall-etkisi, anizotropik manyetoresistans, büyük manyetoresistans, manyetik tünel birleşimleri, büyük manyetoempedans, magnetrostriktif/piezoelektrik bileşikler, manyetodiyot, manyetotransistör, fiber optik, SQUID, manyetooptik ve mikro elektromekanik sistemler olarak tanımlayabiliriz.

Manyetik algılama teknikleri, fizik ve metalürji bilimi alanlarından çeşitli düşünce ve olgularında kullanılır. Daha genel manyetik sensör teknolojilerinin çoğu, ortalama hassasiyet aralığını kıyaslayan şekil 2.11 de listelenmiştir.

Şekil 2.11’de E ve GMN sembolleri sırasıyla dünyanın manyetik alanının gücünü ve jeomanyetik gürültüyü ifade etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. Farklı manyetik sensörlerin hassasiyet değerlendirmesi.

Dünyanın manyetik alanının büyüklüğü nedeniyle, hassas sensörler ya geniş dinamik aralığa sahip olmalı ya da sensör pozisyonunda alanı düşürmek için bobin kullanmalıdır. Jeomanyetik gürültü mekânsal olarak kilometrelerce mesafeden karşılıklı etkilenir. Çünkü iyonosferdeki gelgit kuvvetleri ve rüzgârlar tarafından gerçekleştirilen hareketler gibi geniş mekânlardan ileri gelmektedir (Campbell,1997). Böylece iki veya daha fazla mekânsal ayrılmış sensörler arasındaki ölçümlerin farkı kullanılarak, jeomanyetik gürültüden daha küçük manyetik alan değişimlerini ölçmek mümkündür.

Bir uygulama için hangi sensörün en iyi olduğunu etkileyen frekans tepkisi, boyut ve güç gibi pek çok başka faktörler vardır. Diğer önemli bir konu manyetometrenin sadece alanın büyüklüğünü mü yoksa onun vektör bileşenlerinin her birini mi ölçtüğüdür. Vektör manyetometrelerin ek bilgi sağlamasından dolayı, vektör manyetometrelerin sadece alanın büyüklüğünü ölçen manyetometrelerden daima daha iyi olduğunu düşünülebilir. Çoğunlukla manyetometrelere skalar veya toplam alan manyetometresi denmektedir.

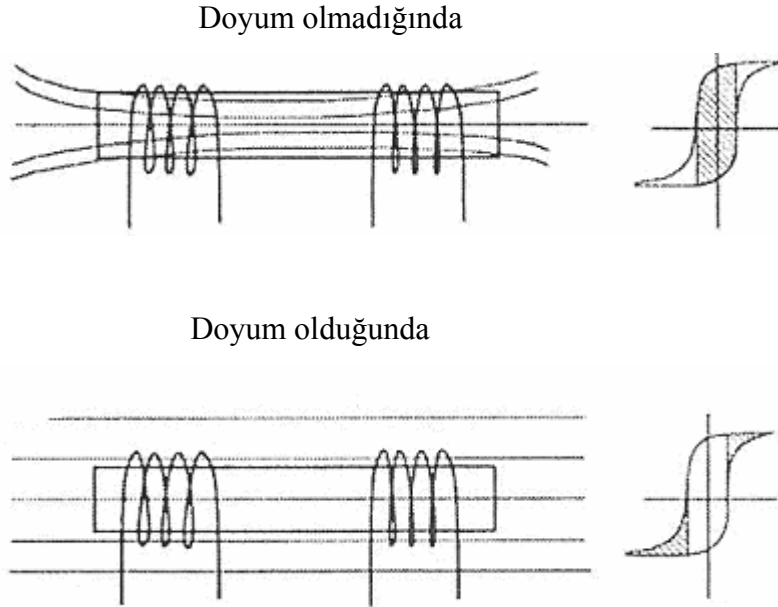
Bazı uygulamalar için skalar manyetometreler vektör manyetometrelerden daha iyidir. Hareketli bir aracın üzerinde manyetometre kullandığını ve ferromanyetik nesnelere dolaylı küçük değişimlerin saptanmaya çalışıldığını düşünelim. Aracın hareketinden kaynaklı rotasyonel titreşimler vektör manyetometreyle saptanmış dünyanın manyetik alanının vektör bileşenlerinde sinyalden ayırt edilmesi zor değişiklikler yaratır. Bileşenlerdeki bu değişimler ferromanyetik nesnelere dolaylı oluşan değişimlerden genellikle daha büyüktür.

Vektör bileşenlerinden toplam alanı doğru bir şekilde hesaplamak zordur. Çünkü üç vektör manyetometrelerin hassasiyeti aynı ve eksenleri tamamen dik olmalıdır. Bu yüzden bu uygulamada toplam alan manyetometre vektörü alan manyetometreden daha iyidir.

2.9.1. Manyetik alan detektörü manyetometre

Şekil 2.12’de gösterilen manyetik alan detektörü manyetometre iki bobin sarımlı, biri sürücü ve biri algı bobini, ferromanyetik malzeme içerir (Ripka2003).

Bu dedektör manyetik indüksiyon da kullanır ve bununla birlikte tüm ferromanyetik malzeme yüksek alanlarda doyma noktasına erişmiş olur. Bu doyumluk, şekil 2.12’ nin sağında gösterilen histerezis luplarında görülebilir. Yeterince geniş sinüsoid akım sürücü bobine uygulandığı zaman, çekirdek her yarım turda bir kez doyumluk mknatıslanmasına ulaşacaktır.



Şekil 2.12. Manyetik alan detektörü manyetometrelerin çalışma prensiplerinin gösterimi.

Çıkış sinyali yumuşak manyetik çekirdeği doyumluğun içine ve dışına hareket ettirerek ayarlanır. Gölge yerler çalışma alanlarını göstermektedir.

Çekirdek doyumluğa zorlandığı zaman, çekirdeğin ölçülen dış manyetik alana mukavemeti yükselir, böylece çekirdeğe geçmesi için herhangi bir ilave manyetik alan için onu daha az çekici yapar. Bu değişim algı bobiniyle saptanır.

Sürücü bobinindeki akımı azaltarak çekirdek doyunluktan çıktığı zaman, algı ikinci bobini tarafından tekrar saptanan dış manyetik alan tekrar çekirdek tarafından etkilenir. Böylece alternatif çekim ve çekim olmaması durumu akımın manyetik çizgilerinin algı bobinini kesmesine neden olur. Algı bobininden akım çıkışı uyarı frekansının çift sayılı uyumlularını içerir. Readout için ikinci uyum çıkartılır ve düzeltilir. Bu uyumla ilgili akım dış manyetik alana orantılıdır.

Bu sensörün hassasiyeti histerezis eğrinin şekline bağlıdır. Maksimum hassasiyet için, manyetik alan manyetik indüksiyon ($B-H$) eğrisi kare olmalıdır. Çünkü bu, verilen manyetik alan değer için en yüksek indüklenmiş elektrik akımının geçmesini sağlayan kuvveti (emf) üretmektedir. Minimum enerji tüketimi için, çekirdek madde düşük doyunluk ve koersivite değerlerine sahip olmalı. Hassasiyet aralığı 10^{-2} - 10^7 nT'dir. Sensörün frekans tepkisi ferromanyetik maddenin tepki süresi ve uyarı alanıyla sınırlandırılır. Frekansta üst limit yaklaşık 10kHz'dir. Manyetik alan detektörü manyetometre boyut olarak test-bobin manyetometreye benzer, fakat onlar aşağı yukarı 5 kat daha fazla enerji tüketirler. Manyetik alan detektörü manyetometrenin test bobinler üzerine asıl avantajı onların doğru akım (dc) alanlarını kesin olarak ölçebilme yetenekleridir.

Manyetik alan detektörü manyetometrelerin birçok çeşidi geliştirilmiştir. Bunların çoğu küçük histerezis çevrimler üzerinde çalışan sensörler sayesinde daha az enerji tüketimini başarırlar, böylece çekirdeği doyunluktan doyunluğa çalıştırmaz. Bu küçük lup manyetik alan detektörü manyetometreler sürücü ve readout elektroniklere, performansı çekirdek maddenin özellikleriyle kontrol edilen büyük lup modellerine göre, çok daha hassas olurlar. Manyetik alan detektörü manyetometrenin üç kollu modelinin doğru bir pusula rotasını belirleme için basit üç-akımlı readout oluşturmak için kullanılabileceğini gösterir. Ayrıca gösterilen 30 yıldan fazla süredir kullanılmakta olan hava araçları pusula sistemidir. Tipik bir hava aracı yönlendirme sistemi $0,1^\circ$ kadar iyi bir doğruluk sağlar.

Üç örümceğin her birinde algıma alanını uygun bir şekilde döndürerek, örümceğe göre dünyanın manyetik alanının açısı kesin olarak belirlenir. Bu üç-örümcek manyetik alan detektörü tek eksen etrafında döndürülür (gimbaled) böylece sensörün hassasiyet yüzeyi daima yataydır.

2.9.2. Süperiletken manyetometreler

SQUID sensörler düşük frekanslarda ($<1\text{Hz}$) manyetik alan ölçümü için tüm aletler içinde en hassası süper iletken kuantum karışım aletidir (Pizzella et al 2001; Cantor 2001).

SQUID, bazı maddeler süperiletken geçiş sıcaklığının altına düşürüldüğünde gözlemlenen elektrik akımlarının ve manyetik alanlarının arasındaki önemli etkileşime bağlıdır. Bu sıcaklıkta maddeler süper iletken olurlar ve elektrik akımına karşı tüm dirençlerini kaybederler.

SQUID’de periyodik değişimler süper iletken halkadaki akımı ölçmek için kullanılır ve genellikle halka manyetik indüksiyon aracılığı ile radyo-frekans devresine eşleştirilir her ikisi de bilinen eğilimli alanı sağlar ve detektör gibi iş görür. Halka akımındaki değişimler akımın rezonans frekansını değiştirir; sonuç olarak alan değişirken çıkış sinyali belirli aralıklarla değişir. Alandaki değişiklikler, her ne kadar girişim çizgileri sayabilse de basitçe tepe noktalarının ve çukurların sayılmasıyla ölçülebilir. Dış alandaki değişiklikleri telafi etmek için devamlı eğilimli alanı değiştirerek, alternatif olarak, geri besleme döngüsü radyo-frekans devresini tek pik üstünde durdurmak için kullanılabilir, O halde geri besleme akımı çevreleyen alanın ölçüsüdür. SQUID’deki süper iletken halka kurşun veya niyobyum gibi metalden yapılmış birkaç milimetre çapında tipik bir halkadır. Zayıf bağlantı süper iletkende dar bir büzülmedir veya nokta temas birleşme yeridir.

Hassasiyet, halkayı etkili bir şekilde manyetik anten veya dc test bobini gibi iş gören daha geniş süper iletken bir lupa veya bobine (zayıf bağlantısız) eşleştirerek geliştirilir, birkaç santimetre karelik alan üzerinde akım toplar.

Süper iletken özellikleri kullanılarak, algı lupu ve SQUID readout arasında bir dc transformatör oluşturulabilir.

SQUID'in kendisi tamamen küçük olabilir, fakat ihtiyaç duyulan sıvı helyum soğutma tüm aleti oldukça büyük ve ağır yapar.

Birkaç watt enerji tüketimi nerdeyse tamamen radyo-frekans elektroniklerden dolaydır. Algı lupu iki paralel dönüşleri çapraz bağlayarak ölçüm alanındaki değişim derecesine hassas yapılandırılabilir. Algı lupu süper iletken olduğu için, manyetik alanlara dc tepkisi olur.

Bobinleri uygun bir şekilde yönlendirerek, herhangi bir yönde dış alanın bir bileşenin değişim derecesi algılanabilir Bu kısmi türevlerin herhangi birini ölçebilen yüksek hassasiyetli gra-diometre üretme kabiliyeti diğer manyetik sensörlere göre bu teknolojinin yegâne özelliğidir.

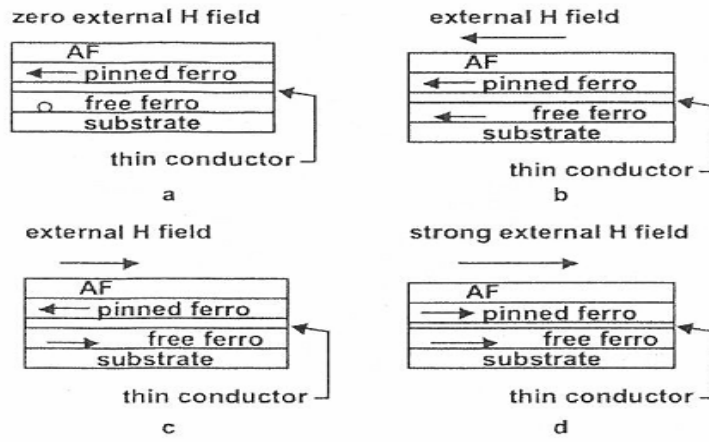
2.9.3.Büyük manyetorezistans GMR sensörler

Manyetorezistanda daha büyük değişimler metallerin düzleyici yapılarında gözlemlenmiştir (Baibich et al 1988;Binasch et al). Etki büyük manyetorezistans veya GMR diye isimlendirilir. En basit formunda iletici ile ayrıştırılmış ince iki ferromagnet içeren dört katmanlı yapı kullanılarak GMR elde edilir. Dördüncü katman, ferromanyetik katmanlarının birinin mıknatıslanmasını bağlamak için (rotasyonu engellemek) kullanılan bir antiferromagnettir. Bağlanan ferromagnet katman iletici ve antiferromagnet arasındadır. Bağlanan ferromagnet sert ferromagnet diye isimlendirilir ve bağlanmayan ferromagnet yumuşak ferromagnet diye isimlendirilir.

Şayet iki ferromagnetin mıknatıslanması birbirine paralelse elektronlar ya katmanlara paralel ya da katmanlara dik daha kolaylıkla hareket edebilirler. Bunun için, mıknatıslanma paralel olduğu zaman elektronlar, ferromagnetlerin birindeki elektronik bant yapısından diğer ferromagnetteki benzer veya aynı elektronik bant yapısına giden saçılmadan daha az zarar görürler.

Mıknatıslanmanın paralel olduğu zaman ve paralel olmadığı zaman koşulları arasındaki özdirenç farkı oda sıcaklığında %12,8 kadar büyük olabilir (Crey et al 2002). Etkiyi optimize etmek için katmanlar çok ince olmalı, örneğin yaklaşık bir nanometre kadar. Alanın lineer fonksiyonu olması için sensörün düşük alan tepkisi için yumuşak ferromagnetin sıfır alanda, bağlı ferromagnetin mıknatıslanmasına dik kendisinin mıknatıslanma kolay eksenine sahip olması önemlidir.

Şekil 2.13 a’da iki mıknatıslanmanın sıfır alan oryantasyonu tasvir edilir. Rezistans ya ferromanyetiklerin düzleminde ya da bu düzleme dik ölçülebilir.



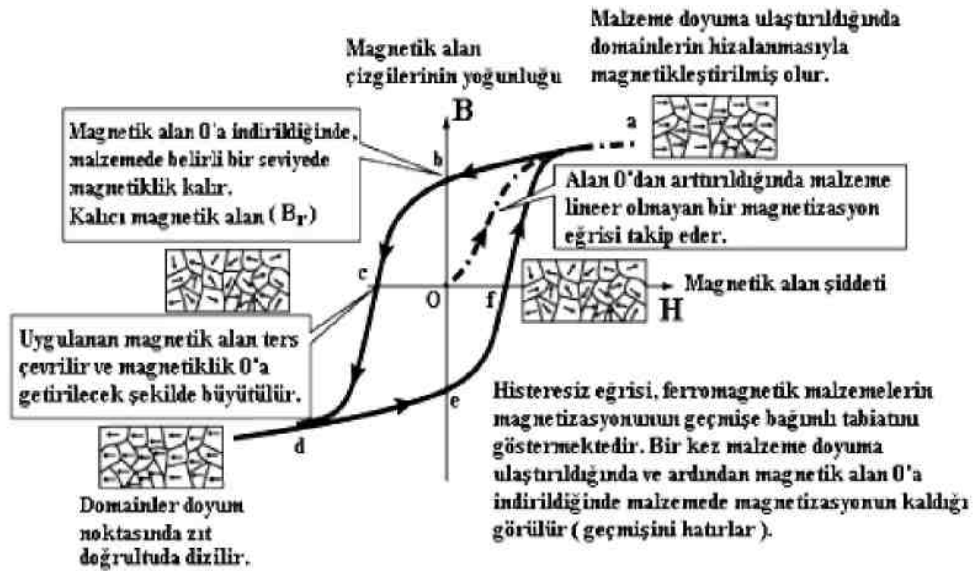
Şekil 2.13. Farklı dış alanlar H için GMR spin valfde ferromanyetik katmanların mıknatıslanma oryantasyonu.

2.9. Histerisis Eğrisi

Bir malzeme, domenlerin yapıları ve davranışları, ferromanyetik maddenin mıknatıslanma eğrisi belirler. Bu eğriye Şekil 2.14 te görüldüğü gibi " *histerisis eğrisi* " (*histerisis çevrimi*) denir.

Eksenlerin kesim noktası 0 mıknatıslanmanın olmadığı ve hiçbir kuvvetin uygulanmadığı anı temsil eder.

Manyetik alan şiddetini arttırdığında, akı yoğunluğu önce hızlı, sonra maksimum ya da doyma noktasına ulaşıncaya kadar yavaşlayarak artar. Manyetik alan şiddetinin daha fazla arttırılması akı yoğunluğunda bir artış meydana getirmez. Akı yoğunluğunun yükselişi şekil 2.14' te noktalı çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Histeresis eğrisi

Şekil 2.14 teki Histeresis eğrisinin temel özellikleri;

1- Manyetik alan şiddeti ters yönde 0 'a düşürüldüğünde H_r noktasında malzemede bir miktar mıknatıslanma mevcut kalır. Buna malzemenin artık mıknatıslığı (remanans) adı verilir.

2- Mıknatıslanma akımı ters çevrilerek yavaşça 0 ' a düşürüldüğünde malzemedeki akı yoğunluğu azalır. Artık mıknatıslık (c) noktasında 0 olur. Yatay eksendeki mesafe, giderme kuvveti (*koersitif*) olarak adlandırılır.

3- Giderme kuvveti mıknatıslanma sonrasında malzemelerdeki manyetik akı yoğunluğu 0 ' a indirmek için gerekli olan manyetik alan şiddeti değeridir. Bu noktadan manyetik alan şiddeti daha da arttırılırsa malzeme tekrar doyuma ulaşır.

4- Manyetik alan şiddeti tekrar yavaş yavaş 0 ' a düşürüldüğünde, akı yoğunluğu bir miktar azalır.

5- (e) noktasında da malzemedeki bir miktar artık mıknatıslanma görülür.

6- Manyetik alan ilk yönde arttırılmaya devam edilirse artık akı yoğunluğu azalır ve (f) noktasında 0 olur.

7- (f) noktasından manyetik alan arttırılmaya devam edilirse başlangıç doyma noktasına (a) ulaşır.

Elde edilen histerisis eğrileri malzeme hakkında şu bilgileri verir;

i. Çok ince manyetik filmlerde, histeresiz eğrisi kareye benzer bir görünüm alır. M_r değeri, histeresiz eğrisinin kareselliği olarak adlandırılır. Eğri M_s kareselleştikçe, oran 1 e yaklaşır.

ii. Elde edilen histerisis eğrisinin alanı küçükse yüksek manyetik geçirgenlik ve düşük zorlayıcı kuvvete sahiptir. Bu tür malzemeler yumuşak mıknatıslardır.

Bu tür malzemeler primer ve sekonder arasındaki akım değişen transformatör çekirdeklerinde kullanışlı bir özelliktir. Bunun dışında bilgisayarlardaki gibi, yüksek anahtarlanma hızlı devrelerde de kullanışlıdır.

Büyük alanlı bir histerisiz eğrisi sert bir manyetik malzeme göstergesidir. Bu tür malzemelere sert mıknatıs denir. Bu tür mıknatıslar, manyetik kilit, hoparlör ve küçük motorlar için kullanılır.

Sonuç olarak histerisiz eğrisinin daralması malzemenin mıknatıslanabileceğini ve düşük artık mıknatısa sahip olacağını, genişlemesi ise malzemenin zor mıknatıslana bileceğini ve daha kuvvetli bir artık mıknatıslığa sahip olacağını göstermektedir (Tacer 2004).

3.MATERYAL VE YÖNTEM

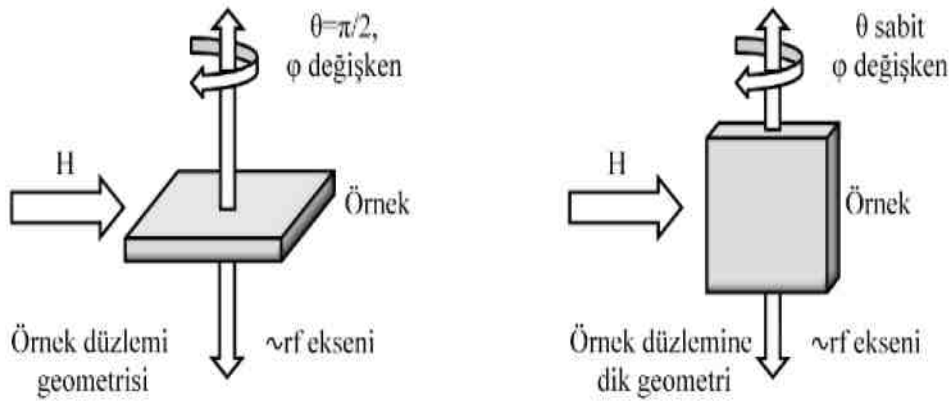
3.1. Ultra İnce Au/Fe/GaAs Düşük Sıcaklık FMR Çalışması

Ultrathin manyetik çok katmanlılara olan ilgi, manyetik erişimli bellekler ve bilgi depolama aygıtları gibi spintronik uygulamaların yapı taşlarını oluşturdukları için, sürekli artmaktadır. Manyetik nano yapıların fiziğini anlamak için ince filmlerin manyetik anizotropilerinin kritik bir önemi vardır. Ferromanyetik rezonans (FMR) ultrathin manyetik filmlerin manyetik anizotropilerini belirlemeye imkân sağlayan çok doğru ve güvenilir bir tekniktir. Bu çalışmada düzenlenmiş GaAs (001) tek kristal alt katmanı üzerinde oluşmuş tek GaAs/80 Au/16Fe (100) katman yapısında manyetik anizotropisi incelenmiştir. Ayrıca burada arayüz indüklenmiş anizotropilerin ultrathin film yapılarının tüm manyetik özelliklerini uygun hale getirmek için kullanılabilmesi gösterilecektir. FMR deneylerimizde, çeşitli düzlemsel manyetik anizotropileri ayırmaya imkân veren alışılmadık üçlü-mod FMR spektrumları gözlenmiştir. 5-300K sıcaklık aralığında bağımlı FMR spektrumunun bilgisayarla ayarlanmış frekans ve açıya bağlı değişimi bize manyetik anizotropilerin kübik, tek eksenli ve dikey bileşenlerini anlamamıza ve her katmandaki kolay ve zor eksenlerin yönünü saptamamıza imkan verir. Manyetik anizotropiler, bu yapılar içinde kullanılan metalik maddelerin farklı ısı genleşmeleri ve latis uyumsuzluklarından dolayı ortaya çıkan manyetoelastik enerjiyi içeren arayüz ve büyük bölüm anizotropiler yönünden ele alınacak (Heinrich 2007).

Çift katlı örneklerin FMR spektrumları X-band (9.5GHz) frekansında çalışan Bruker EMX spektrometre ile alınmıştır. Bu spektrometre yatay düzlemde 2,2 Tesla büyüklüğüne kadar dc manyetik alan uygulayabilen bir elektromagnetsa sahiptir ve bir soğutma sistemiyle (cryostat) sıvı Helyum (LHe) kullanılarak 4,2K kadar soğutma imkânı sağlamaktadır. Oda sıcaklığı ölçümleri hem örnek düzleminde (in-plane) hem de örnek düzlemine dik (out-of-plane) geometride düşük sıcaklık ölçümleri ise yalnızca örnek düzleminde yapılmıştır.

Örnek tutucuyu mikrodalgaya paralel, uygulanan statik manyetik alana ise dik olarak döndürmek için bilgisayar ile kontrol edilebilen bir hassas döndürücü (goniometer) kullanılmıştır.

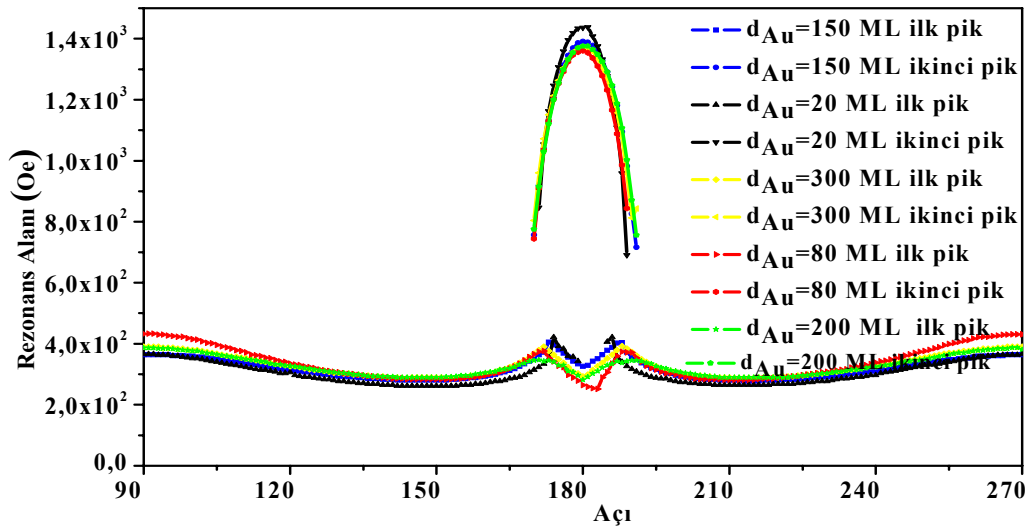
Örnek düzlemi için örnekler örnek tutucunun alt yüzeyine yatay olarak θ açısı $\pi/2$ değerinde sabit, ν açısı değişken olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu durumda mikrodalga örnek düzlemine dik, dış dc manyetik alan ise örnek ekseninin farklı yönlerine uygulanacak şekilde örnek düzlemine paralel olmaktadır. Bu geleneksel olmayan bir geometridir ve örnek düzlemindekiyle örnek düzlemine dik bileşenlerin toplamını vermektedir. Örnek düzlemine dik geometride ise örnek, örnek tutucuya θ açısı değişken ν açısı sabit olacak şekilde yerleştirilmiştir. Manyetik alan bu durumda film düzleminde bu düzleme dik olacak şekilde dönerken, alanın mikrodalga bileşeni daima örnek düzlemine paralel kalacaktır. Bu geometrilerin temsili çizimi;



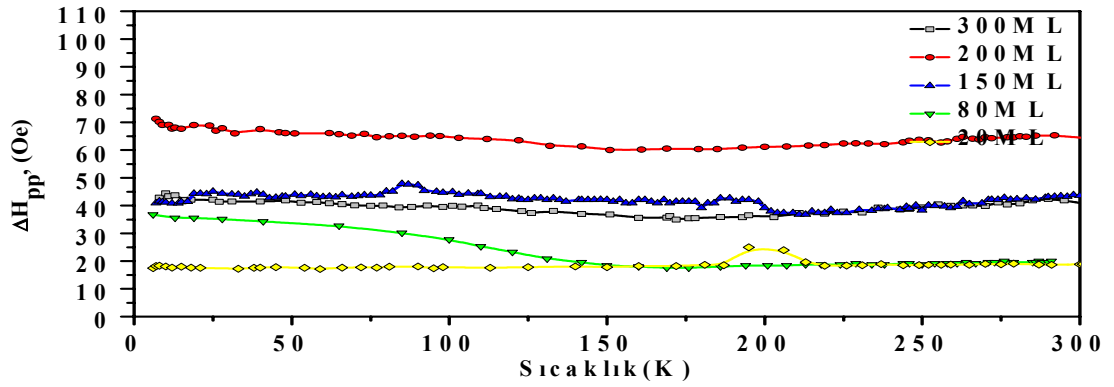
Şekil 3.1. FMR çalışmalarında kullanılan örnek düzlemi ve örnek düzlemine dik geometrilerin gösterimi.

FMR spektrumunun sıcaklık bağımlığı 5-300K aralığında devamlı helyum gaz akış kriyostat kullanarak kaydedilmiştir ve sıcaklık LakeShore 340 sıcaklık-kontrol sistemiyle kontrol edilmiştir. Alanın küçük şiddet modülasyonu 5-300K sıcaklık aralığında alan-türevli soğurma sinyal kaydetmek için kullanılmıştır. Numuneler konvansiyonel düzlem içi geometrilerde numune kaplarına (kaviteye) yerleştirilir. (her iki DC ve mikrodalga manyetik alanlar daima film düzleminde uzanır)

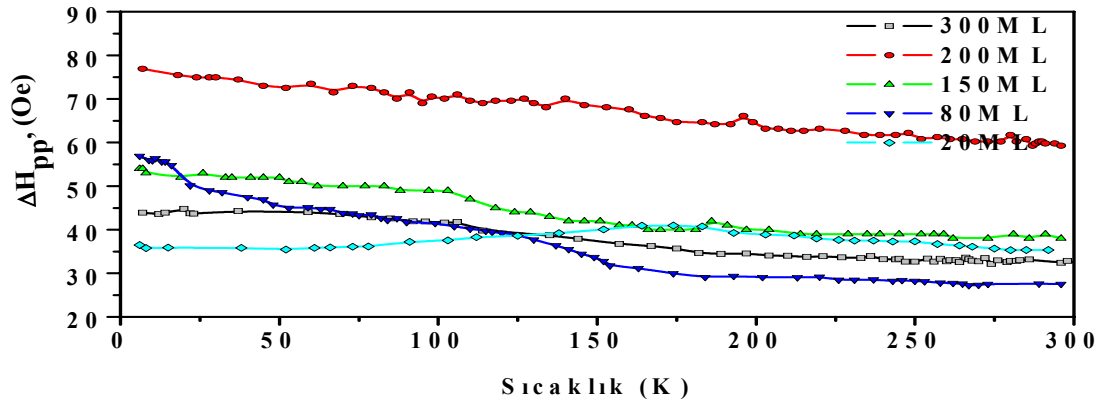
Statik manyetik alanın sırasıyla tekeksenli manyetokristal anizotropinin kolay ve zor eksenine paralel ve zor ekseninden 45° dizilmesi gibi bazı spesifik kristalografik eksenler için konvensiyonel düzlem-içi geometride FMR verisi kaydettik. Konvensiyonel olmayan düzlem içi geometride oda sıcaklığında kaydedilen FMR spektrumunun rezonans alanının açısal bağımlılığı şekil 3.2' de gösterilmiştir.



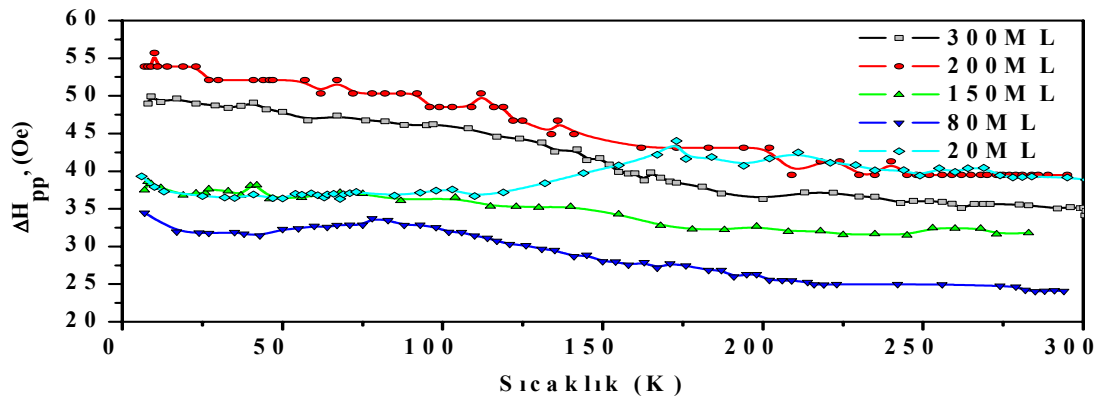
Şekil 3.2. İki rezonans alanının açısal bağımlılığı, düzlem içi geometride ana FMR mod ve çekici FMR mod için kesiksiz çizgilerle gösterilmiştir.



(a)

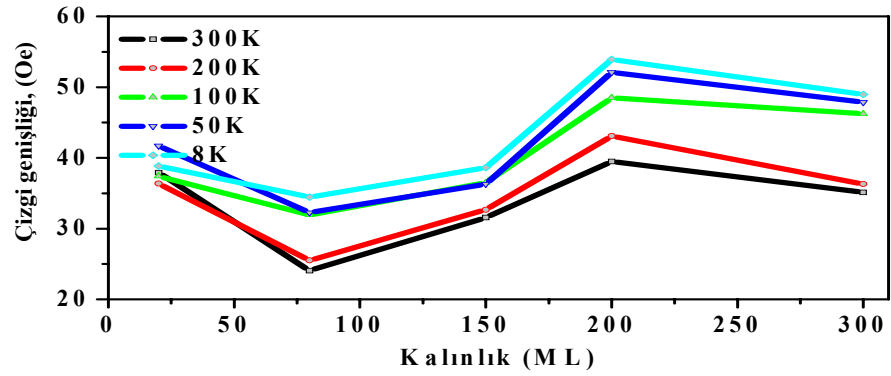


(b)

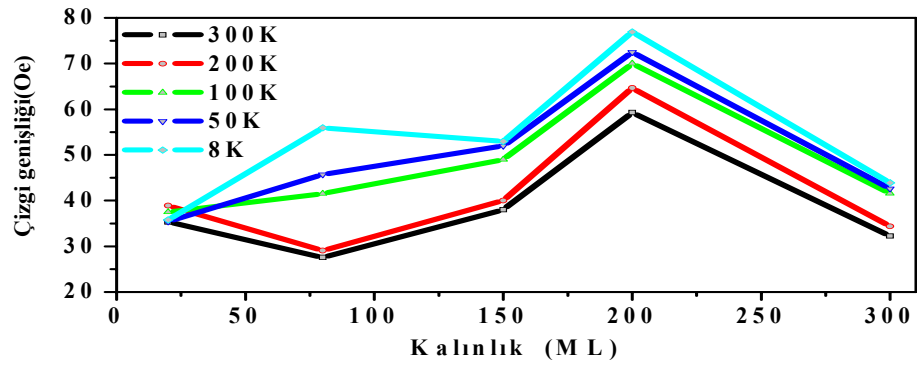


(c)

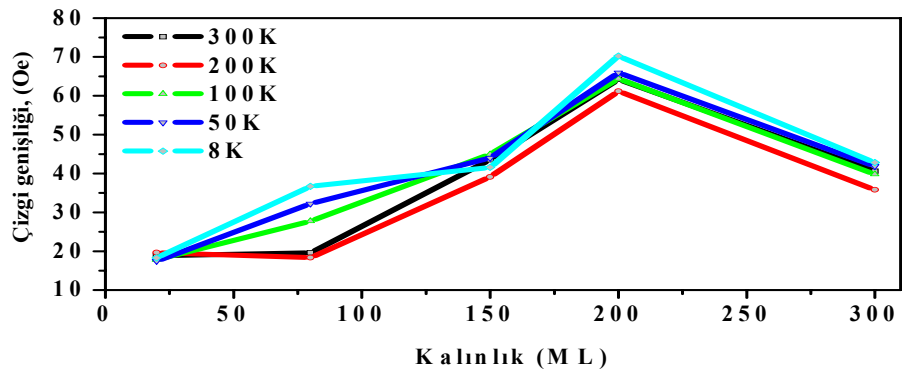
Şekil 3.3. (n)'nin 20, 80, 150, 200, 300 ML olarak Au katmanının kalınlığını gösterdiği yerde, Au(n)/Fe(16ML)/GaAs için sıcaklık fonksiyonu olarak FMR çizgi genişliği ΔH_{pp} . Dış manyetik alan düzlem içi tek eksenli (a) zor eksene (b) kolay eksene (c) tek eksenli zor eksenden 45° açı paralel sıralanır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.4. (n)'nin 20, 80, 150, 200, 300 ML olarak Au katmanının kalınlığını gösterdiği yerde, Au(n)/Fe(16ML)/GaAs içinde Au katmanının kalınlığının fonksiyonu olarak sıcaklık fonksiyonu olarak FMR çizgi genişliği ΔH_{pp} . Dış manyetik alan düzlem içi tek eksenli (a) zor eksene (b) kolay eksene (c) tek eksenli zor eksenden 45° açı paralel sıralanır.

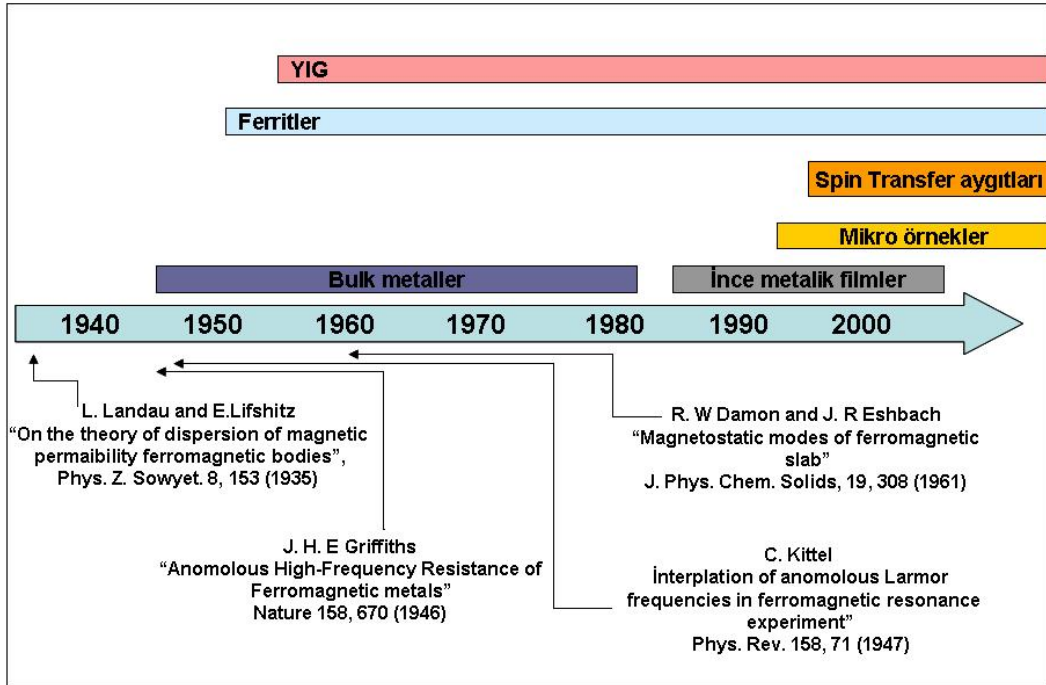
3.2. Ferromanyetik Rezonans (FMR) Deney Tekniği

Ferromanyetik rezonans (FMR) ferromanyetik maddelerin mıknatıslanmalarını anlamamıza yarayan spektroskopik bir tekniktir. Spin dalgalarını ve spin dinamiğini araştırmada kullanılan standart bir yöntemdir. V.K. Arkad'yev 1911'de ferromanyetik maddelerin ultra yüksek frekans (UHF) ışınımlarını soğurmasını tesadüfen gözlemlemiş, böylece FMR'ı bilmeyerek keşfetmiştir. Yüksek frekanslı elektromanyetik radyasyonun ferromanyetik maddeler tarafından emilmesiyle ferromanyetik rezonans gerçekleşir. Bundan dolayı ferromanyetik rezonans radyo-spektroskopi alanıyla yakından ilgilidir. Radyo-spektroskopi genel olarak elektromanyetik dalgalarla değişik maddelerin etkileşmesini inceler. Bu etkileşmeler çoğunlukla 1mm-10 cm dalga boyu yada 10^9 - 10^{11} s⁻¹ frekans aralığında yer alır ve bu aralık kızılötesi bölgededir. Ferromanyetik rezonansın gerçekleştiği bölge de yüksek frekans (UHF) 300 MHz-3000 GHz ya da mikrodalga (MW) 0.3 GHz-300 GHz aralığıdır.

Kuantum mekaniğinden ve atom fiziğinden de bilindiği gibi elektromanyetik dalga ile maddenin etkileşmesinde enerji alışverişi gerçekleşir. Bu enerji alışverişi rastgele değil ancak belirli enerji kuantalarıyla olur.

Radyo-spektroskopinin temelleri Zeeman yarılması dediğimiz; atomun enerji seviyelerinin bir dış manyetik alan tarafından yarılmasına dayanır. Bu enerji seviyeleri elektron hareketinden kaynaklanan manyetik momentlerle ilgilidir. Ferromanyetik rezonans konusunu incelerken manyetizmanın esas kaynağı olarak yarı dolu elektron kabuklarındaki elektronların spin ve yörüngesel momentleri düşünülür.

Tablo 3.1. FMR'ın tarihi gelişimi.



Ferromanyetik rezonans tekniği kullanılarak X-band (9.8 Ghz) Bruker marka Elektron Spin Rezonans (ESR) sistemi (şekil 3.4) ile ölçümler açığa bağlı şekilde oda sıcaklığında (300K) alınmıştır. Çünkü ESR ölçülecek numunedeki ferromanyetik ve paramanyetik değişmelere karşın son derece hassas olduğundan, ESR sistemi manganitleri çalışmada çok önemli bir yere sahiptir.

Elektron Paramagnetik Spektroskopisi (EPR) ise maddelerin manyetik özelliklerinin araştırılmasında önemli bir yere sahiptir. Aynı zamanda EPR spektroskopisi diğer tekniklerle incelenmeyen maddelerin önemli fiziksel özelliklerinin tesbitine imkan vermesi ve incelenen maddenin yapısında herhangi bir değişim yapmaması bu tekniğin diğer tekniklere göre üstün yanlarından bazılarıdır (Yalçın 2004).

Ferromanyetik rezonans tekniği kullanılarak örneklerin dinamik mıknatıslanması incelenmiştir. FMR tekniği ile bu gibi örneklerde iki farklı geometride ölçüm yapılmaktadır.

Bunlardan birincisi statik dış manyetik alanın film düzlemine dik olduğu out of Plane Geometri (OPG) ve diğeri de statik dış manyetik alanın film düzlemine paralel olduğu In Plane Geometri (IPG) dir. Bu iki farklı oryantasyonda ölçümler yapılarak malzemelerin anizotropik davranışları analiz edilebilir. Genel olarak IPG de anizotropik davranış görebilmek için hazırlanmış olan örneklerin tek kristal yapıda olmaları beklenir. Örneklerde IPG geometride herhangi bir anizotropi görülmemiş, sadece şiddet değişimi ile karşılaşılmıştır.

3.3. EPR Spektrometresinin Genel Yapısı

EPR spektrometreleri genel olarak dört temel kısımdan oluşur.

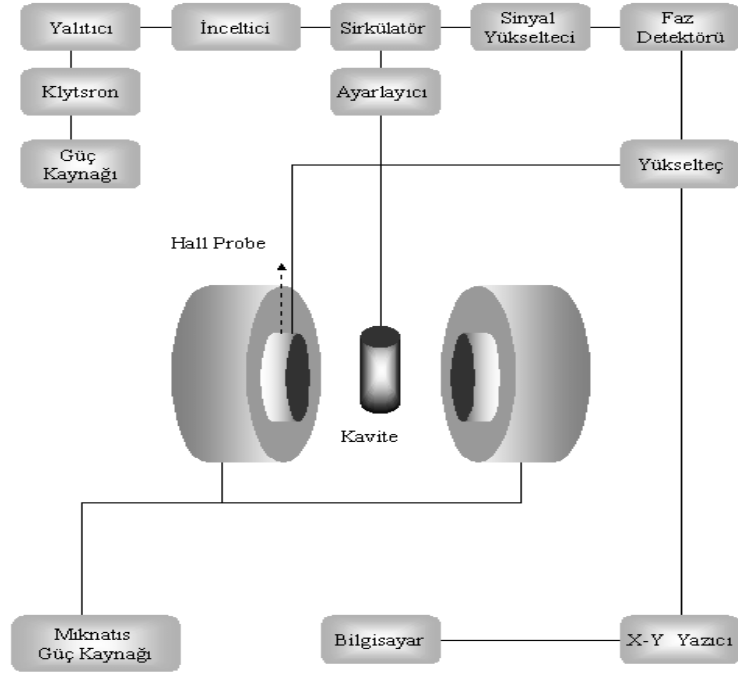
- i. Gerekli frekansta (genel olarak 1–100 GHz arası kullanılan mikrodalga) güç üreten kaynak sistem,
- ii. Üretilen mikrodalgayı araştırılacak örnek üzerine ve örnekten yansıyacak dalgayıda kristal dedektöre taşıyan dalga kılavuzu ve numunenin içinde bulunduğu kaviteden oluşan kavite-kılavuz sistemi,
- iii. Kutuplar arasında homojen ve değeri doğrusal olarak değişen manyetik alan oluşturan mıknatıs sistemi,
- iv. Rezonans sinyalini algılayan dedektör ve modülasyon sistemi.

Bu sistemlerde meydana gelen ESR spektrometresinin ana blok diyagramı şekil 3.5’de verilmiştir.

3.4. Elektron Spin Rezonans Deneyi Kaynak Sistemi

Mikrodalga kaynak sisteminin temel elemanı katihal diyodu ya da yansımali bir klytrondur. Bir vakum tüpüne yerleştirilen iki rezonans kaviteleri ile bunları birleştiren elek yapısındaki iki iletken levha, $1/\sqrt{LC}$ rezonans frekansı ile salınımını LC olan bir hareket yapar. Bu düzenek rezonans halinde iken mikrodalga üretirken, elektrik alan levhalar arasında sinüzoidal olarak değişir. Devrenin devamlı olarak salınması içinde dışarıdan beslenmesi gerekir.

Bir flaman tarafından ısıtılarak termoiyonik yolla katotta üretilen elektron demeti, bir V gerilimi altında hızlandırılarak levhalar arasına yollanır. Bu hızlandırılan elektronlar, kavite civarında ki elektrik alanın fazına göre bir kısmı hızlanırken bir kısmı da yavaşlar. Geçen elektronlar, levhaya göre negatif gerilimde olan bir yansıtıcı tarafından geri gönderilirler. Hızlarına göre modüle edilmiş olan elektronların büyük bir kısmı, elektrik alanın fazı uygun ise enerjilerini elektromanyetik dalgaya aktarırlar. Bu durumda devre sürekli olarak beslenir. Devrenin sürekli olarak salınabilmesi için, elektromanyetik yansıma bölgesinde periyodunun $(n+3/4)$ '  $-n$ bir tam sayıdır- kadar zaman harcamaları gerekir.



Şekil 3.5. ESR spektrometresinin blok diyagramı



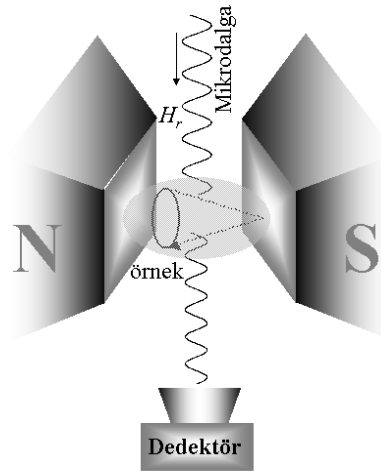
Şekil 3.6. Çalıştığımız ESR labaratuarından bir kare

Bunlardan sonra, yansıtıcı ve hızlandırıcı gerilimlerinin değerleri birbirlerine göre ayarlanarak sürekli bir salınım meydana getirilmiş olur. Diğer bir ifade ile klystronun içinde değişik bölgelerde yine hızlandırıcı ve yansıtıcı gerilimlerinin birbirlerine göre ayarlanarak salınımlar oluşturulabilir. Bu farklı gerilim bölgelerinden her birine klystronun modu denir. Fakat bu modlar salının frekansının harmonikleri değildir, sadece salınım şartını sağlayan gerilim bölgelerini gösterirler. Bununla beraber, herhangi bir hızlandırıcı ve yansıtıcı gerilim bölgesinde bu gerilimlerden biri veya birkaçı değişiklik gösterirse salınım frekansı da değişecektir. Sonrasında yansıtıcı gerilim ile frekans kontrolü sağlanmış olur. Ek olarak salınımı sağlayan kavite boyutları, mekanik olarak değiştirerek de salınım frekansının değişmesi sağlanabilir.

Örneğin, deneylerini yaptığımız kullanılan ticari X-bant Bruker EMX model ESR spektrometresinin frekansı ($\nu = 9.5 - 9.85 \text{GHz}$) arası ayarlanabilir. Salınım frkansı tek bir f_0 değerinde değil de bu değer etrafında ki dar bir bant aralığına sahiptir.

Bir örneğin ferromanyetik rezonans ölçümleri için mikrodalga, dedektör ve mıknatıs sistemi şekil 3.5’de gösterilmiştir.

Sıcaklığın frekansa olan değiştirici etkisine engel olabilmek için genelde, klystron su ile soğutulur ya da yağ banyosuna tutulur. Bunlara ilaveten değişik nedenlerden kaynaklanabilecek frekans kaymalarına karşı sisteme otomatik frekans kontrol birimi eklenmiştir. Yalıtıcıdan sonra gelen güç düşürücü ise güç soğurucu bir eleman olup, kaviteyi besleyen gücün kontrol edilmesinde kullanılır. Yine deneylerin yapıldığı spektrometrede bu güç 0-200mW arasında ayarlanabilmektedir.



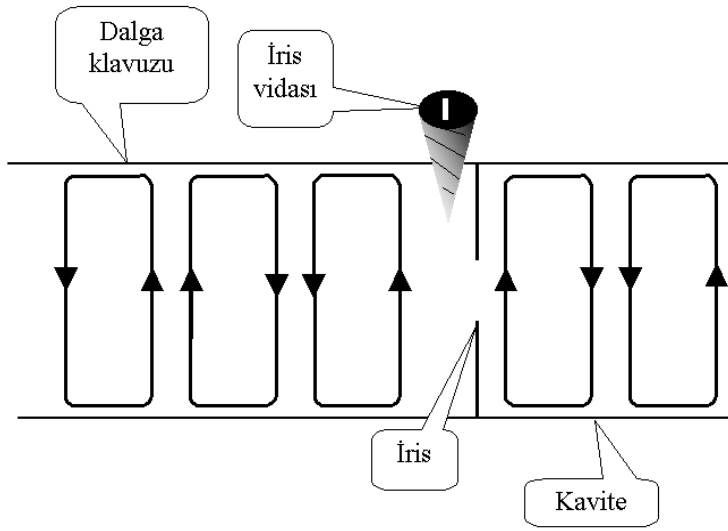
Şekil 3.7. Ferromanyetik rezonans deneyinin temsili gösterimi

3.4.1. Dalga klavuzu ve kavite klavuz sistemi

ESR deneylerinde TE_{102} modunda titreşen dikdörtgen prizma biçiminde bir kavite EPR (ESR) deneyleri için kullanılmaktadır. EPR deneylerindeki etkileşmeler manyetik etkileşmelerdir. Dolayısıyla, bulunduğu yerde mikrodalğanın elektrik alan bileşeni minimum ve manyetik alan bileşeninin maksimum olması gerekir. Bu durum, dielektrik katsayısı yüksek olan örnekler için daha büyük önem teşkil eder. O halde TE_{102} modunda titreşen bir kavite kullanıldığında spektrumu çekilecek örnek, hacim bakımından mümkün oldukça küçük ve silindirik alınarak kavitenin tam orta yerine yerleştirilmelidir.

Ölçülecek numuneler genel olarak kavite içerisine üst ve alt düzeylerinin tam ortasında buluna boşluklar kullanılarak yerleştirilirler. Bu boşluklar aynı zamanda numunenin soğutma veya ısıtma amacı ile kavite içerisinde bir cam boru yerleştirilerek örnek üzerinden soğutulmuş veya ısıtılmış azot ya da hidrojen gazlarından birinin geçirilmesine imkan sağlar. Kaviteye giden mikrodalğanın yansımalarını minimuma indirmek için mikrodalga klavuzu ile kavite arasındaki empedans yumunu sağlamak üzere kavitenin mikrodalga girişinde iris bulunur.

İris aralığının açıklığı ayarlanarak empedans uyumu yapılır ve kaviteye maksimum güç akışı sağlanmış olur. Kavite içindeki mikrodalganın bir kısmı örnek tarafından soğurulurken diğer bir kısmı da kavite çeperleri tarafından soğurulur. Bir kavitenin kalite faktörü (Q) çeperlerin mikrodalgayı soğurma derecesi ile ters orantılıdır. Q faktörünün yüksek olmasının amacı ile genelde kavitenin iç çeperleri iletkenliği yüksek bir metalle kaplanır.

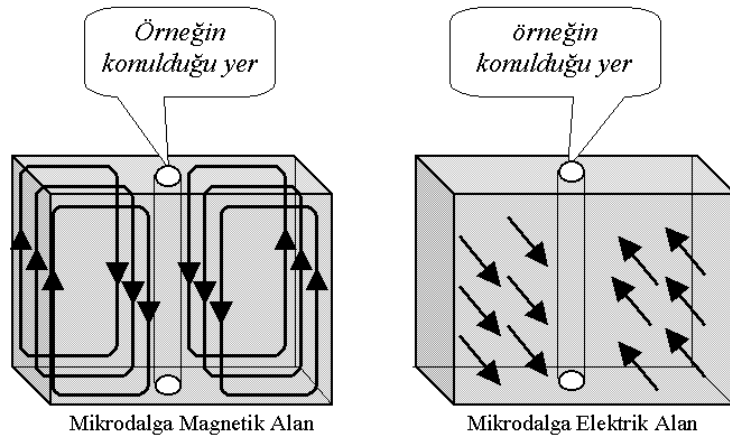


Şekil 3.8. Mikrodalganın dalga klavuzunda uyumlu hareketinin temsili gösterimi.

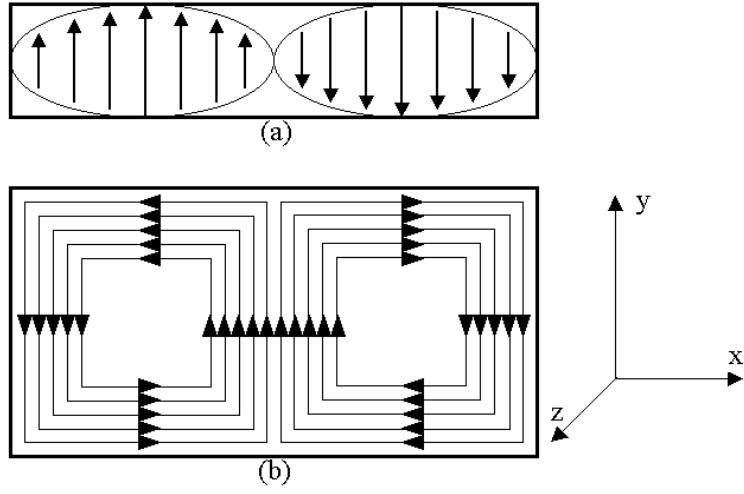
Mikrodalga kaynağından elektromanyetik dalga bir sirkülatör aracılığı içinde örnek bulunan kaviteye gönderilir. T biçimindeki sirkülatörün görevi, kaviteden yansıyan dalgayı kristal dedektöre göndermek ve yine dedektörden gelen yansımaları da başka bir kolla geri göndererek tümünden soğurulmasını sağlamaktır.

Şekil 3.9' da standart bir EPR kavitesinde manyetik ve elektrik alan modelini üç-boyutlu olarak gösterilmiştir. Ancak daha kolay izah etmek için iki boyutta şekil 3.8 ' de görüldüğü gibi TE_{102} modunda titreşen bir mikrodalga kavitesinin elektrik alan (E) ve manyetik alan (B) vektörlerinin kavitenin içindeki dalga biçimleri çizilmiştir.

EPR ölçümleri alınacak kristal numune ya da ince filmler kavite içine yerleştirilmesi için gonyometre olarak adlandırılan ve kendi eksenini etrafında dönebilen bir sistem kullanılır. Özellikle de bazı tür örneklerde örneğin kristal yapısı bilinse bile DC manyetik alana olan bağımlılığın araştırılabilmesi için manyetik iyonun örgüde nereye oturduğu ve dolayısıyla kristal eksen takımına göre z-ekseni hangi doğrultuda olduğunu kestirmek zordur. Bunun için 4π katı açının taranması gerekmektedir. Bazı spektrometreler de bu iş bir miktar kolaydır. Bir taraftan manyetik alanın kristale göre olan yönelmesi yatay bir düzlem içinde değiştirilirken, diğer taraftan incelenen numune adı geçen düzleme dik olan bir başka düzlem içerisinde döndürülmektedir. Dolayısıyla, manyetik alan laboratuvar eksen takımında x -ekseni etrafında ve kristalde z -ekseni etrafında 180° derece döndürülürse, kristalin manyetik alan göre olan tüm katı açılı yönelimleri taranmış olur. Bunun uygun olmadığı spektrometrelerde ise gonyometre sistemi kullanmak yararlı olacaktır.

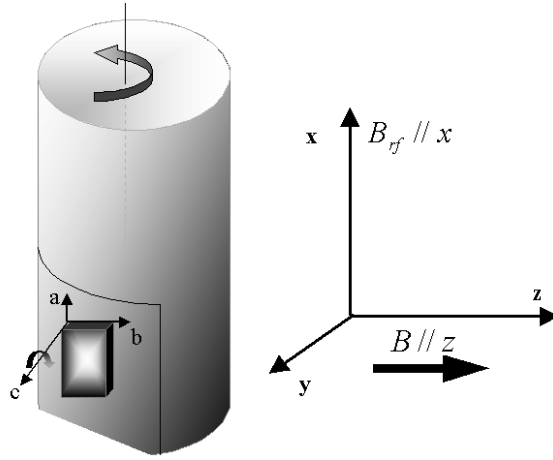


Şekil 3.9. Standart bir EPR kavitesinde manyetik ve elektrik alan çizimlerinin gösterimi.



Şekil 3.10. TE_{102} modunda çalışan dikdörtgen mikrodalga kavitesinin temsili görünümü. a) Elektrik alan bileşeninin xz -düzlemindeki görünümü. b) Manyetik alan bileşeninin xy -düzlemindeki görünümü.

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi, ölçüm yapılacak örnek numunenin konulacağı yere vakum gres yağı ile tutturularak numunenin kristal eksen takımında c -ekseni etrafında kolay bir şekilde dönmesi sağlanır. Gonyometrenin dönme eksenini manyetik alan diktir. Her iki eksen takımına göre dönme işleminin otomatik olarak çalışan bir düzeneyle sağlanması idealdir. Ancak içine girdiği kavitenin Q -faktörünü negatif olarak etkilemeyen ve yatak üzerinde kristalin sürekli olarak çevrilebilmesini sağlayan bir gonyometre sistemi üretmek kolay değildir. Özellikle düşük sıcaklıklarda yapılan deneylerde kryostanın da işin içine girmesinden dolayı ortaya çıkan hacim sıkıntısını aşmak zor olabilir.



Şekil 3.11. Bir kristalin eksenlerine göre ESR ölçümlerinin yapılışının temsili gösterimi

3.4.2. ESR deneyinde mıknatıs sistemi

Enerji seviyelerinin ayrılması ve rezonans olayının gerçekleşebilmesi için gerekli olan durgun manyetik alan, mıknatıs sistemi tarafından üretilir. Bu sistemin temel elemanları bir çift elektromıknatıs ve bunları besleyen doğru akım güç kaynağıdır. Deneysel olarak kullanılan spektrometrede 0-20 kG aralığında değişen değerlerde durgun manyetik alan üretebilmektedir.

Elektromıknatısın oluşturduğu manyetik alan mıknatısın kutuplarından biri üzerine konmuş olan ve Hall etkisine göre işleyen bir kristalin kullandığı servo olarak adlandırılan sistemle kontrol edilir.

Özellikle yüksek manyetik alan değerlerinde ki ısınmayı önleyebilmek için sistem devamlı olarak su dolaşımı ile soğutulmaktadır. Mikrodalga kavitesi mıknatısın kutupları arasındaki tam orta kısma yerleştirilerek B_0 durgun alanı ile mikrodalganın manyetik bileşeninin dik olması sağlanır.

3.4.3. ESR deneyinde modülasyon ve dedeksiyon sistemi

Spektrumu alınan numunenin mikrodalgadan soğurduğu enerjinin kaybedilmesi bu sistemle yapılmaktadır. Durgun manyetik alan ve mikrodalga frekans değerleri rezonans bölgesinin dışındayken, mikrodalga enerjisi kaviteden yansiyarak kristal dedektörüne gider. Dedektör üzerine gelen mikrodalganın gücünün kareköküyle orantılı olarak çıkış akımı verir. Rezonans olayı gerçekleştiği an ise yansiyarak dedektöre gelen güç azaldığından çıkış akımı değişir. Klystron ışın frekansını taraması durgun manyetik alanın değişimine göre daha zor olduğundan, pratikte genel olarak ikinci yol izlenerek rezonans elde edilir. Bu da yavaş bir şekilde doğrusal olarak taranan durgun manyetik alan üzerine, genliği, örneğin rezonans yarı eğri genişliğine göre çok küçük olan, sinüzoidal bir modülasyon alanı bindirilerek sağlanır. Bu alan, numunenin içinde bulunduğu kavitenin, genelde iç yüzeylerine düzlemleri elektromıknatısın kutuplarına paralel olacak biçimde yerleştirilen iki bobin tarafından üretilir. Kullanılan spektrometrede bu modülasyon alanı 50 mG'dan 32 G' a kadar değişebilmektedir.

Araştırılacak numunenin enerjisindeki belirsizlik, uygulanan durgun alanın tam manada homojen olmaması ve klytron tarafından üretilen mikrodalganın tek frekansta olmaması gibi birçok sebepten dolayı, rezonans geçici sabit tek bir B_0 değerinde olamaz. Bunun yerine rezonans soğurması B_0 'ın etrafında ΔB karakteristik aralığında bir bölgede gerçekleşir. Soğurma eğrisinin şekli, manyetik alana göre incelenen numunenin özelliklerine bağlı olarak ya Gaussian ya Lorentzian veya her ikisinin karışımı olabilir. O halde durgun manyetik alana, genliği rezonans eğri genişliği yanında küçük olan bir sinüzoidal alan bindirilirse, yani, rezonans sinyali modüle edilirse, kristal dedektörün çıkışı modülasyon alanı ile aynı frekanslı ve genliği rezonans eğrisinin bulunan noktasındaki eğimi ile orantılı sinüzoidal bir sinyal olur.

Kristal dedektörden gelen bu sinyal dar bantlı bir yükselteçten geçirildikten sonra, faz duyarlı bir dedektörde modülasyon sinyali ile karşılaştırılır.

Faz duyarlı dedektörün çıkış şiddeti rezonans eğrisinin bulunan noktadaki eğimi ile orantılı bir doğru gerilimdir. Bir filtreden geçtikten sonra bu doğru gerilim iki eksenli kaydedicinin düşey eksenine uygulanır. Kaydedicinin yatay eksenine ise, durgun manyetik alanın doğrusal değişimine imkan veren sistem, mekanik olarak bağlanmıştır. Böylece kaydedicinin çizgi eğri soğurma eğrisinin alana göre birinci türevi olmuş olur. Keydedilen spektrumdaki gürültüyü azaltmak için modülasyon alanının frekans değeri yüksek tutulabilir. Ancak kavite içinde yüksek frekanslı modülasyon alanları oluşturmak çok kolay değildir. Bunun benzeri teknik problemlerden dolayı genelde 100 kHz'lik bir modülasyon frekansı optimum olarak bir çok spektrometrede kullanılır.

3.5. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)

VSM sistemi, güç kaynağı, kontrol panelleri gibi elektronik kısımlar ile örnek titreştirici, elektro mıknatıs ve bunlara bağlanmış bir bilgisayardan oluşur. Ayrıca elektro mıknatısa bağlı bir soğutma sistemi kullanılmaktadır.

Bu metodun kurulum temeli bobin yakınlarındaki örnek titreştiği zaman bobindeki akım değişimine bağlıdır. Şekilde görüleceği gibi örnek çubuğun sonuna bağlanır. Çubuğun diğer ucu bir hoparlöre bağlanmıştır. Hoparlörün içinden geçen akım çubuğu ve örneği yaklaşık 80 döngü/saniye lik bir frekansla titreştirir. Titreşim genliği manyetik alana dik yönde 0.1 mm dir.

Örneğin osilasyon yapan manyetik alanı dedeksiyon bobinlerinde alternatif bir elektro-motor-kuvvet (emk) indükler. Titreşen çubuk aynı zamanda bir referans örneği de taşır. Bu örnek çubuğun üst tarafına yakındır ve küçük bir sürekli mıknatıs yapısındadır. Bu örneğin osilasyon yapan alanı, iki referans bobininde diğer bir emk indükler. Bu iki grubun voltajları karşılaştırılır. Aradaki fark örneğin manyetik momenti ile orantılıdır. Bu işlem titreşim genliği ve frekanstaki ölçümleri hassas yapacaktır.

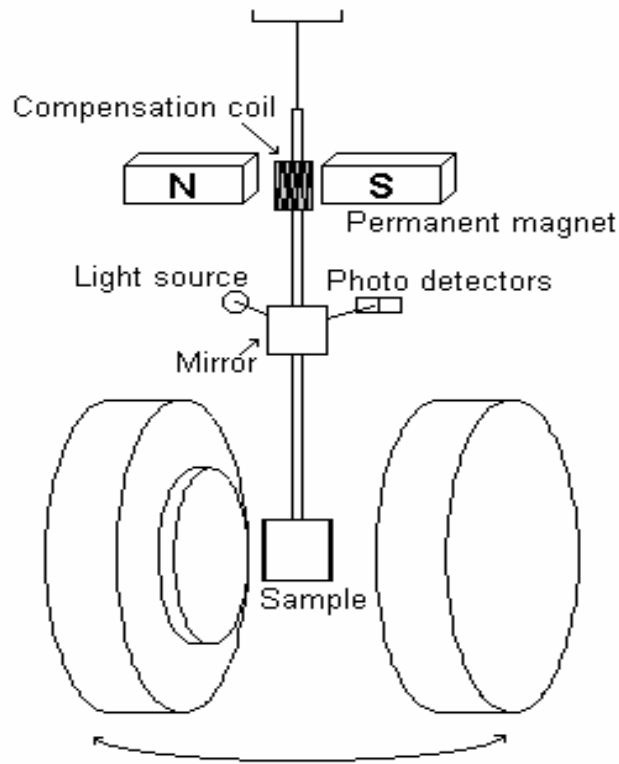
VSM ile manyetizasyonun direkt ölçümü yapılabilir. Algılayıcı bobinler, arasındaki boşlukta örnek varken ve örnek yokken ölçülen manyetik indüksiyon arasındaki fark da hesaplanabilir. Bu ölçüm sonucu elde edilen veriler uygulanan manyetik alana göre manyetizasyonun nasıl değiştiğini vermekle sınırlıdır. Farkın ölçüm yapıldıktan sonra elde edilen verilerin keyfi değerler olmaktan çıkması için bir standarda göre değerlendirilmesi gerekecektir.

Örneğin gerçek manyetizasyon değerinin ortaya konması için sistem manyetik moment değeri bilinen nikel (Ni) standart ile kalibre edilebilir. Bu kalibrasyonda, örnek boyutlarına benzer Ni standart kullanılır. Ni standardın bilinen manyetik moment değerinin, VSM ile ölçülen manyetik moment değerine oranı kalibrasyon sabiti olarak hesaplanır ve diğer ölçümlerde kullanılarak örnekler için gerçek manyetik moment değerleri ortaya konur. Kalibrasyondan sonra VSM, tüm ölçümler için aynı hesaplamayı yaparak ölçülen örnekler için gerçek manyetik moment değerlerinin, uygulanan manyetik alana karşı değişimini verir. Bu kalibrasyondan farklı olarak, her ölçümden önce sistemi ölçüm yapılan şartlara uygun hale getirmek için kalibre etmek gerekir. Bunun için de örneğin boyutlarına benzer Ni standart kullanılır. Kalibrasyonun ile örneğin algılayıcı bobinler arasında en sağlıklı ölçüm alınacak konuma getirilmesi sağlanır. Bu konumda ölçümlerin duyarlılığı kontrol edilir, ölçüm sonuçlarından çıkarılmak istenen katkılar belirlenir.

Kalibrasyon tamamlandıktan sonra örnek, pyrex örnek tutucunun ucuna yerleştirilip örnek tutucu titreştiriciye takılır. İki tür örnek tutucu ile örnekler yatay (manyetik alan film yüzeyine paralel) ve düşey (manyetik alan film yüzeyine dik) olarak yerleştirilip ölçüm yapılabilir. Örnek tutucunun istenen açılarla döndürülmesiyle farklı yönlerde uygulanan manyetik alan altında ölçüm yapmak da mümkündür. İstenen değerler arasında istenen aralıklarla uygulanan manyetik alana karşı ölçülen manyetik moment değerleriyle örneğin histerisiz eğrisi elde edilir. Bu metot çok yönlüdür ve hassastır.

Hem zayıf, hem de güçlü manyetik malzemelere uygulanabilir. Bu alet 5×10^{-5} erg/O elik manyetik momentteki bir değişimi dedekte edebilmektedir. Fakat elektronik ölçüm devreleri bu sistemi diğerlerine göre çok pahalı yapmaktadır.

Manyetik yumuşak bir malzemenin mıknatıslanması veya histerisisinin belirlenmesinde genelde uygun değildir (Çöktüren 2008).



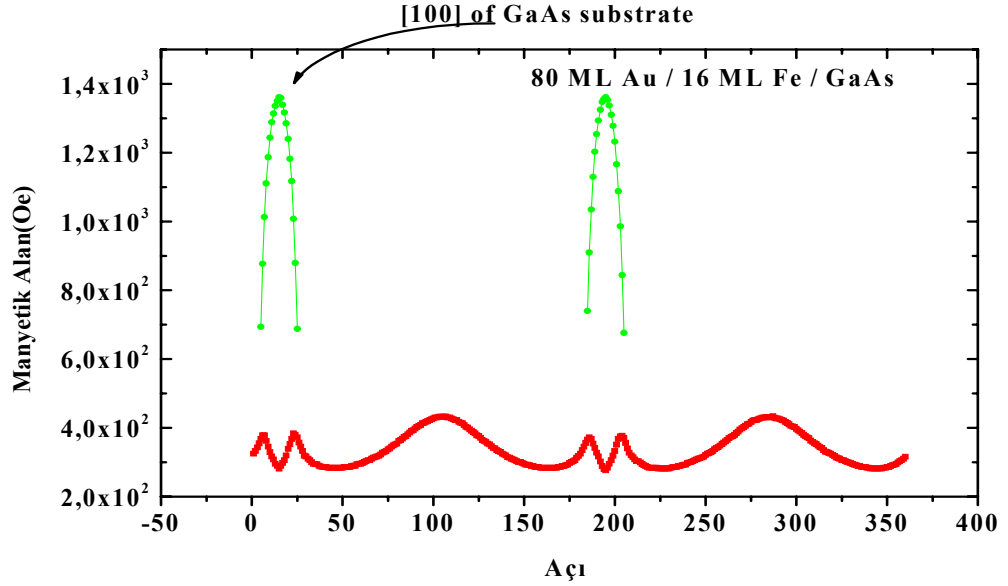
şekil 3.12. VSM şematik gösterimi



Şekil 3.13. Çalıştığımız VSM Laboratuvarı

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

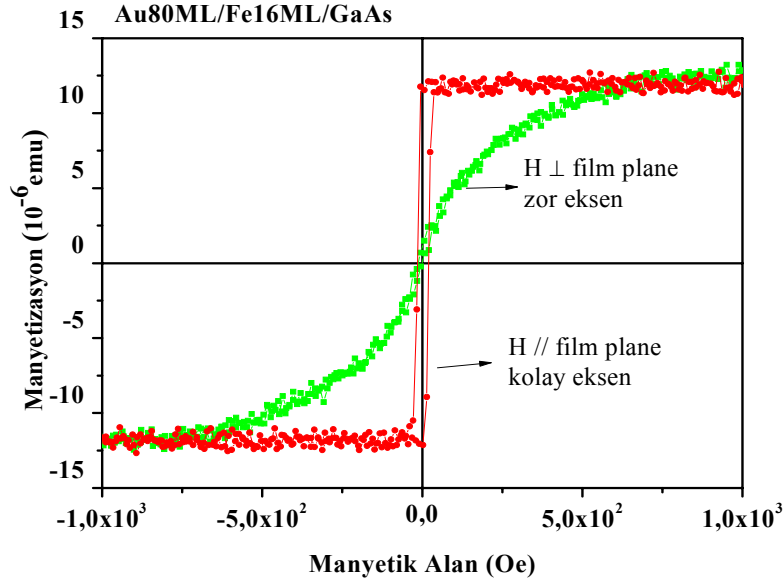
FMR ölçümleri, düzlem içi geometri (IPG) ve düzlem dışı geometri (OPG) olmak üzere iki farklı geometride yapıldı. In plane geometride zemine yatay olarak film örnek tutucusunun alt yüzeyine yerleştirildi ve statik manyetik alan film düzlemi içinde kalacak şekilde tarandı. Out of plane (düzlem dışı) geometride örnek tutucunun önüne yerleştirildi. Bu geometride mikrodalganın manyetik alan bileşeni daima film düzleminin içinde uzanmaktadır. Ölçüm esnasında statik manyetik alan örnek düzleminde yüzey normaline doğru döndürülmüş ve manyetik alan ve film normalinin arasındaki açının fonksiyonu olarak ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.1. 80 ML Au/16 ML Fe/GaAs yapısındaki filmin IPG’de ve oda sıcaklığında alınan FMR spektrumlarından okunan rezonans alanlarının açıya bağımlılığı.

80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin düzlem içi geometri ve oda sıcaklığında alınan FMR spektrumlarından okunan rezonans alanlarının açıya bağlı değişimini şekil 4.1’de görülmektedir.

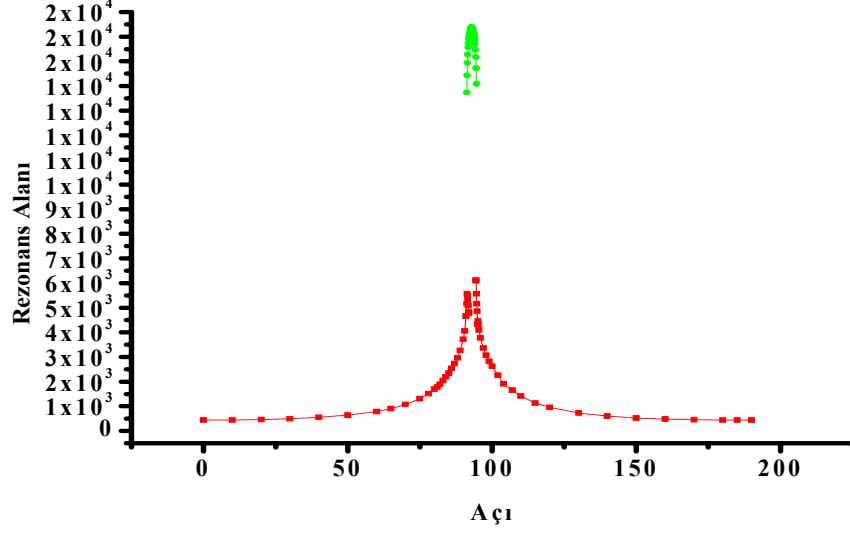
FMR spektrumlarının açısız bağımlılığı dört katlı ve iki katlı in plane anizotropilerinin varlığı ile açıklanabilmektedir. Yazılan simulasyon programı kullanılarak yapılan fit sonucunda; GaAs alttaşın [100] kristal eksenı boyunca bu örneğın güçlü düzlem içi uniaxial anizotropi gösterdiği, yine bu eksende zayıf düzlem içi kübik anizotropi gösterdiği bulunmuştur.



Şekil 4.2. Oda sıcaklığında 80 ML Au/16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin IPG ve OPG'deki manyetik histeri eğrileri.

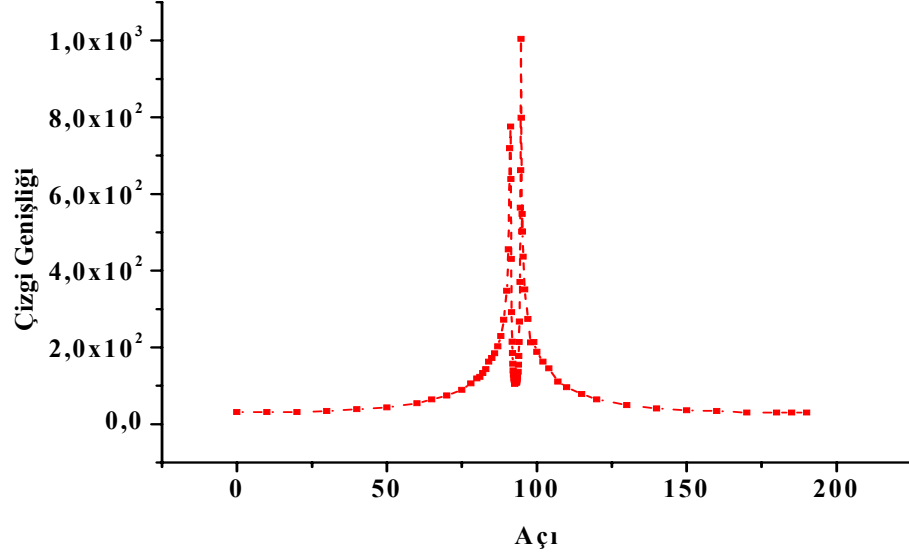
80 ML Au/16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin oda sıcaklığında ve manyetik alana paralel ve dik konumdaki VSM sonuçları şekil 4.2'de görülmektedir. Şekilde kırmızı renkle gösterilen değişim eğrisi ile manyetik alanın film düzlemine paralel olduğu durumda (kolay eksen) elde edilen manyetik histeri eğrisi gösterilmiştir. Siyah noktalardan oluşan eğri ise manyetik alanın film düzlemine dik olduğu durumda (zor eksen) kaydedilen histeris eğrisini göstermektedir. Kolay eksende ölçülen histeride görüldüğü gibi çok küçük alanda örnek doyuma gitmektedir. M_r/M_s oranı bire yakındır. Yani kare şekilli histeri kolay ekseninde elde edilmiştir. Fakat zor ekseninde görüldüğü gibi yaklaşık 1000 Oe'lik manyetik alanda örneğin mıknatıslanması doyuma gitmektedir.

Bu ekseninde mıknatıslanmayı döndürücü alan (coercive field) yaklaşık sıfır O_e civarındadır. Bu davranış zor ekseninde mıknatıslanma alanının şiddetinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.3. 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin OPG’de ve kolay ekseninde alınan FMR spektrumlarından okunan rezonans alanlarının açıya bağlılığı.

Şekil(4.3) 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin OPG’de ve kolay ekseninde alınan FMR spektrumlarından okunan rezonans alanlarının açıya bağlı değişimini göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, manyetik alanın film normaline dik ve paralel olduğu açılarda tek FMR spektrumu elde edilmiştir. FMR ölçümleri kolay ekseninde yapıldığı için manyetik alanın film normaline paralel olduğu açıda FMR spektrumundan okunan rezonans alan değeri yaklaşık 16500 O_e olarak belirlenmiştir.



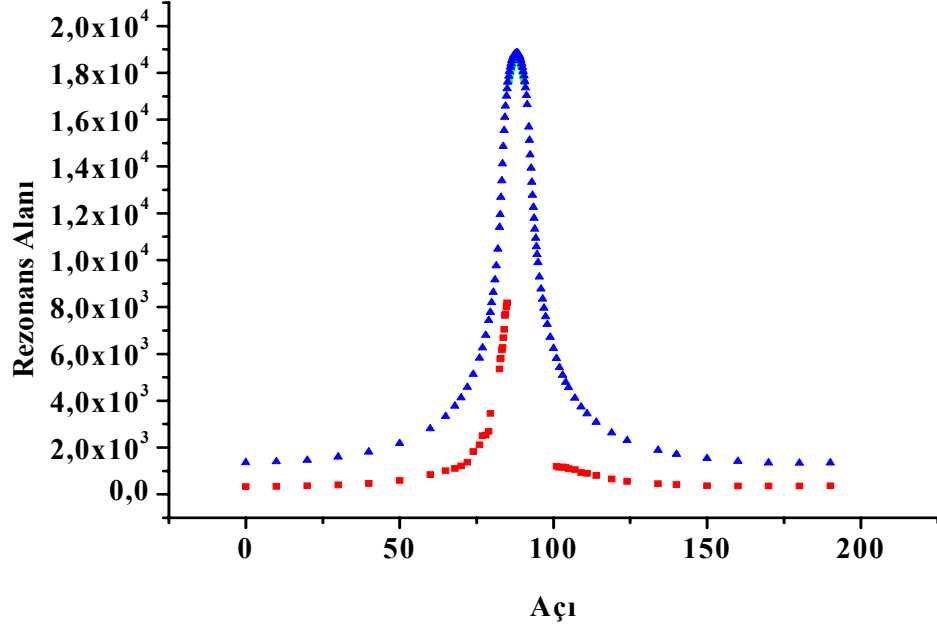
Şekil 4.4. 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin OPG’de ve kolay ekseninde alınan FMR spektrumlarından okunan çizgi genişliklerinin açığa bağımlılığı.

Bir malzemenin FMR spektrumunun çizgi genişliğini

$$\Delta H_{pp}(\omega) = \Delta H_{inhom} + \Delta H_{hom} \quad (4.1)$$

denkleminde bağımlı olarak inceleyebiliriz. Burada ΔH_{inhom} , örnek kusurlarına bağımlı olarak homojensizlikten kaynaklanan çizgi genişlemesi, ΔH_{hom} , kaliteli bir örneğin çizgi genişliği, $\Delta H_{pp}(\omega)$: FMR spektrumunun tüm katkıları içeren deneysel çizgi genişliğini göstermektedir.

(Şekil 4.4) FMR spektrumlarının çizgi genişliklerinin açığa bağımlı olarak değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi çizgi genişliklerinin açığa bağımlılıkları çok fazladır ve manyetik alanın film düzlemine dik ve paralel olduğu açılar arasındaki ara açılarda, çizgi genişliği artmaktadır. (4.1) denkleminde göre, çizgi genişliğine homojensizliğin katkısından dolayı çizgi genişlikleri ara açılarda artmaktadır.



Şekil 4.5. 80 ML Au / 16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin OPG’de ve zor eksende alınan FMR spektrumlarından okunan rezonans alanlarının açıya bağımlılığı.

80 ML Au/16 ML Fe /GaAs yapısındaki filmin zor eksende rezonans alanının dönme açısına bağılı olarak değişimi (şekil 4.5)’de görülmektedir. Grafikten de görüleceği üzere , IPG ve OPG’de iki FMR spektrumu tespit edilmiştir. Yazılan bilgisayar programından elde edilen fit parametreleri ise,

$$H_r=3150$$

$$M=1215$$

$$H_{in}=-140$$

$$H_{ax}=235$$

$$L_w=100$$

şeklindedir.

Kolay eksende yapılan FMR ölçümüne göre zor eksende yapılan ölçümdeki rezonans değeri daha fazladır. Ayrıca, filmlerin güçlü açısal bağımlılığı demanyetizasyon alanından kaynaklanan şekil anizotropisindedir.

GaAs yarıiletkenine farklı kalınlıklardaki ferromanyetik malzemeler dopp edilerek elde edilen numunelerin, spin transistör verimliliğine katkısı incelenmiştir. Fakat tek bir numune üzerinde yapılan ölçümler hedeflenen sonuca ulaşamamıştır.

GaAs veya farklı yarıiletken malzemeler üzerine dopp edilen farklı kalınlıklardaki ferromanyetik malzemelerin manyetik özelliklerinin ölçülmesi ve karşılaştırma yapılması spin transistör üzerinde yapılan araştırmalara katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

A. F. M. nor *et al*, "Noise In Nifeco/Cu spin valve sensors," *Sens. Actuators A*, vol 81 pp 67-70-,2000

Apaydın F. "Manyetik Rezonans" *Hacettepe Üniversitesi Yayınları*,1961

B. S. Deaver And W. M. Fairbank, "Experimental evidence for quantized flux in supereconducting eyelinders," *Phys. rev. lett.*, vol. 7, pp.43-46, 1961.

C. A. Dartora And G. G. Cabrera, "Quantum Transport Properties of a Lwo-Channel Alomic-Sized Magnetic Contact," *Phys. Rev. B*, vol. 72, P.064 456/1 -064 456/119, 2005.

Charles, K. Introduction to solid state physics, 8th ed., John Wiley & Sons inc.,New York (2005).

Çöktüren E. "Ferromanyetik Filmlerde Oluşan Yüzey Manyetik Anizotropinin Numereik Çözümlemesi" *Trakya Üniversitesi,Edirne*,2008.

Charles, K. , Introduction to solid state physics, 7 Th edition, John Wiley & Sons, inc. New York, (1996)

Demiray A.S "Nano Boyuttaki Bazı $\text{La}_{0.7}(\text{Sr}, \text{Ca})_{0.3}\text{mno}_3$ İnce Filmlerin Erromanyetik Rezonans İncelemeleri" *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*,2009.

E. Y. Tsymbal, O. N. Mryasov, And P. R. Leclair, "Spin-Dependent Tunnelling in Magnetic Tunnel Junctions," *J. Phys.: Cond. Malter.*, vol.15, pp. R109-R142, 2003.

Froitova D.,*Phys,Stot Sol.*,124,587-592,1984.

G. Binasch *et al*, "Enhanced Magnetoresistance in Layered Magnetic Structures with Antiferromagnetic Interlayer Exchange," *Phys. Rev. B*, vol. 39, pp. 4828-4830, 1989.

G.Tatara *et al.*, "Domain Wall Scattering Explains 300% Ballistic Magnetoconductance of Nanocontacts," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 83, pp.2030-2033, 1999.

H. D. Chopra And S. Z. Hua, "Ballistic Magnetoresistance Over 3000% in Ni Nanocontacts At Room Temperature," *Phys, Rev, B*, vol. 66, pp.020403/1-020403/3, 2002

http://Sciart.Karaelmas.Edu.tr/Bolumler/Fizik/Fizik_Bolum.htm,2007

Jiles D, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman, Hall London, (1994)

J.E Lenz, "A Review Of Magnetic Sensors," *Proc. Ieee*, vol. 78, No. 6, J. S. Moodera *et al*, "Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, pp.3273-2376, 1995.

J. Moussa *et al*, "Response of an Extraordinary Magnetoresistance Read Head to a Magnetic Bit," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, pp. 1110-1114, 2003

L.James and Alan S. Edelstein'' Magnetic Sensors and Their Applications'' *Ieee Sensors Journal*, vol. 6, No. 3, June 2006

M. N. Baibich *et al*, "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr M. J. Carey *et al*, "Spin Valves Using Insulating Cobalt Ferrite Exchange-Spring Pinning Layers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 1044-1046, 2002

M. Pannetier *et al.*, "FemtoTesla Magnetic Field Measurement with Magnetoresistive Sensors," *Science*, vol. 304, pp. 1648-1650, 2004.

Magnetic Superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, pp. 2472-2475, 1988.

N. Garcia *et al.*, "Ballistic Magnetoresistance in a Magnetic Nanometer

Sized Contact: An Effective Gate For Spintronics," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, pp. 4550-4552, 2001

O. M. J. V.T. Erve, "Transfer Ratio Of The Spin-Valve Transistor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 3787-3789, 2002

Özdemir, M. Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi* (1991)

Physics Of Manganites (Fundamental Materials Research), T. A Kaplan, S.D Mahanti

P. Ripka, "Advances in Fluxgate Sensors," *Sensors and Actuators A*, vol. 106, pp. 8-14, 2003.

R. Cantor, "Squid's And Emerging Applications," *Supercond. Cryo-Electron.*, vol. 13, pp. 16-22, 2001.

R. Doll And M. Nâbauer, "Experimental Proof Of Magnetic Flux Quantization in a Superconducting Ring," *Phys Rev. Lett.*, vol. 7, pp. 51-52, 1961.

R. J. M. V.D. Veerdonk *at al.*, "L/F Noise in Anisotropic and Giant magnetoresistive Elements," *J. Appl. Phys.*, vol. 82, pp. 6152-6164, 1997.

Ramadan Ebrahim Ali Shaioub Phd Thesis, *Universiti Putra Malaysia* (2004)

Robert Gunnarsson Phd Thesis, Chalmers University of Technology (2004) R.S. Popovic, *Hall Effect Devices*. Bristol, U.K.: Inst. Physics, 2004.

R. S. Beach and A. E. Berkowitz, "Giant Magnetic Field Dependent Impedance of Amorphous FeCoSiB Wire," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, pp. 3652-3654, 1994.

S. A. Solin *et al.*, "Enhanced Room-Temperature Geometric Magnetoresistance in Inhomogeneous Narrow-Gap Semiconductors," *Science*, vol. 289, pp. 1530-1532, 2000.

S. Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism*, Oxford University Press (1994)

Soohoo R.F., General spin wave dispersion relations, *Phys. Rev.*, 120, 6, pp 1978, 1960

Soohoo R.F., *Magnetic Thin Films*, Harper & Row Publish inc., 1965

Slichter C.P., *Principle Of Magnetic Resonance*, Harper and Row, New York, 1963

S. Tumanski, *Thin Film Magnetoresistive Sensors*.

Bristol, U.K.: Inst. Physics, 2000. S. Xiao *et al.*, "Giant Magnetoimpedance and Domain Structure in FeCoSiB Films and Sandwiched Films," *Phys. Rev. B*, vol. 61, pp. 5734-5739, 2000.

Tacer E. 2004 Ders Notları İ.T.Ü Elektrik Elektronik Fakültesi, İstanbul

Tapan Chatterji, *Colossal Magnetoresistive Manganites*, Kluwer Academic Publishers, (2004)

T. R. McGuire, "Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3d Alloys," *Ieee Trans. Magn.*, vol. 11, No. 4, pp. 1018-1038, Jul. 1975

V. Pizzella *et al.*, "Squid Systems for Biomagnetic Imaging," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. R79-R114, 2001.

W. F. Egelhoff, Jr. *et al.*, "Artifacts in Ballistic Magnetoresistance Measurements," *J. Appl. Phys.*, vol. 95, pp. 7554-7559, 2004.

W. H. Campbell, *Introduction to Geomagnetic Fields*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1997.

X. P. Li *et al.*, "Enhancement of Giant Magnetoimpedance Effect of Electroplated NiFe/Cu Composite Wires By De Joule Annealing," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, pp. 7626-7630, 2003.

Yalçın, N. "Manyetik İnce Filmlerde Ferromanyetik Rezonans İncelemelr" Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, 1997.

Yilgin, R. Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü* (1999)

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Ankara’ da doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi farklı şehirlerde okudu. 2003 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde eğitim öğrenimine başladı. Mezuniyetinden sonra Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisansa başladı. 2010 yılında Akbank T.A.Ş’de göreve başlamış olup halen aynı kurumda görevine devam etmektedir.