**T.C.**
**HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**FİZİK ANABİLİM DALI**

# DARBELİ LAZER BİRİKTİRME (PLD) SİSTEMİ İLE ÜRETİLEN İTRİYUM DEMİR GARNET İNCE FİLMLERİN MANYETİK TEPKİSİ ÜZERİNDEKİ GERİLME ETKİLERİ

**Sevgi ÖZOĞLU**

**Tez Danışmanları:**
**Dr. Öğr. Üyesi Hasan AĞIL**
**Prof. Dr. Emerson COY**

**HAKKARİ**
**2021**

**T.C.**
**HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE**
**HAKKARİ**

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı öğrencisi Sevgi ÖZOĞLU tarafından hazırlanan **"Darbeli Lazer Biriktirme (PLD) Sistemi ile Üretilen İtriyum Demir Garnet İnce Filmlerin Manyetik Tepkisi Üzerindeki Gerilme Etkileri"** başlıklı tez, 26.04.2021 tarihinde yapılan savunma sonucunda aşağıda isimleri bulunan jüri üyelerince kabul edilmiştir.

| | Ünvanı, Adı Soyadı | Kurumu | İmzası |
|---|---|---|---|
| Başkan: | Doç. Dr. Hakan GÜNDOĞMUŞ | Hakkari Üniversitesi | |
| Üye: | Doç. Dr. Serap SAFRAN | Ankara Üniversitesi | |
| Üye: | Dr. Öğr. Üyesi Hasan AĞIL | Hakkari Üniversitesi | |

Jüri üyeleri tarafından kabul edilen bu Yüksek Lisans tezi, Enstitü Yönetim Kurulunun ……Sayılı kararıyla .....tarihinde onaylanmıştır.

Doç. Dr. Can YILMAZ

Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezde sunulan tüm bilgi ve sonuçların, bilimsel yöntemlerle yürütülen gerçek deney ve gözlemler çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce, sonuç ve bilgilere bilimsel etik kuralların gereği olarak eksiksiz şekilde uygun atıf yaptığımı ve kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

26/04/2021

Sevgi Özoğlu

# ÖZET

## DARBELİ LAZER BİRİKTİRME (PLD) SİSTEMİ İLE ÜRETİLEN İTRİYUM DEMİR GARNET İNCE FİLMLERİN MANYETİK TEPKİSİ ÜZERİNDEKİ GERİLME ETKİLERİ

Sevgi ÖZOĞLU
Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hasan AĞIL
İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Emerson COY
2021, 50

Spin dalgalarının yayılması için bir araç işlevi gören umut verici çalışmalardan biri YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$, İtriyum Demir Garnet) malzemesinin keşfidir. Bu malzeme ile bilgi taşınırken, ısı sorunu neredeyse ortadan kalkmaktadır. Bugün, YIG'in mevcut en düşük mıknatıslanma sönümlemesine sahip olduğu bilinmektedir. Bu eşsiz özellik spin dalgalarının büyük mesafelerde yayılmasını sağlar.

Sunulan tez, epitaksiyel İtriyum Demir Garnet ince filmlerinin büyütülmesi ve karakterizasyonunu ele almaktadır. Numuneler, Gadolinyum Galyum Garnet (GGG-001), İtriyum Alüminyum Garnet (YAG-001), Silikon ve Gadolinyum Skandiyum Oksit ($GdScO_3$) altlıklar üzerinde Darbeli Lazer Biriktirme tekniği (PLD) kullanılarak biriktirilmiştir. Altlıkların seçimi, YIG ve altlıklar arasında düşük bir kafes uyuşmazlığı oluşturmasına göre seçilmiştir. Ardından, malzemelerin yapısal özellikleri ve yüzey morfolojileri sırasıyla X-Işını Kırınımı (XRD), X-Işını Reflektometrisi (XRR) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılarak belirlenmiştir. Statik ve dinamik manyetik özellikler Titreşimli Numune Manyetometre ve geniş bant ferromanyetik rezonans (VNA-FMR) tekniği ile araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetizasyon, İtriyum Demir Garnet, Darbeli Lazer Biriktirme (PLD), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), X-Işını Kırınımı (XRD), X-Işını Yansıması (XRR)

## ABSTRACT

## STRAIN EFFECT ON THE MAGNETIC RESPONCE OF YTTRIUM IRON GARNET (YIG) THIN FILMS DEPOSITED BY PULSED LASER DEPOSITION (PLD)

Sevgi ÖZOĞLU

Master of Science, Department of Physics

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hasan AĞIL

Co-Supervisor: Prof. Dr. Emerson COY

2021, 50

One of the promising studies that serve as a tool for propagating spin waves is undoubtedly the has discovery of YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$, Yttrium-Iron Garnet) material. When carrying information with this material, the heat problem is almost eliminated. Today, YIG is known to have the lowest magnetization damping available. This unique feature allows spin waves to propagate over great distances. In addition, YIG is an insulator that makes information and communication technology devices efficient.

The presented thesis deals with the growth and characterization of thin, epitaxial yttrium-iron garnet films. Samples were grown using the pulsed laser deposition technique (PLD) on Gadolinium Gallium Garnet (GGG-001), Yttrium Aluminum Garnet (YAG-001), Silicon and Gadolinium Skandiyum Oksit ($GdScO_3$) substrates. The selection of the substrate was chosen by requiring a low lattice mismatch between YIG and the substrates. Then, structural properties and surface morphology were determined using X-ray diffraction (XRD), X-ray reflectometry (XRR) and atomic force microscopy (AFM), respectively. Static and dynamic magnetic properties were investigated by vibrating sample magnetometer (VSM) and broadband ferromagnetic resonance (VNA-FMR) technique.



**Key Words:** Magnetization, Yttrium Iron Garnet, Thin Films, Pulsed Laser Deposition (PLD), Atomic Force Microscopy (AFM), X-Ray Diffraction (XRD).

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesi esnasında en zor şartları benim avantajıma çeviren ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Dr. Hasan AĞIL'a; akademik çalışmalarıma çok büyük katkısı olan ortak tez danışmanım Prof.Dr. Emerson COY'a, laboratuvar çalışmalarını keyifle yürüttüğümüz Adam KRYSZTOFİK'e, kariyerime büyük katkı sağlayan ve tez çalışmalarımı yürüttüğüm NanoBioMedical Center, Adam Mickiewicz Üniversitesi ve Hakkari Üniversitesi'nden çalışma arkadaşlarıma, bana her zaman inanan ve destekleyen değerli eşim Tolga ÖZOĞLU'na ve tezimi yazarken beni asla yalnız bırakmayan sevgili kedim Mars'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgi ÖZOĞLU

# İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI ..... ii
ÖZET ..... iii
ABSTRACT ..... iv
ÖNSÖZ ..... v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... ix
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... xi
1. GİRİŞ ..... 1
1.1. Spintronik (Magnonlar) ..... 2
1.2. Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) Denklemi ..... 4
1.2.1 Spin Hall Etkisi ve Ters Spin Hall Etkisi ..... 5
1.3. İnce Filmler ..... 6
1.3.1. İtriyum Demir Garnet (YIG) ..... 9
1.3.2. Gadalinyum Galyum Garnet (GGG) Altlıklar ..... 11
1.3.3. İtriyum Alüminyum Garnet (YAG) Altlıklar ..... 12
2. KAYNAK ÖZETLERİ ..... 15
3. MATERYAL YÖNTEM ..... 17
3.1 Darbeli Lazer Biriktirme (PLD) ..... 17
3.2.X-ışını Kırınımı(XRD) ..... 19
3.3. X-ışını Refrektometrisi (XRR) ..... 22
3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ..... 23
3.5.Vektör Ağ Analizörü ve Ferromanyetik Rezonans Spektroskopisi (VNA-FMRS) ..... 26
4.BULGULAR ..... 28
5.TARTIŞMA VE SONUÇ ..... 44
KAYNAKLAR ..... 46
ÖZGEÇMİŞ ..... 51

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

| | |
|---|---|
| Si | Silikon |
| α | Gilbert sönümleme sabiti |
| μ | Mikro |
| °C | Santigrad derece |
| g | Gram |
| cm | Santimetre |
| m | Metre |
| Å | Angström ($10^{-10}$metre) |
| s | Saniye |
| M | Manyetizma |
| H | Manyetik Alan |
| Nm | Nanometre |
| 4πMs | Sönümleme İndüksiyonu |
| f | Frekans |
| K | Kelvin |
| $\theta$ | Kırınım açısı |
| $\lambda$ | Dalga boyu |
| $L$ | Kristalit büyüklüğü |

### Kısaltmalar

| | |
|---|---|
| YIG | İtriyum Demir Garnet |
| YAG | İtriyum Alüminyum Garnet |
| AA | Alternatif Akım |
| GGG | Gadolinyum Galyum Garnet |
| AFM | Atomik Kuvvet Mikroskobu |
| FMR | Ferromagnetik Rezonans |
| SHE | Spin Hall Etkisi |
| FM | Ferromıknatıs |
| XRD | X Işını Kırınımı |
| XRR | X Işını Yansıması |

| | |
|---|---|
| VNS | Vektör Ağ Analizörü |
| SA | Spin Asimetrisi |
| EDK | Eşdüzlemli Dalga Kılavuzu |
| TSHE | Ters Spin Hall Etkisi |
| RMS | Ortalama Karekök |
| FWHM | Yarım Yükseklik Tepe Genişliği |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

**Şekil 1.1.** H manyetik alanında dinamik spin dalgaları (wavelength: dalga boyu, Amplitude; genlik .....3

**Şekil 1.2.** a) Spin Hall etkisi (SHE), şarj akımına ($\mathbf{j_c}$) dik olan normal bir metalde spin polarize akımın ($\mathbf{j_s}$) oluşumunu açıklar. b) Ters spin Hall etkisi, normal bir metalde spin polarize akıma ($\mathbf{j_s}$) dik olan bir şarj akımı ($\mathbf{j_c}$) oluşumunu ifade eder..... 6

**Şekil 1.3.** Farklı malzemelere kıyasla ince film boyutları .....7

**Şekil 1.4.** Üç farklı katyon kristalografik alt kafese sahip İtriyum Demir Garnet birim hücresi .....10

**Şekil 1.5.** Gadolinium galyum garnet……..12

**Şekil 1.6.** YAG fazının kristal yapısı……...13

**Şekil 3.1.** Darbeli Lazer Biriktirme yöntemi şematik gösterimi……..17

**Şekil 3.2.** Darbeli Lazer Biriktirme cihazı, İnce Film Fiziği Bölümü, Polonya Bilim Akademisi……..……...18

**Şekil 3.3.** X-ışını Kırınım ekipmanı, NanoBioMedical Center, Poznan……..19

**Şekil 3.4.** Atomik Kuvvet Mikroskobu, NanoBioMedical Center, Poznan……..23

**Şekil 3.5.** Çeşitli AFM modlarının temel çalışma prensibi. AFM şematik gösterimi (a) (b) contact mod (temas) gösterimi, and (c) tapping mod (temassız mod) gösterimi……..……....24

**Şekil 3.6.** Vektör Ağ Analizörü-Ferromanyetik Rezonans seti; Polonya Bilim Akademisi İnce Film Fiziği Departmanı, Poznan……..……...25

**Şekil 4.1.** Sıcaklık ve zamana bağlı olarak tavlama işlemi aşamaları……29

**Şekil 4.2.** Sırasıyla (1'den 8'e) tavlamadan önce üretilen ince film numuneler (a), tavlama işleminden sonra numuneler (b)…….29

**Şekil 4.3.** X-ışını kırınımı ölçümleri için numunelerin yerleştirilmesi……...32

**Şekil 4.4.** 5585-60 nm örneği için XRD deseni sonuçları……..33

**Şekil 4.5.** GGG altlığında biriktirilen 10,20,30,35,40 ve 60 nm kalınlığa sahip YIG filmlerinin X-ışını kırınım desenleri…….……..34

**Şekil 4.6.** YAG altlığında biriktirilen 10,20,30,35,40 ve 60 nm kalınlığa sahip YIG filmlerinin X-ışını kırıım desenleri ($2\theta$ = 28-31)…..…….36

**Şekil 4.7.** 10,20,30,35,40 ve 60 nm kalınlıktaki ince film numunelerinin XRD

grafikleri…….36
**Şekil 4.8.** 10,20,30,35,40 ve 60 nm kalınlıklı İtriyum Demir Granat (YIG) filmler için pik pozisyonları ($x_c$) ve yarım yükseklik tepe genişliği (FWHM) ölçümleri……37
**Şekil 4.9.** GGG ve YAG altlıkları üzerinde biriktirilen YIG ince filmlerinin AFM görüntüsü……..……40
**Şekil 4.10.** Film kalınlıklarına göre tanecik boyutu dağılımları;her film kalınlığı için istatistikler 300 ölçüme dayanmaktadır……...41
**Şekil 4.11.**37 nm kalınlığında biriktirilen YIG/YAG ince film numunesinin histeresis eğrisi…….……...……...42
**Şekil 4.12.** Sabit bir frekansta kaydedilen rezonans alanının düzlem içi açısal bağımlılığı f= 20 Ghz……..…….43

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Çizelge 1.1.** İnce film üretim teknikleri ve özellikleri..... 8
**Çizelge 1.2.** Fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinin değişken parametrelerle karşılaştırılması…….…….9
**Çizelge 1.3.** İtriyum Demir Garnetin temel özellikleri..…...……..…….11
**Çizelge 1.4.** İtriyum Alüminyum Garnetin özellikleri…….…...……13
**Çizelge 4.1.** Altlıklara göre biriktirilen ince film numuneleri ve öngörülen kalınlıkları…….....28
**Çizelge 4.2.** Tavlama için ince film numunelerinin aparata yerleştirilme sırası….30
**Çizelge 4.3.** Darbeli Lazer Biriktirme işleminde baz alınan parametre değerleri...31
**Çizelge 4.4.** Altlıklar ve numunelerin numaraları……..……...31
**Çizelge 4.5.** XRD ölçümlerinden her bir örnek için elde edilen veriler…...……...38
**Çizelge 4.6.** XRR ölçümlerinden her bir örnek için elde edilen veriler…….…….38
**Çizelge 4.7.** Numunelerin kalınlıklarına göre (t) sıralanışı…...……..42

# 1. GİRİŞ

Son 50 yılda malzeme bilimindeki gelişmeler özellikle bilgi işleme ve depolama sistemleri üzerinde etkili olmuştur. Yeni malzemelerin araştırılması ve uygulanabilirliği konusunda yapılan çalışmalar elektronik cihazların küçük boyutlara indirilebilmesini mümkün kılmıştır. Bu eğilimi takiben, farklı özelliklere sahip bazı yapısal elemanların (transistörler vb.) ve gelişen elektronik cihazların nanometre boyutuna indirgenmesi bilgi depolama yoğunluğunu artırmış, ancak ısı kayıpları ve hatalı (kayıp) akım gibi bazı diğer sorunlara neden olmuştur. (Transistörler, Online). Bu sorunların neden olduğu kısıtlamalar, bilim insanlarını elektronik alanında daha fazla gelişmeye yol açacak alternatif kavramlar aramaya teşvik etmiştir. Bunlardan biri, elektronun bir özelliği olan açısal momentum dönüşlerini araştıran Spintronik bilimidir. Bu yenilikçi çalışma alanı bilgi taşıyıcı olarak spin dalgalarını kullanma temeline dayanmaktadır.

İtriyum Demir Garnet (YIG-Yttrium Iron Garnet: $Y_3Fe_5O_{12}$) son dönemde keşfedilen ve Spintronik uygulamalar için oldukça kullanışlı bir malzemedir (Hirohata, 2020). Spin dalgalarının uzun mesafelerde yayılmasına olanak sağlamaktadır. Bunun nedeni YIG'nin düşük Gilbert sönümleme sabiti ($\alpha = 3x10^{-5}$) değerine sahip olmasıdır. Ferromanyetik metalik sistemlerin spin dinamiklerinde önemli bir rol oynayan Gilbert sönümleme sabiti, elektronların dönüşlerini örgüyle birleştiren spin-yörünge etkileşiminden kaynaklanır ve böylece yönü zamanla değişirken manyetizasyona uygulanan bir torka yol açar (Manilov, 2009). Ek olarak, YIG doğada bilinen en düşük manyetik sönümlemeye sahiptir ($\sim 10^{-5}$). Manyetik sönümleme değeri, YIG ince filmlerde ön mıknatıslanma, kusurlar, safsızlıklar ve fonon saçılması gibi faktörlerden etkilenir. Ayrıca yüksek bir Curie sıcaklığına (560 K) sahip olması uygulanabilirliğini artırır. Bu benzersiz özelliklerden dolayı, YIG ince filmler farklı altlıklar (GGG, YAG, Si, kuvars vb.) ve yöntemler kullanılarak biriktirilir. YIG iyi bir yalıtkandır ve elektron hareketlerinden kaynaklı ısı salınımı düşük seviyededir. Bu durum en çok GreenIT (Sürdürülebilir Bilgi Teknolojileri) alanında gelecek vaad eden çalışmaların ortaya çıkmasına yol açmaktadır.

Bu tez çalışmasında YIG ince film katmanları GGG (gadolinyum galyum granat) (001) cilalı kristal altlıklar üzerinde biriktirilmiştir. Altlığın GGG olarak seçilmesinin nedeni YIG ile arasında düşük kafes uyumsuzluğu olmasıdır. Darbeli

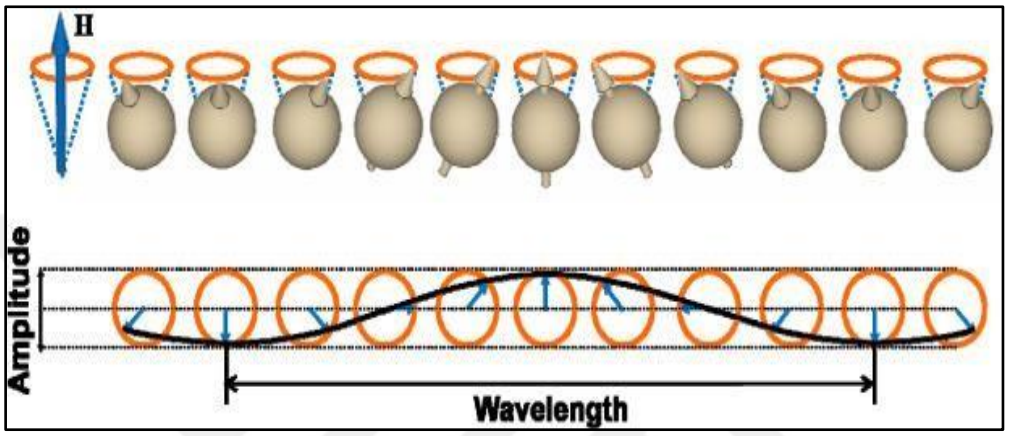
Lazer Biriktirme (PLD) yöntemi ile YIG ince film katmanları Poznan'daki Polonya Bilimler Akademisi Moleküler Fizik Enstitüsü İnce Film Fiziği Bölümü'nde üretimi tamamlanmıştır. Kristal yapı testleri UAM (Polonya Adam Mickiewicz Üniversitesi) 'deki NanoBioMedical Center'da XIR (X-Işını Kırınımı) yöntemi ve XRR (X-Işını Reflektometrisi) kullanılarak gerçekleştirildi. Biriktirilen ince film katmanlarının yüzeyleri NanoBioMedical Center Katıhal Fiziği Laboratuvarı'nda AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) kullanılarak incelenmiştir.

### 1.1. Spintronik (Magnonlar)

Günümüzde mevcut olan teknolojiler, bilgi ileten, işleyen ve alan elektroniklere dayanmaktadır. Teknolojiye ayak uydurmak ve gereksinimleri karşılamak için, yeni malzemeler ve cihazlar geliştirme hedefi Spintronik biliminin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Spintronik terimi spin elektroniklerinden gelmektedir. Elektronun yalnızca bir yükü yoktur, aynı zamanda spin adı verilen başka bir temel özelliği vardır; bu, bir ölçüm yapıldığında yalnızca iki değere sahip olabilen ("yukarı" veya "aşağı") bir fiziksel niceliktir. Yük taşıyıcıların dönüşleri, dönüş özelliği geleneksel şarj tabanlı elektroniklere eklenerek kullanılır. Bu nedenle, dijital bilgileri temsil etmek için mükemmel bir adaydır. Spintronik uygulamalarındaki ana amaç, bir elektrik akımının dönüşünü kontrol etmek, yönlendirmek ve ölçmektir (Padron-Hernandez, 2011).

İlk olarak 1948'lerde çok büyük boyutlarda icat edilen transistörler, günümüzde elektronik bileşenlerin minyatürleştirilmesi ile nano ölçeğe indirgenmiştir (Transistörler, Online). Böylece, elektronik cihazların hızı ve performansı 50 yıldan fazla bir süredir artmakta ve gelişmektedir. Bir dezavantaj olarak minyatür yüzeylerde akımların yaydığı ısının açığa çıkması bir sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, Spintronik çalışmalarının bir amacı da elektronik cihazlarda bu tür sorunları ortadan kaldırmak için uygulamalar geliştirmektir. Spintronik doğrudan spin dalgalarının (magnonlar) incelenmesi ve anlaşılmasına dayanır. Mıknatıslanma devinimi ve Gilbert sönümlemesi (Gs), bir pikosaniye ila onlarca nanosaniye arasında bir zaman aralığına sahiptir (Azevedo, 2000). Magnonlar, sönümlemenin gücüne bağlı olarak benzer karakteristik zaman ölçeklerine sahiptir. Manyetik girdap olayı, bir ila onlarca nanosaniye arasında karakteristik bir zaman

aralığına sahiptir. Manyetik alan duvarlarının hareketi ise 10 ns'nin üzerindeki bir zaman ölçeğinde gerçekleşir (Althammer,2012). Spin dalgaları, manyetik olarak sıralı bir sistemde spinlerin faz uyumlu uyarılmalarıdır. Örgü titreşimlerine benzer şekilde spin dalgaları Şekil 1.1'deki gibi dalga boyu ve genlik özelliklerine sahip dalga benzeri bir formdadır. Magnonlar yayılırken, enerji ve momentum biçiminde bilgi taşır.




**Şekil 1.1.** H manyetik alanında dinamik spin dalgaları (wavelength: dalga boyu, Amplitude; genlik) (Spintronik, Online)

YIG üzerinde spin dalgası olayı 1970'lerden beri çalışılan bir konudur. Bu çekici faktör, YIG ince filmlerdeki spin dalgalarının fiziksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. YIG'ın düşük manyetik sönümlemeye sahip olması, spin dalgalarının nispeten daha iyi yayılmasına ve gözlemlenmesine izin verir (Krzstovofik, 2017). Yayılan bu dalgalar, sinyal işleme cihazlarının potansiyel uygulamaları tarafından motive edilen mikrodalga frekansları ile uyumludur (Kruglyak, 2006). YIG yapılarında Spin Hall Etkisinin ve Ters Spin Hall Etkisinin gözlemlenmesi, bu yapının spin dalgası fenomenine ve potansiyel Spintronik uygulamalarına olan ilgiyi artırmıştır (Collet, 2016). Bununla birlikte, yayılma sırasında spin dalgalarının nanosaniyede sönümlenmesi, pratik uygulamalar için hala bir zorluktur. Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalar, spin dalgalarının YIG ince film tabanlı sistemlerde yeniden üretilebileceği, bu nedenle Spintronik cihazlarda sinyal işleme için yeni olanaklar olduğu bildirilmiştir (Varshney, 2014).

## 1.2. Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) Denklemi

Mıknatıslanma dinamiğinin temel ilkesi manyetik alanın etkisi altındaki manyetik momentlerin presesyon (sabit bir eksen etrafında belli bir açı ile dönmesi) hareketidir. Bu presesyon olayı ilk olarak 1935'te Lev Landau ve Evgeny Lifshitz (Landau, 1935) tarafından önerilmiştir. Landau-Lifshitz denklemi (LLD) adı verilen bir tork denklemiyle tanımlanır. Bu denklem, sistemdeki sönümlemeyi hesaba katmak için bir dağıtma terimi eklenerek formüle edilmiştir. Daha sonra Gilbert, manyetik sönümleme terimi ekleyerek denklemi revize etmiştir.

Manyetik moment $\boldsymbol{\mu}$ ve açısal momentum $\boldsymbol{J}$ olarak;

$$\boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{\gamma J} \tag{1.1}$$

burada $\boldsymbol{\gamma}$ jiromanyetik sabit olup yaklaşık olarak 2,002319 alınır. Etkin manyetik alan $\boldsymbol{B_{eff}}$ altında manyetik moment bir tork $\boldsymbol{\tau}$ oluşturur;

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{\mu}\times\boldsymbol{B_{eff}} \tag{1.2}$$

burada $\boldsymbol{B_{eff}} = \boldsymbol{\mu} H_{eff}$ olarak efektif manyetik alan, $\boldsymbol{H_{eff}}$ iç ve dış manyetik alanların toplamıdır. Harici olarak uygulanan statik alan $\boldsymbol{H_0}$, harici uygulanan manyetik alanın $\boldsymbol{H_{(M)}t}$ bir bileşenidir. Değişim etkileşimleriyle üretilen manyetik alan $\boldsymbol{H_{ex}}$, manyetik olmayan alan $\boldsymbol{H_d}$ ve kristal anizotropi nedeniyle manyetik alan $\boldsymbol{H_{ani}}$;

$$\boldsymbol{H_{eff}} = \boldsymbol{H_0} + \boldsymbol{H_{(M)}}t + \boldsymbol{H_{ex}}, + \boldsymbol{H_d} + \boldsymbol{H_{ani}} + ..... \tag{1.3}$$

olarak ifade edilir.

Artık atomik manyetik moment, süreklilik sınırında makroskopik mıknatıslanma ile değiştirilebilir. Etkili alan, manyetizasyonun Larmor frekansında (Turkrad, Onlıne) dönmeye başladığı için açısal momentumun hız değişimine karşılık gelen bir tork uygular. Bu mıknatıslanma presesyonu Landau-Lifshitz denklemi (LLD) olarak verilir:

$$\frac{\boldsymbol{dM}}{\boldsymbol{dt}} = \boldsymbol{M}\,\boldsymbol{x}\,\boldsymbol{H_{eff}} + \frac{\boldsymbol{\alpha}}{\mu \boldsymbol{s}}\,(\boldsymbol{M}\,\boldsymbol{x}\,\frac{\boldsymbol{dM}}{\boldsymbol{dt}}) \tag{1.4}$$

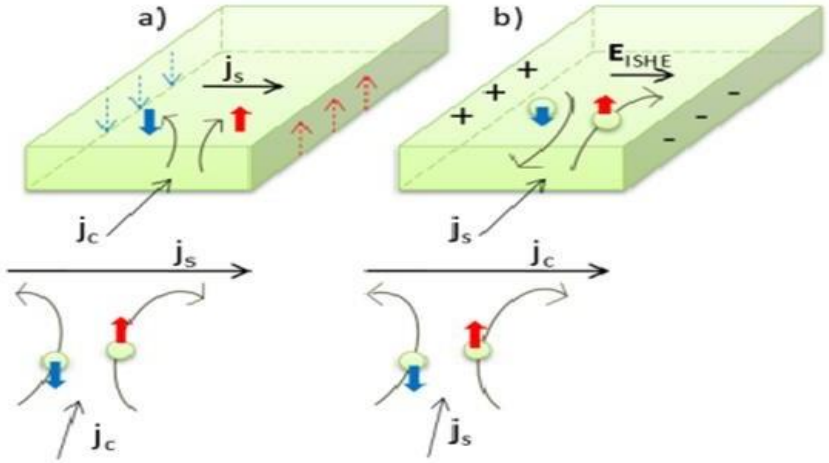
burada **α** boyutsuz Gilbert sönümleme parametresidir. Mıknatıslanma, tork nedeniyle uygulanan alan boyunca ilerler.

Manyetik malzemelerdeki sönümlemenin kaynağı hala tam olarak anlaşılamamıştır. Genel olarak, sönümleme, içsel ve dışsal kategorilere ayrılmış gevşeme mekanizmaları aracılığıyla anlaşılabilir. Döngü yörüngesi etkileşimi yoluyla kafes içindeki fononlara magnonların doğrudan bağlanması, sönümlemeye içsel, elektronlardan magnon-magnon saçılmasına yol açan saçılma süreçleri ise dışsal süreçlerdir.

### 1.2.1. Spin Hall Etkisi ve Ters Spin Hall Etkisi

Manyetik alan içerisinde bulunan ve üzerinden akım geçen bir iletken boyunca gerilim (Hall gerilimi) oluşması olayına Hall etkisi denilmektedir. 1879'da Dr. Edwin Hall tarafından keşfedilmiştir. Gerilimin doğrultusu iletkenden geçen akımın ve manyetik alanın yönüne diktir. Hall katsayısı, indüklenen elektrik alanın akım yoğunluğu ve manyetik alanın çarpımına oranı olarak tanımlanır. Bu katsayı iletkenin yapıldığı malzemenin karakteristik bir özelliğidir ve değeri akıma katkıda bulunan yük taşıyıcılarının tipi, sayısı ve özelliklerine bağlıdır. Birkaç üretici tarafından "Hall Effect Sensörü" denilen bir ürün üretilmektedir. Teknolojideki diğer kullanımına örnek olarak, dönen hız sensörleri, sıvı akış sensörleri, akım sensörleri ve basınç sensörleri verilebilir.

Spin Hall Etkisi (SHE), iki akıma dik yönlendirilmiş dönüşlere sahip bir elektrik yükü akımı ile enine spin akımının üretilmesidir. Dönen elektronlar, elektrik yükü akımının akışına dik olarak tek yönde dağılır ve elektronlar ters yönde aşağı doğru döner (Şekil 1.2.a) ve manyetik alan gerektirmez. Bu etki teorik olarak ilk kez 1971'de Dyakonov ve Perel tarafından çalışılmıştır (Dyakonov vd., 1971). Ancak bu teorik çalışma, Hirsch ve Zhang tarafından yeniden keşfedildiğinde spintronik topluluğunun dikkatini çekmiştir (Zhang, 1999).Ters etki, bir spine polarize akımın enjekte edilmesiyle normal bir metalde enine bir elektrik yükü akımının üretilmesini tanımlayan Ters Spin Hall Etkisidir (TSHE) (Şekil 1.2b).




**Şekil 1.2.** a) Spin Hall etkisi (SHE), şarj akımına ($\mathbf{j_c}$) dik olan normal bir metalde spin polarize akımın ($\mathbf{j_s}$) oluşumunu açıklar. b) Ters spin Hall etkisi, normal bir metalde spin polarize akıma ($\mathbf{j_s}$) dik olan bir şarj akımı ($\mathbf{j_c}$) oluşumunu ifade eder (Miao, 2013).

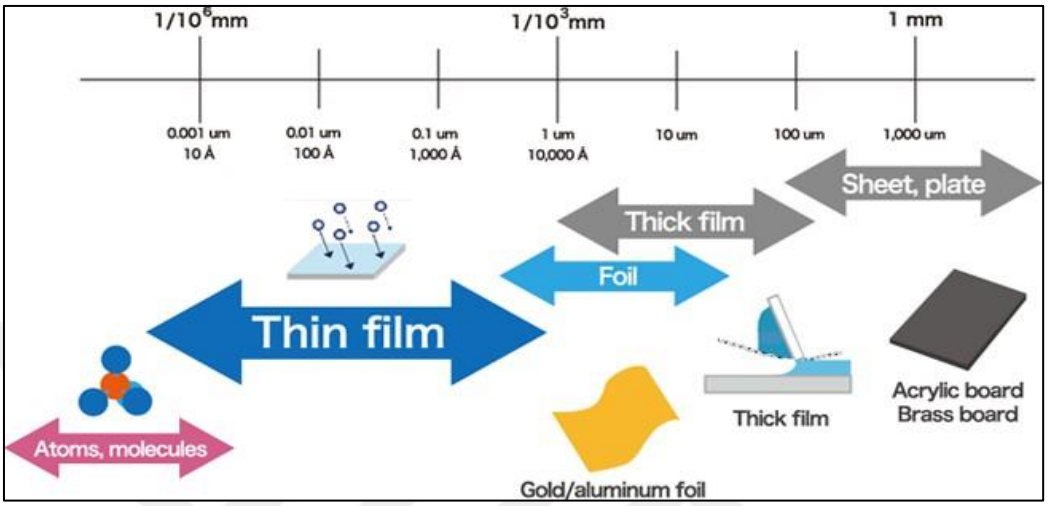
### 1.3. İnce Filmler

İlk uygulamaları 1940'larda ortaya çıkmaya başlayan ince film teknolojisi her geçen gün gelişmekte ve elektronik cihazlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Lustikova, 2014). Mikro ve nano yapılı optielektronik malzeme endüstrisinin temelini oluşturan, teknolojik ve bilimsel araştırmalarda önemli bir yere sahip olan ince filmler, günümüzün popüler araştırma disiplinlerinden biridir.

Elektrik-elektronik sanayi, ulaşım-telekomünikasyon, nanoteknoloji gibi teknolojik uygulamalarda istenilen özelliğe göre birçok amaca hizmet eden ince filmler kullanılmaktadır. Elektriksel özellikleri sayesinde yarı iletken / süperiletken cihazlarda (Wang, 2014), izolasyon ve iletim kaplamalarında, devre elemanı yapımında, optik özelliklerinden dolayı yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda kullanılmaktadır.

Manyetik özelliklerinden dolayı girişim filtreleri ve optik bellek disklerinde kullanılırken kimyasal özelliklerinden dolayı ince filmler, oksidasyon veya korozyona karşı korumada, sensörlerde ve bunlar gibi daha birçok uygulamada kullanılmaktadır (Bhoi, 2015). İnce filmler, istenilen özelliklere göre polimer, seramik, çelik, cam veya oksit gibi altlıklar kullanılarak farklı şekillerde

biriktirilmektedir (Tung, 2016). Altlık üzerine biriktirilen ince filmlerin kalınlığı genellikle 1 µm (mikrometre)'den azdır. Bu noktada, 1 µm'nin altında " ince " bir filme sahip olmanın anlamı, farklı boyutlardaki yapılara kıyasla Şekil 1.3'de verilmiştir (Thin Films, Online).




**Şekil 1.3.** Farklı malzemelere kıyasla ince film boyutları (Thin Films, Online)

İnce filmler uygulama alanlarına göre uygun kalınlık, bileşim ve özelliklere sahip olmalıdır. Bu nedenle, kullanılan farklı üretim yöntemleri ve altlıklar amaca uygun olarak seçilmelidir. Bu parametreler üretilen ince filmlerin fiziksel ve kimyasal yapıları ile birlikte en önemli etken olarak kalitelerini etkilemektedir. Günümüzde çalışma alanı ve amacına göre birçok biriktirme yöntemi bu alanda çalışan bilim insanları tarafından tercih edilmektedir. Her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Çizelge 1.1. popüler olarak kullanılan ince film biriktirme yöntemlerinin kısaca olumlu ve olumsuz özelliklerini göstermektedir. Ayrıca Çizelge 1.2., genel olarak birikimlerin fiziksel ve kimyasal yöntemler olarak 2 ana başlık altında karşılaştırmasını göstermektedir.

**Çizelge 1.1.** İnce film üretim teknikleri ve özellikleri

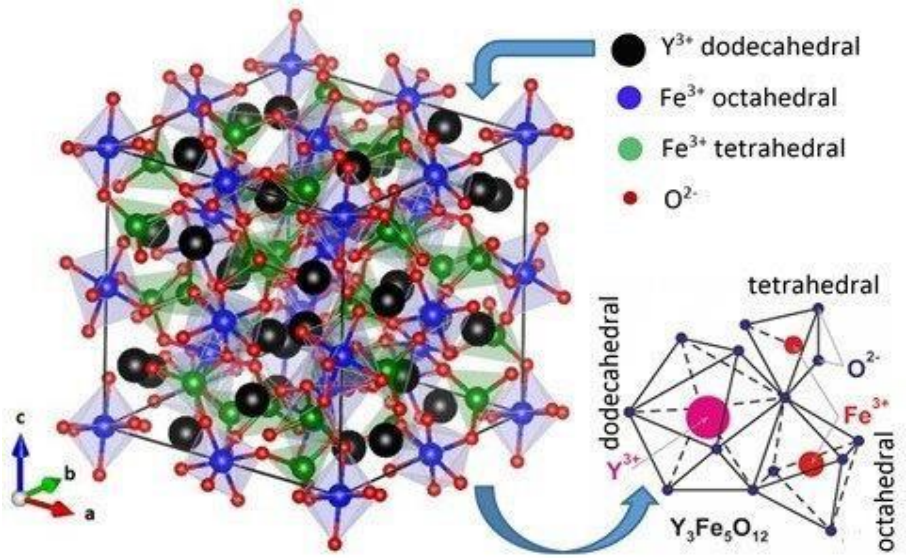
| Kategoriler | Biriktirme Yöntemleri | Öne Çıkan Özellikler |
|---|---|---|
| **Fiziksel Buhar Biriktirme** | Termal Buharlaştırma | Basit ekipman ile hızlı üretim<br>Büyüme oranı (~0,1 µm/ s ) |
| | Darbeli Lazer Biriktirme | Çok katmanlı büyütme ve düşük seviye inceliğe homojen inebilme<br>Büyüme oranı ( 1/10 µm/ s ) |
| | Moleküler Işın Epitaksi | Düşük büyüme oranı ( 1 µm/ s )<br>Kontrol edilebilir fakat karmaşık üretim sistemi |
| | Sıçratma (DC ve RF) | Maliyeti yüksek ve yüzey pürüzsüzlüğü çok<br>Düşük büyüme oranı ( 0,1 µm/ s ) |
| | Sıvı Faz Epitaksi (SFE) | Yüksek büyüme oranı ( 1/10 µm/ s )<br>Oldukça pürüzsüz yüzey |
| **Kimyasal Buhar Biriktirme** | Metal Organik KBB | Düşük biriktirme sıcaklığı<br>Düşük biriktirme oranı Düşük film kalitesi |
| | Düşük Basınç KBB | Homojen film biriktirme |
| | Atmosfer Basıncı KBB | Düşük biriktirme oranı<br>İyi film kalitesi |
| | Plazma KBB | Düşük biriktirme sıcaklığı Yüksek film<br>kalitesi<br>Iyi adezyon |
| | SOL-GEL | Yüksek homojenlik Düşük maliyet<br>Kolay kontrol edilebilirlik |
| | SDP Daldırma | Basit ekipmanlı<br>İhmal edilebilir zehirli atık Pürüzsüz yüzey |

**Çizelge 1.2.** Fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinin değişken parametrelerle karşılaştırılması

| **Parametreler** | **Fiziksel Buhar Biriktirme** | | **Kimyasal Buhar Biriktirme** |
|---|---|---|---|
| | **Buharlaştırma** | **Saçtırma** | |
| **Biriktirme için Üretim Mekanizması** | Termal Enerji | Momentum Transferi | Kimyasal Reaksiyon |
| **Biriktirme Hızı** | Yüksek | Düşük | Orta |
| **Biriktirme Cinsi** | Atom ve İyon | Atom ve İyon | Atom |
| **Biriktirme Gücü** | Zayıf | Güçlü | Güçlü |
| **Metal Biriktirme** | Evet | Evet | Evet |
| **Alaşım Biriktirme** | Evet | Evet | Evet |
| **Biriktirme Enerjisi** | Düşük (0,1-0,5 eV) | Yüksek (1-100 eV) | Plazma Desteği |
| **Isıya Dayanıklı Biriktirme** | Evet | Evet | Evet |
| **Ara Katman Biriktirme** | Çoğunlukla Hayır | Evet | Çoğunlukla Evet |

### 1.3.1. İtriyum Demir Garnet (YIG)

YIG (*Yttrium İron Garnet,* $Y_3Fe_5O_{12}$) ilk olarak 1956'da Bertaut ve Forrat tarafından sentezlenmiş olup, yaklaşık 50 yıl önce Kittel tarafından manyetizmanın önemli bir yapı sistemi olarak anılmıştır (Kittel, 1960). İtriyum demir garnet, kübik simetriye ve belirli kompozisyona sahip karmaşık bir kristal oluşuma sahiptir. YIG'in yoğunluğu 5,17 $g/cm^3$'tür. Oldukça düşük manyetik sönümleme katsayısına sahiptir ($\boldsymbol{\alpha} \approx 3 \times 10^{-5}$). Geniş bant aralığına; 2,85 eV (Sparks, 1964) ve yüksek Curie sıcaklığına (560 K) sahiptir. Birim hücre başına 12,376 ± 0,004 Angstromluk örgü parametresine sahiptir. Bu garnet için olası uzay grubu $O^{10}$ Iα3d olarak verilir (Stancil, 2009). YIG kristali toplam 160 iyonlu kübik bir yapıdadır (Şekil 1.4.). YIG'ın her biriminde, üç dodecahedral (c bileşeni), iki oktahedral (a bileşeni) üç tetrahedral yapı 24 $Y^{+3}$, 40 $Fe^{+3}$ iyonu ve 96 $O^{-2}$ iyonu bulunmaktadır.




**Şekil 1.4.** Üç farklı katyon kristalografik alt kafese sahip İtriyum Demir Garnet birim hücresi (Power vd., 2008)

YIG kübik kristal yapıya sahip granat fazlı bir seramik olduğu için çok düşük manyetokristali anizotropiye sahiptir. Bu tür kübik polikristal yapılarda, parçacık yöneliminden bağımsız olarak, tüm rezonanslar aynı frekansta üst üste biner ve keskin jiromanyetik rezonanslara neden olur. Bu, YIG malzemesini rezonans frekansına yakın frekanslar dahil olmak üzere geniş bant genişliklerinde son derece kullanışlı kılar (Gilleo, 1958). Ayrıca, ferromanyetik bir malzeme olan ve tek bir parabolik spin dalgası moduna sahip olan YIG, doğada bilinen en düşük sönümleme sabitine ve en dar ferromanyetik rezonans (FMR) aralığına (FMR <0.5 Oe ~ yaşam süreleri birkaç yüz nanosaniye magnona eşdeğerdir) sahiptir (Liu, 2015).

Manyeto-optik özellikler, büyümeye bağlı manyetik anizotropi ve foto-manyetik etkiler üzerine yapılan çalışmalar, YIG'i manyetik depolama ve spintronik cihaz uygulamaları için çekici hale getirmiştir. Gecikme hatları, magnon transistörler, lazerler, ayar filtreleri, osilatörler ve bellek depolama cihazları gibi magnon tabanlı cihazlarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, FMR aralığı dar olduğundan ve YIG, metallere kıyasla düşük girdap akım kayıplarına sahip olduğundan, spin pompalama ve ters Spin Hall etkisinin araştırılması için yararlıdır. Bunların yanı sıra günlük hayatta kullanılan telekomünikasyon, bilgisayar, radyo-TV gibi cihazların modernizasyonu ve geliştirilmesinde YIG bazlı malzemeler kullanılmaktadır. Tek kristalli itriyum demir garnetin temel yapısal

özellikleri Çizelge 1.3.'te verilmiştir.

**Çizelge 1.3.** İtriyum Demir Garnetin temel özellikleri

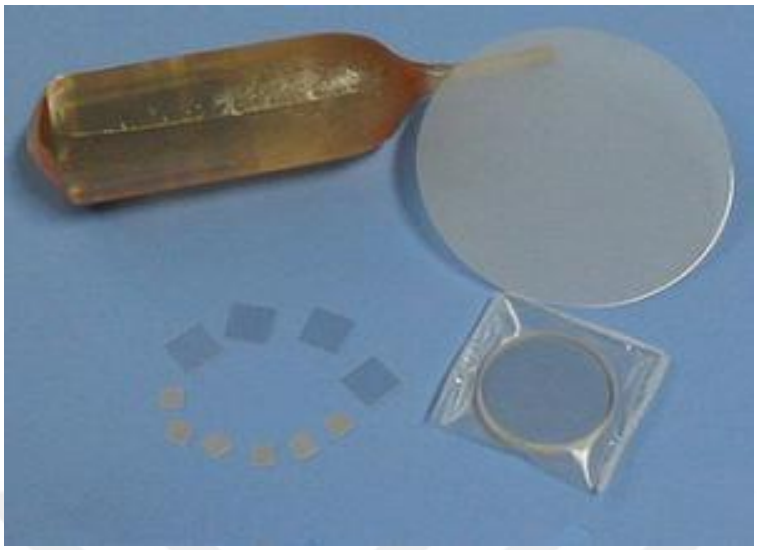
| **Parametreler** | **Değerler** |
|---|---|
| Kafes parametresi α (273 K) | 12,376 ± 0,004 Å |
| Kafes parametresi α (77 K) | 12,361 Å |
| Kafes parametresi α (4 K) | 12,359 Å |
| Termal genişleme sabiti (298 K) | $8{,}3\times10^{-6}$ |
| Termal genişleme sabiti (623 K) | $11{,}0\times 10^{-6}$ |
| Curie sıcaklığı ($\boldsymbol{T_c}$) | 559 K |
| Saturasyon indiksiyonu (4πMs) | 1750 |
| Bant aralığı | 2,85 eV |
| Yoğunluk | 5,17 $g/cm^{-3}$ |
| Sönümleme sabiti (α) | $3\times10^{-5}$ |
| Faraday rotasyonu (1.2 μm) | 240 der/cm |

YIG ince filmleri yapısal ve manyetik özellikleri, hazırlama yöntemine, parçacık boyutuna, homojenliğine ve kimyasal bileşime bağlıdır (Sokolov, 2016). Garnet olmayan altlıklar üzerinde biriktirilen YIG katmanları genellikle amorf veya polikristalindir. Bu nedenle bu tez çalışmasında YIG ince filmler, optik ve manyetik özellikleri geliştirmek ve incelemek için GGG ve YAG gibi garnetler üzerine PLD yöntemi ile kristal yapı olarak biriktirilmiştir.

### 1.3.2. Gadolinyum Galyum Granat (GGG) Altlıklar

YIG ince filmleri, gadolinyum galyum granat (GGG) altlıklar (Şekil 1.5) ile iyi örgü uyumu sağlamaktadır (Bhoi, 2015). GGG'nin örgü sabiti (12,383 Å), YIG ile çok iyi eşleşir ve yüksek kaliteli ve neredeyse hatasız filmlerin üretilmesini sağlamaktadır. GGG altlıklar üzerinde biriktirilen filmler bu nedenle oldukça yüksek kristal kalitesi sergilemektedir. Bu tez çalışmasında, YIG ince film katmanları, çok küçük kafes uyuşmazlıkları nedeniyle paramanyetik bir garnet olan GGG altlıkları üzerine yerleştirilmiştir. Böylece manyetostriksiyonla ilişkili enerjinin ihmal

edilebilmesi sağlanmak hedeflenmiştir (Chiang, 2008).

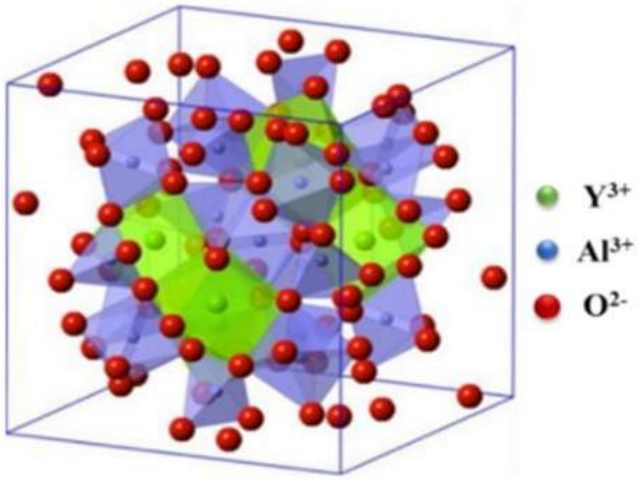


**Şekil 1.5.** Gadolinium gallium garnet (GGG Substrates, Online)

GGG'nin kristalografik verileri, hemen hemen aynı örgü sabitine sahip olduğu YIG ince filmlere yakın değerlerde olması biriken filmin istenen kalitede elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, GGG altlıkların malzemeye paramanyetik bir katkısı olduğu ilerleyen bölümlerde bildirilmiştir.

### 1.3.3. İtriyum Alüminyum Garnet (YAG) Altlıklar

İtriyum Alüminyum Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$, YAG) kübik bir yapıya sahip olup garnet grubunun tane sınırlarında çift kırılma etkisi göstermeyen sentetik kristal bir malzemedir, dolayısıyla daha iyi optik özellikler ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle manyetoptik uygulamalarında altlık olarak sıklıkla tercih edilir. Oksijen iyonları üç geometriye göre düzenlenir: merkezleri $Y^{+3}$ iyonları tarafından işgal edilen dodekahedron (düzgün on iki adet yüzü olan üç boyutlu şekil) köşelerinde ve merkezleri $Al^{+3}$ iyonları tarafından işgal edilen tetrahedronlar (4 yüzlü üç boyutlu şekil) ve oktahedranların (8 yüzlü üç boyutlu şekil) köşelerindedir (Şekil 1.6). YAG altlığının genel özellikleri Çizelge1.4'te verilmiştir.




**Şekil 1.6.** YAG kristal yapısı (YAG, Online)

**Çizelge 1.4.** İtriyum Alüminyum Garnet'in özellikleri

| **Parametreler** | **Değerler** |
|---|---|
| Kafes Parametresi (Å) | 12,013 |
| Krisral Yapısı | Kübik |
| Kütle Hacmi ($g.cm^{-3}$ ) | 4,56 |
| Kütle Molekülü ($g.mol^{-1}$) | 593,7 |
| Spesifik Sıcaklık Cp ($J.g^{-1}.K^{-1}$) | 0,59 |
| Termal İletkenlik | 11,2 |
| Termal Genleşme Katsayısı ($K^{-1}$) | $6,14 \times 10^{-6}$ |
| Termik Emisyon ($cm^2.s^{-2}$) | 0,041 |
| Füzyon Sıcaklığı (° C) | 1965 |
| İletim Aralığı (μm) | 0,24 |

YAG, birçok uygulamada tercih edilen iyi bir yapısal ve işlevsel malzemedir. Tek kristal YAG mükemmel optik özellikleri nedeniyle özel lazer yapılarında ana malzeme olarak kullanılabilir. Ayrıca kübik simetriye sahip olduğu için tane sınırlarında çift kırılma göstermez. YAG izotropik termal genleşme sergiler, bu nedenle genellikle ince film, lazer ve optik gibi temel alanlarda kullanım için tercih edilir.

PLD ile, aynı altlık oryantasyonuna sahip YAG altlıkları üzerinde yüksek kaliteli µm kalınlığında YIG ince filmleri büyütülebilir. YAG altlıkları GGG'lerden daha az maliyetlidir ve daha fazla kullanılabilirlik sağlar. Aynı koşullar altında GGG üzerine biriktirilen YIG filmleriyle karşılaştırıldığında, YIG / YAG numuneleri daha dar bir FMR çizgi genişliğine sahiptir, bu da örgü uyumsuzluğunun YIG filmlerinin manyetik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Sposito, 2013).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Manyetizmanın bir alt dalı olarak magnonlar (spin dalgaları) 1930'larda Bloch tarafından önerilmiştir (Bloch, 1932). Bu tarihten sonra, zaman içinde ferromıknatıslarla manyetizasyon üzerine yapılan çalışmalar, magnonların varlığına işaret etmiştir. İlk yaklaşımlar Griffiths tarafından ferromanyetik rezonans kullanılarak yapıldı. Daha sonra Fleury ve arkadaşları, sıfır olmayan dalga vektörleriyle Brillouin Işık Saçılımı (BLS) deneyinde magnonların varlığını doğruladılar (Gomez, 1968). Magnoniklere olan ilginin artmasının nedeni, oksit spintroniklerin gelişmesiyle birlikte spin dalgası paketleri kullanılarak bilgi aktarımının mevcut taşıyıcılara ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilebilmesiydi (Kajiwara vd., 2010).

1991 yılında ilk kez manyetik sabit disklerin kullanılmasıyla; manyetik veri depolama alanındaki ilk çalışmalar güç kaynağı kesintiye uğradığında, bilgiyi depolamak için gücü şarj eden kapasitörler ile başladı (Varshney, 2014). Daha sonra ferromanyetik ve yarı iletken malzemelerin geliştirilmesiyle; Manyetik belleklerde depolanan bilgilerin kalıcılığı sağlanmıştır. Bu gelişmeler, Spintronik biliminin yeni nesil bir teknoloji olarak doğmasının yolunu açmıştır (Zuti, 2004).

İtriyum Demir Garnet ilk olarak 1956 yılında Bertaut ve Forratis tarafından sentezlenen ve günümüzde geniş bir kullanım alanına sahip olan ferrimanyetik bir malzemedir (Jın, 2015). YIG ince filmler ile yapılan çalışmalarda büyük hacimli, tek kristal formda ve oldukça mükemmel bir atomik diziyle büyütülmüşlerdir (Garskaite vd., 2006). YIG ince filmlerin yüzey alanlarındaki bazı faktörlere bağlı olarak film kalınlığı ile manyetizasyon arasında doğrusal bir ilişki olduğu bildirilmiştir (Chen, 2005). Safsızlıklar, yüzey kusurları ve diğer beklenmedik mekanik morfolojik bozukluklar; düzlem dışı anizotropiye ve düşük satürasyon manyetizasyonuna neden olabildiği daha sonra yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur (Thiery vd., 2018).

Günümüzde ferromanyetik ince film malzemeler, elektrik motorları, jeneratörler, transformatörler, telefonlar, hoparlörler, manyetizma ve malzeme bilimi gibi geniş bir yelpazede; kısaca günlük yaşamdan endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Kivotaka, 2004). Manyetik depolama malzemesi olarak kullanılan ferromanyetik filmler, bellekler, ekranlar,

nanoyapılar, manyetik direnç elemanları gibi yapıların önemli bir parçasıdır.

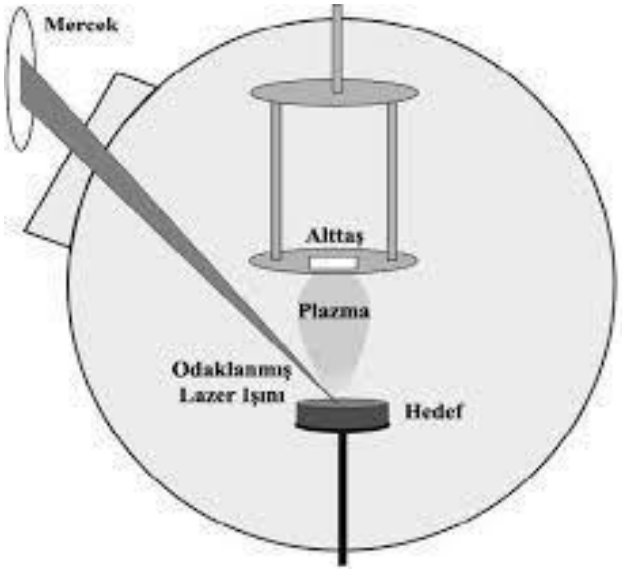
Dünyaca ünlü bir teknik olarak PLD; yüksek kaliteli filmleri büyütmek için kullanılan başarılı bir yöntemdir. İlk deneyler 1960'lara kadar uzanmasına rağmen, yüksek sıcaklık süper iletkenlerini biriktirmedeki başarısı nedeniyle 1980'lerin sonunda dünyanın dikkatini yeniden çekmeyi başarmıştır. Bugün; PLD tekniği, dielektrik-ferroelektrik malzemeler, nitrit ve ferromanyetik filmler, çok katmanlı metal yapılar, yarı iletken ZnO filmler, perovskitler ve granatlar gibi seramik oksitlerin üretiminin kaynağıdır (Yamahara, 2011). Yenilikçi teknoloji ile gelecekte lazer güçlerini artırarak, yüksek güçlü lazerler geliştirerek ve PLD ekipmanını her geçen gün iyileştirerek olağanüstü çalışmalar yapılacağı tartışılmaz bir gerçektir (Manuilov, 2009).

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

## 3.1. Darbeli Lazer Biriktirme (DLB)

Smith ve Turner, PLD yöntemini kullanarak ilk kez 1965 yılında yarı iletken ve dielektrik ince filmleri başarıyla hazırlamışlardır (Weisheit, 2003). Bu tekniğin çalışma sonuçlarını, darbe başına yaklaşık 0,1 nm'lik yüksek birikim hızları ve oluşan damlacıklar dahil olmak üzere başarıyla rapor ettiler. O zamandan günümüze, Darbeli Lazer Biriktirme çok çeşitli malzemeleri biriktirmek için kullanılabilen nispeten ucuz, basit, güçlü ve çok yönlü bir biriktirme tekniğidir. YIG gibi kübik malzemeler, manyetik ve manyeto-optik özelliklerini koruyarak başarılı bir şekilde bu yöntem ile biriktirilir (Yamahara, 2011).

Darbeli Lazer Biriktirme aparatının yapısı şematik olarak Şekil 3.1.'de gösterilmektedir. Biriktirme işlemi, materyalin lazerle buharlaştırılmış masif YIG polikristal hedeften monokristal stokiyometrik transferine dayanır. Yüksek yoğunluklu lazer ışınının hedefle etkileşiminin bir sonucu olarak, malzeme konsantrasyonu değişir, uyarılma ve iyonlaşma başlar. Hedef içinde plazma oluşur ve daha sonra saçılan iyonlar birkaç santimetre uzakta bulunan alt tabakaya yerleştirilir. Böylece ince bir tabaka oluşturulur. Lazer ışını yatay olarak hareket eden bir odaklama merceği tarafından saptırılır. Eşit dağılımın sağlanması için malzeme bir inç çapında dönen bir disk üzerinde biriktirilir.




**Şekil 3.1.** Darbeli Lazer Biriktirme yöntemi şematik gösterimi (DLB, Online)

PLD sisteminin temel çalışma prensipleri aşağıdaki gibidir (PLD Systems, Online):

- Hedef ve altlık malzemeleri dış atmosfer ortamından etkilenmemesi için vakum odasında tutulur,

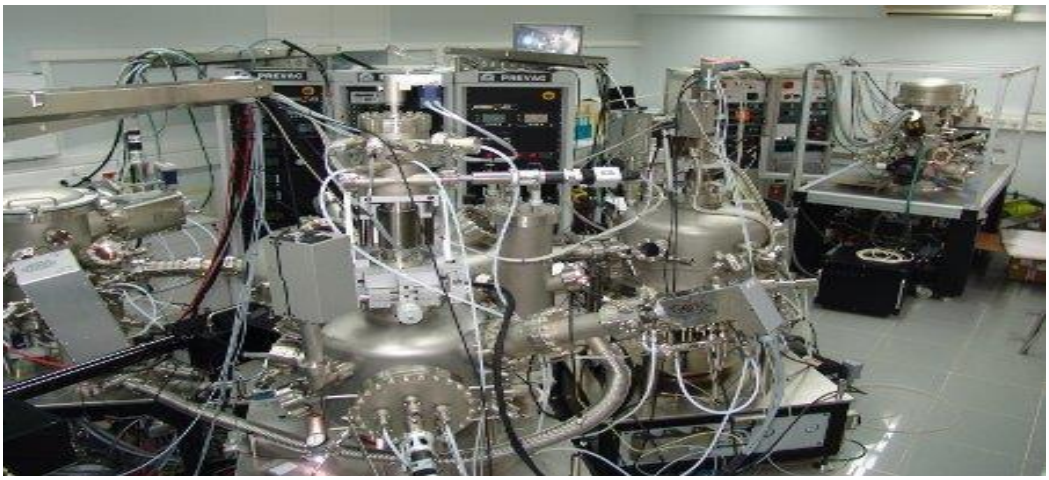
- Hedef malzemeye odaklanan lazer ışını yansıtıcı pencereden vakum odasına girer,

- Yüksek enerjili lazer, hedef malzemenin yüzeyinin buharlaşmasına ve iyonlaşmasına neden olur. Bu sürece ablasyon denir. Ablasyon işlemi, geçici ve oldukça parlak bir plazma bulutunun oluşumuna yol açar,

- Plazma bulutu kontrollü bir şekilde alt tabaka yüzeyine ulaşır ve yoğunlaşarak film birikmesini oluşturur,

- İşlemde baştan sona biriktirilen film, gaz giriş-çıkışı, ısı, basınç gibi temel parametreleri kontrol eden gelişmiş cihazlarla yönetilir.

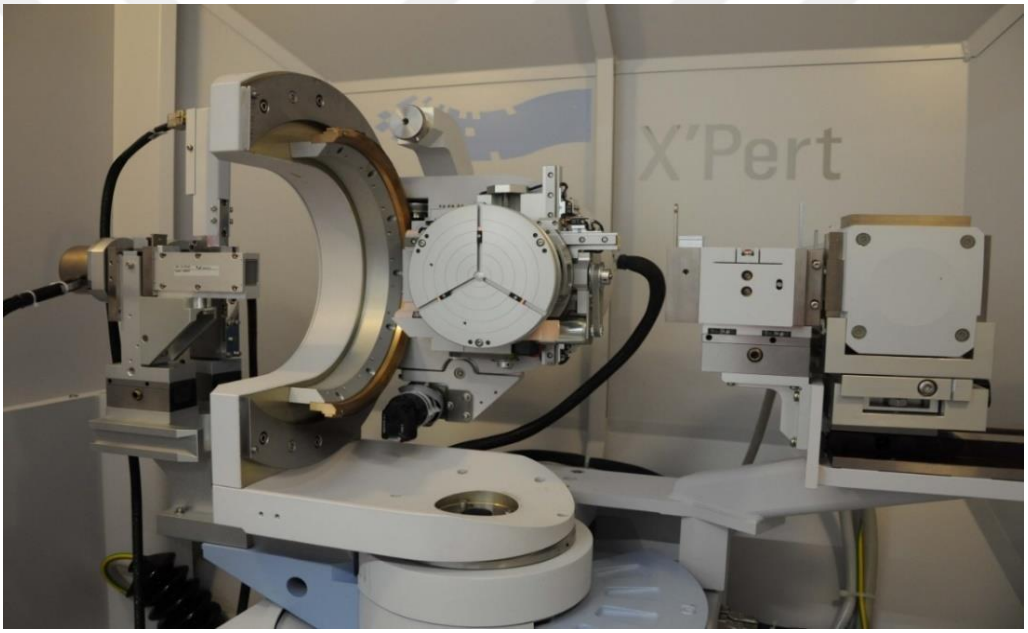
Bu tez çalışmasında, ince filmlerin üretim yöntemi olarak PLD yöntemi, biriken filmlerin çok yüksek kalitede olmasından, karmaşık çok bileşenli malzemeleri uygun şekilde büyütme yeteneğinden (Nag, 2018), yüksek yapışma ve düşük kirlilik nedeniyle tercih edilmiştir. Biriktirme işlemi Poznan'daki Polonya Bilim Akademisi, Moleküler Fizik Enstitüsü İnce Film Fiziği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2).



**Şekil 3.2.** Darbeli Lazer Biriktirme cihazı, İnce Film Fiziği Bölümü, Polonya Bilimler Akademisi

### 3.2. X-Işını Kırınımı (XRD)

Mineraller gibi kristal malzemelerin üç boyutlu yapısı, bir kristal kafesi oluşturan düzenli atomik düzlemler tarafından tanımlanır. Bu düzlemlerle etkileşime giren odaklanmış X-ışınları kısmen emilir ve dağılır. Malzemenin yapısına bağlı olarak, X-ışınları kristal kafesi oluşturan atomlar tarafından farklı şekillerde kırılır. X-ışını kırınımı, kristalografik malzemelerin karakterizasyonu için güçlü ve tahribatsız bir analiz tekniğidir (Şekil 3.3.). X-ışını kırınımı analizleri malzemelerin fazları, kristal yönelimleri (doku), ortalama tane boyutları, kristallik, deformasyon ve kristal kusurları gibi diğer yapısal parametreler hakkında bilgi sağlamaktadır.




**Şekil 3.3.** X-ışını Kırınım ekipmanı, NanoBioMedical Center, Poznan

1921'de William Louis Bragg, kırınım üzerinde çalışırken Bragg yasasını geliştirmiştir. Bu yasa, X-ışınlarının numuneye çarptığında ve numuneden saçıldığında numuneyi oluşturan atomlar arasındaki mesafeleri ölçmek için formüle edilmiştir;

$$2d_{hkl}\sin\Theta = n\lambda \qquad (3.2.1)$$

Burada $\boldsymbol{d_{hkl}}$ atomik düzlem ile gelen ışın tarafından oluşturulan düzlemler arası mesafe, $\boldsymbol{\Theta}$ atomik düzlem ile gelen ışın tarafından oluşturulan açı, $\boldsymbol{n}$ yansıma sayısı $\boldsymbol{\lambda}$ dalgaboyu olarak verilir.

Ölçümlerin bir sonucu olarak elde edilen X-ışını kırınım deseni (Θ açısına bağlı olarak), mesafenin ve daha sonra sabit ağın belirlenmesine izin verir. Örneğin, basit bir kübik hücre için, ağ sabiti $\boldsymbol{a}$ aşağıdaki formüle göre hesaplanır;

$$a = d_{hkl}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \qquad (3.2.2)$$

burada $h$, $k$, $l$ kristalografik düzlemde Miller indisleridir.

Kırınım desenleri incelendiğinde, kırınım zirveleri sadece numune yeterince uzun bir menzile sahip olduğunda gözlenir. Örneğin, mükemmel kristallerin kırınım çizgileri çok dardır. Bu durumda, 100 nm'nin altındaki kristal boyutlar için, X ışınlarının faz dışı olduğu saçılma yönlerinde eksik yıkıcı girişim nedeniyle çizgi genişlemesi meydana gelir.

X ışınları düz bir yüzeye düştüğünde, toplam yansıma, kritik açı olarak adlandırılan belirli bir açıda veya altında meydana gelir. Açı, malzemenin elektronik yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Bir malzemenin elektron yoğunluğu ρ(z) ne kadar yüksek olursa, YIG ince film katmanlarının kristalografik yapısını araştırmak için kritik açı olan XRD ölçümleri o kadar yüksek olur. XRD yöntemi ile elde edilebilen en yararlı bilgiler, yarım yükseklik tepe genişliği (FWHM) kullanılarak tane boyutu hesaplanmasıdır. Modern hesaplamalar ilgili yazılım ve bilgisayar programları aracılığı ile elde edilir. Formül ile ifade etmek gerekirse bu noktada Scherrer denklemi, kristal boyutunu maksimum FWHM'nin yarısında tam genişliğe bağlayan bir ifadeyi elde etmeye yarar $< L >$;

$$\frac{K\lambda}{\beta COS\theta} \qquad (3.2.3)$$

Burada <$L$> yansıma düzlemine dik yönde bir parçacık veya kristalin boyutunun bir ölçüsüdür. $\lambda$ x-ışınının dalgaboyu, $\beta$ pik genişliği, $\theta$ gelen ışın ile yansıma düzlemindeki normal arasındaki açı, $K$ genellikle birim olarak alınan bir sabittir.

XRD karakterizasyonu genel olarak aşağıdaki prosedürlere göre gerçekleşmektedir (Delgado, 2018);

- X-ışınları vakum altındaki kapalı bir tüp içinde üretilir,

- İlk olarak, tüp içindeki filament 20-60 kV gibi yüksek voltaj değerleri uygulanarak ısıtılır. Elektron yoğunluğu kV yüksekliği ile orantılıdır,

- Tüpten çıkan elektronlar bir bakır hedefle çarpışır ve X-ışınları üretilir. X-ışınlarının dalga boyu, ışınların çarptığı malzeme tarafından belirlenir, Daha sonra, X-ışınları numuneye yönlendirilir,

- Örnek tarama, X-ışını kaynağını, numuneyi ve dedektörleri sınır değerlerinde değiştirerek farklı açılardan ve yönlerden gerçekleştirilir.

- Numuneden yansıyan X-ışınları bir dedektör tarafından tespit edilir ve mikro işlemciler yardımıyla elektronik olarak sinyal sayım hızına dönüştürülür,
- XRD şemasındaki pikler, bu sinyallerle malzeme karakteristiği hakkında bilgi sağlar.

Kırınım piklerinin konumları ve yoğunlukları, malzemenin yapısını ve fazını belirlemek için çok önemlidir. Malzemelerin özellikleri büyük ölçüde yapıya bağlı olduğundan, faz tanımı malzemenin "parmak izi" olarak adlandırılabilir. X-ışını kırınım çalışmaları ayrıca ince film tabakalarının epitaksiyel büyümesinin doğrulanmasına izin verir. Bu amaçla ilk olarak, $\Theta$ açısı, tek kristalli bir altlık için Bragg yasasına (3.2.1) göre belirlenir. Altlık ve tabakadan elde edilen yansımaların göreceli konumlarını analiz ederek, tabakanın kristalografik hücrelerinin altlık hücrelerine göre yönelimi belirlenir. X-ışını kırınımı incelemeleri, X'pert PRO MRD (Panalitik) X-ışını difraktometresinin aparatı üzerinde, radyasyon kaynağı olarak $\lambda \leq 1{,}5418$ Å dalga boyuna sahip bir Cu-Kα lambası kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.3. X-ışını Refrektometrisi (XRR)

XRR, X-ışınlarının toplam dış yansımasının etkisini kullanarak ince katmanlı yapıların yüzeyleri ve arayüzlerini araştırmak için kullanılan analitik bir tekniktir. Refrektometri, manyetik, yarı iletken ve optik malzemelerdeki tek ve çok katmanlı yapılarla birlikte kaplamaları karakterize etmek için kullanılır. Ayrıca test edilen tabakanın kalınlığını, pürüzlülüğünü ve yoğunluğunu belirlemeyi sağlar. Ölçümler *0,1-10 θ* derece açı aralığında gerçekleştirilir. Kristal malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin kalitatif ve kantitatif incelemeleri XRR ile elde edilebilir.

Genel olarak XRR ölçüm prosedürü aşağıdaki gibidir;

- X-ışınları numune tabakasına çarpar, kırınır ve yansır,

- Tabakadan çıkan ve tabakaya yansıyan ışınların bir kısmını altlık ara tabakası, ışının doğrudan numunenin yüzeyinden yansımasını önler. XRR modelinde, bu olay dedektöre ulaşan ışın yoğunluğundaki dalgalanmalar olarak gözlenir,

- Yansıtma şiddeti, kalınlık, yoğunluk, arayüz ve yüzey pürüzlülüğü gibi katman parametreleri, her katmanın kristalinden (tek kristal, polikristal veya amorf) bağımsız olarak belirlenebilir.

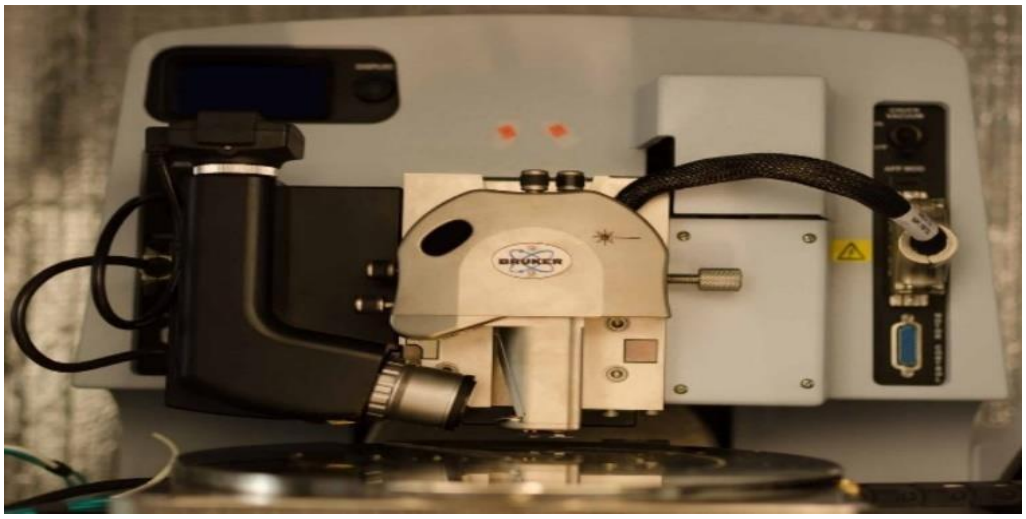
Malzeme yüzeyi pürüzlü ise, yansıtıma azalmaya neden olur. Bir altlık üzerinde, farklı bir elektronik yoğunluğa sahip başka bir materyal ile eşit şekilde biriktirilirse, altlık ile ince film arasındaki arayüzden ve ayrıca ince filmin serbest yüzeyinden yansıyan X-ışınları ya birbirine yapıcı veya yıkıcı bir şekilde müdahale eder. Bu da girişimin neden olduğu bir salınım modeliyle sonuçlanır. İlk yaklaşıma göre, bir örnek tarafından saçılan yoğunluk, elektron yoğunluğunun Fourier dönüşümünün modülünün karesiyle orantılıdır. Böylece elektron yoğunluğu profili, ölçülen yoğunluk modelinden çıkarılabilir ve daha sonra tabakaları karakterize eden dikey özellikler (tabaka kalınlıkları) ve yanal özellikler (ara yüzlerin veya yanal tabaka yapısının pürüzlülük ve korelasyon özellikleri) belirlenebilir. Bu bilgiler ışığında, ince filmlerin kalınlığının hesaplanması aşağıdaki formülasyona dayanmaktadır;

$$\theta^2{}_m = \left(\frac{\lambda}{2t}\right)^2 m^2 + {a_k}^2 \quad (3.3.1)$$

burada $\boldsymbol{\theta}$ maksimum ışın yoğunluğunun meydana geldiği açı, $\boldsymbol{\lambda}$ ışın dalga boyu, $\boldsymbol{t}$ tabaka kalınlığı, $\boldsymbol{m}$ verilen maksimum yoğunluk ve $\boldsymbol{a_k}$ kritik açı olarak verilir. Günümüzde, bu formül deneysel uygulamada nadiren kullanılmaktadır, çünkü bilgisayar simülasyonları kullanılarak, kalınlığa ek olarak, test edilen tabakanın pürüzlülüğünü ve yoğunluğu da belirlenmektedir. Bu tez çalışmasında istenilen parametreleri elde etmek için *PANalytical Reflectivity* yazılımı NanoBioMedical Center, Poznan'da kullanılmıştır.

### 3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

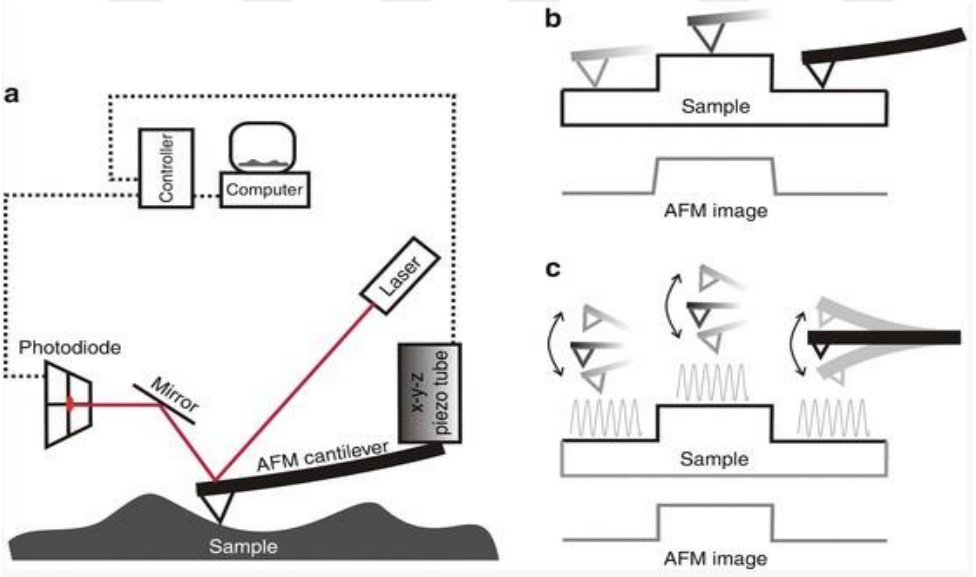
Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), yapıların nanometre ölçeğinde yüzey görüntülerinin elde edilmesini sağlar (Şekil.3.4.). Genellikle çeşitli bilim alanlarında, özellikle fizik, biyoloji ve malzeme biliminde kullanılır. Çok çeşitli malzemelerde kullanım kolaylığı bu yöntemin tercih sebebidir (Binnig vd., 1986.). AFM tekniği, uç atomlar (iğne ucu) ve numunelerin atomları arasındaki çekici Van der Waals etkileşimini kullanır. Mikro kolun serbest ucunun dikey konumuna bağlı olarak, foto dedektöre ulaşan lazer ışını, ölçüm sırasında yukarı veya aşağı hareket ettirilerek örneği analiz etmektedir.




**Şekil 3.4.** Atomik Kuvvet Mikroskobu, NanoBioMedical Center, Poznan

AFM'nin çalışma prensibine göre yüksek keskinliğe sahip iğne uçları yüksek çözünürlük sağlar ve düşük yay sabitlerine sahip konsollar, uç ve numune arasındaki kuvvetlerin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Bu kuvvetler konsolun bükülmesine veya sapmasına neden olur. Sapma, konsolun en ucunun arka tarafına odaklanan bir lazer tarafından izlenir ve oradan bölünmüş bir fotodiyot üzerine yansıtılır.

Lazer noktasının fotodiyot üzerindeki hareketi, AFM ucu üzerindeki uygulanan kuvveti sabit tutmak için bir geri besleme döngüsünde kullanılan bir elektrik sinyali değişikliğine neden olur (Şekil.3.5 a). Geri besleme döngüsü içinde, ucu veya numuneyi yukarı ve aşağı hareket ettiren bir piezoelektrik tarayıcıya voltaj uygulanır (Şekil.3.5 b). Piezonun dikey hareketleri, bir bilgisayarın yüzey topografyasının bir haritasını oluşturmasına izin verir. Temas modu görüntülemede, uç numune yüzeyi ile sürekli fiziksel temas halindedir (Şekil 3.5 c). Tarayıcı, ucu yüzey üzerinde izler ve temas kuvvetleri, topografyadaki değişiklikler üzerine konsolun bükülmesine neden olmaktadır.




**Şekil 3.5.** (a) Çeşitli AKM modlarının temel çalışma prensibi. AKM şematik gösterimi (b) contact mod (temas) gösterimi, and (c) tapping mod (temassız mod) gösterimi (Atomic Force Microscopy, Online)

Konsolun büküldüğü genlik ne kadar büyük olursa, görüntüleme kuvveti o kadar yüksek olur. Bu nedenle, temas modu (contact mode) genellikle yumuşak

(biyolojik numuneler gibi) veya hasar görmüş numunelerin AFM görüntülemesinde kullanılır. Bu tez çalışmasında tapping (temassız) modu kullanılmıştır.

AFM tekniği esas olarak iğne ucu ve numune arasındaki atomların Van Der Waals etkileşimlerine dayanır. Bu kısa menzilli itici etkileşimin doğası nedeniyle, mikroskopun çalışma modları aşağıdaki gibi özetlenebilir (AFM, Online);

- Temas modunda iğne ucu numune ile doğrudan temas halindedir. Burada kısa menzilli itici güçler hakimdir.

- Temassız mod, iğne ucu numune yüzeyinin 1 ila 10 nm üzerinde bulunur. Burada, esas olarak elektrostatik veya manyetik kuvvetlerin yanı sıra Van der Waals kuvvetlerini çeken uzun menzilli kuvvetler kullanılır.

- Aralıklı temas modunda iğne ucu titreşir ve numunenin yüzeyini tarar. Bu noktada, uzun menzilli kuvvetlere ek olarak, kısa menzilli kuvvetler de önemlidir. Bu modun avantajı, yüzeyin sürtünmesi ve sallanması nedeniyle numunenin hasar görmesini önlemesidir. Ayrıca bir faz görüntüsü elde etmenizi sağlar. İğne ucu farklı bir kimyasal bileşime sahip bir alanla karşılaştığında, kaydedilen salınım sinyalinin fazı, iğne atomları ve numune atomları arasındaki etkileşime bağlı olarak değişir.

AFM uçları ya saf silikondan ya da silikon nitrürden yapılmıştır. Uçları sentezlemek için geleneksel fotolitografi kullanılır. Biri örneğin 1cm × 1cm'lik bir silikon gofret parçasıyla başlar. Uç için desen, bir hizalayıcı ile standart fotolitografi kullanılarak tanımlanır. Bunu, açığa çıkan silikon oksidin (BHF solüsyonu kullanılarak) çıkarılması takip eder. Maruz kalmayan fotorezist, numunelerin asetona daldırılmasıyla sıyrılır.

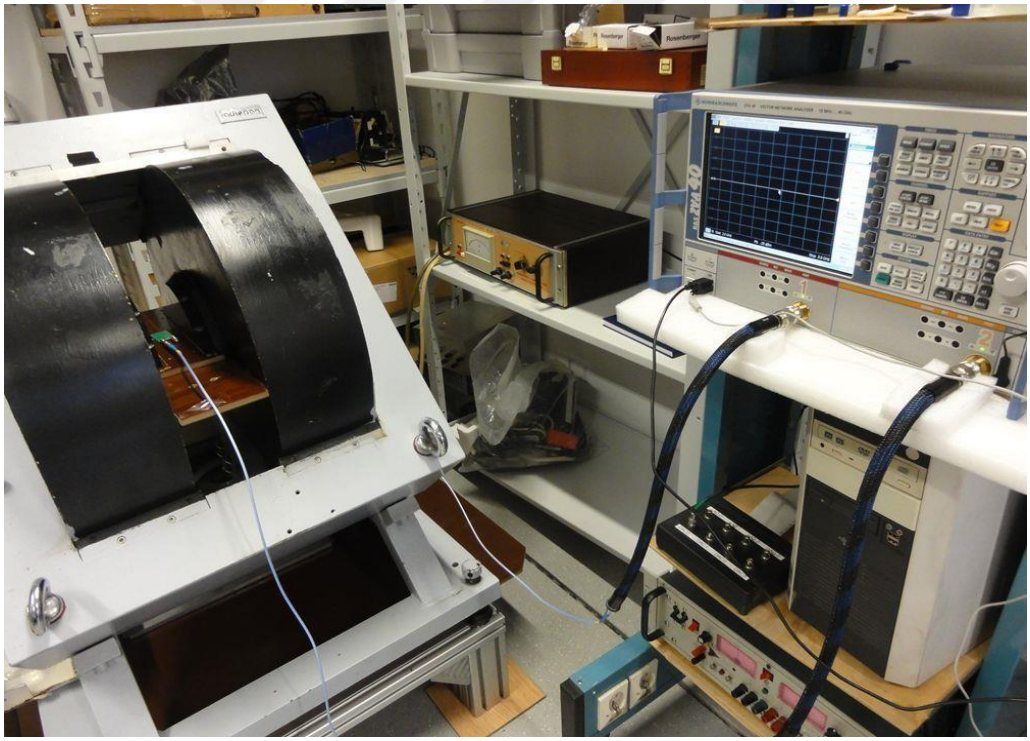
İnce filmlerin yüzey topografyası çalışmaları sırasında belirlenen ana istatistiksel parametrelerden biri ortalama yüzey pürüzlülüğü (RMS değeri), iğne ucunun kök içinde pozisyon varyansı olarak tanımlanmaktadır:

$$RMS = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^{N} (z_i - z)^2} \qquad (3.4.1)$$

burada $z_i$ iğnenin pozisyonu, $z$ ortalama pozisyon, $N$ toplam iğne pozisyonları sayısıdır. Bu tez çalışmasında Gwyddion programı (Gwyddion.net) ile RMS ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

### 3.5. Vektör Ağ Analizörü ve Ferromanyetik Rezonans Spektroskopisi) (VNA-FMRS)

Ferromanyetik rezonans spektroskopisi, dinamik manyetik alanların özelliklerin incelenmesini sağlar. Ölçüm sistemi, bir vektör ağ analizörü (VNA), bir eş düzlemli dalga kılavuzu ve koaksiyel kablolarla analizöre bağlı bir elektromıknatısdan oluşur (Şekil 3.6.). Vektör ağ analizörü, mikrodalga frekansında değişken bir akım kaynağıdır. Bu değişken değerler, akımın genliğini ve fazını ölçmeye izin veren bir matrisin parametreleri olarak ifade edilir (Chiang, 2002).



**Şekil 3.6.** Vektör Ağ Analizörü-Ferromanyetik Rezonans seti; Polonya Bilim Akademisi İnce Film Fiziği Departmanı, Poznan

Sistem, bir eş düzlemli dalga kılavuzu, iletken bir merkezi şerit ve topraklama görevi gören iki yarım düzlemden oluşur. Merkezi hat üzerinde akan alternatif bir elektrik akımı, alternatif bir manyetik alana neden olur. Eş düzlemli dalga kılavuzu, elektromıknatısın polar plakaları arasında, indüklenen alternatif manyetik alanın vektörleri, sabit harici manyetik alana dik olacak şekilde, yani Larmor koşulunu karşılayacak şekilde düzenlenmiştir (Vector Network Analyzer, 2020). Ölçüm alınacak örnekler dalga kılavuzunun merkez çizgisine yerleştirilir.

Ferromanyetik rezonans ölçümleri, seçilen sabit akım frekansını belirleyerek ve harici manyetik alanın gücünü değiştirerek gerçekleştirilir. Rezonans koşulları altında, numune, eş düzlemli dalga kılavuzunda indüklenen elektromanyetik alanın enerjisinin bir kısmını emer, bu da iletimin azalmasına neden olur ve ferromanyetik rezonans absorpsiyon sinyali gözlenir. Bu tez çalışmasında Polonya Bilim Akademisi İnce Film Fiziği bölümünde vektör ağ analizörü ile ferromanyetik rezonans (VNA-FMR) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

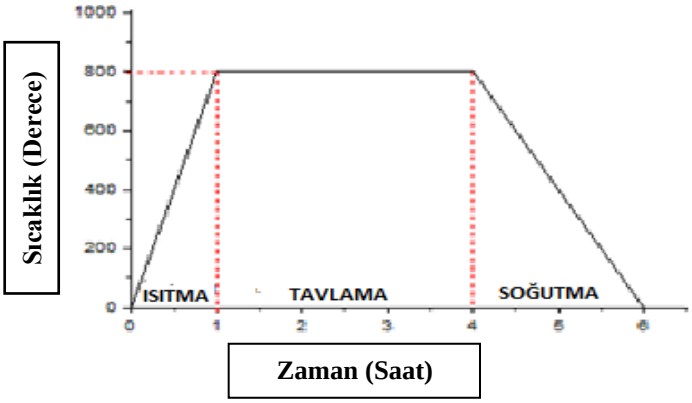
# 4. BULGULAR

Üretimi tamamlanıp ölçümleri alınan bütün numuneler Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir. Üretim teknik ve detay ayrıntıları bölüm 3.1.'de açıklanan örnekler; Polonya Bilim Akademisi İnce Film Fiziği Bölümü'nde PLD cihazı ile biriktirildi. Kullanılan tüm altlıklar (GGG, YAG, Si) PLD cihazında aynı tutucuya yerleştirildi ve tek bir çalışma ile biriktirildi. Buradaki amaç bölüm sonunda, açıklandığı gibi aynı numunelerin aynı koşullar altında farklı altlıklarda biriktirilmesi ile farklı kalınlık değerlerine ulaşmalarını karşılaştırmaktır. PLD ile YIG ince filmleri biriktirmeden önce örneklerin biriktirme ile amaçlanan kalınlığı Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir. Biriktirme işlemleri literatüre uygun olarak yapılmıştır.

**Çizelge 4.1.** Altlıklara göre biriktirilen ince film numuneleri numaraları ve öngörülen kalınlıkları

| **Kalınlık (nm)** | **GGG Altlık Örnek No** | **İAG Altlık Örnek No** | **Silisyum Altlık Örnek No** |
|---|---|---|---|
| 10 | 5589 | 5589 | - |
| 20 | 5588<br>5590<br>5591 | 5588 | - |
| 30 | 5587 | 5587 | 5587 |
| 35 | 5579-1<br>5579-2 | | - |
| 40 | 5586 | 5586 | - |
| 60 | 5585 | 5585 | - |

YIG ince filmleri, oda sıcaklığında oksijen atmosferinde Darbeli Lazer Biriktirme tekniği kullanılarak biriktirildi ve daha sonra yeniden kristalizasyon için yüksek sıcaklıklı fırında tavlandı. İlk tavlama işleminde, numuneler 180 dakika boyunca $800^0C$ tavlandı ve daha sonra $6{,}5^0C\ /dk$ hızında 120 dakika boyunca soğutuldu (Şekil 4.1.).




**Şekil 4.1.** Sıcaklık ve zamana bağlı olarak tavlama işlemi aşamaları




**(a)** **(b)**

**Şekil 4.2.** Sırasıyla (1'den 8'e) tavlamadan önce üretilen ince film numuneler (a), tavlama işleminden sonra numuneler (b)

İlk tavlamadan önce, numuneler gözenekli bir yapıya sahipken, ikinci tavlamadan sonra kompakt hale geldiği gözlemlendi. Biriktirilen ince filmler, kısmen oksijen eksikliğinden dolayı koyu kahverengi olarak elde edildi ve zayıf bir kristal yapıya sahip olduğu raporlandı (Şekil 4.2a). İnce filmler ikinci tavlamadan sonra yeniden kristalleşti ve böylece daha açık sarı göründü (Şekil 4.2b). Tüm tavlama işlemleri, üretilen ince filmleri epitaksiyel tabakalara dönüştürmek için yapıldı. Böylece biriktirilen filmlerin manyetik tepki göstermesi sağlandı, tavlamadan önce biriken ince filmler manyetik düzensizliğe sahiptir.

Aparatların içinde tavlanan ince film örneklerinin yerleri Şekil 4.2.'deki sayılarla gösterilmiştir. Sayılara karşılık gelen örneklerin bilgileri Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Tavlama için ince film numunelerinin aparata yerleştirilme sırası

| **Numunelerin Sırası** | **Altlıklar ve Biriktirilen İnce Filmler** | | | |
|---|---|---|---|---|
| **1** | **5585 İDG/GGG 60nm** | **5585 İDG/İAG 60nm** | **5585 İDG/$GsScO_3$ 60nm** | **5585 İDG/Si 60nm** |
| **2** | **5586 İDG/GGG 40nm** | **5586 İDG/İAG 40nm** | **5586 İDG/Si 40nm** | - |
| **3** | **5587 İDG/GGG 30nm** | **5587 İDG/İAG 30nm** | **5587 İDG/Si 30nm** | - |
| **4** | **5588 İDG/GGG 20nm** | **5588 İGD/İAG 20nm** | - | - |
| **5** | **5589 İDG/GGG 10nm** | **5589 İDG/GGG 10nm** | - | - |
| **6** | **5590 İDG/GGG 20nm** | - | - | - |
| **7** | **5591 İDG/GGG 20nm** | - | - | - |
| **8** | **5592 İDG/GGG 190nm** | **5592 İDG/Si 190nm** | - | - |

## 4.1. PLD Tekniği ile İnce Film Tabakalarının Elde Edilmesi

YIG (111) ince film tabakaları, GGG (001), YAG (001) ve Si altlıklarında DLB tekniği ile elde edildi ve yeniden kristalizasyon için tavlandı (3 saat-800°C). Tavlama işleminden önce numuneler üzerinde ölçüm yapılmamıştır. Bunun nedeni numunelerin manyetizasyon ölçümleri için iyi derece kristalize olması gerekliliğindendir. Üretim aşamasındaki parametreler Çizelge 4.3'de sunulmuştur. Tüm altlıklar benzer koşullar altında biriktirildi. Aynı koşulların farklı altlıklar üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Katmanların kalınlığını planlamak ve tahmin etmek için YIG biriktirme oranı belirlendi. Seçilen altlıklara göre biriktirilen numunelerin numaraları Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Darbeli Lazer Biriktirme işleminde baz alınan parametreler

| **Parametreler** | **Değerler** |
|---|---|
| Lazerin Dalgaboyu | 355 nm |
| Lazerin Frekansı | 2 Hz |
| Hedef ve Kaynak Arasındaki Mesafe | 6 cm |
| İç Ortam Basıncı | $1x\ 10^{-7}$ mbar |
| Oksijen Basıncı | $2{,}4x10^{-4}$ mbar |
| Altlık Sıcaklığı | $650^{o}C$ |
| Lazer Işınları Enerji Yoğunluğu | 3,7 m/ J |
| Toplam Puls Sayısı | Minimum = ~ 2000<br>Maksimum = ~ 32000 |
| Biriktirme Zamanı | Minimum = 11 dk<br>Maksimum = 107 dk |
| Büyütme Oranı | 0,8-1 ~ nm/dk |

**Çizelge 4.4.** Altlıklar ve numunelerin numaraları

| **Altlıklar** | **Numune Numaraları** |
|---|---|
| **GGG (001)** | 5579-1, 5579-2, 5585, 5586, 5587, 5588, 5589, 5590, 5591, 5592 |
| **YAG (001)** | 5588, 5586, 5587, 5588, 5589 |
| **$GdScO_3$(110)** | 5585 |
| **Si(001)** | 5585, 5586, 5587, 5592 |

YIG ince film tabakaları, Çizelge 4.4.'te sunulan altlıklarla birlikte başarıyla biriktirildi. Yapılan çalışmalar, konuyla ilgili önceki çalışmalarla uyumluluk ve tutarlılık göstermektedir. Bu tez çalışması PLD üzerine yapılan çalışma literatürüne yeni bir katkı sağlamıştır.

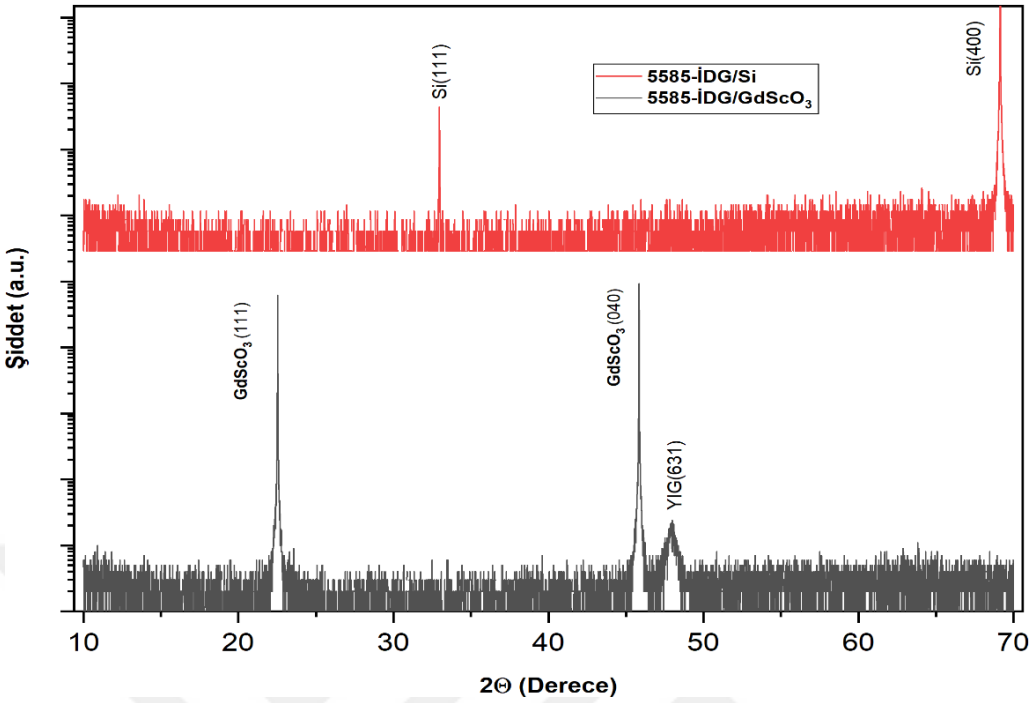
## 4.2. YIG İnce Filmlerinin XRD ve XRR Karakterizasyonu

XRD ve XRR ölçümleri, GGG, YAG, GDSCO ve Si altlıklar ile biriken farklı kalınlıktaki ince film katmanlarını karakterize etmek için kullanıldı. Bu ölçümlerden film katmanlarının kristal yapısı ve kalitesi hakkında bilgiler elde edildi. Tüm numuneler için ölçümler NanoBioMediCal Center X-ışını refraktometri ekipmanı ile gerçekleştirildi. Özel bir yapıştırıcı (yeşil renk) ile sabitlenmiş ince film örnekleri, Şekil 4.3.'de gösterildiği gibi analiz için tutacağa yerleştirildi.



**Şekil 4.3.** X-ışını kırınımı ölçümleri için numunelerin yerleştirilmesi

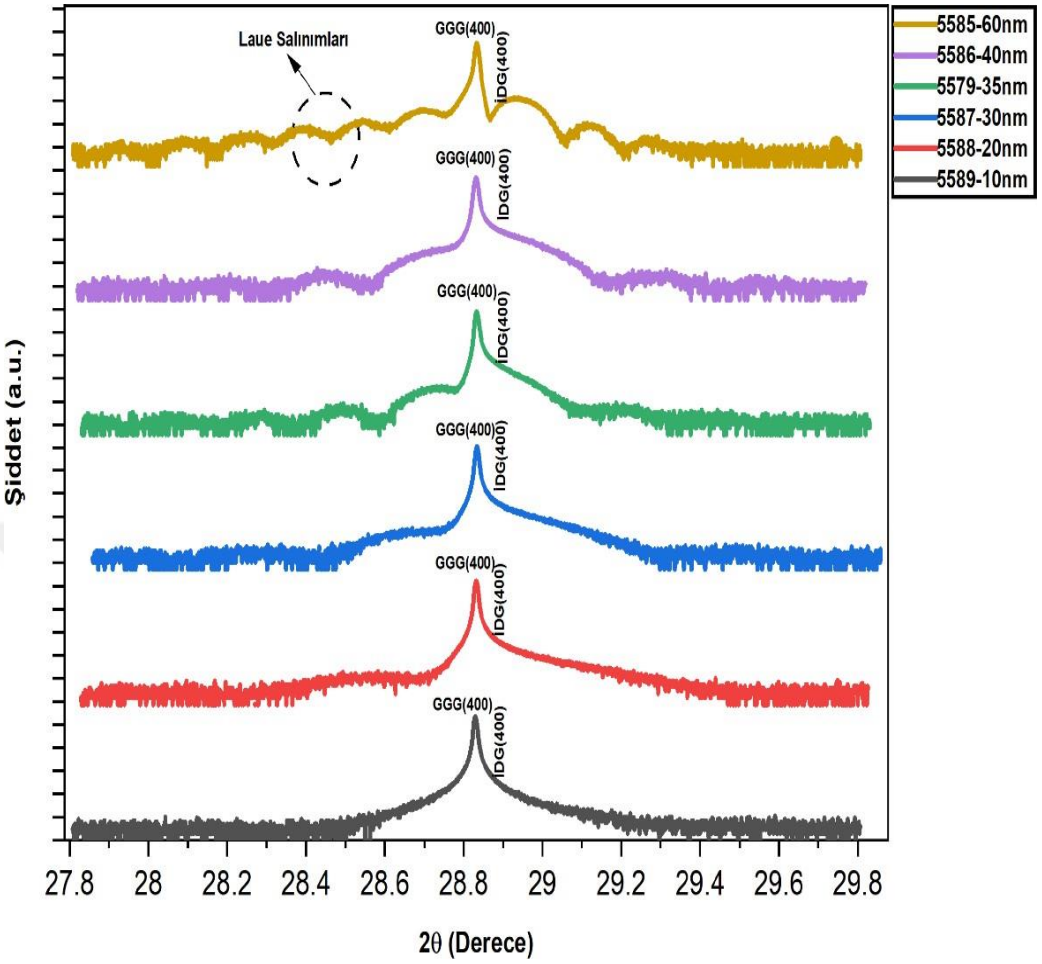
Şekil 4.4.'de farklı altlıklara sahip YIG ince film örnekleri için geniş açı (2θ = 10-70 derece) ölçekli XRD piklerini göstermektedir. Miller kırılma indislerini veren zirveler, Silisyum (111)-(400) ve GDSCO (111)-(040) olarak elde edildi. Bu piklerin ve örgü parametrelerinin konumları, numunelerin kalınlığı ile grafikte gösterilmiştir. Elde edilen pikler, X-ışını kırınım deseninin polikristal olduğunu doğruladı. Her iki farklı altlıkda da aynı büyüme sıcaklığı altında biriken filmler için, zirvelerin kırınım yoğunluklarının farklı olduğu gözlendi.




**Şekil 4.4.** 5585-60 nm örneği için XRD deseni sonuçları

Silisyum altlığı için en güçlü tepe (400) pikinde elde edildi. YIG kristalinin kırınım piki gözlenmemiştir. GDSCO altlığında biriken ince filmin kırınım piki (631) açıkça elde edilmiştir. Tercih edilen altlık için biriktirilen filmde bu pikin elde edilmesi iyi bir kristal yapının oluştuğunu ortaya koymaktadır. GGG ve YAG altlığında biriktirilen YIG ince film tabakalarının yapısal özellikleri dar açılı bir ölçekte X-ışını kırınım desenleri tek bir grafik üzerinde incelenmiştir (Şekil 4.5-4.6).

Çizelge 4.5., GGG zirvelerinin sağ tarafında görüntülenen GGG ($2\theta = 28{,}831^{o}$) (400) altlığının kırınım zirvesini ve IDG (400) film katmanını göstermektedir. Analiz edilen pikler, 00L ailesinden başka kristal yönlerin olmadığını gösterdi. Bu şekilde, genel bir 00L dokuya sahip pikler, üretilen numunelerin altlık ile uyum sağladığını gösterdi. Piklerin örgü sabitleri pik listesine göre 2θ açısına karşılık gelen açılardan belirlendi. Ayrıca XRD tarama sonuçlarından elde edilen YIG pikleri arasında küçük açısal farklılıklar gözlendi; fakat bu durum ince filmin yapısında önemli bir fark göstermek için yeterince anlamlı değildir.




**Şekil 4.5.** GGG altlığında biriktirilen 10,20,30,35,40 ve 60 nm kalınlığa sahip İtriyum Demir Granat (YIG) filmlerinin X-ışını kırınım desenleri (2θ = 27,5-30)

Düşük kalınlıkta (10, 20, 30 nm) YIG kristal yapısının kırınım pikleri açıkça gözlemlemek zordur. Bunun nedeni, YIG kafes parametresine çok yakın olması ve (004) pikinin kuyruğu tarafından tutulmasıdır. Beklenildiği gibi karakteristik tek tip zirve piki gözlendi ($\alpha_{IDG}$ =1,3800 $\alpha_{GGG}$=1,2383 nm). Piklerin diğer kalınlıklar için ayrı ve net bir şekilde görülmesi, kübik kafes parametresinin toplu kafes parametresinden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu noktada, oksijen boşluklarının ve katyon geçişlerinin gözlemlerimizi etkileyen faktörler olabileceğini belirtmek yararlıdır, ancak bu yönleri desteklemek veya ispatlamak için stokiyometrik analiz yapılmasına gerek duyulmamıştır.

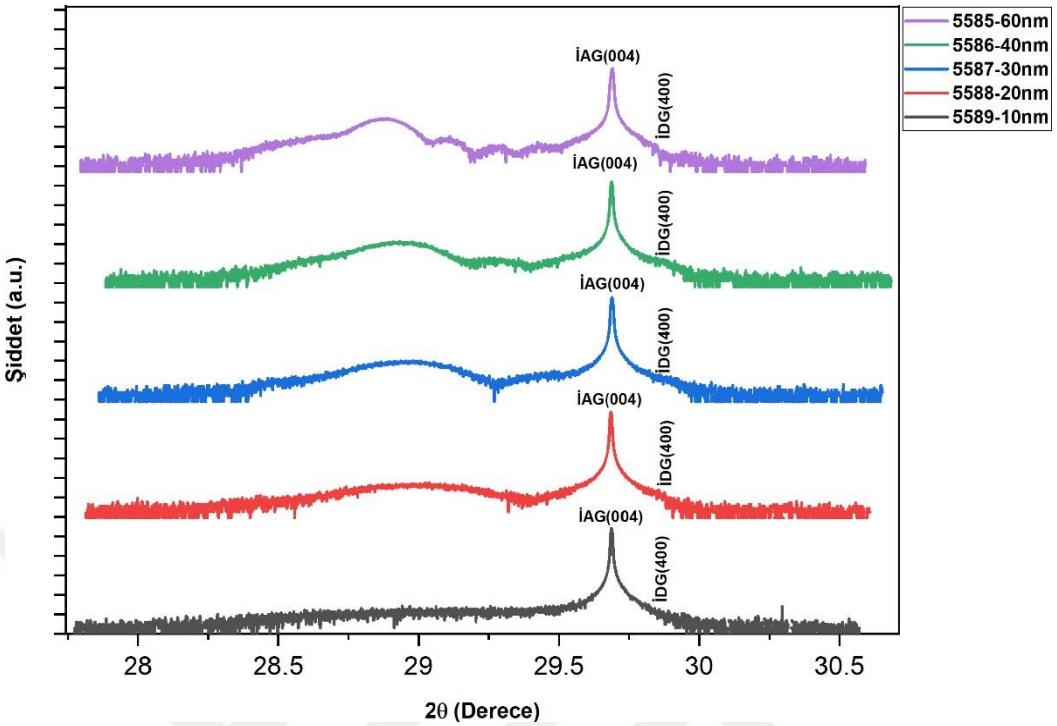
Benzer şekilde YAG altlığı üzerinde biriktirilen YIG filmlerinin XRD pikleri

Şekil 4.6.'da verilmiştir. GGG altlığında olduğu gibi benzer ve kaliteli YIG pikleri YAG altlığında sağ tarafta elde edilmiştir. Çok düşük kalınlıkta (10-20 nm gibi) YIG piklerini YAG kafes parametlerine çok yakın olduğundan gözlemlemek zorlaşmıştır.

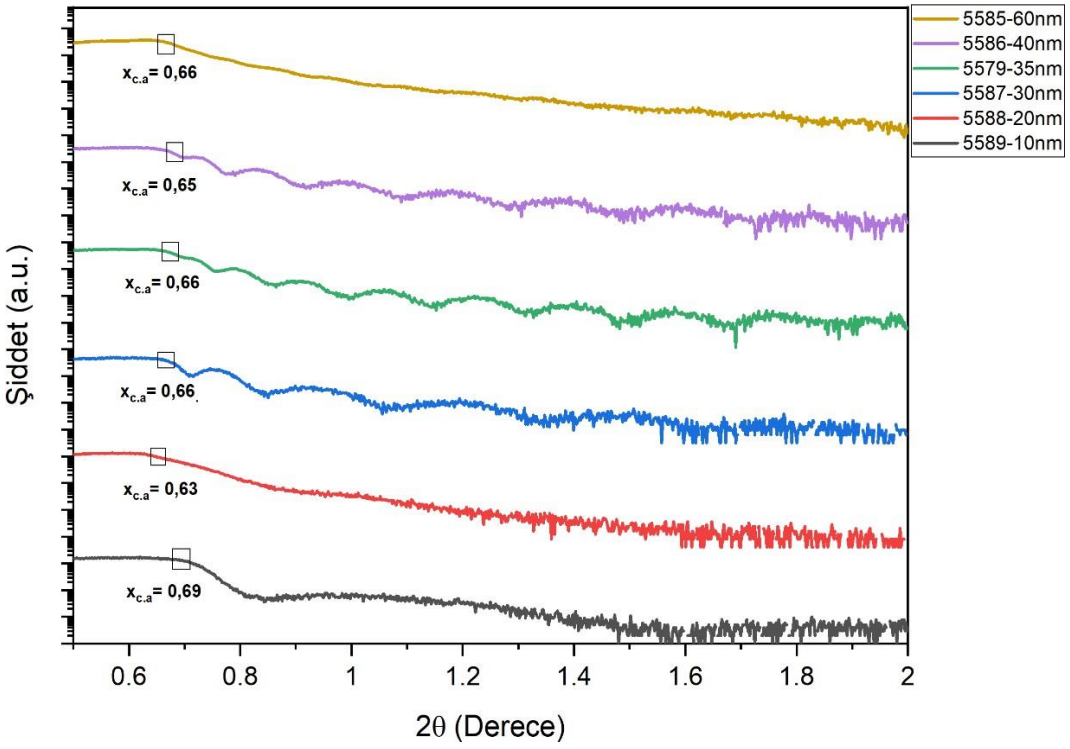
Üretilen ince film tabakalarının kalınlığını ve yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için X-ışını refrektometresi (XRD) tekniği kullanılmıştır. XRD taramalarında gelen ışın film kalınlığına nüfuz eder ve altlık/film arayüzünden yansıtılır. GGG altlık üzerinde biriktirilen YIG ince filmlerin XRD kırınım desenleri kritik açılarının ($\boldsymbol{x_{ca}}$) yerleri ile birlikte Şekil 4.7.'de gösterilmiştir. Kritik açı değerleri grafik çizgileri üzerinden direkt okunarak elde edilmiş ve grafik üzerinde gösterilmiştir. Üretilen filmlerin kalınlığı azaldıkça kırınım piklerinde azalma gözlenmiştir. Bu sonuç kafes parametresi uyumunu sağlamaktadır.

Malzemenin yapısına uygun olarak, literatüre karşılık gelen zirveler beklenen $2\theta$ aralığında elde edildi. Yarım yükseklik tepe genişliği (FWHM) ölçümleri film kristallerinin kırınım zirvelerinden alınmıştır. Bu ölçümler aynı zamanda film piklerinin ideal yerini de göstermiştir. Piklerin fitlenmesi sürecindeki ana zorluk piklerin sağ tarafındaki film kristallerinin kırılma zirvelerinin her zaman açıkça görülmemesidir. Bu çalışmada da düşük kalınlıktaki numunelerin (10 ve 20 nm) gözlemlenmesi zor olan pikleri GGG'nin (400) sağ tarafında elde edilmiştir.

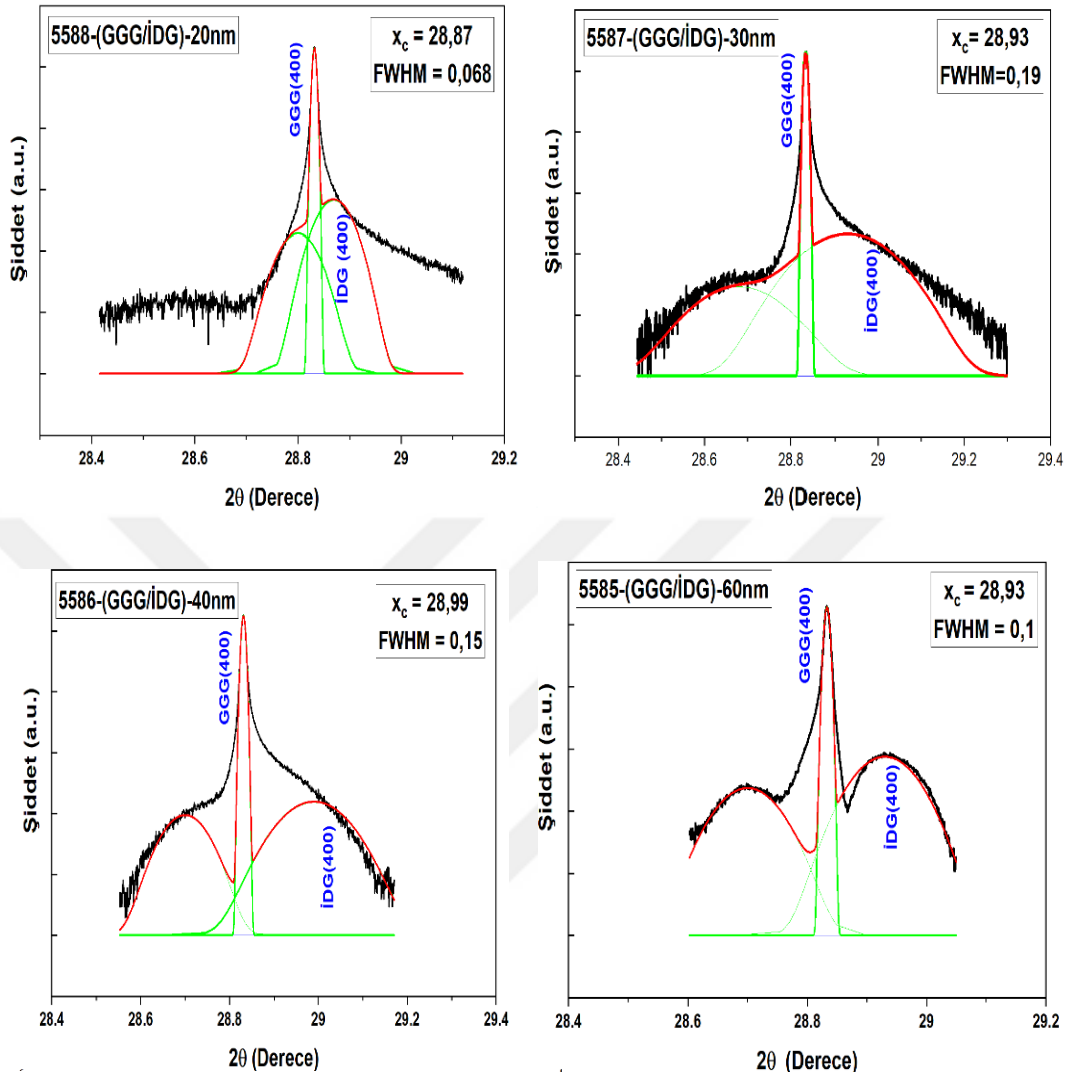
XRD ölçümünün sonuçlarından; örgü parametreleri ve tane büyüklüğü gibi ince filmlerin yapısı hakkında bilgi elde edilmiştir. Kırınım zirvelerinin yeri ve her örnek için örnek bilgileri grafikte gösterilmiştir. Bu parametreler, üretilen filmlerin kalite tespitini karşılaştırmak için oldukça yararlıdır. Elde edilen tüm veriler Çizelge 4.5.'te özetlenmiştir




**Şekil 4.6.** YAG altlığında biriktirilen 10,20,30,40 ve 60 nm kalınlığa sahip İtriyum Demir Granat filmlerinin X-ışını kırıım desenleri (2θ = 28-31)




**Şekil 4.7.** 10, 20, 30, 35, 40 ve 60 nm kalınlıktaki ince film numunelerinin XRR grafikleri




**Şekil 4.8.** 20,30,40 ve 60 nm kalınlıklı YIG (İDG) filmler için pik pozisyonları ($x_c$) ve FWHM ölçümleri

GGG altlığı üzerinde biriktirilen bütün YIG örnekleri için XRD çizgileri ayrı ayrı olarak Şekil 4.8.'de verilmiştir. Böylece aynı büyüme koşulları altında farklı kalınlıklara sahip ince filmlerin incelenmesi ve numunelerin doğrudan karşılaştırılması için genel bir çerçeve sağlanmıştır. Grafiklerde gösterilen altlık zirvelerinin sol ve sağındaki salınımlar, tabakaların iyi tanımlanmış bir kristalografisi ile ilgili olan YIG filmlerinin Laue salınımlarıdır (kalınlık saçakları). Grafiklerden her bir örnek için yüksek kristallik gösteren Laue salınımları gözlendi.

**Çizelge 4.5.** XRD sonucu elde edilen veriler

| *Örnekler* | *Kritik Açı (2θ)* | *Kalınlık (nm)* | *Yoğunluk* $(g/cm^3)$ | *Pürüzlülük (nm)* |
|---|---|---|---|---|
| **5589(YIG/GGG)10 nm** | 0,69 | 9,62 | 5,64 | 0,77 |
| **5588(YIG/GGG)20 nm** | 0,63 | 17,70 | 5,58 | 0,89 |
| **5587(YIG/GGG)30 nm** | 0,66 | 26,32 | 5,64 | 0,75 |
| **5579(YIG/GGG)35 nm** | 0,66 | 42,84 | 5,93 | 0,81 |
| **5586(YIG/GGG)40 nm** | 0,65 | 36,61 | 5,72 | 1,06 |
| **5585(YIG/GGG)60 nm** | 0,66 | 54,54 | 6 | 0,85 |

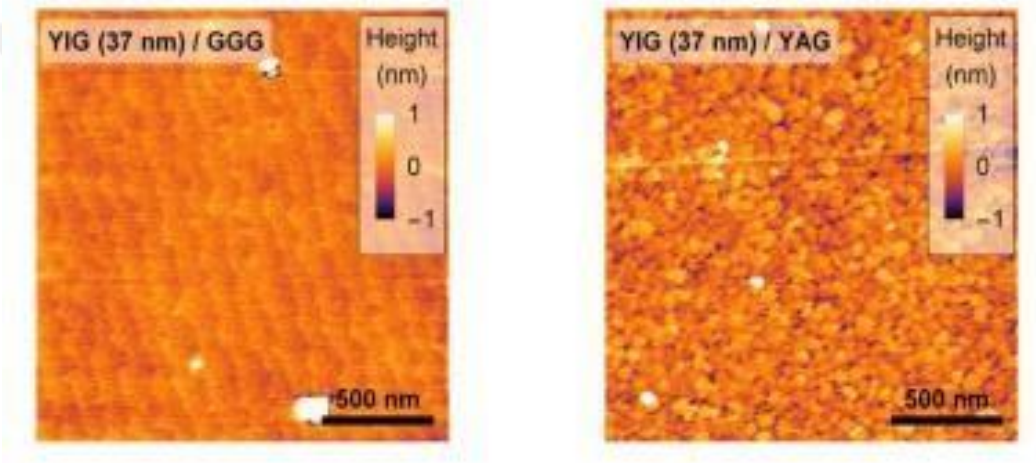
Kırınım sonuçlarından elde edilen gerçek film kalınlıkları, beklenen film kalınlıklarına çok yakın değerlerde elde edildi. Bu noktada biriktirme sürecinin başarılı olduğu vurgulanmalıdır. Katmanların kalınlıkları, işlemden önce tahmin edilen değerlere göre %10'dan az hata ile üretilmiştir. Bölüm 2.4.'de bahsedildiği gibi istenilen veriler gerekli formül ve yazılım programlarıyla elde edilmiş ve Çizelge 4.6.'de verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** X-ışını karakterizasyonu ile elde edilen veriler

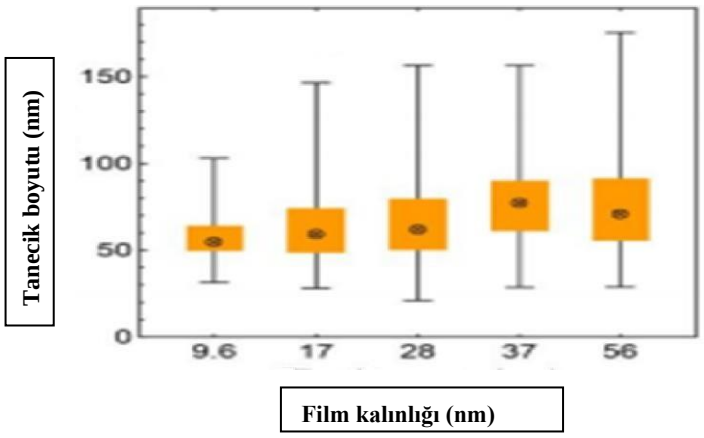
| **İnce Film Numuneleri** | **Veriler** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ***Kalınlık (nm)*** | ***Pik Pozisyonu (derece.)*** | ***FWHM (derece)*** | ***Kafes Sabiti (nm)*** | ***Tanecik Boyutu (nm)*** |
| **5589(YIG/GGG)** | **10** | **28,94** | **0,25** | **1,234** | **34,29** |
| **5588(YIG/GGG)** | **20** | **28,93** | **0,20** | **1,237** | **42,86** |
| **5587(YIG/GGG)** | **30** | **28,93** | **0,19** | **1,234** | **45,12** |
| **5579(YIG/GGG)** | **35** | **28,90** | **0,10** | **1,235** | **85,72** |
| **5586(YIG/GGG)** | **40** | **28,99** | **0,15** | **1,232** | **57,16** |
| **5585(YIG/GGG)** | **60** | **28,93** | **0,10** | **1,234** | **85,72** |

### 4.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile YIG Katmanlarının Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi

AFM yüzey topografya haritaları, YAG ve GGG altlıkları üzerinde biriktirilen YIG filmleri arasında belirgin bir fark göstermektedir (Şekil 4.9). GGG üzerinde biriktirilen film, ≥ 120 nm uzunluğunda ve ≥ 0.4 nm yüksekliğinde teraslar sergilerken, YAG üzerinde biriken filmler için yeniden kristalleşme, farklı yanal boyutlardaki tanelerin oluşmasına neden olmuştur. Her ayırt edilebilir tanenin $(A)$ alanı ölçüldü ve tane çapı tahmin edildi ($d = 2\sqrt{A/\pi}$). Tane büyüklüğü dağılımının istatistikleri gösterildi (Şekil 4.10).




**Şekil 4.9.** GGG ve YAG altlıkları üzerinde biriktirilen YIG ince filmlerinin AFM görüntüsü

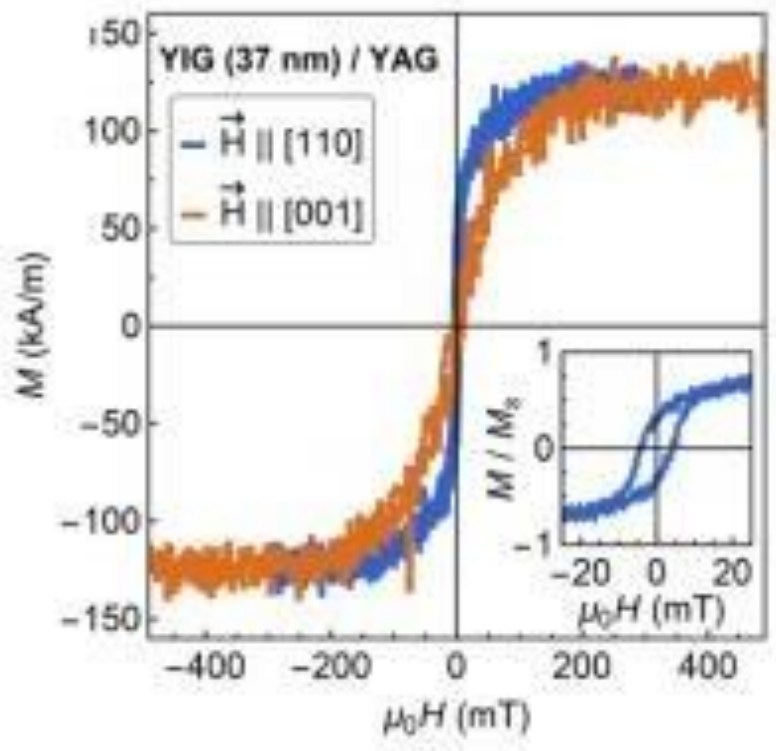



**Şekil 4.10.** Film kalınlıklarına göre tanecik boyutu dağılımları; her film kalınlığı için istatistikler 300 ölçüme dayanır

### 4.4. Manyetik Ölçüm Sonuçları

Filmlerin doygunluk manyetizasyonu üretilen örnekler arasında tutarlı olarak elde edildi (Çizelge 4.13.). Yaklaşık olarak 125 kA/m'deki değerler daha önce bildirilen değerlerle uyumludur (Coey, 2010). Bu tez çalışmasında biriktirilen ve yeniden kristalize edilen İDG filmleri için ölçülen 118 kA/m değeri; daha önce rapor edilen (Jermain, 2016) 140 kA/m değerinde YIG ile karşılaştırıldığında biraz azalmış olsada, toplu değerden küçük sapma, ince oksijen ve katyon nonstekiyometrisinin bir sonucu olarak anlaşılabilir.

YIG/GGG örneklerinde, $\mu_0 H$ = 0.4 Mt koersivite ve IP ekseni boyunca ölçülen dikdörtgen histerezis döngüsü gözlenmemiştir. YAG üzerine biriktirilen YIG ince filmleri için histerezis döngüsü $\mu_0 H$ = 4.5 mT artan koersivite ve $r/Ms$ = 0.4 doygunluk manyetizasyon oranına (Arias, 1999) devam ettiğini ortaya koymaktadır (Şekil 4.11.). Ek olarak, manyetizasyon ters eğrisinin yuvarlak bir doygunluğa ulaştığı gözlemlendi. Gözlenen manyetostatik yanıt, gergin filmler için tipik olarak bulunmuştur ve uyumludur. Altlıktan kaynaklı bir diyamanyetik alan katkısı gözlemlenmiştir.




**Şekil 4.11.** 37 nm kalınlığında YIG/YAG ince film histeresis eğrisi

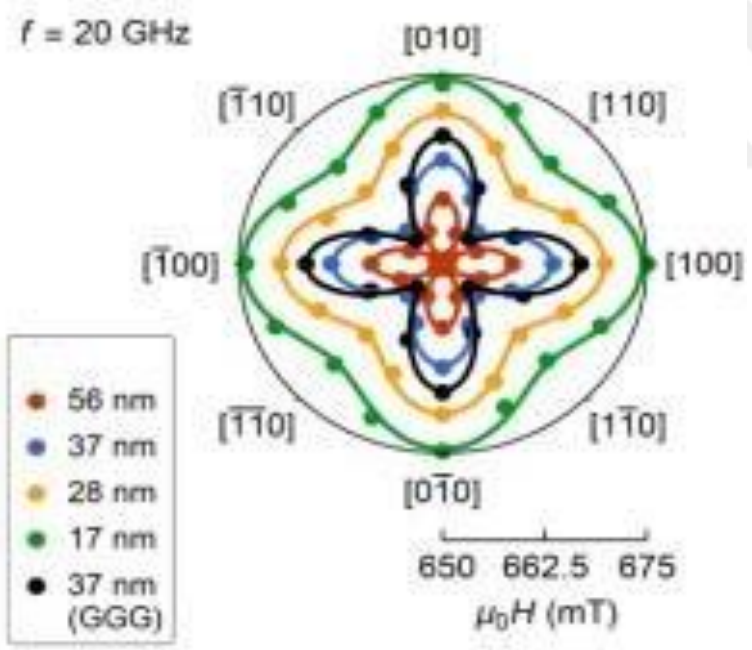
Ferromanyetik rezonans ölçümleri (FMR), İDG birim hücrelerinin düzlemde iyi düzenlendiğini gösterdi. Sonuçlar (Şekil 4.12) filmlerin dört kat simetri ile manyetokristal anizotropiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Kittel denklemi kullanarak hesaplar yapılmıştır;

$$f = \frac{\mu_0 \gamma}{2\pi} \sqrt{(H + H_c \cos 4\theta_H)\left(H + \frac{1}{4} H_c (3 + \cos 4\theta_H) + M_{\text{eff}}\right)}, \quad (4.1)$$

$$M_{\text{eff}} = M_s - H_u, \quad (4.2)$$

burada $\boldsymbol{H_c}$ manyetokristal anizoropik alan, $\boldsymbol{H}$ manyetik alan, $\boldsymbol{f}$= 20.000 GHz frekans, $\boldsymbol{\theta_H}$ IP açısı, $\boldsymbol{H_u}$ düzlem dışı anizotropik alandır.

Elde edilen $\mu_0 H_c$ verileri bildirilen verilerle uyumlu olarak 4.6 - 9.5 mT aralığında raporlanmıştır.




**Şekil 4.12.** Sabit bir frekansta kaydedilen rezonans alanının düzlem içi açısal bağımlılığı f= 20 Ghz

Bu tez çalışması sırasında gerçekleşen tüm manyetizma ölçüm verileri Çizelge 4.7'de özet olarak sunulmuştur.

**Çizelge 4.7.** Numunelerin kalınlıklarına göre (t) sıralanmış datalar

| **Kalınlık (nm)** | **RMS (nm)** | $\boldsymbol{M_s}$ $\boldsymbol{(K_a/m)}$ | $\mu_0\boldsymbol{H_c}$ **(mT)** | $\boldsymbol{M_{eff}}$ $\boldsymbol{(K_a/m)}$ | $\mu_0\boldsymbol{H_u}$ **(mT)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **10** | 0,4 | - | - | - | - |
| **20** | 1 | 127∓ 6 | 4,6∓0,3 | 68∓3 | 71,6∓3,8 |
| **30** | 1,1 | 119∓ 8 | 5,1∓0,2 | 79∓1 | 57,8∓1,3 |
| **35** | 0,3 | 131∓6 | 5,9∓0,3 | 95∓2 | 37,7∓2,5 |
| **40** | 0,3 | 123∓6 | 5,7∓0,2 | 101∓1 | 30,2∓1,3 |
| **60** | 0,2 | 122∓6 | 9,5∓0,3 | 103∓1 | 27,6∓1,3 |

Bu tez çalışmasında DLB yöntemi ile üretilen İDG epitaksiyel ince film tabakalarının yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. İnce filmler yapısal düzenlilik içerisinde ve iyi özelliklere sahip manyetik malzemeler olarak elde edilmiştir.

- Üretilen numuneler yüksek yapısal düzen ile karakterize edildi
- Yüzey pürüzlülükleri literatürdeki değerlerle uyumlu elde edildi

-Örgü ile eşleşmeyen altlık üzerinde YIG'ın yeniden kristalleşmesi, yüksek sıcaklıkta çökelmeye kıyasla farklı yapısal ve manyetik özelliklere neden olabilir. Gerilme deformasyonunun bir sonucu olarak, düzlem dışı anizotropi alanının pozitif değerleri belirlendi ve bu da çok arzu edilen anizotropiye ulaşmanın yolunu açtı.

- Filmlerin büyüme koşulları tahmin edildi ve başarıyla gerçekleştirildi

-Gerinim kontrolü, diğer granatların anizotropi ayarında da önemli bir rol oynayabileceği sonucuna varıldı

- İDG / İAG filmleri için linewidth belirgin bir şekilde artmış olarak elde edildi.

-5 ila 30 GHz arasındaki tüm frekans aralığında alışılmadık bir negatif eğim gözlemlenmedi

- Film katmanları homojen bir şekilde elde edildi.
- Düşük mıknatıslanmayı yansıtan dar manyetik rezonans çizgi genişlikleri elde edildi.

Yukarıda elde edilen bulgular, tez çalışmasının başarıyla sonuçlandığını vurgulamaktadır. İDG ince film üretim teknolojisi, çalışma amacına ulaşmıştır. Ayrıca fiziksel özellikleri belirlemek için dikkat çekicidir. Anizotropi sabitlerini belirlemek için doygunluk manyetizasyon değerlerinin belirlenmesi ve sırayla ilk önce tabakaların kalınlığını belirlemek gerekiyordu. Seçilen yöntemler ve ölçümler tam ve tutarlı bir şekilde karakterize etmeyi mümkün kılmıştır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

GGG altlığında biriktirilen YIG ince filmler için X-ışını karakterizasyonu ve AKM ölçümlerinin genel sonuçları;

- Üretilen tüm ince film katmanları için XRD taramalarında parazitlik veya ikincil fazlar tespit edilmedi.
- Elde edilen verilerden bulunan kafes sabitleri, beklenen değerlerden %0,4'ten daha az olduğu sonucuna ulaşıldı. Burada, örneklerin yeniden yapılandırılmasının başarılı etkisi ortaya çıkmıştır.
- FWHM ölçümü, ince filmlerin örgü ile altlık seçiminin uyumlu olduğunu gösterdi.
- Elde edilen tane büyüklüğü ölçümlerinden büyüme sıcaklığının granat yapısını çok iyi kristalleştirdiği sonucuna varılmıştır.
-XRD sonuçları, üretilen numunelerdeki altlık ve film piklerini herhangi bir yapısal bozulma olmadan açıkça görmemizi sağlamıştır.
-XRD sonuçları numunelerin kalınlığını, malzemenin büyüme oranını, yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk hesaplarının yapılmasını sağlamıştır. Beklenen pürüzlülük ve yoğunluğa sahip veriler elde edildi. Buradan elde edilen yüzey pürüzlülüğü bir sonraki bölümde incelenerek olan AKM verileri ile uyuşmaktadır.
- Sonuç olarak bir polikristalin hedeften GGG ve YAG üzerinde yüksek kaliteli tek kristalli YIG filmlerinin büyümesine izin veren bir dizi büyüme parametresi hedeflenen düzeyde elde edilmiştir.

Manyetizasyon ölçümlerinin genel sonuçları;

- Filmlerde oluşan gerilmenin bir sonucu olarak, düzlem dışı anizotropi alanının pozitif değerleri belirlendi ve bu da istenen anizotropiye ulaşmanın yolunu açtı.
-Gerinim kontrolü, diğer garnetlerin anizotropi ayarında da önemli bir rol oynayabileceği sonucuna varıldı.
- 5 ila 30 GHz arasındaki tüm frekans aralığında alışılmadık bir negatif eğim gözlenmemiştir.
-Düşük mıknatıslanmayı yansıtan dar manyetik rezonans çizgi genişlikleri elde edildi.

Tüm deneysel verilerden elde edilen genel sonuçlar;

- Elde edilen bulgular, tez çalışmasının başarıyla sonuçlandığını vurgulamaktadır. YIG ince film üretim teknolojisi, bu çalışmada başarıyla uygulanmıştır. Sonuçlar

seçilen malzemelerin fiziksel özellikleri belirlemek için dikkat çekicidir. Anizotropi sabitlerini belirlemek için doygunluk manyetizasyon değerlerinin belirlenmesi ve sırayla ilk önce tabakaların kalınlığını belirlemek gerekmiştir. Böylece seçilen yöntemler ve ölçümler malzemeleri tam ve tutarlı bir şekilde karakterize etmeyi mümkün kılmıştır.

- Deneysel bulguların teorik tahminlerle iyi uyuşması, anizotropi ekseninin eğildiğini ve dağıldığını göstermektedir. Bu nedenle, gerinim homojenliğinin, filmlerin düşük mıknatıslanma sönümlemesini yansıtan dar FMR çizgi genişliklerinin elde edilmesinde önemli bir rol oynadığı sonucuna varıldı.
- Teorik öngörüler deneysel verilerle mükemmel uyum içinde elde edilmiştir.
- Gözlemlenen arayüzey gerinimi indüklenen manyetik anizotropi tepkisine iyi bir şekilde karşılık geldiği sonucu dikey manyetik anizotropiyi ortaya çıkaran garnet sistemlerinin mevcut araştırmasında olası anizotropi ayarlanabilirliği aralığı ve türü hakkındaki görüşü genişletebilir.
- Ferromanyetik rezonans hat genişliğinin frekansa bağımlılığı, en yüksek ölçüm frekanslarına kadar negatif eğim ile karakterize edilir. Bildiğimiz kadarıyla, bu tür bir bağımlılık şimdiye kadar bildirilmemiştir.
- Atomik kuvvet mikroskobu kullanarak, bu davranışın, pürüzsüz film yüzeyleri ve gözle görülür şekilde ana hatları çizilen tane sınırları ile kanıtlanmıştır. Bu verilere karşılık yeni bir ferromanyetik çizgi genişliği mekanizması önerilmiştir.

## KAYNAKLAR


Alüminyum-itriyum-garnet. [Online] Erişim: https://www.nanoshel.com/aluminium- yttrium-garnet. [Erişim: 20-03-2020].

Althammer, M. K., Spin-transport-phenomena in metals, semiconductors, and insulators (PhD thesis, München, 2012).

Arias, R. & Mills, D. L. 1999. Extrinsic contributions to the ferromagnetic resonance response of ultrathin films. **Phys. Rev. B,** 60: 7395.

Atomic force microscopy | NanoBioMedical Centre | Adam Mickiewicz University in Poznan, Poland. [Online]. Erişim: http://cnbm.amu.edu.pl/en/atomic-force- microscopy. [Erişim: 29-04-2020].

Azevedo, A., Oliveira, A. B., de Aguiar, F. M. & Rezende, S. M. 2000. Extrinsic contributions to spin-wave damping and renormalization in thin Ni50Fe50 films. **Phys. Rev. B,** 62:5331.

Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas. 1998. "Giant magnetoresistance of (001) Fe / (001) Cr magnetic superlattices," Physical Review Letters, 61: 2472–2475

Berger L. 1996. "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current," **Phys. Rev. B**,54: 9353–9358.

Bhoi B., Sahu B., Venkataramani N., Aiyar, and Prasad S. 2015. Preparation of Low Microwave Loss YIG Thin Films by Pulsed Laser Deposition, **IEEE** Trans. Magn., 51: 3–6.

Binnig G. Ve Quate C.F. 1986. Atomic Force Microscope, **Phys. Rev. Let.,** 56: 930–933.

Bloch F. 1932. Zur Theorie des Austauschproblems und der Remanenzerscheinung der Ferromagnetika, **Zeitschrift für Phys**., 74: 295–335.

Chen Y.F., Wu K.T., Yao Y.D.,Peng C.H., You K.L., ve Tse W.S. 2005. The influence of Fe concentration on Y3Al5 - XFe xO12 garnets, **Microelectron. Eng**.,81: 329–335.

Coey, J. M. D. 2010. **Mag. Mag. Mater.** (Cambridge University Press, Dublin.

Chiang W.C., Chern M.Y., Lin J.G., ve Huang C.Y. 2002. FMR studies of Y3Fe5O12/Gd3Ga5O12 (YIG/GGG) superlattices and YIG thin films. J.

**Magn. Mater**., 239: 332–334.

Collet, M. 2016. Generation of coherent spin-wave modes in yttrium iron garnet microdiscs by spin orbit torque. **Nature Com.,**7:10377.

D'Allivy Kelly O., Anane A., Bernard R., Ben J. Youssef, C. Hahn, Molpeceres A.H., Carret´ ero C., Jacquet E., Deranlot C., Bortolotti P., R. Lebour- ´ geois, J. C. Mage, G. De Loubens, O. Klein, V. Cros, and A. Fert. 2013."Inverse spin Hall effect in nanometer-thick yttrium iron garnet/Pt system. **Appl. Phys. Let.**, 103: 8.

Delgado, A., Guerra Y., Padrón-Hernández E., and Peña-Garcia R. 2018. Combining the sol gel method and spin coating to obtain YIG films with low FMR linewidth on silicon (100) substrate. **Mater. Res. Express**, 5: 2.

Department of Thin Films Equipment Institute of Molecular Physics Polish Academy of Sciences. [Online]. Erişim: https://www.ifmpan.poznan.pl/en/scientific- divisions/department-of-thin-films/department-of-thin-films-equipment.html. [Erişim Tarihi: 27-Nisan-2020].

Du, C., Wang, H., Hammel, P. C. & Yang, F. 2015. Y3Fe5O12 spin pumping for quantitative understanding of pure spin transport and spin. **J. Appl. Phys.,** 117: 172603.

Dyakonov M., Perel V.I.1971. Current-induced spin orientation of electrons in semiconductors. **Phys. Let. A**, 35: 459-460.

Garskaite E. 2006. On the synthesis and characterization of iron-containing garnets (Y3Fe5O12, YIG and Fe3Al5O12, IAG). **Chem. Phys.,** 323: 204–210.

GGG Substrate , Gadolinium Gallium Garnet GGG Gd3Ga5012 Crystal Substrate for sale – Gallium Arsenide Wafer manufacturer from china (108081391). [Online] http://galliumnitridewafer.sell.everychina.com/p-108081391-ggg-substrate-gadolinium-gallium-garnet-ggg-gd3ga5012-crystal-substrate.html. [Erişim Tarihi: 10-05-2020].

Gilleo M.A. ve Geller S. 1958. Magnetic and Crystallographic Properties of Substituted Yttrium-Iron Garnet, 3Y2O3.xM2O3.(5-x)Fe2O3. **Phys. Rev.,** 110: 73–78.

Gomez M. 1968. **Phys. Rev.** 8 letters 11, 207: 9–12.

Hao Chen; Lav R. Varshney; Pramod K. Varshney. 2014. Noise-Enhanced Information Systems, **IEEE**,1607- 1621.

Hirohata A. 2020. 'Review on spintronics: Principles and device applications', **J. Mag. Mag. Mater.**, 509: 166711.

https://www.turkrad.org.tr/assets/kisokulusunumlar/temel-mr-fizigi.pdf/ Erişim Tarihi (02-02-2021)

https://www.weltderphysik.de/gebiet/materie/spintronik/ Erişim Tarihi (19-03-2021)

Jermain C.L, Paik H., Aradhya S.V., Buhrman R.A., Schlom D.G. ve Ralph D.C. 2016. Low-damping sub-10-nm thin films of lutetium iron garnet grown by molecular- beam epitaxy, **Appl. Phys. Let.**, 109:19.

Jin H., Boona S.R., Yang Z.,Myers R.C., ve Heremans J.P. 2015. Effect of the magnon dispersion on the longitudinal spin Seebeck effect in yttrium iron garnets, Phys. Rev. B - **Condens. Matter Mater. Phys**., 92: 1–8.

Kajiwara Y. 2010. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator, **Nature,** 464:262–266.

Krysztofik A., Coy L.E., Kuświk P., Załęski K., Głowiński H., and Dubowik J. 2017. Ultra-low damping in lift-off structured yttrium iron garnet thin films. **Appl. Phys. Let.,** 111:192404.

Krysztofik A., Coy L.E. 2017. Characterization of spin wave propagation in (1 1 1) YIG thin films with large anisotropy', J. Phys. D. Appl. Phys., 50:1–15.

Kittel C. 1960. Microwave resonance in rare earth iron garnets, **J. Appl. Phys.,** 11:10–13.

Kruglyk V.V, Hicken R.J. 2006. Magnonics: Experiment to prove the concept, **J. Mag. Mag. Mater.**,302:191-194.

Landau and Lifshits E. 1935. On the Theory of the Dispersion of Magnetic Permeability in Ferromagnetic Bodies, Phys. Zeitsch. der Sow., 169:14–22.

Liu W. 2015. Enhancing magnetic ordering in Cr-doped Bi2Se3 using high- T C ferrimagnetic insulator, **Nano Let.,** 15:764–769.

Lustikova J. 2014. Spin current generation from sputtered Y3Fe5O12 films, **J. Appl.Phys.**, 116:153902.

Madami M., Bonetti S. Consolo G., Tacchi S., Carlotti G., Gubbiotti G. 2011.Direct

observation of a propagating spin wave induced by spin-transfer torque, **Nat. Nano.**, 6: 635–638.

Manuilov S.A., Khartsev S.I., ve Grishin A.M. 2009. Pulsed laser deposited Y3Fe5O12 films: Nature of magnetic anisotropy, **J. Appl. Phys**., 106:12.

Miao B.F., Huang S.Y., Qu D., ve Chien C.L. 2013. Phys. Rev. Lett. 111;66602.

Nag J. ve Ray N. 2018. 'Influence of annealing temperature on structural and magnetic properties of pulsed laser-deposited YIG films on SiO2 substrate', **AIP Conf.Proc.,** vol. 1953.

Padron-Hernandez E., Azevedo A., ve Rezende S.M. 2011. Amplification of spin waves by thermal spin-transfer torque, **Phys. Rev. Let.**, vol. 107:1–5.

Spencer G., Lecraw R.C., ve Linares R.C. 1961. Low-temperature ferromagnetic relaxation in yttrium iron garnet, **Phys. Rev.**, 123:1937–1938.

Sokolov N. S., Fedorov V.V., Korovin A. M., Suturin S., Baranov, Gastev S.V., Krichevtsov B. B., Maksimova K.Y., Grunin A.I., Bursian V.E., Lutsev L.V., Tabuchi M. 2016. Thin yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition: Crystal structure, static, and dynamic magnetic properties, **J. App. Phys.**, 119: 2.

Stancil D.D. and Prabhakar A. 2009. Spin Waves. Springer US.

Tang C. 2016. Exquisite growth control and magnetic properties of yttrium iron garnet thin films, **Appl. Phys. Let.,** 108:10.

Thiery N. 2018. Electrical properties of epitaxial yttrium iron garnet ultrathin films at high temperatures, **Phys. Rev. B**, 97:1–9.

Transistörler, https://maker.robotistan.com/transistor-nedir/ (Erişim Tarihi: 01/02/2021).

Uchida K., Kikkawa, T. A. Miura, J. Shiomi, and Saitoh E. 2014. Quantitative temperature dependence of longitudinal spin seebeck effect at high temperatures, **Phys. Rev. X**, 4:1–9.

Varshney P. ve Agrawal H. 2014. Spintronics Technology : a Review, Conf. Pap.

Vector Network Analyzer – Ferromagnetic Resonance (VNA-FMR) set-up Katedra Fizyki Magnetyków. [Online] https://physics.uwb.edu.pl/wf/magnet/en/equipment/vector-network-analyzer-

ferromagnetic-resonance-vna-fmr-set-up/. [Erişim: 30-Nisan-2020].

Wang H.,Du C.,Hammel P.C., ve Yang F. 2014. Strain-tunable magnetocrystalline anisotropy in epitaxial Y3Fe5 O12 thin films, **Phys. Rev. B Condens-Mater. Phys.,** 89:1–17.

Wigen P.E., McMichael R.D., ve Jayaprakash C. 1990. Route to chaos in the magnetic garnets, **J. Magn. Magn. Mater.**, 84; 237–246.

X-ray Diffraction Analysis: Principle, Instrument and Applications | Request PDF'. [Online]. Erişim: https://www.researchgate.net/publication/260659249_X-ray_Diffraction_Analysis_Principle_Instrument_and_Applications. [Erişim Tarihi: 29-Nisan-2020].

X-ray Reflectometry (XRR) | Malvern Panalytical. [Online]. Erişim: https://www.malvernpanalytical.com/en/products/technology/xray-analysis/xray- scattering/x-ray-reflectometery. [Erişim Tarihi: 21-Nisan-2020].

Yamahara H., Mikami M., Seki M., ve Tabata H. 2011. Epitaxial strain-induced magnetic anisotropy in Sm3Fe 5O12 thin films grown by pulsed laser deposition, **J. Magn.Magn. Mater**., 323: 3143–3146.

Zuti I., Fabian J., ve Sarma S.D. 2004. Spintronics: Fundamentals and applications, **Rev.of Modern Phys.,** 76: 323–410.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sevgi ÖZOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi :

## EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ/ FİZİK BÖLÜMÜ

Yüksek Lisans Öğrenimi : HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ/ FİZİK ABD

Yabancı Diller : İNGİLİZCE (B2)

## BİLİMSEL FAALİYETLERİ

### Bildiriler

- Ağıl Hasan, Ozoglu Sevgi (2021). Research of both γ-irradiation and $La_2O_3$ addition on structural and magnetoresistivity of Bi-2223 bulk superconductors. International Journal Of Applied Ceramic Technology, 18(3), 677-683.

- Ağıl Hasan, Ozoglu Sevgi (2019). Influence of Gamma Irradiation Exposure on Structural, Electrical and Magnetic Properties of Bi-2223 with $Nb_2O_5$ Addition. Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 30(16), 15356-15361.

- Ozoglu Sevgi, Ağıl Hasan (2019). Influence of Gamma Irradiation Exposure on Structural, Electrical and Magnetic Properties of Bi-2223 with $Nb_2O_5$ Addition. 35. Türk Fizik Dernegi Uluslarası Fizik Kongresi (Özet Bildiri/Sözlü Sunum).

Tarih : 26.04.2021