

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FERROMANYETİK REZONANS TEKNİĞİ İLE
GÖRÜNTÜLEME (FMRI)**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Atilla ÜNAL

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr.
Nigar Berna TEŞNELİ**

Haziran 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FERROMANYETİK REZONANS TEKNİĞİ İLE
GÖRÜNTÜLEME (FMRI)

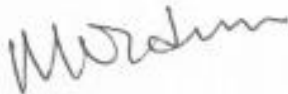
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Atilla ÜNAL

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

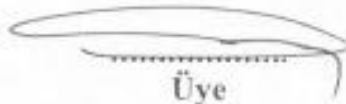
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 11/06/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



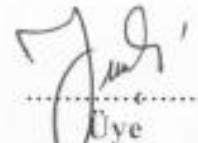
Jüri Başkanı

Doç. Dr. Mustafa Özdemir



Üye

Prof. Dr. Osman Gerezoğlu



Üye

Yrd. Doç. Dr. N. Berna
Teşneli

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, şu ana kadar üzerinde teorik olarak çalışılmış olan manyetik rezonans konusunda uygulama yapılarak bu rezonans değişiminin baz alındığı görüntüleme teknolojisi geliştirilmiştir.

Çalışmasının fikir olarak ortaya atılmasından uygulamanın sonuçlanmasına kadar sabırlı desteklerini ve değerli bilgi birikimlerini paylaşan, gerekli yönlendirmeleriyle tez çalışmasının sonuçlanmasında desteklerini esirgemeyen değerli danışmanım Yard. Doç. Dr. Nigar Berna TEŞNELİ'ye, fikrin uygulanması konusunda ekipman desteği sağlayan ve desteklerini sunan TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'ne, Uluslararası Yüksek Teknoloji Laboratuvarı (UYTL) Müdürü Prof. Dr. Alexey VERTII' ye ve TÜBİTAK MAM Başkan Yardımcısı Sn. Doç. Dr. Sunullah ÖZBEK'e , tezi aldığım ilk günden beri bıkmıp usanmadan FMR anlatan Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR'e, tezin tashihinde emeğini esirgemeyen kadim dostum Mustafa TEKBAŞ'a çok kısa sürede yazılmasına yardımcı olan değerli dostlarım UYTL personeli ve öğrencilerine, aileme akşam çalışmalarında beni sonuna kadar destekleyen hayatımdaki iki çok değerli kadın; Annem ve müstakbel eşime teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Not: Tezin cihaz altyapı desteği 5075519 Nolu "İleri Teknoloji için Elektromanyetik Tomografi Görüntüleme Cihaz ve Sistemleri" DPT projesinden sağlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
TEMEL KAVRAMLAR VE BİLGİLER.....	3
2.1. Ferromanyetizma.....	3
2.2. Manyetik Rezonansı.....	4
2.3. Spin Dalgaları.....	6
2.4. Spin Dalga Rezonansı.....	11
2.5. Tahribatsız Muayene ve Girdap Akımları (Eddy Current).....	14
2.5.1. Tahribatsız muayene.....	14
2.5.2. Girdap akımları (eddy current) muayenesi.....	16
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE VERİLER.....	19
3.1. FMR Probu Hazırlanması.....	20
3.2. Prob Yapısı ve İşlemi.....	23
3.3. Rezonans Şartı.....	26

3.4. Rezonans Şartının Genel İfadesi.....	27
3.5. Şekil Anizotropisinin Rezonans Frekansına Etkisi.....	31
3.6. Mikroşerit Hatlar ve Özellikleri	33
3.7. Mikroşerit Hatların Taban Malzemelerinin Seçilme Koşulları.....	35
3.8. Mikroşerit Hat Tasarımı.....	37
3.9. FMR Spektroskopisi	42
3.10. Farklı Malzemeler İçin Spektroskopisi Geliştirilmesi.....	46
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

E	: Elektrik Alan Bileşeni
FMR	: Ferromanyetik Rezonans
G	: Spektroskopik Yarılma Faktörü
H	: Manyetik Alan Bileşeni
J	: Değiş Tokuş İntegrali
M	: Doyum Magnetizasyonu
MD	: Mikrodalga
MRI	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
N_d	: Demagnetizasyon Faktörü
NDT	: Tahribatsız Muayene
PTFE	: Teflon
RF	: Radio Frekansı
SDR	: Spin Dalga Rezonans
SHF	: Süper Yüksek Frekans Bandı
SNR	: İşaret Gürültü Oranı
M	: Spin Açısal Momentumu
M_b	: Bohr Manyetonu
VNA	: Vektör Network Analizör
ω_0	: Öz Titreşim (Larmour) Frekansı
YIG	: Yttrium Ion Grnet
YSD	: Yüzey Spin Dalgaları
Z_0	: Karakteristik Empedans
E_r	: Bağlı Dielektrik Sabiti
3D	: Üç Boyutlu
N_d	: Örneğin Geometrisine Bağlı Demanyetizasyon Faktörü
N_x	: Örneğin Geometrisine Bağlı X Ekseni Demanyetizasyon

	Faktörü
N_y	Örneğin Geometrisine Bağlı Y Eksenli Demanyetizasyon Faktörü
N_z	Örneğin Geometrisine Bağlı Z Eksenli Demanyetizasyon Faktörü
U_d	Heisenberg Değiş tokuş Etkileşme Enerjisi
J	Değiş tokuş (Exchange) İntegrali
N	Özdeş Spin Sayısı
S_p	Spindalga
P	Spin Numarası
G	Spinin Açıl Sal Momentumu
M_p	Spektroskopik Yarılma Faktörü
B_p	Manyetik Momentin Sahip Olduğu Enerji
H	Plank Sabiti
U	Spin Dalga Genliği
V	Spin Dalga Genliği
Lift Off	Probun Test Yüzeyinden Uzaklığı
R	Probun Giriş Empedansı
X	Probun Giriş Reaktansı
M	YIG Doyum Magnetizasyonu
H_{dc}	Harici Mıknatıs Tarafından Oluşturulan DC Alan
H_{RF}	Bobinin Kuplajı Tarafından Oluşturulan RF Alan
M_{rf}	Yüzeye Dik Hareket Eden Zamana Bağlılık Terimi
I	Bobine Uygulanan Akım
H_{rf}	Kuplaj Döngüsünün Dinamik Alanının Genliği
E_i, E_k	Manyetik Alan Etkisiyle Yarılan Enerji Seviyeleri
W_{ik}	Geçiş Frekansı
H_0	Zeeman Yarılanmasını Sağlayan Sabit Manyetik Alan
M	Mıknatıslanma Vektörü
H_m, H_θ, H_r	Dış Manyetik Bileşen Vektörü
F	Toplam Efektif Manyetik Alan Serbest Enerji Yoğunluđu
G	Lande Faktörü

F_{mc}	:	Kristal Anizotropi Enerjisi
F_{me}	:	Manyeto Elastik (Gerilim) Anizotropi
F_{ex}	:	Değiş-Tokuş (Exchange) Enerjisi
F_D	:	Domain Duvarı (Domain Wall) Enerjisi
H_{dc}	:	Zeeman Enerjisi İkinci Terimi
$H_{(l)}$:	Etkin İç Alan
$H_{(0)}$:	Uygulanan Manyetik Alan
In Plane	:	Örnek Düzleminde
Out Of Plane	:	Örnek Düzlemine Dik Olarak

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Birçok bölgeden oluşmuş bir ferromanyetik madde içinde spinlerin yönelimleri.....	4
Şekil 2.2. Komşu spinlerin yönelmesine göre ortaya çıkan spin dalgaları.....	9
Şekil 2.3. Basit bir ferromanyetik maddede taban enerji durumunda spinlerin sıralanışı.....	10
Şekil 2.4. a) Uniform modda film kalınlığı boyunca dizilmiş spinlerin dönme hareketinin herhangi bir andaki görünüşü; b) Birinci modda spinlerin dönme hareketinin anlık durumu. (Ortadaki spinin dönme genliğinin daha büyük olduğuna dikkat edilmelidir. Burada L film kalınlığını göstermektedir)	12
Şekil 2.5. Yüzey anizotropi alanının sonsuz olması durumunda filmin içindeki spin dalga modlarının davranışı, burada yatay eksen film kalınlığı boyunca alan ekseni, dikey eksen de mıknatıslanmanın enine bileşenin genliğini temsil etmektedir.....	13
Şekil 2.6. Girdap Akımları Yöntemi Uygulaması.	17
Şekil 2.7. Kapalı devre Girdap Akımı Yöntemiyle Boru Kontrollerinde Hata Tespiti (Boru çapı 125,7mm, hız 150m/dak, t:4,4mm, Malzeme: 1.4462 D7, test frekansı: 5kHz, Kazanç: 62dB)	18
Şekil 3.1. Tek ve Farksal Standart Girdap Akım probu ve FMR probu için Lift Off eğrisi (kesikli çizgi) ve akış sinyal çizgisi (kesiksiz çizgi) ve prob çizimleri.....	21
Şekil 3.2. FMR prob yapısı.....	23

Şekil 3.3. Auld tarafından gerçekleştirilmiş olan FMR probun resmi probun alt kısmında samaryum kobalt mıknatıs bulunmaktadır.....	25
Şekil 3.4. H dış manyetik alanı altındaki toplam mıknatıslanması M olan sistem için koordinat eksen takımının gösterimi.....	28
Şekil 3.5. Küre için Rezonans Frekansı.....	32
Şekil 3.6. İnce Film için (H dik) Rezonans Frekansı.....	33
Şekil 3.7. İnce Film için (H paralel) Rezonans Frekansı.....	33
Şekil 3.8. a) 3-boyutlu mikroşerit hat , b) 2-boyutlu mikroşerit hattın kesit görünümü.....	34
Şekil 3.9. Mikroşerit hattın değişik dielektrik malzemeleri için karakteristik empedansın W/h oranı ile değişimi.....	35
Şekil 3.10. TXLINE 2003 programı kullanılarak elde edilen sonuçlar.....	37
Şekil 3.11. Mikroşerit iletim hattının karşıdan kesit görünümü.....	38
Şekil 3.12. Mikroşerit iletim hattının üstten görünümü.....	38
Şekil 3.13. Gerilim duran dalga oranları.....	41
Şekil 3.14. FMR Spektroskopi Düzenegi.....	42
Şekil 3.15. FMR Spektrometrede kullanılan mikroşerit hat (1 örnek düzlemi (in plane), 2 örneğe dik düzlem (Örnek ekseninde, out of plane) ölçüm eksenleri.....	43
Şekil 3.16. FMR Spektrometre Blok Diyagramı.....	44
Şekil 3.17. FMR Spektrometrede Örnek Düzleminde Elde Edilen Rezonans Frekansları.....	44
Şekil 3.18. Ölçülen ve Hesaplanan Rezonans Çukur Değerleri.....	45
Şekil 3.19. Rezonatör kaviteli FMR Spektrometre.....	47
Şekil 3.20. Mikro şerit hatlı FMR Spektrometre.....	47

Şekil 3.21. Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Rezonans Grafikleri.....	49
Şekil 3.22. FMR perturbasyon deneyinin manyetik olmayan iğneyle yapıldığı düzenek.....	50
Şekil 3.23. FMR Düzeneği ile Elde Edilmiş Rezonans Grafiği.....	50
Şekil 3.24. a)Rezonans çukurunun mikroşerit hat iğne arasındaki uzaklığı b) Rezonans çukuru genliğinin mikroşerit hat iğne arasındaki uzaklığı göre değişim grafiği.....	51
Şekil 3.25. Alüminyum Malzeme için a) Mikroşerit Hat İğne arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikroşerit Hat İğne arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.....	53
Şekil 3.26. Pirinç Malzeme için a) Mikroşerit Hat İğne arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikroşerit Hat İğne arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.....	54
Şekil 3.27. Bakır Malzeme İçin a) Mikroşerit Hat İğne arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikroşerit Hat İğne arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.....	55
Şekil 4.1. FMRI Düzeneği a) fotoğrafı ve b) blok diyagram.....	58
Şekil 4.2. 33x33 mm boyutlarında PCB örnek a) Örneğin fotoğrafı, b) 2D FMRI siyah beyaz sonucu c) 2D FMRI renkli sonucu.....	59
Şekil 4.3. 33x33mm boyutlarında PCB örneğe ait 3D FMRI sonucu.....	60
Şekil 4.4. PCB harflerin FMRI sonuçları.....	62
Şekil 4.5. Silikon Alttaş FMRI uygulaması.....	63
Şekil 4.6. Tungsten Alttaş Optik Görüntüsü ve FMRI uygulaması.....	64
Şekil 4.7. Mikroelektronik Devre Parçası FMRI Uygulaması.....	65
Şekil 4.8. Güneş Panelinin FMRI Uygulaması.....	66
Şekil 4.9. Yaprak Parçasınının FMRI incelemesi.....	66

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Tahribatsız muayene deneylerinin makina mühendisliği endüstrisinde uygulama alanları.....	15
--	----

ÖZET

Anahtar kelimeler: Ferromanyetik Rezonans, FMR Görüntüleme, Mikro şerit FMR Prob, NDT

Bu çalışmada manyetik rezonansın (MR) ana ilkesi dikkate alınarak mikro şerit hat üzerine Yttrium Iron Garnet (YIG) küre koyulmuş olan yeni bir tip ferromanyetik rezonatör (FMR) önerilmektedir. Mikro şerit hat benzetimi gerçekleştirilip, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) tekniği özellikle altını çizmek gerekir ki açık elektrodinamik (mikro şerit hat) yapıya sahiptir. Bu yöntemle etkili görüntüleme sistemi tasarımında benzetimle elde edilen özelliklerin elde edilmesi amaçlanmıştır. MRI sistemi FMR perturbasyon yöntemini temel alarak oluşturulur. Çalışma frekans aralığı 1-20 GHz'tir.

Mikroşerit hat FMR spektrometresi kullanılarak FMR deneyleri yapılmıştır. Prob olarak tek kristalli Yttrium Iron Garnet (YIG) küre kullanılmıştır. FMR sinyal perturbasyonu kullanılan örneğin iletkenliğine bağlıdır. Elde edilen görüntüler; üzerinde çalışılan malzemenin (manyetik olmayan malzemeler için) iletkenlik dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Diğer bir yandan malzemenin manyetik olarak homojen olmayan yapısının ortaya çıkarılmasında da kullanılabilir. Bu yöntemin ileride geliştirilecek yeni bir tomografi –Spin Dalga Tomografi (SDT)- için de kullanılabileceği düşünülmektedir.

Bu yaklaşım yarı iletken yonga için tahribatsız muayene yapmak üzere MRI mikroskop yapılmasında da kullanılabilir. Bu yöntemle tungsten ve silikon altaş fabrikasyonu için tahribatsız muayene (NDT) için kullanılmıştır.

FERROMAGNETIC RESONANCE IMAGING (FMRI)

SUMMARY

Key Words: Ferromagnetic Resonance, FMR Imaging, Microstrip FMR Prob, NDT

That Paper have been considered the main principle of Magnetic Resonance (MR) where is fixed Yttrium Iron Garnet (YIG) sphere proposed new type of FMR spectrometer on the bases of micro strip line application. Demonstrated micro strip line simulation of micro strip after for development magnetic resonance imaging (MRI) technique especially should be underlined that we have applied open electro dynamic structure (micro strip line) which shown sufficient properties for creating imaging system obtained results demonstrated efficiency of properties method.

MRI system is based by using FMR perturbation method. It's operated in the frequency range in between 1 to 20 GHz.

FMR observations were done by using strip line FMR spectrometer. Probe has been created by using single crystal yttrium iron garnet sphere. Perturbation FMR signal depending on conductivity of sample. Obtained image is giving information about conductivity distribution of studied objects (for non-magnetic samples). From another hand method may be used for magnetic inhomogeneous mapping. Method considered may be is going to used for creating new kind of tomography –spin wave tomography-.

This approach will be used it for creating MRI microscopy for semi-conductor chips Non Destructive Testing (NDT) controls. In fact this method could be used NDT for tungsten and silicon wafer fabrication.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Spektroskopi; moleküllerin, iyonların ve çekirdeklerin kuantumlanmış enerji düzeylerini inceleyen bir yöntemdir. İki enerji düzeyi arasındaki geçişe karşı gelen soğurma enerjisine bir spektral çizgi ya da spektrum denir. Spektroskopide geçiş frekanslarına karşılık gelen spektrumlar gözlenir ve bu spektrumların yerleri frekans olarak belirlenir. Net bir spine sahip olan elektron ve çekirdek gibi yüklü parçacıklar bir H alanının etkisinde kalınca manyetik moment ile alanın etkileşmesi sonucu dejenere olan enerji düzeyi ikili durumlara yarılr. Bu durumlar arasındaki geçişler $h\nu$ enerjisine sahip yüksek frekanslı bir fotonun soğurarak alt enerji durumundan üst enerji durumuna veya fotonu yayarak üst enerji durumundan alt enerji durumuna geçerler ve bu olay Manyetik Rezonans olarak adlandırılır [1].

Yetmişli yıllarda medikal alanda kullanıma geçmesiyle büyük teknolojik gelişmeler yaşayan manyetik rezonans günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, sadece en yüksek doku kontrastını değil, çok düzlemde kesit alınabilmesiyle önemli avantajlar sağlamaktadır. Canlılarda kullanımı; X-ışını gibi zararlı etkilerinin olmaması da yöntemin değerini artıran önemli bir özelliğidir[2].

Üstünlüklerine karşın, görüntülerinin yorumlanmasındaki zorluk, yöntemi itici kılan önemli bir faktördür. Röntgende ve Bilgisayarlı Tomografide bunu bilmek kolaydır. X-ışınının az düştüğü yerler beyaza yakın, fazla düştüğü kesimler siyaha yakın gri tonlarda görülürler. MR görüntülerinin yorumlanmasını güçleştiren neden görüntülerdeki beyazlık ve siyahlığın bu kadar kolay açıklanamamasıdır[2].

Tezimizle ortaya atacağımız düşüncede ferromanyetik rezonans görüntüleme (FMRI) uygulamaları tıpta şu anda kullanılmakta olduğu gibi çok yüksek bir manyetik alan altında gerçekleşmemektedir.

Bu bölümde MRI yönteminin karmaşık fiziği anlaşılır hale getirilmesi amaçlanmaktadır. MRI; çözünürlüğü, hassasiyeti ve belirliliği çok yüksek bir yöntemdir.

Deneysel Ferromanyetik Rezonans çalışmaları, ilk kez tek bir rezonans çizgisinin dinamiği ile başlamıştır. Bu çalışmalardan sonra Kittel (1948), bir çok rezonans çizgisinden oluşan Ferromanyetik Rezonans spektrumun gözlenebileceğini ileri sürmüştür. Ardından Rado (1954) ilk kez birçok çizgiden oluşan Ferromanyetik Rezonansı “Spin Dalga Rezonansı” (SDR) olarak adlandırdı. Ayrıca 1954 yılında yayınlanan bir başka makalesinde, durgun manyetik alan içindeki herhangi bir manyetik malzemenin dış yüzeylerinde, mıknatıslanma gradyentinden dolayı Yüzey Spin Dalgaları (YSD) oluşacağını ileri sürdü. Spin Dalga Rezonansı hakkındaki bu ilk çalışmalardan sonra Kittel çalışmasında, ince manyetik filmlerin duran spin dalgaları için iyi bir ortam olacağını gösterdi. Yukarıda sözü edilen temel bilgiler ışığında, deneysel olarak spin dalga rezonansı ilk defa 1958 yılında Seavey ve Tannenwald tarafından gözlemlendi[3].

Ferromanyetizma çalışmaları yine bu çalışmalar ışığında başlamış ve ince filmler kullanılarak ferromanyetik rezonans (FMR) elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmalar genelde bu yönde devam etse de *Auld* 1981’de yaptığı çalışmada FMR için YIG küre kullanmış ve rezonans elde etmiştir.

BÖLÜM 2. TEMEL KAVRAMLAR VE BİLGİLER

2.1. Ferromanyetizma

Ferromanyet, bir dış manyetik alanın bulunmaması halinde bile var olan, kendiliğinden oluşmuş net bir manyetik momente sahiptir [4]. Bu manyetik momentin oluşumu, elektron spinlerinin düzenli yönelimine bağlı olarak manyetik momentlerin uyumlu bir şekilde yerleşmiş olduklarını gösterir. Spinler güçlü iç etkileşme nedeniyle paralel durumdadır. Sıcaklık arttıkça gelişi güzel hale gelmeye ve Curie noktası üzerinde paramanyetik malzeme gibi davranmaya başlar. Manyetizasyon eğrisi ve sabit manyetizasyon miktarı, ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin önemli özellikleridir [5].

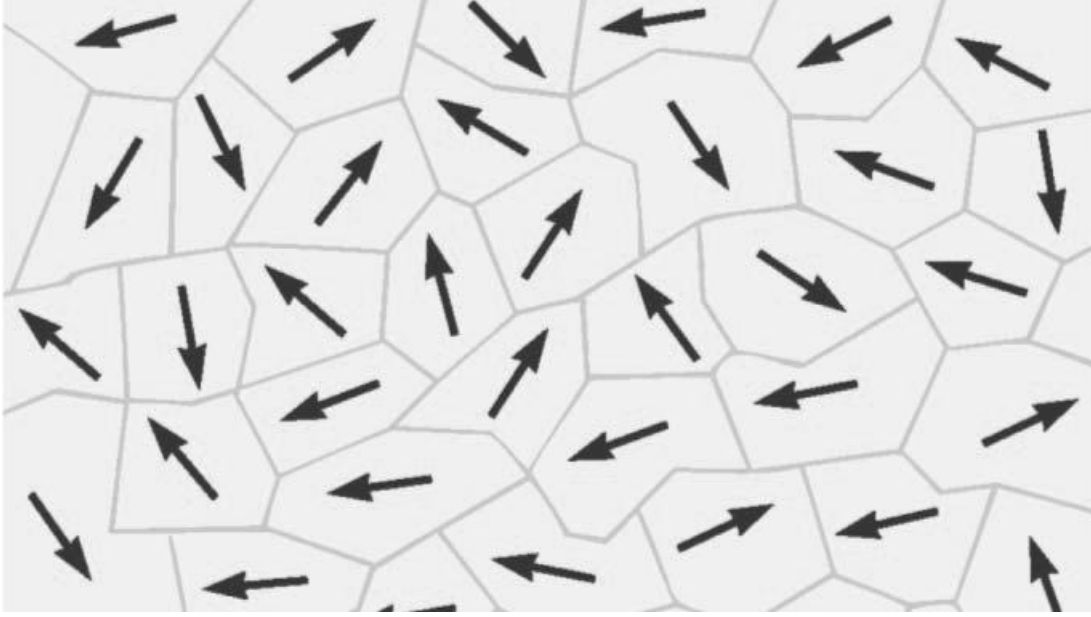
Ferromanyetik maddelerdeki manyetik rezonans, temelde elektron paramanyetik rezonans tekniğine benzer. Ancak ferromanyetik örneklerde değişken manyetik alinganlığın enine bileşenleri çok büyüktür. Bunun nedeni, manyetik alan içindeki ferromanyetik maddenin mıknatıslanmasının, aynı alan değerindeki paramanyetik maddenin mıknatıslanmasından çok daha büyük olmasıdır. Ayrıca incelenen örneğin geometrisi de ferromanyetik örnekler için çok önemli rol oynar. Çünkü mıknatıslanma büyük olduğundan, örneğin mıknatıslanmasından kaynaklanan ve mıknatıslanmaya ters yönde ortaya çıkan demanyetizasyon alanının büyüklüğü,

$$\vec{H}_d = -\vec{N}_d \vec{M}_d \quad (2.1)$$

uygulanan alanla karşılaştırılabilecek kadardır. Burada N , uygulanan alan doğrultusuna karşı gelen ve örneğin geometrisine bağlı “*demanyetizasyon*” faktörü olup x, y ve z doğrultularındaki bileşenleri,

$$N_x N_y N_z = 4\pi \quad (2.2)$$

şartını sağlar[6].



Şekil 2.1. Birçok bölgeden oluşmuş bir ferromanyetik madde içinde spinlerin yönelimleri [7].

2.2. Manyetik Rezonans

Manyetik Rezonans; manyetik momentleri ve açısal momentumu olan manyetik sistemlerde gözlenen bir olaydır. Rezonans kelimesi, dış bir etkenin, manyetik sistemin doğal frekansı ile uyum içinde olmasını açıklar. Bu frekans durgun dış manyetik alanda manyetik momentin jirokobik presesyonuna karşılık gelir.

Atomik spektrumun belirgin frekansları arasındaki benzerliği ve manyetik rezonans frekanslarının tipik olarak radyo frekans bölgesine (çekirdek spinleri için) yahut mikrodalga frekansı bölgesine (elektron spinleri için) düşmesi nedeniyle pek çok defa radyo frekans (RF) spektroskopisi veya mikrodalga (MD) spektroskopisi olarak adlandırılmıştır [8].

Ferromanyetik bir örnek statik bir manyetik alan içerisine yerleştirildiğinde, manyetik momentler malzemeye özgün karakteristik bir ω_0 (Larmour frekansı) ile presesyon hareketi yaparak denge durumuna geçerler. Eğer statik alana dik yönde ω

frekanslı mikrodalga alanı uygulanırsa, statik alanın artmasıyla ω_0 öz titreşim frekansı ile aynı değeri aldığı anda bir güç soğurma olur. Bu güç her iki frekans değerlerinin birbirlerine yaklaşması ile artar ve frekanslar eşitlendiğinde en yüksek seviyeye ulaşır. Bu olaya manyetik rezonans denir. Bu soğrulan güç malzemenin sadece iç yapısına bağımlı olmayıp, aynı zamanda dış manyetik alanın büyüklüğüne ve yönelimine bağlıdır.

Rezonans yönteminin üstünlüğü, incelenen örnekte tümü ile karşılaştırıldığında çok zayıf olabilen bir katkıyı seçip ayırmayı mümkün kılmasıdır. Manyetik rezonansın fizik ile bütünleşmesinin en büyük sebebi atomik düzeyde süreçler hakkında bilgi verebilmesidir. Burada, açılal momentumu olan manyetik sistemler söz konusudur.

Elektron ve çekirdek manyetik rezonansları arasındaki en temel fark, çekirdeksel spin, manyetik moment ve dört kutuplu (quadropol) moment gibi özelliklerinin büyük bir olasılıkla çevreden etkilenmemeleri, buna karşın çok daha büyük fiziksel hacimde olan uyarılmış durumlarını çok daha küçük enerji istemeleri yüzünden çevreye kuvvetle bağılı olmalarıdır. Bir kristale konulan atom serbest haldeki atomdan tamamen farklı açılal momentum, manyetik moment ve dört kutuplu momente sahip olabilir. Spin çiftlenimleri yüzünden yalıtkanlar rezonans göstermez. Demir grubu veya nadir toprak elementleri grubu gibi bazı atomlar tamamlanmamış iç tabakalara sahiptir. Hatta iyonlaştırıldıkları zaman bile yine net bir momente sahiptirler.

Özel durumlarda genel durumların geçersiz kalmasına rağmen manyetik rezonansın umulduğu madde sınıflarını ve koşullarını şöyle sıralayabiliriz.

- a. Demir grubu ve nadir toprak elementleri gibi doldurulmamış iç tabakaları olan geçiş elementlerinin bulunduğu maddeler.
- b. Metallerdeki iletkenlik elektronları.
- c. Ferro ve ferrimanyetler.
- d. Yalıtkanlarda elektron ve boşluklar yakalayabilen bozukluklar. Bir alkali halojenden çıkarılan halojenin yerinde yakalanan bir elektron veya yarı iletkenlerde donör ve kabul edici bölgeler [8].

Kuantum mekaniğinde rezonans olayını daha kolay açıklayabilmek için örnek olarak, ışık ile maddenin etkileşmesi verilebilir [1]. Bu durumda atom ile elektromanyetik alan birbiri ile kenetlenen iki periyodik sistem olarak düşünülür. Atomların doğal frekansları geçiş frekansları olarak bilinir ve gelen ışığın frekansı da bu frekanslara göre ayarlanabilir. O halde elektromanyetik alanın frekansı, atomun doğal frekansına ayarlandığı zaman, bu kuantum mekaniksel sistem klasik mekanikteki sarkaç sistemi gibi davranır.

Yani, ya elektromanyetik alandan atoma enerji aktarılır ya da başlangıçta uyarılmış durumda olan atomdan elektromanyetik alana enerji aktarılır. Bu olaylardan birincisine enerji soğurulması ve ikincisine de enerji salınması denir.

Çekirdek spinlerinin uygulanan manyetik alanla etkileşmelerine benzer şekilde, elektronların spinlerinin de manyetik alanla etkileşme içinde oldukları bilinmektedir. Ancak bu etkileşmeler enerji bakımından çekirdeklere ait etkileşmelerden yaklaşık 10^3 kez daha büyüktür ve elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesine düşmektedir.

2.3. Spin Dalgaları

SDR deneylerinde, çizgi genişliği oldukça küçük olan örnekler seçilmelidir. Eğer çizgi genişliği yeterince küçük değilse rezonans modlarını birbirlerinden ayırmak mümkün olmaz. Bu nedenlerden dolayı SDR gözlemlerinin yapılabileceği örnek sayısı pek fazla değildir. SDR'ye ilişkin ilk deneysel çalışmalar, eğri genişliği oldukça küçük olan Fe-Ni alaşımı (Permalloy) üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunun yanında Fe, Ni, Co, gibi saf ferromanyetik metaller ve Fe-Pd, Fe-Pt, Fe-Cr, Ni-Pd, Ni-Cu, Ni-Co, Cr-Te, Fe-Ni-Co ve Mn-Cr-Sb gibi metalik alaşımlar (Kouvel, 1986) ferrite ve garnet (YIG) (Vittoria, 1976, Wigen, 1975) gibi yalıtkan örneklerden hazırlanmış ince filmlerde de SDR çalışmalarına rastlanmaktadır. Hatta yakın zamanlarda, YCo_3 ve GdCoMoAr gibi alaşımların amorf filmlerinde yapılan bazı SDR çalışmaları yayınlamıştır.

Son yıllarda, birçok ferromanyetik rezonans deneyinde ortaya çıkan ve daha önceleri nedeni pek anlaşılamayan bazı rezonans çizgilerinin “Yüzey Spin Dalgalarından” kaynaklandığı fikri gündeme gelmiştir. Bu rezonans çizgileri filmin yüzeyindeki mıknatıslanma hakkında bilgi vermektedir. Yüzey Spin Dalga Rezonansına (YSDR) ilişkin teorik çalışmaları: permalloy, YIG üzerindeki deneysel çalışmalar izlemiştir. Yüzey spin dalga rezonansı, son zamanlarda daha bir çok metal, amorf ve manganez ferritlerde de gözlemlendi. Ayrıca Fraitova va arkadaşları tarafından demir tek kristalinde yüzey spin dalgaları dikkatle incelendi.

Bu konuda daha önceleri Landau, Gilbert ve Bloch tarafından teorik olarak mıknatıslanmanın dinamik davranışı için çeşitli ifadeler önerilmiştir. Önerilen bu ifadelerden sadece basitlik olsun diye Bloch tipi denklem dikkate alındı. Durgun manyetik alanın en genel yönelimi için etkin alan belirlendi. Burada etkin alanın yönü örneğin doyum mıknatıslanması yönü olarak kabul edildi. Doyum mıknatıslanma yönü ise, film üzerinde oluşan demanyetizasyon alanı (mıknatıslanmayı giderici alan) ile dışarıdan uygulanan durgun manyetik alanın bileşkesi doğrultusunda alındı. Sınır koşulları (yüzey anizotropisi) da dikkate alınarak uygulanan manyetik alanın en genel yönelimi için manyetik duygunluk ve soğrulan güç ifadesi türetildi. Çeşitli modlara karşı gelen güç ifadesinin durgun manyetik alana göre türevi alınarak teorik SDR spektrumları bulundu. Türetilen teorik spektrum ifadesinin hazırlanan bir bilgisayar programı yardımıyla çeşitli parametrelere göre davranışı incelendi. İkinci bölümde, konularla ilgili genel bilgi verildi. Üçüncü bölümde, spektrumların açıklanmasında kullanılacak model ayrıntılı bir biçimde anlatıldı. Dördüncü bölümde ise yapılan deneyler ve elde edilen spektrumlar anlatıldı. Spektrumlar, değişik sıcaklıklarda, uygulanan manyetik alanla film yüzeyinin arasındaki açının fonksiyonu olarak kaydedildi. Çeşitli spin dalga modlarının ve rezonans alan değerlerinin açığa göre davranışı incelendi. Son bölümde ise modelle deney arasındaki uyum tartışıldı ve bu tür çalışmaların daha başarılı olması için sağlanması gereken deneysel koşullar tartışıldı.

İnce film olarak hazırlanmış ferromanyetik bir sistem, bir dış etki ile uyarıldığında, komşu spinler örgü içinde birbirlerine göre belli bir açı kadar dönmüş olarak sıralanırlar. Spinlerin bu düzeni Şekil 2.2'deki gibi film kalınlığı doğrultusunda

dalgaya benzer bir görünümündedir. Spinlerin dalgaya benzer bu düzenlenişine spin dalgası adı verilir. Kuantalanmış spin dalgalarına da magnon denir.

Her birinin spini S olan N tane özdeş spinin bir doğru boyunca dizildiğini düşünelim (Şekil 2.3). Bu durumda spinler arasındaki etkileşmeleri ifade eden Heisenberg değiş-tokuş etkileşme enerjisi, en yakın komşulukların etkileşmesi dikkate alındığında;

$$U_d = -2JN \sum_{p=1}^N \vec{S}_p \cdot \vec{S}_{p+1} \quad (2.3)$$

biçimindedir. Burada, J değiş-tokuş integrali, p spinlerin numaralarını göstermektedir. J 'nin pozitif değeri için minimum enerji durumu tüm spinlerin paralel olma durumuna karşı gelir.

p . spinin spin açısai momentumu (μ_p);

$$\vec{\mu}_p = -g\mu_B \vec{S}_p \quad (2.4)$$

olduğundan bu spinin en yakın komşu spinlerle etkileşmesinden ortaya çıkan değiş-tokuş enerjisi,

$$U_d = -\vec{\mu}_p \left(-\frac{2J}{g\mu_B} \right) (\vec{S}_{p-1} + \vec{S}_{p+1}) \quad (2.5)$$

Biçiminde yazılabilir (Kittel, 1972). Burada g spektroskopik yarıma faktörü, μ_B 'de Bohr manyetonudur. Denklem 2.5 ile verilen enerji ifadesi, herhangi bir manyetik alandaki manyetik momentin sahip olduğu enerjiye benzetilebilir. Yani,

$$\vec{B}_p = \left(-\frac{2J}{g\mu_B} \right) (\vec{S}_{p-1} + \vec{S}_{p+1}) \quad (2.6)$$

yazılırsa, bu enerji bağıntısı

$$U_d = \vec{\mu}_p \cdot \vec{B}_p \quad (2.7)$$

biçimine sokulur. Öte yandan bir μ_p dipolü üzerine,

$$\frac{d\vec{S}_p}{dt} = -g\mu_B \vec{S}_p \times \vec{B}_p \quad (2.8)$$

kadar bir moment etkir. Denklem 2.6' dan B_p 'nin değeri denklem 2.8'de yerine konularak,

$$\frac{d\vec{S}_p}{dt} = -g\mu_B \left(-\frac{2J}{g\mu_B}\right) \vec{S}_p \times (\vec{S}_{p-1} + \vec{S}_{p+1}) \quad (2.9)$$

denklemleri elde edilir. Denklem 2.9'da bileşenleri cinsinden yazılırsa;

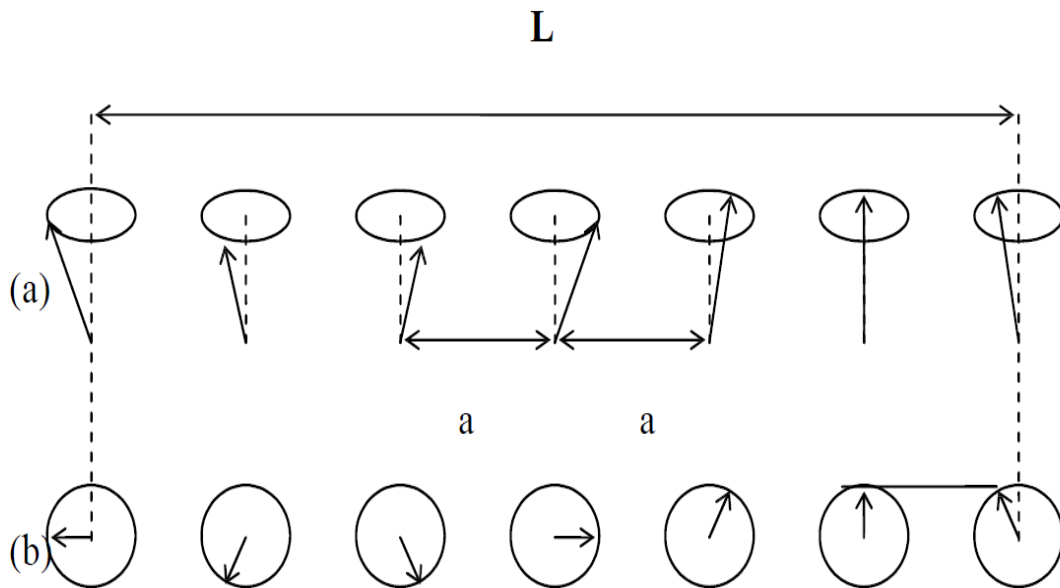
$$\frac{dS_p^z}{dt} = \left(\frac{2J}{\hbar}\right) \left[S_p^x (S_{p-1}^y + S_{p+1}^y) - S_p^y (S_{p-1}^x + S_{p+1}^x) \right] \quad (2.10)$$

$$\frac{dS_p^x}{dt} = \left(\frac{2J}{\hbar}\right) \left[S_p^y (S_{p-1}^z + S_{p+1}^z) - S_p^z (S_{p-1}^y + S_{p+1}^y) \right] \quad (2.11)$$

$$\frac{dS_p^y}{dt} = \left(\frac{2J}{\hbar}\right) \left[S_p^z (S_{p-1}^x + S_{p+1}^x) - S_p^x (S_{p-1}^z + S_{p+1}^z) \right] \quad (2.12)$$

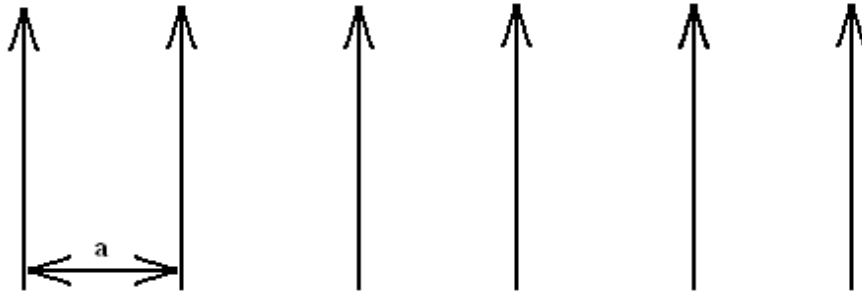
denklemleri elde edilir. Uyarılmanın genliği çok zayıf ise S'nin z bileşeni,

$$S_p^z = S_{p-1}^z = S_{p+1}^z = S \quad (2.13)$$



Şekil 2.2. Komşu spinlerin yönelmesine göre ortaya çıkan spin dalgaları. a) Spinlerin dönme hareketinin belli bir andaki perspektif görünüşü. b) Spinlerin dönme hareketinin üstten görünüşü

Burada a spinlerin ait oldukları örgüdeki atomlar arası uzaklığı L'de film kalınlığını göstermektedir. S her bir atomun spinini S_1 'de dönme düzlemindeki izdüşümünü göstermektedir.



Şekil 2.3. Basit bir ferromanyetik maddede taban enerji durumunda spinlerin sıralanışı.

Toplam spini temsil edeceğinden zamana göre türevi;

$$\frac{dS_p^z}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

olmalıdır. S_z 'nin bu değerleri Denklem 2.11 ve Denklem 2.12 ifadelerinde yerine konularak;

$$\frac{dS_p^x}{dt} = \left(\frac{2JS}{\hbar}\right) \left[S_p^y - S_{p-1}^y + S_{p+1}^y \right] \quad (2.15)$$

$$\frac{dS_p^y}{dt} = -\left(\frac{2JS}{\hbar}\right) \left[S_p^x - S_{p-1}^x + S_{p+1}^x \right] \quad (2.16)$$

denklemlerine ulaşılır. Bu denklemlerin lineer oldukları dikkate alınarak S_p^x ve S_p^y vektörlerine

$$S_p^x = u e^{i(pka - \omega t)} \quad (2.17)$$

$$S_p^y = v e^{i(pka - \omega t)} \quad (2.18)$$

biçiminde ilerleyen düzlem dalga çözümleri önerilebilir. Burada a spinler arası uzaklık u ve v 'de dalgaların genlikleridir. Böylece Denklem 2.15 ve Denklem 2.16'dan u ve v için

$$-i\omega u = \left(\frac{4JS}{\hbar}\right) \left[-\cos(ka) \right] \underline{v} \Rightarrow -i\omega v = \left(\frac{4JS}{\hbar}\right) \left[-\cos(ka) \right] \underline{u} \quad (2.19)$$

denklemleri elde edilir. Bu iki denklemi aynı anda sağlayacak çözüm olması için katsayılar determinantının sıfır olması gerekir. Buradan spin dalgalarının dağılım bağıntısı olarak,

$$\hbar w = 4JS(1 - \cos ka) \quad (2.20)$$

ifadesi bulunur. Bu ifade uzun dalgaboyu limitinde seriye açılırsa

$$w = \frac{2JSa^2}{\hbar} k^2 - \frac{JSa^4}{8\hbar} k^4 + \dots \quad (2.21)$$

biçimine girer.

$$D = \frac{2JSa^2}{\hbar} \quad F = \frac{JSa^4}{8\hbar} \quad (2.22)$$

tanımlarıyla (Tannenwald 1965) Denklem 2.21 ifadesi,

$$w = Dk^2 - Fk^4 \quad (2.23)$$

şeklini alır .

Buradaki D ve F parametreleri spin dalga rezonansı deneyleri yapılarak tesbit edilebilir. Bu sabitler değiş-tokuş integrali (J) hakkında bilgi verir.[2]

2.4. Spin Dalga Rezonansı

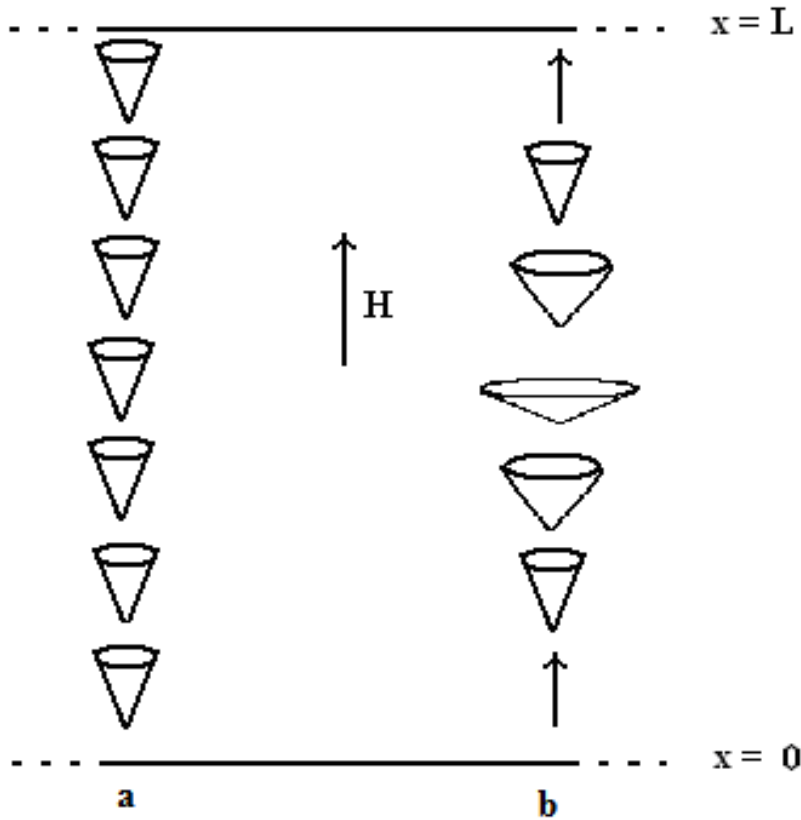
Spin dalga rezonansı (SDR) ferromanyetik ince filmlerin elektromanyetik alandan enerji soğurması esasına dayanır ve temelde ferromanyetik rezonansa benzer. Spin dalga rezonansı çok sayıda soğurma çizgisinden oluşur. Halbuki ferromanyetik rezonans da genelde tek bir çizgi görülür.

Spin dalgaları “sanki parçacıklar (quasi particle)” sınıfına girerler. Sin sistemini oluşturan spinlerden birinin yönelmesindeki bir değişim, değiş-tokuş etkileşmesinden dolayı diğerlerini de etkileyecektir. Yani onların yönelimlerinde bir değişim oluşturup yeni bir spin konfigürasyonu oluşturacaktır. Bu etkileşim komşudan komşuya geçip

tüm spin dalgalarının hareketini ve yönelmelerini gözümüzde Şekil 2.2'deki gibi canlandırabiliriz.

Bir manyetik örnek içerisinde uyarılan spin dalgaları statik manyetik alandan kazandığı enerjinin bir kısmını daha sonra geri vermek zorundadır. Spin dalgalarını uyarma metodlarından birisi, elektromanyetik alanın enerjisinin soğurulması için gerekli olan rezonans şartının sağlanmasıdır.

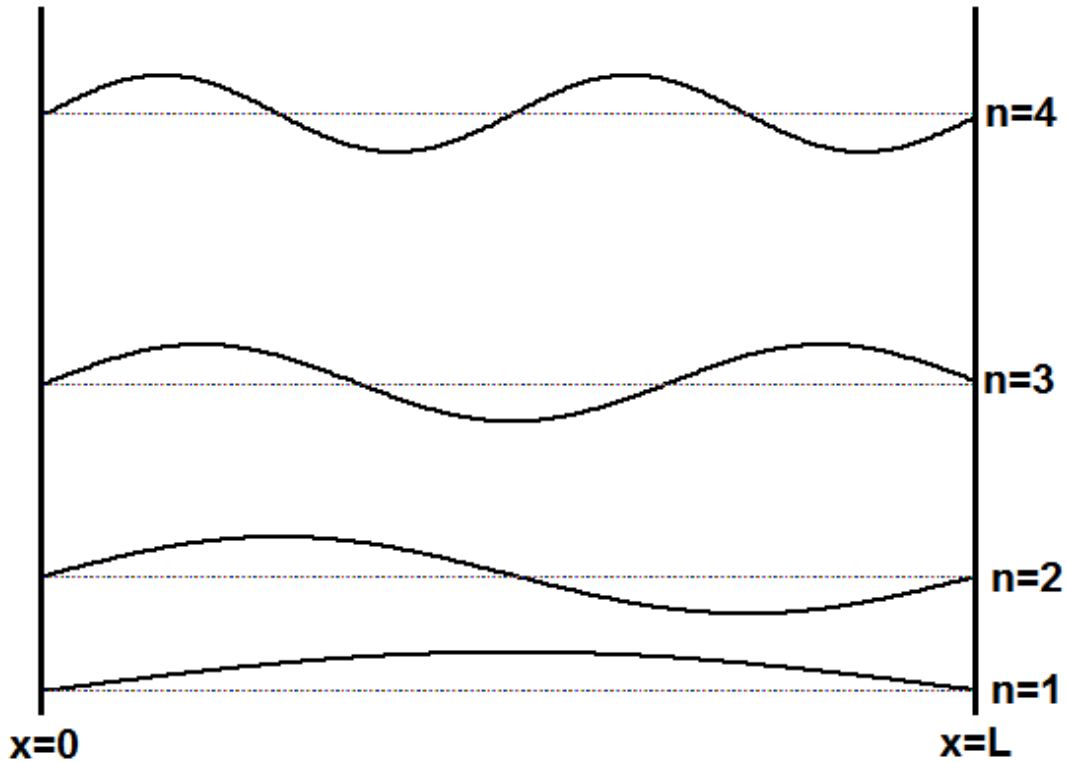
İnce ferromanyetik örneklerin magnon spektrumu kesiklidir. Belirli alan değerlerinde enerji soğurulması olur ve bu değerler farklı modlara karşı gelir. Böylece manyetik alan içindeki bir ferromanyetik film, mikrodalga ile uyarıldığında, spin dalgasının her moduna uygun rezonans çizgileri serisinden oluşan bir rezonans spektrumu elde edilir.



Şekil 2.4. a) Uniform modda film kalınlığı boyunca dizilmiş spinlerin dönme hareketinin herhangi bir andaki görünüşü; b) Birinci modda spinlerin dönme hareketinin anlık durumu. (Ortadaki spinin dönme genliğinin daha büyük olduğuna dikkat edilmelidir. Burada L film kalınlığını göstermektedir)

Ferromanyetik rezonansta uniform (0. mod) modun dinamiği incelenmektedir. Uniform mod Şekil 2.4.a'da da görüldüğü gibi, örnek içindeki spinlerin hepsinin aynı genlikte ve aynı fazda dönme hareketi yaptıkları moddur. Burada spinlerin yönelimleri belli bir dalga formunda değildir.

Film yüzeyindeki elektronların spinleri, filmin içindeki elektronların spinlerinden daha farklı, sonsuz yüzey anizotropi alanı görüyorsa, yüzeydeki spinler yüzey anizotropisi alanına paralel olarak yöneleceklerdir. Yüzey anizotropisi alanının sonsuz olması, kuantum mekaniğinde sonsuz potansiyel kuyusundaki elektronun davranışına benzetilebilir. Yüzey anizotropi alanının sonsuz olması durumundaki spinlerin bu şekildeki davranışı "Surface Spin Pining Model" olarak adlandırılır.



Şekil 2.5. Yüzey anizotropi alanının sonsuz olması durumunda filmin içindeki spin dalga modlarının davranışı, burada yatay eksen film kalınlığı boyunca alan eksenini, dikey eksen ise miknatıslanmanın enine bileşeninin genliğini temsil etmektedir.[3]

Spinlerin film içindeki dalga görünümünden dolayı oluşan modları uyarabilmek için daha öncede söylediğimiz gibi, filmin üzerine durgun manyetik alana dik bir mikrodalga alanı uygulanarak mikrodalga alanıyla spin dalgalarının etkileşmeye girmesi sağlanır. Eğer filmin kalınlığı spin dalgalarının dalga boyunun yarısının tek katlarına eşit olursa bu durumda mikrodalga alanı ile spin dalgası arasında net bir enerji alış-verişi olacaktır (Kittel, 1958). Diğer durumlarda ise net bir enerji alış-verişi olmaz.

2.5. Tahribatsız Muayene ve Girdap Akımları (Eddy Current)

2.5.1. Tahribatsız muayene

Ülkemizde profesyonel anlamda özel sektör tarafından büyük döküm fabrikaları 70’li yıllarda kurulmaya başlamıştır. Öncelikle yaş kum kalıba döküm teknolojisinin öğrenilmesi, özgün ürün üreten yani döküm bilgisini kendileri oluşturan döküm fabrikalarının sayısı zamanla artış göstermiştir. 90’lı yıllardaki ekonomik krizler döküm sektörünün dışarıya açılma yılları olmuş, bu da yeni üretim teknolojilerinin yanında yeni kontrol teknolojilerine duyulan ihtiyaçları beraberinde getirmiştir. Ülkemizde özellikle 90’lı yıllardaki aşırı otomobil ve traktör talebi, ileri kontrol teknolojilerinin kullanımını ikinci planda bırakırken, 21. Yüzyıla girildiğinde sınırların kalkması, dünya ticaretinin globalleşmesi, büyük otomotiv firmalarının globalleşme eğilimi, döküm sektörünü ileri teknoloji kontrol tekniklerini kullanarak yeni ürünlerin hızlı bir şekilde ve bir defada seri üretime sokmaya mecbur kılmıştır. Özellikle 2000’li yıllarda otomotiv sektöründe kıran kırana bir rekabet başlamıştır. Firmalar çelikten imal ettikleri parçaları sfero dökme demirden üretmek için çalışmalar yapmaya başlamışlardır[9].

Tahribatsız malzeme muayenesi, kalite kontrolün en önemli bölümü olup, üretimin tamamlayıcı son kısmıdır. Tahribatsız muayene, incelenen malzemelere herhangi bir zarar vermeden muayene edilerek, dinamik ve statik yapıları hakkında bilgi edinilen muayene yöntemlerinin tümüne verilen addır. Tahribatsız muayene yöntemi ile malzemelerin imalat esnasında veya belli bir süre kullandıktan sonra örneğin,

korozyon veya aşınma gibi nedenlerden dolayı oluşan çatlak, iç yapıda meydana gelen boşluk, kesit azalması vb. hataların tespiti gerçekleştirilir. Bu işlemlerde, malzemelerden herhangi bir numune alma ihtiyacı yoktur. Testler doğrudan iş parçası üzerinde yapılır ve böylece parçaların % 100 muayenesi gerçekleştirilebilir. Kullanıma uygun olmayan veya kullanıma uygunluğunu yitirmiş olan parçalar çoğunlukla kullanımdan kaldırılır[10].

Tablo 2.1. Tahribatsız muayene deneylerinin makina mühendisliği endüstrisinde uygulama alanları[10],

Uygulama Alanı	İşlevi	Uygulama Örnekleri
Araştırma ve Geliştirme	Malzemelerin yapısal değerlendirilmesi, Üretim ve montaj yöntemlerinin karşılaştırılması ve bulguların değerlendirilmesi.	Metallerin iç yapılarının ve yorulma belirtilerinin incelenmesi, kaynak dikişlerinde çatlakların tespiti.
Üretim Yöntemi Kontrolü	Üretim yöntemi değişkenlerinin belirlenmesi ve kontrolünün sağlanması.	Radyografik ve ultrasonik yöntemle kalınlık ölçme ve imalat parametrelerinin tespiti.
Kalite Kontrolü	Kusurlu parçaların ve anormalliklerin tespiti, Üretim montaj kusurlarının, yerlerinin ve yönteminin değerlendirilmesi.	Zayıf yapışma, kaynaklarda çatlama, metallerde homojen olmayan gözenekler ve malzeme hatalarının belirlenmesi.
Servis Süresince Değerlendirme	Kullanım süresince aşınma ve anormalliklerin erken belirlenmesi.	Depolarda ve borularda korozyonun ve yerinin tespiti, Çeşitli araçlarda erken uyarı sistemleri.

Tahribatsız muayene yöntemleri çeşitli fiziksel prensiplerle, farklı şekillerde uygulanır. Seçilecek yöntem, incelenen malzemenin cinsine ve aranan hata türüne

göre belirlenir. Her bir yöntemin diğerine göre üstün tarafları olup, genellikle birbirlerinin tamamlayıcısı durumundadırlar. Tahribatsız muayenede uygulanan yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

1. Manyetik Parçacık(MT)
2. Radyografik-Radyoskopik Kontrol(RT)
3. Ultrasonik Kontrol (UT)
4. Kaçak Testi(LT)
5. Sonik Kontrol
6. Girdap Akımları(ET)

Burada sadece çalışma konumuz ile benzerliği bulunan Girdap akımları muayenesi hakkında detaylı bilgi verilecektir.

2.5.2. Girdap akımları (eddy current) muayenesi

Özellikle otomotiv firmalarının asla vazgeçemediği bir yöntem olan girdap akımları ısıtma işlem sonrası tüm dişlilere ve civatalara sertliklerinin kontrolü veya ısıtma işlem derinliğinin tesbiti uygulamalarında kullanılan bir yöntemdir. İletken bir bobine elektrik akımı uygulandığında, bobinde bir manyetik alan oluşur, Eğer iletken bir malzeme bu akım taşıyan bobine yaklaştırılırsa, iletkenin (test parçası) üzerinde bir girdap akımı meydana gelir. Girdap akımının şiddeti alaşımın veya metalin kimyasal bileşimine veya yapısal durumuna bağlıdır. Girdap akımının frekansının değiştirilmesi, bobin sistemi içerisinde, parçanın yapısal durumunun bir elektromanyetik parmak izinin elde edilmesini sağlar. Bu ise yine alıcı bir bobin ile cihaz tarafından alınır ve değerlendirilir. Parçanın yapısal durumundaki bir değişim, bileşimindeki bir değişim, malzemedeki karışım durumları, karışmış durumdaki iki parti üretim veya yanlış, yetersiz ısıtma işlem girdap akımı sinyallerinin değişmesine neden olur. Girdap akımları muayenesi gerek elektrik ve gerekse manyetik olarak iletken olan her tür malzemeye uygulanabilir. Bu durumda girdap akımları yöntemi tüm metalik malzemeleri içine alır.

Girdap akımları yöntemi, mutlak değer veren bir yöntem değildir. Tamamıyla bir karşılaştırma yöntemidir. Bu özelliği nedeniyle döküm parçalarda ± 10 HB (10 mm bilya ve 3000 kg yük) hassasiyetle ayırım mümkün olabilmektedir. Fakat burada sınırlayıcı nokta o parçaya uygun bobinleri bulmaktır. Bu yöntemde malzemedeki homojensizlikler, numunedeki boyutsal toleranslar, bobinlerin sabitlenmesindeki boyutsal değişimler ve sıcaklık değişimleri sonuçları çok fazla etkilemektedir. Özellikle gri dökme demir parçalarda sertlik ayırımı başarılı bir şekilde yapılırken sfero parçalarda örneğin küreselliğe göre ayırımında bu kadar başarılı olunamamaktadır. Ferritik – Perlitik parçaların kimyasal ve dolayısıyla mikroyapı değişimleri cihazdan küresellik için doğru değerlerin alınmasını zorlaştırmaktadır. Fakat bu problem tamamen perlitik (örneğin krank millerinde) parçaların küresellik esaslı ayırımlarında ortadan kalkmaktadır.

Parçaların çok iyi taşlanmaları ve temizlenmeleri gerekmektedir. Aksi takdirde alınan sonuçlar güvenilirliğini yitirmektedir. Yine her iki bobinin de çok iyi yerleştirilmesi ve eğer mümkün ise ahşaptan bir aparat(kestamit türü plastik malzemeler de olabilir) üzerine sabitlenmesi çalışmalara çok yardımcı olmaktadır.

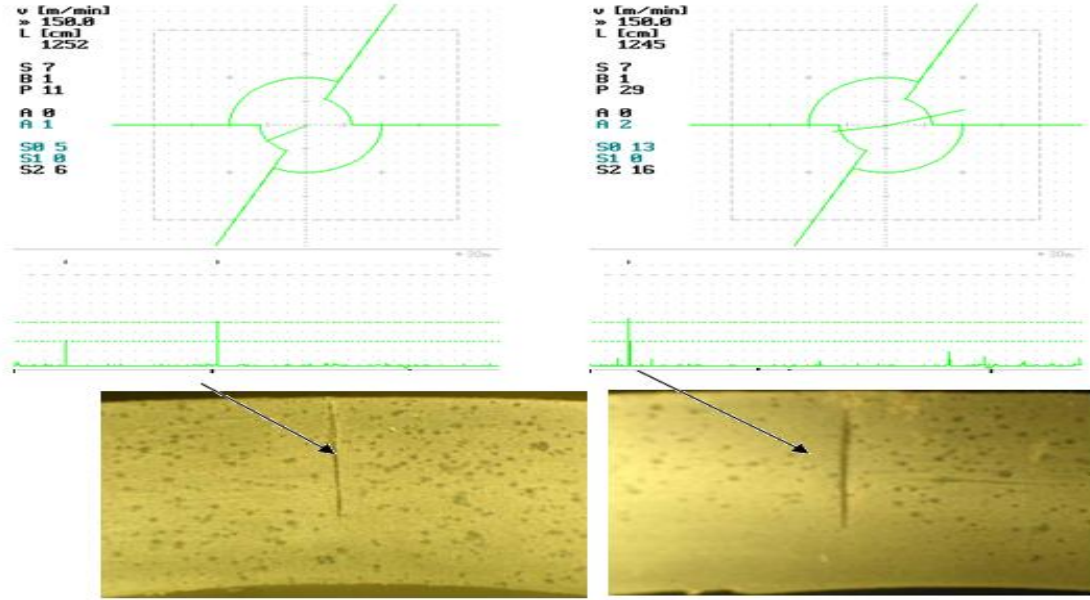
Şekil 2.6 Bazı parçaların bu yöntemle kontrolünü göstermektedir. Tek bir kontrol bobini kullanılabildiği gibi birden fazla bobin kullanılarak da çalışılan yöntemler vardır. Bu sayede bir krank mili veya kam milinin girdap akımları ile kontrolü mümkündür. Önemli olan kalibrasyonun çok iyi yapılması ve devamlı olarak kalibrasyonunun doğruluğundan emin olunmasıdır.



Şekil 2.6. Girdap Akımları Yöntemi Uygulaması.

Girdap akımı yöntemiyle çatlak analizinin genel teorisi, düşük frekans standartları ve ferromanyetik rezonans problemlerinin teorisine uygundur, bunlar saf 2 boyut ve 3 boyutlu açık ve kapalı yarıklı geometrilerinin analizi için geliştirilmiştir. Bu analiz,

probun yüklenmesi ile alanın yarığa uygulanması üzerine temellendirilmiştir. Bu yarıkların yanıtları probun çalışma frekansına göre arttığını gösterir. Farklı problemler için de deney sonuçları, pratikte tüm gerçekleştirilebilir geometriler için, çeşitli çatlak ve yarıkların boyutları hakkında önemli bilgiler edinmemizi sağlar.



Şekil 2.7. Kapalı devre Girdap Akımı Yöntemiyle Boru Kontrollerinde Hata Tespiti (Boru çapı 125,7mm, hız 150m/dak, t:4,4mm, Malzeme: 1.4462 D7, test frekansı: 5kHz, Kazanç: 62dB). [11]

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE VERİLER

3.1. FMR Probenin Hazırlanması

Temel kavramlar ve bilgiler bölümünde kısaca tahribatsız muayene işlerinden söz edilmiş, yöntemler sıralanmış ve yaptığımız uygulama ile benzerlikleri olan girdap akımları yöntemi üzerinde durulmuştur. Bu bölümde ise çalışmamızda kullandığımız yöntem olan FMRI hakkında ayrıntılı bilgiler verilip, girdap akımları yöntemi ile benzerlikleri üzerinde durulacaktır. Auld (1981)'de yayınladığı makalesinde diğer yöntemlerden daha basit algılama yapabilecek bir yöntem önermektedir[13].

Tüm tahribatsız ölçümlerin değerlendirilmesinde, üzerinde durulan nokta yorulma çatlaklarını tespit etmek, yorulma zamanını öngörmektir. Bu yaklaşım; ultrasonik testle sağlanması yapılarak kullanılmaktadır. Çalışmada öncelikle çatlakların normalize edilmiş şiddet faktörü tesbit edilir. Bu parametre periyodik yükleme altında çatlak boyutunun ve yorulma zamanının tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çatlaktan kısa dalga boyu (büyük k_a) ile ultrasonik saçılma boyutlarını ve bundan dolayı zorlama yoğunluk faktörünü hesaplar, uzun dalga boyu ile ise (küçük k_a) saçılma zorlama yoğunluk faktörünü direkt elde eder[13].

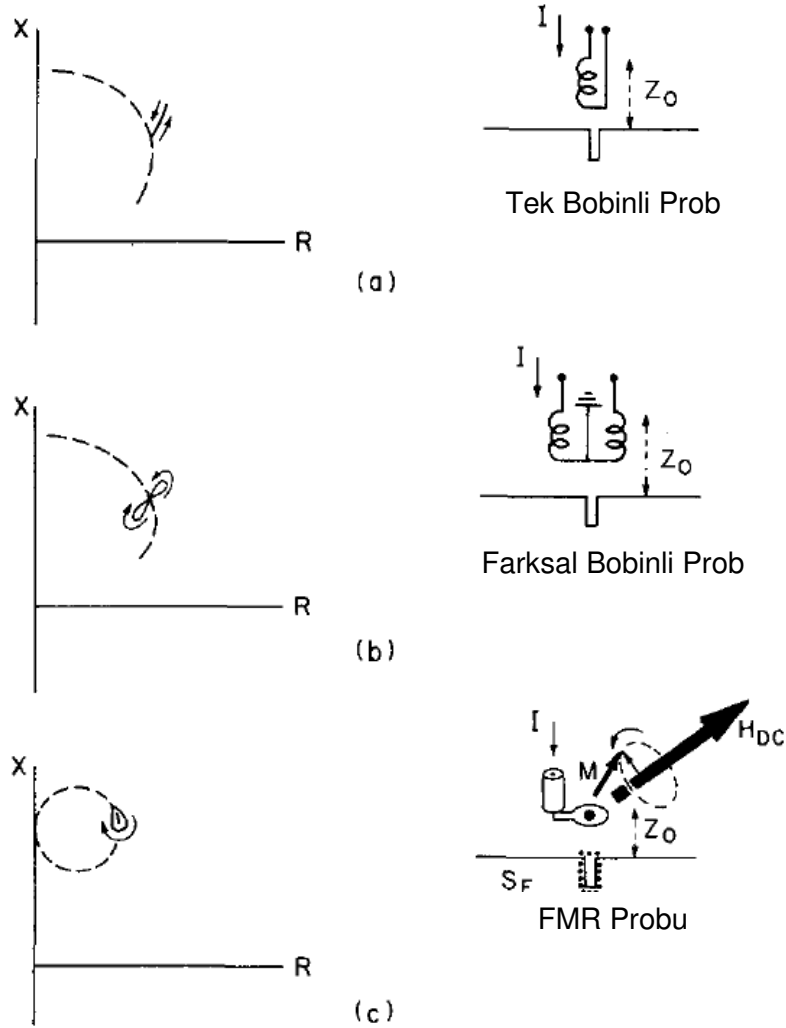
Girdap akımı testleri ultrasonik testlerle aynı yöntemi izler, prob tasarımı ve hata yanıtı ilişkisi aynı derecede zorludur. Bu problemlerin tasarımı; elektromanyetik karşılıklılık bağıntısından başlar, prob sonundaki empedans değişikliğinden çatlak yüzeyi etrafında elektromanyetik alan integrali alınarak formüle edilmesine kadar uzanır. Çatlak boyutu iletkenliğe bağlı olarak elektromanyetik deri kalınlığına bağlı olarak büyük yada küçük boyutta olması durumuna göre değişir. Mikrodalga girdap akım muayenesi kullanılarak analitik olarak yarık bulunur ve düşük frekans uygulamada da doğrulanarak kullanılır. a/δ büyüklüğü girdap akım yanıtları çatlak tesbit etkilerine karşı çok hassastır. Yorulma zamanı ve çatlak büyümesi tespiti

ölçümlerinin önemi artmıştır. Bu analiz ayrıca küçük a/δ girdap akım yanıtının sadece küçük ka ultrasonik çatlak tespitinde çatlak zorlama şiddeti faktörünün normalize edilmesi ile ilgili bilgileri kapsamaktadır.

3.2. Prob Yapısı ve İşlemi

Şekil 3.1’de çalışma frekansı yaklaşık olarak 50 KHz ile 2 MHz arasında olan düşük frekansta standart olarak kullanılan 2 tip girdap akımı probu gösterilmiştir. Şekil 3.1.a’da tek bir bobin ya da diğer adıyla mutlak prob vardır. Probu beslemesi RF akım üreten zaman değişkenli manyetik alana bağlıdır. Bu da yaklaşık olarak bobin eksenindeki alternatif manyetik dipole paraleldir. Test parçacığına yaklaştırılan prob çatlak üzerinden geçerken bu değişken alan tarafından test parçacığı üzerinde dönen akımları indükler ve dağıtır. Bu sebeple çatlak probdaki cevabı değişken empedanslı bir sinyal üretimi şeklindedir. Elektronik ekipmanlar kullanılarak osiloskop ekranında karmaşık giriş empedansı görülür. R ve X sırasıyla probun ucundaki giriş resistansı ve reaktansıdır. Burada prob empedansı aynı zamanda probun test parçacığından uzaklığıyla (lift-off, d) ilişkili bir fonksiyona sahiptir ve Z_0 olarak gösterilir. Z_0 ’da tarama esnasında tarama esnasında kontrol edilemeyen prob yüzey uzaklığı değişiminin birincil kaynaktaki sistem gürültüsü olarak tanımlanır. Bu değer tarama hassasiyetini artırması gerekir. Şekil 3.1’de prob karmaşık empedansı ile prob test parçacığı uzaklığı değişimi kesikli çizgi ile ifade edilmiştir.

Tek sarımlı prob tipinde hassas olarak test parçacığı üzerinde hareket; empedans değişimi oluşturur. Bu, karmaşık empedans gösteriminde kesiksiz çizgi ile belirtilmiştir. Buradaki açı farklılığı akış ve prob test parçacığı uzaklığı değişimi sinyali arasındaki değişimi gösterir ve akış empedansının prob test parçacığı uzaklığı eğrisine dikey değişiminin ölçümüdür.



Şekil 3.1. Tek ve Farksal Standart Girdap Akım probu ve FMR probu için Lift Off eğrisi (kesikli çizgi) ve akış sinyal çizgisi (kesiksiz çizgi) ve prob çizimleri [13]

Diğer bir standart prob ise “Bitişik Sargı Prop”tur. Bu prob bitişik bobinlerin bağlanmasıyla köprü devresi oluşturulup bobin empedans farkının ölçülmesiyle elde edilir. Şekil 3.1.b’de gösterilen farksal probun iki avantajı vardır. Probların eğilme etkisi kabul edildiğinde farksal iki bobin üzerinde elektronik olarak hassas olan sinyalin algılanmasıyla prob test parçacığı uzaklığı değişiminin ayırıştırma etkisi öne çıkar.

Probların boşluk ve test parçacığı ayrımının artırılması amacıyla ölçüm sisyalininin geri dönen kısmı probun içinden akar. FMR ise girdap akımına göre daha yüksek olan 500MHz ile 2GHz frekans aralığında boyutları küçültülmüş rezonans devresi

içerir. Akış değişkeni prob test parçacığı uzaklığı değişimi etkisini en aza indirip prob test parçacığı üzerinde tarama yaparken prob empedans değişiminin düşük frekanslardaki değişimi gözlemlenir. Eğer prob rezonansa gelmişse lift off etkisi rezonansın kaymasına sebep olur.

Genel FMR prob detayı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Prob YIG küre ve yarı sert manyetik olarak dengelenmiş ko-aksiyal kablodan oluşur. Manyetizasyonu M olan YIG ferromanyetik kristelin hareket denklemi;

$$\frac{dM}{dt} = \gamma M \times H \quad (3.1)$$

Burada;

M: YIG doyum manyetizasyonu,

H: toplam manyetik alan,

H_{dc} : Harici mıknatıs tarafından oluşturulan dc alan,

H_{RF} : bobinin kuplajı tarafından oluşturulan rf alan,

olarak tanımlanır.

Denklemdaki çarpım teriminden görülüyor ki M, H’ye paralel olmadığına yüzeye dikey olarak hareket eden zamana bağlılık terimi m_{rf} oluşur. Sadece H_{dc} ’nin olması durumunda mıknatıslanma rezonansın en üstündeki çekim alanı gibi yalpalanmaya sebep olur. Çünkü γ pozitif olduğunda, yalpalanma doğrultusu H_{dc} ye göre sağ el kuralıyla ifade edilir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi DC alan ters yönde olduğunda yalpalanma doğrultusu ters yönde olur. Yalpalanma frekansı Denklem 3.2’ye göre hesaplanır.

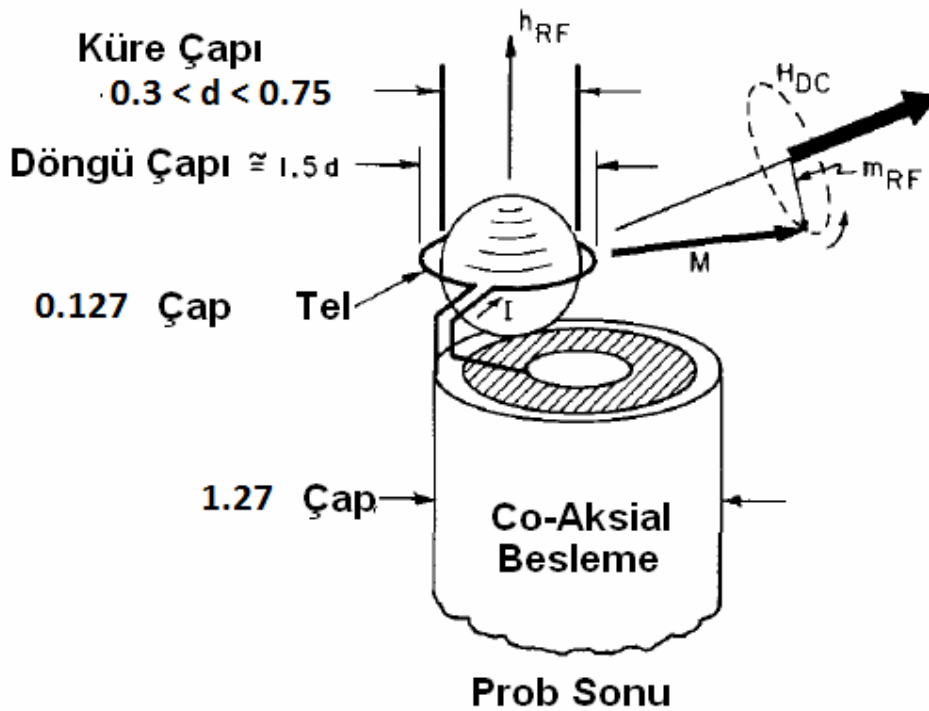
$$\omega_0 = \gamma H_{dc} \quad (3.2)$$

$\gamma=2.8\text{MHz/Oe}$ saf YIG içindir. Rezonans frekansı 0.5 GHz ile 2 GHz arasında iken H_{dc} 200-800 Oe arasında bir değerdedir. Değer küçük bir samaryum kobalt mıknatıs ile kolayca uygulanabilir.

Rezonans sadece ferromanyetik malzemenin kendi rezonansı olarak tanımlanır.

Manyetostatik rezonans modlarının sonsuz sayıda olması kürenin içinde manyetik dağılımına ve H_{dc} nin bir fonksiyonu olan karakteristik frekansın hesaplanmasına olanak verir. Test parçası olarak kullanılacak olan iletken malzemeye prob yaklaştırıldığında kayıplara ve birbirlerine göre kuplaj modlarına göre hem frekans hem hemde genlik değişimlerinin olduğu görülür.

Bu baskın mod Şekil 3.2’de verilen çizime göre manyetizmanın küre içinde düzgün olarak dağıldığı ve düzgün dönme değişim gösterdiği yönündedir. Denklem 3.2’de verilen rezonans frekansına sahip olan dipol momentin gücü H_{dc} ’nin sağ el rotasyonu olarak gözüken dönme modunda normal düzlemine paralel uzanan $m_{rf} \times$ (kürenin hacmi) ile hesaplanır.



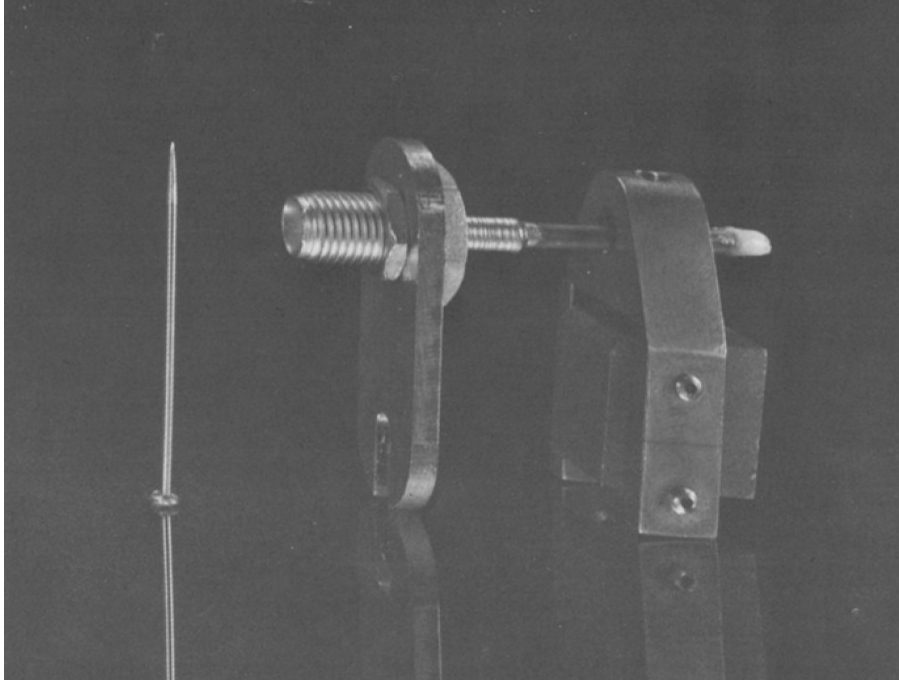
Şekil 3.2. FMR prob yapısı [13]

Bobine uygulanan akım $I.m_{rf}$ olduğunda rezonans frekansı, tepe noktası $\omega = \omega_0$ olur. Bilinmelidir ki bu yönde dönen kürenin kendisi (alan) değil manyetik dipol momentidir. Dönen manyetik dipol momentinden alanın dışında oluşturulmuş zamanla değişen manyetik alan, çatlak ile etkileşir ve Şekil 3.1.a ve Şekil 3.1.b’deki

gibi bobin tipi problemleri temsil eden uzaysal sabit, farklı zamanlı eşdeğer manyetik dipollerle aynı şekilde çatlak algılama sinyali üretirler.

Şekil 3.3'te Auld tarafından gerçekleştirilmiş olan FMR prob gösterilmiştir. YIG, mikrodalga devresine oyularak monte edilmiştir. Koaksiyal kablunun uç kısmına oluşturulan bir sarımlık bir bobin ile hatlar birbirine bağlanmış ve bu bobinin içine YIG küre koyulmuştur. Pirinç destekteki küçük bir samaryum kobalt mıknatıs manyetik alanı oluşturur. Bu mıknatıs, deneyde farklı alan yönlendirmeleri ve rezonans frekansları sağlayabilmek amacıyla soldan ayarlanabilir özelliktedir. Bütün düzenek 1.5 cm çapında ve sadece 4 cm uzunluğunda bir yapı olup, probun ucu sadece monte edildiği hattın genişliği kadardır.

FMR probun hassasiyet faktörü, standart girdap akımları probunun bobin tasarım parametrelerinden daha az bağımlıdır. Ancak FMR prob hassasiyet faktörü; hem ferit yüzey ayrıntılarına, kalitesine, katkılarına vs hem de yönlendirme ve güç etki alanına bağlıdır. FMR probunun hassasiyet faktörü test parçasının varlığından daha kuvvetli bir şekilde etkilenmesinden dolayı da farklılık gösterir. YIG içindeki girdap akımları ana rezonastaki rezonansı ve çift farklı rezonans modlarını (manyetostatik modlar) önemli ölçüde yükler. Bu, rezonans frekansındaki değişiklikleri ve probun hat şeklini meydana getirir. Sonuç olarak; Prob, test örneğinin iletkenliğindeki aşırı değişimlerden büyük bir çatlak gibi etkilenir. Büyük bir yarık için genel tepki Bölüm 3'teki basit hesaplamalarda bulduktan sonra probun hassasiyet faktörü değiştirilebilir. Öncelikle kuplaj döngüsünün dinamik alanının h_{rf} genliği hesaplanır. Deneysel olarak en iyi kuplaj döngü çapı (Sadece küresel YIG feritler için) küre çapının 1,5 katı olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. Auld tarafından gerçekleştirilmiş olan FMR probun resmi probun alt kısmında Samaryum cobalt mıknatis bulunmaktadır [13]

Mıknatıslanma vektörü bileşenlerini hesaplamak için $h'_x = -\frac{e'_y}{Z_s}$ referans alınarak elde edilen aşağıdaki formüller kullanılır;

$$m_z = \frac{\left[w_m \left(w_r + \frac{i}{T} \right) + \frac{i}{3} w_m \right] h_z}{\left[\left(w_r + \frac{i}{T} \right)^2 - w^2 \right]} \quad (3.3)$$

$$m_x = \frac{i w w_m h_z}{\left[\left(w_r + \frac{i}{T} \right)^2 - w^2 \right]} \quad (3.4)$$

$$w_m = 4\pi\gamma M_s; w_r = \gamma H_r - \frac{1}{3} w_m \quad (3.5)$$

Yukarıdaki formüllerde

Şekil 3.2`deki koordinatlara uygun olacak şekilde kullanılmıştır. [13]

3.3. Rezonans Şartı

Manyetik alanın etkisiyle yarılan enerji seviyelerini $\varepsilon_i, \varepsilon_k$ olarak adlandıralım. Enerji aralıkları elektromanyetik kuantlara eşit olmalıdır [14].

$$\hbar\omega_{ik} = \varepsilon_i - \varepsilon_k = \Delta\varepsilon_{ik} \quad (3.6)$$

Yukarıda ω_{ik} geçiş frekansıdır. Enerji geçişleri Zeeman etkileşmesiyle belirlenir:

$$\Delta\varepsilon_{ik} = g\mu_B m_i H - g\mu_B m_k H = g\mu_B \Delta m_i H \quad (3.7)$$

Deneysel olarak ve teorik olarak geçişleri sağlayan SHF (MW) manyetik alanı H_{MW} , Zeeman yarılmasını sağlayan sabit manyetik alana (H_0) dik olmalıdır.

Yukarıdaki denklemlerden rezonans frekansını şu şekilde buluruz:

$$\hbar\omega_{ik} = \hbar\omega_{res} = \Delta\varepsilon_{ik} = g\mu_B \Delta m_{ik} H_0 \quad (3.8)$$

Sadece Zeeman enerjisi etkisiyle yarılan enerji seviyeleri arasındaki geçişler için seçim kuralı $\Delta m_{ik} = \pm 1$ olacaktır. Böylece;

$$\omega_{res} = \frac{g\mu_B H_0}{\hbar} = \frac{ge\hbar}{2m_e c \hbar} H_0 = \frac{ge}{2m_e c} H_0 = \gamma H_0 \quad (3.9)$$

olur.

Bu denklemden de anlayacağımız üzere Lande g faktörünü bulmanın iki yolu var. Birincisi H_0 'ı sabit tutup ω_{res} frekansını değiştirmek, ikincisi de ω_{res} frekansının sabit tutup manyetik alanı değiştirmek. Deneysel kolaylık açısından ikinci yol birincisinden daha uygundur ve sıklıkla bu yöntem kullanılır.

Denklem 3.9`de \hbar yani Plank sabitinin olmadığını görüyoruz. Yani bu formüle kuantum teorisinin yardımı olmadan da ulaşmamız mümkündür. Gerçekten de bu Larmour tarafından kuantum teorisi ortaya çıkmadan önce elde edilmiştir.

3.4. Rezonans Şartının Genel İfadesi

Mıknatıslanma için genel hareket denklemi denklem 3.1 de verildiği gibidir. Şimdilik sönüm terimlerini dikkate almamaktayız. Burada küresel koordinat sistemini kullanmak daha elverişli olacaktır. Buna göre mıknatıslanma vektörü ve dış manyetik alanın bileşenleri;

$$\begin{aligned} M_x &= M \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ M_y &= M \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \\ M_z &= M \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (3.10)$$

ve

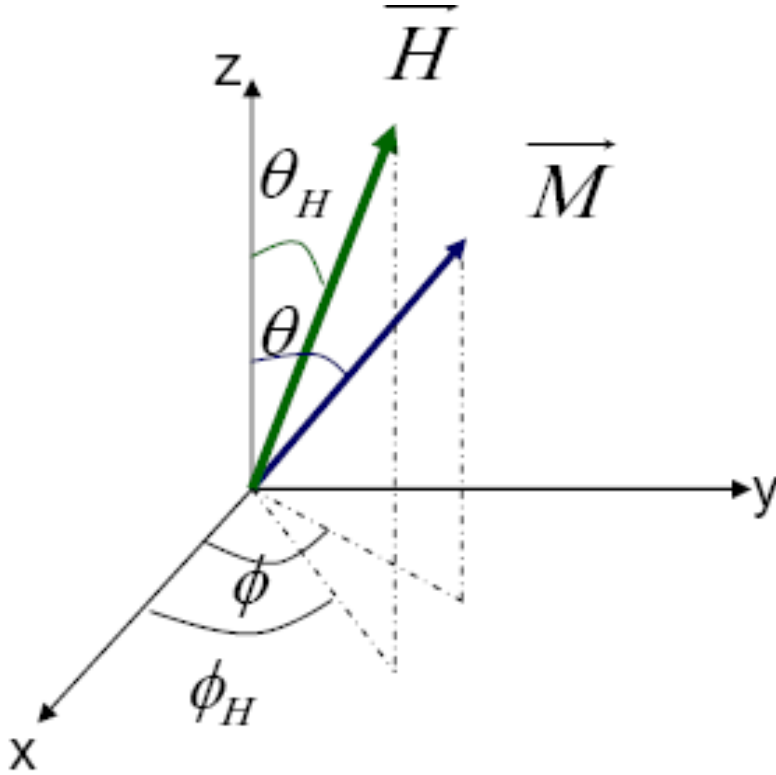
$$\begin{aligned} H_{M(Radial)} &= H_x \sin \theta \cdot \cos \varphi + H_y \sin \theta \cdot \sin \varphi + H_z \cos \theta \\ H_{\theta(Polar)} &= H_x \cos \theta \cdot \cos \varphi + H_y \cos \theta \cdot \sin \varphi + H_z \sin \theta \\ H_{r(azimuthal)} &= H_x \sin \varphi + H_y \cos \varphi \end{aligned} \quad (3.11)$$

Mıknatıslanmanın ifadesi Denklem 3.5`de ifade edilmişti.

Hareket denklemi için;

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \gamma H_\varphi \\ \frac{d\varphi}{dt} \sin \theta &= -\gamma H_\varphi \end{aligned} \quad (3.12)$$

elde edilir.



Şekil 3.4. H dış manyetik alanı altındaki toplam mıknatıslanması M olan sistem için koordinat eksen takımının gösterimi [14].

Termodinamik denge durumunda mıknatıslanma vektörü \vec{M} , toplam efektif manyetik alan yönünü tercih eder. Toplam efektif manyetik alan serbest enerji yoğunluğunun (F') türevi şeklinde verilir;

$$\vec{H}_{eff} = \frac{\partial F}{\partial \vec{M}} \left\{ \text{veya } \vec{H}_{eff} = -\nabla_{\vec{M}} F \right\} \quad (3.13)$$

Denge durumunda mıknatıslanma \vec{H}_{eff} 'e paralel olur ve H 'ın θ ve ϕ bileşenleri olmaz. Öyleyse denge durumu serbest enerjinin minimum koşullarından bulunur;

$$\begin{aligned} F_{\theta} &\equiv \frac{\partial F}{\partial \theta} = 0 \\ F_{\phi} &\equiv \frac{\partial F}{\partial \phi} = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Hareket denklemlerini analitik olarak çözebilmek için bazı ön kabuller yapmalıyız. Öncelikle sistem tam olarak denge durumunda değil de, denge durumu etrafında çok küçük salınımlar yapsın. Bu durumda H_θ ve H_φ bileşenleri artık 0 değildir ve

$$\begin{aligned} H_\theta &= -\frac{F_\theta}{M} \\ H_\varphi &= -\frac{F_\varphi}{M \sin \theta} \end{aligned} \quad (3.15)$$

olur.

Denge durumundan küçük ötelemeler için

$$\begin{aligned} \delta\theta(t) &= \theta(t) - \theta_0 \\ \delta\varphi(t) &= \varphi(t) - \varphi_0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

yazarak serbest enerji türevleri Taylor açılımı yardımıyla

$$\begin{aligned} F_\theta &= F_{\theta\theta}\delta\theta + F_{\theta\varphi}\delta\varphi \\ F_\varphi &= F_{\varphi\theta}\delta\theta + F_{\varphi\varphi}\delta\varphi \end{aligned} \quad (3.17)$$

olur. Burada $F_{\theta\theta}$, $F_{\varphi\varphi}$ ve $F_{\theta\varphi}$ ifadelerinden kasıt sırasıyla θ 'ya göre iki kere türev, φ 'ye göre iki kere türev ve önce θ sonra da φ ye göre türev anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan bu türevlerin $F_{\theta\theta} = \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right)_{\theta=\theta_0}$ da olduğu gibi $\theta_0 = \varphi_0 \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right)_{\theta=\theta_0}$

denge durumunda hesaplandığı ve yazım kolaylığı açısından kısaltılmış olduğu unutulmamalıdır.

Denklem (3.15) ve denklem (3.12) birlikte ifade edilirse;

$$\begin{aligned} F_\theta &= \frac{M \sin \theta_0}{\gamma} \dot{\varphi} = F_{\theta\theta}\delta\theta + F_{\theta\varphi}\delta\varphi \\ F_\varphi &= \frac{M \sin \theta_0}{\gamma} \dot{\theta} = F_{\varphi\theta}\delta\theta + F_{\varphi\varphi}\delta\varphi \end{aligned} \quad (3.18)$$

ve sapmalar denge durumu etrafında olduğundan $\begin{pmatrix} \dot{\varphi} = \delta \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} = \delta \dot{\theta} \end{pmatrix}$ alınabilir çünkü

$$\left(\frac{d\delta\theta}{dt} = \frac{d(\theta - \theta_0)}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \right). \quad (3.19)$$

şeklindedir.

Böylece;

$$\begin{aligned} \frac{M \sin \theta_0}{\gamma} \delta \dot{\varphi} &= F_{\theta\theta} \delta\theta + F_{\theta\varphi} \delta\varphi \\ -\frac{M \sin \theta_0}{\gamma} \delta \dot{\theta} &= F_{\varphi\theta} \delta\theta + F_{\varphi\varphi} \delta\varphi \end{aligned} \quad (3.20)$$

halini alır.

Yukarıda verilen diferansiyel denklemlerin çözümünün harmonik bir fonksiyon olacağı bilinmektedir ve ω frekans olmak üzere $\delta\theta, \delta\varphi = e^{j\omega t}$ şeklinde arandığında Denklem (3.15) lineer denklemlere dönüşür.

Bu denklem sisteminin çözümü için katsayılar determinantı sıfır olmalıdır.

$$F_{\varphi\theta}^2 - F_{\theta\theta}F_{\varphi\varphi} + \frac{\omega^2}{\gamma^2} M^2 \sin^2 \theta_0 = 0 \quad (3.21)$$

Buradan rezonans koşulu elde edilmiş olur.

$$\omega_0 = \gamma H_{eff} = \frac{\gamma}{M \sin \theta} = \left\{ F_{\theta\theta}F_{\varphi\varphi} - F_{\varphi\theta}^2 \right\}^{1/2} \quad (3.22)$$

veya

$$\left(\frac{\omega_0}{\gamma} \right)^2 = \frac{1}{M^2 \sin^2 \theta} \left\{ \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} - \left(\frac{\partial F}{\partial \theta} \frac{\partial F}{\partial \varphi} \right)^2 \right\} \quad (3.23)$$

elde edilir [14].

3.5. Şekil Anizotropisinin Rezonans Frekansına Etkisi

Homojen ve manyetik olarak izotropik bir örneği düşünelim. Bu durumda yukarıdaki serbest enerji ifadesi F denklem (3.24) gösterildiği gibi Zeeman enerjisiyle demanyetizasyon enerjisinin toplamı olarak ifade edilir.

$$F = F_z + F_{de} \quad (3.24)$$

Gerçekte serbest enerji ifadesinde bu toplama aşağıdaki faktörleri de dahil etmek gerekir.

F_{mc} = kristal anizotropi enerjisi

F_{me} = manyeto elastik (gerilim) anizotropi

F_{ex} = değiş-tokuş (exchange) enerjisi

F_D = domain duvarı (domain wall) enerjisi

Biz şimdilik izotropik bir örnek için Zeeman ve demanyetizasyon ifadelerini göz önünde bulunduracağız.

$$F = -\overline{M}\overline{H} + \frac{1}{2}(N_x M_x^2 + N_y M_y^2 + N_z M_z^2) \quad (3.25)$$

Yukarıdaki birinci terim Zeeman enerjisidir. İkinci terim ise

$$F_{de} = -\frac{1}{2}\overline{M}\overline{H}_{de} = -\frac{1}{2}\overline{M}\left(M(-\overline{N}\overline{M}) = \frac{1}{2}\overline{M}\overline{N}\overline{M}\right) \quad (3.26)$$

den bulunur. \overline{N} örneğin geometrisine bağlı demanyetizasyon faktörüdür ve ana eksenler için,

$$\begin{pmatrix} N_x & 0 & 0 \\ 0 & N_y & 0 \\ 0 & 0 & N_z \end{pmatrix}$$

olur. Ana eksenler için demanyetizasyon faktörleri toplamı

$$N_x + N_y + N_z = 4\pi \quad (3.27)$$

olacaktır.

Demanyetizasyon faktörleri N_x, N_y ve N_z olan elipsoit şeklindeki ferromanyetik bir örneği düşünelim. Örneğin iç manyetik alan bileşenleri

$$\left. \begin{aligned} H_{x(i)} &= H_{x(0)} - N_x M_x \\ H_{y(i)} &= H_{y(0)} - N_y M_y \\ H_{z(i)} &= H_{z(0)} - N_z M_z \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

şeklinde dir. $H_{(i)}$ etkin iç alan $H_{(0)}$ uygulanan manyetik alandır. Hareket denklemleri şu şekli alır;

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_x}{dt} &= \gamma [H_{0(eff)} + (N_y - N_z)M] M_y \\ \frac{dM_y}{dt} &= \gamma [H_{0(eff)} + (N_x - N_z)M] M_x \\ \frac{dM_z}{dt} &= 0 \text{ ve } M_z = M_s \end{aligned} \right\}$$

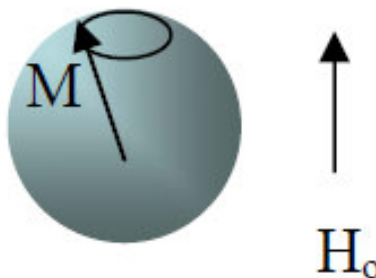
Buradan

$$\omega_0^2 = \gamma^2 [H_{0(eff)} + (N_y - N_z)M_s] x [H_{0(eff)} + (N_x - N_z)M_z] \quad (3.29)$$

Kittel formülüne [7] ulaşılır.

Kittel formüllerini küre, silindir ve ince film şekilleri için kullandığımızda özel durumların rezonans frekansları elde edilir.

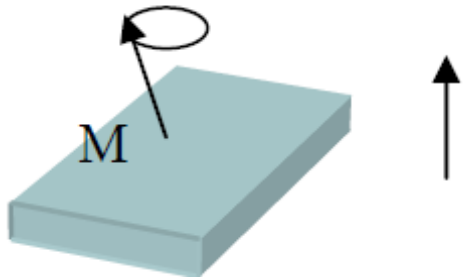
Örneğimizin şekli küre ise;



$$\begin{aligned} N_x &= N_y = N_z = 4\pi/3 \\ \omega_0 &= \gamma H_0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Şekil 3.5. Küre için Rezonans Frekansı

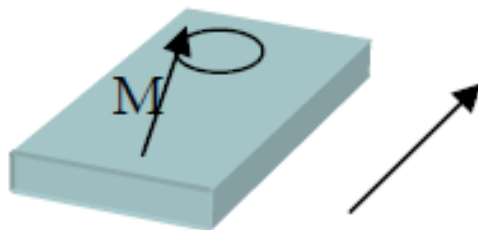
H_0 film düzlemine dik ise:



$$\begin{aligned} N_x = N_y = 0, \quad N_z = 4\pi \\ \omega_0 = \gamma(H_0 - 4\pi M_s) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Şekil 3.6. İnce Film için (H dik) Rezonans Frekansı

H_0 film düzlemine (xz) paralel ise:



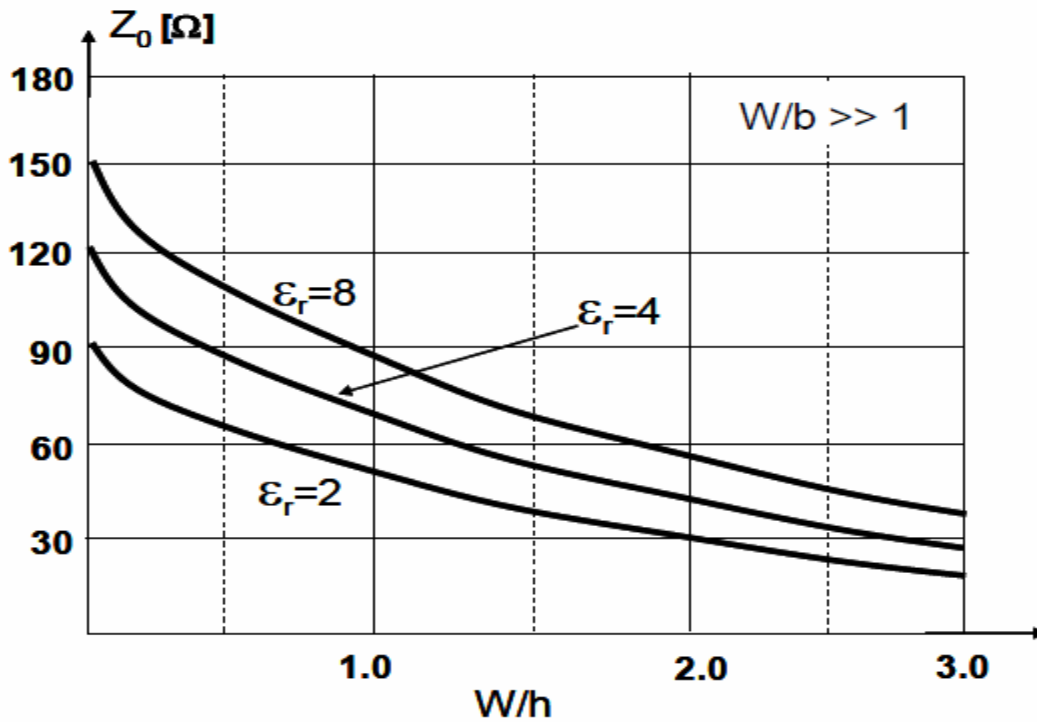
$$\begin{aligned} N_x = N_y = 0, \quad N_z = 4\pi \\ \omega_0 = \gamma\sqrt{H_0(H_0 + 4\pi M_s)} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Şekil 3.7. İnce Film için (H paralel) Rezonans Frekansı

Olur [14].

3.6. Mikro Şerit Hatlar ve Özellikleri

Mikrodalga teknolojisinin gelişmeye başladığı ilk yıllarda dalga kılavuzlarıyla yapılan çalışmalar, sonraki yıllarda şerit tabanlı yapıların gündeme gelmesiyle yerini büyük ölçüde mikro şerit yapılar bırakmıştır. İlk zamanlar araştırmacılar ucuz ve üretiminin basit olması nedeniyle dikkatlerini mikro şerit yapılar yönlendirmişlerdir. Askeri mikrodalga sistemlerinde, seramik ara tabakalı ince film devreleri ve teflon ara tabakalı mikro şerit yapılarla birlikte önemli gelişmeler gerçekleştirilmiştir. Günümüzde birçok RF ve yüksek hızda çalışan sayısal sistemlerde, çok katlı, mikro şerit ve şerit hat geometrilerinin kombinasyonundan oluşan PCB lerde kullanılmaktadır[15].



Şekil 3.9. Mikro şerit hattın değişik dielektrik malzemeleri için karakteristik empedansın W/h oranı ile değişimi

Tipik bir mikro şerit hattın karakteristik empedansı (Z_0) 20-30 Ω ile 150-250 Ω arasında değişmektedir. Pratikte bir mikro şerit hattın karakteristik empedansı 50 Ω dur.

Bir mikro şerit hattın karakteristik empedansını arttırmak iki şekilde gerçekleştirilir. Bağlı dielektrik sabiti daha büyük olan taban dielektrik malzeme seçilebilir. Ya da mikro şerit genişliğinin, taban dielektrik malzemenin yüksekliğine oranı (W/h) küçültülebilir[17].

3.7. Mikro Şerit Hatların Taban Malzemelerinin Seçilme Koşulları

Mikro şerit hat tasarımında, dielektrik taban malzemesi iki fonksiyonun yerine getirilmesini sağlar. Bunlardan birincisi devre elemanlarının uygun bir şekilde monte edilmesini sağlamak ve mekanik açıdan devre elemanlarına destek olmaktır. İkinci

fonksiyon olarak bir iletim hattının parçası olarak görev yapmak ve dielektrik geçirgenliği ve kalınlığı itibari ile antenin ve ya devrenin özelliklerini belirlemektir.[18] Mikro şerit tasarımı ilk olarak uygun bir dielektrik taban malzemesinin seçilmesi gerekmektedir. Bakır, alüminyum veya altınla kaplı çok sayıda taban malzemesi bulunmaktadır. Plakalar genellikle 1/3,1/6 veya 1/8 inch kalınlığında olduğu gibi üretim tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak, 10, 25, 50, 75 ve 100 mil ($1\text{ mil} = 2.54 \times 10^{-2}\text{ cm}$) kalınlığında plakalar temin etmek mümkün olabilmektedir[18].

Tasarımda taban malzemedeki dalga yayılım sabitinin iyi bilinmesi gereklidir. Bu sayede rezonans frekansı, rezonans direnci ve diğer parametreler belirlenebilir. Mikro şeritlerin performansını etkileyen en önemli parametre taban malzemenin dielektrik sabiti ve üretici toleransıdır.

Piyasada pek çok taban malzemesi kullanılmaktadır. Bunların dielektrik sabiti değerleri 1.17 den 25' e kadar değişmektedir. Kayıp tanjant değerleri ise 0.0001 – 0.0004 arasında değişmektedir [19].

Yüksek dielektrik sabitli malzemelere ihtiyaç duyulduğunda alümina, seramik taban malzemeleri tercih edilmektedir. Bu malzemelerin ϵ_r değerleri 9.7-10.3 arasında değişmektedir. Ticari bir malzeme olan ve kullanımı yaygın olan malzeme K-6098 teflon /cam kompoziti ($\epsilon_r = 2.5$), RT/Duroid-5880 PTFE $\epsilon_r = 2.2$ Epsilam-10 seramik dolgulu teflondur. ($\epsilon_r = 10$) [20].

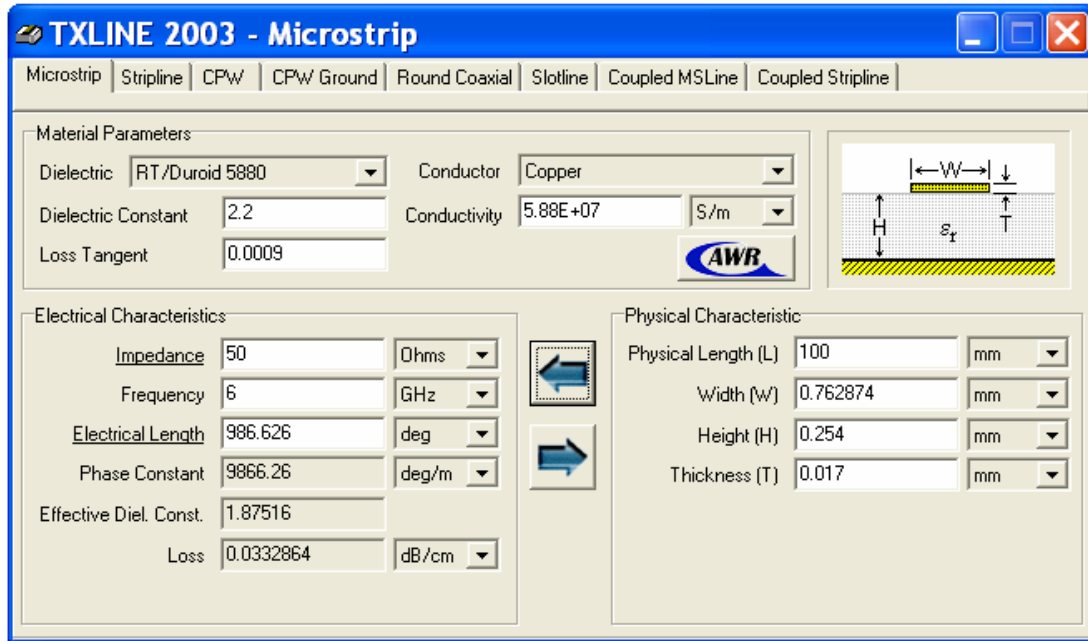
En yaygın olarak kullanılan mikro şerit taban malzemesi PTFE'dir (Politetrafloretilen). Bunun yanında gelişen malzeme teknolojisinin ürünü olarak yeni malzemeler, alternatif taban malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Gelecekte de PTFE malzemenin en temel taban malzeme olacağı düşünülmektedir. Boyutsal kararlılık, kolay üretilebilirlik, elektriksel kayıpların az olması, bakırla iyi yapışmaları ve geniş levhalar halinde bulunabilmeleri bu malzemeleri oldukça çekici hale getirmektedir. Bu malzemelerin kullanımını kısıtlayan en önemli faktör tam olarak belirli olmayan dielektrik sabitidir. Sistem yüksek frekanslara doğru

kaydığında malzemeler düşük kayıplarla çalışacak kadar gelişmiş değildir ve bu konuda yeni gelişmelere ihtiyaç vardır. PTFE malzemelerin içerisinde kullanıldığı, beklenen özelliklerin optimize edildiği yeni karma malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır [21].

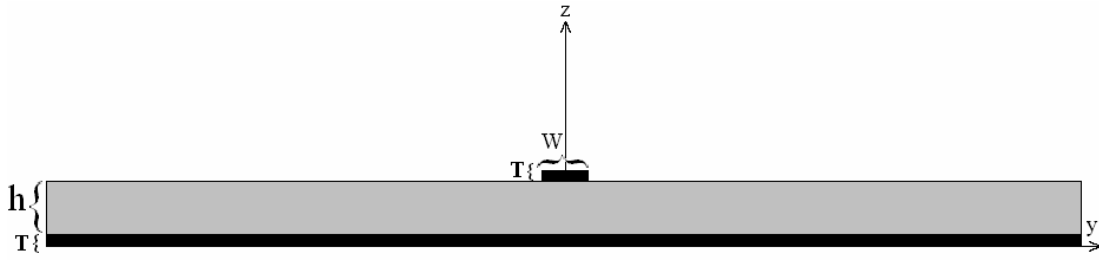
3.8. Mikro Şerit Hat Tasarımı

Karakteristik empedansı (Z_0) 50Ω , çalışma frekansı 6 GHz ve uzunluğu (L) 100mm olan bir mikro şerit hat tasarlamak için; dielektrik katsayısı $\epsilon_r = 2.2$, dielektrik kalınlığı $h=0,254\text{mm}$ ve bakır kalınlığı $t=0.017\text{mm}$ olan Rogers RT 5880 kodlu duroid altta seçilmiştir. Öncelikle hattın genişliğini hesaplayalım.

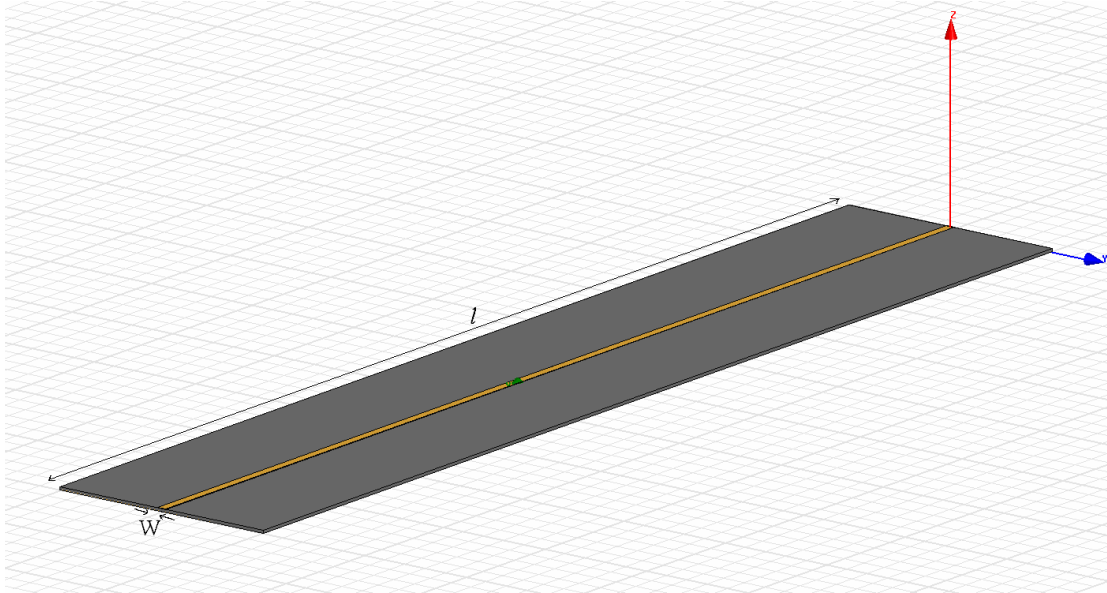
Kullanılan plaka için $\epsilon_r = 2.2$ (dielektrik katsayı), $h=0.254\text{mm}$ ve $T=0.017\text{mm}$ (bakırın kalınlığı) olarak belirlenmiştir. Öncelikle hattın genişliğini(W) hesaplayalım.



Şekil 3.10. TXLINE 2003 programı kullanılarak elde edilen sonuçlar



Şekil 3.11. Mikro şerit iletim hattının karşıdan kesit görünümü



Şekil 3.12. Mikro şerit iletim hattının üstten görünümü

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & W/h < 2 \text{ için} \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & W/h > 2 \text{ için} \end{cases} \quad (3.33)$$

Burada A;

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3.34)$$

şeklinde tanımlanır. B ise;

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.35)$$

olarak verilir. Tasarlamak istediğimiz hat için A;

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{2.2+1}{2}} + \frac{2.2-1}{2.2+1} \left(0.23 + \frac{0.11}{2.2}\right) = 1.159$$

olarak elde edilir.

Bulunan A ve $\epsilon_r = 2.2$ değerini denklem 3.33' de yerine koyarsak

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} = 3.126 \text{ sonucuna ulaşılır. Bu sonuca göre } W/h < 2 \text{ olmadığından B}$$

değerine ihtiyaç duyulur. B değeri denklem 3.35 yardımı ile

$$B = \frac{377\pi}{2 \times 50 \sqrt{2.2}} = 7.985$$

olarak elde edilir.

Bulunan B ve $\epsilon_r = 2.2$ değerini denklem 3.33' de yerine konulduğunda

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[7.985 - 1 - \ln(2 \times 7.985 - 1) + \frac{2.2-1}{2 \times 2.2} \left\{ \ln(7.985 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{2.2} \right\} \right] = 3.081$$

sonucunu buluruz. $W/h > 2$ koşulunu sağladığına göre $W/h = 3.081$ olacaktır.

$h = 0.254$ mm olduğundan $W = 0.254 \times 3.081 = 0.783$ mm olarak bulunur. Yani hattımızın genişliği 0.783 mm olmalıdır.

Efektif dielektrik katsayısı

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \quad (3.36)$$

İfadesi ile verilir[16]. Bu ifade de $h/W = \frac{1}{3.081}$ ve $\epsilon_r = 2.2$ değerleri yerlerine

yazılarak efektif dielektrik katsayısı $\epsilon_e = \frac{2.2+1}{2} + \frac{2.2-1}{2} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{12}{3.081}}} = 1.871$ bulunur.

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi \times 6 \times 10^9}{3 \times 10^8} = 125.664 \text{ m}^{-1}$$

Seçilen malzeme için kayıp tanjantı ($\tan \delta$) 0.0009`dur.

Hatta oluşacak kayıp ise

$$\alpha_d = \frac{k_0 \epsilon_r (\epsilon_e - 1) \tan \delta}{2\sqrt{\epsilon_e} (\epsilon_r - 1)} Np / m \quad (3.37)$$

eşitliği [16] kullanılarak,

$$\alpha_d = \frac{125.664 \times 2.2 (1.871 - 1) 0.0009}{2\sqrt{1.871} (2.2 - 1)} = 0.066 Np / m \quad \text{elde edilir.}$$

1 Neper = 8.686 dB ise $\alpha_d = 0.066 \times 8.686 = 0.573 \text{ dB} / m = 0.00573 \text{ dB} / \text{cm}$ olarak bulunur.

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 W} Np / m \quad \text{eşitliği } R_s = \sqrt{\omega \mu_0 / 2\sigma} \quad \text{olmak üzere [16]}$$

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{\omega \mu_0 / 2\sigma}}{Z_0 W} \quad (3.38)$$

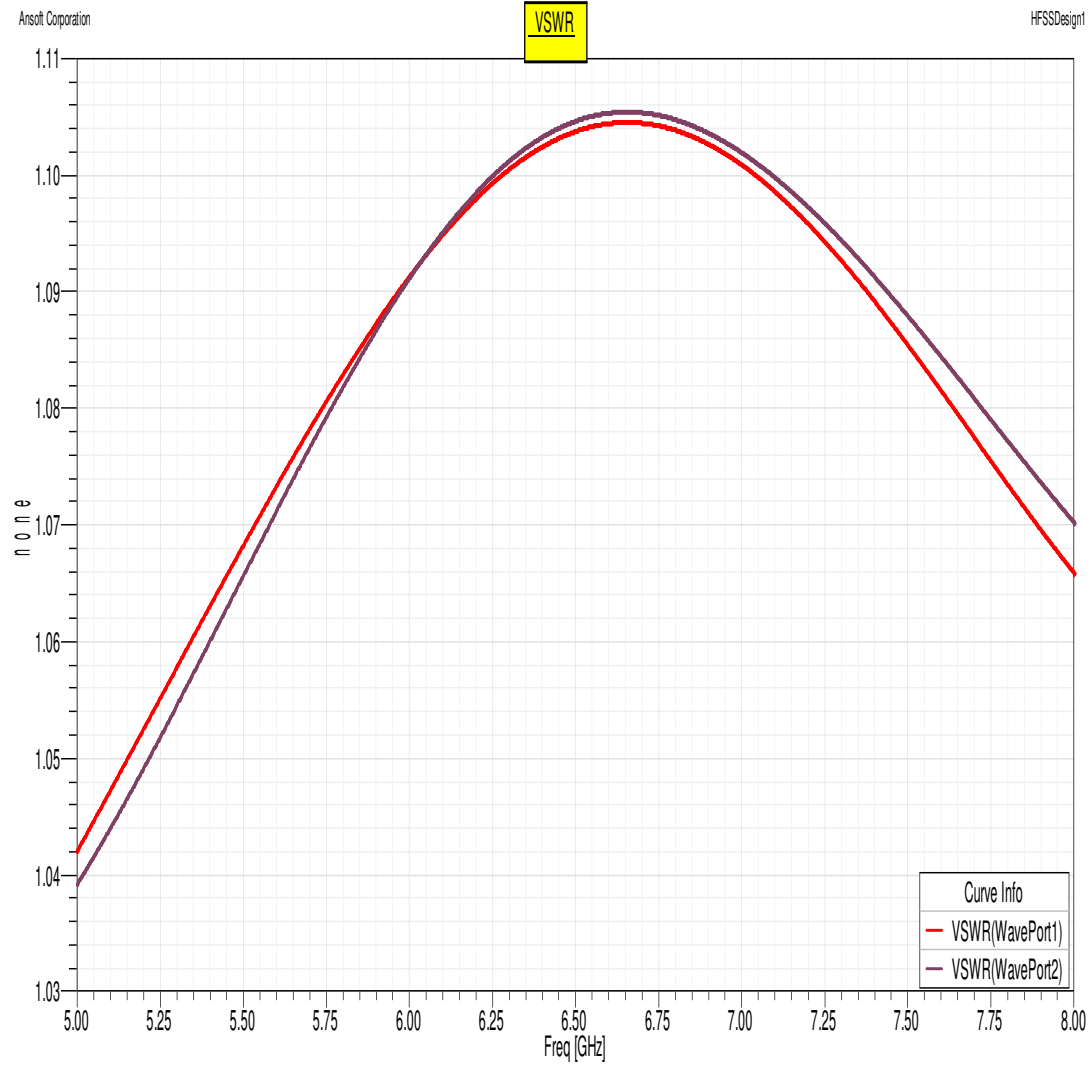
kullanılarak

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{\frac{2\pi \times 6 \times 10^9 \times 4\pi \times 10^{-7}}{2 \times 5.88 \times 10^7}}}{50 \times 0.783 \times 10^{-3}} = 0.5126 Np / m$$

elde edilir.

$$0.5126 Np / m = 4.45 \text{ dB} / m = 0.0445 \text{ dB} / \text{cm} \quad \text{olur}$$

Toplam kayıp= $\alpha_c + \alpha_d = 0.0445 + 0.00573 = 0.0523$ dB/cm olur.



Şekil 3.13. Gerilim duran dalga oranları

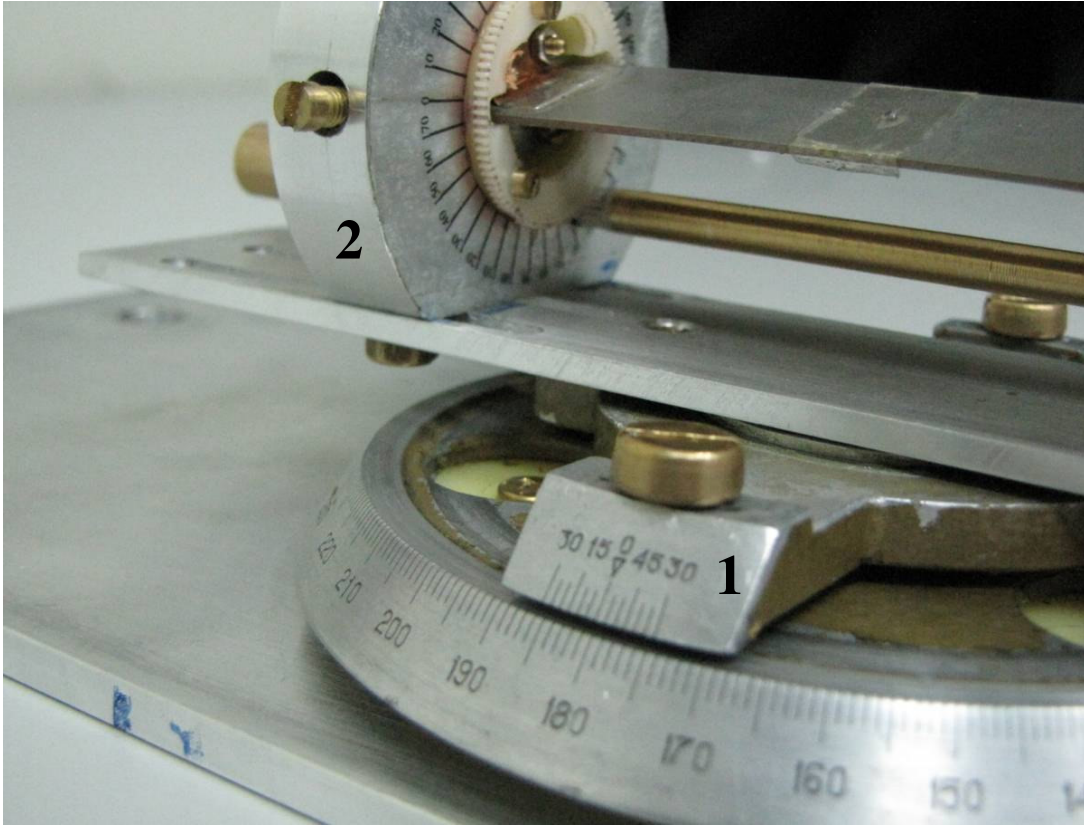
3.9. FMR Spektroskopisi

Spektrometre bir örneğin elektromanyetik alan altındaki davranışını incelemek için gerçekleştirilen düzendir. Şekil 3.14'te FMR Spektroskopisi Düzeneği görülmektedir.

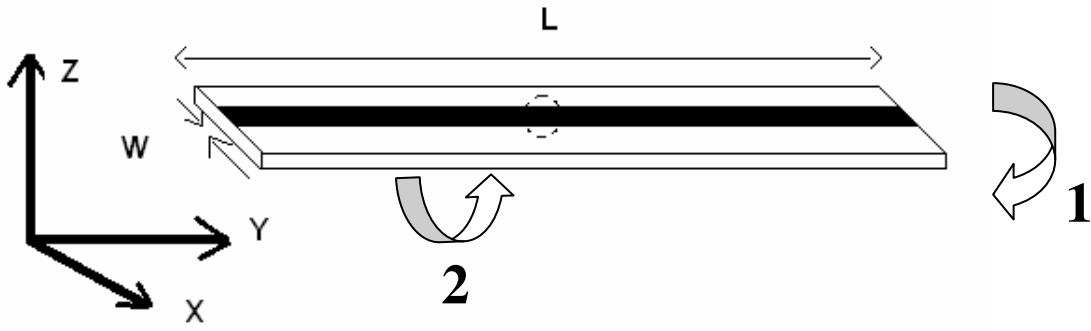


Şekil 3.14. FMR Spektroskopisi Düzeneği

Bir örneğin kristal anizotropisini belirlemek için örnek düzleminde (in plane) ve örneğe dik düzlemde (out of plane) ölçümleri yapılarak kristal simetrisi belirlenir. Bu amaçla elimizdeki standart YIG'in ölçümleri farklı statik alanlarda örnek düzleminde frekansa bağlı VNA ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan düzeneğe ait çizim ve döndürme düzeneği Şekil 3.15'te verilmiştir.

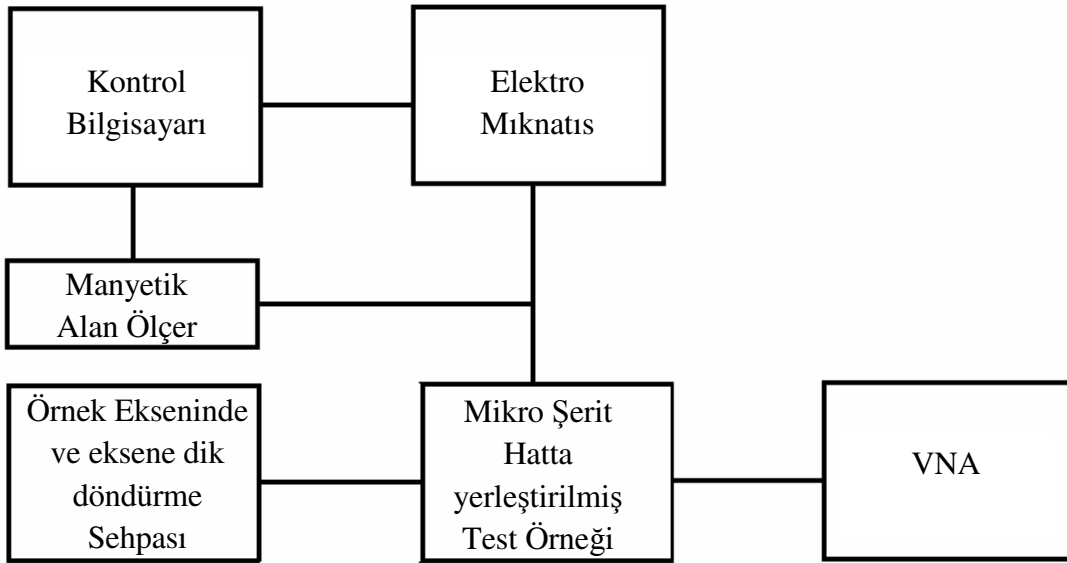


(a)

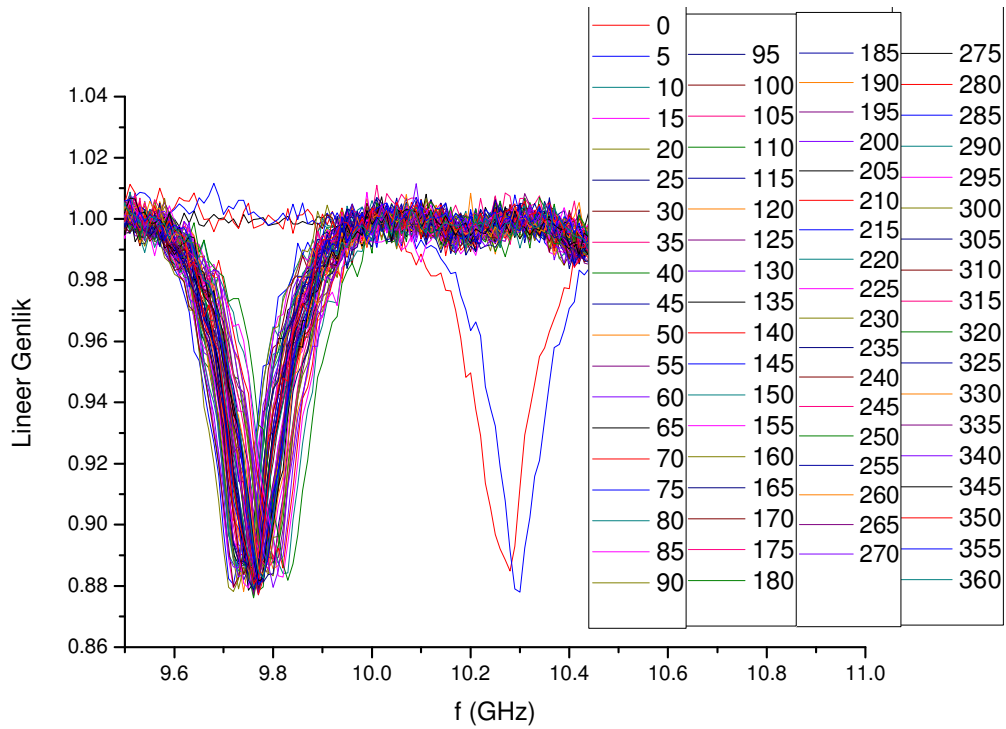


(b)

Şekil 3.15. FMR Spektrometrede kullanılan mikro şerit hat (1 örnekleme düzlemi (in plane), 2 örneğe dik düzlem (Örnek ekseninde, out of plane) ölçüm eksenleri)



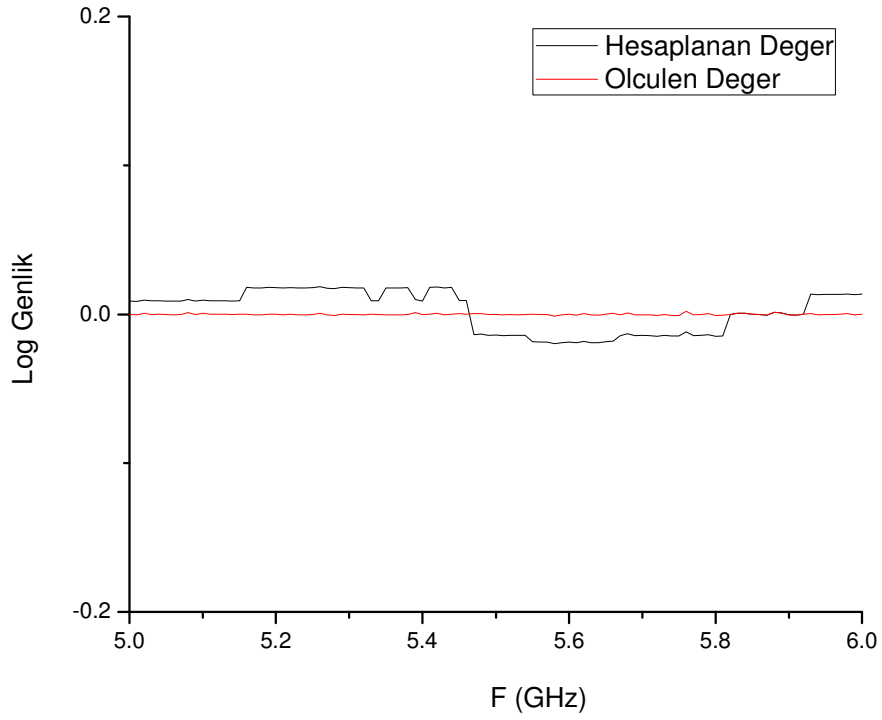
Şekil 3.16. FMR Spektrometre Blok Diyagramı



Şekil 3.17. FMR Spektrometrede Örnek Düzleminde Elde Edilen Rezonans Frekansları

Yukarıda gösterilen düzenekte 4.5 KOe manyetik alanda farklı açılarda alanlarında Şekil 3.15`de verilen 1 ve 2 yönlerinde döndürülerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her beş derecede bir alınan açı değerine karşılık gelen rezonanslar için elde edilen grafik 3.17`de verilmiştir. Matlab^(R)`da bu uygulama için yazılan programda

hesaplanan ve ölçüm sonunda elde edilen sonuçlar arasındaki ilişki Şekil 3.18'te verilmiştir.



Şekil 3.18. Ölçülen ve Hesaplanan Rezonans Çukur Değerleri

Teorik şiddet değeri deneysel sonuçlarla uyum icindedir. Ölçümlerdeki açısız davranış geometrik demanyetizasyon alanından kaynaklanmaktadır. Esasında küre tipi örneklerde geometrik alan her yönde özdeş olmalıdır. Çalışmada kullanılan örnekte de açısız davranış birçok açıda uyumluluk göstermektedir. Ancak bazı açılarda uyumsuzluk vardır. Bu uyumsuzluğun nedeni kristal malzemenin anizotropisinin tanımlanmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Bu örneğimizdeki açısız değişim, örneğin kristal anizotropisinin bir yansıması olarak yorumlanabilir. Örneğe ait anizotropi katsayılarını ve anizotropi simetrisini belirleyerek açısız simetri ve şiddet uyumu sağlanmalıdır.

Literatürde γ değeri 2.8MHz/Oe olarak verilmiştir. Bizim modellemede yapmış olduğumuz sonuç değerlendirmesinde aldığımız değer $\gamma = 2.55\text{MHz/Oe}$ 'tir. Bu iki değer birbirine oldukça yakın görünmektedir.

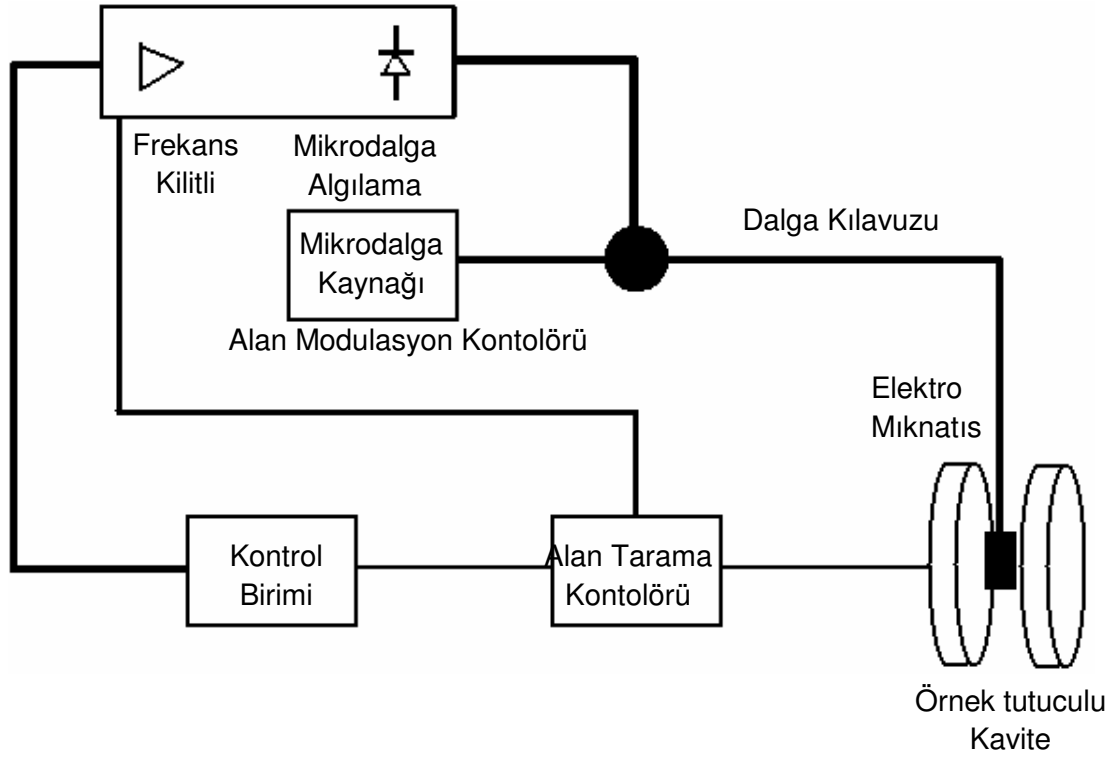
3.10. Farklı Malzemeler İçin Spektroskopi Geliştirilmesi

Manyetik rezonans elde etmek için çeşitli spektrometreler tasarlanmıştır. Bunlar genellikle ince manyetik filmlerle manyetik rezonans elde etmektedirler. Bu bölümde özellikle bu tür spektrometrelere değinilecek ve kendi geliştirdiğimiz spektrometre ile rezonans elde edilmesi, ölçüm yüzeyine uzaklık ve farklı metallere karşı davranışı değerlendirilecektir.

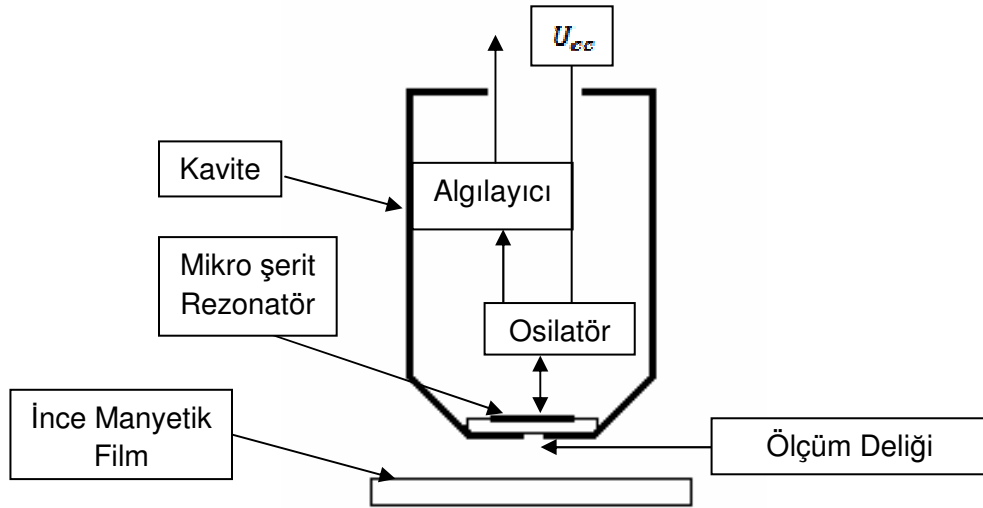
Hassas kaviteli FMR spektrometre blok diyagramı Şekil 3.19'da gösterilmektedir. Bu tür spektrometreler kural olarak malzemenin manyeto rezonans özelliklerini araştırmak için kullanılır. Diğer bir hassas FMR spektrometre prob türü olan ko-planar hatlar resonatör olarak kullanılabilir.

Hassas bir klasik mikro şerit hat oluşturmak için hesaplamalar yapıldı. Bu tür bir mikro şerit hat hesaplanırken MRI yöntemiyle görüntü elde edilmesi amaçlanmakta olup, ferromanyetik küre mikro şerit hattın metal zemininde açılmış olan bir deliğin içine yerleştirilmiştir.

Bu tür geometrilerin bağlantı şemalarında probun ölçülen örneğe yaptığı etki en aza indirgenir. FMR spektrum kaydı ve işlemesi bilgisayarla yapılmaktadır. Program zor ve kolay manyetizasyon eksenlerinin aranmasına, tek eksenli manyetik anizotropik alanın değerlerinin incelenmesine, etkin doyum manyetizasyonuna ve incelenen filmin (tezimizde küre) seçili alanına zorlayıcı kuvvet uygulanmasına olanak verir. FMR spektrometresinin blok diyagramı Şekil 3.3.20'de gösterilmiştir. Diyagram üç ayrı blokta oluşmaktadır



Şekil 3.19. Rezonatör kaviteli FMR Spektrometre [22]



Şekil 3.20. Mikro şerit hatlı FMR Spektrometre

İlk blok (algılayıcı bloğu), bir film örneğinin, Helmholtz sargılarının ve modülasyon sargılarının bulunduğu kat olan mikrodalga başlığını içerir. Bu kat, yatay düzlemde ölçülmüş iki koordinat boyunca hareket ettirilebilir ve incelenen film örneği ile birlikte, ölçüm başlığı ile çakışan eksen etrafında döndürülebilir. Helmholtz sargıları 1 kHz'lik frekans ile modüle edilmiş taramalı statik manyetik alanı üretir. Modüle eden alanın genliği, inceleme altındaki filmin FMR hat genişliğine ve statik alan şiddetine bağlı olarak $0,01 \pm 5.0$ Oe sınırları dahilinde ayarlanabilir. Bir bütün halinde bakılırsa, algılayıcı bloğu 270 x 180 x 350 mm ölçülerinde kompakt bir masaüstü aygıtı biçiminde yapılmıştır.

İkinci blok (işaret işleme bloğu) 365 x 380 x 165 mm. ölçülerine sahiptir ve aşağıdaki parçalardan oluşmaktadır:

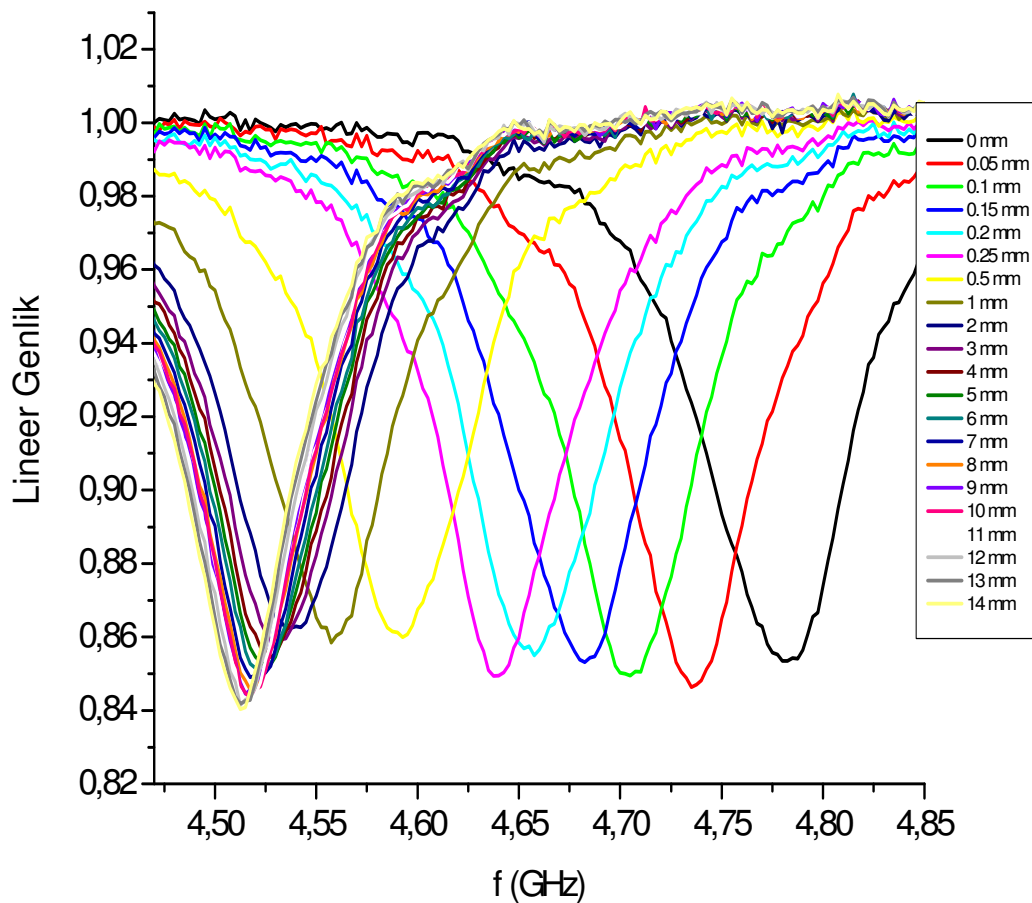
1. İşaret alışı kanalı - ölçüm başlığındaki mikrodalga üreticinin mevcut çalışma modunu sürekli biçimde destekler ve eşzamanlı işaret sezimini gerçekleştirir,
2. Tarama ve modülasyon birimi - tarama ve modülasyon sargılarının beslemesini sağlar.
3. Döner birim sürücüsü denetleme birimi.
4. Hızlı sıralı kanal üzerinden bilgisayar bağlantısı denetleme birimi

Üçüncü blok (spektrometre kontrol ve veri işleme bloğu), belirli programların arayüz modunda çalıştığı bir bilgisayardır. Zayıf işaret durumunda, örneğin filmler çok ince (100 \AA ve altı) veya FMR hattı geniş olduğunda, işaret birikim ihtimali sağlanır. Ne var ki, birikim olmasa bile, 100 \AA kalınlığındaki nikel-demir alaşımı film için işaret/gürültü oranı (SNR) 10 civarındadır [23].

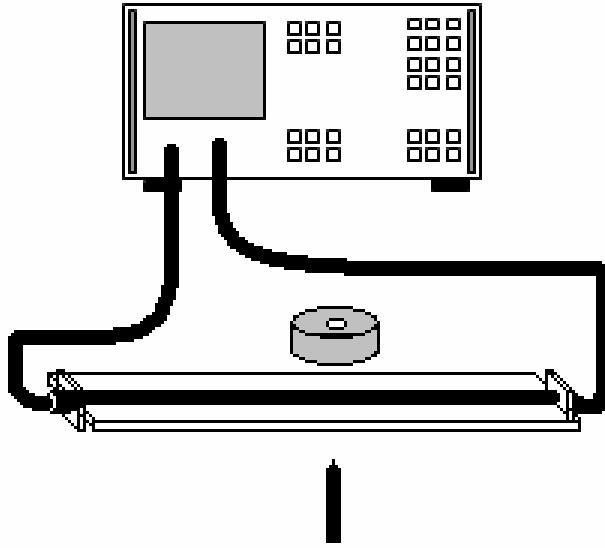
Ön araştırma için bu tür yüksek hassasiyetli spektroskopik sistem cevapları algılanmasında, rezonans koşullarının bozulmasına sebep olan örnek yakın alana yerleştirilmiş olan girdap akımı yakın alan probu gibi uyarılmaktadır. Burada; FMR frekansı ölçümü sırasında tarama probunun örneğe olan uzaklık ile değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.21`de verilmiştir. Bu deney için; metal bir

plaka test parçacığı olarak alınır ve probun test parçacığı yüzeyine olan uzaklığı ile değişen rezonans değerleri kaydedilir. Sonuç olarak; probun test parçacığı yüzeyine yaklaştırılması durumunda FMR sinyalinin etkilendiği belirlenmiştir. Bu etkilenme faz grafiğinde de açıkça görülmektedir. Bu sonuçtan, probun yüzeye yaklaştırılmasının ölçüm probu olarak kullanılan küre yüzeyinde yerel değişimler oluşturduğu anlaşılır. Ölçüm düzeneği Şekil 3.22`de gösterilmektedir.

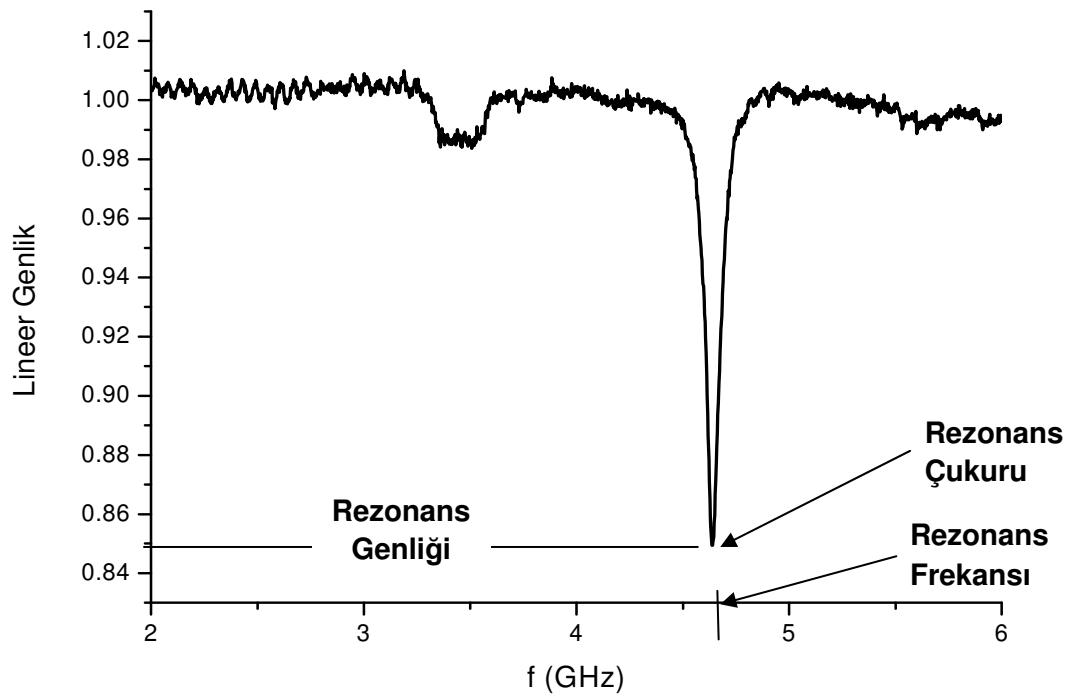
Yapılan deneyde elde edilen rezonans bir ters tepe özelliği taşımaktadır. Bundan sonraki kısımda bu özellik “rezonans çukuru” olarak adlandırılacaktır.



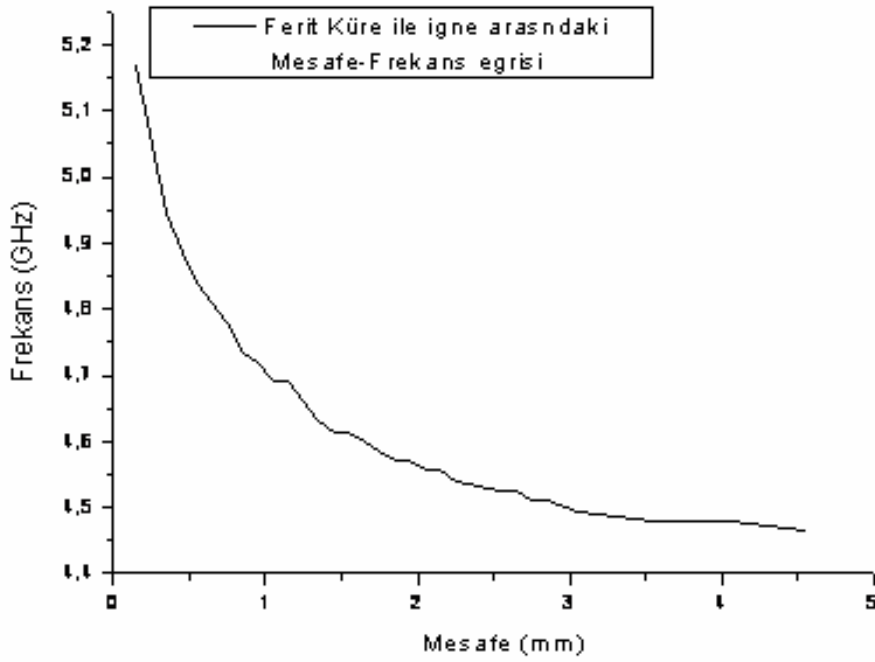
Şekil 3.21. Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Rezonans Grafikleri



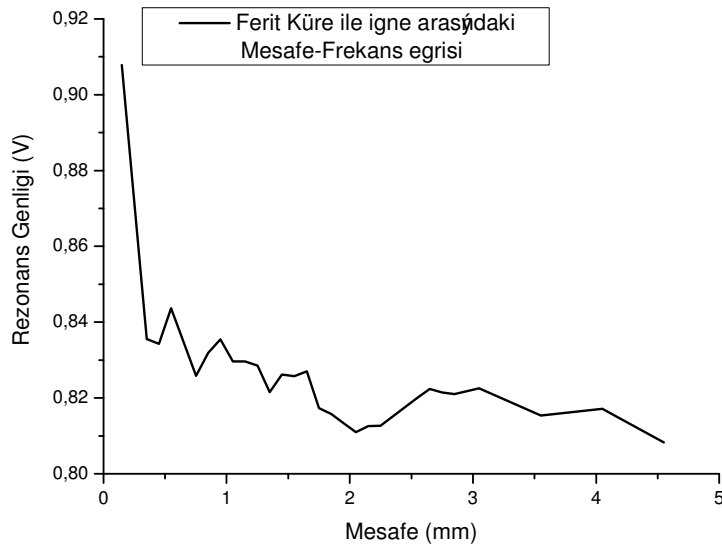
Şekil 3.22. FMR pertürbasyon deneyinin manyetik olmayan iğneyle yapıldığı düzenek



Şekil 3.23. FMR Düzenegi ile Elde Edilmiş Rezonans Grafiği



(a)



(b)

Şekil 3.24. a) Rezonans çukurunun mikro şerit hat iğne arasındaki uzaklığı b) Rezonans çukuru genliğinin mikro şerit hat iğne arasındaki uzaklığı göre değişim grafiği

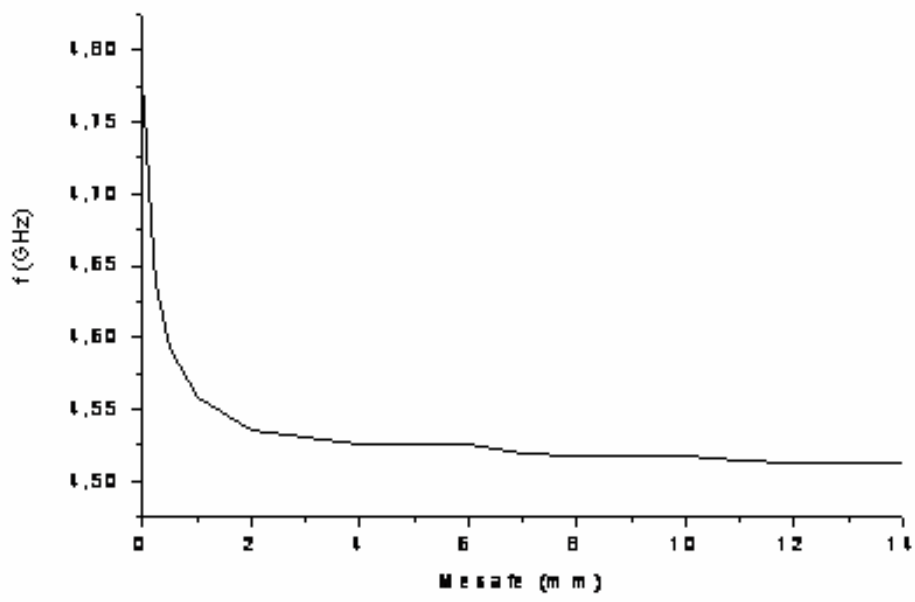
Şekil 3.24'te FMR rezonans çukuru sinyalinden elde edilen mikro şerit hat iğne uzaklığının frekans kaymasında ortaya çıkardığı sonuç görülmektedir. İğne küreye

dokunduğunda sinyal tamamen düşmektedir. Belli bir uzaklıktan sonrada sabit bir rezonans sinyali elde edilmektedir. Frekans düşüşü prob iğne uzaklığının artmasına bağlıdır.

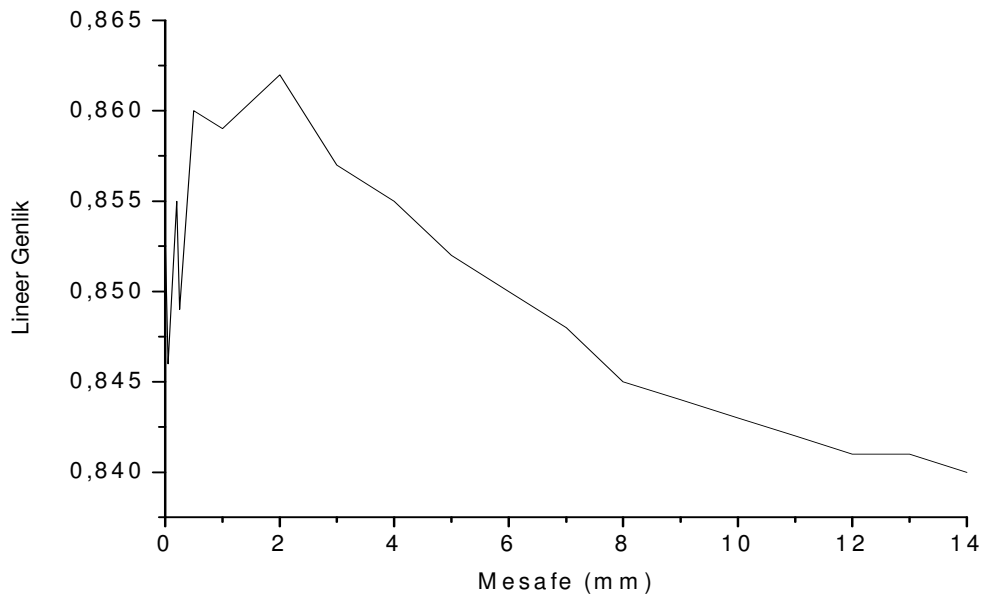
Frekans kayması değişimi uzaklık 4-5 mm olduktan sonra sabit hale gelmektedir. Bu deneyden açıkça görülüyor ki iğne kürenin oldukça geniş olan etki alanından uzaklaşmaktadır. Bu dolaylı bilgiyle kürenin yakınında bulunan alandan rezonans değişim bilgisi elde edebiliriz. Bu yaklaşım FMR Walker mode yüzey yapısının ölçülmesinde etkili olabilir. Rezonans çukuru genliğinin basamaklı olarak azalması sinyali Şekil 3.24 a'da gösterilmiştir.

İleride gerçekleştirilecek olan küresel prob ile örnek malzeme yapısı görüntüleme uygulamaları için farklı malzemelerden üretilmiş olan problarla çalışmak ve onların ferromanyetik cevabını gözlemlemek önemli bir çalışmadır.

Bu deneyde iletkenliği birbirinden farklı üç metal kullanılmıştır (Bakır 59x10 s/m, Alüminyum 37,8x10 s/m ve Pirinç 16.2x10 s/n). İletkenlikle orantılı benzer davranışları rezonans çukuru genliğinde de elde ettik. Bakır, alüminyum ve pirinçten üretilip yüzeyi pürüzsüz hale getirilen üç farklı metalle yapılmış olan uygulama aşağıda belirtilmektedir. Probun yüzeye yaklaşması ile rezonans frekansını değiştiği gözlenmiştir. Alüminyum, pirinç ve bakır için elde edilen rezonans frekansının probun yüzeye olan uzaklığıyla değişimi grafikleri Şekil 3.25a, Şekil 3.26a ve Şekil 3.27a'da verilmiştir. Ferromanyetik kürenin manyetik momenti girdap akımı oluşturmuş olup bu da frekans kaymasının ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

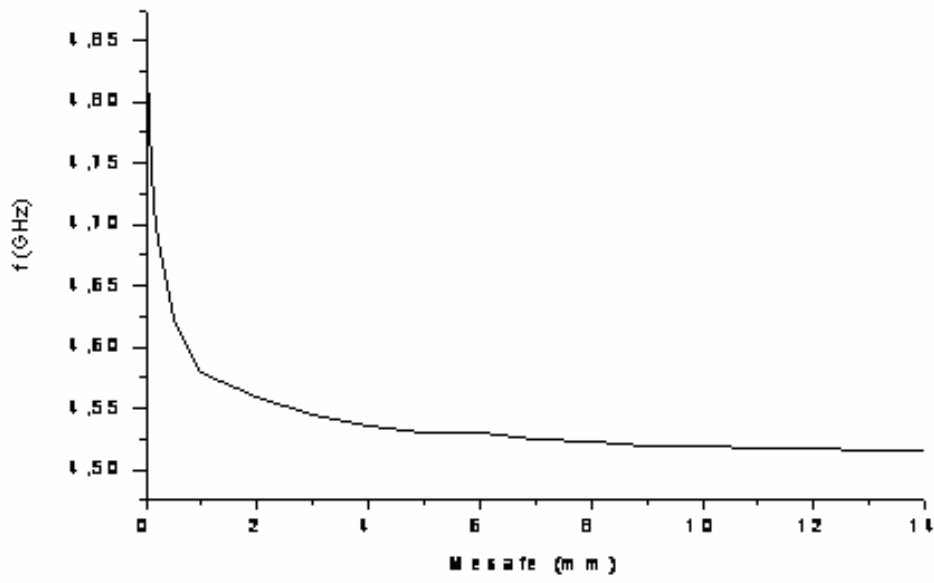


(a)

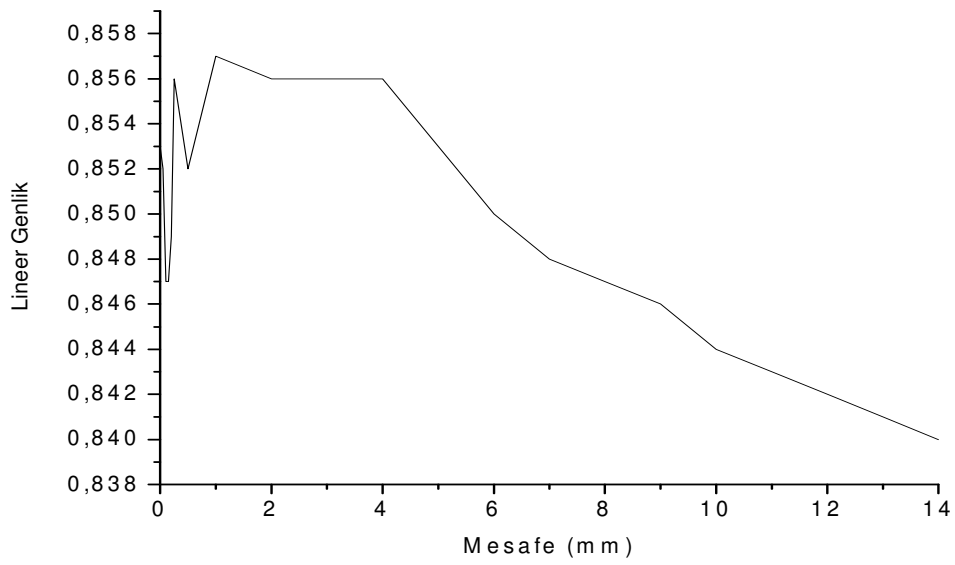


(b)

Şekil 3.25. Alüminyum Malzeme için a) Mikro şerit Hat İğne arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat İğne arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği

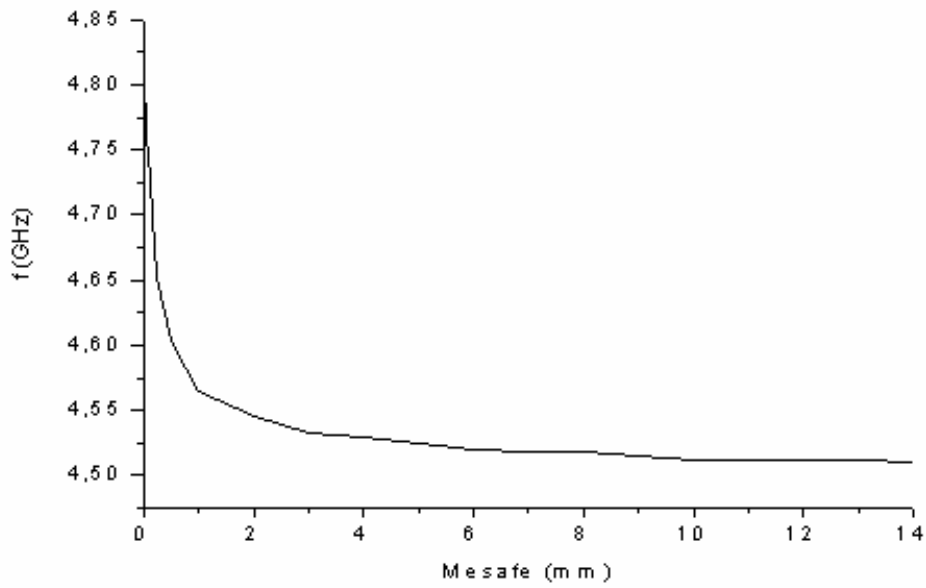


(a)

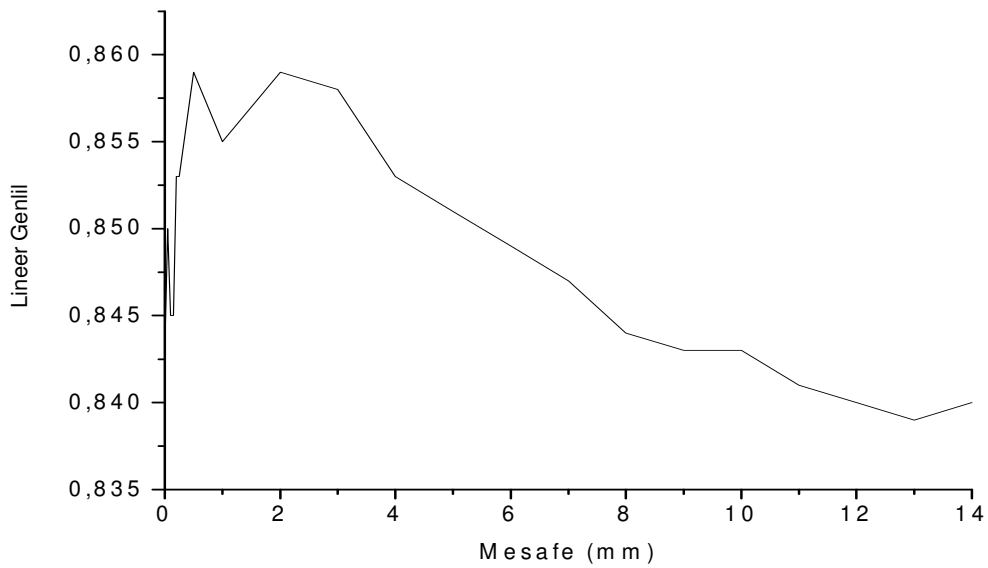


(b)

Şekil 3.26. Pirinç Malzeme için a) Mikro şerit Hat İğne arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat İğne arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği



(a)



(b)

Şekil 3.27. Bakır Malzeme İçin a) Mikro şerit Hat İğne arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat İğne arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği

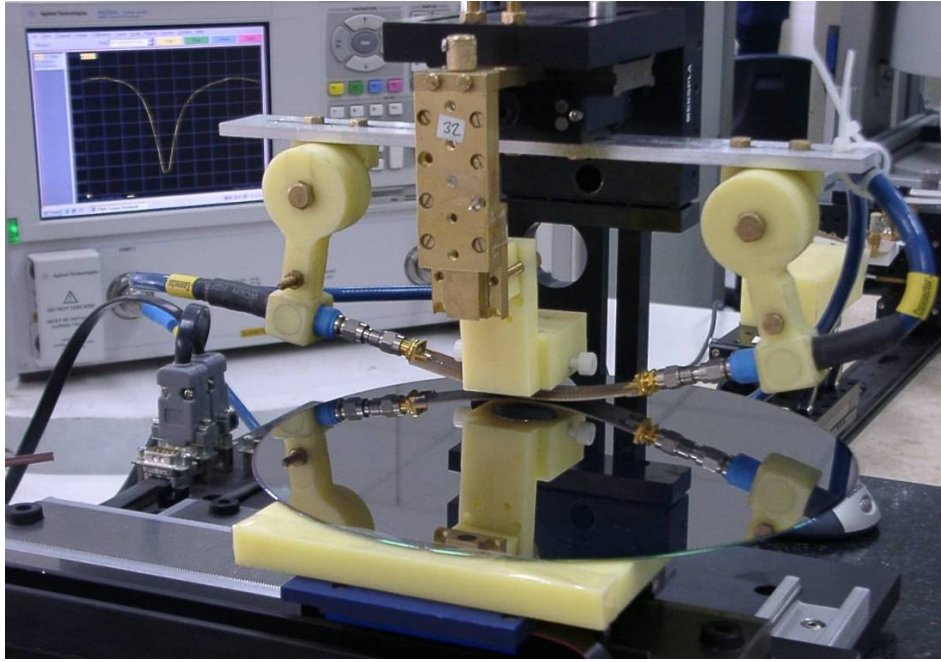
Uygulanan alan nedeni ile meydana gelen girdap akımı metal örnek yüzeyinde perturbasyon ile ferromanyetik rezonans oluşturur. Bu perturbasyon frekans kaymasına sebep olur, artan frekans perturbasyonun artmasına sebep olur.

Bilindiđi gibi rezonans sisteminde perturbasyon derecesi artmasıyla tanımlanır ve bu rezonans frekansında bir kaymaya sebep olur. Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'de FMR probunun metal yüzeyinden uzaklaşmasıyla oluşan frekans kaymasının grafiği verilmiştir. En yüksek hassasiyete ulaşıldığı mesafenin milimetreler bazında olduğu görölmektedir.

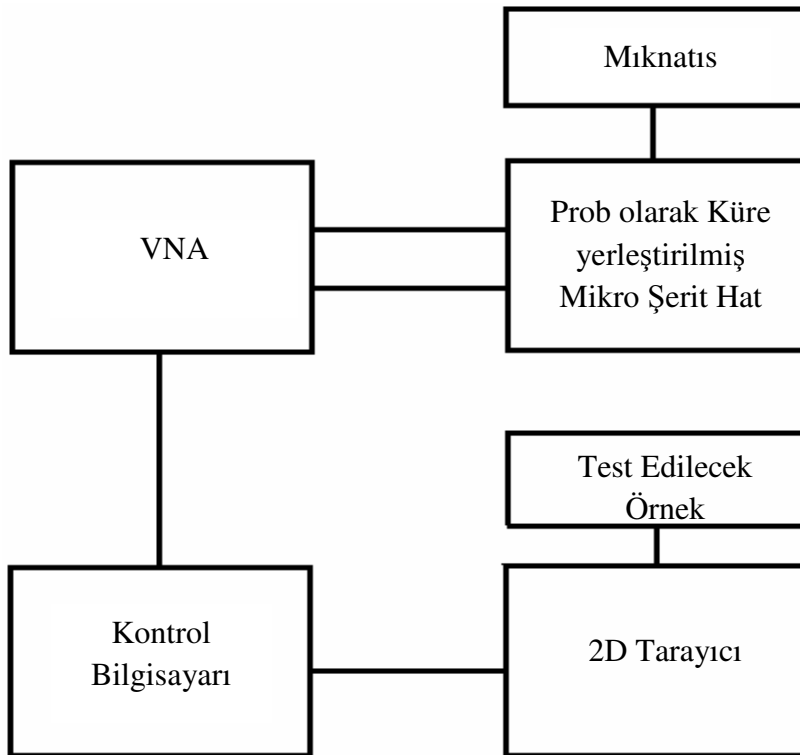
Hazırlanan prob farklı iletken malzemelerde, farklı kusurların (çatlak, yüzey pürüzü, homojen olmama vs.) görüntülenmesi amacıyla kullanılabilir. Bu yaklaşımla yarı-iletken malzemelerin de ölçülmesinde bu probun kullanımına olanak vereceği anlaşılmaktadır. Gelecek bölümde yarı-iletken malzemelerle ilgili çalışmalar yer almaktadır.

BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölüme kadar belirtilen yaklaşımla ferromanyetik kürenin MRI teknolojisi için çok yönlü olarak kullanılabilmesi düşüncesi ortaya çıkmaktadır. Bu tür bir yaklaşımla FMR fenomeninin uygulamaya dönüştürüldüğü belirtebilir. Bu durumda frekans kayması ve genlik değişimi yüksek hassasiyetli bir görüntülemeye nasıl dönüştürüldüğü belirtilmektedir. Manyetik rezonans çukur genişliği daraltılarak elde edilecek bir rezonansın tarama sonucu daha keskin bir görüntülemeyi ortaya koyacaktır. Bundan dolayı oluşturduğu rezonansın darlığı yaygınca bilinen YIG kristali tercih edilmiştir. FMRI teknolojisinin gerçekleştirildiği düzenek Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

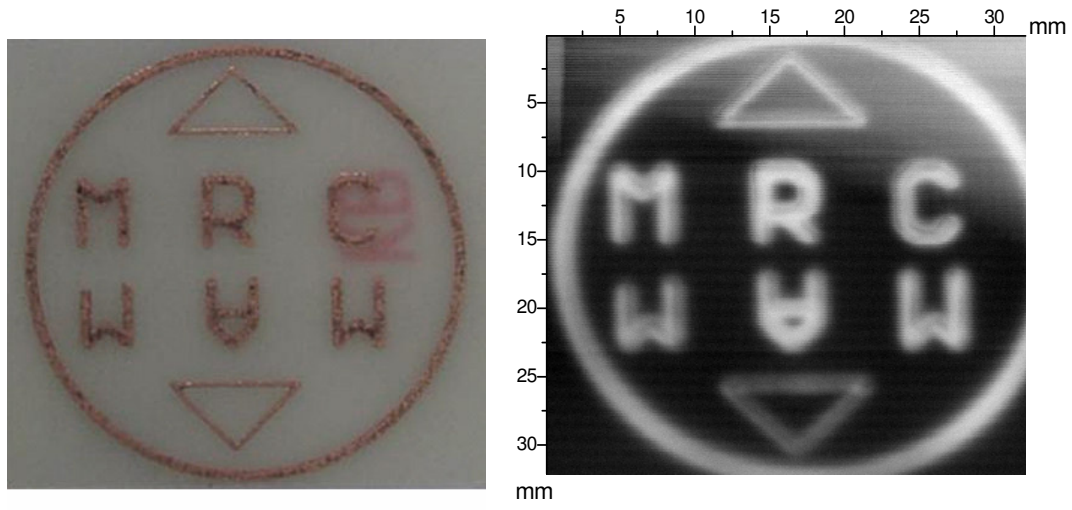


(a)



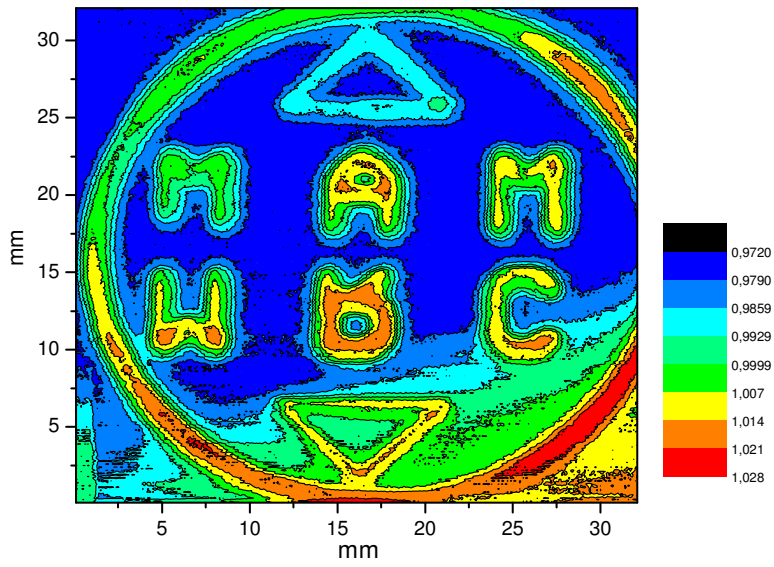
(b)

Şekil 4.1. FMRI Düzenegi a) fotoğrafı ve b) blok diyagramı



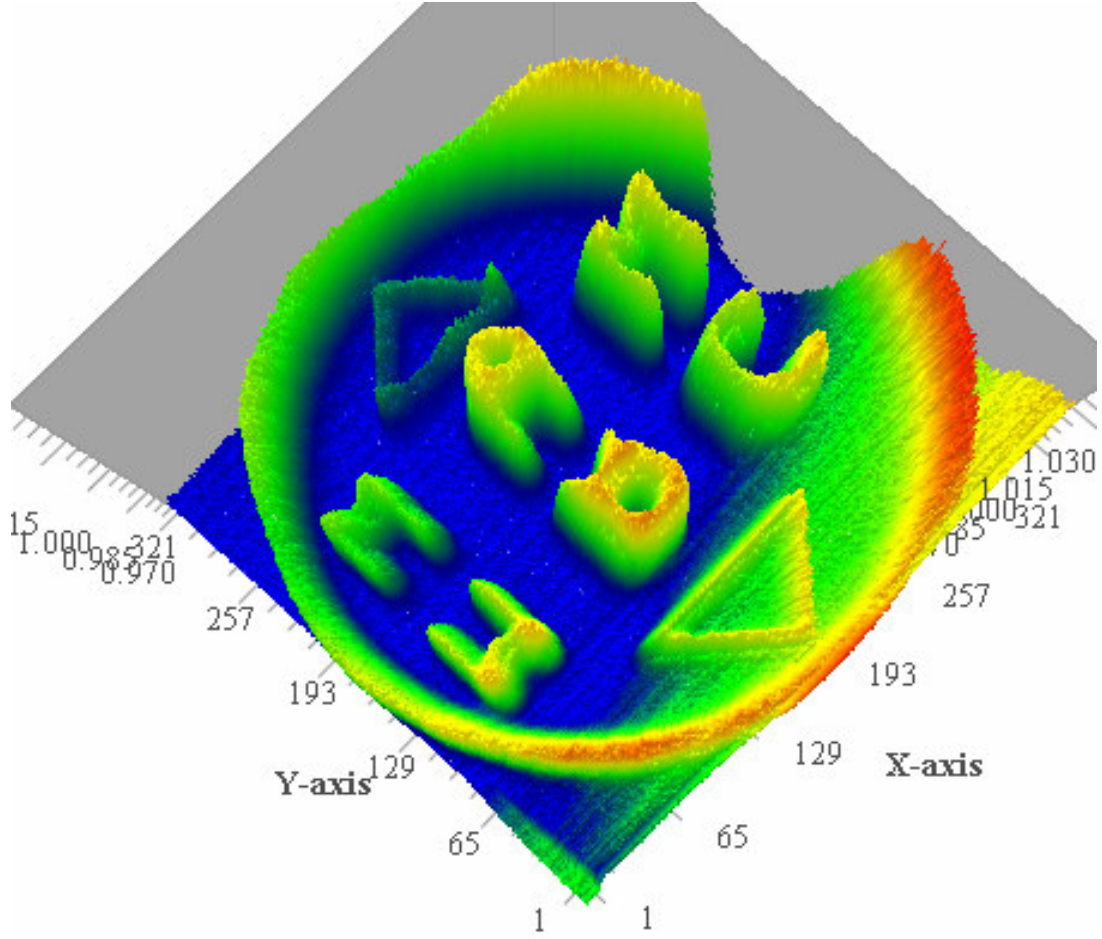
(a)

(b)



(c)

Şekil 4.2. 33x33 mm boyutlarında PCB örnek a) Örneğin fotoğrafı, b) 2D FMRI siyah beyaz sonucu
c) 2D FMRI topografik renkli sonucu

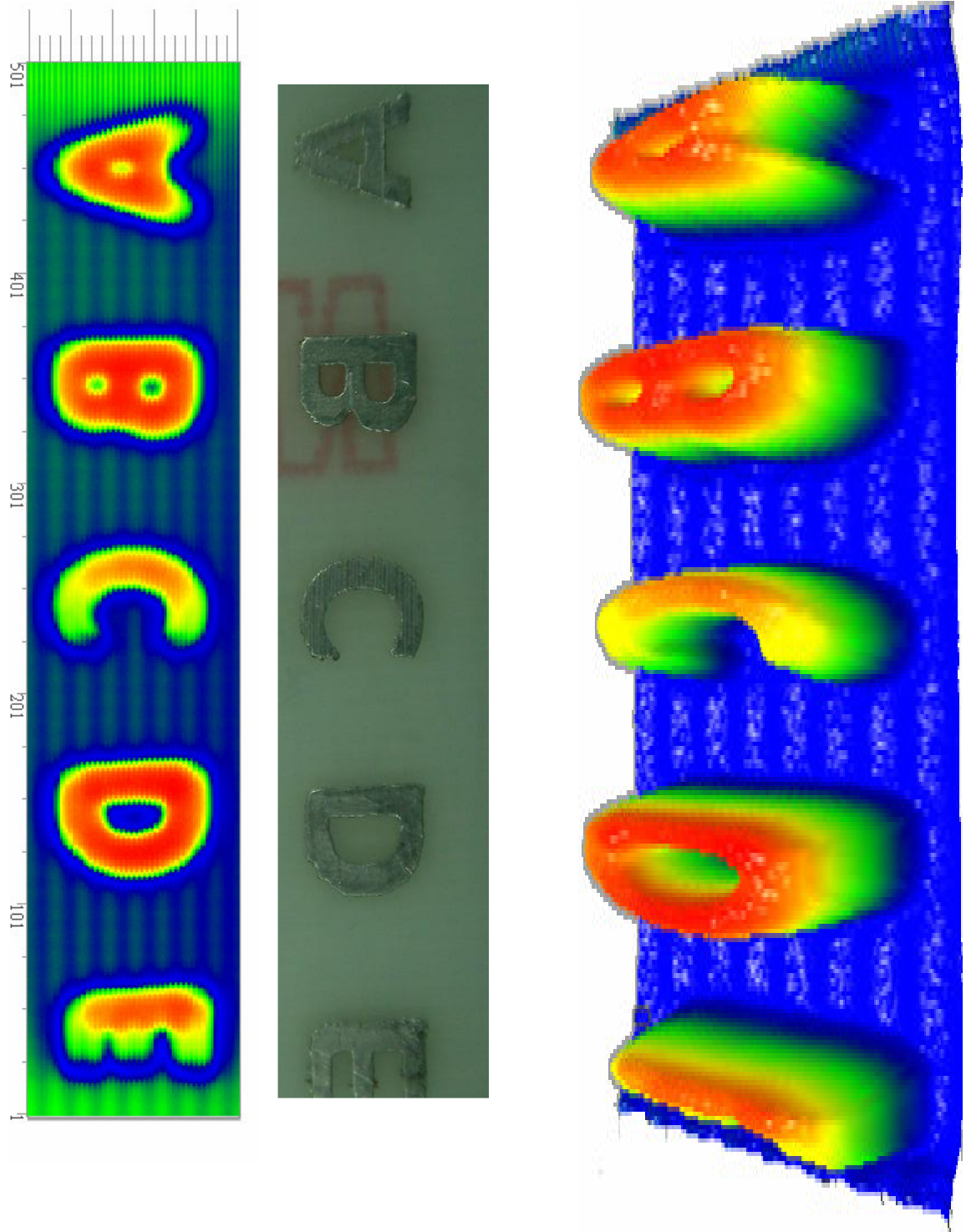


Şekil 4.3. 33x33mm boyutlarında PCB örneğe ait 3D FMRI sonucu

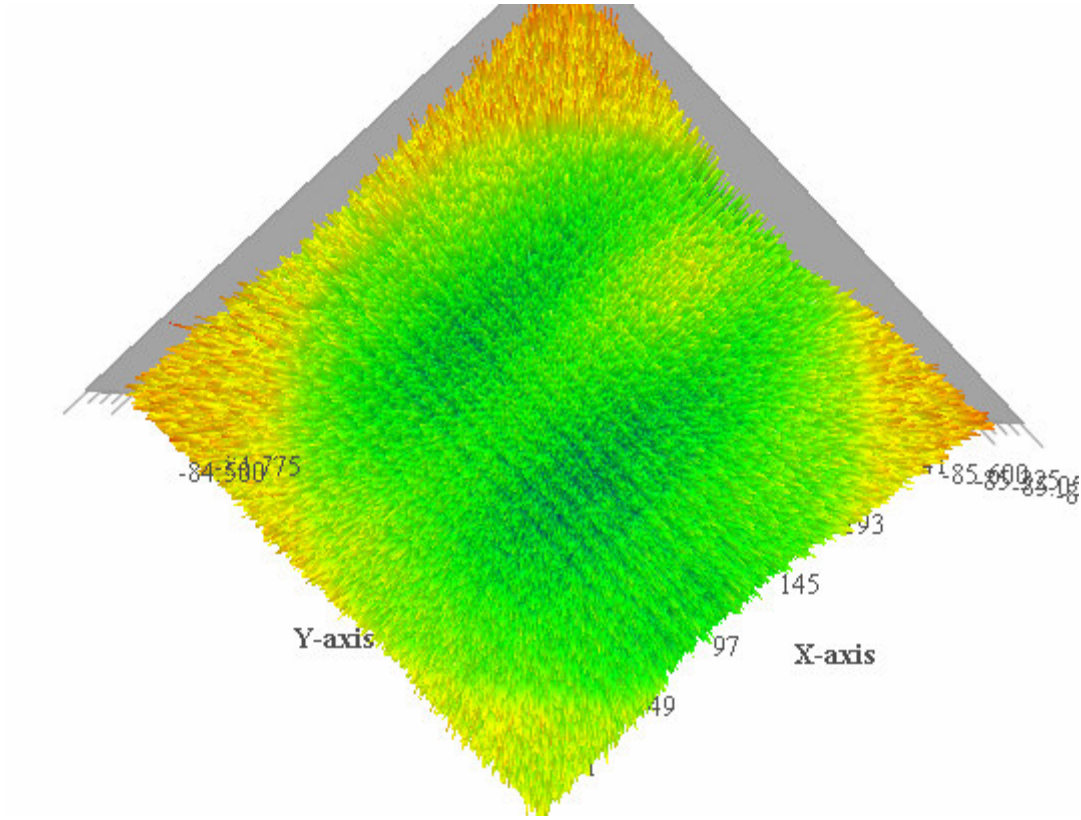
Uygulamada üzerine YIG küre yerleştirilmiş olan mikro şerit hat konnektörlerle VNA'ya bağlanmıştır. Samaryum kobalt sabit mıknatıs aracılığıyla manyetik alan mikro şerit hat üzerine yerleştirilmiş olan kürede rezonansın oluşmasına sebep olmaktadır. Mıknatısın yüzeye uzaklığı değiştirilerek küre üzerindeki manyetik alan değiştirilmekte ve bu da rezonans sinyalinin kaymasına neden olmaktadır. Şekil 4.1'de verilen fotoğrafta FMR sinyali 4.5-5 GHz aralığında elde edilmiştir. Kürenin altına $150 \times 150 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki bir alanı $10 \mu\text{m}$ hassasiyetle tarayabilecek 2D tarayıcı yerleştirilmiştir. Test parçacığı da bu tarayıcının üzerine yerleştirilerek FMRI sağlanmaktadır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 baskı devre kartı üzerine kazıma tekniğiyle işlenmiş olan MAM (Marmara Araştırma Merkezi) ve MRC (Marmara Research Center) numunesinin tarama sonuçları yer almaktadır. Her üç MRI sonucundan da PCB fotoğrafıyla nasıl örtüştüğü gözlemlenmektedir. Buna benzer olarak Şekil 4.4'te de baskı devre üzerine işlenmiş harflerin FMR sonuçları yer almaktadır.

Bu çalışmada tahribatsız muayene amacı ile kullanılması önerilen yöntemimiz ile bir başka önemli deneme de test örneği olarak silikon alttaşlar seçilerek yapılmıştır. Şekil 4.5'te silikon alttaş ve Şekil 4.6'da tungsten alttaşa ait uygulamalar sonucu elde edilen görüntüler yer almaktadır. Bu uygulama özellikle bu tür alttaşlar yonga yada başka bir amaçla işlenmeden önce (ön fabrikasyon kontrolü) hata denetimi açısından önerilebilir. Kullandığımız alttaşa homojen olmayan yüzeyler açıkça görülmektedir. Bu yolla kullanıma uygun olmayan bölgeler rahatça tespit edilebilmektedir. Bu uygulama 4 GHz'te gerçekleştirilmiştir.

Silikon önemli bir frekans bölgesinin altında şeffafmış gibi davranmaktadır. Bu; silikonun kalınlığının homojen olmayan bölgelerinin kontrolünde FMRI teknolojisinin önemini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan bu ölçümü optik yöntemlerle yapmak mümkün değildir.



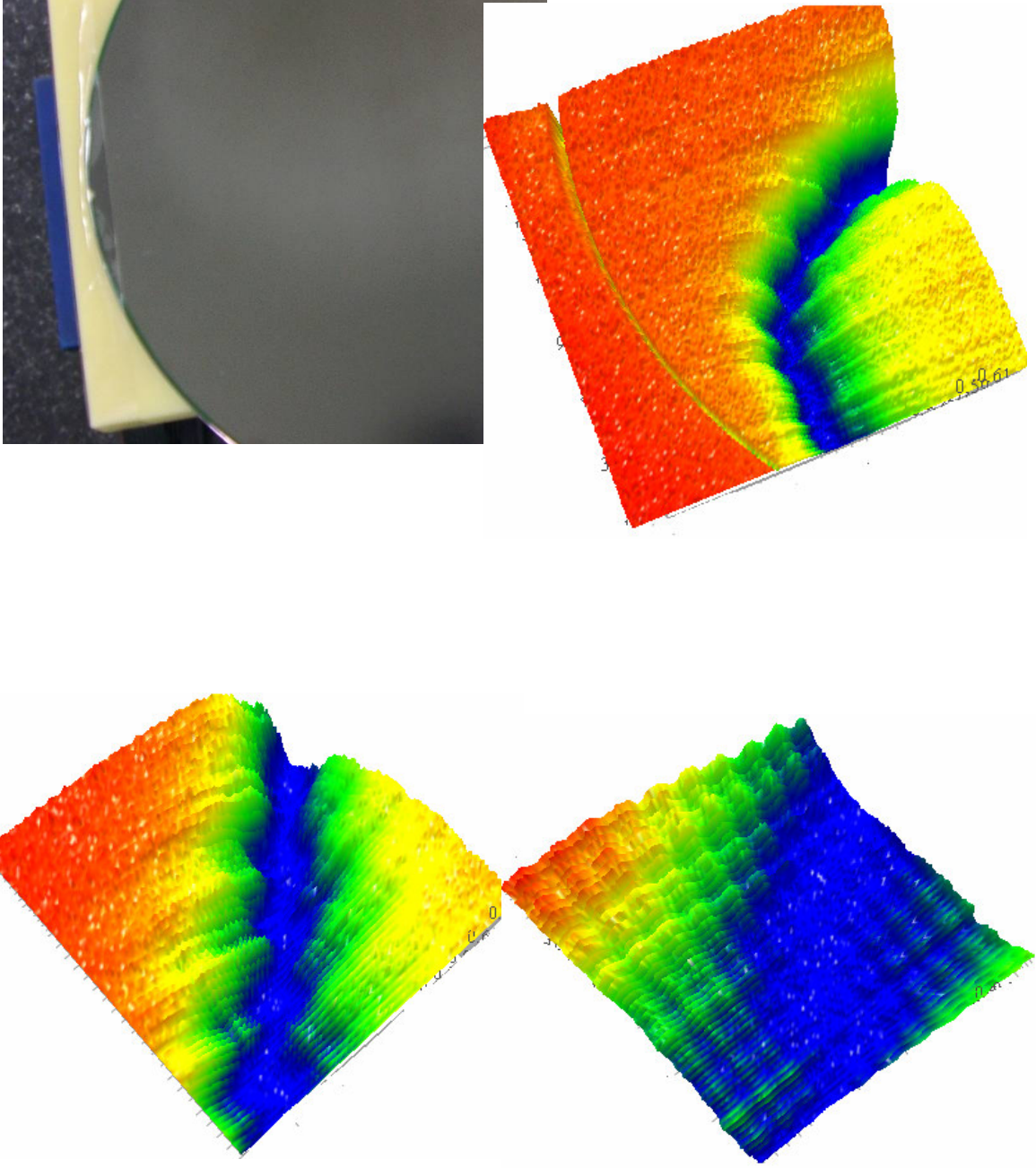
Şekil 4.4. PCB harflerin FMRI sonuçları



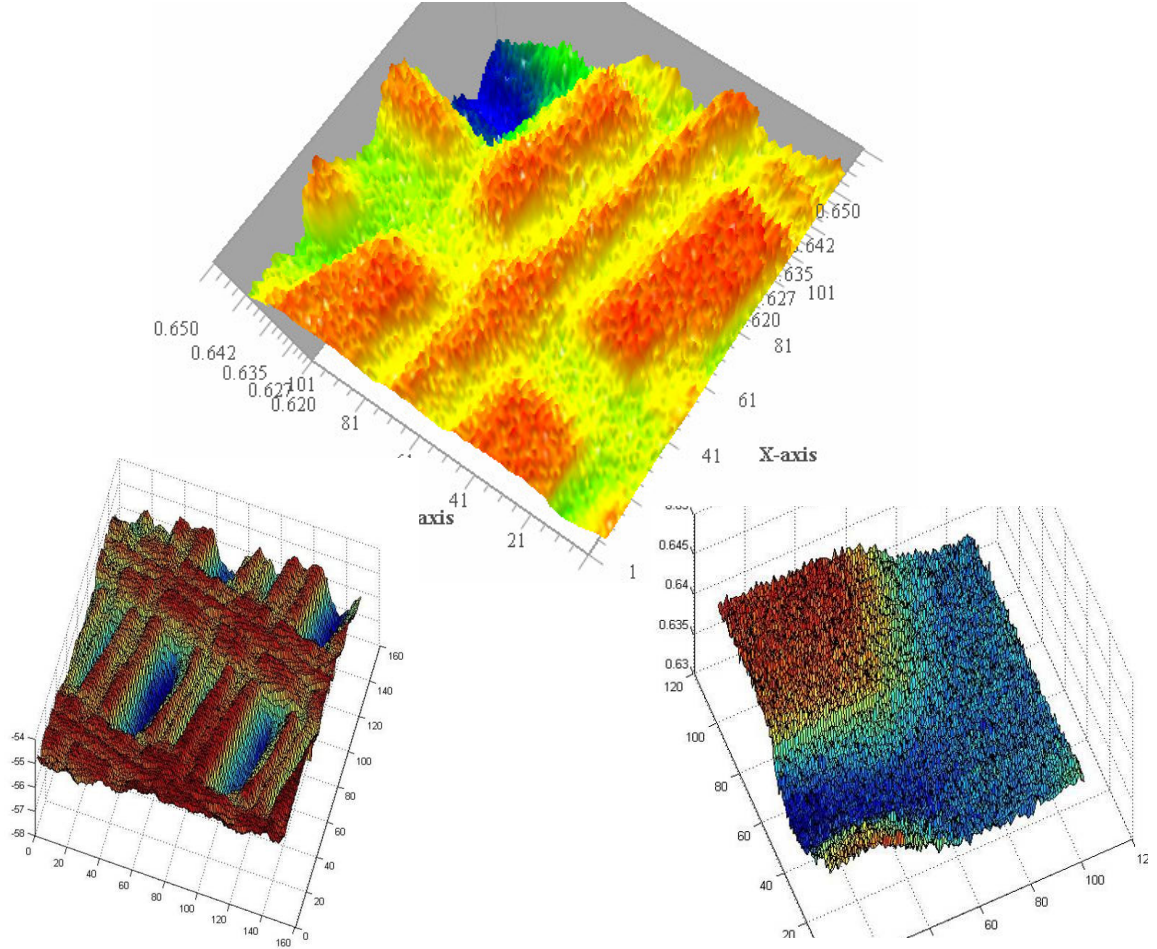
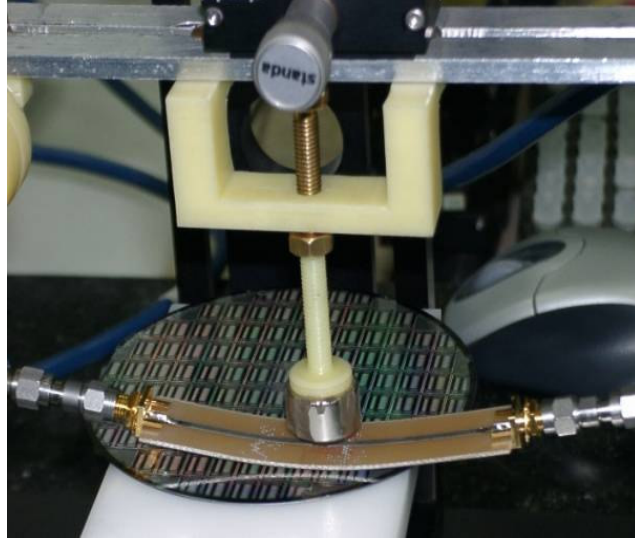
Şekil 4.5. Silikon Alttaş FMRI uygulaması

Üzerinde durduğumuz görüntüleme tekniğinin alttaş yapılarının görüntülenmesinde çok verimli olduğu şu ana kadarki fabrikasyon öncesi örneklerde incelenmiştir. Fabrikasyon sonrasında da bu tür örnekleri FMRI yöntemiyle incelemek istediğimizde sonuçlar gelecek vaat etmektedir.

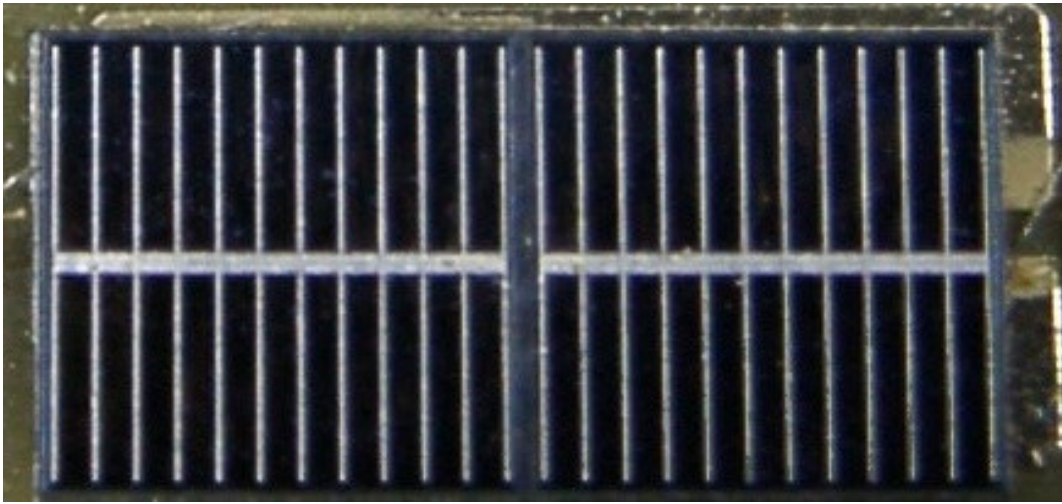
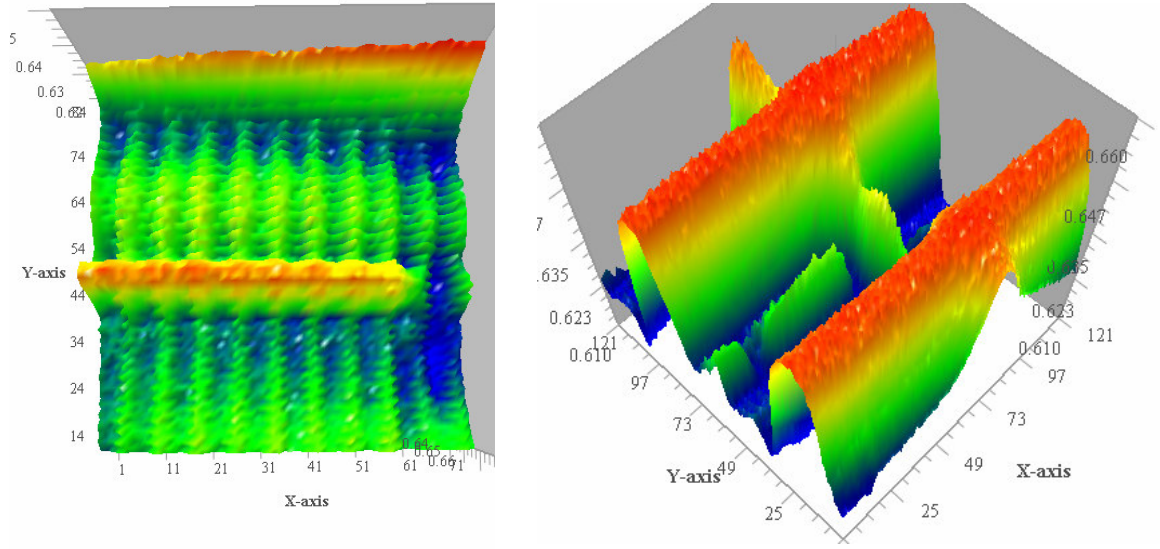
Şekil 4.7'de gösterilen mikro elektronik devre silikon alttaş üzerine yapılmıştır. Şekilde görülen sonuçlar; FMRI uygulamasının, aynı bölgede farklı ölçeklerde tarama sonuçlarıdır. Şekil 4.8'de başka bir silikon yapı olan güneş pili uygulamasında FMR sonuçları görülmektedir.



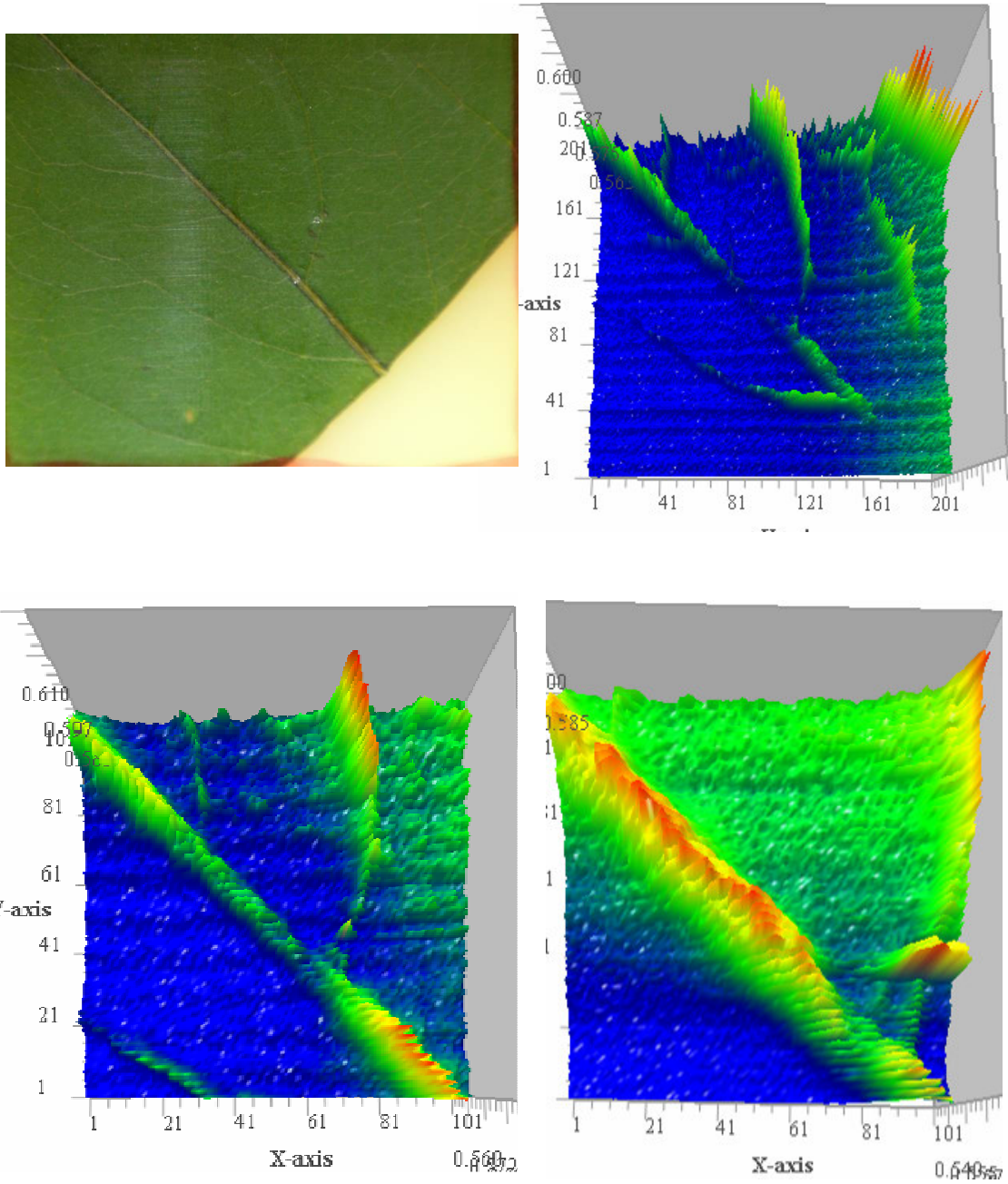
Şekil 4.6. Tungsten Altaş Optik Görüntüsü ve FMRI uygulaması



Şekil 4.7. Mikro Elektronik Devre FMRI Uygulaması



Şekil 4.8. Güneş Panelinin FMRI Uygulaması



Şekil 4.9. Yaprak Parçasının FMRI Uygulaması

Şu ana kadar manyetik olan ve manyetik olmayan çeşitli objeler üzerinde yapılan uygulama sonuçlarına yer verilmiştir. Bu uygulamalarda, ulaşılan sonuçların yarı iletken teknolojisinin fabrikasyon öncesi ve sonrası kontrolleri amacı ile rahatlıkla kullanılabilceği görülmektedir. Düzenek girdap akımları yöntemine alternatif bir NDT olmasının yanı sıra, 3D görüntüleme de ek özellik olarak ortaya çıkmaktadır ve endüstriyel uygulamalarda kullanıcıya çatlak ve yüzey bozukluğu konularında bilgi vermektedir.

Teze konu alınan FMR elde edilmesi bilim adamlarınca farklı zamanlarda yapılmıştır. Fakat tezdeki düzeneğe en yakın düzenek YIG küre kullanması sebebiyle Auld'un çalışmalarıdır. Nitekim ülkemizde de FMR konusunda çalışmalar yapıp ince film üretilmektedir. Çalışma sürecinde yaptığımız incelemelerde; zayıf manyetik alan altında bu tür bir uygulamanın yapılmadığı görülmüştür. Günümüzde tıbbi tanı koymada en güvenilir yol olarak kullanılan MR yönteminin manyetik gücünün yüksekliğinden dolayı kansere sebep olduğu tartışılırken, FMR görüntüsü uygulamaların belki de en can alıcı denemesi Şekil 4.9'da verilen biyolojik malzemeler üzerinde gerçekleşen uygulamalardır. Bu uygulamalar piyasadan kolaylıkla temin edilebilecek sabit manyetik alanlı samaryum kobalt mıknatıslar kullanılarak kurulmuş olan düzeneğimizle gerçekleştirilmiştir.

Şekildeki yaprak koparıldıktan hemen sonra taranarak FMRI gerçekleştirilmiştir. Yaprakta zamanla ortaya çıkan su yoğunluğunun azalması sonucu ilerleyen zamanlarda alınan görüntüde yaprak damarları belirginliğini yitirmektedir. Bu uygulama sonucunda vücudun su yoğunluğunun yüksekliği FMRI teknolojisinin biyolojik objelerin yapılarının görüntülenmesinde kullanımın mümkün olacağı kanısını doğurmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] APAYDIN, F., Manyetik Rezonans, 1991.
- [2] Dr. KONEZ, O., Manyetik Rezonans Görüntüleme Temel Bilgiler.
- [3] ÖZDEMİR, M., Ferromagnetik alaşımlarda spin dalga rezonansı incelemeleri Yüksek Lisans Tezi, 1991.
- [4] KITTEL, Solid State Physics, 1986.
- [5] CHIKAZUMI, S., Physics of Magnetism, Robert E. Krieger Publishing, 1978.
- [6] KRAUS, F., Electromagnetics with Applications, 1999.
- [7] BRIAN F.P, (1999), " An Inclusive Model of Ferromagnetic Hysteresis" Queen'sUniversity Kigston,Ontario, Canada, Power Point Sunu.
- [8] SLICHTER, C.P., "Principles of Magnetic Resonance", Harper & Row. 1963.
- [9] SOOHOO, R.F., Magnetic Thin Films, Harper & Row Publishers Inc. 1965.
- [10] YAYLALI, G., DEĞİRMENCİ, S., ŞİRİN, B. İ., Metalurji Dergisi Sayı:136, Sayfa:3946 Demir Döküm Sektöründe Tahribatsız Muayenenin Önemi Ve Uygulamaları.
- [11] TEKİZ, Y. Tahribatsız Deneyler, İTÜ Makine Fakültesi, 1984.
- [12] GÜNAY, H., KARADENİZ, S., Akım Yöntemiyle Kontrol Uygulamaları.
- [13] AULD, B. A., Eddy Current Probe Response To Open And Closed Surface Flaw F. Muennemann, 1 And D. K. Winslow Journal Of Nondestructive Evaluation, Vol. 2, No. 1, 1981.
- [14] KÜÇÜKÖZET, A. S., Network analizör tekniği ile ferromanyetik rezonans ölçümlerinin yapılması, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [15] POZAR, D. M., Microwave Engineering, New York: John Wiley and Sons, 1998.

- [16] SEVGİ, L., Elektromanyetik Problemler ve Sayısal Yöntemler, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1999.
- [17] ÇAKIR, G., SEVGİ, L., Geniş Bandlı Mikroşerit Filtre Tasarımı, 2006.
- [18] SAINATI, R.A., CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications, Artech House, London, 1996.
- [19] TRAUT, G. R., “Clad laminates of PTFE composites for microwave antennas”, Microwave J., vol.23, no.11, pp.47-51, 1980.
- [20] NWICKI, T. E., “Microwave substrates, present and future”, Proc. Workshop Printed Circuit Antenna Tech., New Meksiko State Univ., Las Cruces, 1979.
- [21] CARVER, K.R., MINK, J.W., “Microstrip Antenna Technology”, IEEE Trans. On Ant. And Propagation, AP-29, no.1, pp.2-24, 1981.
- [22] HALA, M., RANNO L., Ferromagnetic Resonance and Magnetic Films <http://www.cernocky.com/matej/france/labs/FMR%20poster.pdf>
- [23] BELYAEV, B. A., IZOTOV, A. V., and LEKSİKOV, A. A., Magnetic Imaging in Thin Magnetic Films by Local Spectrometer of Ferromagnetic Resonance, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Atilla ÜNAL, 1979 yılında İstanbul'da doğdu. Lise öğrenimini 1996 yılında Tuzla Endüstri Meslek Lisesi elektronik bölümünde tamamlamış, yine aynı yıl İstanbul Üniversitesi TBMYO Haberleşme programında, 2000 yılında ise DGS ile Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde öğrenimini devam etmiştir. 2005 yılında mühendis olarak mezun olduktan sonra 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği'nde yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. 2005 yılında yardımcı öğrenci olarak başladığı TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü UYTL'de teknisyen olarak çalışmaya başlamış ve yine aynı yıl araştırmacılık görevini üstlenmiştir. İlerleyen yıllarda bu laboratuvarın Türk yöneticisi olarak görevine devam etmiştir. Tezin sunulduğu sırada Kayseri Gesi'de askerlik hizmetini yerine getirmektedir.