



**Y₃Fe₅O₁₂ (YIG) BİLEŞİĞİNİN
DARBELİ LAZER BİRİKTİRME (PLD)
TEKNİĞİYLE İNCE FİLM OLARAK BÜYÜTÜLMESİ**

Ümmügülsüm SOYKAN

**Yüksek Lisans Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı
Nanomalzeme Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Tolga YURTCAN
2019
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEKLİSANS TEZİ

**Y₃Fe₅O₁₂ (YIG) BİLEŞİĞİNİN DARBELİ LAZER BİRİKTİRME
(PLD) TEKNİĞİYLE İNCE FİLM OLARAK BÜYÜTÜLMESİ**

Ümmüğülsüm SOYKAN

NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI
Nanomalzeme Bilim Dalı

ERZURUM
2019

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ ONAY FORMU



Y₃Fe₅O₁₂ (YIG) BİLEŞİĞİNİN DARBELİ LAZER BİRİKTİRME (PLD)
TEKNIĞIYLA İNCE FİLM OLARAK BÜYÜTÜLMESİ

Dr. Öğr. Üyesi M. Tolga YURTCAN danışmanlığında, Ümmügülsüm SOYKAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 17/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanomalzeme Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi M. Tolga YURTCAN

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatma Nur TUZLUCA

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **16.05./2019** tarih ve **.21...../.30.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma TÜBİTAK-1001 projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: MFAG-112T820

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Y₃Fe₅O₁₂ (YIG) BİLEŞİĞİNİN DARBELİ LAZER BİRİKTİRME (PLD) TEKNİĞİYLE İNCE FİLM OLARAK BÜYÜTÜLMESİ

Ümmügülsüm SOYKAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı
Nanomalzeme Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Tolga YURTCAN

Bu çalışmada, Darbeli Lazer Biriktirme (PLD) tekniği kullanılarak magnonik kristalin alt yapısını oluşturacak YIG (Y₃Fe₅O₁₂) ince filmler, GGG (Gd₃Ga₅O₁₂) alttaş üzerine büyütülmüştür. Basınç ve sıcaklık değerleri değiştirilerek en iyi büyütme şartı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla YIG ince filmler hedef üzerinde oluşan plazma bulutunun fiziksel yapısı göz önüne alınarak, 100 mTorr'dan 250 mTorr'a kadar 50 mTorr'luk basınç adımlarıyla, 560 – 800 °C aralığında büyütülmüştür. Hazırlanan filmlerin mikroyapısının incelenmesi amacıyla X-Işını Kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri incelenmiştir. YIG ve GGG'nin aynı kristal yapı ve XRD verisine sahip olması nedeniyle, ince filmlerin kompozisyonunun belirlenmesi amacıyla Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi (EDX) kullanılmıştır. Basınç ve sıcaklık haricinde; atış sayısı, tekrarlama frekansı, ısıtma ve soğutma hızı, hedef-alttaş mesafesi, lazer uyarma enerjisi ve tavlama şartları gibi diğer değişkenler sabitlenmiştir. PLD ile büyütülen YIG ince filmlerden elde edilen ölçümler, 100 mTorr ve 800 °C'de hazırlanan numunenin kristal yapı olarak en iyi sonucu verdiğini göstermiştir.

2019, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Y₃Fe₅O₁₂ (YIG), Gd₃Ga₅O₁₂ (GGG), Darbeli Lazer Biriktirme (PLD), Magnonik Kristal.

ABSTRACT

MS Thesis

THIN FILM GROWTH OF $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) COMPOUND BY PULSED LASER DEPOSITION (PLD) TECHNIQUE

Ümmügülsüm SOYKAN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Nanoscience and Nanoengineering
Department of Nanomaterials

Supervisor: Assistant Prof. Dr. Mustafa Tolga YURTCAN

In this study, YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$) thin films grown on GGG ($Gd_3Ga_5O_{12}$) substrates by Pulsed Laser Deposition technique, in order to prepare a base for magnonic crystals. Deposition pressure and temperature values were changed to determine the best growth condition. For this purpose, the thin films grown from 100 mTorr to 250 mTorr, with 50 mTorr pressure steps in 560 - 800 °C range and this ranges chosen by the physical structure of the plasma plume. In order to investigate the microstructure of the films, X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopes (SEM) techniques have been used. Due to the YIG and GGG having the same crystal structure and XRD data, the Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDX) has been used to specify the composition of the films. Except for the pressure and temperature; total pulse number, laser frequency, heating and cooling speed, target to substrate distance, laser influence and annealing conditions has been fixed. The results show that the best crystal structure achieved by PLD with the YIG sample prepared at 100 mTorr pressure and 800 °C temperature.

2019, 66 pages

Keywords: $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG), $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG), Pulsed Laser Deposition (PLD), Magnonic Crystal.

TEŞEKKÜR

Tez alıőmamın tamamlanmasında desteğini ve yardımını esirgemeyen tez danıőmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Tolga YURTCAN'a,

Deneysel çalışmalarında sağlamıő olduğu laboratuvar imkânı ve desteğinden dolayı Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL'a,

Bu alıőma; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından 112T820 MFAG proje numarası ile desteklenerek gerçekleştirilmiştir. Sağladığı imkânlar nedeniyle proje yürütücüsü Sayın Prof. Dr. Selçuk ATALAY'a ve TÜBİTAK'a,

Desteęini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Ümmüğülsüm SOYKAN

Nisan, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Kristaller	5
2.1.1. Kristal yapı	5
2.1.2. Kristal yapı sistemleri ve bravais örgü modelleri.....	6
2.2. Manyetizma	9
2.2.1. Manyetizmanın tarihi	9
2.2.2. Manyetik alan	9
2.2.3. Manyetik akı ve akı yoğunluğu	11
2.2.4. Manyetizasyon.....	12
2.2.5. Manyetik malzemelerde karakter tayini	13
2.2.5.a. Histerezis eğrisi	13
2.2.5.b. Curie sıcaklığı (T_c)	15
2.2.5.c. Doyum manyetizasyonu (M_s)	16
2.2.5.d. Manyeto kristalin anizotropisi.....	17
2.2.5.e. Manyetik duyarlılık	18
2.2.6. Atomların manyetik momentleri	19
2.2.7. Manyetik malzeme türleri	23
2.2.7.a. Diyamanyetikler	23
2.2.7.b. Paramanyetikler	24
2.2.7.c. Ferromanyetikler	24
2.2.8. Garnetler ve özellikleri.....	28
2.2.8.a. $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) garnet	28

2.2.8.b. Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ (GGG) kristalinin özellikleri	30
2.2.9. Magnonikler	31
2.2.9.a. Fotonik kristaller.....	31
2.2.9.b. Magnonik kristaller	32
2.2.9.c. Spin dalgaları	33
2.3. Literatürdeki PLD Tekniğiyle YIG/GGG Büyütmeleri	34
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	36
3.1. YIG Tabletinin Hazırlanması	36
3.1.1. GGG altaşın hazırlanması	38
3.2. Darbeli Lazer Biriktirme (PLD) Sistemi	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	46
4.1. XRD Analizleri.....	47
4.2. EDX ve SEM Analizleri.....	56
5. SONUÇ	62
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	67

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Å	Angstrom
B	Manyetik Alan Çizgisi
B _z	Z yönünde manyetik alan
C	Curie Sabiti
COD	Crystallography Open Database
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi
GGG	Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂
H	Manyetik Alan Şiddeti
H _c	Kritik Manyetik Alan
I	Elektriksel akım
K	Kelvin
LPE	Sıvı Fazlı Epitaksiyel Büyütme
M	Manyetizasyon
mTorr	miliTorr
PLD	Darbeli Lazer Biriktirme
RF	Radyo frekanslı
S	Spin
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
T	Sıcaklık (Kelvin)
T _c	Curie Sıcaklığı
Wb	Weber
XRD	X-Işını Kırınımı
YIG	Y ₃ Fe ₅ O ₁₂
μ	Manyetik Dipol Momenti
μ ₀	Boşluğun Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
μ _m	Malzemenin Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
χ	Manyetik Alınganlık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. (a) yüzey merkezli kübik yapı (b) çinko sülfür yapı	6
Şekil 2.2. Birim hücre	7
Şekil 2.3. Kristal sitemler ve bravais kafes modelleri	8
Şekil 2.4. Atomik manyetik momentin oluşumunda elektronların orbital ve spin hareketi.....	10
Şekil 2.5. Manyetik alanın kuvvet çizgileri	11
Şekil 2.6. Manyetik akı tanımı	11
Şekil 2.8. Ferromanyetik bir malzemelerin histerezis döngüsü.....	14
Şekil 2.9. Nikelin kendiliğinden manyetizasyonun sıcaklığa bağlılığı.....	16
Şekil 2.10. Tek kristal a) demir ve b) kobaltın farklı kristalografik yönlerdeki manyetizasyonu.....	18
Şekil 2.11. Pozitif yüklü çekirdek etrafında r yarıçaplı yörüngede V hızıyla hareket eden elektron	19
Şekil 2.12. Spin manyetik momenti.....	22
Şekil 2.13. Ferromanyetik malzemenin spin dizilimi.....	24
Şekil 2.14. Birbirine paralel olarak yönelen atomik manyetik dipol momenti.....	25
Şekil 2.15. Antiferromanyetik malzemedeki spinlerin yönelimi	26
Şekil 2.16. a) Ferromanyetik malzeme, b) antiferromanyetik malzeme	26
Şekil 2.17. Ferrimanyetik malzemedeki spinlerin yönelimi	27
Şekil 2.18. YIG kafes yapısı	30
Şekil 2.19. Fotonik kristal a) bir boyutta periyodik b) iki boyutta periyodik ve c) üç boyutta periyodik	32
Şekil 2.20. Magnonik kristal a) bir boyutta, b) iki boyutta ve c) üç boyutta	33
Şekil 2.21. Magnonik kristal.....	33
Şekil 3.1. Kullanılan %99,9 saflıkta YIG nanotoz	36
Şekil 3.2. Bir inç çapındaki kalıp takımı.....	36
Şekil 3.3. Tablet tüp fırında sinterlenmesi.....	37
Şekil 3.4. Tablet haline getirilmiş YIG tablet.....	37
Şekil 3.5. Satın alınan <111> tek kristal GGG wafer	38

Şekil 3.6. Complete P180 PLD Laboratory PLD sistemi	39
Şekil 3.7. TED pella gümüş yapıştırıcı	40
Şekil 3.8. Vakum odası içerisindeki karosel düzenek.....	41
Şekil 3.9. Vakum odası	42
Şekil 3.10. Ana vakum pompası	43
Şekil 3.11. Optik bileşenler.....	44
Şekil 4.1. YIG hedef tabletin XRD grafiği	46
Şekil 4.2. GGG kristalinin XRD grafiği	47
Şekil 4.3. Kaplama sıcaklığı 560 °C, kaplama basıncı 100 mTorr için XRD grafiği	48
Şekil 4.4. Kaplama sıcaklığı 560 °C, kaplama basıncı 150 mTorr için XRD grafiği	49
Şekil 4.5. Kaplama sıcaklığı 560 °C, kaplama basıncı 200 mTorr için XRD grafiği	49
Şekil 4.6. Kaplama sıcaklığı 560 °C, kaplama basıncı 250 mTorr için XRD grafiği	50
Şekil 4.7. Kaplama sıcaklığı 640 °C, kaplama basıncı 100 mTorr için XRD grafiği	50
Şekil 4.8. Kaplama sıcaklığı 640 °C, kaplama basıncı 150 mTorr için XRD grafiği	51
Şekil 4.9. Kaplama sıcaklığı 640 °C, kaplama basıncı 200 mTorr için XRD grafiği	51
Şekil 4.10. Kaplama sıcaklığı 640 °C, kaplama basıncı 250 mTorr için XRD grafiği	52
Şekil 4.11. Kaplama sıcaklığı 720 °C, kaplama basıncı 100 mTorr için XRD grafiği	52
Şekil 4.12. Kaplama sıcaklığı 720 °C, kaplama basıncı 150 mTorr için XRD grafiği	53
Şekil 4.13. Kaplama sıcaklığı 720 °C, kaplama basıncı 200 mTorr için XRD grafiği	53
Şekil 4.14. Kaplama sıcaklığı 720 °C, kaplama basıncı 250 mTorr için XRD grafiği	54

Şekil 4.15. Kaplama sıcaklığı 800 °C, kaplama basıncı 100 mTorr için XRD grafiği	54
Şekil 4.16. Kaplama sıcaklığı 800 °C, kaplama basıncı 150 mTorr için XRD grafiği	55
Şekil 4.17. Kaplama sıcaklığı 800 °C, kaplama basıncı 200 mTorr için XRD grafiği	55
Şekil 4.18. Kaplama sıcaklığı 800 °C, kaplama basıncı 250 mTorr için XRD grafiği	56
Şekil 4.19. GGG/YIG ince filmin 1500x büyütme yüzey SEM görüntüsü	57
Şekil 4.20. GGG/YIG ince filmin 3000x büyütme yüzey SEM görüntüsü	57
Şekil 4.21. GGG/YIG ince filmin 12000x büyütme yüzey SEM görüntüsü	58
Şekil 4.22. GGG/YIG ince filmin 24000x büyütme yüzey SEM görüntüsü	58
Şekil 4.23. GGG/YIG ince filmin 50000x büyütme yüzey SEM görüntüsü	59
Şekil 4.24. GGG/YIG ince filmin 100000x büyütme yüzey SEM görüntüsü	59
Şekil 4.25. GGG/YIG ince filmin 50000x büyütme kesit SEM görüntüsü	60
Şekil 4.26. YIG/GGG ince film üzerindeki damlacığın EDX analizi.....	61
Şekil 4.27. YIG/GGG ince film yüzeyinin EDX analizi	61
Şekil 5.1. COD #1008628 ve #9013458 girdileri	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Manyetizmada kullanılan tanımların SI ve CGS sisteminde birimleri	13
Çizelge 2.2. Bazı manyetik malzemelerin doyum alanı	17
Çizelge 2.3. YIG'in fiziksel özellikleri	29
Çizelge 2.4. GGG tek kristalinin özellikleri	31



1. GİRİŞ

Magnonik kristalleri anlayabilmek adına öncelikli olarak kristal yapıların bilinmesi gerekmektedir. Kristaller, üç boyutlu uzayda tekrar eden düzgün yapılardır ve sadece maddenin katı hali atomlar arası düzenli dizilim göstermektedir. Katı maddelerde ise; bazı katılar kristal özellik gösterirken, bazıları ise amorf yapı sergilemektedir. Kristal yapılar belirli bir düzen içerisinde dizilmekteyken, amorf yapılar rastgele yönelim göstermektedir.

Bir kristal yapının tüm özelliğini gösteren en küçük yapısına birim hücre adı verilmektedir. Birim hücre; x, y, z eksenlerinde yönelim gösteren kenarlardan ve kenarlar arası açı gibi iki değişkenli parametrelerden oluşmaktadır. Böylelikle bu parametreler doğada yedi farklı kristal sistem oluşturmakta ve bu kristal sistemler 14 alt kafes (bravais kafes) yapıyı meydana getirmektedir.

Magnonik kristaller, kristal yapılar ve manyetik malzemelerin birleştiği yapılardır. Bu yüzden magnonik kristalleri anlayabilmek adına manyetik malzemelerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Demir, kobalt ve nikel gibi metalik elementler bilinen en iyi manyetik malzemeler arasındadır ve asal mıknatıs olarak adlandırılmaktadır. Mıknatıslanmanın doğada çift kutuplu olduğu ve tek kutuplu mıknatısın bulunmadığı yapılan deneylerle gözler önünde serilmiştir. Mıknatıslanmanın çift kutuplu oluşu atomik boyutta da kendini göstermektedir. Mikro boyutta mıknatıs malzemelere bakıldığında, bir atom içerisinde bulunan elektronun manyetik momente sahip olduğunu söylemek mümkündür. Atom içerisindeki elektron kendi etrafında ve atom etrafında dönme hareketi yapmaktadır. Böylelikle, elektron atomun dönme ekseninde bir manyetik moment hareketi yaparken küçük bir manyetik alan etkisi de yaratmaktadır. Elektronun dönme eksenini boyunca yönelen diğer manyetik moment etkisi de bu dönme hareketinden kaynaklanmaktadır. Spin manyetik momenti olarak adlandırılan bu momentler sadece yukarı yönlü veya ters yönde paralel olacak şekilde aşağı yönlü olmaktadır. Bu nedenle, elektronun kalıcı bir yörüngesi ve spin manyetik momentleri bulunmaktadır. Atom içerisinde bir elektron küçük bir mıknatıs olarak düşünülebilir.

Böylelikle atom içinde net manyetik moment, elektron içerisindeki spinlerin net manyetik momentleri toplamı olmaktadır (Vural 2010).

Malzemeler manyetik özelliklerine göre; diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik olarak üç ana başlık altında ele alınmaktadır. Ferromanyetiklik ise, ferrimanyetik ve antiferromanyetik olarak iki alt grupta incelenmektedir.

Diyamanyetik malzemeler; manyetik alana karşı çok az itilmekte olup, duyarlılığı zayıf ve negatif yönlü olmaktadır. Dış manyetik alan kaldırıldığında ise manyetik özelliğini kaybetmektedirler. Diyamanyetik malzemeler dış manyetik alan etkisiyle elektron orbitallerinin yeniden dizilmesiyle meydana gelir ve örnek olarak bakır, gümüş, altın gibi elementler verilebilmektedir (Vural 2010).

Paramanyetik malzemeler ise manyetik alan tarafından çok az çekilip, alana karşı az ve pozitif duyarlılığa sahiptirler. Dış manyetik alan kaldırıldığında malzeme manyetik özelliğini kaybetmektedir. Diyamanyetik malzemeler gibi paramanyetik malzemeler de dış manyetik alan etkisiyle bazı eşleşmemiş elektron orbitallerinin yeniden dizilmesiyle meydana gelir. Örnek olarak hava, alüminyum ve silisyum verilebilmektedir (Vural 2010).

Ferromanyetik malzemeleri bu iki manyetik malzemelerden ayıran en büyük özellik, dış manyetik alan kaldırıldığında dahi malzemenin manyetik özelliğini korumasıdır. Manyetik alana karşı duyarlılığı fazla ve pozitif yönlüdür. Elektron orbitallerin de eşleşmemiş orbital bulunmakta ve bu da net manyetik moment oluşturmaktadır. Bu malzemelere örnek olarak demir, kobalt ve nikel gibi elementler verilebilir (Ünal 2011).

Ferromanyetik malzemeler kendi içerisinde iki alt ana gruba ayrılmaktadır. Bunların ilki antiferromanyetik olarak adlandırılmaktadır. Elektronların momentleri birbirine eşit ve zıt yönelimdedir. Bu momentler birbirini yok eder ve manyetik alan yokluğunda net mıknatıslanma sıfır olmaktadır. İkincisi ise ferrimanyetik olarak adlandırılır. Farklı manyetik momentlere sahip ve farklı dizimli iki grup atom yapısından bir çubuk

mıknatıs elde edilebilmektedir. Ferrimanyetik malzemeler birbirine eşit olmayan, zıt ve paralel yönelimli spin momentlerinden oluşmaktadır. Böylelikle kalıcı manyetizasyon mümkündür. Bu malzemelere örnek manyetik oksitler verilmektedir (Ünal 2011).

Ferrimanyetik özellik gösteren elementler ferrit olarak adlandırılır. Seramik veya oksit mıknatıslar olarak bilinir ve doğal manyetit malzemelerdir. Doğal manyetit malzeme (Fe_3O_4), doğada bulunan en eski manyetik malzemeler arasındadır. Üretimleri için gerekli ham madde ucuz ve kolay yolla bulunabilir. Kristal yapıları bakımından bazıları hegzagonal sıkı paket yapıda, bazıları ise kübik sıkı paket yapıda gözlemlenmektedir (Vural 2010).

Bilinen en iyi ferrit malzemelere örnek olarak İtiryum Demir Garnet ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, YIG) verilebilir. Nadir toprak elementi katkılı YIG (İtiryum Demir Garnet, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) tipi garnetler, kendine özgü manyetik, termal, mekanik, elektriksel ve manyeto-optik (manyetik alan altında ışığın yön değiştirmesi) gibi özelliklere sahiptir. Bundan dolayı yeni nesil veri depolama cihazları, yeni tip elektronik cihazlar, çok katmanlı seramik mikrodalga cihazları ve mikrodalga haberleşme cihazları için birçok uygulamada kullanılması adına YIG ile ilgili araştırmalar devam etmektedir. Bu uygulamaların geliştirilmesi için YIG'in manyeto-optik ve manyetik özellikleri yeterli olmamaktadır. YIG'in Bi, Pb, Ce, Nd, Ru, Rh, Ir gibi maddelerle katkılanarak manyetik ve manyeto-optik özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir (Öztürk 2010).

Magnonik kristal, spin dalgaları yani mangonlar (spin dalga kuantumları) manyetik olarak düzenli bir ortamda (ferromanyetik, antiferromanyetik vb.) spinlerin uyarılması şeklinde tanımlanmaktadır. Spin dalgaları, kırılma, yansıma, odaklama, yayılma ve doppler etkisi gibi ses ve ışık dalgalarının özelliklerini göstermektedir. Bu özellikleriyle magnonik adı altında yeni bir araştırma alanı doğurmuştur (Kaya 2016). Böylelikle magnonik kristaller, bilgiyi işlemek ve iletmek için spin dalgalarının davranışlarını inceleyen manyetizmanın yükselen bir bilim dalı haline gelmiştir.

Magnonik cihazlarda bilgi, elektronik cihazlardaki gibi yükler yerine spinler üzerine kodlanmaktadır. Spinler, akım olmadan da yönlendirilebildiğinden dolayı elektronik cihazlardaki güç tüketiminin üstesinden gelinmektedir. Spin dalgaları dalga boyunun nano boyutta olması ve mikrodalga frekans aralığında yer alması nedeniyle nano boyutta mikrodalga cihazları üretilmesine yardımcı olmaktadır.

Garnetlerin özelliklerini inceleyebilmek ve magnonik kristal olarak işleyebilmek adına yüksek kaliteli ince filmler üretilmektedir. Bu ince filmler, radyo frekanslı püskürtme (RF Sputtering), sıvı fazlı epitaksiyel büyüme (LPE), sol-jel ve darbeli lazer biriktirme (PLD) yöntemleri gibi çeşitli teknikler ile büyütülebilmektedir (Öztürk 2010).

YIG ince filmler üzerine magnonik kristaller oluşturulabilmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında darbeli lazer biriktirme (PLD) tekniği kullanılarak Gadolinyum Galyum Garnet (GGG) kristalleri üzerine İtriyum Demir Garnet (YIG) büyütülerek, magnonik kristaller hazırlanması için altyapı oluşturulmuştur. İyi bir tek kristal elde edebilmek için büyüme koşullarından sıcaklık ve basınç parametreleri değiştirilip, XRD, SEM ve EDX analizleri yardımıyla en iyi kaplama koşulu belirlenmeye çalışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kristaller

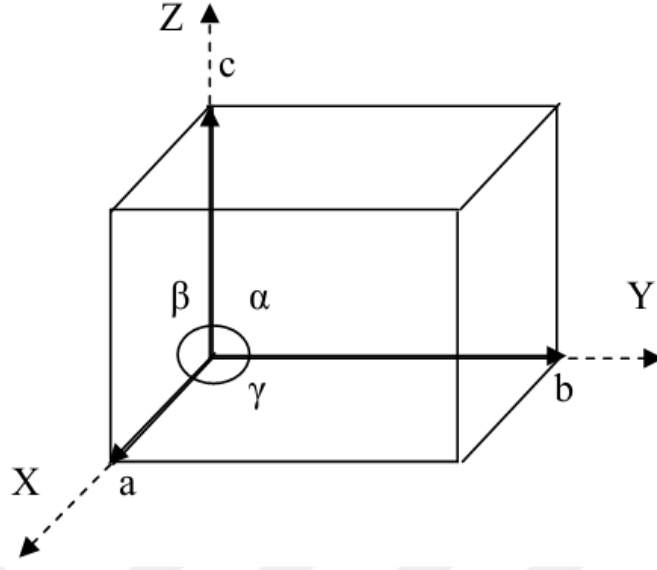
2.1.1. Kristal yapı

Üç boyutlu uzayda atom ve moleküllerin periyodik olarak muntazam bir şekilde düzenli dizilimi kristal yapıyı meydana getirmektedir. Kristal yapılar belirli bir geometrik şekle ve simetriye sahip yapılardır. Kristal yapı özelliğini genellikle katı maddeler göstermektedir (Akdemir 2014). Kristal katılar tek kristal ve polikristal olmak üzere iki ayrı kategoride incelenmektedir. Düzenli atomik sıralanış; tek kristallerde tüm kristal boyunca gözlenmekteyken, polikristallerde sadece birkaç angstromdan (Å) birkaç santimetreye kadar tane boyutuna sahip olan kristal bölgelerinde gözlemlenmektedir (Aydoğan 2011).

Bazı katılar ise periyodik olarak düzgün dizilim göstermezler ve belli bir kristal yapıya sahip değildirler. Bu tür yapılar amorf yapılar olarak adlandırılır. Amorf yapılara cam ve plastik gibi maddeler örnek verilebilir. Amorf katılar ve kristal katılar arasındaki ayrım, X-ışını veya elektron kırınımı teknikleri kullanılarak yapılmaktadır. Bir malzeme birden fazla kristal yapıya sahip olabilir. Sıcaklık ve basınç değişimiyle bir yapıdan diğer yapıya geçiş yapılabilmektedir (Akdemir 2014).

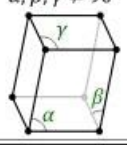
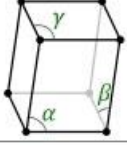

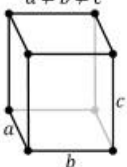
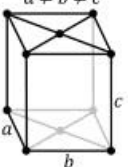
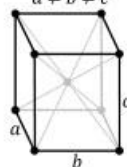
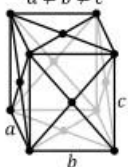
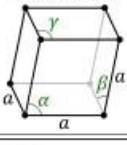
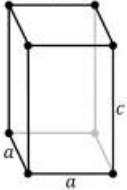
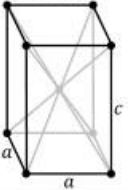
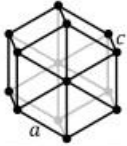
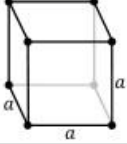
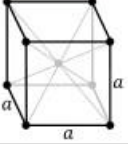
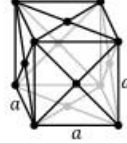
Kristal yapı örgü ve baz olarak adlandırılan terimlerden oluşmaktadır. Aynı yönelime ve aynı görünüme sahip olan noktalar topluluğu, örgü olarak adlandırılmıştır. Atom topluluklarında örgü noktalarının varlığı kabul edilmiş ve bu atom toplulukları baz olarak adlandırılmıştır. Bu kavramlar arasındaki ilişki denklemi 2.1'de gösterilmiştir.

$$\text{Örgü} + \text{baz} = \text{kristal yapı} \quad (2.1)$$



Şekil 2.2. Birim hücre (Anderson 2006)

Bu parametrelerin alacağı farklı değerlerin, doğadaki bütün kristalleri temsilen yedi farklı şekil ve büyüklükte olduğu belirlenmiştir (Anderson 2006). Bu kristal sistemler ve kafes görünümleri Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

Kristal sistemi (7 Adet) (En az simetrikten en çok simetriğe)	Bravais kafesi (14 Adet)			
1. Triklirik	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ 			
2. Monoklinik	Basit	Basit, taban merkezli		
	$\beta \neq 90^\circ$ $\alpha, \gamma = 90^\circ$ 	$\beta \neq 90^\circ$ $\alpha, \gamma = 90^\circ$ 		
3. Ortorombik	Basit	Taban merkezli	Hacim merkezli	Yüzey merkezli
	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 
4. Rombohedral	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ 			
5. Tetragonal	Basit	Hacim merkezli		
	$a \neq c$ 	$a \neq c$ 		
6. Hegzagonal				
7. Kübik	Basit kübik (BK)	hacim merkezli (HMK)	yüzey merkezli (YMK)	
				

Şekil 2.3. Kristal sistemler ve bravais kafes modelleri (Gencoğlu 2013)

2.2. Manyetizma

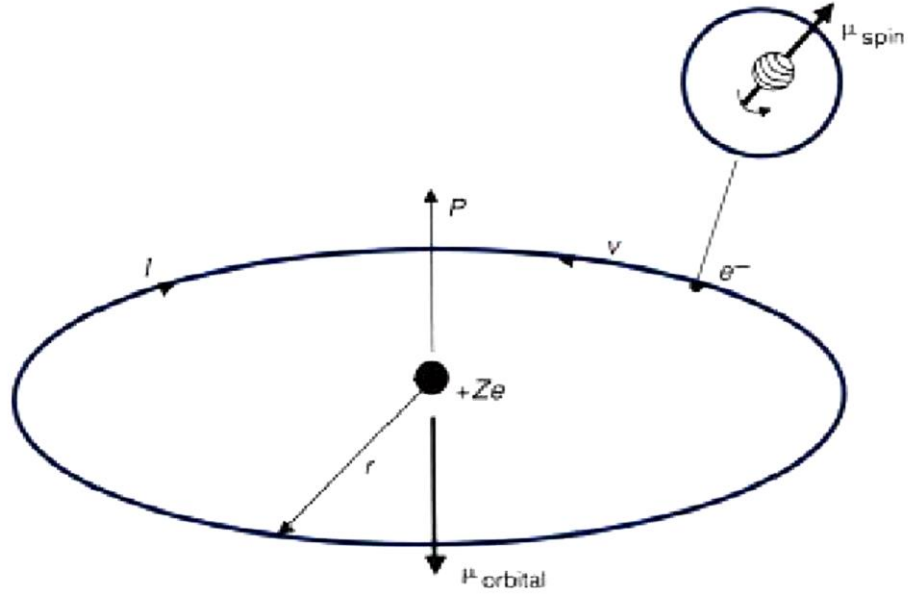
2.2.1. Manyetizmanın tarihi

Manyetizma milattan önce 2000 yılından beri kullanılmakta olup, son yıllarda insanlar için günlük hayatın vazgeçilmez unsuru haline gelmiştir. Manyetizma terimi ismini Türkiye'nin demir özünün bol bulunduğu Manisa ilinin eski adı olan Magnesia'dan almaktadır (Aydoğan 2011). Mıknatısın demirli nesnelere çekmesi birçok insanın ilgisini çekmiştir. Bu alanda Coulomb, Ampere ve Faraday gibi ünlü isimler çeşitli araştırmalar yapmış ve ortaya koydukları sonuçlarla manyetizmanın önemini arttırmışlardır.

1820 yılında Danimarka'da Hans-Christian Oersted elektrik ve akım arasındaki ilişkiyi bulmuş, akım taşıyan telin, etrafında manyetik alan oluşturduğunu göstererek elektromanyetiğin temelini atmıştır. Ardından Michael Faraday 1821 yılında elektromanyetik indüksiyonu keşfetmiştir. Faraday deneysel çalışmalarını geliştirerek elektrik motorunun ilkesini ve elektrik ile manyetizma arasındaki ilişkinin varlığını göstermiştir. Faraday'ın bu deneysel çalışması James Clerk Maxwell'in elektrik, manyetizma ve ışığın bir arada bulunduğu denklemlerine ışık tutmuştur. 1824 yılında William Sturgeon at nalı şeklinde demir çekirdekli elektromıknatısının zayıf ve kalıcı mıknatıslardan daha etkili olduğunu ispatlamıştır. Manyetizmanın gelişimi, günümüzde kullandığımız veri kayıt cihazları, bilgisayarlar ve haberleşme araçları gibi birçok teknolojik gelişimin kaynağını ve temelini oluşturmuştur (Unan 2014).

2.2.2. Manyetik alan

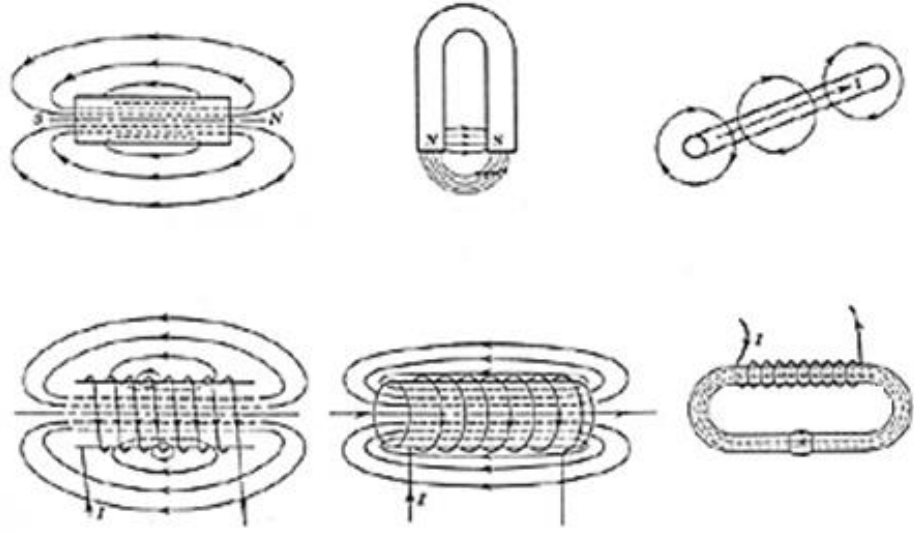
Atom içerisinde bulunan elektronlar, çekirdek etrafında yörüngesel dönme hareketi yaparken, kendi etrafında da dönme hareketi yapmaktadırlar (Şekil 2.4). Elektriksel yüklerin bu hareketi sonucu bir elektrik akımı meydana gelmektedir.



Şekil 2.4. Atomik manyetik momentin oluşumunda elektronların orbital ve spin hareketi (Ünal 2011)

Andre Marie Ampere (1775-1836) mıknatıslanmış madde içinde dolaşan bir akımın var olduğunu ve maddenin manyetik özelliğinin bu kapalı devre akımından meydana geldiğini ileri sürmüştür. Bu görüş artık günümüzde kesinlik kazanarak, elektrik yüklü parçacıklar hareket halinde olduğunda ortamda değişiklik yarattığı gözlenmiştir. Ampere yasasına göre akım taşıyan bir bobinin ya da mıknatısın bulunduğu ortamda manyetik kuvvet olarak ortaya çıkan bu değişiklik manyetik alan olarak adlandırılmıştır. Manyetik alan, doğrultusu, yönü ve şiddeti ile belirlenen bir vektörel büyüklüktür. Manyetik alanın varlığı, kuvvet çizgileri ya da manyetik akım çizgileri ile gösterilmektedir (Tacer 2004).

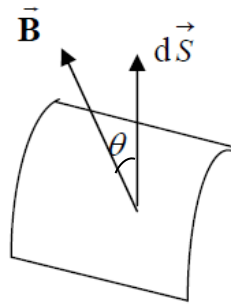
Manyetik kuvvet çizgileri N kutbundan çıkıp S kutbuna yönelim göstermekte ve kapalı bir yol oluşturmaktadır. Şekil 2.5'te değişik yapıdaki mıknatıs ve akı taşıyan bobinlerde söz konusu olan manyetik alanın kuvvet çizgilerinin gösterimleri verilmiştir (Tacer 2004).



Şekil 2.5. Manyetik alanın kuvvet çizgileri (Tacer 2004)

2.2.3. Manyetik akı ve akı yoğunluğu

Bir manyetik alan içindeki kapalı bir yol ya da akım taşıyan telin, oluşturduğu çevrimin belirli bir yüzeyinden geçen kuvvet çizgisi sayısı manyetik akı olarak adlandırılmaktadır. Manyetik akı ϕ simgesi ile gösterilir ve uluslararası birim sisteminde weber (Wb) ile ölçülür. Birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi manyetik akı yoğunluğu olarak adlandırılır ve B ile gösterilir. (Tacer 2004). Şekil 2.6'da S yüzey alanı ile küçük bir d_s yüzeyinin normali ve B manyetik alan çizgisi arasındaki θ açısı gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Manyetik akı tanımı (Tacer 2004)

Böylelikle manyetik akı, B manyetik alan içerisinde S yüzey alanından küçük bir d_s yüzey alanı kesiti alındığında yüzeysel integral ile belirlenir. B manyetik akı yoğunluğu ve yön vektörü ile d_s yüzey alanı vektörü arasındaki açı θ ile gösterilmektedir; Denklem 2.2 ile manyetik akı belirlenmektedir.

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.2)$$

Açı 0 (sıfır) olduğunda;

$$\phi = B \cdot S \quad (2.3)$$

ve

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (2.4)$$

denklemleri elde edilmektedir. Manyetik akı birimi (ϕ) weber, S yüzey alanı m^2 olarak alınırsa manyetik akı yoğunluğu B , birimi ise weber/ m^2 olur.

2.2.4. Manyetizasyon

Malzemenin birim hacmindeki manyetik dipol momenti manyetizasyon olarak bilinmektedir. Birimi A/m olarak veya katları kA/m ve MA/m olarak gösterilmekte ve manyetik alanla aynı şekilde H ile gösterilmektedir. Yeryüzünün manyetizasyonu göreceli olarak çok küçüktür ve $50 A/m$ olarak ölçülmüştür.

Genel olarak manyetizmada kullanılan tanımların SI ve CGS birim sisteminde gösterimi Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Manyetizmada kullanılan tanımların SI ve CGS sisteminde birimleri (Ünal 2011)

Sembol	Tanım	SI	CGS
H	Manyetik Alan Şiddeti	A/m ²	Oe
B	Akı yoğunluğu	Tesla	Gauss
M	Manyetizasyon	A/m	Emu/cm ³
Φ	Akı	Weber	Maxwell

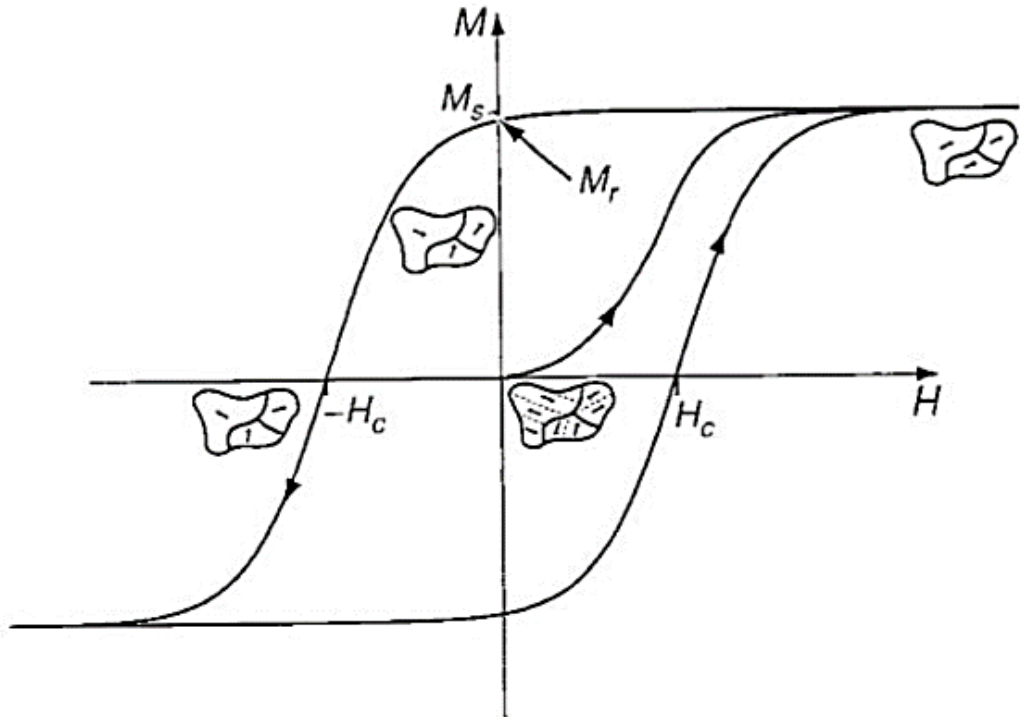
2.2.5. Manyetik malzemelerde karakter tayini

Malzemeleri dış manyetik alana, sıcaklığa ve basınca verdikleri tepkiye göre gruplandırmak mümkündür. Bu gruplandırmayı yaparken malzemelerin ayırt edici özellikleri incelenmektedir. Histerezis eğrisi, Curie sıcaklığı, doyum manyetizasyonu, manyeto kristalin anizotropisi, manyetik duyarlılık ve atomların manyetik momentleri gibi özellikler manyetik malzemelerin ayırt edici özellikleridir.

2.2.5.a. Histerezis eğrisi

Malzemenin birim hacmine düşen manyetik dipol momenti manyetizasyon olarak adlandırılmaktadır. Dış manyetik alan (H) metre başına amper (A/m) ile ölçülmektedir. Herhangi bir maddeye uygulanan dış manyetik alana (H) karşı verdiği tersinmez, doğrusal olmayan manyetizasyon (M) tepkisi histerezis eğrisini oluşturmaktadır. Histerezis eğrisi, ferromanyetik malzemeler için temel ayırt edici bir özelliktir. Histerezis döngüsünün ortaya çıkması için uygulanan alanın kuvveti ile manyetizasyon karşılaştırılabilir olmalıdır. Fe, Co ve Ni ferromanyetik elementlerinin 296 K'de kendiliğinden manyetizasyon M_s değerleri sırasıyla 1720, 1370 ve 485 kA/m'dir. Manyetit (Fe₃O₄) için ise bu değer 480 kA/m'dir (Unan 2014).

Manyetik malzeme, uygulanan alana karşı verdiği tepkiye göre M-H histerezis eğrisi oluşturmakta ve bu eğri döngü şeklinde çizilmektedir. Sert malzemeler kalıcı mıknatıslanmaya uygundur ve histerezis eğrileri geniş kare şeklini almaktadır. Uygulanan manyetik alan kaldırıldığında, $H \geq M_s$ olduğundan dolayı manyetizma hali devam etmektedir. Yumuşak malzemeler ise dar döngüye sahip geçici mıknatıs halindedirler ve dış manyetik alan kaldırıldığında manyetizasyonlarını kaybederler. Uygulanan dış manyetik alan, malzeme içinde var olan mikroskobik düzeyde bölgecikler halindeki ferromanyetikliğin açığa çıkmasına yöneliktir. Manyetik bölgecikler James Ewing tarafından önerilmiş ve bölgecik teorisinin ilkeleri Lev Landau ve Evgeny Lifschitz tarafından 1935'te teşhis edilmiştir. Bu yapı Şekil 2.8'deki gibi ferromanyetik bir malzeme için; orijinde manyetize olmamış doymuş durum $M = M_s$ olarak, manyetik alan olmadığı durum $M = M_r$ olarak, M'nin işaret değiştirdiği durum $H = H_c$ olarak bölgeciklerle birlikte gösterilmiştir (Unan 2014).



Şekil 2.8. Ferromanyetik bir malzemelerin histerezis döngüsü (Coey 2010)

2.2.5.b. Curie sıcaklığı (T_c)

Manyetik malzemeler için sıcaklık, malzemenin manyetik özelliğini etkilemektedir. Malzeme ısı etkisiyle enerjisi artmakta ve artan enerjiye bağlı olarak titreşim hareketi de artmaktadır. Artan titreşim hareketiyle atomların manyetik momenti rastgele yönelim göstermekte ve malzemenin manyetikliğini düşürmektedir. Böylelikle sıcaklık etkisiyle atomların manyetik özelliği azalmaktadır.

Pierre Curie (1856-1906) ve birçok araştırmacı paramanyetik bir malzemenin mıknatıslanmasının manyetik alan ile doğru, mutlak sıcaklık ile ters orantılı olduğunu keşfetmiş ve 2.5 eşitliğinde verilen Curie Yasasını ortaya koymuştur.

$$M = C \frac{\beta}{T_c} \quad (2.5)$$

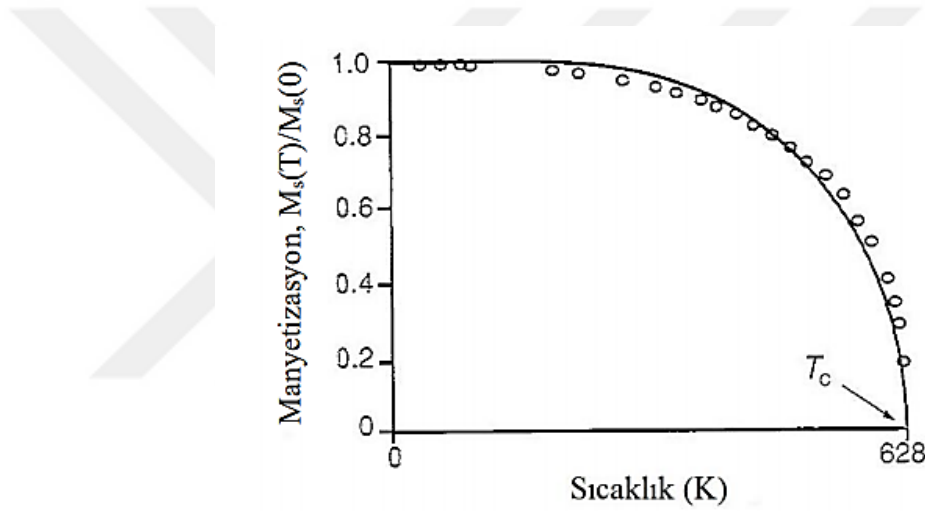
Burada manyetizasyon M ; Curie sabiti C ; Curie sıcaklığı T_c ve manyetik alan β olarak verilmiştir.

$\beta=0$, mıknatıslanma sıfır olduğu duruma karşılık gelmektedir ve mıknatıslanma olmadığında dipol momentler rastgele yönelmektedir. Manyetik alan arttığında ya da sıcaklık azaldığında mıknatıslanma artmakta ve böylelikle çok yüksek manyetik alan veya çok düşük sıcaklık maksimum doyum derecesine ulaşmaktadır. Bu durumda tüm dipol momentler uygulanan manyetik alan yönünde dizilmiştir.

Ferromanyetik, antiferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler için atomik termal hareketler; komşu atomik dipol momentlerini etkisiz hale getirerek dipollerin düzensiz hale gelmesine sebep olurken, ferrimanyetik ve ferromanyetik malzemeler için doyum manyetizasyonu (M_s) değerini düşürmektedir. Titreşim hareketinin en az olduğu 0 değerinde doyum manyetizasyonu en yüksek değerini alarak, artan sıcaklığa bağlı olarak azalır ve ani olarak Curie sıcaklığı (T_c) sıfır değerine düşer. Ferromanyetik ve ferrimanyetik özellik gösteren malzemeler T_c sıcaklığı ve üzerinde kalıcı manyetik

özelliğini kaybetmekte ve paramanyetik malzeme gibi davranış göstermektedir. Böylelikle Curie sıcaklığı (T_c) malzemeler için farklılık göstermekte ve manyetik malzemelerin ayırt edici özelliği olmaktadır (Vural 2010).

Demir, nikel ve kobalt gibi ferromanyetik malzemelerin Curie sıcaklıkları farklı değer almaktadır. En yüksek Curie sıcaklığına 1388 K değeriyle kobalt sahip olurken, demir 1044 K ve nikel 628 K değerine sahiptir (Coe 2010). Şekil 2.9'da değişen sıcaklığa karşı nikelin kendiliğinden manyetizasyonu verilmiştir.



Şekil 2.9. Nikelin kendiliğinden manyetizasyonunun sıcaklığa bağlılığı (Coe 2010)

2.2.5.c Doyum manyetizasyonu (M_s)

Malzemenin ürettiği en yüksek manyetik alan ölçüsü olarak tanımlanmakta ve malzemenin kendiliğinden mıknatıslanması olarak da ifade edilmektedir. Doyum manyetizasyonu, bir malzemeyi oluşturan atomlardaki çift yönlü momentlerin yoğun paketlenmesine ve direncine bağlı olarak değişmektedir. Atomik momentlerin paketlenme yoğunluğu ise kristal yapı ve yapıdaki manyetik olmayan elementlerin varlığından etkilenmektedir.

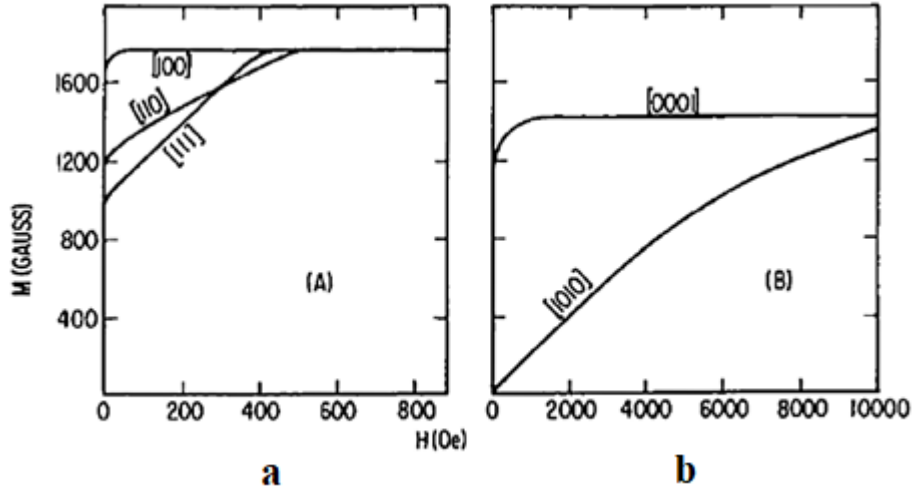
Ferromanyetik malzemelerde doyum manyetizasyonu, momentlerin düzgün dizilimine önemli ölçüde bağlıdır (Vural 2010). Bazı ferromanyetik elementler ve bileşiklerin doyum manyetizasyonu Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı manyetik malzemelerin doyum alanı (Vural 2010)

Malzeme	Manyetik Yapı	J_s 298 K (T)
Fe	Ferro	2,15
Co	Ferro	1,76
Ni	Ferro	0,60
Nd₂Fe₁₄B	Ferro	1,59
SmCo₅	Ferro	1,14
Sm₂Co₁₇	Ferro	1,25
BaO₆·Fe₂O₃	Ferri	0,48
SrO₆·Fe₂O₃	Ferri	0,48
MnO·Fe₂O₃	Ferri	0,51

2.2.5.d. Manyeto kristalin anizotropisi

Manyetizasyonun malzeme içerisinde tercihli kristalografik yönelimde gerçekleşmesine manyeto kristalin anizotropisi adı verilmektedir. Malzemeye özgü bir özellik olup, manyetikleşme kolaylığı tek kristalde kristalin doğrultusu ile değişmektedir. Buna örnek olarak demir ve kobalt elementleri verilebilir. Şekil 2.10’da iki farklı elementin farklı kristal yönelimlerindeki mıknatıslanmaları gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Tek kristal a) demir ve b) kobaltın farklı kristalografik yönlerdeki manyetizasyonu (Ünal 2011)

Şekil 2.10a'da gösterildiği gibi tek demir kristalinin manyetikleşme yönü [100] olmakta ve geçirgenlikteki bu anizotropiden faydalanarak çeliklerde yüksek geçirgenlik değeri elde edilebilmektedir. Şekil 2.10b'de gösterildiği gibi kobalt hekzagonal yapıda [0001] yöneliminde kolaylıkla mıknatıslanma gerçekleşirken, [1010] yöneliminde mıknatıslanma zorlaşmaktadır (Ünal 2011).

Bir malzeme de bütün kristalografik yönelimlerinde sahip olduğu fiziksel özellik aynı ise malzeme izotropik, farklı yönelimlerde fiziksel özellikleri değişiyor ise anizotropik olarak tanımlanmaktadır.

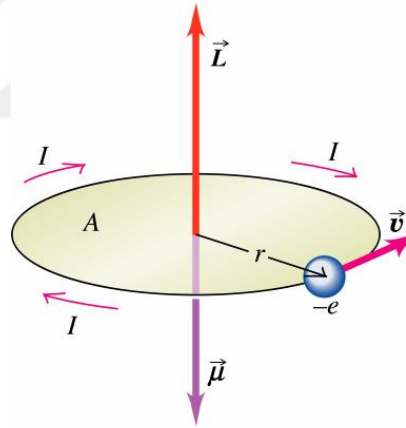
2.2.5.e. Manyetik duyarlılık

Manyetik duyarlılık (χ), malzeme tarafından üretilen manyetikleşme ile uygulanan alan arasındaki orantıdır. Histerezis döngüsünün oluşturduğu M-H eğrileri, uygulanan alanın tersine çevirmeden önce manyetik doyuma ulaşana kadar manyetik alan uygulanmakta ve histerezis döngüsü alana göre farklılık göstermektedir. Döngünün bir noktasından başlayarak farklı histerezis döngüsü oluşturup demanyetizasyon oluşturulabilir.

2.2.6. Atomların manyetik momentleri

Atom içerisindeki elektronlar, pozitif yüklü çekirdek etrafında ve kendi eksenlerinde yörüngesel dönme hareketiyle iç atomik akımı oluşturmaktadır. Atom içerisinde oluşan bu iç akım manyetik momenti meydana getirmektedir. Bu elektronların net manyetik momenti, elektronun yörüngesel hareketi ve spin olarak bilinen iç özelliğinin birleşiminden oluşmaktadır (Çöktüren 2008).

Manyetik moment hesaplanırken, r yarıçaplı bir yörüngede, V hızıyla, ağır bir çekirdek etrafında hareket eden elektron göz önüne alınarak hesaplama yapılmaktadır. Şekil 2.11’de, dairesel olarak çekirdek etrafında dönen elektron $2\pi r$ kadar yol almakta ve T (periyot) zamanında dolanımını tamamlamaktadır.



Şekil 2.11. Pozitif yüklü çekirdek etrafında r yarıçaplı yörüngede V hızıyla hareket eden elektron (Çöktüren 2008)

Elektron dolanımı sonucu oluşan akım;

$$I = \frac{q}{T} \quad (2.6)$$

dolanım periyodu;

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.7)$$

denklemleri ile verilir.

Elektronun açısal hızı ve oluşan akım;

$$\omega = \mathcal{V} \cdot r \quad (2.8)$$

$$I = \frac{e\mathcal{V}}{2\pi r} \quad (2.9)$$

ile verilmektedir.

Manyetik moment ise;

$$\mu = I \cdot S \quad (2.10)$$

$$S = \pi r^2 \quad (2.11)$$

$$\mu = I \cdot S = \left(\frac{e\mathcal{V}}{2\pi r}\right) \pi r^2 = \frac{1}{2} e\mathcal{V}r \quad (2.12)$$

olmaktadır.

Elektronun açısal momentumunun büyüklüğü;

$$L = m\mathcal{V} \times r \quad (2.13)$$

olduğundan,

$$\mu = \left(\frac{e}{2m}\right)L \quad (2.14)$$

denklemini elde edilmektedir.

Elektronlar negatif yüklü olduğu için μ ve L vektörleri birbirine ters yönde ve yörünge düzlemine diktirler. Kuantum mekaniğine göre; yörünge açısal momentumu kuantumlu olduğundan her zaman \hbar 'ın katları şeklinde ifade edilir. Böylelikle, n tam sayı olmak üzere;

$$L = 0, \hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots, n\hbar \quad (2.15)$$

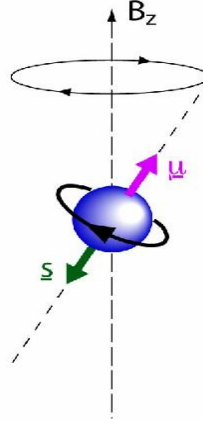
şeklinde açısal momentum tanımlanır.

Manyetik momentin sıfır olmayan en küçük değeri 2.14 denkleminde verilenlere göre;

$$\mu = \frac{e}{2m}\hbar = \frac{e}{2m}\left(\frac{h}{2\pi}\right) \quad (2.16)$$

olur.

Elektronların spin özelliği nedeniyle elektron, manyetik momente katkıda bulunmaktadır. Kuantum mekaniği açısından dönen bir elektronun bir akım ilmeği oluşturması dolayısıyla manyetik moment oluşmaktadır. Şekil 2.12'de elektronun manyetik momentini μ , spini S ve z yönünde oluşan manyetik alan ise B_z olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Spin manyetik momenti (Çöktüren 2008)

Bu momentin büyüklüğü; yörüngesel manyetik momentle aynı mertebededir. Spin açısıl momentumunun büyüklüğü kuantum mekaniğine göre;

$$S = \left(\frac{h}{2\pi}\right) \cdot \frac{1}{2} = 5,2729 \times 10^{-35} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (2.17)$$

olarak verilir.

Bir elektron spinin iç manyetik moment değeri ise;

$$\mu_\beta = \frac{e}{2\pi} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T} \quad (2.18)$$

denklemleri ile verilmektedir. Bu büyüklüğe 'Bohr magnetonu' denir.

Çok sayıda elektron bulunduran atomlar veya iyonlar da genellikle, spinleri zıt yönelimli elektron çiftleri meydana getirir. Böylece spinlerin manyetik momentleri birbirini yok etmektedir. Tek sayıda elektronu bulunan atomların ise en azından bir tane çiftlenmemiş elektronu ve buna karşı gelen spin manyetik momentleri vardır. Bir atomun toplam manyetik momentleri "spin" ve "yörüngesel" manyetik momentlerinin vektörel toplamıdır.

Bir atomun çekirdeğindeki proton ve nötronlardan da kaynaklanan çekirdek manyetik momenti de vardır. Çekirdeksel manyetik momentler elektronun manyetik momentlerinden yaklaşık olarak 10^3 kez daha küçüktürler (Çöktüren 2008).

2.2.7. Manyetik malzeme türleri

Atom içerisindeki elektronlar, çekirdek etrafında dönme hareketi yaparken kendi eksenini etrafında da dönme hareketi de yapmaktadırlar. Elektron kendi eksenini etrafında döndüğünde manyetik moment meydana getirmektedir. Atoma dış manyetik alan uygulandığında manyetik alan içerisinde kalan yük, hareket ettiği zaman bu manyetik kuvvetin etkisinde kalmaktadır. Malzemenin manyetik özelliğini atom içerisindeki bu hareketler belirlemektedir. Bir malzemeye dış manyetik alan uygulayarak malzemenin yörüngesel hareketleri ve spin hareketlerinin farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Böylelikle malzemeleri gösterdikleri farklılıklara göre üç ana manyetik özellik altında incelememiz mümkündür. Bu manyetik özellikler; diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik olarak adlandırılmaktadır.

2.2.7.a. Diyamanyetikler

Diyamanyetik malzemeye bir dış manyetik alan uygulandığında, malzemenin tüm elektronlarının spin ve yörüngeleri sıfır olacak şekilde yönelim göstermektedir. Uygulanan alan ile çiftlenmiş elektronlar, malzeme içerisinde toplam alanı azaltacak şekilde yörüngesel hareketlerini değiştirmektedir. Atomda net ve uygulanan manyetik alana karşı, zayıf ve zıt yönde bir manyetik moment oluşmaktadır. Bu şekilde oluşan manyetiklik, diyamanyetik olarak adlandırılmaktadır. Böylelikle diyamanyetik özellik gösteren bir malzeme küçük bir mıknatısla zayıf bir şekilde itilebilmektedir. Doğada bulunan birçok malzemenin diyamanyetik özelliği bulunmaktadır. Örnek olarak; potasyum, radyum, magnezyum, bakır, gümüş, hidrojen, altın ve su verilebilmektedir (Unan 2014).

2.2.7.b. Paramanyetikler

Paramanyetik malzemeye bir dış manyetik alan uygulandığında, malzemenin manyetik momentleri birbirinden bağımsız bir şekilde kısmen alan yönünde yönelim göstermektedir. Dış manyetik alan kaldırıldığında ise malzeme içerisinde oluşan net manyetik moment sıfır olmaktadır. Net manyetik momenti sıfırdan farklı olacak şekilde çiftlenmiş elektronlardan oluşan atomların, rastgele davranması sonucu oluşan manyetizma paramanyetik olarak adlandırılmaktadır. Isıl enerji arttığında atom içerisindeki manyetik momentlerin dizilimi rastgele yönelmekte ve manyetizasyon azalmaktadır (Tacer 2004). Paramanyetik özellik gösteren malzemelere örnek olarak hava, alüminyum ve silisyum verilmektedir.

2.2.7.c. Ferromanyetikler

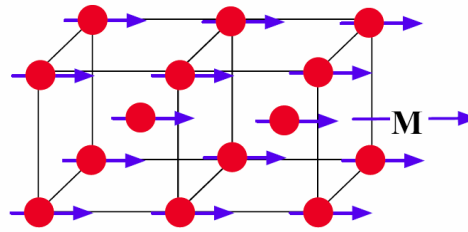
Curie sıcaklığının altında, dış manyetik alan olmadığında bile elektron spin dizilimleri düzenli olduğundan kalıcı manyetik momente sahip manyetik malzemeler, ferromanyetik malzeme olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.13'de ferromanyetik malzemenin spin dizilimi gösterilmektedir (Ünal 2011).



Şekil 2.13. Ferromanyetik malzemenin spin dizilimi (Ünal 2011).

Birçok atomda, elektronların simetrik olarak dizilimi nedeniyle net manyetik moment sıfırdır. Sadece elektronların iç kabuğu tamamlanmamış atomlarda manyetik moment söz konusudur. Buna örnek olarak atom numaraları 21 ile 28, 39 ile 45, 57 ile 78 arasında ve 89 üstü olan malzemeler verilebilmektedir. En önemli aralık 21 ile 28 arasında olup, bu aralıkta bulunan vanadyum, krom, manganez, demir, nikel ve kobalt gibi elementlerin alaşımlarında net manyetik moment sıfırdan farklıdır. Bu malzemeler ferromanyetik malzemeleri oluşturmaktadır (Tacer 2004).

Ferromanyetik malzemelere zayıf bir dış manyetik alan uygulandığında bile alan ile paralel yönelime sahip atomik dipol momentler mevcuttur. Bu dipol momentler Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Dış manyetik alan kaldırıldığında birbirine paralel olarak yönelen atomik momentlerin yönelimi bozulmaz ve mıknatıslanmış olarak kalır. Bu sürekli yönelim, komşu olan manyetik momentler arasında kuvvetli etkileşimden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.14. Birbirine paralel olarak yönelen atomik manyetik dipol momentleri (Tacer 2004)

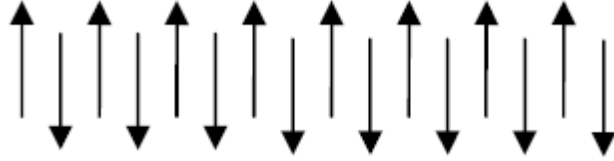
Ferromanyetik özellik gösteren malzemelerin, diyamanyetik ve paramanyetik özellik gösteren malzemelerden farkı;

- Ferromanyetik özellik gösteren malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri 1'den çok büyüktür.
- Diyamanyetik ve paramanyetik özellik gösteren malzemelerde manyetizasyon (M) ile manyetik alan (H) arasında doğrusal bağlantı varken, ferromanyetik özellik gösteren malzemelerde doğrusal ilişki bulunmamaktadır.
- Ferromanyetik özellik gösteren malzemeler histerezis eğrisine sahiptirler.
- Ferromanyetik özellik gösteren malzemeler Curie sıcaklığının üzerinde paramanyetik özellik göstermektedir.

1. Antiferromanyetikler

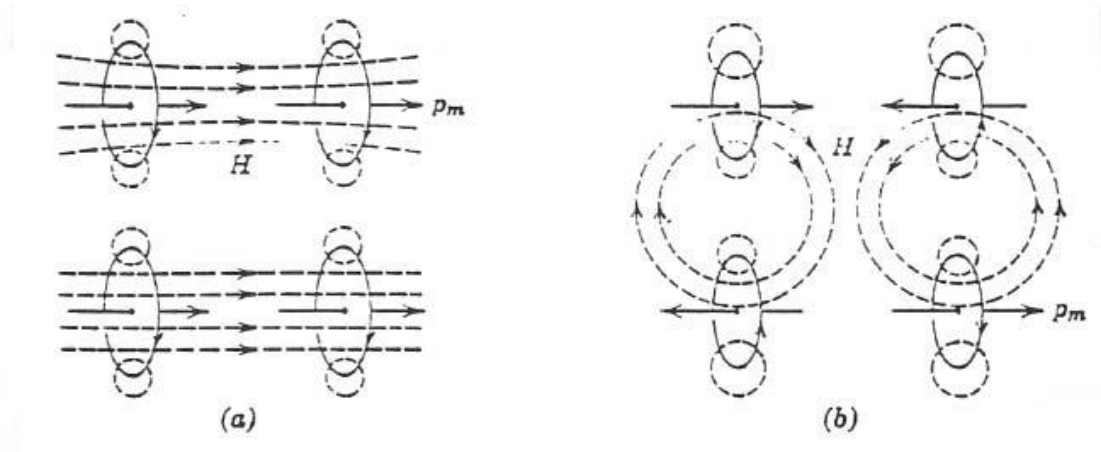
Ferromanyetik özellik gösteren malzemelerde, birbirine komşu atomların diziliminde, elektronların döngü eksenini aynı yönelim gösterdiği için net manyetik moment sıfırdır.

Böylelikle manyetik momentler birbirine eşit ve zıt yönlü yönelerek birbirlerini yok ederler. Bu eşit ve zıt yönlü manyetik momentler Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Manyetik alan yokluğunda net mıknatıslanma sıfırdır. Bu tür malzemeler antiferromanyetik malzeme olarak adlandırılır (Ünal 2011).



Şekil 2.15. Antiferromanyetik malzemedeki spinlerin yönelimi (Ünal 2011)

Manyetik akı, ferromanyetik özellik gösteren malzemeler için Şekil 2.16.a'da gösterildiği gibi, yön ve doğrultu olarak süreklilik göstermektedir. Antiferromanyetik özellik gösteren malzemeler için ise Şekil 2.16.b'de gösterildiği gibi akı sadece komşu manyetik momentleri halkalamaktadır.



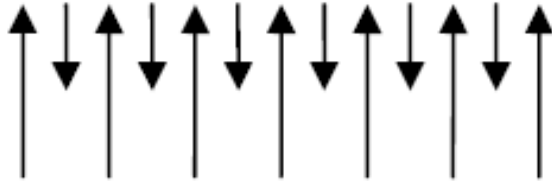
Şekil 2.16. a) Ferromanyetik malzeme, b) antiferromanyetik malzeme (Tacer 2004)

Demir kobalt ve nikelden oluşan saf elementler grubunda, aynı sıradaki momentler oda sıcaklığında ferromanyetik özellik meydana getirmektedir. Oda sıcaklığının biraz altında ise, bu elementlerdeki ferromanyetik özellik etkilenmemektedir. Isı sonucunda oluşan kuvvetler, komşu atomlarda manyetik moment oluşturan elektronlar arasındaki

mesafeye bağılı olmaktadır. Belli bir mesafeye kadar ferromanyetik özellik gösteren bir malzeme, o mesafenin altında manyetik olmayan bir malzeme durumuna geçebilir. Antiferromanyetik özellik gösteren malzemelerde bu değer oldukça küçüktür ve manyetik olmayan malzemelerin alaşımıyla bu değer büyütülebilmektedir. Bu teknikle antiferromanyetik özellik gösteren malzemedan, alaşım yöntemi ile ferromanyetik özellik gösteren malzeme meydana getirilebilir.

2. Ferrimanyetikler

Farklı manyetik momentlere sahip ve farklı dizilimli iki grup atom yapısından bir çubuk mıknatis elde edilebilmektedir. Elde edilen bu yapı ferrimanyetik olarak adlandırılmaktadır. Ferrimanyetik özellik gösteren malzemeler, ferromanyetik gibi kendiliğinden mıknatislanma gösteren malzemelerdir fakat doğal mıknatislanmaları ferromanyetikliğe göre daha küçüktür. Ferrimanyetik özellik gösteren malzemelerin spin yönelimleri Şekil 2.17’de gösterildiği gibi zıt ve paralel yönelim göstermektedir. Bu dizilimdeki zıt yönlü momentler birbirine eşit olmadığı için bu farktan dolayı kalıcı manyetizasyon meydana gelir. Manyetik alan karşısında ferromantikliğe benzer davranış göstermektedirler. Ferrimanyetik malzemelere örnek olarak manyetik oksitlerin birçoğu verilebilir ve ferrimanyetik özellik gösteren elementler ferrit olarak adlandırılmaktadır (Ünal 2011).



Şekil 2.17. Ferrimanyetik malzemede spinlerin yönelimi (Ünal 2011)

Ferritler günümüzde en yoğun olarak kullanılan ferrimanyetik malzemedir. Başka bir ifadeyle ‘mıknatis taşı’ olarak adlandırılan Fe_3O_4 doğal manyetit malzeme, doğada bulunan en eski manyetik malzemeler arasındadır. Seramik veya oksit mıknatislar olarak bilinirler. Üretimleri için gerekli ham madde ucuz ve kolay yolla bulunabilir.

Yüksek koersif kuvvet, kimyasal kararlılık ve indüksiyon değerleri sebebiyle farklı tiplerde küçük motor üretiminde kullanılmaktadırlar.

Birbirine kilitlenmiş pozitif yüklü metal iyonları ile negatif yüklü iki değerlikli oksijen iyonlarından oluşan ağ görünümlü bir kristal yapıya sahiptirler. Oksijen iyonlarının düzenlenmesi ile bazı ferritler hegzagonal sıkı paket yapıda, bazıları ise kübik sıkı paket yapıda gözlemlenmektedir. Tercih edilen kristal yapının çeşidini metal iyonu yükü ve boyutu belirler (Vural 2010). Bilinen en iyi ferrit malzeme olarak İttriyum Demir Garnet (Yttrium Iron Garnet, YIG) örnek verilebilir. Kaplamada kullandığımız bu garnet ferrimanyetik özellik gösteren malzeme grubuna girmektedir.

2.2.8. Garnetler ve özellikleri

2.2.8.a. $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) garnet

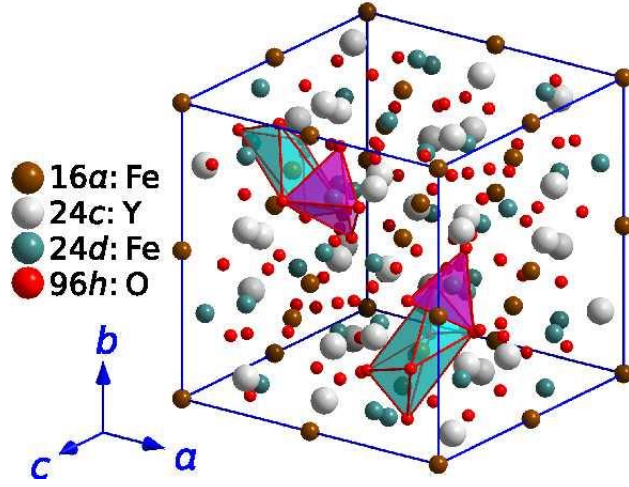
Ferrimanyetik garnetler genel olarak $R_3Fe_5O_{12}$ ile formülize edilmektedir. Denklemdaki R, nadir toprak elementlerini temsil etmektedir. Böylelikle yapı nadir toprak elementi grubundan bir element ve demir olmak üzere iki tip iyon içermektedir (Öztürk 2010). YIG için bu denklemden R'nin yerini itriyum elementi alır.

$Y_3Fe_2(FeO_4)_3$ veya $Y_3Fe_5O_{12}$ kimyasal denklemlerine sahip olan İttriyum Demir Garnet (Yttrium Iron Garnet, YIG), manyetik ve manyeto-optik (manyetik alanla malzemenin optik özelliklerini değiştirme) özellikleri ile yapay bir ferrimanyetik garnettir. YIG yapay garnetin fiziksel özelliklerine bakıldığında, 160 atom içeren geniş kübik birim kafes ($a \approx 1200$ pm) yapısına sahip olduğu gözlemlenmektedir (Yarıçı 2015). Çizelge 2.3'de saf YIG garnetin $25^\circ C$ sıcaklıkta fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. YIG'in fiziksel özellikleri (Yariçi 2015)

Deneysel Formül	Y ₃ Fe ₅ O ₁₂
Molekül Ağırlığı (g/mol)	737,95
Kristal Yapısı	Kübik
Yoğunluk (g/cm³)	5,17
Erime Noktası (°C)	1555
Örgü Sabiti (Å)	12,376
Doyma Manyetizasyonu (Gauss)	1780
Manyetik Anizotropisi (erg/cm³)	-6,20 x 10 ⁻³
Dielektrik Sabiti	15,0
Curie Sıcaklığı (K)	553
Manyeto-optik Hassasiyeti (Å⁻¹)	0,14

YIG garneti, ikisi demir biri itriyum iyonu olmak üzere üç tane alt kafes yapısına sahiptir. Her bir alt kafesin manyetik momenti, kendi içerisinde birbirine paralel diğer alt kafese göre zıt yönde yönelim göstermektedir. YIG içerisindeki oksijen atomları oktahedral (16a) ve tetrahedral (24d) yapıda bulunur (Şekil 2.18). Bu şekilde oktahedral (düzgün sekiz yüzlü) yapı için alt kafes hacim merkezli kübik yapı özelliği gösterirken, tetrahedral (düzgün dört yüzlü) yapının alt kafesi ise yüzey merkezli kübik yapı özelliği göstermektedir. Gerçekte bu yapılar düzgün simetriye sahip olmamalarına rağmen simetri yaklaşımı ile bu isimleri almaktadırlar (Öztürk 2010).



Şekil 2.18. YIG kafes yapısı (Kreisel 2011)

YIG kendine özgü manyeto-optik, manyetik, termal, mekanik ve elektriksel özelliklere sahip olduğundan dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlar; mikro optik araçlar, yeni tip elektronik aygıtlar, çok katmanlı seramik mikrodalga cihazlar, mikrodalga haberleşme cihazları, manyeto-optik kayıt sistemleri, optik yalıtkanlar, modülasyon cihazları ve manyeto-optik görüntüleme gibi uygulama alanlarıdır. Bi, Pb, Ce, Nd, Ru, Ir gibi maddeler katılarak manyeto-optik özelliklerinin gelişmesi yönünde çalışmalar devam etmektedir.

2.2.8.b. $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) kristalinin özellikleri

$Gd_3Ga_5O_{12}$ (Gadolinium Galyum Garnet, GGG) kristali YIG büyütme için literatür taramasında incelendiğinde en çok kullanılan alttaştır. Tek kristal ve kübik yapıda olma özelliğine sahiptir. Çizelge 2.4'de GGG kristalin yapı özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.4. GGG tek kristalinin özellikleri

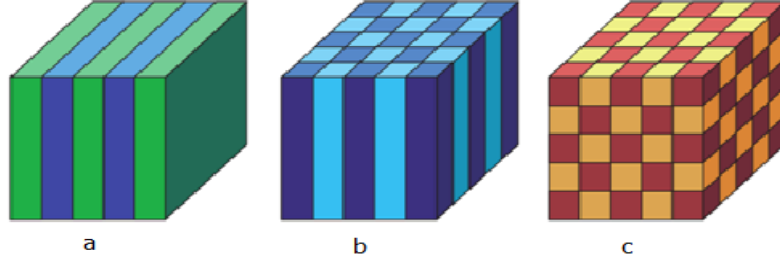
	Kristalin Fiziksel Özellikleri
Kristal Yapı	Kübik: $a = 12,376 \text{ \AA}$, ($Z = 8$)
Molekül ağırlığı	1012,36 g/mol
Erime Noktası	1800 °C
Yoğunluk	7,09 g/cm ³
Kırılma İndisi	1,95
Kristal Büyütme Yönelimi	<111>

2.2.9. Magnonikler

2.2.9.a. Fotonik kristaller

Pigmentler dokulara renk veren ve canlıların renkli gözükmesini sağlayan maddelerdir. Bazı durumlarda canlıların özellikle de hayvanların, renk pigmenti içermediği halde renkli görünmesine sebep olan yapılar mevcuttur. Bunlar doğada yapay olarak bilinen fotonik kristallerdir. Kristale gönderilen ışın, kırınımına uğrayarak saçılır ve saçılan ışın bir film üzerine düşürüldüğünde kırınım deseni oluşturmaktadır. Bu tür yapılara fotonik kristal adı verilmektedir. Örnek olarak bu kristal bir kelebeğin kanadında yer aldığına, oluşan kırınım deseni kelebeğin kanadının renklerini meydana getirmektedir (Dildar 2013).

Fotonik kristaller dielektrik (yalıtkan) sabitinin periyodik olarak değiştiği yapılardır. Bant aralığı yönünden yarı iletken yapılara benzemektedir. Yarı iletken maddelerdeki elektronların yerini fotonik kristallerde fotonlar almaktadır. Bu nedenle maddeler içerisinde ışığın yayılımını anlamak için, periyodik ortamda dalga yayılımını anlamak gerekir. Fotonik kristaller bir, iki ya da üç boyutta periyodik yalıtkan (dielektrik) yapıda bulunmaktadır (Dildar 2013). Şekil 2.19'da bir, iki ve üç boyutta periyodik fotonik kristaller gösterilmiştir.

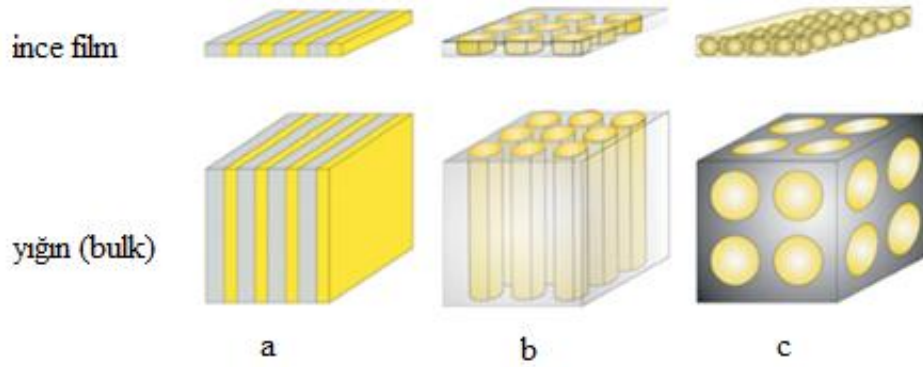


Şekil 2.19. Fotonik kristal a) bir boyutta periyodik b) iki boyutta periyodik ve c) üç boyutta periyodik (Joannopoulos 2008)

Fotonik kristallerin keşfinden sonra manyetik benzeri olarak magnonik kristaller de keşfedilmiştir. Fotonik kristallerin bant yapılarının ilginç olması magnonik kristallere de ilgiyi arttırmıştır. Magnonik kristaller, magnonların (spin dalgası kuantumları) bilgi taşıyıcılığı yaptığı manyetik periyodik yapılardır. Böylelikle magnonik kristaller, bilgiyi işlemek ve iletmek için spin dalgalarının davranışlarını inceleyen manyetizmanın yükselen bir bilim dalı haline gelmiştir (Kaya 2016).

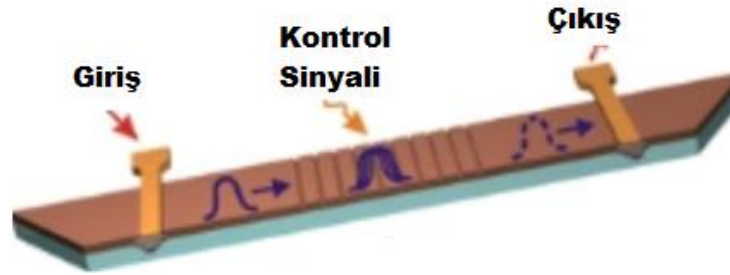
2.2.9.b. Magnonik kristaller

Spin dalgalarının uzun erişimli ilerlemesini sağlamak için, laboratuvar şartlarında yapay olarak üretilen ve manyetik özelliği periyodik olarak değişkenlik gösteren malzemeler magnonik kristaller olarak tanımlanmaktadır. Magnonik kristaller, bulk (yığın) ve ince film olmak üzere iki yapıda incelenmektedir. Her iki yapıda da bir, iki veya üç boyutta magnonik kristal oluşturulabilmektedir (Kaya 2016). Farklı renkler farklı manyetik özelliğe sahip materyalleri temsil etmektedir. Şekil 2.20’de görüldüğü gibi farklı manyetik özelliğe sahip materyaller bir, iki ve üç boyutta periyodik olarak tekrar etmektedir.



Şekil 2.20. Magnonik kristal a) bir boyutta, b) iki boyutta ve c) üç boyutta (Kaya 2016)

Spin dalgaları nano boyutta bilgi taşıma ve işleme kapasitesine sahip olduğundan dolayı magnonik kristallere olan ilgiyi artırmıştır. Böylelikle magnonik kristaller aracılığıyla mikro boyutta cihaz üretilmesi mümkündür (Kaya 2016). Şekil 2.21’de magnonik kristal örneği verilmektedir. Magnonik kristaller, spin dalga kuantumlarının bilgi taşıyıcılığı yaptığı manyetik yapılar olduğundan dolayı magnonik kristallerin anlaşılması için spin dalgalarının bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 2.21. Magnonik kristal (Serga 2009)

2.2.9.c. Spin dalgaları

Spin dalgaları yani mangonlar (spin dalga kuantumları) manyetik olarak düzenli bir ortamda (ferromanyetik, antiferromanyetik vb.) spinlerin uyarılması şeklinde tanımlanmaktadır. Spin dalgaları, kırılma, yansıma, odaklama, yayılma ve doppler etkisi gibi ses ve ışık dalgalarının özelliklerini göstermektedir. Bu özellikleriyle magnonik adı altında yeni bir araştırma alanı doğurmuşlardır (Kaya 2016).

Spin dalgaları, manyetik ortamdan geçerken elektromanyetik ve akustik dalgalardan farklı olarak daha dağınık davranış sergiler. Bu dağınık özellikleri manyetik materyalin seçimi, materyalin şekli, uygulanan alanın yönü ve büyüklüğü gibi parametrelere bağlı olarak değişir. Spin dalgaları, koherent uzunluğu (düşük enerjili fotonların bir atomla etkileşimi) ve düşük grup hızı gibi avantajlarından dolayı magnonik cihazlarda yeni nesil bilgi taşıyıcılığında kullanılmaktadır (Kaya 2016).

Magnonik cihazlarda bilgi, elektronik cihazlardaki gibi yükler yerine spinler üzerine kodlanmaktadır. Spinler akım olmadan da yönlendirilmekte ve elektronik cihazlardaki güç tüketiminin üstesinden gelinmektedir. Spin dalgaları dalga boyunun nano boyutta olması ve mikrodalga frekans aralığında yer alması nedeniyle nano boyutta mikrodalga cihazları üretilmesine yardımcı olmuştur.

Mühendislik alanında manyetik bilgi depolama, modern sabit diskler ve yüksek yoğunluklu manyetik kaydedicilerde, oldukça hassas cihazlar tasarlamak mümkündür. Magnonik kristallerle, birçok manyetik alan sensörü geliştirilerek günümüz teknolojisinde kullanılmaktadır. Günümüzde manyetik alanın algılanması ile ilgili çalışmalar, hassasiyetin artması, daha küçük boyut ve ağırlık, düşük maliyet ve yüksek frekans çalışma aralığı nedenlerinden dolayı hala hızla devam etmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, magnonik kristalleri kullanarak oldukça hassas manyetik alan sensörlerinin yapılabileceğini göstermiştir (Kaya 2016).

2.3. Literatürdeki PLD Tekniğiyle YIG/GGG Büyütmeleri

Literatür incelendiğinde PLD kullanılarak GGG alttaş üzerine YIG büyütülmesi farklı araştırma grupları tarafından farklı değerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalar içerisinde önemli olarak belirlenen çalışmalarda kullanılan parametreler aşağıda verilmektedir.

Sun ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmalarında önce hedef-alttaş arası mesafe 4 cm daha sonra 7 cm olarak, 100 mTorr basınç altında 650 °C'de 1,7 J/cm² lazer uyarılma enerjisi kullanmışlardır (Sun et al. 2012a; Sun et al. 2012b).

Lu 2005 yılında yaptığı çalışmada hedef-alttaş arası mesafeyi 6,5 cm alarak, 200 mTorr basınç altında, 450 - 700 °C'de ve 2,2 J/cm² lazer uyarılma enerjisi kullanmıştır (Lu 2005).

İbrahim ve arkadaşları 2000 yılında yaptıkları çalışmada büyütme basıncını 127,5 mTorr ve daha sonra 52,5 mTorr olarak almış, büyütme sıcaklığını 766 °C ve 800 °C'de değiştirip, lazer uyarılma enerjisini 1 J/cm², 2 J/cm² ve 3 J/cm² olarak büyütme yapmışlardır (İbrahim et al. 2000).

Buhay ve arkadaşları 1995 yılında yaptıkları çalışmada hedef-alttaş arası mesafeyi 5 cm, basıncı 50 mTorr, sıcaklığı 550 - 850 °C aralığında alarak 200 mJ uyarılma enerjisinin de YIG büyütmüşlerdir (Buhay et al. 1995).

Bhoi ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada hedef-alttaş arası mesafeyi 4 cm kullanarak, 37,5 mTorr basınç altında, 750 °C büyütme sıcaklığında, 240 - 350 mJ uyarılma enerjisi kullanmışlardır (Bhoi et al. 2013).

Manuilov ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmalarında önce hedef-alttaş arası mesafe 6 cm olarak, 25 mTorr basınç altında 750 °C'de 3 J/cm² daha sonra ise 4 J/cm² lazer uyarılma enerjisi kullanarak YIG büyütmesi yapmışlardır (Manuilov et al. 2011).

Dorsey ve arkadaşları 1993 yılında yaptığı çalışmada ise hedef-alttaş arası mesafeyi 4 cm alarak, 250 mTorr basınç altında 800 °C'de 3 J/cm² lazer uyarılma enerjisi kullanmışlardır (Dorsey et al. 1993).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. YIG Tabletinin Hazırlanması

PLD de kullanılacak olan hedef tablet için Sigma-Aldrich firmasından %99,9 saflıkta, 10 g YIG nanotoz (<100 nm BET) satın alınmıştır (Şekil 3.1). Nanotozu hedef tablet (pellet) haline getirmek için 5,5 g nanotoz 1 inç çaplı kalıp takımı (Şekil 3.2) vasıtasıyla 150 kN'luk basınç altında sıkıştırılmıştır.



Şekil 3.1. Kullanılan %99,9 saflıkta YIG nanotoz



Şekil 3.2. Bir inç çapındaki kalıp takımı

Elde ettiğimiz tabletin istenilen sertliğe ulaşması ve lazer için hedef malzeme olarak kullanılması amacıyla ProTherm (PTF-16-38-250) tüp fırın kullanılarak, hava ortamında, 1400 °C sıcaklıkta, 8 saat süre ile sinterlenmiştir (Şekil 3.3). Böylelikle toz haldeki YIG bileşiği PLD sisteminde hedef tablet haline getirilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Tabletın tüp fırında sinterlenmesi



Şekil 3.4. Tablet haline getirilmiş YIG tablet

3.1.1. GGG alttaşın hazırlanması

PLD yönteminde tek kristal ince filmlerin büyütülmesi için bir şablona ihtiyaç duyulmaktadır. YIG ince filmler için GGG yaygın olarak kullanılan ve çok sert bir alttıştır. GGG kristali 3 inç çapında, 0,5 mm yüksekliğinde, $a=12,1376 \text{ \AA}$ örgü parametresine sahip ve $\langle 111 \rangle$ yöneliminde tek yüzü cilalı wafer olarak MTI şirketinden ticari yolla satın alınmıştır (Şekil 3.5). Kullanıma uygun hale gelmesi amacıyla wafer elmas kalem yardımıyla 5 mm genişliğinde paralel olarak dilimlenmiştir. Paralel dilimlenen GGG wafer kristal lam üzerine TED Pella Crystalbond 509-3 yapıştırıcısı kullanılarak yapıştırılmış ve Buehler Isomet Elmas Testere kullanılarak $15 \times 5 \times 0,5$ mm boyutlarında alttaş haline getirilmiştir.



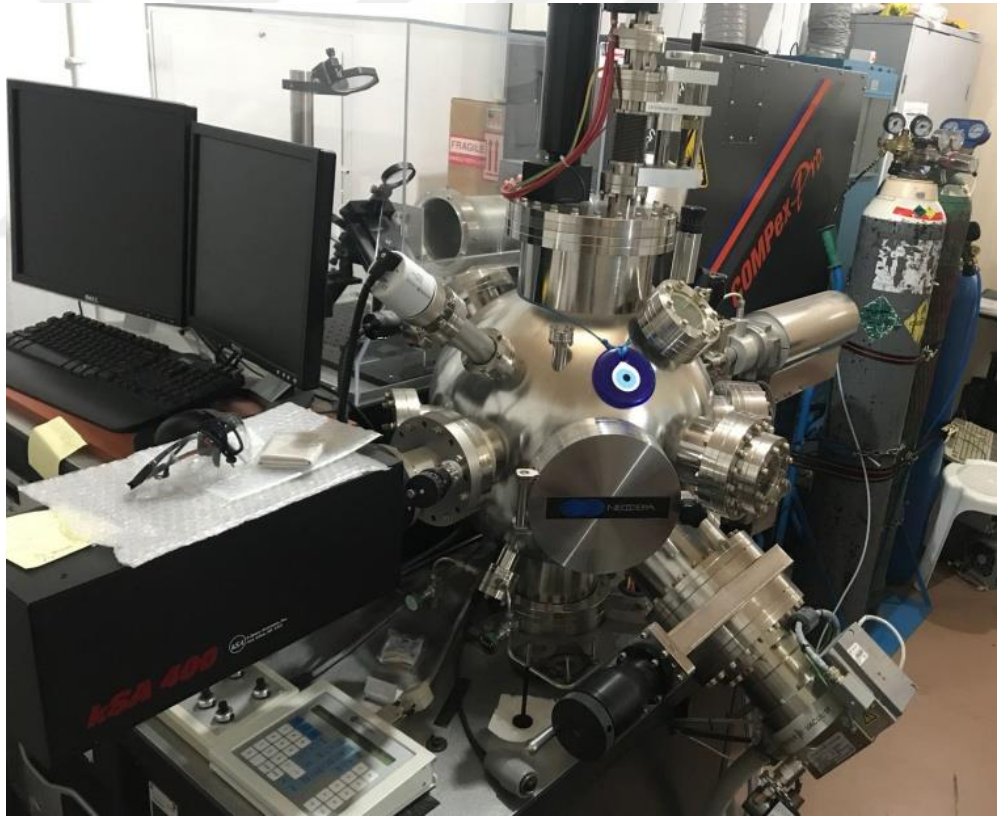
Şekil 3.5. Satın alınan $\langle 111 \rangle$ tek kristal GGG wafer

İstenilen boyuta getirilen GGG alttaşları, kirlere ve yapıştırıcıdan arınması amacıyla ultrasonik temizleyici de önce aseton, daha sonra 2-propanol ile 5 dakika süreyle temizlenmiştir. Temizlenen alttaşlar temizleme bezi üzerine alınarak YIG büyütme için hazır hale getirilmiştir.

3.2. Darbeli Lazer Biriktirme (PLD) Sistemi

Darbeli lazer biriktirme (Pulsed Laser Deposition, PLD) sistemi, tek elementten çeşitli materyallere kadar geniş bir yelpazede büyütme işlemi yapılabilmektedir. Manyetik malzemeler, oksit malzemeler, yarıiletken, süper örgü, polimer, elmasımsı karbon ve biyo-malzemeler gibi çeşitli malzemeler buna örnek verilebilir (Yurtcan 2011).

Kristal büyütme işlemi için Neocera firması üretimi 'Complete P180 PLD Laboratory model PLD kullanılmıştır (Şekil 3.6). PLD sisteminin genel bileşenleri; lazer kaynağı, optik bileşenler, vakum odası, bilgisayar ve ısıtıcıdır (Chrisey and Hubler 1994).

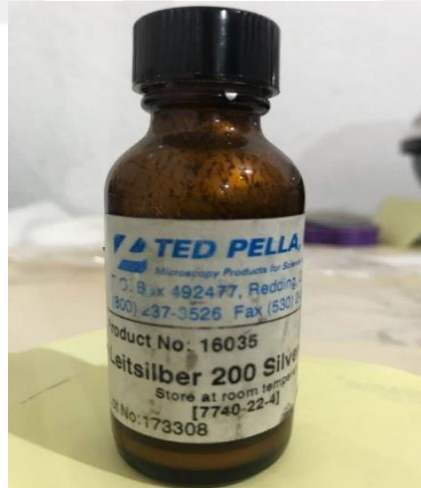


Şekil 3.6. Complete P180 PLD Laboratory PLD sistemi

Büyütme işlemi için öncelikle temizlenmiş GGG kristalinin sistemdeki numune tutucuya yerleştirilmesi ve termal kontak yapılabilmesi için hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle numune tutucuyu, kaba kirlere ve daha önceki deney

atıklarından arınması için suyun altında zımparalayarak yüzeysel kirliliği giderilmiştir. Gözle görülür bir parlaklık elde edilene kadar zımparalama işlemine devam edilmiştir. Zımpara işlemi bittikten sonra, temizleme beziyle numune tutucu yuvası ile birlikte aseton ve metanol yardımıyla organik kirlere arıtılması için silinmiştir. Böylelikle cihazımızın numune tutucusu hazırlanan GGG kristalini yapıştırmak için hazır hale getirilmiştir.

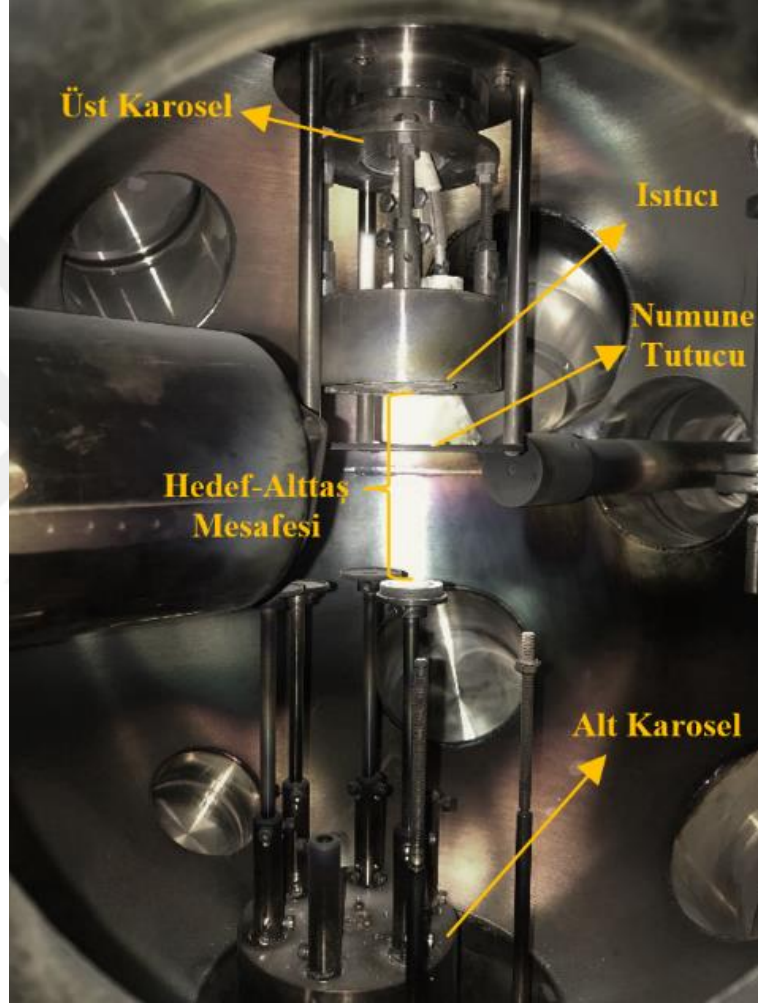
Numune tutucunun yüzeyi ortalanarak, TED Pella şirketine ait termal iletkenliği yüksek '200 Silver Paint' gümüş yapıştırıcısı (Şekil 3.7) damlatılmıştır. Hazırlanan alttaş, yine aseton ve metanol ile temizlenmiş bir cımbız yardımıyla tutulup, cilalanmamış yüzü damlaya gelecek şekilde ve alttaş ile yüzey arasında boşluk kalmamasına dikkat edilerek, damlatılan gümüş yapıştırıcısı üzerine bırakılmıştır. Halojen lamba (25W) altında 30 dakikalık sürede gümüş yapıştırıcı kurutulup, alttaşın, tutucuya yapışması sağlanmıştır.



Şekil 3.7. TED pella gümüş yapıştırıcı

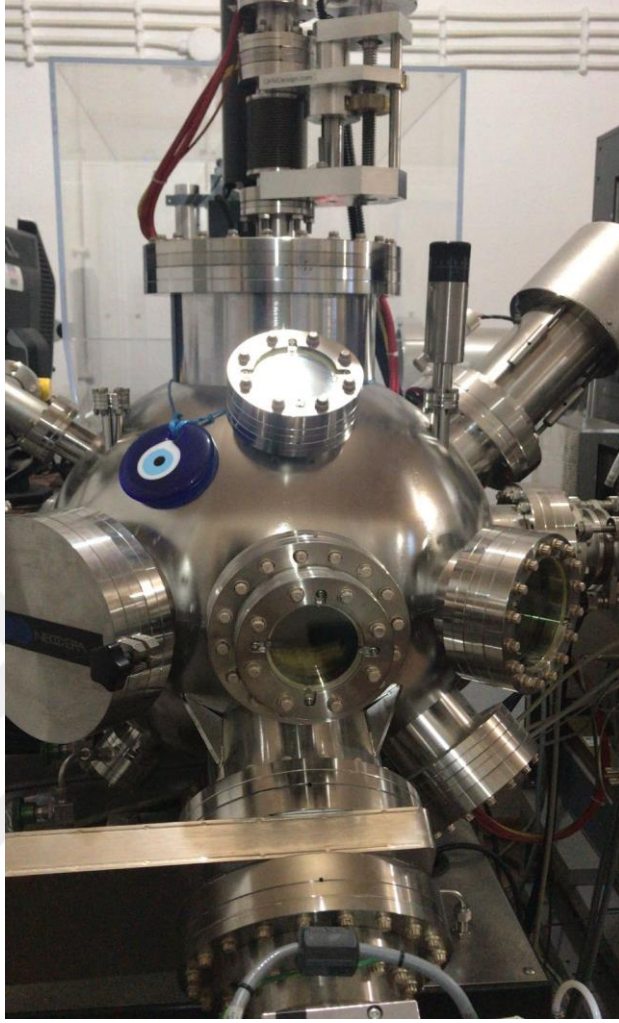
Yapıştırılan numune, numune tutucu ve tutucu yuvası ile birlikte vakum odası içerisine yer alan, üst karosel düzenekteki yerine, hazırlanan YIG tableti ise tam karşısına gelecek şekilde alt karosel düzenekteki yerine yerleştirilmiştir. Kaplama homojenliği sağlanabilmesi adına üst karosel düzenek kaplama esnasında rotasyonel olarak hareket etmektedir. Hedef ve kristal numune arasındaki mesafe ortalama serbest yolu

etkileyeceğinden numuneler için hedef-alttaş mesafesi plazma bulutunun şekli göz önüne alınarak 4,3 cm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8’de vakum odası içerisinde yer alan alt-üst karosel düzenek, numune tutucusu, hedef-alttaş arası mesafe ve ısıtıcı gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Vakum odası içerisindeki karosel düzenek

Vakum odası (chamber) içerisine hedef tablet ve kristal alttaş yerleştirildikten sonra kapatılarak düzeneğin dış ortamla bağlantısı kesilmiştir (Şekil 3.9). Vakum odası dışında bulunan ısıtıcı hareket kolu yardımıyla ısıtıcı numune tutucuya yaklaştırılmıştır.



Şekil 3.9. Vakum odası

Vakum odası kapağı kapatıldıktan sonra sistemin çalışması ve basınç, sıcaklık, lazer atış sayısı gibi değişken değerlerin ayarlanması için bilgisayar kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır.

Büyütmeye işlemi öncesi bilgisayar programıyla her bir numune için ayrı kaplama şartları belirlenmiş ve dosya halinde oluşturulmuştur.

Temizlik ve numune yerleştirme sonrası deneyin ilk adımı, vakum odası içerisindeki kirliliğini gidermek ve yabancı maddelerden arıtmak amacıyla vakum pompalarının devreye girmesidir İki aşamalı vakumlama gerçekleştirilmektedir. Ana vakumlama (Şekil

3.10) atmosfer basıncından vakumlamaya başlarken, turbo moleküler pompa daha düşük basınçta devreye girmekte ve böylelikle yüksek vakum ortamı oluşturulmaktadır. Deneyler için vakum odasının temizlenmesi amacıyla 9×10^{-6} Torr taban basıncı kullanılmıştır. Büyütme basıncı, oluşan plazmanın geometrik özelliklerine göre 50 - 150 mTorr aralığında belirlenmiştir. Büyütme esnasında ortam basıncını sabitlemek için, turbo moleküler pompanın devri azaltılarak akış kontrolcüsü yardımıyla ortama %99,999 saflıkta oksijen gazı verilmiş ve büyütme işlemi için 100 – 250 mTorr basınç aralığı kullanılmıştır.

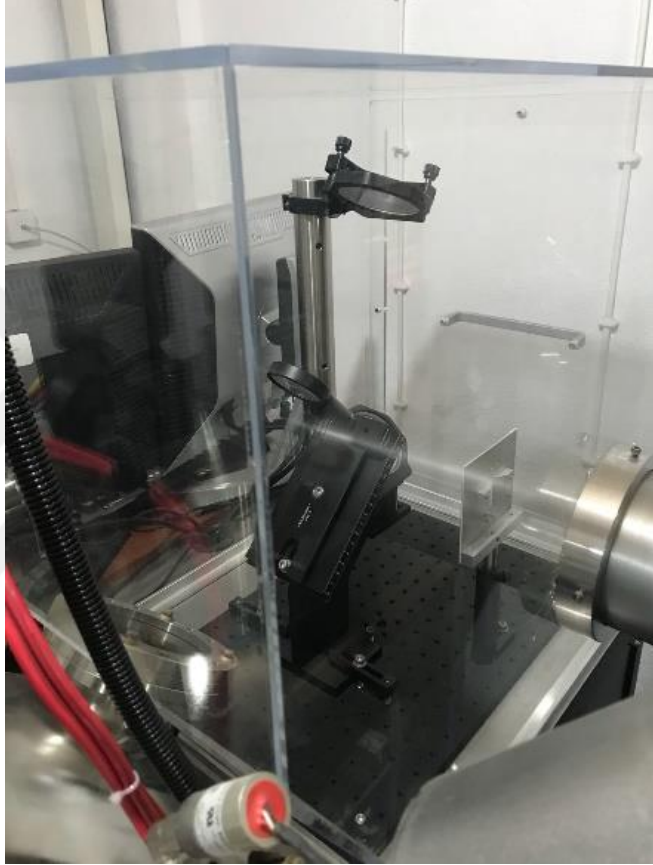


Şekil 3.10. Ana vakum pompası

Vakum odası istenilen vakum değerine geldiğinde alttaş ısıtıcı yardımıyla belirlenen sıcaklık değerlerine getirilmektedir. Alttaşı ısıtma hızı 800 °C'ye kadar 20 °C/dakika, 1000 °C'ye kadar ise 10 °C/dakika seçilmiştir. Isıtıcı numune tutucuya temas etmemekte ve numune tutucunun arka tarafında bulunmaktadır. Bu nedenle, ayarlanan sıcaklık ile alttaş üzerinde elde edilen sıcaklık arasında %20 değerinde bir kayıp olmaktadır. Bu kayıp göz önüne alınarak, alttaş üzerinde yaklaşık 560 °C, 640 °C, 720 °C ve 800 °C değerleri elde edilerek de büyütme yapılmıştır.

Vakum odası içerisinde istenilen basınç ve sıcaklık şartları tamamlandığında kaplama için lazer atışına geçilmektedir. Dış ortamda oluşturulan lazer, yine dış ortamda bulunan

optik bileşenler (Şekil 3.11) yardımıyla yansıtılarak vakum odasının cam penceresinden giriş yapmakta ve hedef üzerine odaklanmaktadır. Lazerin çıkış enerjisi 200 mJ değerine sabitlenerek, hedef tablet üzerine odaklanmış lazerin enerjisi $1,6 \text{ J/cm}^2$ 'ye sabitlenmiştir.



Şekil 3.11. Optik bileşenler

Optik bileşenler yardımıyla katı hedef üzerine odaklanmış lazer, hedef üzerinden elektron uyarılmasıyla elektromanyetik enerjiye dönüşmekte sonrasında buharlaşma ile plazma bulutu oluşturarak alttaş üzerine kaplaması sağlanmaktadır. Plazma bulutu içerisinde atomlar, moleküller, elektronlar, iyonlar, katı partiküller ve erimiş damlacıklar (globül) yer almaktadır (Okada and Maeda 1997). Hedef ve alttaş arası mesafe kısa olduğu için alttaş yüzeyi YIG hedef tabletinin yüzeyinden çıkan plazma bulutu yardımıyla kaplanmaktadır. Alttaş üzerinde kaplama homojenliği sağlanması

açısından kaplama esnasında karosel düzenekteki hem hedef hem de alttaş döndürülmektedir.

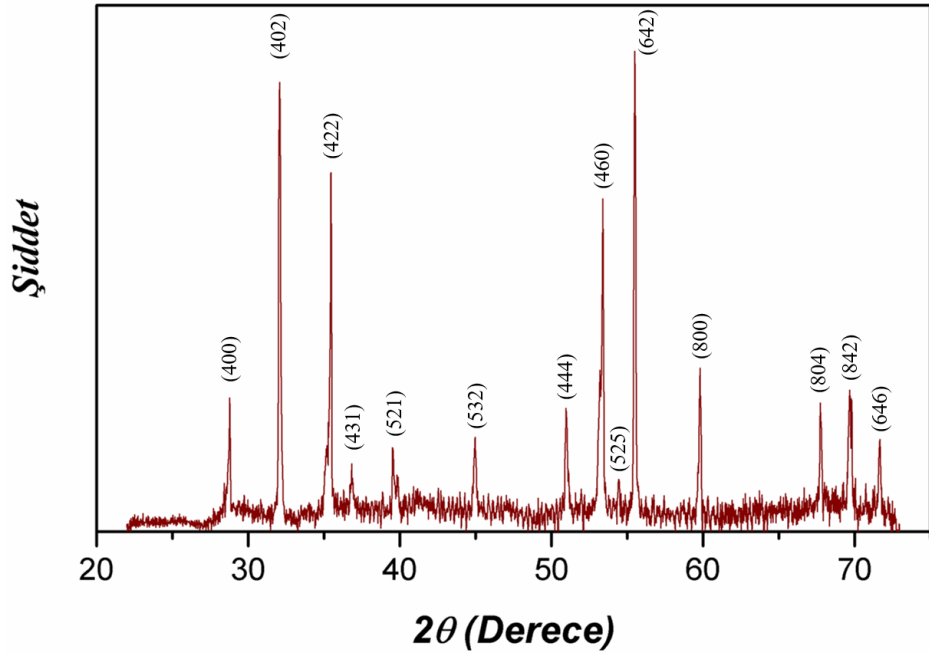
Hedef tablet üzerinde birikmiş olabilecek kirlerin temizlenmesi amacıyla kristal büyütme işlemi başlamadan önce alttaş koruyucu bir plaka ile kapatılarak hedef tablet üzerine 500 atış yapılmıştır. İyi bir kristalleşmenin sağlanabilmesi için ilk 1000 atış 1 Hz'de, sonraki 9000 atış ise 10 Hz'de yapılmıştır. Belirlenen lazer atış sayısı tamamlandığında lazer kapatılmıştır.

Lazer atışları sonrası numuneler vakum odasından çıkarılmadan 800 °C'de 400 Torr basınca çıkılarak 10 dakika tavlama işlemi yapılmıştır. Tavlama işlemi sonrasında numune soğumaya bırakılmıştır. GGG ve YIG arasında termal genişleme katsayıları farklı olduğundan, soğuma esnasında numunede çatlama olmaması için dakikada 10°C ile 250 °C'ye kontrollü soğutma yapılmış, sonrasında doğal soğutmaya bırakılmıştır. Soğutulmuş numuneyi çıkarabilmek için vakum odası içerisine %99,999 saflıkta azot gazı verilmiştir. Vakum odasının basıncı atmosfer basıncına getirilerek kaplanan numune dikkatli bir şekilde vakum odasından çıkarılmıştır. Numuneler bir kazıyıcı yardımı ile numune tutucudan ayrılmış ve paketlenerek desikatöre konulmuştur. Her bir numune aynı işlemlere tabi tutularak farklı parametrelerde kaplanmıştır.

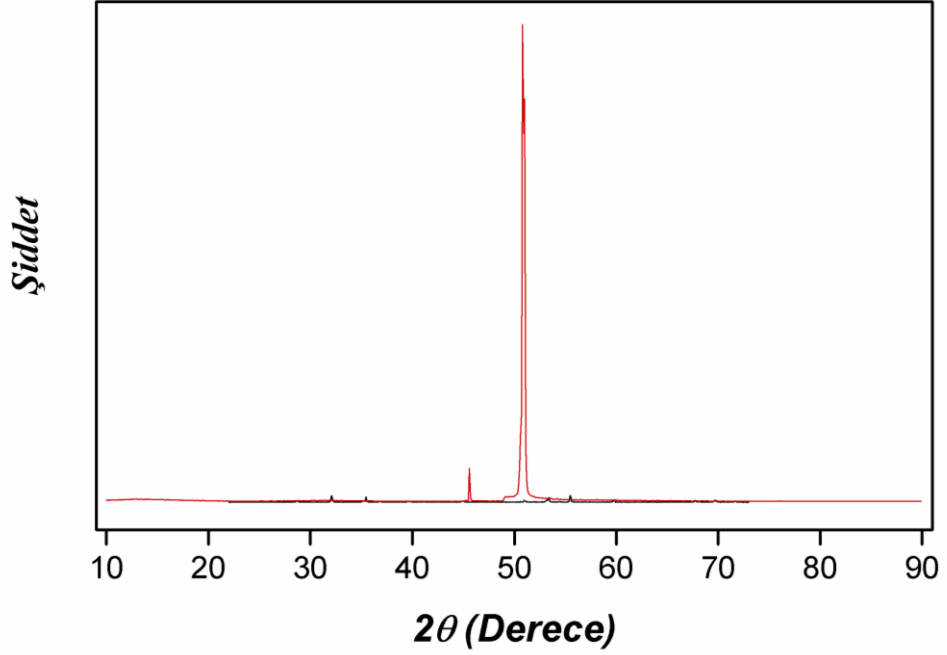
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Hedef olarak hazırlanan tabletin Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bulunan Bruker marka D2 Phaser model X-Işını Kırınım Deseni (XRD) cihazı ile kırınım desenine bakılmış ve literatüre (Hubbard 1981) bağlı olarak Darbeli Lazer Biriktirme Sistemi (PLD) ile kullanım için uygunluğu saptanmıştır (Şekil 4.1).

XRD verisinin analizi için kristalografi açık veri tabanının (Crystallography Open Database - COD) #10086289 girdisi kullanılmıştır. YIG hedef tabletinin XRD verisi alınarak Şekil 4.1’de ve GGG alttaşına ait XRD verisi Şekil 4.2’de verilmektedir.



Şekil 4.1. YIG hedef tabletin XRD grafiği



Şekil 4.2. GGG kristalinin XRD grafiği

4.1. XRD Analizleri

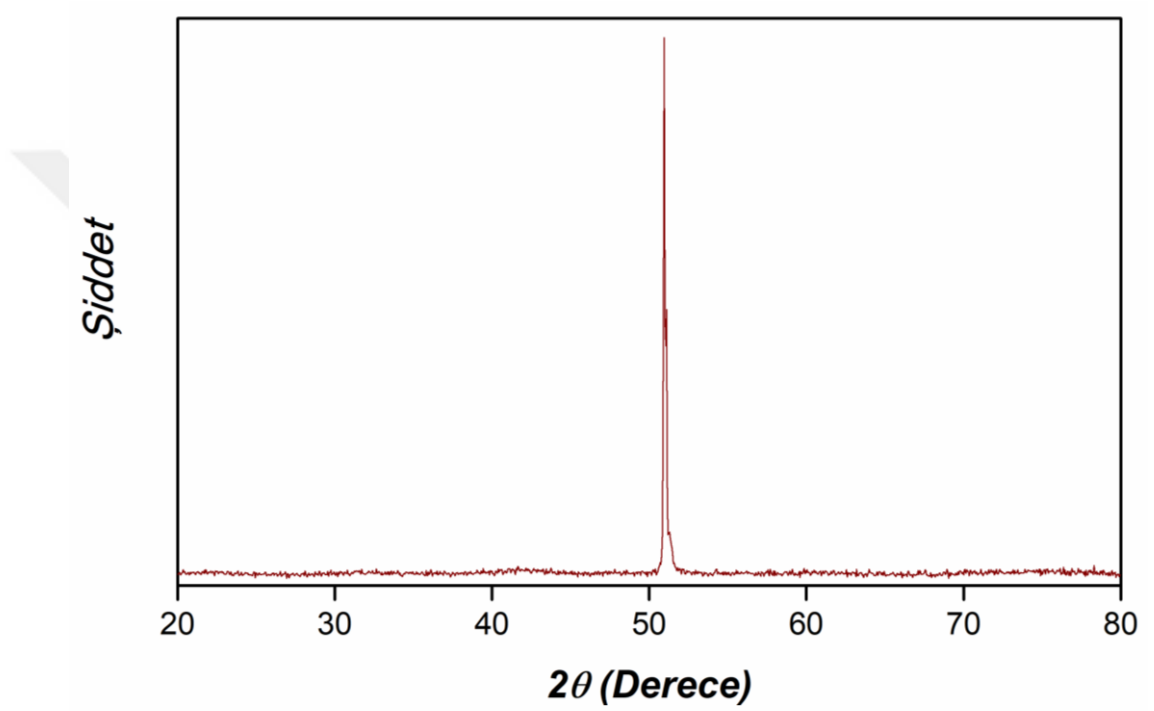
Karosel düzenek üzerindeki, 560 °C’de, kaplama basıncı 100 mTorr (Şekil 4.3), 150 mTorr (Şekil 4.4), 200 mTorr (Şekil 4.5) ve 250 mTorr (Şekil 4.6)’a arttırılarak büyütme yapılmıştır.

Karosel düzenek üzerindeki, 640 °C’de, kaplama basıncı 100 mTorr (Şekil 4.7), 150 mTorr (Şekil 4.8), 200 mTorr (Şekil 4.9) ve 250 mTorr (Şekil 4.10)’a arttırılarak büyütme yapılmıştır.

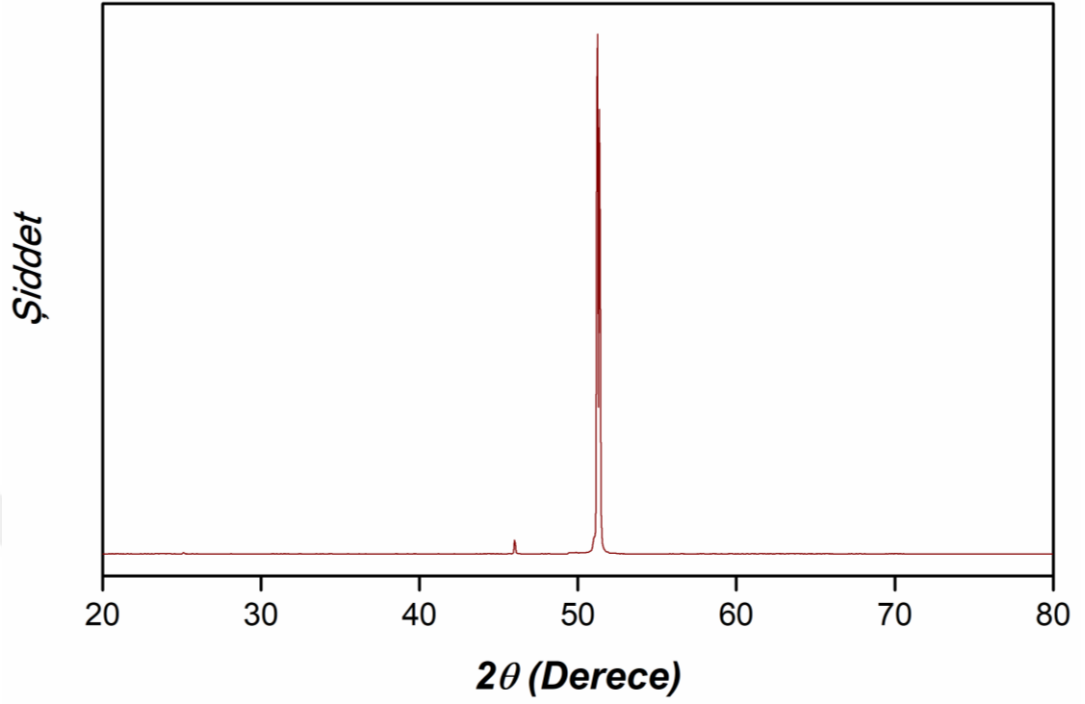
Karosel düzenek üzerindeki, 720 °C’de, kaplama basıncı 100 mTorr (Şekil 4.11), 150 mTorr (Şekil 4.12), 200 mTorr (Şekil 4.13) ve 250 mTorr (Şekil 4.14)’a arttırılarak büyütme yapılmıştır.

Karosel düzenek üzerindeki, 800 °C’de, kaplama basıncı 100 mTorr (Şekil 4.15), 150 mTorr (Şekil 4.16), 200 mTorr (Şekil 4.17) ve 250 mTorr (Şekil 4.18)’a arttırılarak büyütme yapılmıştır.

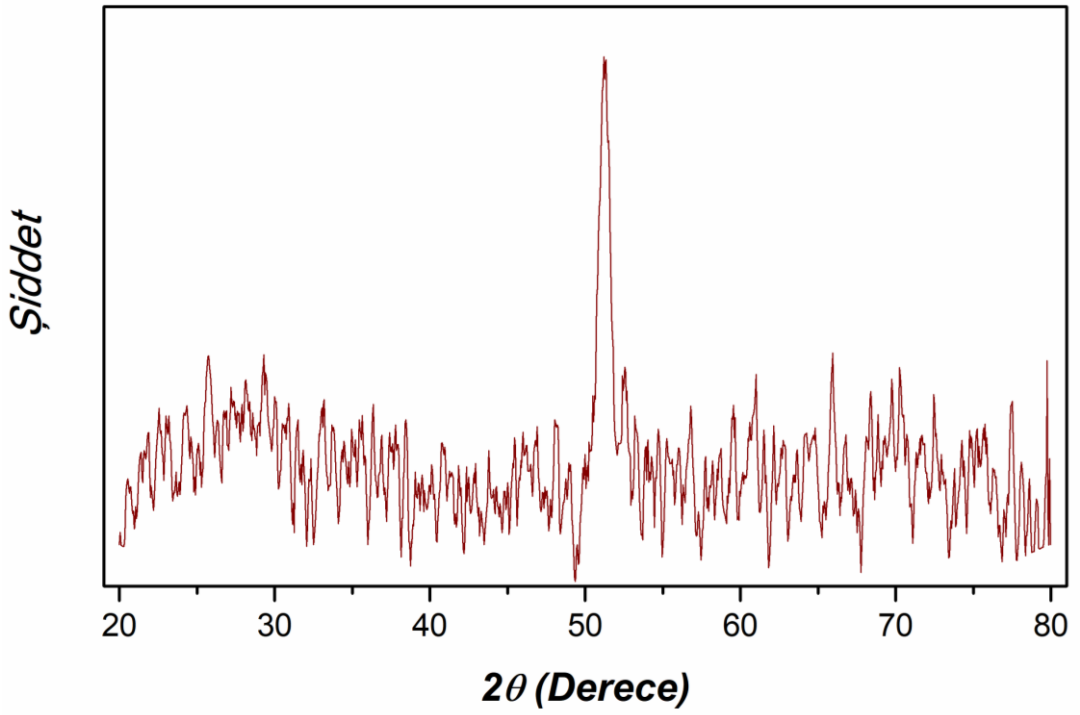
Yapılan büyütme sonucunda aşağıdaki görsellere ulaşılmıştır;



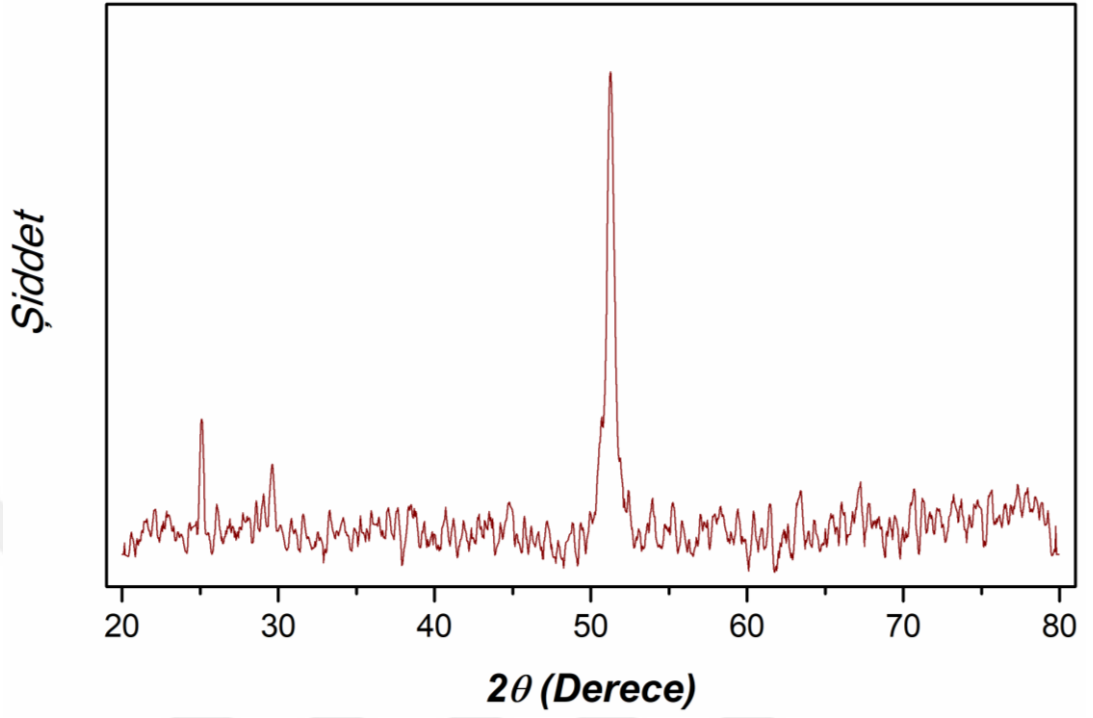
Şekil 4.3. Kaplama sıcaklığı 560 °C, kaplama basıncı 100 mTorr için XRD grafiği



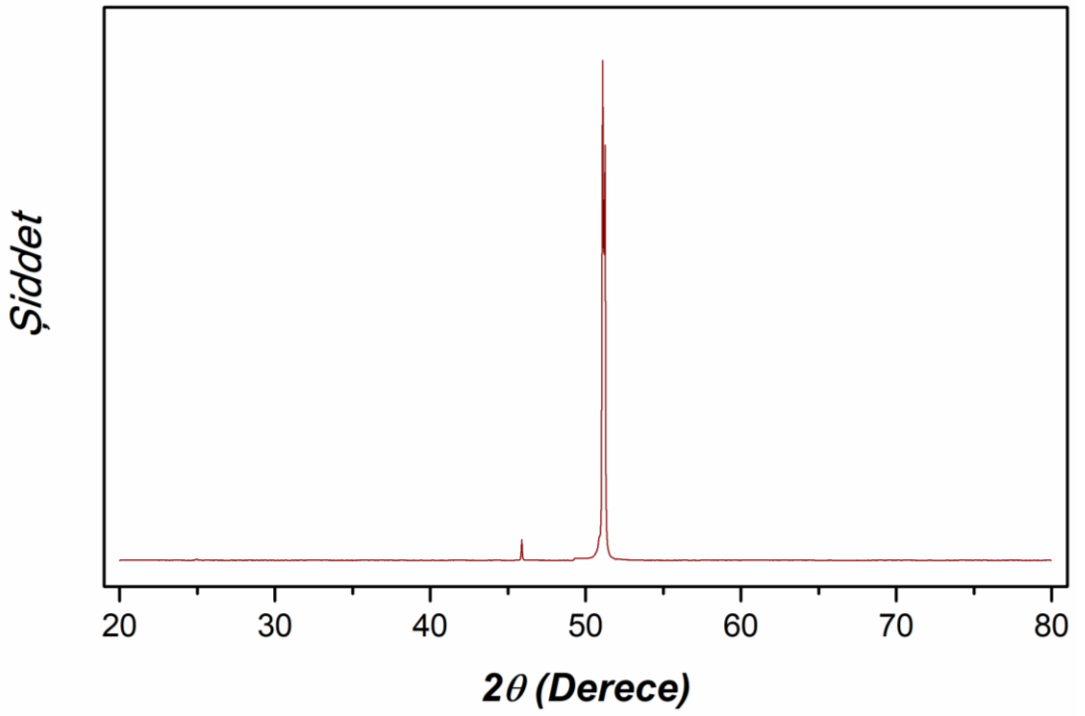
Şekil 4.4. Kaplama sıcaklığı 560 °C, kaplama basıncı 150 mTorr için XRD grafiği



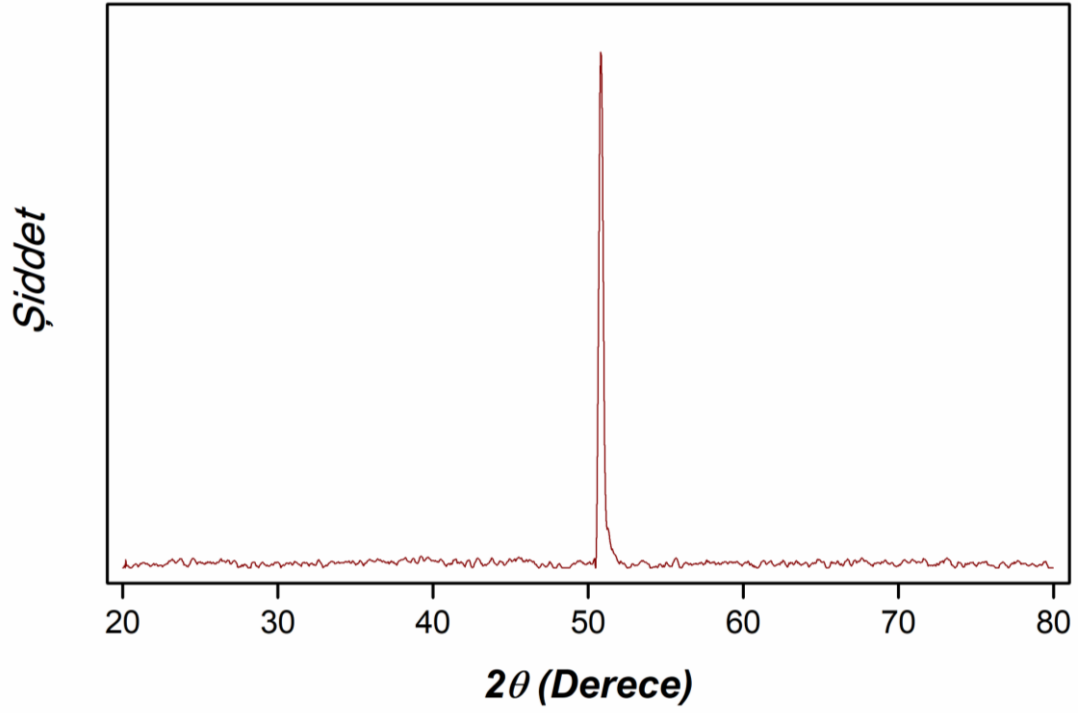
Şekil 4.5. Kaplama sıcaklığı 560 °C, kaplama basıncı 200 mTorr için XRD grafiği



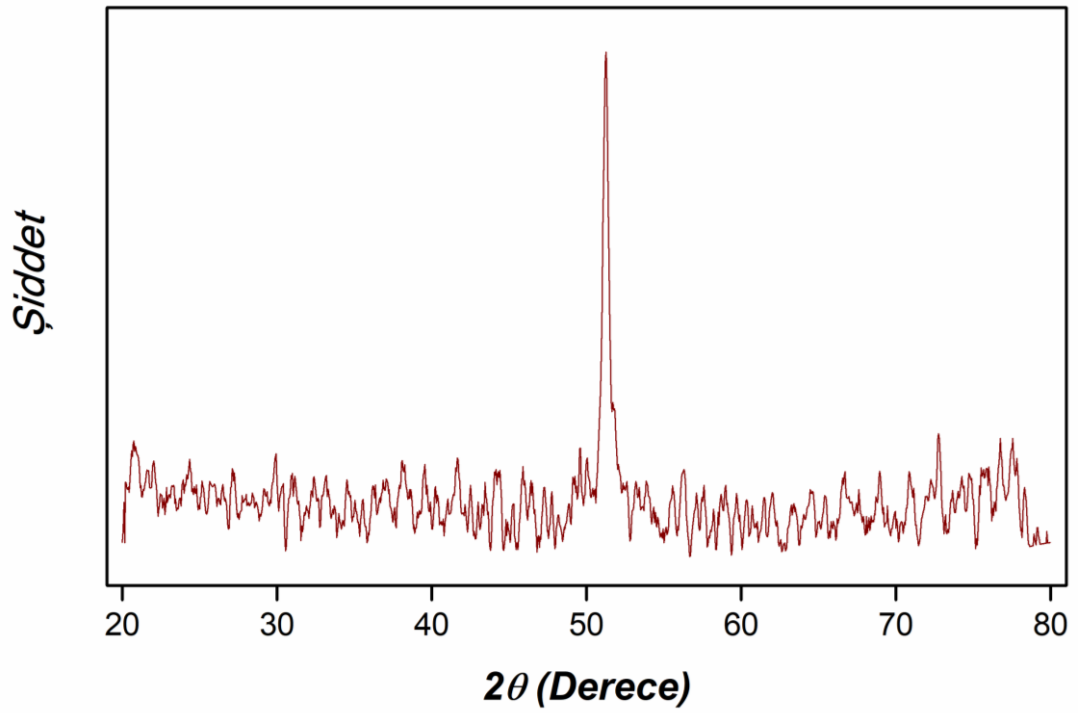
Şekil 4.6. Kaplama sıcaklığı 560 °C, kaplama basıncı 250 mTorr için XRD grafiği



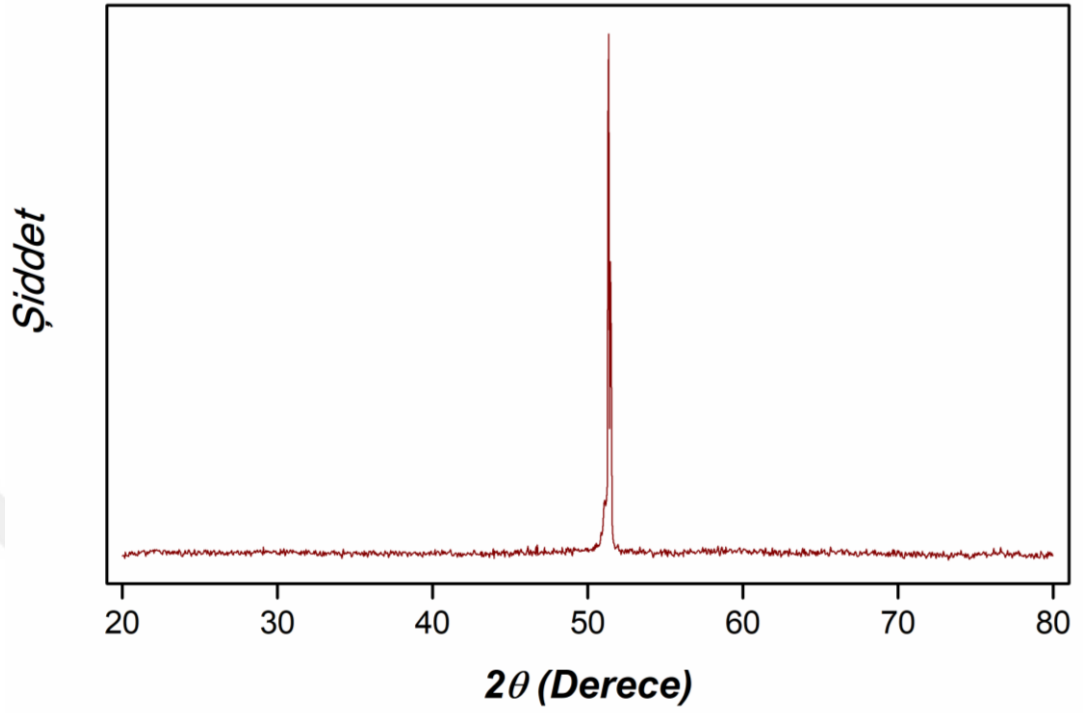
Şekil 4.7. Kaplama sıcaklığı 640 °C, kaplama basıncı 100 mTorr için XRD grafiği



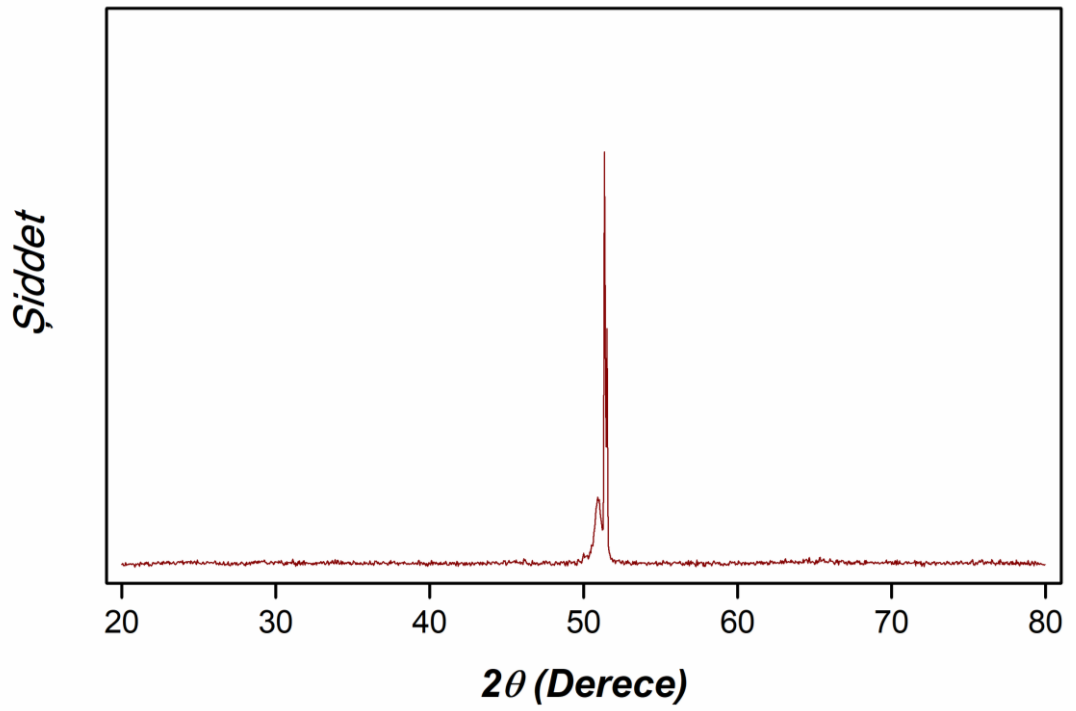
Şekil 4.8. Kaplama sıcaklığı 640 °C, kaplama basıncı 150 mTorr için XRD grafiği



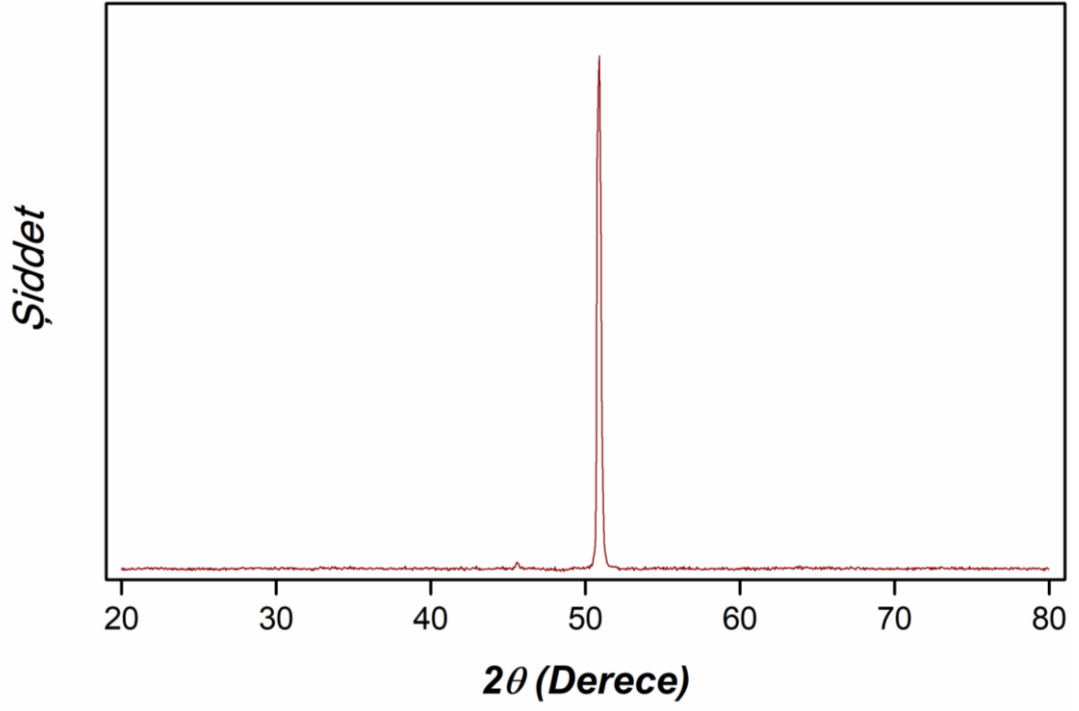
Şekil 4.9. Kaplama sıcaklığı 640 °C, kaplama basıncı 200 mTorr için XRD grafiği



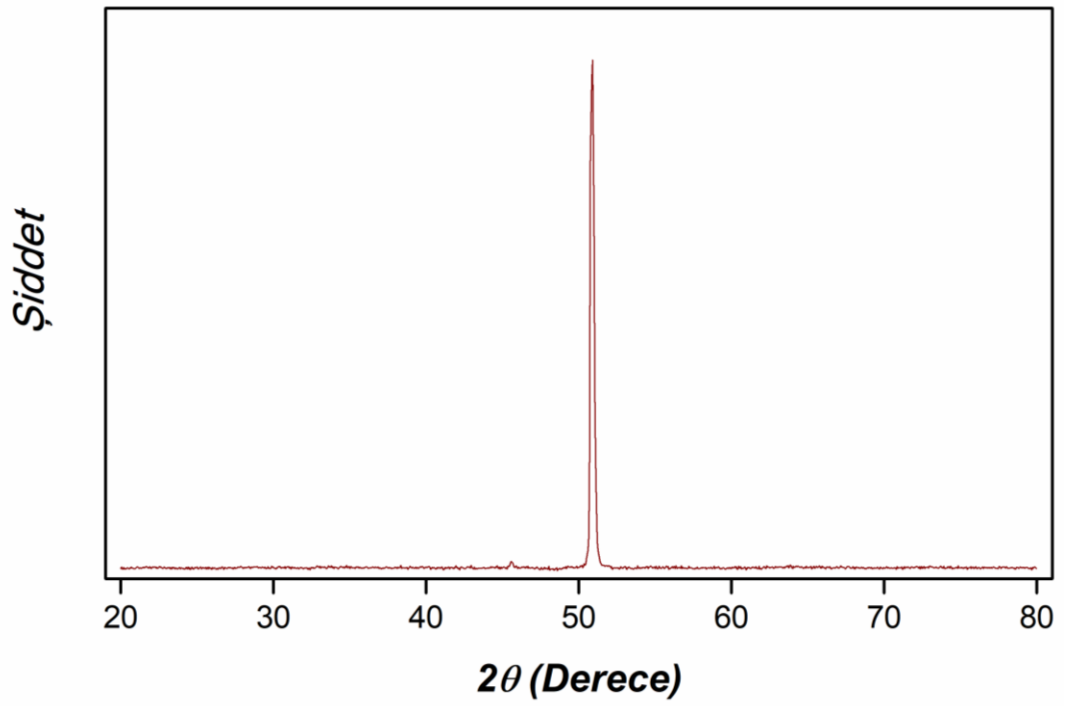
Şekil 4.10. Kaplama sıcaklığı 640 °C, kaplama basıncı 250 mTorr için XRD grafiği



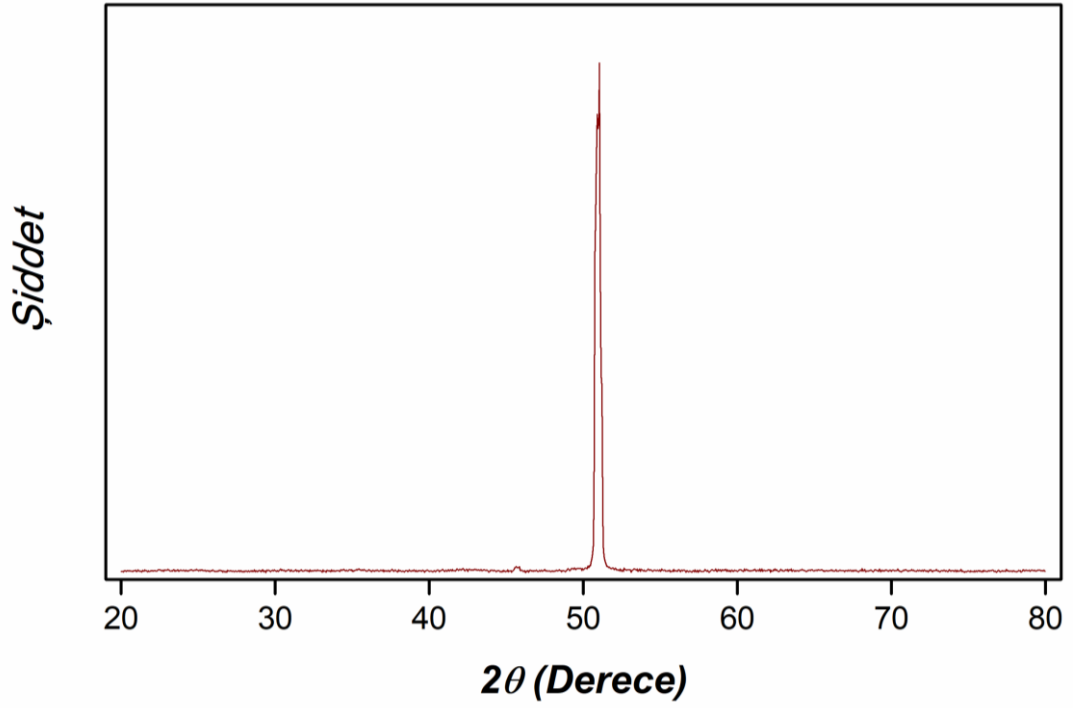
Şekil 4.11. Kaplama sıcaklığı 720 °C, kaplama basıncı 100 mTorr için XRD grafiği



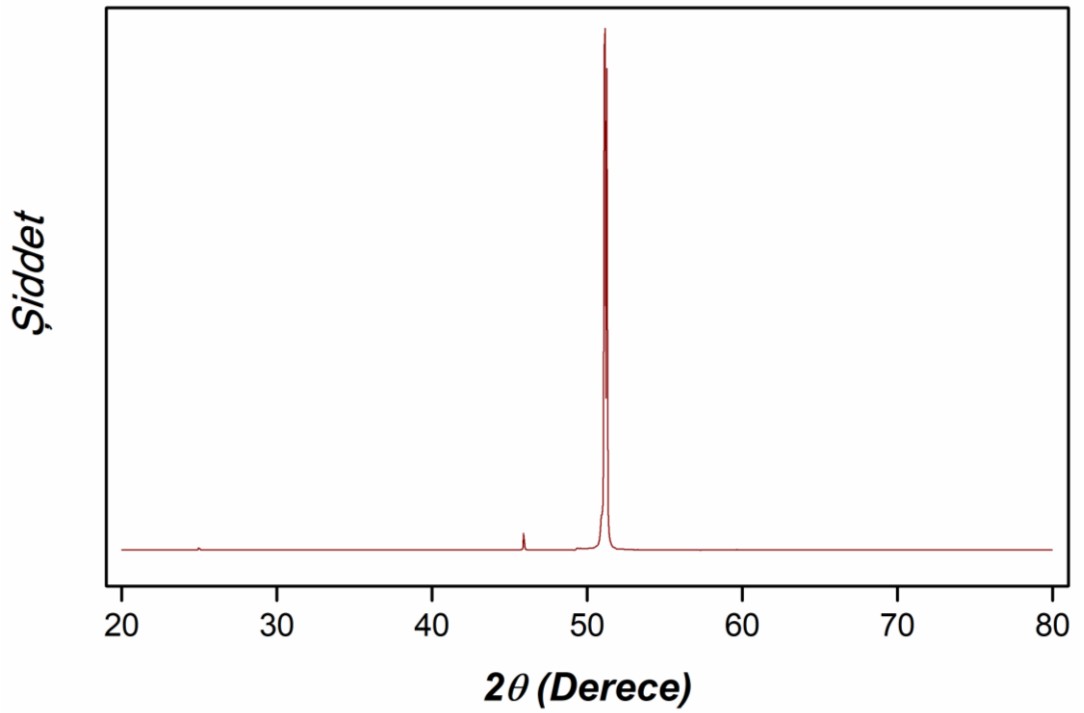
Şekil 4.12. Kaplama sıcaklığı 720 °C, kaplama basıncı 150 mTorr için XRD grafiği



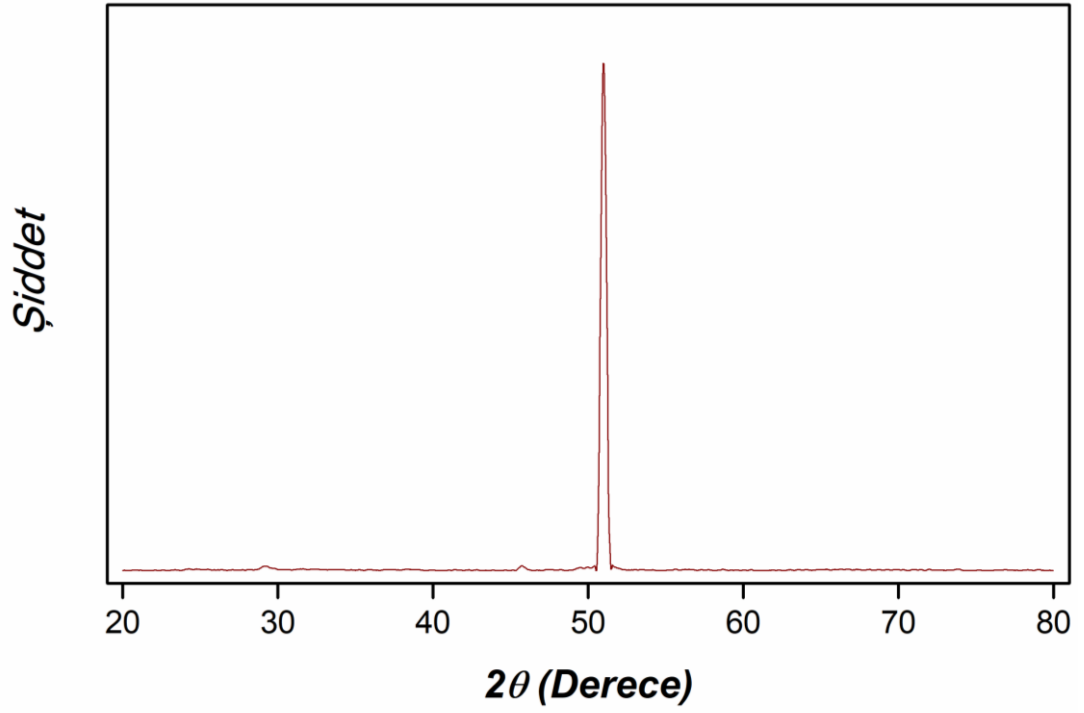
Şekil 4.13. Kaplama sıcaklığı 720 °C, kaplama basıncı 200 mTorr için XRD grafiği



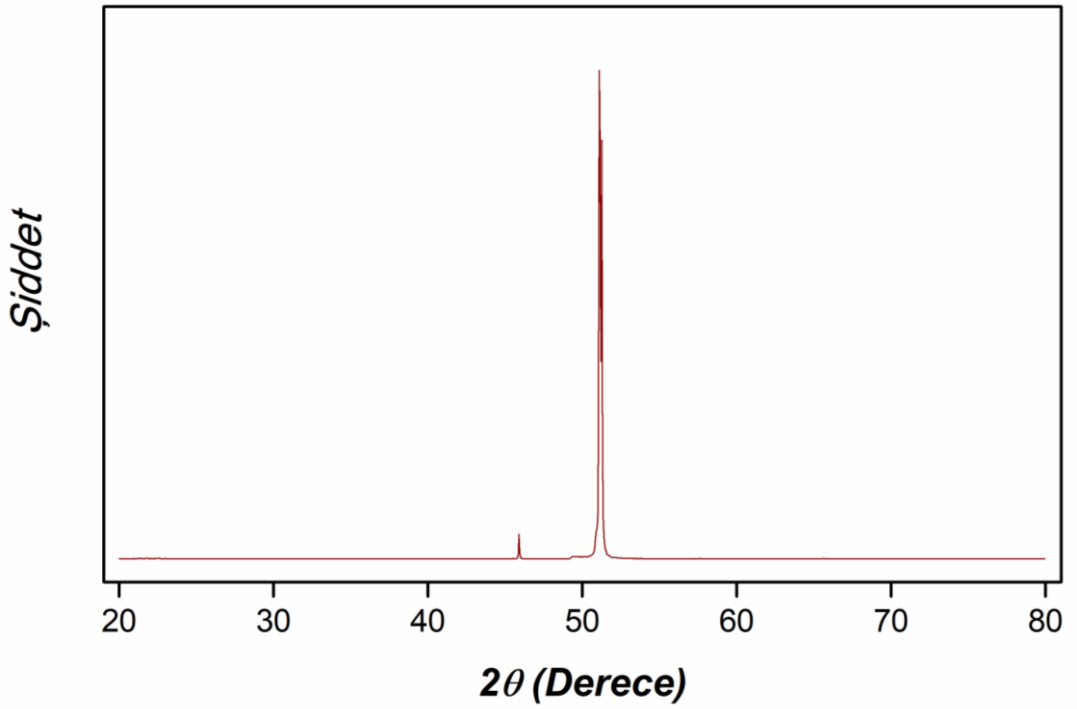
Şekil 4.14. Kaplama sıcaklığı 720 °C, kaplama basıncı 250 mTorr için XRD grafiği



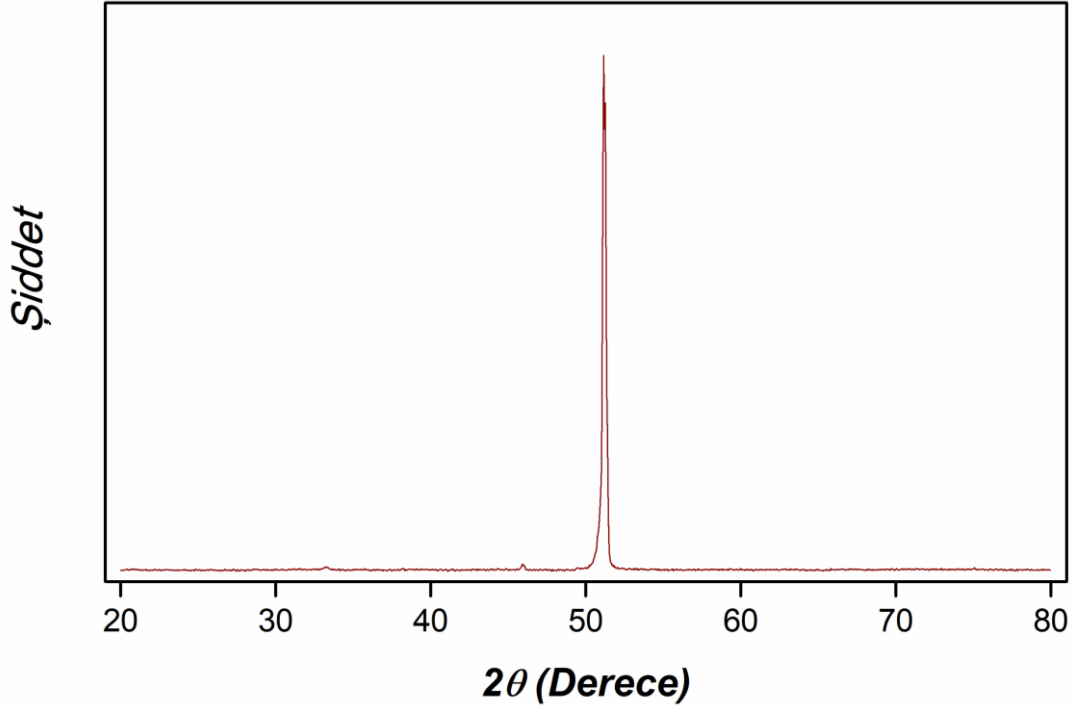
Şekil 4.15. Kaplama sıcaklığı 800 °C, kaplama basıncı 100 mTorr için XRD grafiği



Şekil 4.16. Kaplama sıcaklığı 800 °C, kaplama basıncı 150 mTorr için XRD grafiği



Şekil 4.17. Kaplama sıcaklığı 800 °C, kaplama basıncı 200 mTorr için XRD grafiği

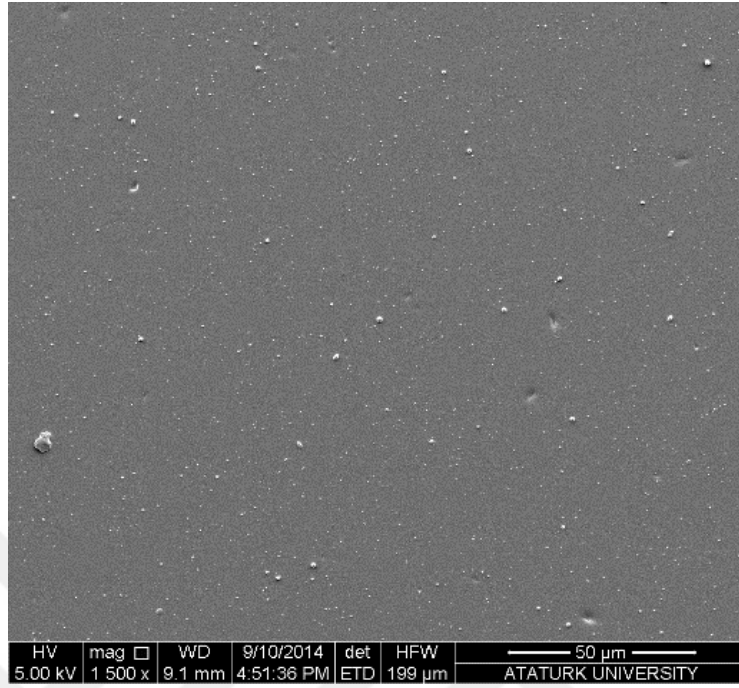


Şekil 4.18. Kaplama sıcaklığı 800 °C, kaplama basıncı 250 mTorr için XRD grafiği

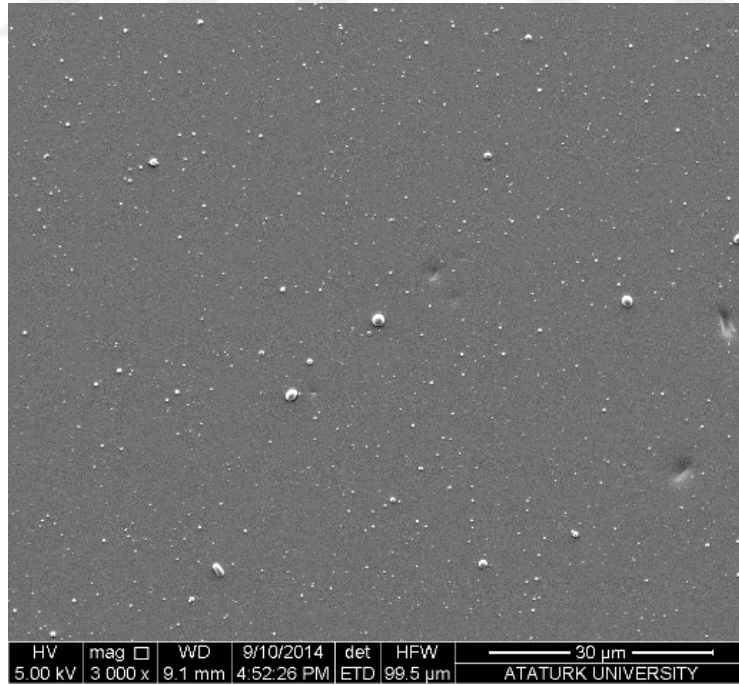
Yüksek sıcaklıkta gürültü çok daha az ve pikler daha keskindir. GGG ve YIG tamamen aynı kristal yapıda olduklarından XRD analizleri ile kesin bir yoruma varmak mümkün değildir. GGG alttaş <444> yönelimine sahip olduğundan büyütülen YIG’da aynı doğrultuda büyümektedir. Bu nedenle SEM ve EDX analizleri yapılarak kaplama gözlenmeye çalışılmıştır.

4.2. EDX ve SEM Analizleri

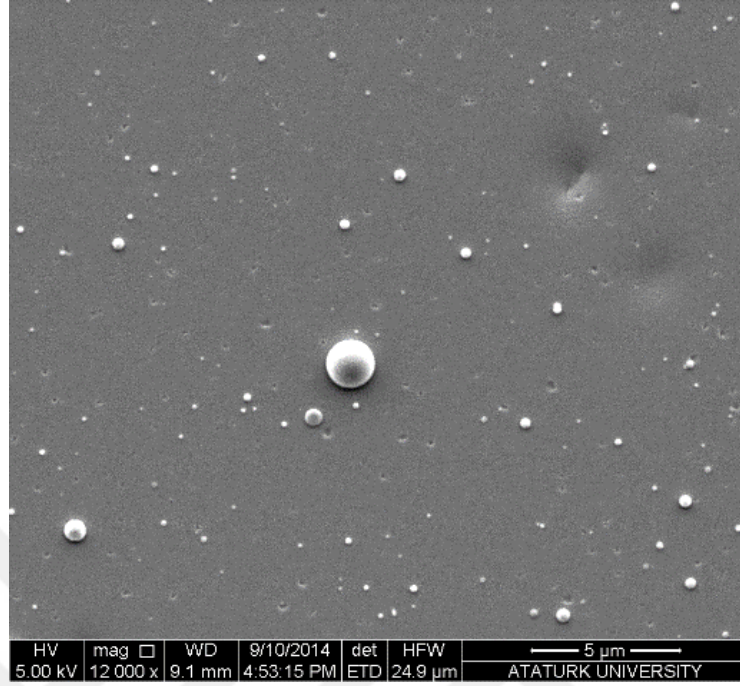
XRD ile bir sonuca varılamadığı için SEM analizi yapılarak kaplama kalınlığı ve yüzey morfolojisi belirlenmeye çalışılmıştır. 10000 atış ile yapılan kaplama kalınlığının gözlenmesinde sorun çıkmaması amacıyla 800 °C ve 100 mTorr basınçta büyütülen numunenin atış sayısı 50000’e çıkartılarak SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Şekil 4.19-24’de numune yüzeyinden farklı büyütme oranlarıyla alınan SEM görüntüleri verilmektedir.



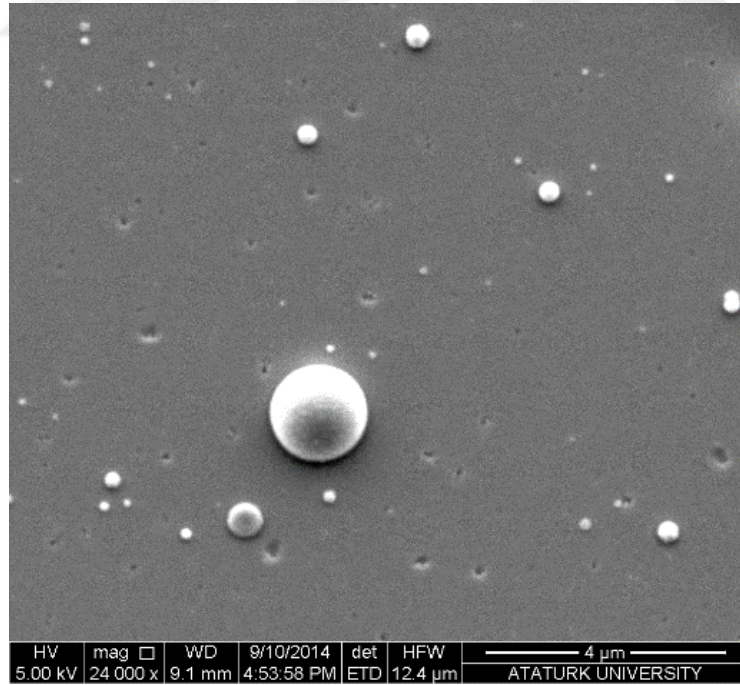
Şekil 4.19. GGG/YIG ince filmin 1500x büyütmeli yüzey SEM görüntüsü



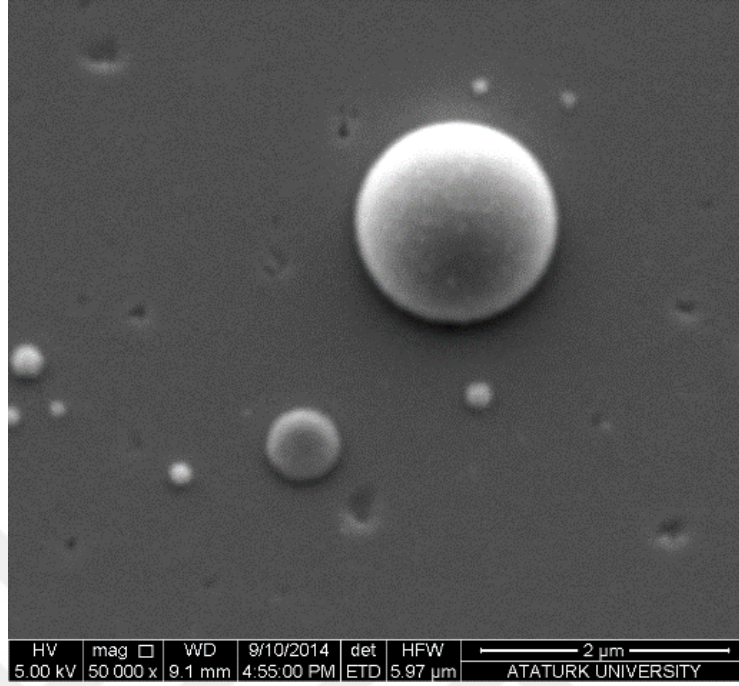
Şekil 4.20. GGG/YIG ince filmin 3000x büyütmeli yüzey SEM görüntüsü



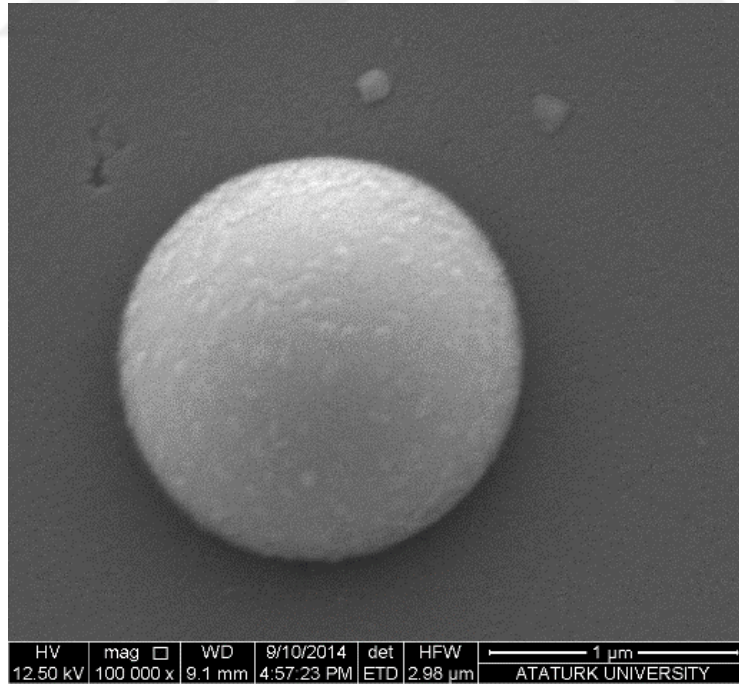
Şekil 4.21. GGG/YIG ince filmin 12000x büyütmeli yüzey SEM görüntüsü



Şekil 4.22. GGG/YIG ince filmin 24000x büyütmeli yüzey SEM görüntüsü



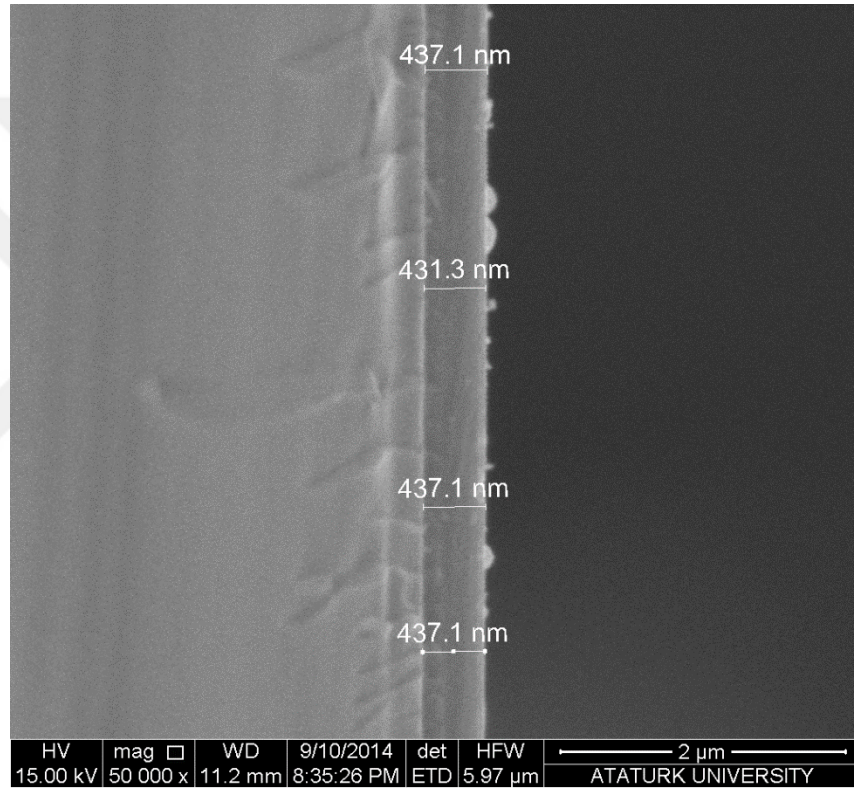
Şekil 4.23. GGG/YIG ince filmin 50000x büyütmeli yüzey SEM görüntüsü



Şekil 4.24. GGG/YIG ince filmin 100000x büyütmeli yüzey SEM görüntüsü

Yüzey görüntüleri incelendiğinde yüzeyde herhangi bir çatlak bulunmamaktadır. Yüzeyde az sayıda yaklaşık 1,5 μm çapında damlacıklar tespit edilmiştir. Bu büyük damlacık dışında görülen damlacıklar ortalama olarak 300 nm çapına sahiptirler.

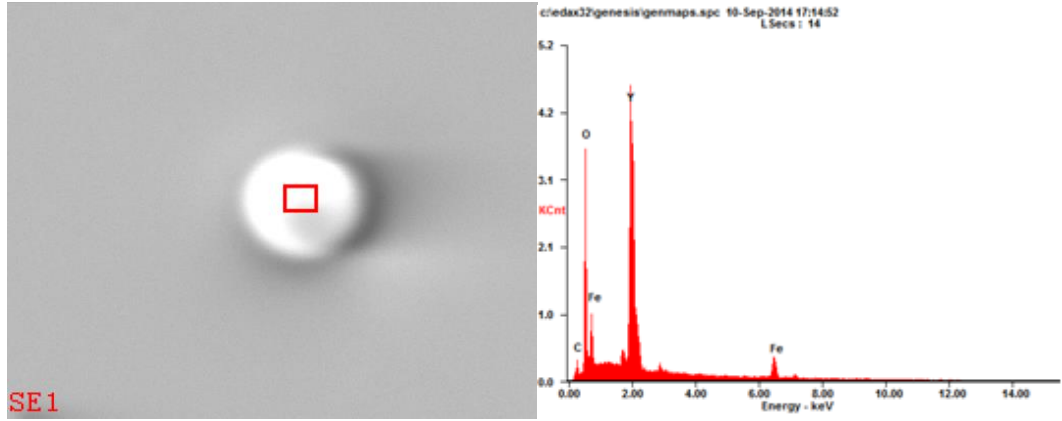
Kaplama kalınlığının belirlenmesi amacıyla numune kesitinin SEM görüntüsü alınarak Şekil 4.25’de verilmiştir.



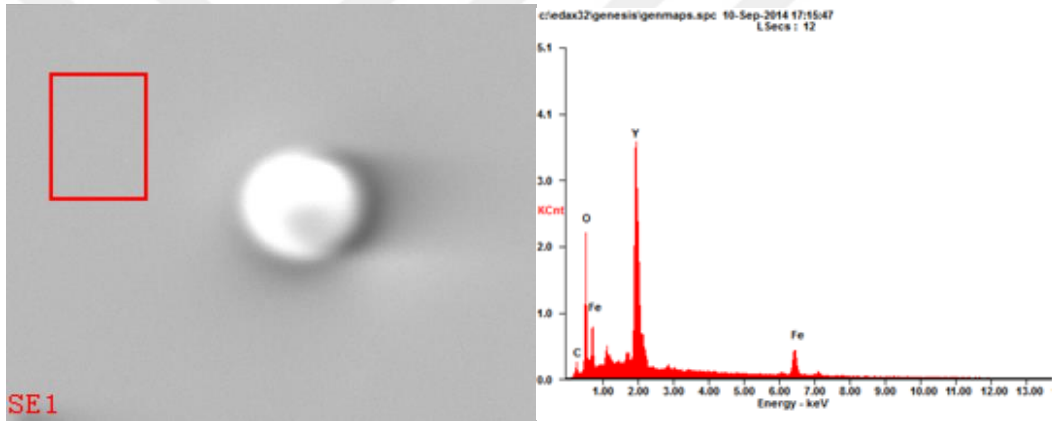
Şekil 4.25. GGG/YIG ince filmin 50000x büyütme kesit SEM görüntüsü

Şekil 4.25’de YIG kaplaması açıkça görülebilmektedir. Kaplama kalınlığı 50000 atış için ortalama olarak 435 nm tespit edilmiştir. Atış sayısı değiştirilerek istenilen kalınlıkta YIG kaplaması elde etmek mümkün olmaktadır.

EDX analizi kullanılarak kaplamada bulunan YIG tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.26-27’de numune yüzeyinden alınan EDX analizi sonuçları verilmektedir.



Şekil 4.26. YIG/GGG ince film üzerindeki damlacığın EDX analizi



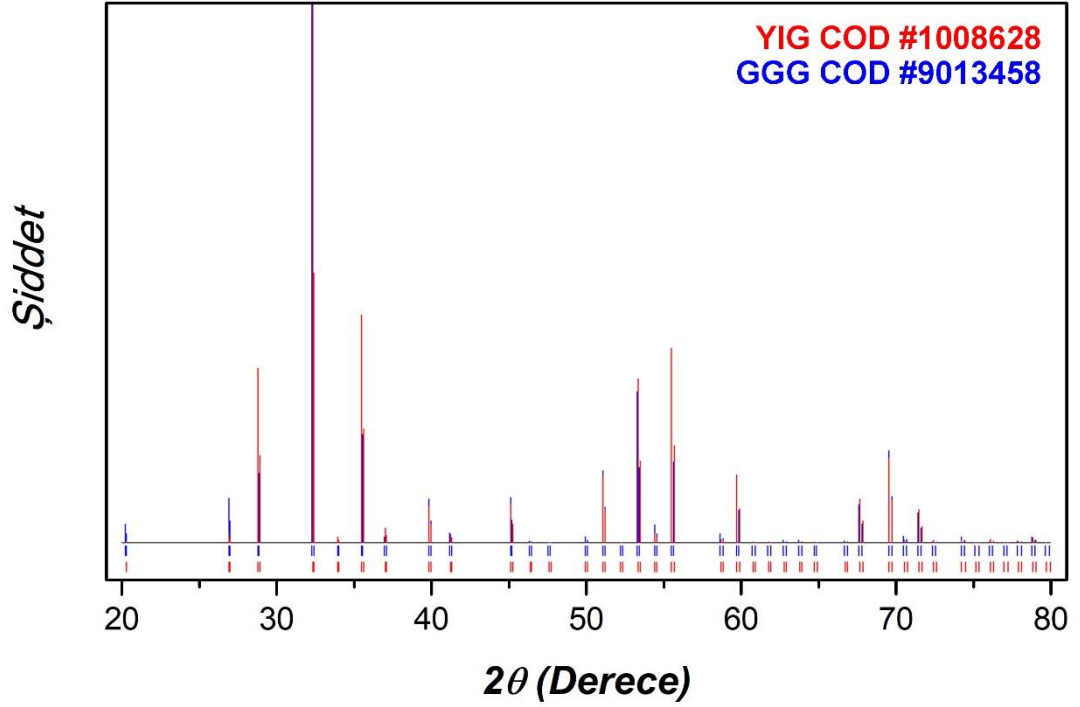
Şekil 4.27. YIG/GGG ince film yüzeyinin EDX analizi

EDX analizi sonucu kaplamadan gelen Y ve Fe elementleri açıkça görülmektedir. Bu veri kaplamanın başarıyla yapıldığını teyit etmektedir.

5. SONUÇ

Fiziksel buhar biriktirme tekniklerinden biri olan PLD, yüksek kalitede ince filmlerin büyütülmesi amacıyla tercih edilen bir yöntemdir. Filmlerin yüksek kaliteye sahip olması büyütme ortamının yüksek vakumda yabancı atomlardan temizlenmesi ve büyütme gazı dışında ortama yabancı madde girişi bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Doğru şartlar yakalandığında istenilen çoğu malzeme PLD ile büyütülebilmektedir.

PLD sistemindeki ısı kaybı nedeniyle ısıtıcıya ayarlanan sıcaklık ile alttaş üzerinde elde edilen sıcaklık arasında %20'luk bir kayıp bulunmaktadır. Bu nedenle verilen sıcaklıklar alttaş üzerinde elde edilen sıcaklıklar olup, ısıtıcının ani ve yüksek akım değerleri ile zarar görmemesi için alttaşı ısıtma hızı 650 °C'ye kadar 20 °C/dakika, 800 °C'ye kadar ise 10 °C/dakika seçilmiştir. Alttaş sıcaklığı olarak 560 °C, 640 °C, 720 °C ve 800 °C değerlerine çıkartılarak bu değerlerde büyütme yapılmıştır. PLD yönteminde plazma bulutunun alttaşa ve filme zarar vermemesi için tepe noktasının alttaşa temas etmemesi, aynı zamanda bulut içerisindeki partiküllerin alttaşa ulaşabilecek enerjiye sahip olması gerekmektedir. Belirlenen büyütme şartlarında plazma bulutunun fiziksel yapısı gözlenerek büyütme basıncı olarak 100 mTorr, 150 mTorr, 200 mTorr ve 250 mTorr değerleri seçilmiştir. Alttaş olarak kullanılan GGG kristali ile üzerine büyütme yapılan YIG kristalleri aynı kristal yapıda olduklarından XRD analizi sonucunda aynı pikleri vermektedirler. Bu durumun daha açık gösterilmesi için YIG'a ait COD #1008628 ve GGG'ye ait COD #9013458 XRD girdileri Şekil 5.1'de verilmektedir.



Şekil 5.1. COD #1008628 ve #9013458 girdileri

Alınan XRD analizleri sonucunda, YIG ve GGG aynı kristal yapıya sahip oldukları için pik değerleri aynı açıda ve şiddette gelmektedir. Bundan dolayı XRD analizi ile kaplamanın varlığı ispat edilememektedir. Elde edilen XRD sonuçlarında yüksek sıcaklıkta elde edilen pikler daha keskin olduğu için, 800 °C'de 100 mTorr basınç altında hazırlanan numunenin daha iyi olduğu söylenebilmektedir.

Kaplamanın SEM ile daha rahat görüntülenmesi amacıyla lazer atış sayısı 50000'e çıkartılarak 800 °C ve 100 mTorr basınçta yeni bir numune hazırlanmıştır. Bu numunenin SEM kesit alanı görüntüsü 50000 atışta kaplamanın yaklaşık olarak 435 nm kalınlığa sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Yüzeyde PLD yönteminden kaynaklanan damlacıklar bulunmakta olup film yüzeyi genel olarak pürüzsüzdür. YIG kaplamanın itriyum, demir ve oksijen içeriği ise EDX ile başarıyla tespit edilmiştir.

Titreşim dolayısıyla adacıkların yüzeye dağılarak ince film yüzeyi oluşturması daha kolay olacağından yüksek sıcaklıkta kaplama daha iyi olmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışmada; TÜBİTAK MFAG 112T820 “Magnonik Kristaller” projesinin ilk aşaması olan PLD tekniğiyle GGG altlık üzerine YIG ince filmlerin büyütülmesi başarıyla tamamlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Akdemir, H. K., 2014. X-Işınımları Toz Kırınım ile Azitromis'in Kristal Yapısının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Anderson, E., 2006. E. U. Çev. S. Karadi içinde, Katıhal Fiziğine Giriş. Leitenmeier, S., A. Heinrich, J. K. N. Lindner, and B. Stritzker.
- Aydoğan, S., 2011. Katıhal Fiziği. Nobel Yayın Dağıtım. Erzurum. Sayfa 339,340,341.
- Bhoi B., Venkataramani N., Aiyar R.P.R.C., Shiva Prasad, Mikhail Kostylev and Stamps. R.L., 2013. Frequency Dependent FMR Studies on Pulsed Laser Ablated YIG Films deposited on (111) GGG Substrate. Solid State Physics.
- Buhay, H., Adam, J. D., Daniel, M. R., Doyle, N. J., Driver, M. C., Eldridge, G. W., Hanes, M. H., Messham, R. L. and Sopira, M. M., 1995. "Thick Yttrium-Iron-Garnet (YIG) Films Produced by Pulsed Laser
- Callister, William D., Rethwisch D., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Chrisey, D.B. and Hubler, G.K., 1994. Pulsed Laser Deposition of Thin Films. Wiley-Interscience, 613 p, USA.
- Coey, J., 2010. Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge University Press, sayfa 8, 9,11,12,24
- Çöktüren, E., 2008. Ferromanyetik Filmlerde Oluşan Yüzey Manyetik Anizotropisinin Numerik Çözümlemesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Dildar, Y., 2013. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzu Temelli Küçük Optik Filtrelerin Tasarlanması ve Sayısal Çözümlemesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dorsey, P. C., Bushnell, S. E., Seed, R. G. and Vittoria, C., 1993. "Epitaxial Yttrium Iron Garnet Films Grown by Pulsed Laser Deposition", Journal of Applied Physics, 74 (2), 1242-1246.
- Gencoglu, O., 2013. KBT Bilim Sitesi, <http://www.kuark.org/2013/05/kristal-yapilar>, (01.01.2019).
- Ibrahim, N. B., Edwards, C. and Palmer, S. B., 2000. "Pulsed laser ablation deposition of yttrium iron garnet and cerium-substituted YIG films", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 220 (2-3), 183-194.
- Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Meade, R. D. and Winn, J. N. 2008. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press, 283 p., Princeton.
- Kaya, A. O., 2016. Magnonik Kristallerin Manyetik Alan Sensörü Olarak Kullanımı. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Kreisel, A., 2011. Spin-Wave Calculations For Heisenberg Magnets With Reduced Symmetry. Doktora Tezi, Fizik Bölümü, Frankfurt.
- Leitenmeier, S. K., 2008. Studies on the Growth of Epitaxial Bismuth-Substituted Iron Garnet on. Journal of Materials Processing Technology, 5392p.
- Lu, W.-Q., 2005. Combinatorial pulsed laser deposition and characterization of spintronic oxide films. PhD Thesis, Department of Innovative and Engineered Materials, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 104 pp

- Manuilov, S., 2011. Ferromagnetic Resonance in Films with Growth Induced Anisotropy. PhD Thesis, Department of Integrated Devices and Circuits, School of Information and Communication Technology, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 134 pp.
- Okada, T. and Maeda, M., 1997. Laser spectroscopic studies of pulsed-laser deposition process for high-Tc thin films. *Materials Science and Engineering B*, 47 (1), 64-69.
- Öztürk, Y., 2010. Garnet Esaslı Nano Filmlerin Üretilmesi ve Manyeto-optik Özelliklerin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Serga, A. A., 2009. Scattering of Surface and Volume Spin Waves in a Magnonic Crystal. Researchgate, https://www.researchgate.net/figure/Color-online-Sketch-of-magnonic-crystal-structure-used-in-the-experiments_fig1_257873930 (01.01.2019).
- Sun, Y. Y., Song, Y. Y. and Wu, M. Z., 2012a. "Growth and ferromagnetic resonance of yttrium iron garnet thin films on metals", *Applied Physics Letters*, 101 (8), 3.
- Sun, Y. Y., Song, Y. Y., Chang, H. C., Kabatek, M., Jantz, M., Schneider, W., Wu, M. Z., Schultheiss, H. and Hoffmann, A., 2012b. "Growth and ferromagnetic resonance properties of nanometer-thick yttrium iron garnet films", *Applied Physics Letters*, 101 (15), 5.
- Tacer, E. P., 2004. Elektromekanik Enerji Dönüşümü ders notları, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Unan, U., 2014. Yerli Hammaddelerden Üretilen M Tipi Stronsiyum Hezaferrit $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ Miknatısın Özelliklerine Empürite Elementlerin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünal, M. S., 2011. Doğal Kaynaklardan Ve Atık Malzemelerden Stronsiyum Ferrit Miknatıs Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vural, L., 2010. Sert Ferrit ve NdFeB Miknatısların Karakterizasyonu ve Tersinir Olmayan Kayıpların Yapı Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yarıçı, İ., 2015. Garnet Esaslı Manyetik Sıvı Üretilmesi, Manyeto-Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yurtcan, M. T., 2011. YBCO İnce Filmlerin Darbeli Lazer Yığıma. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

ÖZGEÇMİŞ

Eylül 1990 Yılında Erzurum’da doğdu. İlköğretim ve lise hayatını takiben 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fatih Eğitim Fakültesi, Fizik Öğretmenliği Bölümünde öğrenimine başladı. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi, Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi, Fizik Öğretmenliği Bölümüne geçiş yaparak 2013 yılında lisan eğitimini burada tamamladı. 2015 Yılında Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanobilim ve Nanomühendislik Bölümünde, yüksek lisans eğitimine başladı. Bu süre zarfında NanoTR-9 ve IPCAP2016 gibi çeşitli konferanslarda gönüllü olarak görev aldı. 2017 yılından bu yana bankacılık sektöründe çalışmaktadır.