ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FeAl İNCE FİLMİNİN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE LASER İLE MANYETİK ÖRGÜLENMESİ

Tuğçe BOZDAĞ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2019

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Tuğçe BOZDAĞ tarafından hazırlanan **'FeAl İnce Filminin Üretimi, Karakterizasyonu ve Laser ile Manyetik Örgülenmesi'** adlı tez çalışması 26/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Halime Gül YAĞLIOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eş Danışman : Doç. Dr. Eyüp DUMAN
Ankara Üniversitesi Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Abdullah CEYLAN
Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği
Katıhal Fiziği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Ş. Barış EMRE
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Halime Gül YAĞLIOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdür Vekili

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

26/06/2019



Tuğçe BOZDAĞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FeAl İNCE FİLMİNİN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE LASER İLE MANYETİK ÖRGÜLENMESİ

Tuğçe BOZDAĞ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. H. Gül YAĞLIOĞLU

Bu tez çalışmasında, FeAl sisteminde gözlenen ve kristal düzensizliği sonucu ortaya çıkan ferromanyetizma fenomeninin kullanılması ile üretilen FeAl ince filmleri üzerinde değişik atma sürelerine sahip lazer ışını kullanılarak noktasal mikro boyutta periyodik manyetik bölgelerin oluşturulması amaçlanmıştır. FeAl ince filmleri VAKSİS-PVD model ısısal buharlaştırma sistemiyle üretilmiştir. Üretilen ince filmler 773K'de vakum altında ısıl işlem uygulanmıştır. Daha sonra ince filmlerin kalınlıklarını ve kimyasal kompozisyonlarını belirlemek için ZEİSS-EVO40 model taramalı elektron mikroskobu(SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi(EDX) kullanılmıştır. İnce filmlerin kristal yapısını tespit etmek için Rigaku MiniflexII marka X-ışını kırınımmetresi(XRD) kullanılarak analiz edilmiştir. Daha sonra farklı atma sürelerine(ns, ps ve fs) sahip lazer demetinin FeAL ince filmleri üzerinde manyetik bölgeler oluşturularak manyetik örgüleme çalışması yapılmıştır. Lazer demetinin şiddet ve akı parametreleri değiştirilerek uygun parametreler belirlenmiştir. Farklı lazer parametreleriyle örgülenen ince filmlerin üzerindeki manyetik bölgeler optik ve MOKE mikroskobu ile incelenmiştir. Bunun için ince film üzerinden yansıyan lazer ışınının polarizasyonunda, ince filmin manyetizasyonundan kaynaklanan değişimler manyetik alan altında belirlenmiştir.

SEM-EDX analizlerine göre, ince filmlerin homojen olarak büyütüldüğü ve beklenilen komposizyonda üretildiği gözlemlenmiştir. XRD analizine göre, FeAl ince filmlerinin amorf yapıda kristallendiği bulunmuştur. MOKE mikroskobu sonuçlarına göre fs ve ps atma süreli lazer sistemi ile yapılan örgüleme işlemindeki ince filmlerin atma başına enerji değerlerinde lazer demetinin vurduğu bölgelerde manyetik kontrast farkı net bir şekilde gözlenmiştir. Fakat ns lazer sistemiyle örgülenen ince filmlerin yüzeylerinde herhangi bir manyetik kontrast farkı gözlemlenememiştir. Bunun nedeni ns lazer ışığının film yüzeyinde lokal olarak çok yüksek sıcaklıklara ulaşması nedeniyle film yüzeyini yakmıştır. Bu sistem ile yapılacak örgüleme işlemlerinde manyetik kontrast elde edebilmek için düşük enerjilerde çalışılmalıdır.

Haziran 2019, 71 sayfa

Anahtar Kelimeler : İnce film, Manyetizasyon, Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE)

ABSTRACT

Master Thesis

FABRICATION and CHARACTERIZATION FeAl THIN FILMS and It's MAGNETIC PATTERNING WITH LASER

Tuğçe BOZDAĞ

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Engineering Physics

Supervisor : Prof.Dr.H.Gül YAĞLIOĞLU

In this thesis, it is aimed to create periodic magnetic regions in point micro dimension by using laser beam which has different pulse duration on FeAl thin films produced by using ferromagnetism phenomenon which is as a result of crystal disorder and observed in FeAl system. Thin films of the FeAl system were produced by VAKSIS-PVD model thermal evaporation system. Thin films produced were subjected to heat treatment under vacuum at 773K. ZEISS-EVO model scanning electron microscope and energy distribution x-ray spectroscopy were used to determine the thickness and chemical composition of thin films produced by using different parameters. The Rigaku Miniflex model by using X-ray diffraction was analyzed to determine the crystal structure of the thin films produced. Magnetic patterning was then performed by forming magnetic regions on FeAl thin films of the laser beam with different pulse duration (ns, ps and fs). The intensity and flux parameters of the laser beam were changed and appropriate parameters were determined. Magnetic regions on thin films patterning with different laser parameters were examined by optical and MOKE microscopy. For this, the changes in the polarization of the laser beam reflected through the FeAl thin films and the changes due to the magnetization of the thin film were determined under magnetic fields.

According to SEM-EDX analysis, it was observed that thin films were grown homogenously and produced in the expected composition. According to XRD analysis, FeAl thin films were found to crystallize at room temperature in amorphous form. According to the results of MOKE microscopy, the magnetic contrast difference was clearly observed in the regions where the laser beam was hit in the energy values per pulse of the thin films in the patterning process with the fs and ps laser system. However, magnetic contrast difference could not be observed on the surfaces of thin films patterning with the ns laser system. The reason for this is that the ns laser systems burned the surface of the film exactly as it reached very high temperatures locally on the film surface. In order to obtain magnetic contrast in the patterning processes to be performed with this system, it should be studied in low energies.

June 2019, 71 pages

Key Words: Thin film, Magnetization, Magneto-Optic Kerr Effect (MOKE)

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgilerini ve tecrübelerini esirgemeden benimle paylaşan, tüm araştırmalarıma, tez çalışmalarıma yön veren, bana olan güvenini kaybetmeden desteğini her daim sunan değerli danışman hocalarım Prof.Dr.H.Gül YAĞLIOĞLU ve Doç.Dr.Eyüp DUMAN'na

Optik malzemeler araştırma grubuna geldiğim günden beri çalışmalarımda bana tecrübelerini aktaran, her daim yardımcı olmaya çalışan Araş.Gör.Dr.Ahmet KARATAY'a, Öğr.Gör.Dr.Elif AKHÜSEYİN'e ve Araş.Gör.Yasemin PEPE'ye

Deneysel çalışmalarım boyunca göstermiş oldukları tüm yardımlar için çalışma arkadaşlarım Ziya TABAK'a, Metin ARSLAN'a, Jale YALÇIN'a ve Çağrı BEŞE'ye

Tez çalışmalarım boyunca beni sabırla dinleyen, sorularıma usanmadan cevap veren, her daim yanımda olan, büyük motivasyon kaynağım Bekir Asilcan ÜNLÜ'ye

Ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, beni hep destekleyen aileme ve arkadaşlarıma

sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, 'FeAl Manyetik İnce Filminin Değişik Atma Sürelerine Sahip Lazer Işını İle Manyetik Örgülenmesi (16B0443008–BAP)' konulu proje ve 'FeAl İnce Filminde Ultrahızlı Manyetizasyon Ve Demanyetizasyon Dinamiklerinin İncelenmesi (117R017-TÜBİTAK)' konulu proje tarafından desteklenmiştir.

Tuğçe BOZDAĞ
Ankara, Haziran 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI SAYFASI

ETİK ..... **i**

ÖZET ..... **ii**

ABSTRACT ..... **iii**

TEŞEKKÜR ..... **iv**

SİMGELER DİZİNİ ..... **vii**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xi**

1. GİRİŞ **1**

2. KURAMSAL TEMELLER **8**

2.1 Manyetik Malzemeler **8**

2.1.2 Manyetik domein ve histerisis döngüsü **14**

2.2 Ferromanyetik Malzemelerde Farklı Enerji Yoğunlukları **15**

2.2.1 Manyetokristal anizotropi enerjisi **16**

2.2.2 Değiş-tokuş enerjisi **17**

2.2.3 Manyeto-elastik enerji **18**

2.2.4 Manyetostatik enerji **18**

2.2.5 Zeeman enerjisi **19**

2.3 Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE) **19**

2.3.1 Kerr etkisinin geometrileri **22**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **29**

3.1 Vakum Altında Isısal Buharlaştırma Sistemi **29**

3.1.1 FeAl ince filmlerin hazırlanması ve üretilmesi **30**

3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) **32**

3.3 Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) **33**

3.4 X-Işını Kırınımı-XRD **35**

3.5 Lazer ile Örgüleme **37**

3.5.1 Nanosaniye lazer ile örgüleme **38**

3.5.2 Pikosaniye lazer ile örgüleme **40**

3.5.3 Femtosaniye lazer ile örgüleme 42
3.6 Statik-MOKE Deney Düzeneği 43
3.7 MOKE Mikroskobu Çalışmaları 45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI 47
4.1 SEM-EDX Analiz Sonuçları 47
4.2 XRD Analiz Sonuçları 52
4.3 Statik-MOKE Analizi 53
4.4 Lazer ile Örgüleme Çalışmaları ve MOKE Analiz Sonuçları 54
4.4.1 Femtosaniye atma süresine sahip lazer ile örgüleme ve MOKE sonuçları 54
4.4.2 Pikosaniye atma süresine sahip lazer ile örgüleme ve MOKE sonuçları 58
4.4.3 Nanosaniye atma süresine sahip lazer ile örgüleme ve MOKE sonuçları 62
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 65
KAYNAKLAR 67
ÖZGEÇMİŞ 71

SİMGELER DİZİNİ

H	Manyetik Alan
M	Mıknatıslanma
M_s	Doyum Mıknatıslanması
T	Sıcaklık
T_c	Curie Sıcaklığı
X	Manyetik Alınganlık
fs	Femtosaniye
Ns	Nanosaniye
Ps	Pikosaniye
μJ	Mikrojoule
μm	Mikrometre

Kısaltmalar

EDX	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
FM	Ferromanyetik Malzemeler
L-MOKE	Boyuna Manyeto-Optik Kerr Etkisi
MOKE	Manyeto-Optik Kerr Etkisi
P-MOKE	Kutupsal Manyeto-Optik Kerr Etkisi
PM	Paramanyetik Malzemeler
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
T-MOKE	Enine Manyeto-Optik Kerr Etkisi
XRD	X-Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 FeAl sisteminde gözlenen a. A2 düzensiz, b. B2 düzenli kristal yapısı (Kubaschewski 1982) 2

Şekil 1.2 FeAl sistemine ait faz diyagramı (Kubaschewski 1982) 2

Şekil 1.3 Değişik iyon akılarında 45 keV'luk Ne+ iyonu ile bombardıman edilen 250 nm kalınlığındaki FeAl folyo için MOKE sinyali. Artan akı değeri ile ferromanyetizmanın oluştuğu açıkça görülmektedir (Fassbender vd. 2008). .. 4

Şekil 1.4 Maske kullanılarak belirli bölgeleri iyon bombardımanına maruz bırakılan $Fe_{60}Al_{40}$ folyo için a) AFM ve b-d) MFM görüntüleri 4

Şekil 1.5 Değişik iyon akılarında 10 keV'luk Ne^{+} iyonu ile bombardıman edilen 40 nm kalınlığındaki FeAl ince film için MOKE sinyali (Bali vd. 2014) 5

Şekil 1.6.a.Deney geometrisinin şematik gösterimi. Dikdörtgen şeklindeki 400x200 nm^2 büyüklüğündeki beyaz bölgeler FIB yöntemi ile bombardıman maruz bırakılan bölgelerdir. MFM görüntüsü için uygulanan manyetik alanine yönü de siyah ok ile veirlmiştir, b. Uygulanan 400 Oe'lik manyetik alan altında MFM ile gözlenen manyetik bölgeler (Fassbender vd. 2008) 6

Şekil 2.1 Manyetizmanın manyetik özelliklerine göre sınıflandırılması (Stancil ve Probha.kar 2009) 9

Şekil 2.2 Diyamanyetik malzemeler için (a) M-H grafiği ve (b) $\chi - T$ grafiği (Spaldin 2010) 10

Şekil 2.3 Paramanyetik malzemeler için a. Mıknatıslanmanın manyetik alana karşı davranışı, b. Manyetik alınganlığın sıcaklığa bağlılığı (Spaldin 2010) 12

Şekil 2.4 Ferromanyetik bir malzeme için mıknatıslanmanın manyetik alan ile değişimi ve doyum mıknatıslanması (Spaldin 2010) 13

Şekil 2.5 Ferromanyetik malzemelerin manyetik özelliklerini incelemek için histerisis döngüsünün grafiği (Hujan 2013). 15

Şekil 2.6 Manyetitin (Magnetite) kolay ve zor ekseni için mıknatıslanma eğrisi (Hujan 2013) 16

Şekil 2.7 Farkı manyetizasyon yönlerine göre MOKE geometrileri a. boyuna-MOKE, b. kutupsal-MOKE, c. enine-MOKE (Kesserwan 2011) 22

Şekil 2.8 Yansımada Kerr etkisini ve iletimde Faraday etkisini veren, Lorentz hareket yönü ϑ_Lor 'i ve mıknatıslanma yönünü gösteren kutupsal (polar)-MOKE'un şematik gösterimi (Hubert ve Schafer 1999) 23

Şekil 2.9 Gelen ışığın polarizasyon düzlemine göre boylamasına geometrinin paralel ve dik düzleminin şematik gösterimi (Hubert ve Schafer 1999) 24

Şekil 2.10 Lorentz hareketi ile enine-MOKE için şematik gösterim (Hubert ve Schafer 1999) 24
Şekil 2.11 Yüzeye gelen, s-polarize ve p-polarize ışığın süperpozisyonlarının şematik gösterimi (Hujan 2013 25
Şekil 2.12 Polarizörün, polarizasyon düzlemi ile analizör düzlemi arasındaki açıya karşı Kerr duyarlılığının grafiği (Hujan 2013) 28
Şekil 3.1 Isısal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi (Bilgen 2015) 30
Şekil 3.2 Isısal buharlaştırma yöntemiyle SiO_2 alttaş üzerine büyütülen FeAl ince filmleri 31
Şekil 3.3 VAKSİS PVD-handy Twin Çift Vakum Odalı Isısal buharlaştırma sistemi ... 32
Şekil 3.4 Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi 33
Şekil 3.5 Taramalı elektron mikroskobu (ZEISS EVO40 model) 35
Şekil 3.6 Bragg kırınım yasası şematik gösterimi 36
Şekil 3.7 Rikagu MiniFlexII model XRD cihazı 37
Şekil 3.8 Nanosaniye lazer sistemi için kurulan deney düzeneği 39
Şekil 3.9 Quantel Brilliant Nanosaniye Lazer Sistemi 39
Şekil 3.10 Pikosaniye lazer sistemi için kurulan deney düzeneği 41
Şekil 3.11 Continuum Leopard Pikosaniye Lazer sistemi 41
Şekil 3.12 Femtosaniye lazer sistemi için kurulan deney düzeneği 42
Şekil 3.13 Spectra Physics Femtosaniye Lazer sistemi 43
Şekil 3.14 Statik-MOKE için kurulan deney düzeneği 44
Şekil 3.15 Statik-MOKE deney düzeneği 45
Şekil 3.16 EVİCO Magnetics firmasına ait MOKE mikroskobu 46
Şekil 4.1 a, b, c, d, e, f Lazer örgüleme için kullanılan FeAl ince filmlerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri 48
Şekil 4.2 a. b. c. FeAl ince filminin elemental haritalama görüntüleri 49
Şekil 4.3 FeAl ince filmlerin taramalı elektron mikroskobuyla belirlenen yan kesit görüntüleri 51
Şekil 4.4 .a, b. Amorf yapıda kristallenen FeAl ince filmlerinin XRD analiz sonuçları 52
Şekil 4.5 Femtosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen ince film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri 56
Şekil 4.6 Femtosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen ince film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri 57

Şekil 4.7 Pikosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri.....60
Şekil 4.8 Pikosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri.....61
Şekil 4.9 Nanosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen ince film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri.....63
Şekil 4.10 Nanosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen ince filmin yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri.....64

ÇİZELGELER DİZİNİ

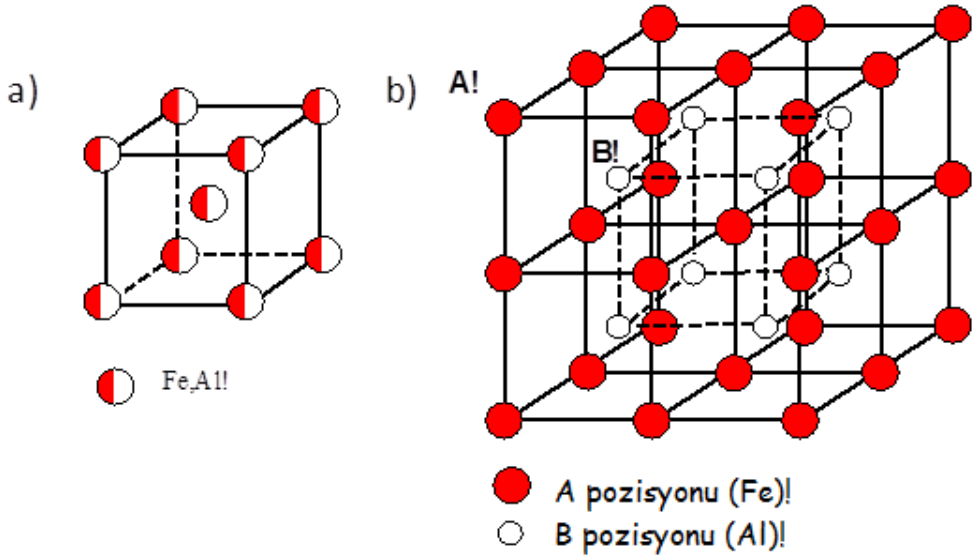
Çizelge 4.1 Lazer örgüleme için kullanılan ince filmlerin EDX analizi sonuçları 50
Çizelge 4.2 FeAl ince filmi için Statik-MOKE histerisis ölçümü 53
Çizelge 4.3 Fs lazer sistemiyle yapılan örgüleme çalışmasında enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri verilmektedir.....54
Çizelge 4.4 Ps lazer sistemiyle yapılan örgüleme çalışmasında enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri verilmektedir.....58
Çizelge 4.5 Ps lazer sistemiyle yapılan örgüleme çalışmasında enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri verilmektedir.....62

1. GİRİŞ

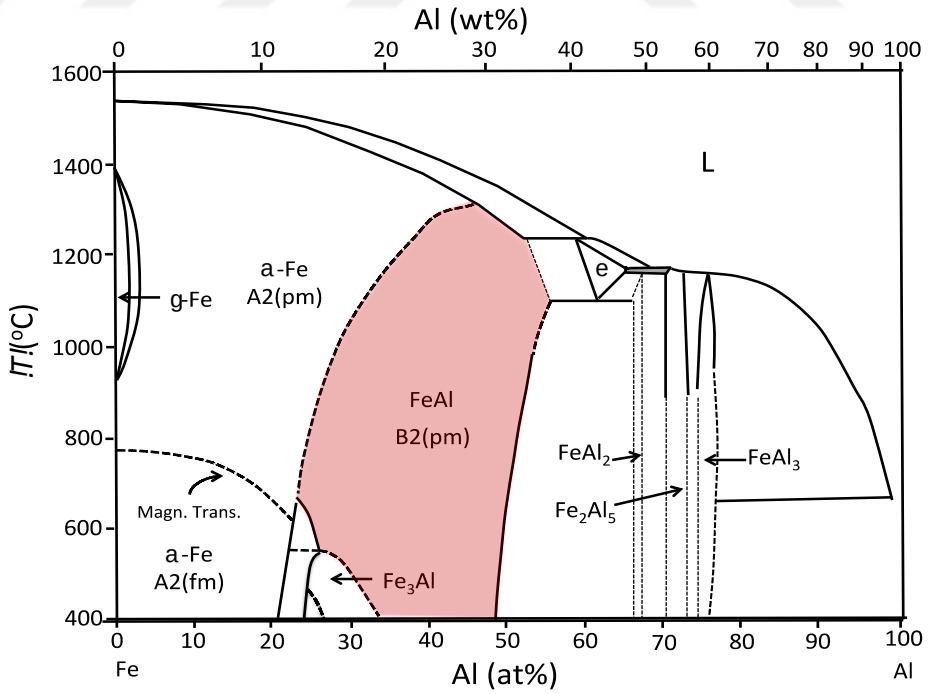
Son yıllarda manyetik tabanlı malzemeler için ince filmlerin üretilmesi ve bu ince filmlerin üzerinde nano veya mikro-boyutta periyodik örgülemelerin (desenlerin) oluşturulması değişik uygulamalar açısından büyük önem kazanmıştır. Bu amaçla kullanılan birçok yöntem pahalıdır ve birkaç adımda uygun örgüleme örnek yüzeyinde oluşturulabilir. Bu hem maliyeti arttırmakta hem de zaman açısından kayba yol açmaktadır. Bunlara ek olarak şu ana kadar yapılan örgüleme çalışmalarında kullanılan litografik yöntemlerin numune topografisinde meydana getirdiği etkiler özellikle manyetik uygulamalar açısından sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle alternatif yöntemlerin ve malzemelerin kullanılmasına yönelik yapılan veya yapılacak olan çalışmalar büyük öneme sahiptir. Örneğin, spin dalga kılavuzu gibi mikrodalga teknolojisinde önemli bir yere sahip olmaya başlayan teknolojilerde, yüzeyinde bozulma olmadan yaratılan saf manyetik periyodik örgülemeler spin dalgasının yansımadan ilerlemesi için büyük önem taşımaktadır.

Bu bağlamda FeAl sisteminde kristal düzensizliği ile ortaya çıkan ferromanyetizma, örnek yüzeyinde herhangi bir bozulma meydana getirmeden manyetik örgülerin oluşturulması için bir imkân sağlamaktadır. FeAl sistemi manyetik özellikleri ve yapısal özellikleri arasındaki ilişki nedeniyle Al miktarına bağlı olarak ve uygulanan ısıl işlemlere göre farklı manyetik özellik gözlenmektedir (Menendez vd. 2009, Bali vd. 2015). $Fe_{1-x}Al_x$ sisteminde şekil 1.1' de gösterildiği gibi iki farklı kristal yapı gözlemlenmektedir. Bunlar, A2 düzensiz kristal yapısı ve 229 uzay grubuna sahipken, B2 düzenli yapısı ve 221 uzay grubuna sahiptir (Bali vd. 2018). Şekil 1.2' de verilen $Fe_{1-x}Al_x$ sistemine ait faz diyagramına göre (Kubaschewski,1982) düzenli kristal yapıda (x=0'dan itibaren) artan Al miktarı ve Fe manyetik momenti x=0.20' ye kadar yavaşça azalır. Yüksek sıcaklıklarda (800^oC) sistem paramanyetik (PM) özellik gösterirken 800-600^oC' nin altındaki sıcaklık değerlerinde ferromanyetik (FM) özellik göstermektedir. Al miktarının arttırılmasıyla $0.35 \leq x$ için manyetik moment hızla azalır ve sıfır değerine ulaşır. $Fe_{1-x}Al_x$ sisteminde bu tez çalışması için ilginç özellikler gösteren kompozisyon bölgesi ise $0.35 \leq x \leq 0.50$ aralığındadır (şekil 1.2' de kırmızı ile işaretlenen bölge). Bu aralıkta FeAl sistemi B2 düzenli kristal yapısına sahiptir ve bu durumda oda

sıcaklığında PM özellik gösterir. Eğer bu yapıda iyon bombardımanı, basınç veya sıcaklık gibi dışarıdan herhangi bir etki ile bir kristal düzensizliği meydana getirilirse, FM özellik göstermektedir.



Şekil 1.1 FeAl sisteminde gözlenen a. A2 düzensiz, b. B2 düzenli kristal yapısı (Kubaschewski 1982)



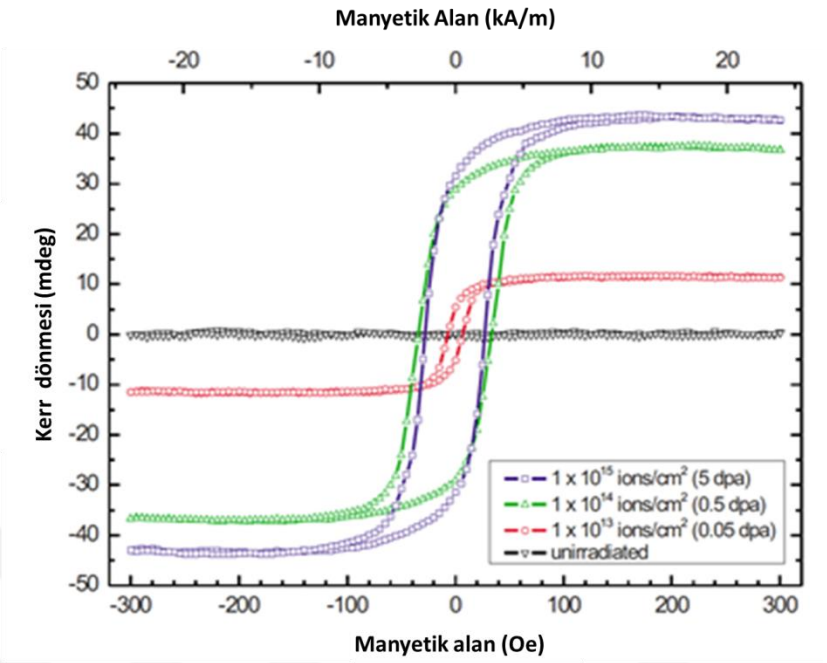
Şekil 1.2 FeAl sistemine ait faz diyagramı (Kubaschewski 1982)

FeAl sisteminde gözlenen ve kristal düzensizliği ile meydana gelen ferromanyetizma için teorik açıklama olarak genellikle Fe atomunda gözlenen manyetik momentin çevresindeki en yakın Fe atomu sayısına bağlı olması ile verilmektedir (Huffmann vd. 1967;Krause vd. 2000; Wu vd. 2003; Wertheim vd.1964, Kulikov vd. 1999; Redy vd. 2000; Smirnov vd. 2005; Bose vd. 1997;.Menendez 2008) Buna göre düzenli kristal yapıda Fe atomunun en yakın Fe atomu komşu sayısı yaklaşık 3 iken düzensiz kristal yapıda bu sayı yaklaşık 5 olmaktadır. Komşu Fe atomu sayısındaki bu artış düzensiz kristal yapıda gözlenen ferromanyetizma için sorumlu tutulmaktadır. Bunun yanında kristal yapıda ve buna bağlı olarak oluşan örgü parametrelerindeki değişiklik ile bant yapısında meydana gelen değişimin de geçiş metalleri arasındaki manyetik etkileşmeyi değiştirebileceği önerilmiştir. Ancak bu sistemde kristal düzensizliği ile oluşan FM özelliğin teorik açıklaması henüz açıklığa kavuşmamıştır ve tartışma devam etmektedir (Huffmann vd. 1967, Krause vd. 2000, Wu vd. 2003, Wertheim vd.1964, Kulikov vd. 1999, Redy vd. 2000, Smirnov vd. 2005, Bose vd. 1997, .Menendez 2008).

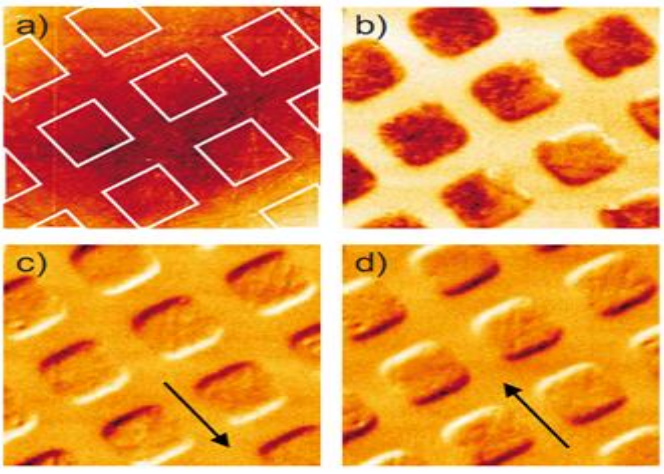
Bu konudaki teorik çalışmalar tam bir açıklık getirmese de bu sistemde kristal düzensizliği ile oluşan FM özellik külçe malzemelerde soğuk haddeleme, ball-milling ve basınç ile, ince filmlerde ise iyon bombardımanı (Fassbender vd. 2008, Mennendez 2009, Bali vd 2014) ile gösterilmiştir.

Fassbender ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 250 nm kalınlığındaki folyo ve 40 nm kalınlığındaki ince filmlerin iyon bombardımanı sonucunda ferromanyetik özellik gösterdiği bulunmuştur (Fassbender vd. 2008). Şekil 1.3' de değişik iyon akılarında 45 keV'luk Ne+ iyonu ile bombardıman edilen 250 nm kalınlığındaki folyo için manyeto-optik Kerr (MOKE) sinyali ölçümünü göstermektedir. Bombardıman edilmemiş örnekte manyetik sinyal gözlenmezken artan iyon akısı ile ferromanyetizma açıkça gözlenmiştir. Aynı çalışmada folyo üzerinde maske kullanılarak iypn bombardımanı ile manyetik örgüleme çalışması da yapılmıştır. Şekil 1.4'de bu şekilde iyon bombardımanına maruz bırakılan folyonun AFM ve MFM görüntüleri verilmiştir. Şekil 1.4a'daki AFM görüntüsüne göre folyo üzerinde topografik olarak herhangi bir bozulma gözlenmemektedir. MFM görüntülerinde ise örnek düzlemine paralel uygulanan ±400

Oe'lik manyetik alan ile manyetik kontrastın değiştiği açıkça gözlenmekte ve bu da iyon bombardımanı ile manyetik bölgelerin yaratılabildiğini göstermektedir.



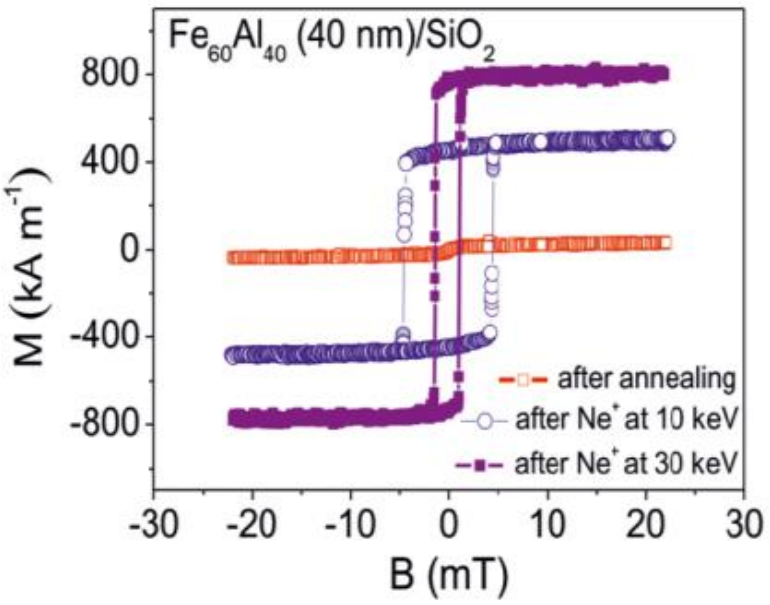
Şekil 1.3 Değişik iyon akılarında 45 keV'luk Ne+ iyonu ile bombardıman edilen 250 nm kalınlığındaki FeAl folyo için MOKE sinyali. Artan akı değeri ile ferromanyetizmanın oluştuğu açıkça görülmektedir (Fassbender vd. 2008).



Şekil 1.4 Maske kullanılarak belirli bölgeleri iyon bombardımanına maruz bırakılan $Fe_{60}Al_{40}$ folyo için a) AFM ve b-d) MFM görüntüleri

Burada siyah oklar uygulanan manyetik alanın yönlerini göstermektedir.

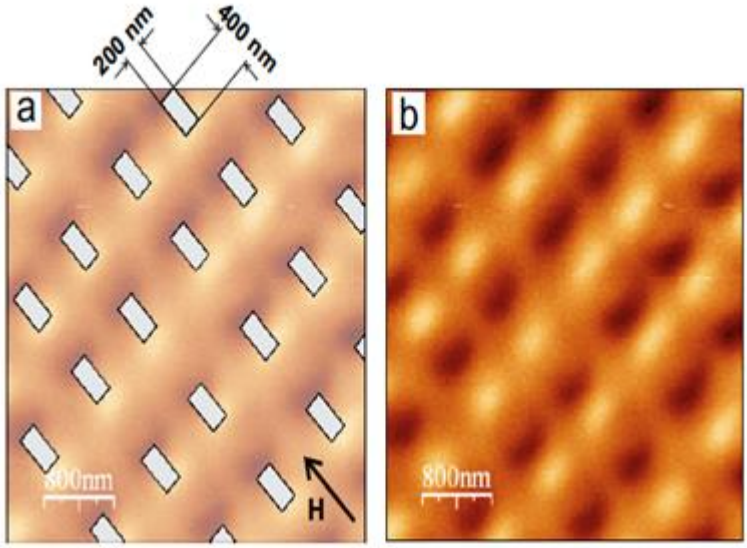
İyon bombardımanı yöntemi FeAl sistemine ait ince filmlerin üzerinde manyetik desenleme çalışmaları içinde kullanılmıştır. Benzer şekilde 40 nm kalınlığındaki FeAl ince filmi içinde 10 ve 30 keV'luk Ne+ iyonu ile bombardıman edilmesi sonucu, Şekil 1.5' de gösterilen MOKE çalışması bombardıman edilen örneklerde ferromanyetizmanın oluştuğunu açıkça göstermektedir. Artan iyon enerjisi ile de ferromanyetik sinyalin arttığı gözlenmektedir.



Şekil 1.5 Değişik iyon akılarında 10 keV'luk Ne^+ iyonu ile bombardıman edilen 40 nm kalınlığındaki FeAl ince film için MOKE sinyali (Bali vd. 2014)

Isıl işlem sonrası ince film manyetik değil iken, artan akı değeri ile ferromanyetizmanın oluştuğu açıkça görülmektedir.

Şekil 1.6b'de B2 düzenli fazda kristallenmiş olan ve $Fe_{60}Al_{40}$ kimyasal kompozisyonuna sahip ince film üzerinde, odaklanmış iyon demeti (focussed ion beam-FIB) yöntemi ile, 400x200 nm'lik bölgelerin iyon bombardımanına maruz bırakılması sonucu elde edilen manyetik bölgelerin manyetik kuvvet mikroskobu (MFM) görüntüsü verilmiştir. Paramanyetik matris içinde elde edilen periyodik manyetik bölgeler açık bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 1.6.a.Deney geometrisinin şematik gösterimi. Dikdörtgen şeklindeki 400x200 nm^2 büyüklüğündeki beyaz bölgeler FIB yöntemi ile bombardıman maruz bırakılan bölgelerdir. MFM görüntüsü için uygulanan manyetik alanine yönü de siyah ok ile veirlmiştir, b. Uygulanan 400 Oe'lik manyetik alan altında MFM ile gözlenen manyetik bölgeler (Fassbender vd. 2008)

Literatürde yapılmış çalışmalardan açıkça görüldüğü gibi FeAl sisteminde iyon bombardımanı ile kristal düzensizliği meydana getirilerek ferromanyetik bölgeler oluşturulabilmektedir. İyon bombardımanı yöntemi pahalı olması ve desenleme çalışması için maske kullanılması gerektiğinden daha ucuz ve zaman kaybına yol açmayacak alternatif yöntemlerin kullanılması önemlidir. Bu kapsamda manyetik desenleme çalışmalarında daha önce birçok sistemde kullanılmış olan güçlü lazer atmalarının FeAl sisteminde de iyon bombardımanına benzer bir sonuç yaratacağı düşünülebilir. Ayrıca lazer ile örgüleme çalışmasında numune yüzeyinde topolojik olarak herhangi bir değişiklik meydana getirilmeyecek olması, yani, saf manyetik bölgelerin manyetik olmayan bölgelerin içerisinde elde edilecek olması da farklı uygulamalar açısından önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, FeAl sisteminde gözlemlenen ve kristal düzensizliği ile ortaya çıkan ferromanyetizma fenomeninin kullanılması ile ısısal buharlaştırma sisteminde üretilen $Fe_{50}Al_{50}$ kompozisyonuna sahip ince filmler üzerinde farklı atma sürelerine sahip lazer ışınları kullanılarak bölgesel mikro boyutta manyetik bölgelerin

oluşturulması amaçlanmıştır. Bu şekilde oluşturulan manyetik bölgelerin manyetik özellikleri MOKE mikroskobu ile incelenmiş ve bu manyetik bölgelerin yüzey morfolojileri ve manyetik alana karşı davranışları ortaya konulmuştur.

Literatürde bu zamana kadar FeAl sistemi için yapılmış herhangi bir lazer ile örgüleme çalışması yapılmadığından farklı atma sürelerine sahip lazer ışınının manyetik bölgeleri oluşturmadaki farklılıklar tez çalışması kapsamında incelenmiş ve sonuçların değerlendirilmiş olması, uygulamalara yönelik yapılacak olan örgüleme çalışmaları için bir baz teşkil edecektir ve literatüre büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

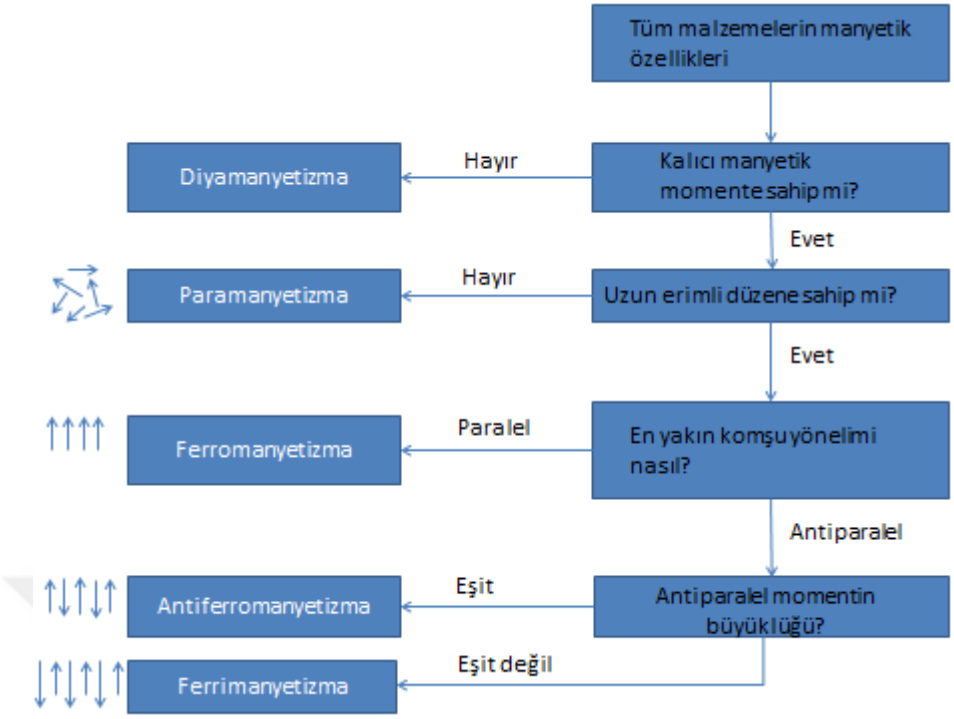
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Manyetik Malzemeler

Malzemelerde makroskobik mıknatıslanma, bireysel atomların manyetik momentlerinden kaynaklanır. Manyetik momente sebep olan iki ana kaynak vardır. Bunlardan birincisi, elektronun çekirdek etrafında küçük, kapalı döngü akımı olarak düşünülen yörünge hareketidir. İkincisi, elektronun kuantum mekaniksel içsel bir özeliği olan spininden kaynaklanır.

Bir atomun net manyetik momenti, yörünge hareketinin ve spin hareketinin toplam katkısından oluşur. Spinleri karşıt yönlerdeki elektron çiftlerinin (örneğin spin aşağı ve spin yukarı) spin manyetik momentlerinin vektörel toplamı birbirlerini yok eder ve bu nedenle net manyetik moment sıfır olur. Soy gazlarda olduğu gibi tüm kabukları dolu veya alt kabukları dolu bir atomda mıknatıslanma tamamen ortadan kalkar. Kalıcı mıknatıslanma bu nedenle bu tür malzemelerde mümkün değildir. Elektron yörüngelerine bağlı olan makroskobik mıknatıslanma yüksek oranda malzemeye özgü bir özellik katar (Lysne, 2017).

Manyetik malzemeler manyetik momentlerin hizalanmalarına göre şekil 2.1'de gösterildiği gibi farklı sınıflara ayrılırlar :



Şekil 2.1 Manyetizmanın manyetik özelliklerine göre sınıflandırılması (Stancil ve Probha.kar 2009)

Manyetizmanın farklı sınıflandırılmasıyla oluşan malzemeler, dışarıdan uygulanan bir manyetik alana karşı farklı tepki verirler. Bu tepki, manyetik alanla ilgili olan mıknatıslanma M, ile karakterize edilir.

$$M = \chi . H \tag{2.1}$$

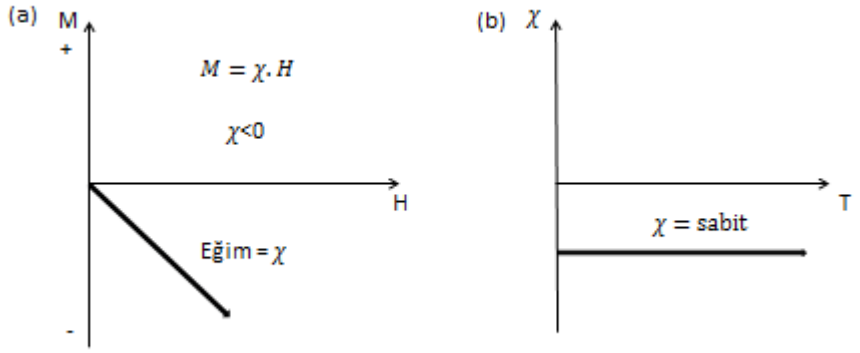
Burada χ, manyetik alınganlıktır ve birimsizdir. Manyetik alınganlık; malzemenin geçirgenliği μ, boş uzayın geçirgenliği μ_0 ve bağıl geçirgenlik μ_r ile aşağıdaki gibi ilişkilidir.

$$\chi = \frac{\mu}{\mu_0} - 1 = \mu_r - 1 \tag{2.2}$$

Bağıl geçirgenlik 1'den büyük veya küçük olabilir. Bu nedenle manyetik alınganlık negatif bir değer alabilir. Diyamanyetizma ve paramanyetizma en zayıf manyetizma türleridir ve sırasıyla negatif ve pozitif manyetik alınganlık ile karakterize edilirler. Bu

manyetizma türleri kendiliğinden mıknatıslanmaya sahip değildirler ve dış manyetik alanın yokluğunda malzemelerin akı yoğunluğu vakumunkine yakındır. Diyamanyetik ve paramanyetik malzemeler bu nedenle manyetik olmayan malzemeler olarak adlandırılırlar.

Diyamanyetik malzemelerde, bir dış manyetik alan uygulandığında elektronların yörüngesel hareketinde hafif bir değişim meydana gelir. Bu, negatif manyetik alınganlığa karşılık gelen, uygulanan alanın tersi yönünde bir mıknatıslanmaya neden olur. Bu etki çok zayıftır ve χ için tipik büyüklük derecesi 10^{-5} mertebesindedir. Yeterince güçlü bir alana maruz bırakıldıklarında diyamanyetik malzemeler zayıf mıknatıslanma bölgelerine karşı hareket etme eğilimindedirler ve dolayısıyla mıknatıslar tarafından hafifçe itilirler. Bu davranış, Lenz yasasının mikroskobik uygulamasıyla tanımlanabilir (Schmitt 2002). Diyamanyetik malzemelere; bakır, altın, gümüş ve soy elementler örnek gösterilebilir.



Şekil 2.2 Diyamanyetik malzemeler için (a) M-H grafiği ve (b) χ – T grafiği (Spaldin 2010)

Paramanyetik malzemeler, spin ve/veya yörünge momentlerinin tam olarak birbirlerini yok etmemesinden dolayı kalıcı net dipol momentlere sahiptirler. PM'lerde atomların manyetik momentleri rastgele yönelmişlerdir ve bu nedenle net makroskobik bir mıknatıslanma sergileyemezler. Ancak dipoller dönmekte serbesttir ve bir dış manyetik alanla hizalanabilirler. Bu, dış manyetik alan yönünde hizalanmış bir mıknatıslanmaya yol açar. Ancak komşu dipoller arasındaki etkileşim olmadığından indüklenen

mıknatıslanma zayıftır. Bununla birlikte alan kaldırıldığı anda manyetik momentler yönlerini kaybeder ve tekrar rastgele yönelirler, böylece ısıl dengede toplam net sıfır mıknatıslanma meydana gelir. Tüm manyetik momentlerin aynı hizada olduğunu varsayılırsa; PM'nin mıknatıslanması Langevin fonksiyonu ile verilir (Kittel, 1986).

$$M = N.g.\mu_B.J.L(x) \tag{2.3}$$

- N, birim hacim başına atom sayısı
- J, toplam açısal momentum
- g, Lande' faktörü
- μ_B , Bohr magnetonu
- $L(x)$, Langevin fonksiyonu
-

$$L(x) = \coth(x) - \frac{1}{x} \tag{2.4}$$

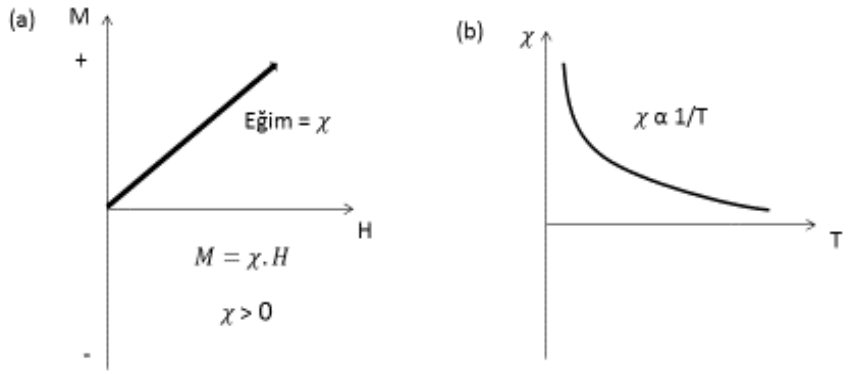
x, dış alandaki manyetik momentin Zeeman enerjisinin, $k_B T$ termal enerjisine oranıdır.

$$x = g.\mu_B.J.\frac{B}{k_B T} \tag{2.5}$$

Yüksek sıcaklıklarda, paramanyetik mıknatıslanma Curie yasası ile verilmektedir;

$$M = \frac{C}{T}.H \tag{2.6}$$

Burada C , Curie sabitini temsil eder. Paramanyetik malzemeler için χ pozitiftir ve $10^{-2} - 10^{-5}$ aralığındadır. Paramanyetik malzemeler; magnezyum, lityum, tungsten, sodyum, örnek verilebilir.



Şekil 2.3 Paramanyetik malzemeler için a. Mıknatıslanmanın manyetik alana karşı davranışı, b. Manyetik alınganlığın sıcaklığa bağlılığı (Spaldin 2010)

2.1.1 Ferromanyetizma

Ferromanyetik malzemeler, bir dış manyetik alan yokluğunda bile kendiliğinden mıknatıslanma özelliği gösteren, kalıcı manyetik momente sahip malzemelerdir. Genel olarak bir malzemeye bir dış alan uygulandığında malzemede oluşan manyetik akı $B = \mu_0 H + \mu_0 M$ ile verilir. Ferromanyetik malzemelerde manyetik alınganlık χ, 10^6 kadar yüksek olabilir ve malzeme içindeki manyetik akı yoğunluğu bu nedenle mıknatıslanma alanı (M>>H olduğundan $B = +\mu_0 H$) tarafından yönetilir. Ferromanyetizma olayı birbirini yok etmeyen elektron çiftlerinden dolayı atomik manyetik momentlerinden kaynaklanır. Eşleşmenin komşu atomlar arasında gerçekleşmesinden dolayı dış alan kaldırıldıktan sonra bile mıknatıslanma belli bir değerde korunur. Bu nedenle mıknatıslanma, uygulanan alanın geçmişine bağlıdır ve ferromanyetik malzemeler bu yüzden histerisis özelliğine sahiptir. Eşleşme, göreceli olarak büyük hacimlerde ortaya çıkabilir ve homojen mıknatıslı bir bölgeye domein adı verilir. Weiss tarafından sunulan moleküler alan kavramı manyetik domeinlerin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır (Weiss, 1907). Weiss moleküler alanı, komşu manyetik momentlerin, en düşük enerji durumuna ulaşmak için birbirlerini paralel olarak hizalanmasına neden olan atomlar arası etkileşimin etkisidir. Moleküler alan manyetik momentleri termal dalgalanmalara karşı hizalar ve yönlerini korur, böylece malzemeler mıknatıslanmış halde kalır. Uygulanan bir manyetik alanın yokluğunda, bir

ferromagnet, manyetik domeinlerden oluşur. Her domein içinde manyetik momentler birbirine paralel hizalanmıştır, böylece etki alanı (domein) küçük bir mıknatıs gibi davranır. Dış manyetik alan uygulanır uygulanmaz, manyetik momentler alan yönüne göre paralel olacak şekilde hizalanır. Bununla birlikte manyetik momentler arasındaki etkileşme sıcaklıktan etkilenir. Bir ferromanyetik malzeme mıknatıslanmasını Curie sıcaklığı T_c olarak adlandırılan kritik sıcaklığın üzerinde kaybeder ve bu durumda paramanyetik davranış sergiler. Ferromanyetizma için mıknatıslanma Curie-Weiss yasası ile verilmektedir (Kittel 1986).

$$M = \frac{C}{T - T_c}.H \tag{2.7}$$

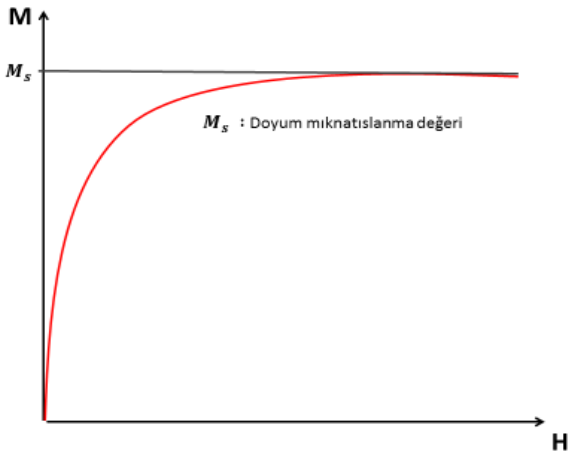
Burada,

$$C = g.\mu.B.M_s.\frac{(J+1)}{3k_B} \tag{2.8}$$

ve

$$T_c = \frac{\mu_B}{k_b}.M_s \tag{2.9}$$

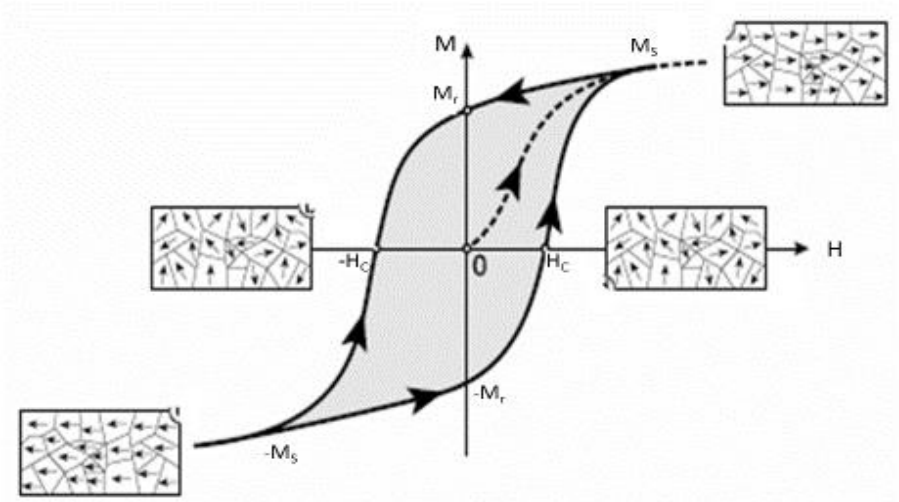
İle verilir. Burada M_s, doyum mıknatıslanma değeri, T_c Curie sıcaklığıdır.



Şekil 2.4 Ferromanyetik bir malzeme için mıknatıslanmanın manyetik alan ile değişimi ve doyum mıknatıslanması (Spaldin 2010)

2.1.2 Manyetik domein ve histerisis döngüsü

Bir ferromanyetin karakteristik manyetik davranışı, yalnızca malzemenin mıknatıslanmanın karşılıklı olarak aynı hizada olduğu küçük hacimli bölgelerden oluştuğu Curie sıcaklığı T_c 'nin altında görülür. Bu küçük hacimli bölgelere manyetik domein adı verilir ve bireysel domeinler mıknatıslanmanın bölgesel olarak doyuma ulaştığı yerlerdir. Komşu domeinler, mıknatıslanmanın bir yönden diğerine döndüğü domein duvarı ile ayrılırlar. Makroskobik mıknatıslanma alanı tüm domein katkılarının vektörel toplamından oluşur. Bir malzemenin, başlangıçta tüm manyetik domeinler farklı yönlerde mıknatıslanmaya sahip olduğundan, kendiliğinden mıknatıslanması sıfırdır. Dış manyetik alan arttıkça, düşük manyetik alanlar için M-H ilişkisi doğrusaldır ve bir malzeme özelliği olan ilk geçirgenlik μ_i ile karakterize edilir. Belirli bir alan şiddeti elde edildikten sonra doğrusallık bozulur ve geçirgenlik, H'ın doğrusal olmayan bir işlevi olur. Manyetik alan şiddeti arttıkça manyetik alan yönünde dönen manyetik momentler ile alan yönünde mıknatıslanmaya sahip olan domeinler, diğer domeinlerin pahasına büyümeye başlar. Bu domeinler, domein sınırlarının hareketi ile komşu domeinleri absorbe ederek hacimsel olarak büyür ve manyetik alandaki küçük değişimler için mıknatıslanma keskin bir şekilde artar. Sonuç olarak, alan yeterince şiddetli olduğunda, manyetik malzeme tüm manyetik momentleri neredeyse alan ile aynı yönde olan, geniş ve tek bir domeinden oluşur. Alanın daha da artmasıyla doygunluğa ulaşır ve mıknatıslanma alan ile mükemmel bir şekilde hizalandığında artık mıknatıslanma da başka bir artış gözlenmez. Çünkü daha fazla düzenlenecek bir manyetik moment kalmamıştır.



Şekil 2.5 Ferromanyetik malzemelerin manyetik özelliklerini incelemek için histerisis döngüsünün grafiği (Hujan 2013).

İlk mıknatıslanmadan sonra ferromanyetik bir malzeme doğrudan manyetik olmayan duruma geri dönemez. Bunun yerine manyetik tepki bir histerisis davranışı ile karakterize edilir. Bu histerisis eğrisinden malzemenin zorlayıcı alan değeri (H_c), doyum mıknatıslanma değeri (M_s), kalıcı mıknatıslık değeri (M_r) gibi bilgiler elde edinilebilir.

Zorlayıcı alan, mıknatıslanmayı önceki mıknatıslanmanın tersi yönünde sıfıra indirmek için gereken alan değeridir. Doyum mıknatıslanması, malzemenin maksimum mıknatıslanma değeridir. Kalıcı mıknatıslık, dış alan kaldırıldıktan sonra malzeme tarafından korunan mıknatıslanma değeridir. Bu, domein duvarındaki değişime karşı dirençten kaynaklanır ve mıknatıslanmanın uygulanan alanın gerisinde kalmasına neden olur. Kalıcı alan tipik olarak, yumuşak manyetik malzemelerin aksine, özellikle büyük bir histerisis alanı ile karakterize edilen sert manyetik malzemeler için doyum mıknatıslanma değerine yakındır (Hujan 2013).

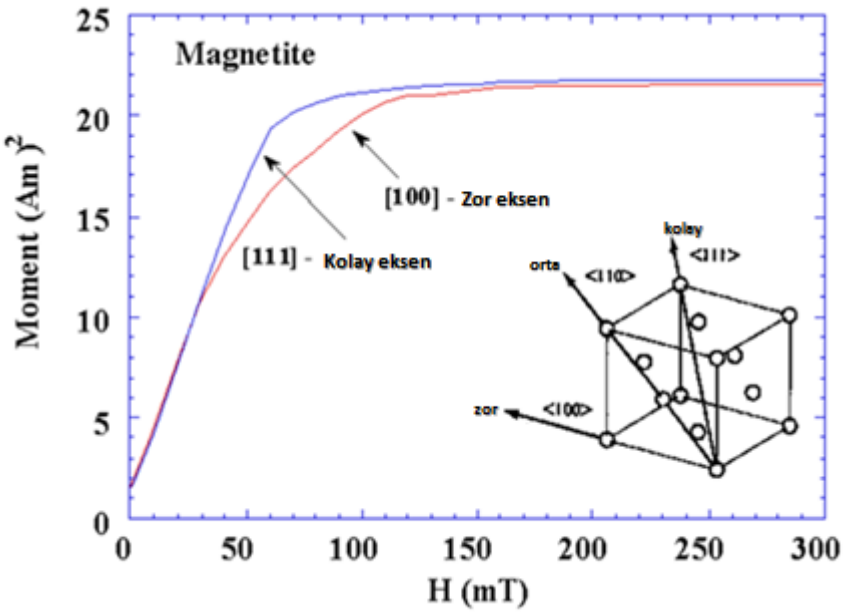
2.2 Ferromanyetik Malzemelerde Farklı Enerji Yoğunlukları

Manyetik domeinleri etkileyen sadece manyeto-statik enerji katkılarından değil, aynı zamanda diğer farklı enerji katkıları da etkilemektedir. Diğer enerji katkıları,

ferromanyetik malzemelerdeki farklı mıknatıslanma yönleri ve farklı domein oluşumlarının genel kavramlarını anlamak için bu bölümde detaylı olarak anlatılacaktır. Ferromanyetik malzemedeki mıknatıslanma dağılımının mikromanyetik hesaplamasını yapmak için bu gibi domeinlerin düzenlenimlerini etkileyen enerjilerin kaynaklarını da bilmek gerekir. Kısacası beş ana enerji katkısı vardır; manyetokristal anizotropi enerjisi, değişim enerjisi, manyetoelastik enerji, manyetostatik enerji ve Zeeman enerjisi.

2.2.1 Manyetokristal anizotropi enerjisi

Manyetokristal anizotropi, spin-yörünge çiftleniminden dolayı malzemenin mıknatıslanma yönünün belirli bir kristalografik yön boyunca mıknatıslanmasıdır. Bu tercih edilen kristalografik eksen kolay eksen olarak adlandırılır ve mıknatıslanmanın manyetik alan ile en zor şekilde gerçekleştiği yön ise zor eksen olarak bilinir. Zor eksenin kolay eksenden daha yüksek doygunluk alanına sahip olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır (Moskowitz vd. 1991).



Şekil 2.6 Manyetitin (Magnetite) kolay ve zor ekseni için mıknatıslanma eğrisi (Hujan 2013)

Örneğin şekil 2.6'da manyetitin mıknatıslanma için kolay eksen [111] yönü ve zor ekseni [100] olarak görülmektedir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, kolay eksen için doyum alanı zor eksen için doyum alanından daha yüksektir. Demir ve Nikel gibi kübik kristaller için manyetokristal anizotropi enerji yoğunluğu;

$$\varepsilon_a = K_1(a_1^2a_2^2 + a_2^2a_3^2 + a_3^2a_1^2) + K_2(a_1^2a_2^2a_3^2) \ldots\ldots \quad (2.10)$$

ile verilir. Burada K_1 ve K_2 malzeme için sırasıyla birincil ve ikinci anizotropi sabitleridir ve $a_{1,2,3}$ küp kenarlarına göre kosinüs yönleridir. Nikel için K_1 ve K_2 değerleri sırasıyla -4,5.10^3J/m^3 ve -2,5.10^3J/m^3 'dür (Kronmuller ve Fahnle, 2003). Kobalt gibi tek eksenli (tek yönlü) malzemeler için manyetokristal anizotropi enerji yoğunluğu;

$$\varepsilon_a = K_1 sin^2\theta + K_2 sin^2\theta \ldots\ldots \quad (2.11)$$

Burada θ, kolay eksen ile mıknatıslanma arasındaki açıdır. Deneysel olarak kobalt için oda sıcaklığındaki K_1= 4,1.10^5 J/m^3 ve K_2=1,5.10^5 J/m^3 'dür (Robert vd. 2003).

2.2.2 Değiş-tokuş enerjisi

Değiş-tokuş enerjisi, manyetik momentlerin birbirine paralel olarak hizalanmasını sağlayan enerjidir. Bu en yakın komşu ile kısa erimli mesafe için etkileşim enerjisi olarak tanımlanır. Bu nedenle mıknatıslanmanın yönünü değiştirecek enerjiye değiş-tokuş enerjisi denir ve şu şekilde verilir;

$$\varepsilon_{ex} = A\sum_{i=1}^{3}(\Delta\, a_i r^2) \quad (2.12)$$

Bu denklemde, A sıcaklığa bağlı olan değiş-tokuş sertlik sabiti (J/m)'dir ve $a_{1,2,3}$ örgü noktalarındaki spinlerin kosinüs yönüdür.

2.2.3 Manyeto-elastik enerji

Manyeto-elastik enerji, malzeme üzerindeki mekanik zorluğa bağlı olan manyeto-kristal anizotropinin bir parçasıdır. Kristal örgüye gerilim uygulandığında, atomlar arası mesafeler etkileşim enerjisinde değişime neden olacak şekilde kaydırılır ve bu etki manyeto-elastik enerji olarak adlandırılır. Açıkçası gerilimi olmayan bir kristal örgü için sıfır manyeto-elastik enerji olacaktır ve bu nedenle mıknatıslanması diğer manyetik anizotropi ile belirlenir. Çeşitli örgü yönleri için tanımlanan sembol manyetostriksiyon olarak bilinen spin-orbit etkileşimi etkisiyle manyeto-elastik enerji yoğunluğu şu şekilde verilir;

$$\varepsilon_{me} = \frac{3}{2}(\lambda_s \sigma sin^2\theta) \tag{2.13}$$

Burada σ gerilme ve θ, gerilme yönü ve mıknatıslanma yönü arasındaki açıdır. Çok katmanlı ve ince filmlerde gerilme katmanlar arasında farklı örgü hizalanmaları ve termal gerilme ile numunenin üretimi sırasında uygulanabilir.

2.2.4 Manyetostatik enerji

Manyetostatik enerji, bir malzemenin manyetik momentleri tarafından üretilen alanda depolanan enerjidir. Manyetostatik enerji yoğunluğu;

$$\varepsilon_m = \frac{\mu_0}{2} H_{stray}.M_s \tag{2.14}$$

İle verilir. Burada M_s, doyum mıknatıslanma vektörü, μ_0, boş uzayın geçirgenliğidir. ε_m denklemi, dış manyetik alanı H_{stray} ile etkileşimini verir. $\frac{1}{2}$ katsayısı etkileşimi iki kez saymamak için dahil edilmiştir.

2.2.5 Zeeman enerjisi

Manyetik momentler ve uygulanan dış manyetik alan arasındaki etkileşimin enerjisidir. Zeeman enerjisi, bir alandaki manyetik momentin potansiyel enerjisi olarak da düşünülebilir.

$$\varepsilon_{zeeman} = -\mu_0 H_{stray}.M_s \tag{2.15}$$

Burada $H_{stray,}$ dış manyetik alan büyüklüğüdür.

2.3 Manyeto-Optik Kerr Etkisi (MOKE)

Manyetik domeinleri gözlemlemek için birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden biri olan Manyeto-Optik Kerr etkisi (MOKE) tekniğidir ve diğer metotlara kıyasla daha fazla avantaja sahiptir. MOKE, numunede mevcut MOKE tipine bağlı olarak, saydam olmayan bir numuneden yansıyan ışığın, polarizasyonda veya yoğunluğunda meydana gelen değişime dayalı bir tekniktir. MOKE tipleri bu bölümde daha sonra anlatılacaktır. Manyetik domein kontrastı çok zayıf olmasına rağmen, dijital görüntü işleme kullanılarak gerçekleştirilir. Bu nedenle, dijital görüntü işlemenin geliştirilmesi bu yöntemin etkinliğini arttırmaya yardımcı olur. Kerr etkisi mikroskobu altında numunenin gözlemlenmesi için özel bir işleme gerek yoktur. Bazen MOKE sinyalini arttırmak için dielektrik kaplama yapılır. Numune kriyostatlarda soğutulabilir veya optik ısıtma aşamaları kullanılarak ısıtılırsa manyetik numunenin sıcaklık etkileri gözlemlenebilir. Gözlem yaparken numuneye fiziksel stres uygulamak da mümkündür. Bu şekilde manyetik domeinler üzerindeki stres incelenebilir. Kerr mikroskobu, numunenin düzlem-içi ve düzlem-dışı mıknatıslanma bileşenlerini incelemek için kolayca değiştirilebilir. Numune üzerindeki manyetik domeinlerin incelenmesi, numuneye manyetik alan uygulanırken direkt olarak yapılır ve domein duvarı hareketi bu yöntem kullanılarak etkin bir şekilde gözlemlenebilir (Huyan, 2013).

MOKE mikroskobuna ek olarak, manyetik domeinleri gözlemlemenin başka yöntemleri de vardır. Günümüzde Lorentz mikroskobu (Chapman, 1984), elektron hologrofisi

(Chapman, 1984, Lithte ve Lehmann, 2008) ve polarizasyon ekseni ile taramalı elektron mikroskobu (Hankemeier vd. 2010) gibi çok küçük manyetik yapılarda manyetik domein görüntüleme kapasitesi olan mikroskobik gözlemlemeler mevcuttur. Kerr mikroskobundan daha küçük bir görüş alanına sahip olduğu bilinen geçirimli elektron mikroskobu da küçük manyetik yapıları gözlemlemek için kullanılan yöntemlere örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte, manyetik kuvvet mikroskobu, spin-polarize tünel mikroskobu (Krause vd. 2009) ve diğer rezonans teknikleri (Davis vd. 2010) gibi elektron mikroskobu kullanılmayan diğer mikroskoplar için, ayrıca spin-polarize tünel mikroskobu için ön hazırlık gereksinimi duyan domein gözlemleme yeteneğini sınırlayan başka sınırlayıcı faktörler de vardır. Alternatif olarak nano ölçekli manyetik örneklerde Hall-Probe tekniği ve nano-süperiletken kuantum girişim cihazları (SQUID) (Wernsdorfer, 2009) gibi mıknatıslığı gözlemleyebilen diğer yüksek ilerlemeli manyetometri teknikleri de vardır. Avantajlarına rağmen maalesef bu teknikler numunelerin özel olarak üretilmesine ihtiyaç duymaktadırlar. MOKE genel olarak, çok esnek, çok yönlü, numuneye zarar vermeyen ve küçük yapılardaki mıknatıslanmayı saptayabilen bir tekniktir ve daha önce belirtilen diğer tekniklerle karşılaştırıldığında en ucuz çalışma yöntemidir.

Optik Kerr etkisi, bir ışığın bir örnek ile etkileşmesinden sonra kutuplanmasında meydana gelen değişim olayına verilen isimdir. Manyeto Optik Kerr etkisi ise, doğrusal olarak polarize edilmiş bir ışığın manyetik bir örnekten yansıdıktan sonra kutuplanmasının manyetik etkilerden dolayı eliptik kutupluluğa döndürüldüğü bir etkidir. Kerr etkisi ilk olarak 1877'de John Kerr tarafından keşfedilmiştir (Kerr, 1877-1878). Benzer bir etki olan Faraday etkisi ise ilk olarak 1845'de Faraday tarafından keşfedilmiştir (Faraday, 1846). Faraday etkisi ise, manyetik bir numuneden iletilen doğrusal kutuplu ışığın kutuplanma düzleminin döndürülmesidir. Her iki etki için gözlenen polarizasyonun dönme açısı, numunenin yüzeyinin mıknatıslanma kuvvetine ve gelen ışığın düzlemine göre numune yüzeyinin mıknatıslanma yönüne bağlıdır. Mıknatıslanma yöneliminin bu etkisi, Kerr etkisinin farklı mıknatıslanma geometrileri ile tarif edilebilir.

MOKE'un dönme etkisi genel olarak manyetik ortamın etkisini açıklayan dielektrik tensör formunda tanımlanmaktadır. Dielektrik yasası şöyle verilir;

$$D = \boldsymbol{\varepsilon}.E \tag{2.16}$$

Denklem (2.16)'da **ε**, ışık dalgası düzleminin elektrik alan vektörü (E) ile indüklenen elektrik yer değiştirme vektörü (D)'yi bağlayan dielektrik geçirgenlik tensörüdür.

Genelleştirilmiş dielektrik geçirgenlik tensörü şu şekilde verilir;

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon \begin{matrix} 1 & -i\theta_\vartheta m_3 & i\theta_\vartheta m_2 \\ i\theta_\vartheta m_3 & 1 & -i\theta_\vartheta m_1 \\ -i\theta_\vartheta m_2 & i\theta_\vartheta m_1 & 1 \end{matrix} . \begin{matrix} B_1 m_1^2 & B_2 m_2 m_3 & B_2 m_1 m_3 \\ B_2 m_1 m_2 & B_1 m_2^2 & B_2 m_2 m_3 \\ B_2 m_1 m_3 & B_2 m_2 m_3 & B_1 m_3^2 \end{matrix} \tag{2.17}$$

Burada θ_ϑ, ışığın polarizasyon düzleminin manyeto-optik rotasyonunu tanımlayan malzemeye bağlı olan Voigt sabitidir, bu durumdaki yansıma Kerr etkisindedir. Bu Voigt terimi, numunenin mıknatıslanmasıyla orantılı olan birinci dereceden kompleks malzeme parametresidir. B_1 ve B_2 , Voigt etkisini tanımlayan sabitlerdir ve m_i, kübik eksen boyunca birim vektörünün mıknatıslanma bileşenleridir. θ_ϑ, B_1 ve B_2 karmaşık sabitlerdir ve çoğu malzeme için iyi bilinmemektedir. Ancak bu sabitlerin gerçel kısımları en baskın olanıdır. Denklem (2.16)'daki terim kullanılarak dielektrik yasası referans (Zak vd ark, 1990)'de gösterildiği gibi genelleştirilebilir;

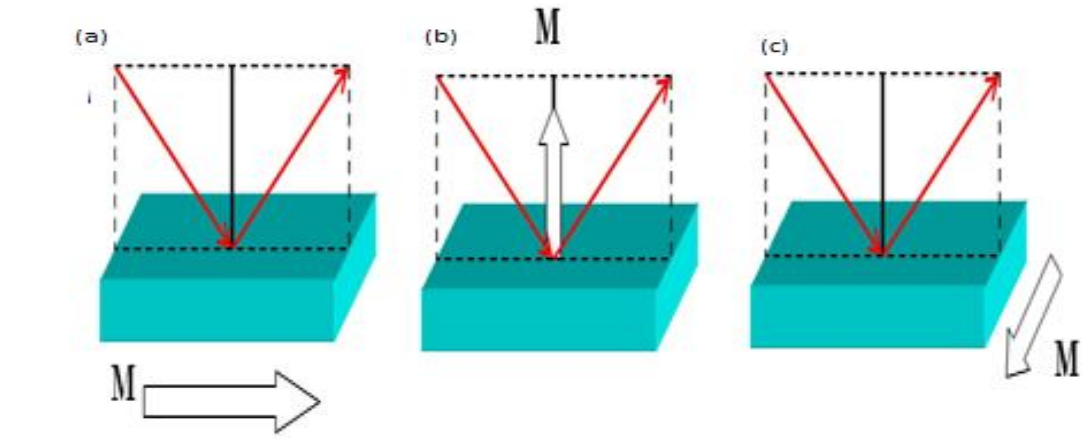
$$D = \varepsilon(E + i\theta_\vartheta m \times E) \tag{2.18}$$

Denklem (2.17)'de $\boldsymbol{\varepsilon}$, dielektrik geçirgenlik tensörüdür. D vektörü, E ile numunedeki mıknatıslanma vektörü m arasındaki manyeto-optik etkileşmeler tarafından üretilen ikincil ışık genliğini(secondary light amplitude) temsil eder. Denklem (2.18)'den itibaren vektörel çarpım Lorentz kuvveti $(m \times E)$ teorisi kullanılarak açıklanabilen simetrisi ile Kerr etkisinin gyro-elektrik yapısını gösterir. Genel olarak MOKE'da gözlemlenen, gelen ışığın polarizasyonunda değişiklik şeklinde olan ortamın manyeto-optik tepkisidir. Bu değişiklik iki şekilde yapılır; birincisi, yansıtılan ışığın aynı fazda

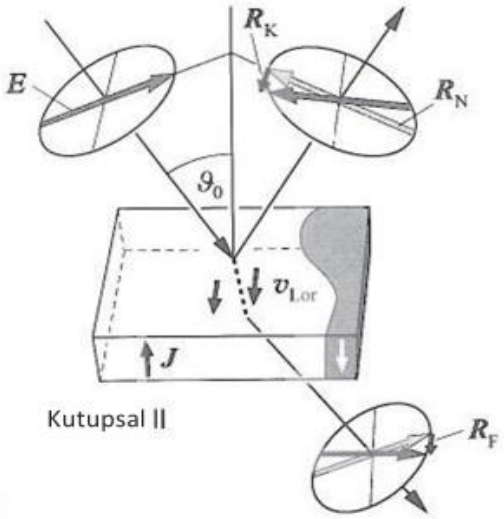
(eş fazlı) bileşenlerinin değişimi, gelen ışığın polarizasyon düzleminde dönmesine sebep olur ve ikincisi, gelen ışığın polarizasyonunda eliptik olacak şekilde değişikliğe sebep olan faz dışı değişim neden olur (Faz dışı: örneğin iki dalganın aynı anda aynı noktadan geçmediği durum).

2.3.1 Kerr etkisinin geometrileri

MOKE'un 3 farklı geometrisi vardır, bu ışığın geliş düzlemi veya manyetizasyon yönleri ile ilgilidir. MOKE'un üç farklı geometrisi; (a) boyuna MOKE, (b) kutupsal MOKE, ve (c) enine MOKE'dan oluşmaktadır ve şekil 2.7'de gösterilmektedir.

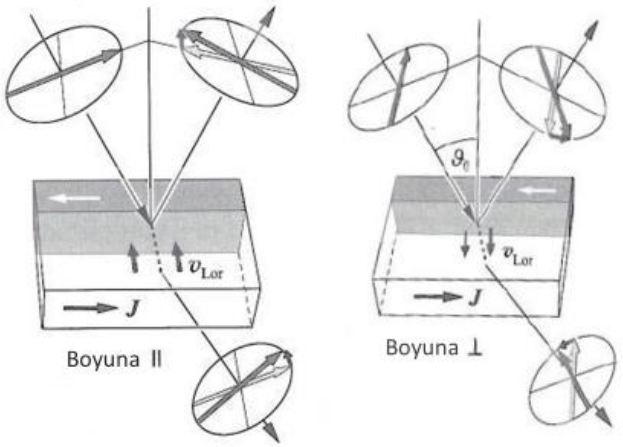


Şekil 2.7 Farkı manyetizasyon yönlerine göre MOKE geometrileri a. boyuna-MOKE, b. kutupsal-MOKE, c. enine-MOKE (Kesserwan 2011)



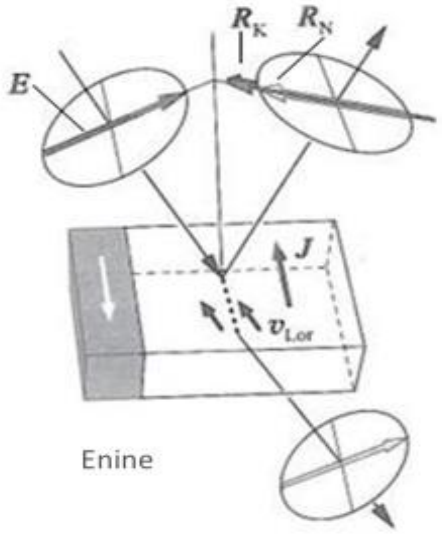
Şekil 2.8 Yansımada Kerr etkisini ve iletimde Faraday etkisini veren, Lorentz hareket yönü ϑ_Lor 'i ve mıknatıslanma yönünü gösteren kutupsal(polar)-MOKE'un şematik gösterimi (Hubert ve Schafer 1999)

Kutupsal-MOKE'da doğrusal olarak polarize edilmiş ışık, elektronların polarizasyon düzlemine paralel olarak elektrik alan E ile aynı düzlemde salınım yapmasına neden olur. Şekil 2.8 itibariyle R_N , gelen ışık ile aynı düzlemde kutuplandığı, düzenli olarak yansıyan ışıktır. Küçük bir titreşim Lorentz kuvveti tarafından birincil harekete ve mıknatıslanma yönüne dik yönde indüklenir. İkincil hareket Lorentz kuvveti $(m \times E)$ ile orantılıdır, yansıma için Kerr genliği R_K 'yı oluşturur. Bu nedenle R_N ve R_K arasındaki açı farkı mıknatıslanmaya bağlı polarizasyonun dönmesi ile sonuçlanır.



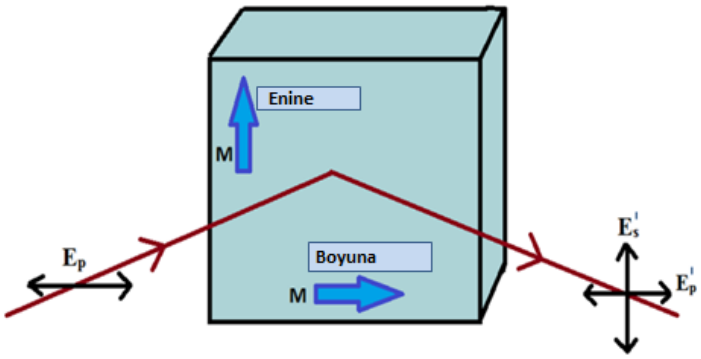
Şekil 2.9 Gelen ışığın polarizasyon düzlemine göre boylamasına geometrinin paralel ve dik düzleminin şematik gösterimi (Hubert ve Schafer 1999)

Şekil 2.9 Boyuna-MOKE geometrisinde, numunenin mıknatıslanma yönü gelen ışığın düzlemine göre paraleldir. Boyuna etki hem polarizasyon hem de gelen ışığın dik polarizasyon düzlemi için polarizasyon düzleminde dönme değişikliğine neden olur. Şekil 2.9'den, Lorentz hareketleri geliş düzleminin iki farklı polarizasyonundan elde edilen Kerr genliğinin ters yönde dönmesine yol açacak şekilde birbirlerine zıt olduğu görülmektedir. Boyuna etki, ışığın normal gelişinde kaybolur (θ=0), çünkü Lorentz kuvveti ya yok oluyor ya da ışın boyunca işaret eder.



Şekil 2.10 Lorentz hareketi ile enine-MOKE için şematik gösterim (Hubert ve Schafer 1999)

Enine-MOKE, mıknatıslanma yönü gelen ışığın düzlemine dik olduğunda oluşur. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, enine-MOKE'da yansıtılan ışığın genliğinde değişime neden olur, ancak Kerr genliğinin polarizasyon yönü devamlı olarak yansıtılan ışığınkiyle aynı olur. Dolayısıyla, görüntüde çok az kontrast farkı üretecektir çünkü ışık kaynağından enine-MOKE sinyalini etkileyebilecek şiddet değişimi şeklinde ayrıca gürültü olacaktır. Yine de enine-MOKE, ölçüm fonksiyonu için kullanılabilir (Krinchik ve Artem'ev, 1967). Boyuna-MOKE'a benzer şekilde enine etkide numune yüzeyine gelen normal ışığı elimine eder.



Şekil 2.11 Yüzeye gelen, s-polarize ve p-polarize ışığın süperpozisyonlarının şematik gösterimi (Hujan 2013)

Yukarıda boyuna ve enine Kerr etkisinin açıklaması, yüzey filmlerinde Maxvell sınır koşullarının uygulanmasıyla elde edilmiş olan Kerr Fresnel yansıma katsayısı kullanılarak basitleştirilebilir (Zak vd. 1990). Yüzeye gelen ve sonra yansıyan p-polarize ve s-polarize ışığın süperpozisyonlarını gösteren şekil 2.11'a atfen referans (Florchzak ve Dalhberg, 1990)'da verilen enine etki için katsayılar denklem (2.19), (2.20) ve (2.21) ile verilmektedir;

$$r_{pp}^{t} = \left(\frac{n\beta - \beta'}{n\beta + \beta}\right)\left(1 + \frac{k_2 sin2\theta}{n^2(n^2 cos^2\theta + sin^2\theta)}\right) \tag{2.19}$$

$$r_{ss}^{t} = \frac{\beta - n\beta'}{\beta + n\beta'} \tag{2.20}$$

$$r_{ps}^{t} = r_{sp}^{t} = 0 \tag{2.21}$$

t : transverse (enine)

Yine referans (Florchzak ve Dalhberg, 1990)'da verilen boyuna Kerr etkisi için Fresnel yansıma katsayıları denklem (2.22), (2.23) ve (2.24) ile verilmektedir;

$$r_{pp}^{l} = \frac{n\beta - \beta'}{n\beta + \beta'} \tag{2.22}$$

$$r_{ss}^{l} = \frac{\beta - n\beta'}{\beta + n\beta'} \tag{2.23}$$

$$r_{ps}^{l} = r_{sp}^{l} = \frac{\gamma_s \beta k_2}{(n\beta + \beta')(\beta + n\beta')} \tag{2.24}$$

Burada θ, numunenin normalinden ölçülen geliş açısıdır, n filmin kırılma indisidir, $k_2 = in^2\theta$ göreceli geçirgenlik tensörünün kapalı diyagonal terimidir.

$\gamma_s = sin\theta$, $\beta = cos\theta$ ve $\beta' = (1 - \frac{sin^2\theta}{n^2})^{\frac{1}{2}}$

Yukarıda enine katsayılara bakıldığında, enine Kerr etkisi dönmeye neden olan diyagonal terimlerin denklem (2.21)'de gösterildiği gibi sıfıra eşit olduğunu düşünürsek gelen ışığın polarizasyon düzleminde dönme değişikliğine neden olmaz. Mıknatıslanmaya bağlı olan tek parametre denklem (2.19)'da verilen gelen ve yansıyan p-polarize ışığa ilişkin yansıma katsayısıdır. Bu nedenle, daha önce açıklandığı gibi sadece enine etki için ışık şiddeti değişimi (light intensity chance) olacaktır. Ayrıca, boyuna Kerr etkisi için katsayılar, denklem (2.24)'deki diyagonal olmayan terimlerinden gelen ışığın polarizasyon düzleminde manyetik-bağımlı bir dönme değişimi olduğunu doğrular.

Işık şiddeti analizörden geçtikten sonra normal polarizasyon denklemi kullanılarak aşağıdaki şekilde gösterilebilir;

$$I = I_0 . cos^2\theta \tag{2.25}$$

Burada I_0, analizöre girmeden önce yansıtılan ışığın şiddetidir ve θ, analizör düzlemi ve I_0 düzlemi arasındaki açıdır. Dolayısıyla maksimum şiddet değişimi için denklem (2.25) farklılaştırılarak aşağıdaki formda hesaplanabilir;

$$\frac{dI}{d\theta} = 2. I_0 . cos\theta . sin\theta \tag{2.26}$$

Elde edilen maksimum şiddet değişimi θ=45^o dir, ancak bu bütün yansıyan ışığın maksimum değişimidir. Tüm yansıyan ışığa göre Kerr dönmesinin neden olduğu ışık şiddetinin değişmesi gerekir ve şöyle ifade edilir;

$$\Delta I = \frac{dI}{d\theta} . \frac{a_r}{I} \tag{2.27}$$

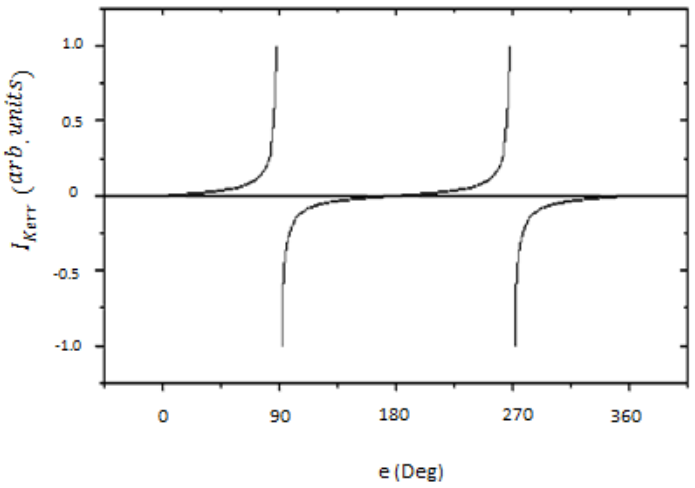
Böylece, Kerr dönmesine bağlı göreceli değişiklik;

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{2I_0 cos\theta sin\theta}{I_0 cos^2\theta} . a_r \tag{2.28}$$

Ve I_{Kerr} ;

$$I_{Kerr} = \frac{\Delta I}{I} = 2a_r . tan\theta \tag{2.29}$$

Burada ΔI, Kerr dönmesine bağlı ışık şiddeti değişimidir ve a_r, Kerr dönmesinin açısıdır. Ayrıca Kerr duyarlılığı ve denklem (2.29)'da gösterildiği gibi analizör ayarına ilişkin şekil (2.11)'deki grafik çizilerek I_{Kerr} 'in analizör ayarının 90^o ye yakın bölgelerde çok yüksek olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Polarizörün, polarizasyon düzlemi ile analizör düzlemi arasındaki açıya karşı Kerr duyarlılığının grafiği (Hujan 2013)

Şekil 2.12'de görüldüğü gibi grafiğin 90°'deki yüksek eğimi, analizörün açısındaki küçük bir değişim, Kerr duyarlılığının yüksek bir kazanç veya kaybına neden olabileceği anlamına gelir. Deneysel olarak analizörün açısını birkaç derece saptamak zordur. Dahası, polarizörün %100 verimlilikten daha az olmaları ve numunenin üzerine odaklanmış ışığın geliş açılarının aralığı nedeniyle her zaman polarize edilmiş ışıkta bir derece kusur vardır. Bu nedenle çok yüksek bir Kerr duyarlılığı için arkaplan ışığını tamamen kaldırmak için analizörü polarizör ile tam 0° çapraz olacak şekilde ayarlamak mümkün değildir.

Kerr duyarlılığını arttırmak için, analizörü ve polarizörü mükemmel bir şekilde ayarlamak veya arkaplan ışığının çoğunun yukarıda anlatıldığı gibi sönüm yoluyla uzaklaştırılması çalışması ile her zaman elde edilemez.

Ortaya çıkan görüntü çok karanlıksa elektronik olarak işlenen sinyal çok küçük olacaktır. Kameradan elde edilen karanlık görüntü çok loş olduğundan daha az Kerr sinyali içerecektir. Bu nedenle daha büyük a_r analizör açısı daha çok tercih edilir. Benzer şekilde, Yüksek bir Kerr duyarlılığı mikroskop kurulumu için, sinyal-gürültü oranı, Kerr mikroskobunun r_{SN}'sinin yeterince yüksek olması gerekir. Böylece zayıf

Kerr sinyali gürültüde kaybolmaz. Kerr sinyali oldukça düşüktür, fakat r_{SN} yeterince büyük olduğu durumda elektronik olarak geliştirilebilir.

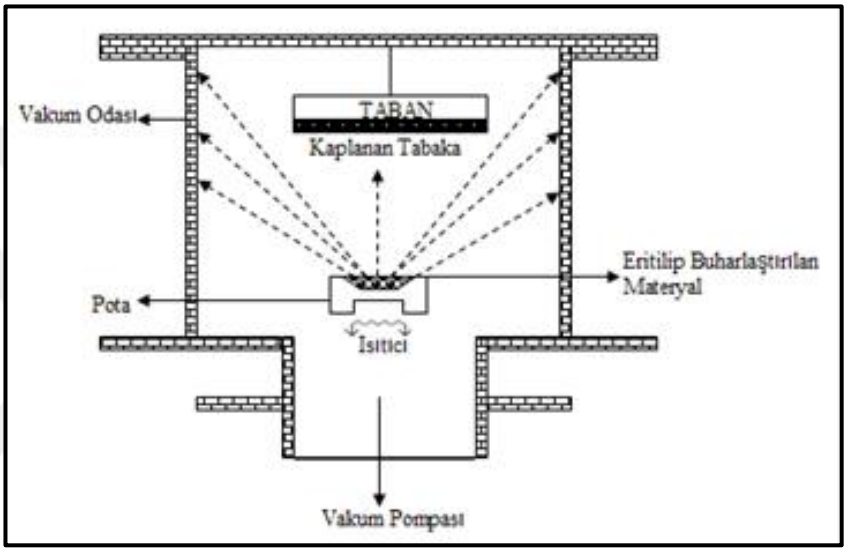
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çerçevesinde kullanılan deneysel yöntemler ve cihazlar hakkında bilgi verilmiştir.. FeAl ince filmleri VAKSİS-PVD model ısısal buharlaştırma sistemiyle üretilmiştir. Üretilen ince filmlerin kalınlıklarını ve kimyasal kompozisyonlarını belirlemek için ZEİSS-EVO40 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) kullanılmıştır. İnce filmlerin kristal yapısını tespit etmek için Rigaku MiniflexII marka X-ışını kırınımmetresi (XRD) kullanılmıştır. Daha sonra farklı atma sürelerine (ns, ps ve fs) sahip lazer demetinin FeAl ince filmleri üzerinde manyetik bölgeler oluşturularak manyetik örgüleme çalışması yapılmıştır. Farklı lazer parametreleri ile örgülenen ince filmlerin üzerindeki manyetik bölgeler optik ve MOKE mikroskobu ile incelenmiştir. Ayrıca Laboratuvarımızda ilk kez kurulan Statik-MOKE deney düzeneği ile FeAl ince filminin manyetik özellikleri incelenmiştir.

3.1 Vakum Altında Isısal Buharlaştırma Sistemi

Fiziksel buhar biriktirme işlemleri genellikle vakum koşulları altında ve dört adımda gerçekleşir. İlk adım buharlaşma adımıdır. Bu aşamada hedef dirençli ısıtma veya elektron demeti gibi yüksek enerji kaynağı ile buharlaştırılır. İkinci adım taşıma adımıdır. Bu adımda ise buharlaşan atomlar bu hedeften bir alt-taş yüzeyine doğru hareket eder ve taşınma gerçekleştirilmiş olur. Üçüncü adım reaksiyondur. Bu adımda, sistemde azot veya oksijen gibi bir gaz varsa malzemenin atomları gaz ile etkileşime girer. Fakat kaplamanın gaz içermediği yalnızca hedef malzemeden oluştuğu durumlarda bu adım işlemin bir parçası olmaz. Son adım olarak biriktirmede artık alt-taşa doğru hareket eden atomlar alt-taş yüzeyini (genellikle homojen bir şekilde) kaplayacaktır.

Araştırmalar geleneksel vakum biriktirme olarak bilinen ısısal buharlaştırma işlemi, mikrometre (μm) kalınlığında ince film hazırlamak için kullanılan en basit tekniktir [Adechi, Kitabatake ve Vasa 2004]. Isısal buharlaştırma işlemi, bir vakum odasında buharlaşma ve yoğunlaşma işlemlerinden oluşur. İlk olarak, malzemeler ısıtılmış kaynak tarafından buharlaştırılır, daha sonra buharlaştırılan malzeme alt-taş üzerinde biriktirilir. Bu işlem dirençli ısıtma (şekil 3.1) veya elektron ışın kaynağı kullanılarak gerçekleştirilebilir.



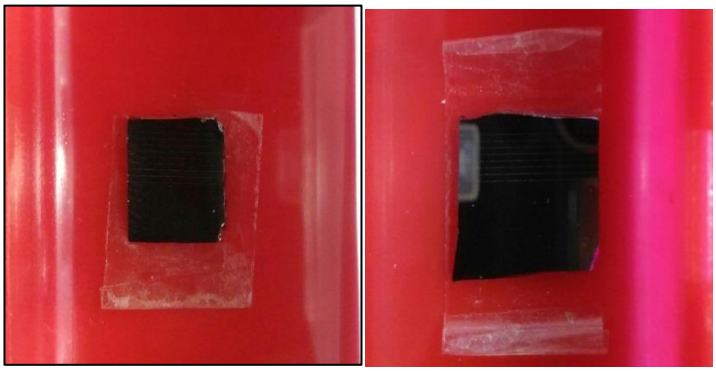
Şekil 3.1 Isısal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi (Bilgen 2015)

Dirençli yöntemde kaynak olarak genellikle tungsten (erime noktası 3683 K), molibden (e.n. 2890 K) ve tantal (e.n. 3269 K) gibi ısıya dayanıklı (refractory) metallerden üretilen bir kayık tabak veya telli ısıtma malzemelerinden oluşur (Chopra 1969).

3.1.1 FeAl ince filmlerin hazırlanması ve üretilmesi

$Fe_{50}Al_{50}$ kompozisyonuna sahip alaşım olarak üretilmiş olan külçe halindeki hedeften kesilen parçalar temizlemek amacıyla sonik banyoda 1 saat bekletildikten sonra sırasıyla: 0.0140gr, 0.0142gr, 0,0155gr olacak şekilde hassas terazide tartıldı. Bu tartım işlemi tüm örneğin buharlaştığında, kullanılan alttaşın yüzeyini buharlaşan örneğin tam

olarak kaplaması elde edilecek örnek kalınlığı hesap edilerek belirlenmiştir. Daha sonra ince filmler üretilmek üzere Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında bulunan VAKSİS PVD-handy Twin Çift Vakum Odalı Isısal buharlaştırma sistemi (şekil 3.3) kullanıldı. Bu sistemde büyütme hızı ve kalınlıkları bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirildi. Büyütme işleminde kaynak olarak tungsten pota kullanıldı ve alt-taş (SiO_2 alt-taş) tutucu tungsten potadan yaklaşık 12 cm yukarıya yerleştirildi. Daha sonra vakum odasının havası boşaltılarak istenilen vakum 5.10^{-5} Torr basınca ulaşınca film kaplama süreci başlatıldı ve tungsten pota üzerinden kontrollü bir şekilde elektrik akımı geçirilerek ısıtıldı (tungsten potada üretilen bütün ince filmlerde yaklaşık 24A'de kızarmaya başladı). Üretilen ince filmler 64A - 70A (bu akım aralığında basınç $1{,}7.10^{-5}$ - $2{,}6.10^{-5}$ Torr aralığında değişim göstermekte idi) arası buharlaştıkları için daha sonra akım daha küçük aralıklarla arttırıldı ve pota üzerinden geçirilen en yüksek akım 81A olarak ayarlandı. Film büyütme işlemi sisteme bağlı olan kalınlık monitöründen istenilen film kalınlıkları bilgisi elde edildikten sonra ince film kaplama işlemi sona erdirildi. Üretilen ince filmler şekil 3.2' de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Isısal buharlaştırma yöntemiyle SiO_2 alttaş üzerine büyütülen FeAl ince filmleri



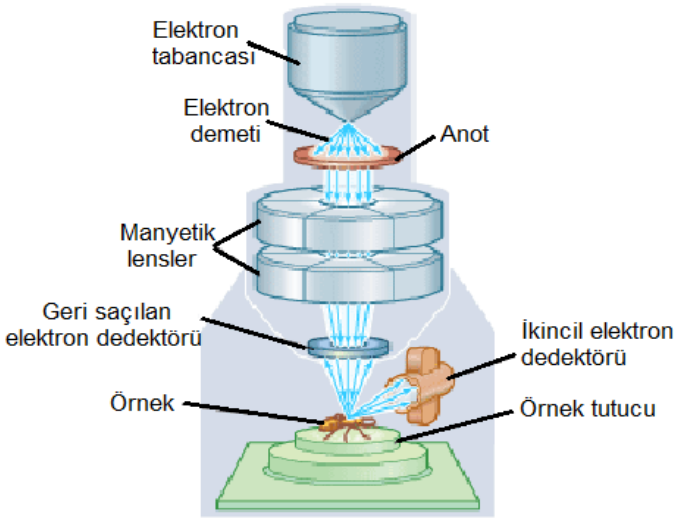
Şekil 3.3 VAKSİS PVD-handy Twin Çift Vakum Odalı Isısal buharlaştırma sistemi

3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), kimyasal bileşimlerin, kristal yapıların ve yönlerin belirlenmesinde, element analizi, numuneleri görüntüleme, numuneler üzerindeki morfoloji ve topografya tayininde, çok fazlı numunelerde kompozisyondaki kontrastları gösteren, yıkıcı olmayan tahribatsız bir karakterizasyon tekniğidir. SEM'de numune yüzeyinde çeşitli sinyaller üretmek için yüksek enerjili elektronlardan oluşan odaklanmış bir ışın kullanılır. Çoğu uygulamada veriler numunenin yüzeyinde seçilen bir alandan toplanır ve bu özelliklerde uzaysal farklılıkları gösteren 2-boyutlu bir görüntü elde edilir.

SEM'de hızlandırılmış elektronlar önemli miktarda kinetik enerji taşır ve bu enerji, gelen elektronlar numunede yavaşlatıldığında elektron-numune etkileşimleri tarafından üretilen ve çeşitli sinyaller olarak yayılır. Bu sinyaller, ikincil elektronları (SE, SEM görüntülerini üreten), geri saçılmış elektronları (BSE), kırınım olarak geri saçılmış elektronları (EBSD, minerallerin kristal yapılarını ve yönlerini belirlemek için kullanılır), fotonları (element analizi ve sürekli x-ışınları için kullanılan karakteristik x-ışınları), görünür ışık (katotlüminesans-CL) ve ısıyı içerir. İkincil elektronlar ve geri saçılmış elektronlar, numuneyi görüntülemek için oldukça yaygın olarak kullanılır.

İkincil elektronlar (SE), numune morfolojisi ve topografya gösterimi için en uygunu iken, geri saçılmış elektronlar (BSE), çok fazlı numunelerin kompozisyonundaki kontrast farkını göstermek için en uygundur. X-ışını, gelen elektronların numunedeki atomların ayrık yörüngelerinde (kabukları) elektronlarla elastik olmayan çarpışmalarından üretilir. Uyarılmış elektronlar daha düşük enerji hallerine döndüklerinde sabit bir dalga boyuna sahip x-ışınları verirler, yani belirli bir element için farklı kabuklardaki elektronların enerji seviyelerindeki farkla ilgilidir. Böylece her element için karakteristik x-ışınları, elektron demeti tarafından uyarılan malzemelerden üretilmiş olur.



Şekil 3.4 Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi

SEM analizi yıkıcı olmadığından yani elektron etkileşimleriyle üretilen x-ışınları numunenin hacim kaybına yol açmadığından aynı numuneyi tekrar analiz etmek mümkündür.

SEM rutin olarak numunelerin şekillerinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek ve kimyasal bileşimlerin uzaysal farklılıklarını göstermek için kullanılır.

3.3 Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX)

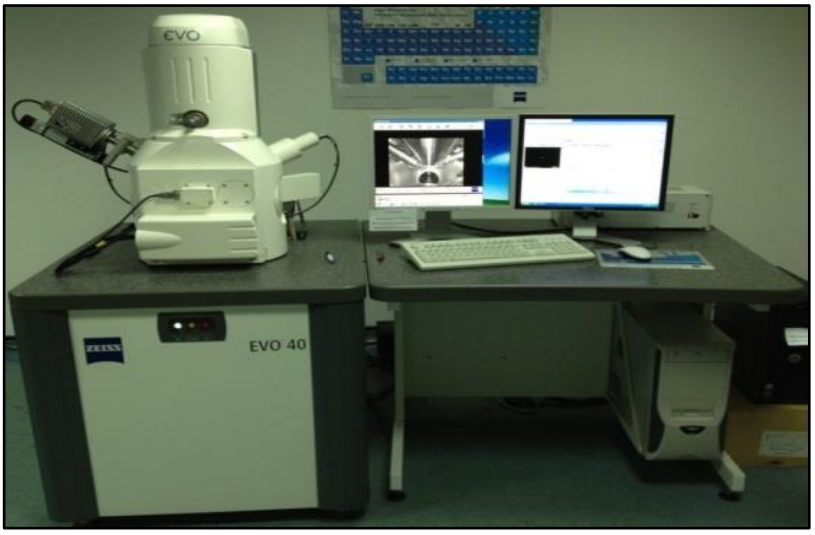
Bir elektron ışınının numune ile etkileşimi, x-ışınları dahi olmak üzere çeşitli emisyonlar üretir. Farklı elementlerin karakteristik x-ışınlarını bir enerji spektrumuna ayırmak için bir enerji dağıtıcı (EDX) dedektörü kullanılır. Spesifik elementlerin çokluğunu belirlemek ve enerji spektrumu analizi yapmak için EDX sistemi yazılımı kullanılır (serc.carleton.edu./research-education).

EDX, bir elektron demeti ile bombardıman edilmek üzere yaydığı x-ışını spektrumu kullanarak katı numunenin kimyasal analizini sağlar. Yeterli x-ışını yoğunluğu elde etmek için elektronların numunede bulunan herhangi bir elementin en yüksek uyarma enerjisinden iki kat daha yüksek bir voltajla hızlandırıldığı bir elektron gözlem analizi içerir (Love and Scott, 2001). Hızlandırılmış elektronlar numune ile iki ana yolla etkileşime girer. Bremsstrahlung (frenleme ışıması) denilen ve elektronların malzemede ainden yavaşlatılması nedeniyle yaptıkları ivmeli hareketten kaynaklanan ışıma şiddeti $I(E)dE = k.İ.Z(\frac{Emax}{E})dE$ ile verilir. Burada İ, demet akımıdır, Z numunenin atom numarası, k bir sabittir ve E_{max} hızlandırılmış elektron demetinin enerjidir.

Hızlandırılmış elektronlar ayrıca, atom başına atom numarasıyla ilişkili olan ve dolayısıyla elementin atom ağırlığı ile orantılı olan iç kabuğa bağlı elektronlarla etkileşerek yavaşlar. Bu dış yörüngeden gelen elektronların, 1-10keV enerji aralığında olanların, numunenin analizinde kullanıldığı karakteristik x-ışınlarını üretebileceği atomların iç yörüngesinde boşluklar üretir (Severin, 2008).

Bilinmeyen bir numunedeki elementlerin tanımlandığı nitel analiz, x-ışını spektrumundaki çizgileri tanımlamak için enerji ve dalga boyu tabloları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu her bir element için karakteristik x-ışını tepe noktasının enerjisini tanımlayarak yapılır (Leng, 2009).

Bu tez çalışmasında üretilen FeAl ince filmlerin SEM-EDX analizleri Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsünde bulunan 0,5-30 kV aralığında ölçüm sağlayan ZEİSS EVO40 model taramalı elektron mikroskobu (şekil 3.5) ile analizler yapılmıştır ve sonuçlar araştırma bulguları bölümünde yer almaktadır.



Şekil 3.5 Taramalı elektron mikroskobu (ZEISS EVO40 model)

3.4 X-Işını Kırınımı-XRD

X-ışını kırınımı (XRD), öncelikle bir numunede var olan farklı fazlardaki kristal bileşimlerin kantitatif olarak belirlenmesi ve tanımlanması için kullanılan, yıkıcı olmayan çok yönlü hızlı bir analitik tekniktir ve kristal yapı, atomik mesafeler gibi birim hücre boyutları hakkında bilgi sağlar. XRD, monokromotik x-ışınları ve kristal bir numunenin yapıcı girişimine dayanır. X-ışınları bir katot tüpünde üretilir, monokromotik radyasyon üretmek için süzülür, konsantre olmak için toplanır ve numuneye doğru yönlendirilir. Gelen ışınların numune ile etkileşimi, koşulların Bragg yasasını sağlamasıyla ilgilidir. Bu yasa, elektromanyetik radyasyonun dalga boyu, kırınım açısı ve kristal numunenin örgü mesafeleriyle ilgilidir. Bu kırınıma uğrayan x-ışınları daha sonra tespit edilir, toplanır ve işlenir. Numuneyi 2θ açı aralığında tarayarak örgünün tüm olası kırımın yönleri elde edilir.

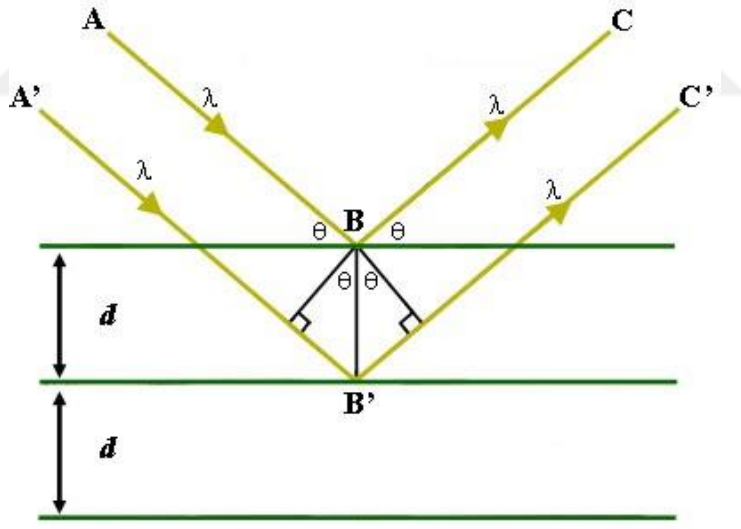
Bragg Yasası; bir kristal sabit bir dalga boyuna sahip x-ışınları ile belirli geliş açılarında bombardıman edildiğinde, dağınık x-ışınlarının dalga boyları yapıcı olarak etkileşime girdiğinde, şiddetli yansıyan x-ışınları üretilir. Dalgaların yapıcı olarak karışması için hareket yolundaki dalga boylarının tam katlarına eşit olması gerekir. Bu yapıcı girişim meydana geldiğinde kırılan x-ışını demeti kristale gelen ışınını eşit bir açıda

bırakacaktır. Bu özellikleri göstermek için, kristal örgü düzlemsel mesafeleri d olan bir kristal düşünelim. Işın yolu uzunluğu ABC ve A'B'C' ışın yolları arasındaki farkın dalga boyunun tam katı olduğu durumlarda, söz konusu dalga boyunun, kristal örgü düzlemsel mesafenin ve geliş açısının (θ) bir kombinasyonu için yapıcı girişim meydana gelecektir. Bir kristaldeki atomların her bir rasyonel düzlemi, tek ve benzersiz bir açıda (sabit dalga boylu x-ışınları için) kırınıma uğrayacaktır.

Gelen x-ışınlarının dağla boyu, geliş açısı ve atomların kristal kafes düzlemleri arasındaki mesafeleri ile arasındaki genel ilişki Bragg Yasası ile tanımlar;

$$n\lambda = 2d\sin\theta \tag{3.1}$$

Burada n (bir tam sayı) yansıma sırasını, λ gelen ışının dalga boyunu, d kristalin düzlemsel aralığını ve θ ise geliş açısını temsil eder.



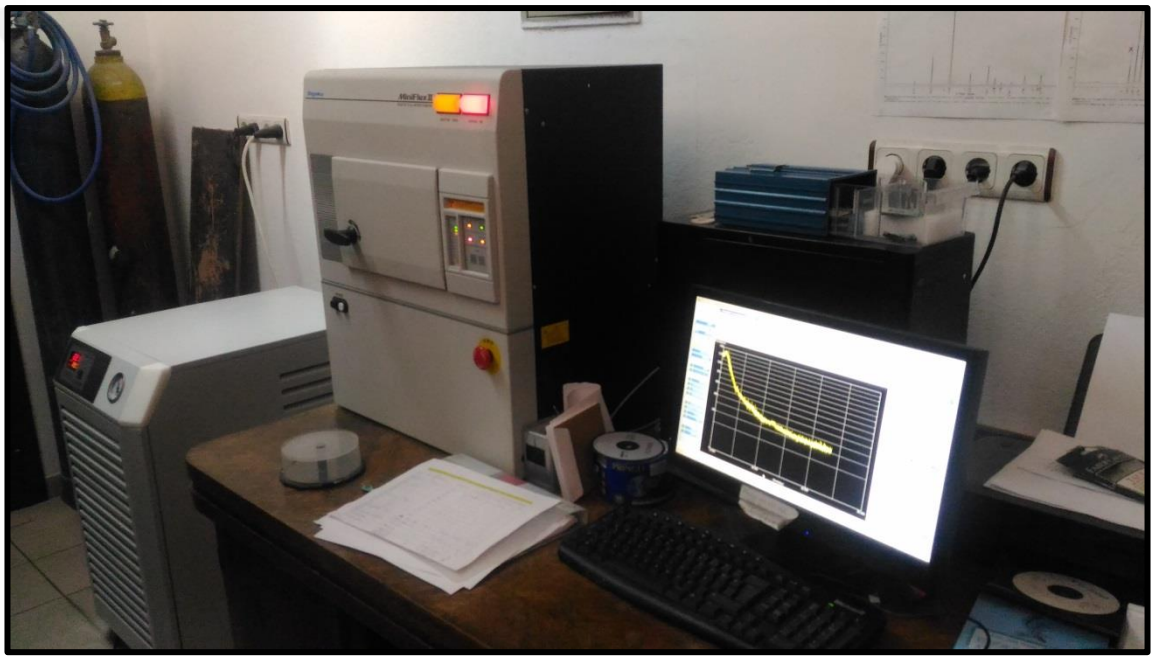
Şekil 3.6 Bragg kırınım yasası şematik gösterimi

Miller indisleri h,k,l, ve örgü sabiti a, kübik malzemelerde kafes aralığını ifade etmek için kullabilir, öyle ki Bragg yasası için;

$$sin\theta_{hkl} = \frac{\lambda}{2a}\sqrt{(h^2} + k^2 \tag{3.2}$$

Bu teknikten elde edilen x-ışını spektrumları, malzemenin yapısal bir parmak izini oluşturur.

Numunenin tanımlanması, bilinmeyen bir numuneden elde edilen XRD deseninin çok sayıda malzeme için referans modellerini içeren toz kırınım standartları ortak komitesi (JCPDS) gibi uluslararası kabul görmüş bir veri tabanıyla karşılaştırılarak yapılır (Dutrow ve Clark 2007, Wong-Ng vd. 2001).



Şekil 3.7 Rikagu MiniFlexII model XRD cihazı

Bu tez çalışmasında üretilen FeAl ince filmlerin XRD analizleri Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvar'ında bulunan Rikagu MiniFlexII marka X-ışını kırınımmetresi (şekil 3.7) kullanılarak yapılmıştır.

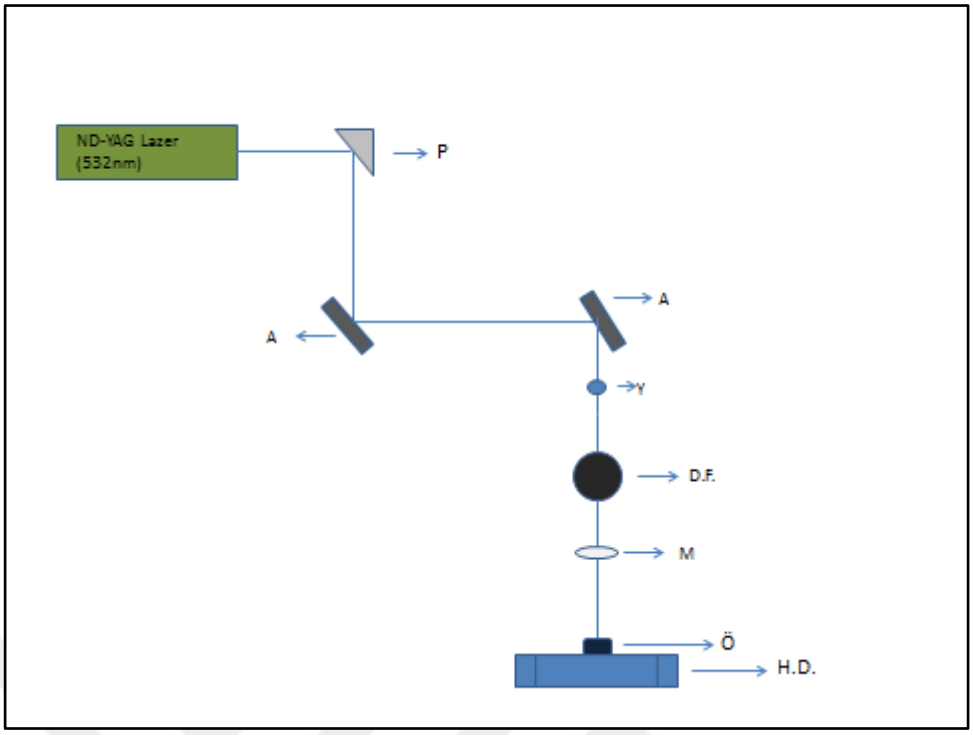
3.5 Lazer ile Örgüleme

Üretilen FeAl ince filmlerin kalınlıkları ve kompozisyonları belirlendikten sonra numunelerin yüzeylerinde Quantel Brilliant Nanosaniye Lazer Sistemi (şekil 3.9),

Continuum Leopard Pikosaniye Lazer Sistemi (şekil 3.11) ve Spectra Physics Femtosaniye Lazer Sistemi (şekil 3.13) kullanılarak farklı lazer parametreleri ile manyetik örgüleme yapılmıştır.

3.5.1 Nanosaniye lazer ile örgüleme

Isısal buharlaştırma sistemiyle üretilen FeAl ince filmleri, Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında bulunan Quantel Brilliant Nanosaniye Lazer sistemi ile bölgesel olarak lazer örgüleme yapıldı. Lazer sistemi, 4 ns atma süresine, 1-10 Hz tekrarlama frenkans aralığına, 4 W çıkış gücüne ve 532 nm çıkış dalga boyuna sahiptir. Lazerin örnek üzerindeki enerjisi 2 μJ' den 18 μJ' e kadar değiştirildi. Nanosaniye lazerden çıkan 532 nm dalga boyundaki ışın öncelikle prizmaya gönderildi, prizmadan düşük şiddette alınan ışın iki tane ayna yardımıyla döner optik yoğunluk (optical density, OD) filtresinden geçirildi. Işığın gücü, döner filtre ile ayarlanarak Gentec-eo firmasına ait QEBSP-B-MT marka güç-metre ile ölçüldü. Döner filtreden geçirilen ışın daha sonra odak uzaklığı 150 mm olan ince kenarlı mercek kullanılarak numune üzerine gönderildi. Referans (Landry, 2008) 'de detaylı olarak anlatılan bıçak-kenarı yöntemiyle lazer ışınının yarıçapı örnek üzerinde 15 μm olacak şekilde ayarlandı ve ışığın akısına bağlı olarak örgülemeler yapıldı. Örgülemelerin yapıldığı tek eksenli hareketli düzeneğin hızı 1 mm/s olacak şekilde ayarlandı. Nanosaniye lazer için kurulan deney düzeneği aşağıdaki şekil 3.8' de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.8 Nanosaniye lazer sistemi için kurulan deney düzeneği

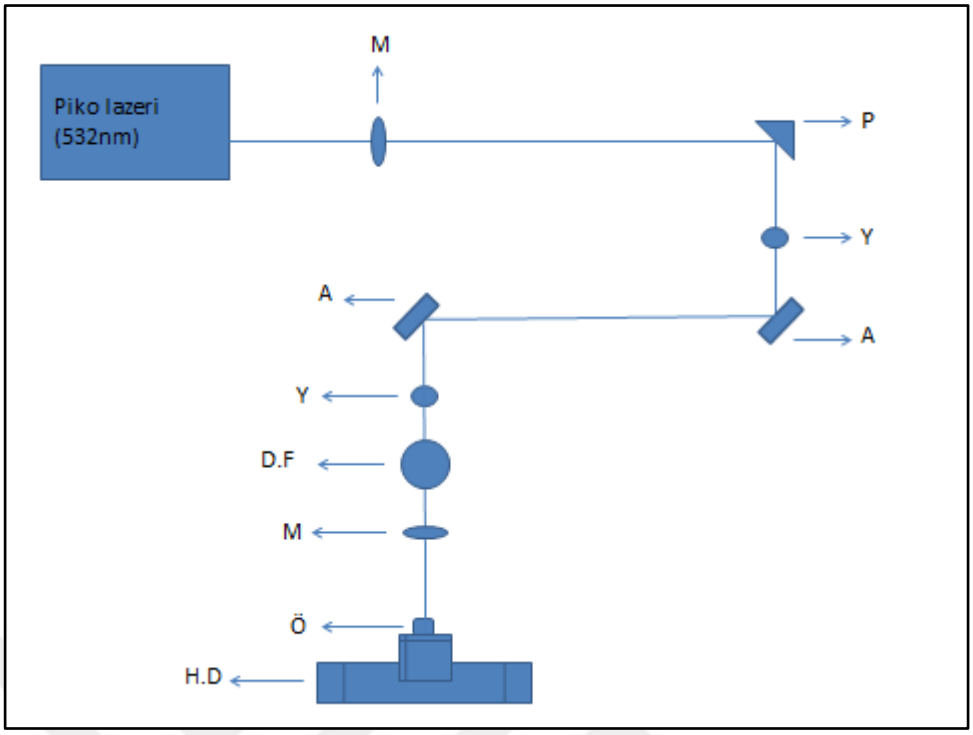
(P: prizma, A: ayna, Y: yarık, D.F: döner filtre, M: mercek, Ö: örnek, H.D: hareketli düzenek (xyz-düzenek)



Şekil 3.9 Quantel Brilliant Nanosaniye Lazer Sistemi

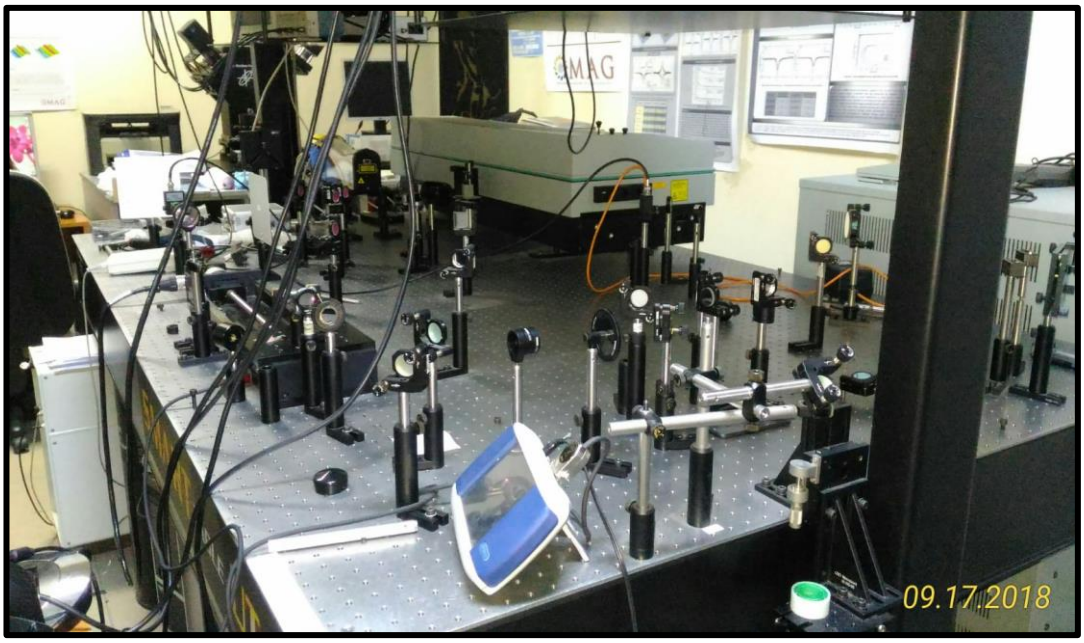
3.5.2 Pikosaniye lazer ile örgüleme

Isısal buharlaştırma sistemiyle üretilen FeAl ince filmleri için Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında bulunan Continuum Leopard Pikosaniye Lazer sistemi ile bölgesel olarak lazer örgüleme yapıldı. Lazer sistemi 60 ps atma süresine sahip, 10 kHz tekrarlama frekansı ve 532 nm çıkış dalga boyuna sahiptir. Lazerin örnek üzerindeki enerjisi 2 μJ' den 18 μJ 'ye kadar değiştirilerek örgülemeler yapıldı. Pikosaniye lazerden çıkan 532 nm dalga boyundaki ışın öncelikle mercekten geçirilerek prizmaya gönderildi, prizmadan düşük şiddette alınan ışın iki tane ayna yardımıyla döner filtreden geçirildi. Işığın gücü döner (OD) filtre ile ayarlanarak Gentec-eo firmasına ait QEBSP-B-MT marka güçmetre ile ölçüldü. Döner filtreden geçirilen ışın daha sonra odak uzaklığı 150 mm olan ince kenarlı mercek ile örnek üzerine düşürüldü. Referans (Landry, 2008) 'de detaylı olarak anlatılan bıçak-kenarı yöntemiyle bıçak-kenarı yöntemiyle ışının örnek üzerindeki yarıçapı 19 μm olacak şekilde ayarlanıp ışığın akısına bağlı olarak örgülemeler yapıldı. Taramanın yapıldığı tek eksenli hareketli düzenek elektronik olarak kontrol edildi ve hızı 1 mm/s olacak şekilde ayarlandı. Pikosaniye lazer için kurulan deney düzeneği aşağıdaki şekil 3.10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.10 Pikosaniye lazer sistemi için kurulan deney düzeneği

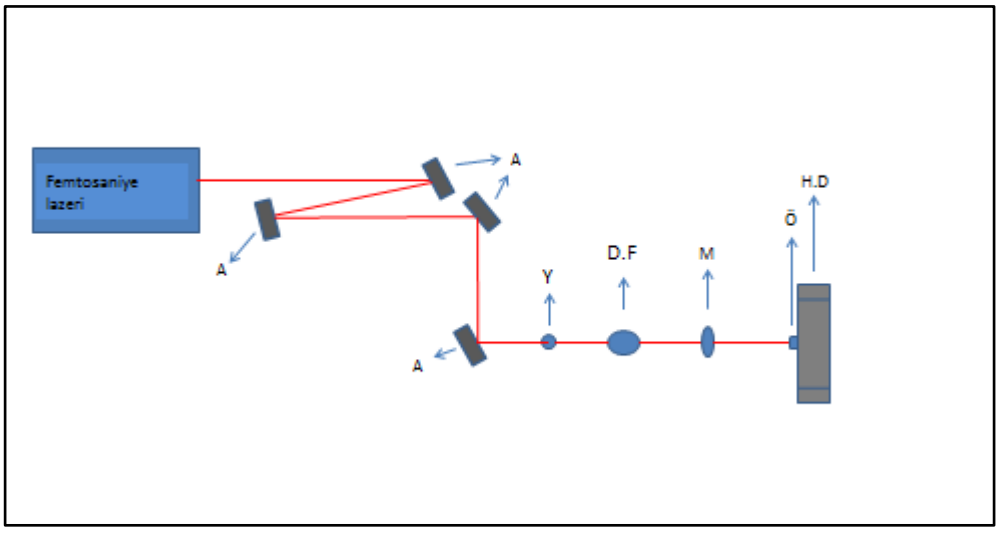
(M: mercek, P: prizma, Y: yarık, A: ayna, D.F: döner filtre, Ö: örnek, H.D: hareketli düzenek)



Şekil 3.11 Continuum Leopard Pikosaniye Lazer sistemi

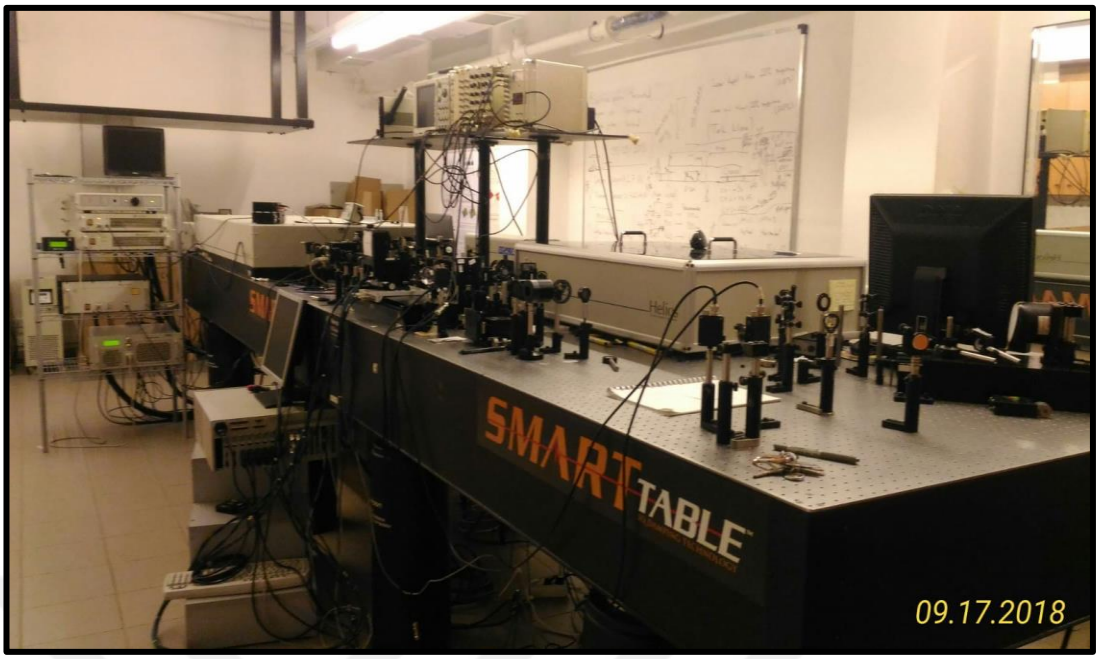
3.5.3 Femtosaniye lazer ile örgüleme

Isısal buharlaştırma sistemiyle üretilen FeAl ince filmleri için Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvar'ında bulunan Spectra Physics Femtosaniye Lazer sistemi ile bölgesel olarak örgüleme yapıldı. Lazer sistemi, 35 fs atma süresine, 3 mj atma enerjisine ve 800 nm çıkış dalga boyuna sahiptir. Lazerin örnek üzerindeki enerjisi 0.1 µJ' den 1 µJ' e kadar değiştirilerek örgüleme yapıldı. Femtosaniye lazerden çıkan 800 nm dalga boyundaki ışın öncelikle 4 tane ayna yardımıyla döner (OD) filtreden geçirildi. Lazer ışınının gücü döner filtre ile ayarlanarak Gentec-eo firmasına ait QEBSP-B-MT marka güçmetre ile ölçüldü. Döner filtreden geçirilen ışın daha sonra odak uzaklığı 200 mm olan ince kenarlı mercek kullanılarak numune üzerine düşürüldü. Referans (Landry, 2008) 'de detaylı olarak anlatılan bıçak-kenarı yöntemiyle bıcak-kenarı yöntemi ile lazer ışınının örnek üzerindeki yarıçapı 35 µm olacak şekilde ayarlandı ve ışığın akısına bağlı olarak örgülemeler yapıldı. Örgülemelerin yapıldığı hareketli düzeneğin hızı 150 mm/s olacak şekilde ayarlandı. Femtosaniye lazer için kurulan deney düzeneği aşağıdaki şekil 3.12' de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.12 Femtosaniye lazer sistemi için kurulan deney düzeneği

(A: ayna, Y: yarık, D.F: döner filtre, M: mercek, Ö: örnek, H.D: hareketli düzenek)

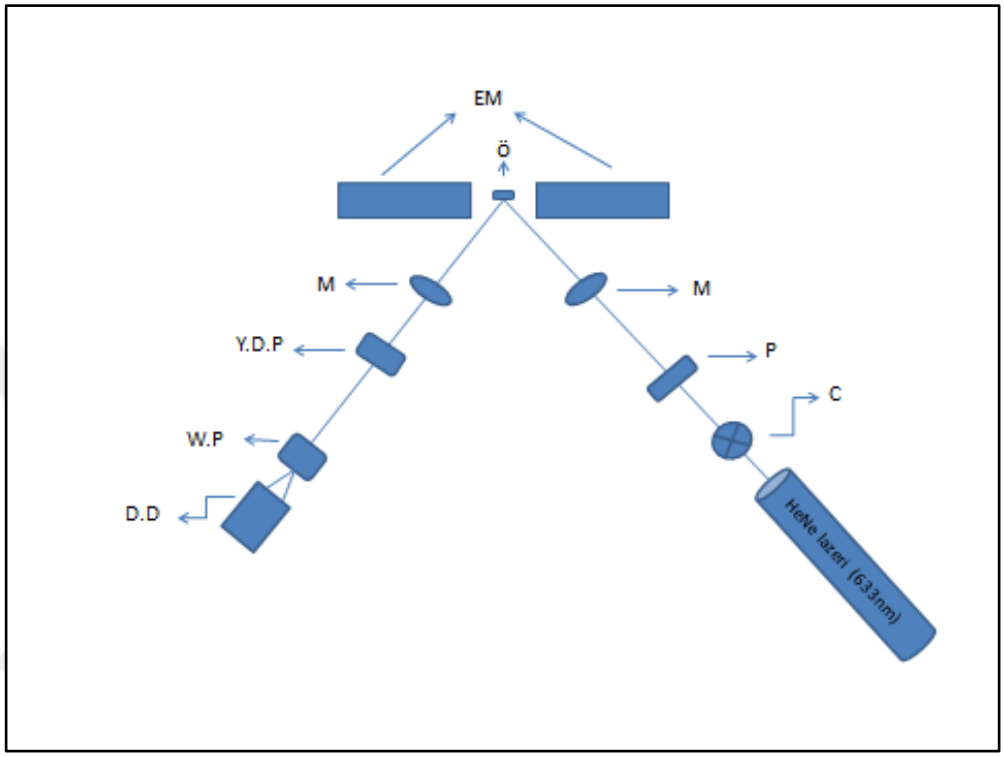


Şekil 3.13 Spectra Physics Femtosaniye Lazer sistemi

3.6 Statik-MOKE Deney Düzeneği

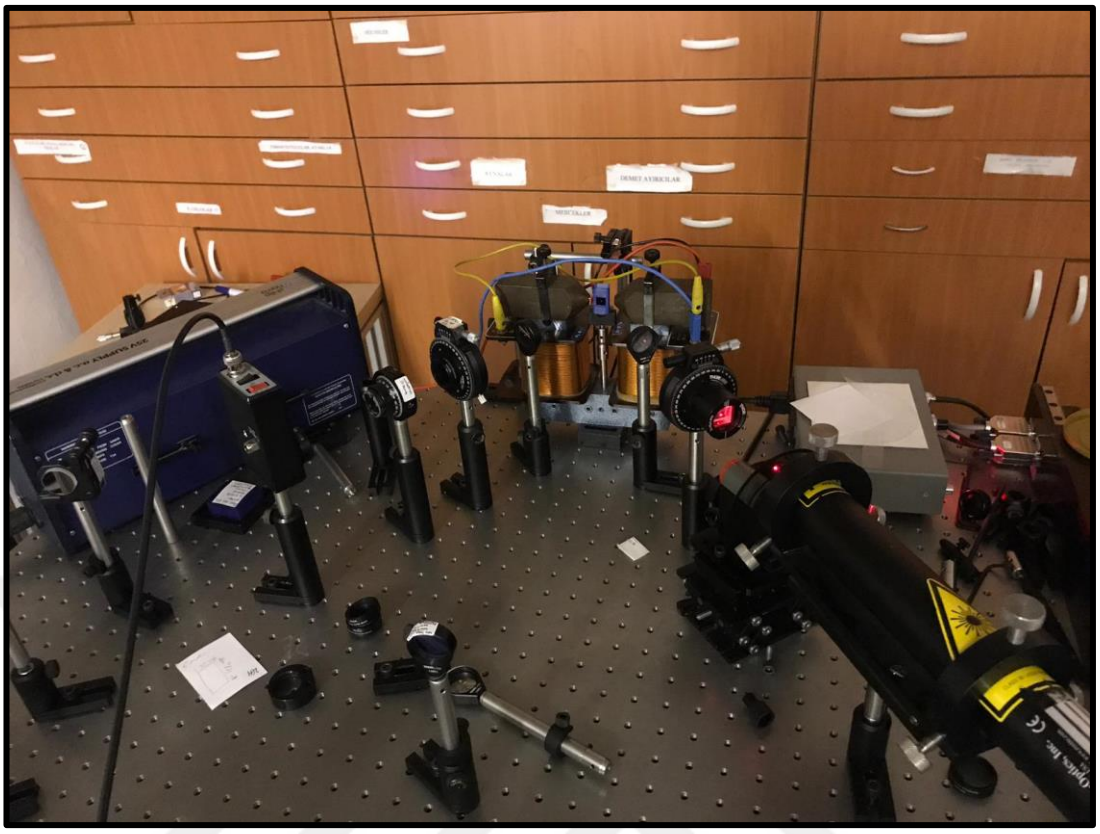
Isısal buharlaştırma sistemiyle üretilen FeAl ince filminin mıknatıslanma özelliklerini incelemek için statik-MOKE deney düzeneği Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarı'nda şu şekilde kurulmuştur. Deney düzeneğindeki lazer ışın kaynağı olarak HeNe lazeri kullanılmıştır (Chvykov, vd. 2012). HeNe lazer ışın kaynağı; 633 nm çıkış dalga boyuna sahip, 5 mW güçte ve sürekli dalga veren (CW-Continuous Wave), bir ışın kaynağıdır. Bu ışın kaynağından çıkan ışın ilk olarak dalga keserek frekans oluşturan (Chopper) bir elektronik sisteme gönderilmiştir (Wilkes, 2000). Burada belirli bir frekansta çıkan ışın (500-600 Hz) daha sonra Glan-Thompson prizmasıyla s-kutuplu hale getirilmiştir. Kutuplayıcıdan çıkan ışın numune üzerinde odaklanması için bir mercekten geçirilmiştir. Daha sonra örnek üzerinde odaklanmıştır. Örnekten yansıyan 633 nm dalga boylu ışın çap olarak paralel hale getirebilmek için başka bir merceğe gönderilmiştir. Bu mercekten çıkan ışının şiddetini ayarlayabilmek için kutupluluğu döndürülebilen yarım dalga plakasından geçirilmiştir (Nakayama, vd. 2017). Kutupluluğu ayarlanabilen bu ışın iki farklı kutuplayıcı bileşenine ayrılması için Wollaston prizmasına gönderilmiştir ve iki farklı kutuplayıcı olarak çıkan bu ışınlar dengeli dedektör (balans dedektörü) ile dedekte edilmiştir.

Dedektöre gelen bu optik sinyal dengeli dedektör de elektronik sinyale dönüştürülerek sinyal yükseltici'ye (lock-in amplifier) gönderilerek statik-MOKE ölçümü alınmıştır. Statik-MOKE için kurulan deney düzeneğinin şematik görünümü şekil 3.14' de, deney düzeneğinin fotoğrafı şekil 3.15' de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.14 Statik-MOKE için kurulan deney düzeneği

(C: chopper, P: Glan-Thomson polarizer, M: mercek, Ö: örnek, EM: elektro-mıknatıs, Y.D.P: yarım dalga plakası, W.P: wollaston prizma, D.D: dengeli dedektör)



Şekil 3.15 Statik-MOKE deney düzeneği

3.7 MOKE Mikroskobu Çalışmaları

FeAl ince filmlerin yüzeyinde oluşturulan manyetik bölgeler Almanya'da Darmstadt Teknik Üniversitesi Malzeme Bölümünde bulunan EVİCO Magnetics firmasına ait MOKE mikroskobu ile incelenmiştir (Şekil 3.16). MOKE Mikroskobu Zeiss marka bir kutuplu ışık mikroskobu ile birlikte kullanılan Hamamatsu marka CCD (Charge Coupled Device) kamera ile beraber oluşturulmuştur. Işık kaynağı olarak beyaz LED ışık kullanılmaktadır. İnce filmlerin yüzeyine paralel veya dik olarak yaklaşık 1T (10^4G)' lık manyetik alan uygulanabilmektedir. Örnek üzerine gönderilen kutuplanmış ışığın kutupluluğu, manyetik yüzeyden yansıdıktan sonra değişmektedir ve bu değişim sistem tarafından algılanmaktadır. Kutuplanmadaki değişimin büyüklüğü ışığın yansıdığı bölgenin manyetik özelliklerine bağlıdır.



Şekil 3.16 EVİCO Magnetics firmasına ait MOKE mikroskobu

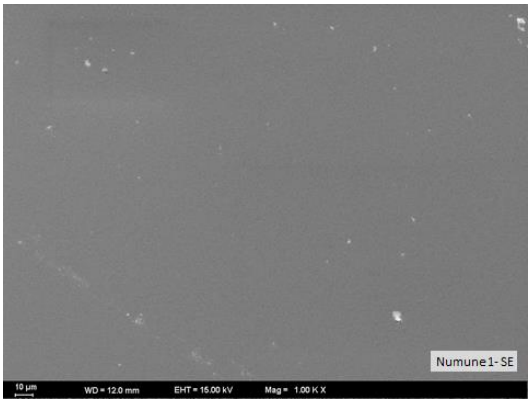
(http://www.evico-magnetics.de/Standard.html)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

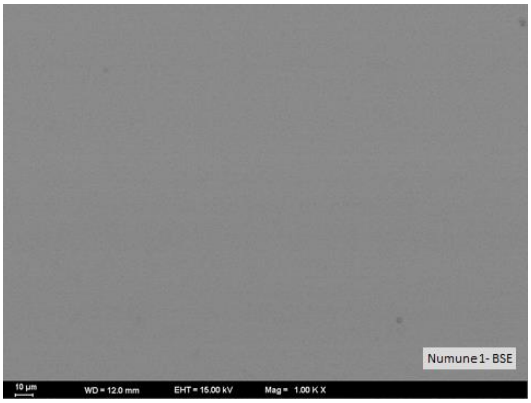
Isısal buharlaştırma sistemiyle üretilen FeAl ince filmlerinin kimyasal kompozisyonlarını ve kalınlıklarını belirlediğimiz SEM-EDX analizi sonuçları, ve yapısal özelliklerini belirlediğimiz XRD analizi sonuçları bu bölümde anlatılmaktadır. Ayrıca, kimyasal ve yapısal analizleri yapılan ince filmlerin farklı atma sürelerine sahip lazer ile örgülenmesinden sonra optik ve MOKE mikroskobu sonuçları da bu bölümde anlatılmaktadır.

4.1 SEM-EDX Analiz Sonuçları

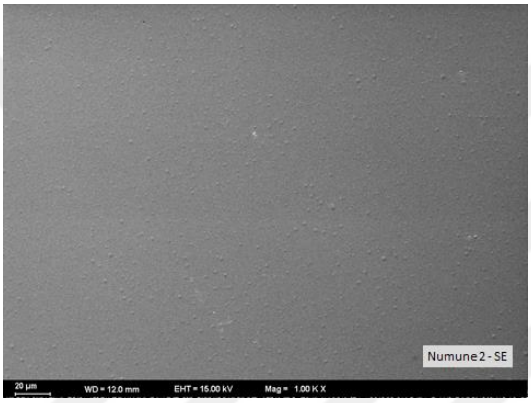
FeAl ince filmlerin beklenilen kompozisyonda ve homojen olarak üretildiğini göstermek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yüzey morfolojileri alınmıştır. Lazer örgüleme için kullanılan bu ince filmlerin yüzey morfolojilerinin SE ve BSE görüntüleri şekil 4.1' de gösterilmektedir. Her bir numune için BSE görüntüsünde numune yüzeyinde herhangi bir kontrast farkının gözlenmemesi ince filmlerin tüm örnek yüzeyinde homojen olarak üretildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca elemental haritalama görüntülerine bakıldığında da Fe ve Al atomlarının film yüzeyinde homojen dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır (şekil 4.2).



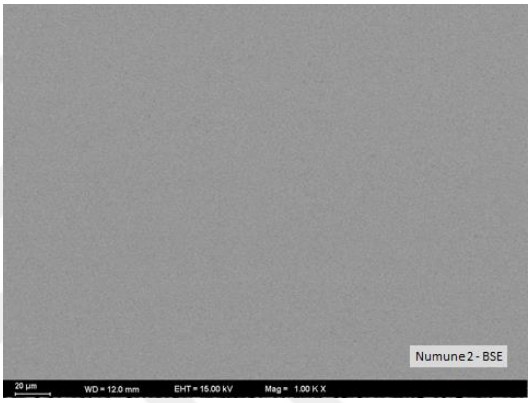
a



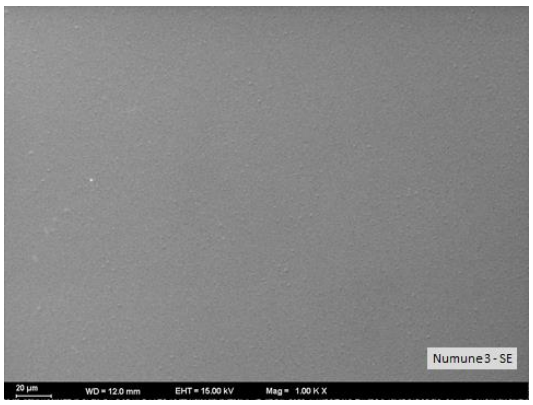
b



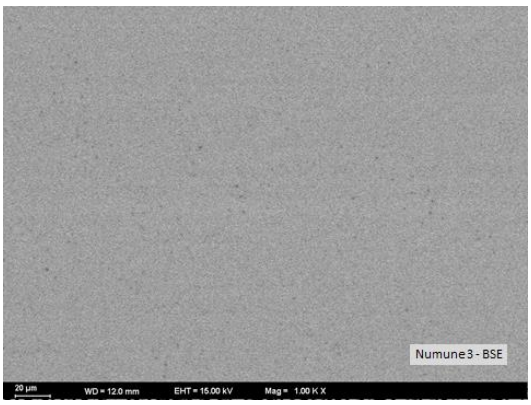
c



d



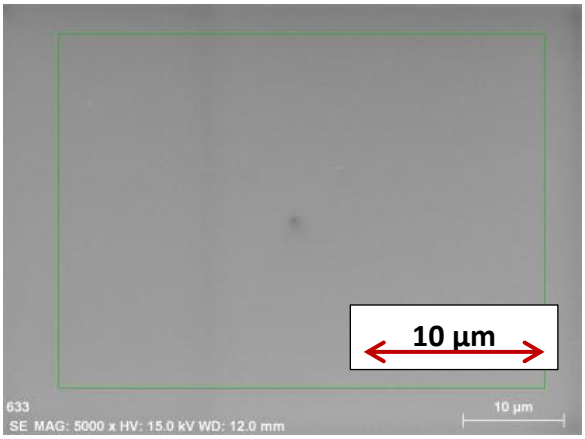
e



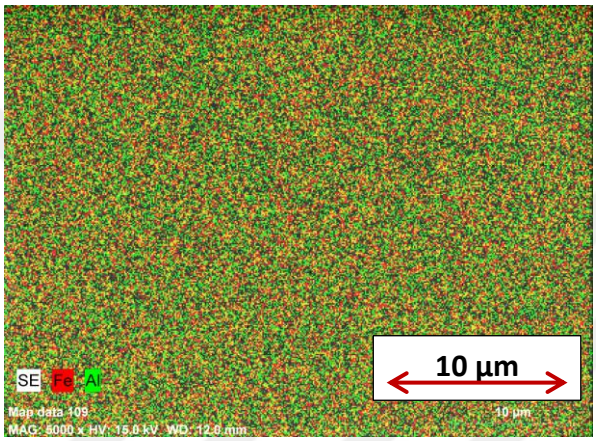
f

Şekil 4.1 a, b, c, d, e, f Lazer örgüleme için kullanılan FeAl ince filmlerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

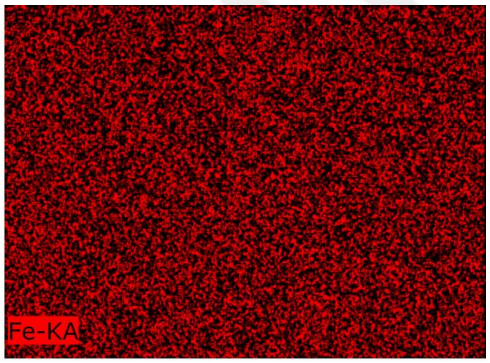
a



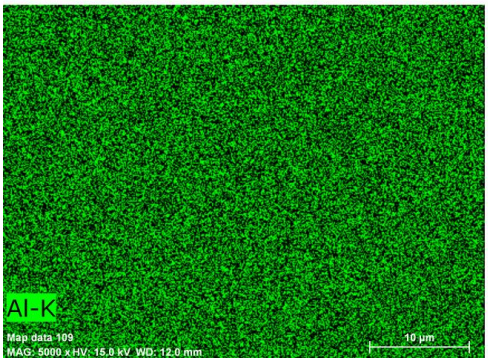
b







c



Şekil 4.2 a. b. c. FeAl ince filminin elemental haritalama görüntüleri

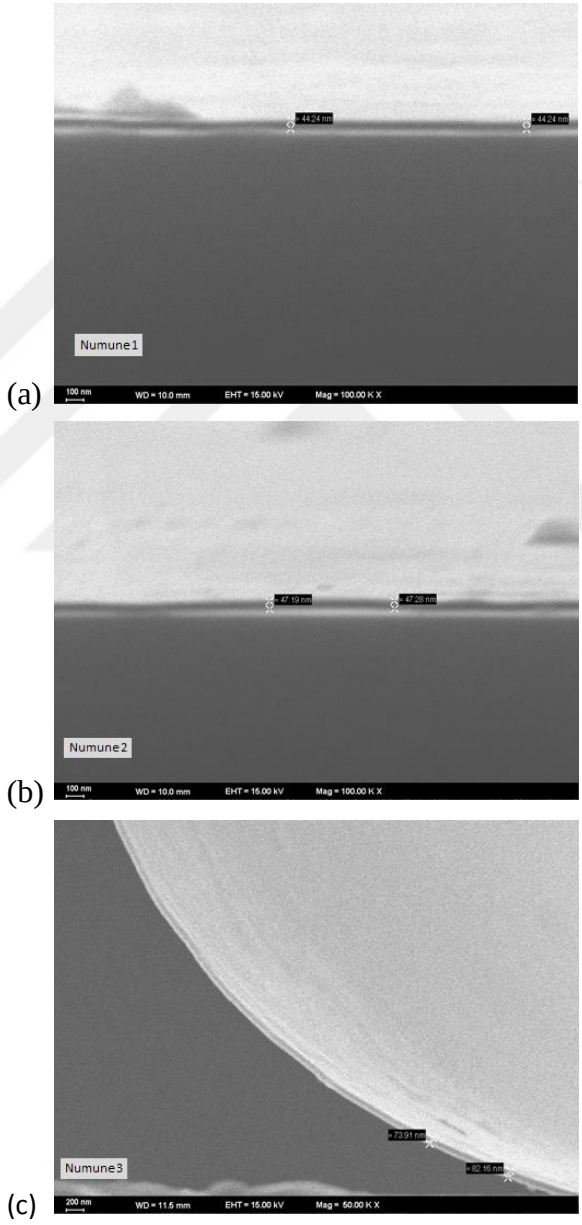
İnce filmlerin istenilen kompozisyonda üretilebildiği taramalı elektron mikroskobu analizi sonuçları ile gösterilmiştir. Fakat, ince filmlerin yüzeyinin pürüzlülüğü diğer bir ince film üretim yöntemi olan magnetron saçtırma (Bali, vd. 2018) ile üretilen filmlere göre oldukça yüksek olduğu bariz bir şekilde görülmektedir (şekil 4.1). Isısal buharlaştırma sistemiyle ince filmlerin üretiminde kontrol edilebilecek parametreler sınırlı olduğundan ince filmlerin yüzey pürüzlülüğünü değiştirebilecek ya da yok edebilecek herhangi bir işlem bulunmamaktadır. Dolayısıyla magnetron saçtırma sistemiyle üretilen ince filmlere kıyasla (Tatsuya, vd., 2018) ısısal buharlaştırma sistemiyle üretilen ince filmlerin yüzeyinin kalitesini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, lazer ile örgüleme çalışmalarında herhangi bir probleme yol açmayacak olsa da özellikle manyetik bölgelerin görüntülenmesi sırasında yüzey kalitesi önemli rol oynamaktadır. Yine bu durum, manyetik bölgelerin MOKE mikroskobu çalışmalarında gözlenmesini zorlaştırıcı bir etkiye sahip olacaktır.

Lazer örgüleme için kullanılan bu numuneler için değişik noktalardan alınan EDX analizi ile elde edilen sonuçlar çizelge 4.1' de verilmektedir. Çizelge 4.1' de görüldüğü gibi üretilmek istenen $Fe_{50}Al_{50}$ kompozisyonundaki ince filmlerin kimyasal kompozisyonları istenilen değere hemen hemen yakın bulunmuştur.

Çizelge 4.1 Lazer örgüleme için kullanılan ince filmlerin EDX analizi sonuçları

Numune	Beklenen kompozisyon (%at)	Al (%at)	Fe (%at)	Hata (%)	Kalınlık (nm)
1	$Fe_{50}Al_{50}$	49.27	50.73	0.2	44
2		49.79	50.21	0.2	47
3		50.01	49.99	0.2	82

Farklı parametreler kullanılarak üretilen ince filmlerin kalınlıklarını belirlemek için SiO_2 alttaş üzerine kaplanan örneklerin kesit görüntüleri yine taramalı elektron mikroskobu ile belirlenmiştir. Şekil 4.3' de lazer ile örgüleme çalışmalarında kullanılan ince filmlerin yan kesit görüntüleri gösterilmektedir. Özellikle ns atma süresine sahip lazer ile örgüleme çalışmalarında 3 numuralı ince filmin diğer ince filmlere göre daha kalın olacak şekilde üretilmiştir.

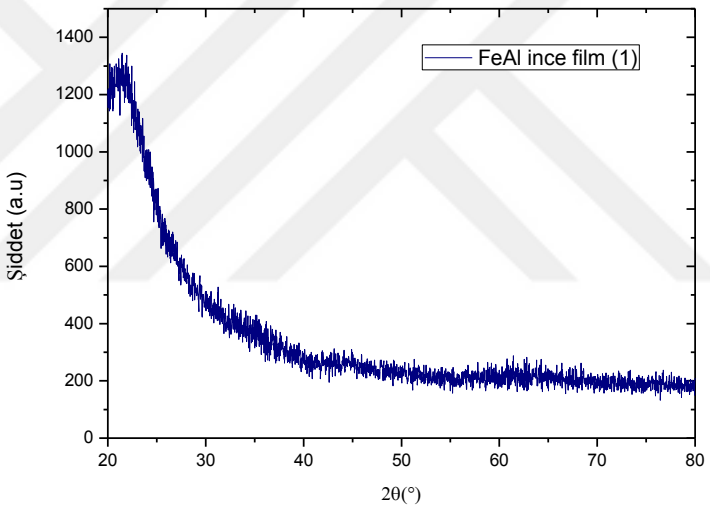


Şekil 4.3 FeAl ince filmlerin taramalı elektron mikroskobuyla belirlenen yan kesit görüntüleri

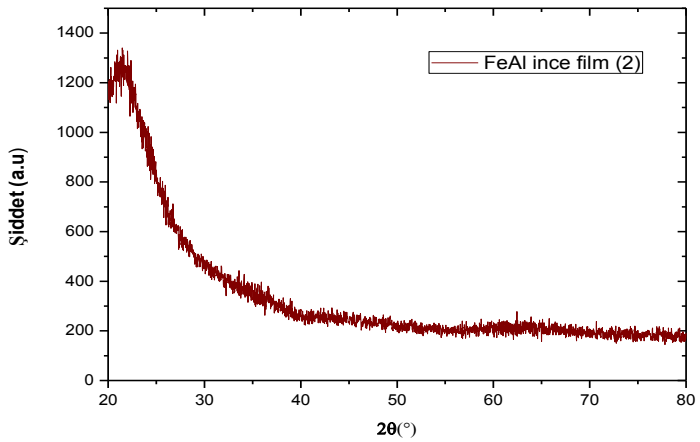
4.2 XRD Analiz Sonuçları

SiO_2 alttaş üzerine büyütülen $Fe_{50}Al_{50}$ kompozisyonundaki ince filmlerin XRD analiz sonuçlarına göre, üretilen ince filmlerin beklenildiği gibi amorf yapıda kristallendiği gözlemlenmiştir (şekil 4.4). Amorf yapıda kristallenen bu FeAl ince filmleri ferromanyetik özellik taşımaktadır (Liedke. vd, 2015).

Lazer ile örgüleme çalışmalarında kullanılacak ince filmler düzenli kristal yapıda olmaları istenildiğinden üretilen FeAl ince filmleri 773 K' de vakum altında 1 saat ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlem uygulanan FeAl ince filmleri düzenli kristal yapıda bulunduğunda manyetik olmayan bir yapıya dönüşmektedir (Bali 2018).



(a)



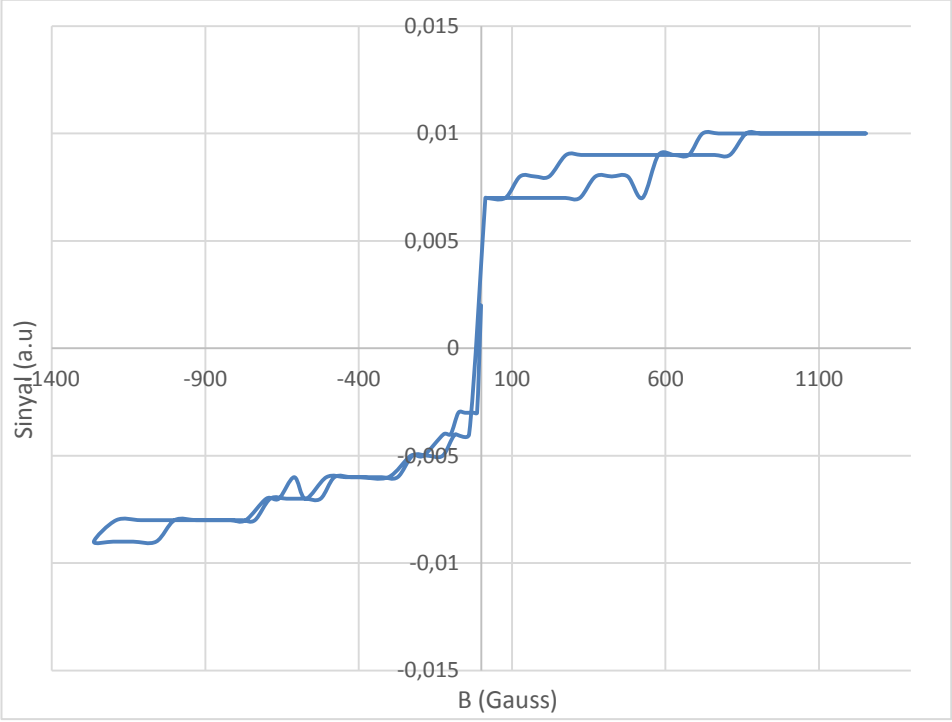
(b)

Şekil 4.4 .a, b. Amorf yapıda kristallenen FeAl ince filmlerinin XRD analiz sonuçları

4.3 Statik-MOKE Analizi

Statik-MOKE'un en çok uygulanan ölçümü düzlem içinde (in-plane) ferromanyetik ince fimler için manyetik özelliklerini ortaya koyan histerisis eğrileri ölçülebilmektedir. Böylelikle ferromanyetik ince filmlerin düzlem içi anizotropik davranışları incelenebilmektedir. Çizelge 4.2' deki histerisis ölçümünde mıknatıs kutupları arasında uygulanan manyetik alan ± 1250 Gauss 'dur. Alınan bu histerisis ölçüm sonucuna göre, FeAl ince filminin yumuşak manyetik özellik sergilediği anlaşılmaktadır. Yani, kolay mıknatıslanabilen ve mıknatıslığı kolay giderilebilen malzemelere yumuşak manyetik malzemeler denir. Bu histerisis eğrisinden FeAl ince filminin zorlayıcı alan değeri pozitif yönde +50G, negatif yöne zorlayıcı alan değeri -50G olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2 FeAl ince filmi için Statik-MOKE histerisis ölçümü



4.4 Lazer ile Örgüleme Çalışmaları ve MOKE Analiz Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında lazer ile örgülenen ince filmlerin manyetik karakterizasyon sonuçları bu bölümde anlatılacaktır. Bu filmlerin manyetik karakterizasyonları için Almanya'da Darmstadt Teknik Üniversitesi Malzeme Bölümünde bulunan MOKE mikroskobu ile incelenmiştir.

4.4.1 Femtosaniye atma süresine sahip lazer ile örgüleme ve MOKE sonuçları

Lazer ile örgüleme deneyleri, Ti : Safir Lazer (Spectra Physics, Tsunami osilatör) ve yükseltici (Spitfire Pro) sistemden elde edilen 800 nm dalga boyuna, 1 kHz çalışma frekanslı ve 35 fs atma süresine sahip lazer ışını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lazer demetinin örnek üzerindeki yarıçapı 35 µm olarak ölçülmüştür. Örgüleme çalışmasında atma başına lazer enerjisi 0.1 µJ' den 1 µJ' e kadar değiştirilerek yapılmıştır. Numune üzerindeki ışığın yarıçapının önemli olduğu bu enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri (Fluence) denklem 4,1 ile hesaplanmıştır.

$$F = \frac{Q}{\pi . \omega_0^2} \qquad 4.1$$

Burada Q enerji, ω_0 lazerin örnek üzerindeki yarıçapı, F akı değeridir. Yarıçap ve enerji değerlerine göre akı değerleri çizelge 4.3 gösterilmektedir.

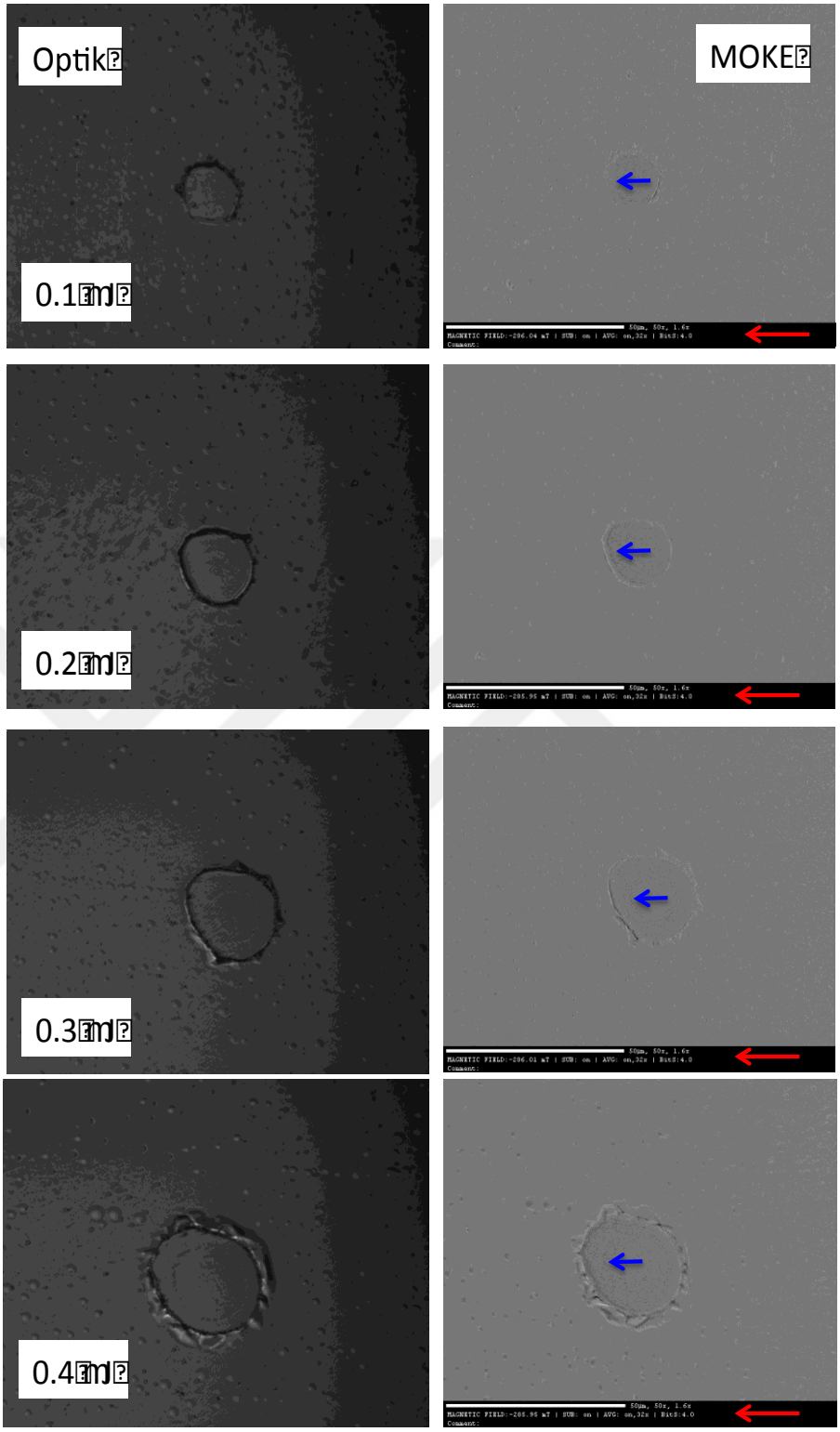
Çizelge 4.3 Fs lazer sistemiyle yapılan örgüleme çalışmasında enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri verilmektedir

Yarıçap (µm)	Enerji (µJ)	Akı (J/cm^2)
35	0.1	0.002
35	0.2	0.005
35	0.3	0.007
35	0.4	0.010
35	0.5	0.012
35	0.6	0.015
35	0.8	0.020
35	1	0.025

Femtosaniye lazer sistemi ile yapılan örgüleme işlemindeki numunelerin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri şekil 4.5 ve şekil 4.6' de gösterilmektedir. MOKE mikroskobu görüntülerinden görüleceği üzere, her bir atma başına akı değerlerinde lazer spotunun vurduğu bölgelerde manyetik kontrast farklı net bir şekilde gözlemlenmiştir. Deney, boyuna-MOKE geometrisine göre yapıldığından bu bölgedeki manyetik momentlerin numune düzleminde yer aldığını göstermektedir. Deney aşamasında uygulanan DC manyetik alan (kırmızı ok ile yönü gösterilmiştir)' dan dolayı bu bölgelerdeki bütün manyetik bölgeler manyetik alan yönüne doğru yönelmiştir (şekilde mavi ok ile gösterilmektedir) ve bu nedenle bu bölgelerde bir kontrast gözlenmektedir. Bu tez çalışmasında öngörüldüğü gibi lazer demeti ince filmler üzerinde bir kristal düzensizliğine yol açabilmekte ve bu da ince film yüzeyinin o bölgesinin ferromanyetik olmasına sebep olmaktadır.

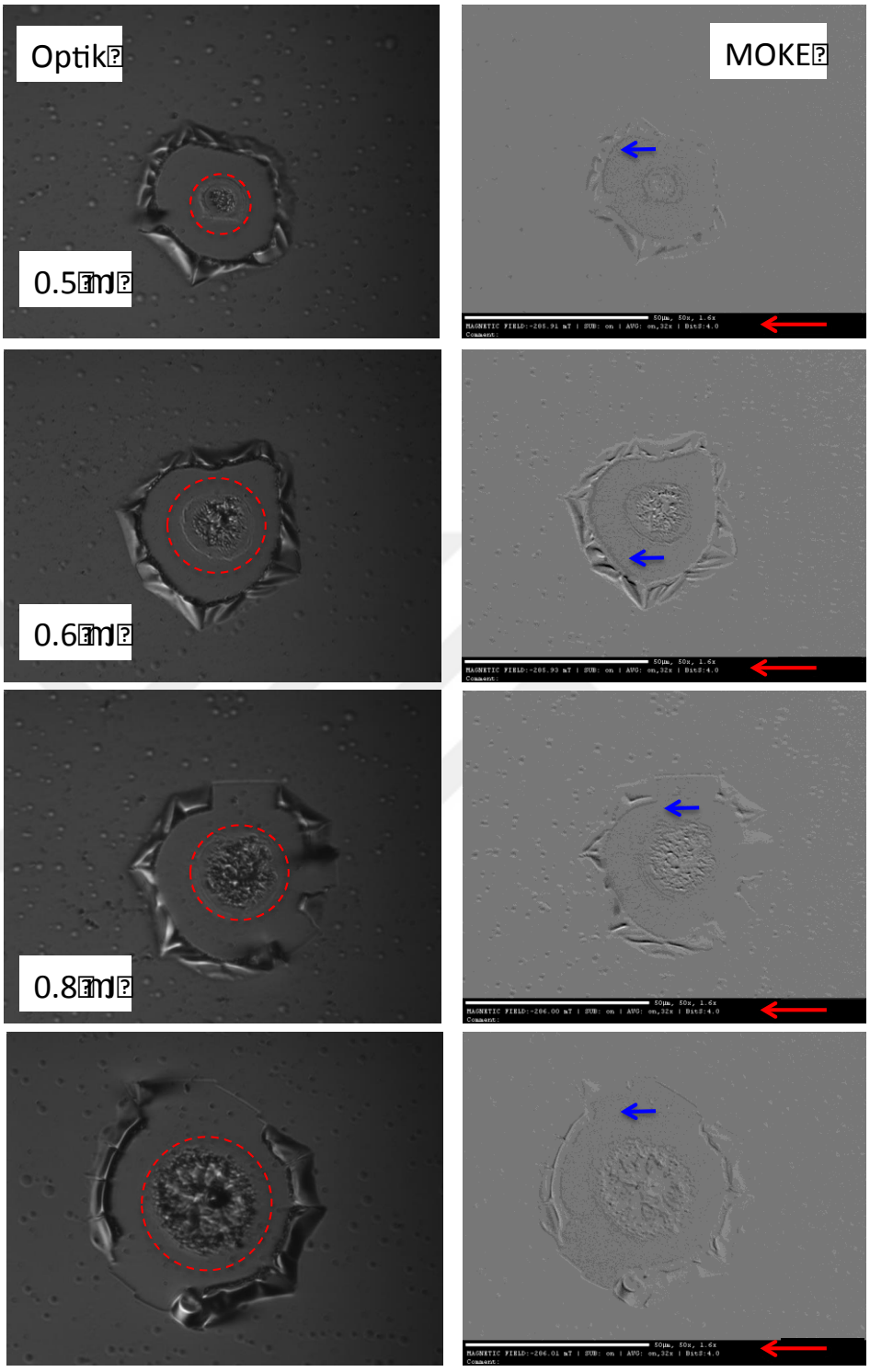
Optik mikroskop görüntülerine bakıldığında, en düşük enerjide bile lazer ışınının ince filmin yüzeyine çarptığı bölgelerde film yüzeyinde morfolojik olarak lazer demetinin şeklinde bozulma meydana gelmektedir. Enerjinin 0.5 μJ' den düşük olduğu durumlarda lazer demetinin vurduğu yerin iç bölgeleri optik olarak düzgün bir şekil görülmektedir (şekil 4.5). 0.5 μJ' den büyük yani yüksek enerjilerden itibaren, bu bozulmanın şiddeti artmakta ve dairesel lazer demetinin iç bölgelerinde ikinci bir bozulma meydana gelmektedir (şekil 4.6' de kesikli daire içindeki bölgeler). Bu durum Gaussian bir dağılım sergileyen lazer demeti enerjisinin en yüksek olduğu pik bölgelerinde gözlemlenmekte ve bundan dolayı numune yüzeyi zarar görmektedir.

MOKE mikroskobu görüntüleri de, optik mikroskobundan elde edilen görüntü sonuçlarını desteklemektedir. Atma başına enerjinin 0.5 μJ' den düşük olduğu durumlar için lazer demetinin çarptığı bölgelerde düzgün bir manyetik kontrast gözlenmiştir. Atma başına enerjinin 0.5 μJ' den yüksek olduğu durumlar için ise ince film yüzeyinde lazer atmasının akı eşik değeri (0.012 J/cm^2) geçildiği için örnek üzerinde lazer demetinin oluşturduğu morfolojide yanma meydana gelmektedir. Orta noktasında ince film yüzeyinde meydana gelen yanma nedeniyle bu bölgede herhangi bir manyetik kontrast gözlemlenememektedir. Bunun sonucu olarak FeAl sistemi gibi manyetik ince filmlerin direkt olarak lazer demeti ile manyetik örgülemesinde lazer başına atma akısının büyük bir öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.5 Femtosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen ince film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri

Kırmızı ok uygulanan manyetik alanın yönünü gösterirken, mavi ok ise gözlenen manyetik kontrast bölgesindeki manyetik bölgelerin yönelimini işaret etmektedir. Şekilde gösterilen lazer demetinin atma başına enerjisi 0.1-0.4 μJ arasındadır.



Şekil 4.6 Femtosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen ince film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri

Kırmızı ok uygulanan manyetik alanın yönünü gösterirken, mavi ok ise gözlenen manyetik kontrast bölgesindeki manyetik bölgelerin yönelimini işaret etmektedir. Şekilde gösterilen lazer demetinin atma başına enerjisi 0.5-0.9 μJ arasındadır.

4.4.2 Pikosaniye atma süresine sahip lazer ile örgüleme ve MOKE sonuçları

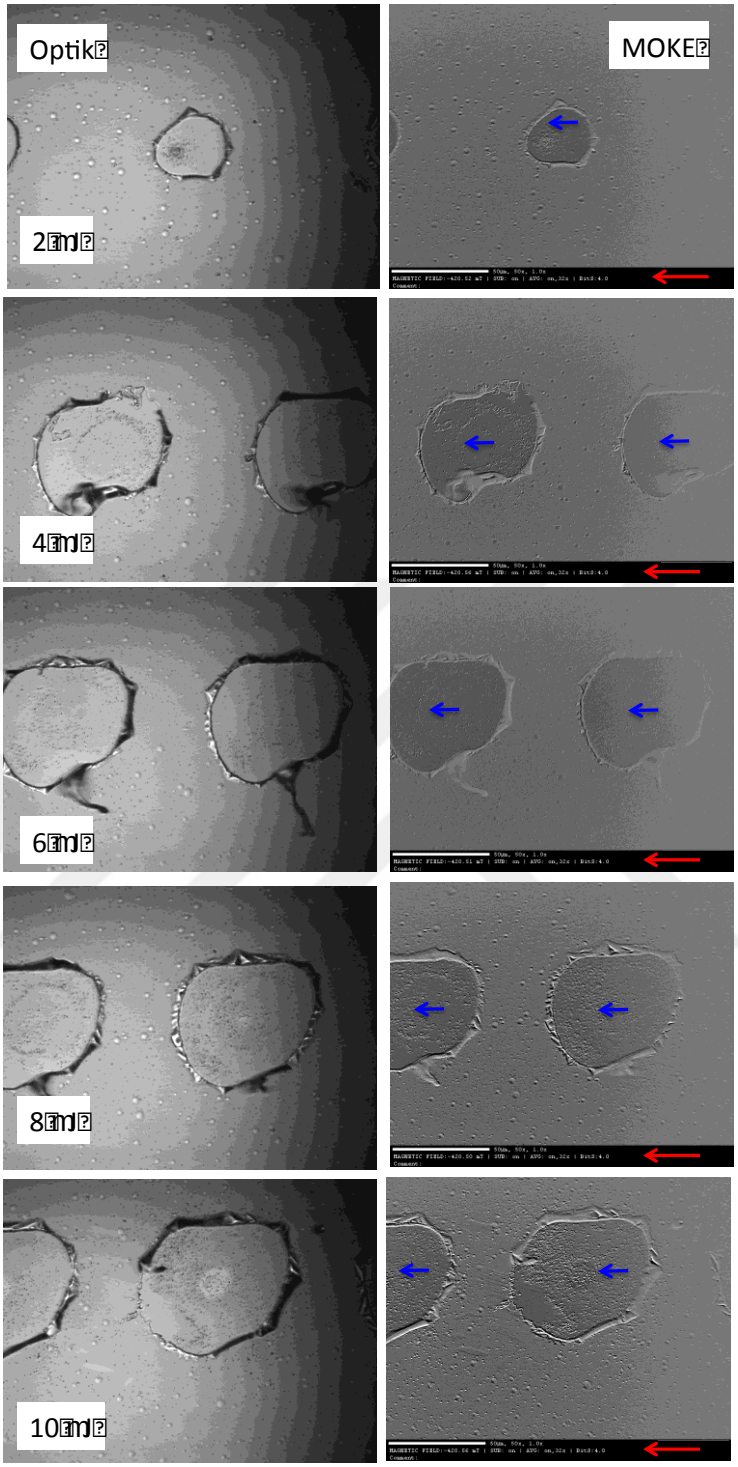
Lazer ile manyetik örgüleme deneyleri 10 Hz tekrarlama frekansına ve 60 ps atma süresine sahip Continuum Leopard Pikosaniye Lazer Sisteminden elde edilen 532 nm dalga boylu lazer ışını kullanılarak yapılmıştır. Lazer demetinin yarıçapı 19 µm olarak ölçülmüştür. Örgüleme çalışmasında atma başına lazer enerjisi 2 µJ' den 18 µJ' e kadar değiştirilerek yapılmıştır. Numune üzerindeki ışığın yarıçapının önemli olduğu bu enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri (fluence) çizelge 4.4' de verilmektedir.

Çizelge 4.4 Ps lazer sistemiyle yapılan örgüleme çalışmasında enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri verilmektedir

Yarıçap (µm)	Enerji (µJ)	Akı (J/cm^2)
19	2	0.176
19	4	0.352
19	6	0.529
19	8	0.705
19	10	0.882
19	12	1.058
19	14	1.235
19	16	1.411
19	18	1.587

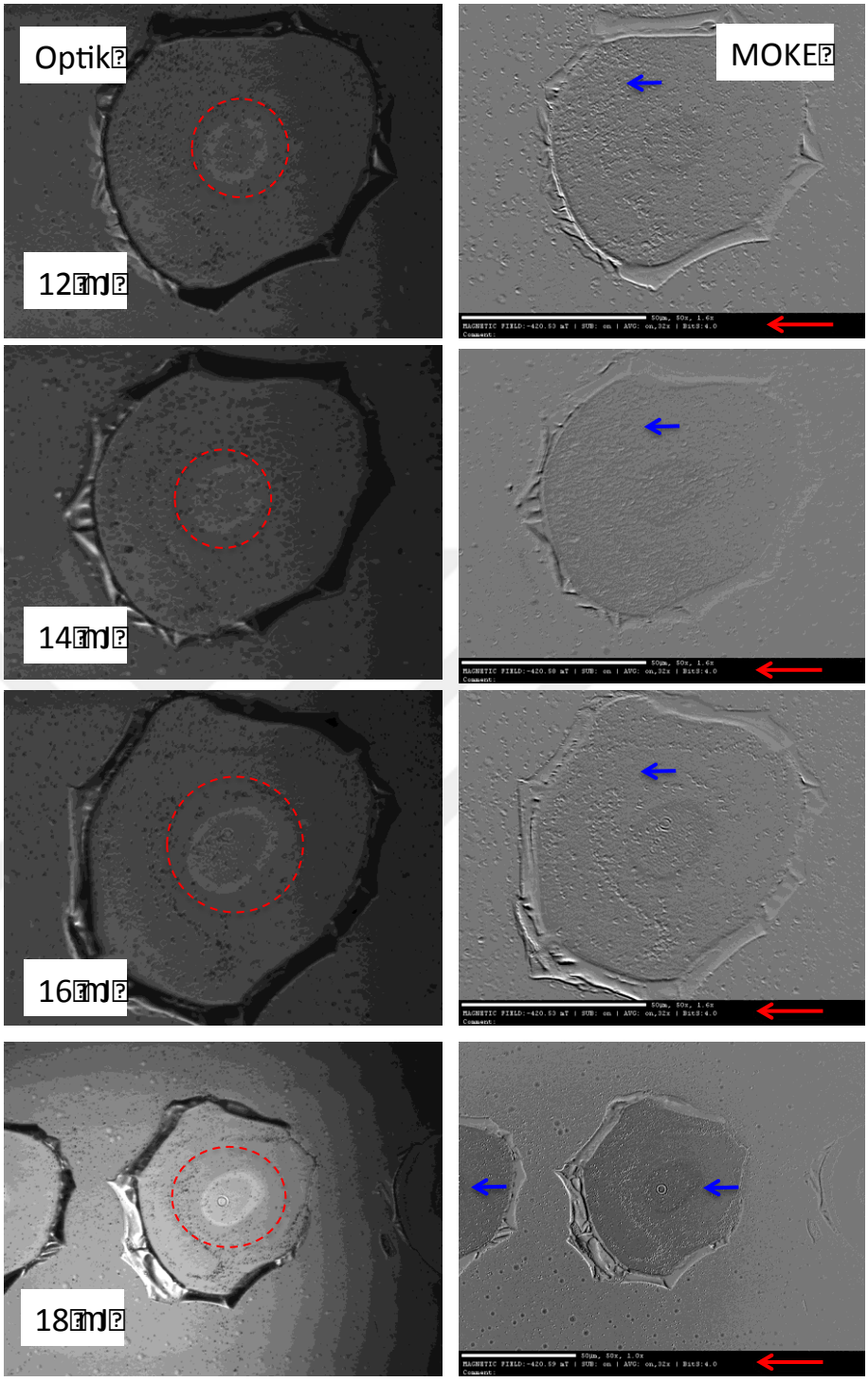
Pikosaniye lazer sistemi ile manyetik örgüleme çalışmaları yapılan ince filmlerin optik mikroskop ve MOKE mikroskobu görüntüleri şekil 4.7 ve şekil 4.8'da verilmektedir. Femtosaniye lazer sistemiyle yapılan manyetik örgüleme sonuçlarına benzer şekilde MOKE mikroskobu görüntülerinden görüleceği üzere, bütün atma başına enerji değerlerinde lazer demetinin çarptığı bölgede manyetik kontrast net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında öngörüldüğü gibi lazer atması ince film üzerinde bir kristal düzensizlik oluşturabilmekte ve bu da ince filmin yüzeyinin o bölgesinin ferromanyetik olmasına yol açmaktadır. Fakat, optik mikroskop görüntülerinden görüleceği üzere lazer atmasının ince film üzerinde bıraktığı iz femtosaniye lazerindekiler kadar düzgün değildir. İnce film üzerinde meydana gelen morfolojik

bozulmanın femtosaniye lazerine gözlemlenen bozulmalara göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, kullanılan atma başına lazer demetinin enerjisinin fs lazerindeki duruma göre yaklaşık 10 kat daha yüksek olması yol açmıştır. Buna ek olarak atma sürelerinin çok farklı oluşu da örneğe ısı aktarımını etkilemektedir. 100 fs süresine sahip tek bir atmanın örnekle teması oldukça kısadır. Bu darbe örnekte kayda değer bir ısı artışı sağlayamamaktadır. fs lazerin tekrarlama frekansı 1 KHz olduğunda ardışık atmalar da örnekte yapı değiştirecek kadar ısı artışına sebep olmamaktadırlar. Buna rağmen ps ve ns atma süresine sahip bir lazerin verdiği tek bir atma örneği ısıtabilecek kadar örnekle temas etmektedir. Bu nedenle ps ve ns lazerlerde ısıl etkilerden dolayı atmanın örnekle temas yüzeyinin dışındaki bölgelerde de tahribat olmaktadır. Bu da optik mikroskop görüntülerinden anlaşıldığı gibi dağılıma sebep olmaktadır. Yukarıdakilere ek olarak, atma başına yaklaşık 8 μJ' lük enerjiye sahip lazer demeti için ince film yüzeyindeki izin orta bölgesine yakın bir yerde yeni bir optik iz gözlemlenmiştir. Bu iz, femtosaniye lazeri ile örgüleme işleminde olduğu gibi Gaussian bir enerji profiline sahip lazer demetinin en yüksek enerjiye sahip olan tepe noktasının ince film üzerinde meydana getirdiği topografik bozulmadan ibarettir.



Şekil 4.7 Pikosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri

Kırmızı ok uygulanan manyetik alanın yönünü gösterirken, mavi ok ise gözlenen manyetik kontrast bölgesindeki manyetik bölgelerin yönelimini işaret etmektedir. Şekilde lazer demetinin atma başına enerjisi 2-10 μJ arasındadır.



Şekil 4.8 Pikosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri

Kırmızı ok uygulanan manyetik alanın yönünü gösterirken, mavi ok ise gözlenen manyetik kontrast bölgesindeki manyetik bölgelerin yönelimini işaret etmektedir. Şekilde lazer demetinin atma başına enerjisi 12-18 μJ arasındadır.

4.4.3 Nanosaniye atma süresine sahip lazer ile örgüleme ve MOKE sonuçları

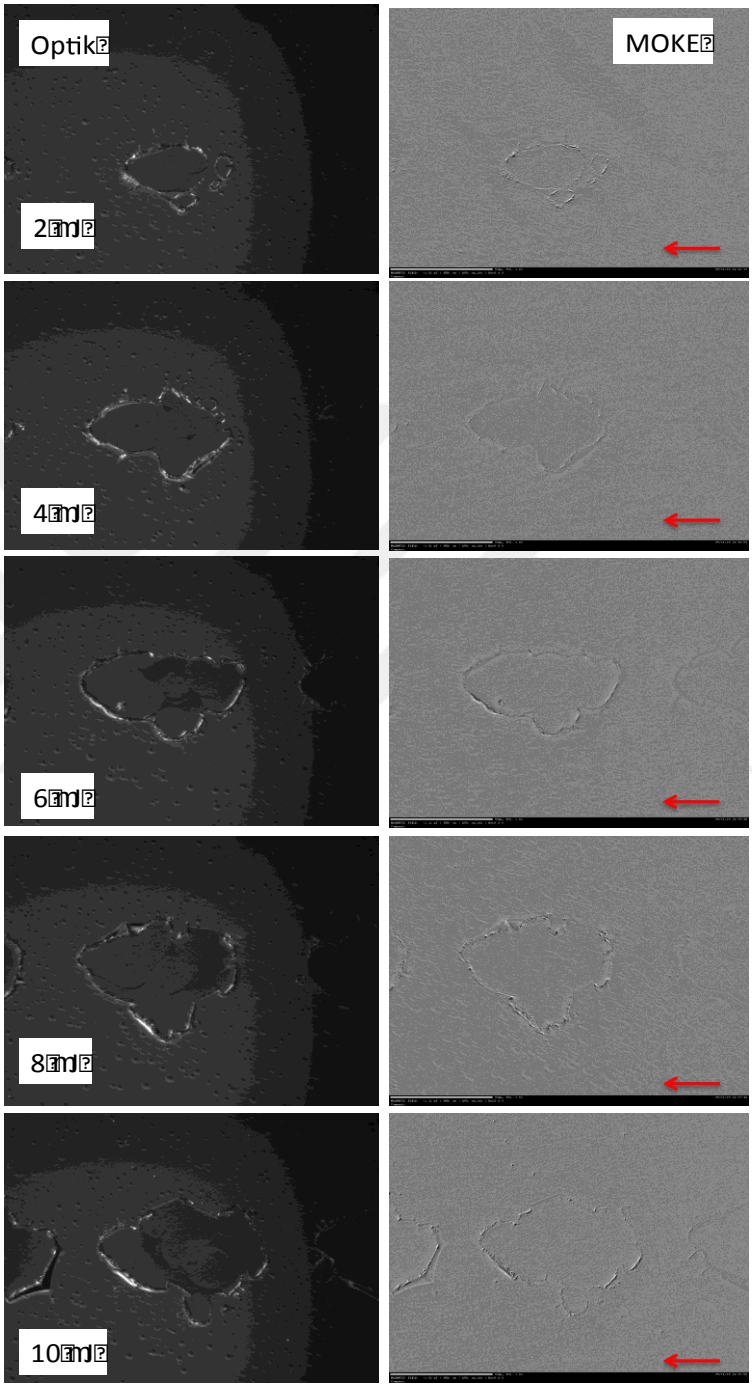
Lazer ile örgüleme deneyleri, 4 ns atma süresi, 1-10 Hz çalışma aralığı frekansına sahip Quantel Brilliant Nanosaniye Lazer Sistemi'nden elde edilen 532 nm dalga boylu lazer ışını kullanılarak yapılmıştır. Lazer demetinin yarıçapı yaklaşık 15 µm olarak belirlenmiştir. Lazer örgüleme işleminde atma başına lazer enerjisi 2 µJ' den 18 µJ' e kadar değiştirilerek yapılmıştır. Numune üzerindeki ışığın yarıçapının önemli olduğu bu enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri (fluence) çizelge 4.5' de verilmektedir.

Çizelge 4.5 Ps lazer sistemiyle yapılan örgüleme çalışmasında enerji değerlerine karşılık gelen akı değerleri verilmektedir

Yarıçap (µm)	Enerji (µJ)	Akı (J/cm^2)
15	2	0.283
15	4	0.566
15	6	0.849
15	8	1.132
15	10	1.415
15	12	1.698
15	14	1.981
15	16	2.264
15	18	2.547

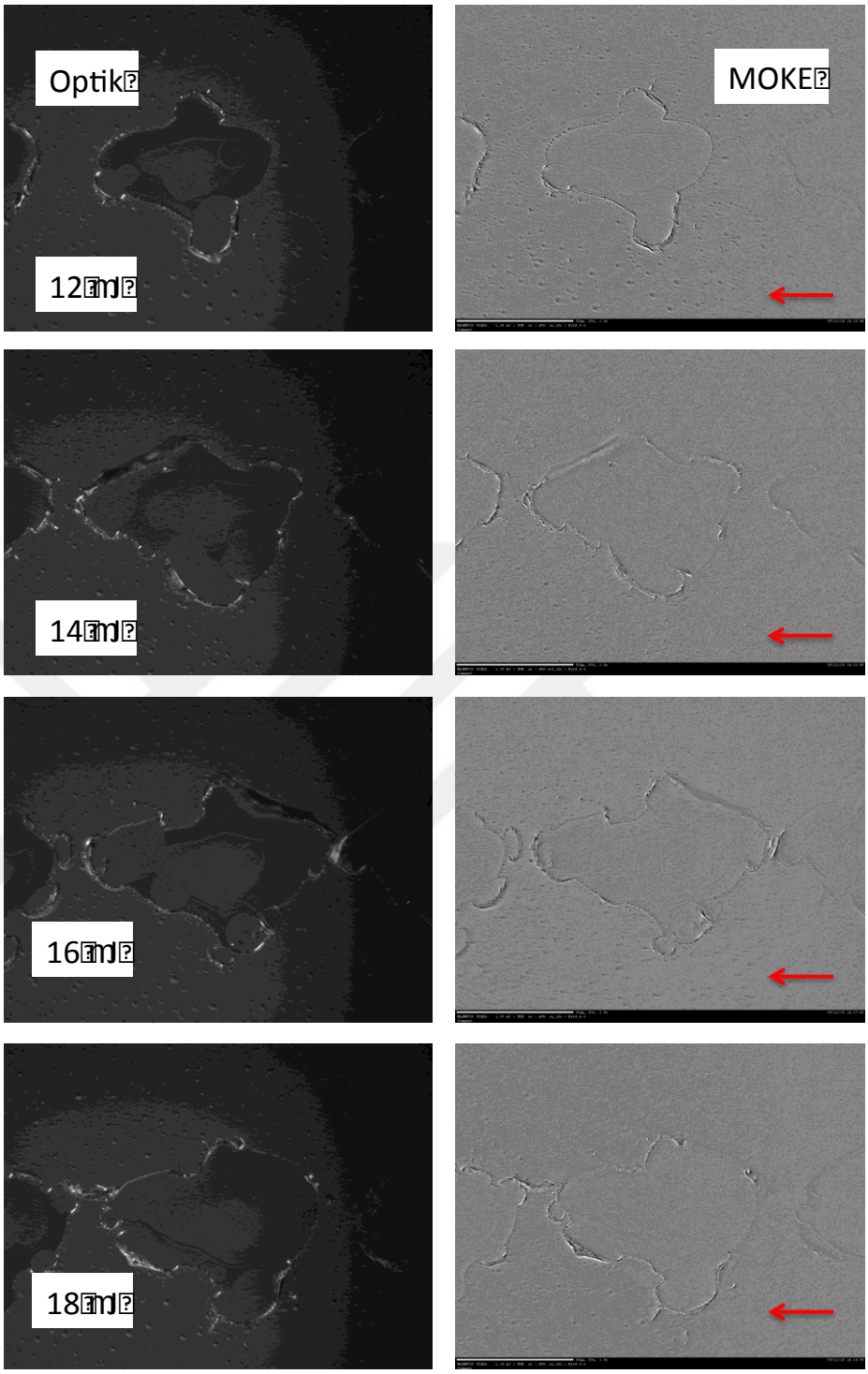
Nanosaniye lazer sistemi ile manyetik örgüleme çalışması yapılan ince filmlerin yüzeylerinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri şekil 4.9 ve şekil 4.10' da gösterilmektedir. Nanosaniye lazer sistemiyle yapılan manyetik örgüleme çalışmalarında MOKE mikroskobu çalışmalarına göre herhangi bir manyetik kontrast farkı elde edilememiştir. Optik mikroskop görüntülerine göre ise bütün atma başına enerji değerlerine için ince filmlerin yüzeylerinin çok büyük zarar gördüğü anlaşılmaktadır. Bundan dolayı bu lazer sistemiyle örgülenen ince filmlerin yüzeylerinden herhangi bir manyetik kontrast farkı elde edilememiştir. Nanosaniye lazer sistemlerinin numune yüzeylerinde lokal olarak çok yüksek sıcaklıklara ulaşıldığı bilinmektedir. Bu çalışmada bunun bilincinde olarak bu lazer sistemi ile örgülenecek ince filmi diğer filmlerden daha kalın üretmiş olsak bile sistem ince film yüzeyini maalesef tam olarak yakmıştır. Bu sistem ile yapılacak örgüleme çalışmalarında

manyetik kontrast elde edebilmek için çok daha düşük enerjilerde gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.9 Nanosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen ince film yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri

Kırmızı ok uygulanan manyetik alanın yönünü göstermektedir. MOKE mikroskobunda ise herhangi bir manyetik kontrast gözlenmemektedir. Şekilde lazer demetinin atma başına enerjisi 2-10 μJ arasındadır.



Şekil 4.10 Nanosaniye atma süresine sahip lazer sistemi ile örgülenen ince filmin yüzeyinin optik mikroskobu ve MOKE mikroskobu görüntüleri

Kırmızı ok uygulanan manyetik alanın yönünü göstermektedir. MOKE mikroskobunda ise herhangi bir manyetik kontrast gözlenmemektedir. Şekilde lazer demetinin atma başına enerjisi 12-18 μJ arasındadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında öngörüldüğü gibi FeAl sistemi için lazer ile örgüleme yapılabileceği deneysel olarak kanıtlanmıştır. Manyetik örgülemede lazer atma başına akı (fluence) değeri elde edilen sonuçlara göre en önemli role sahip olduğu anlaşılmaktadır. Belirli bir akı eşik değerinde (threshold) ince film yüzeyinde bozulmalar meydana gelmekte ve bu nedenle istenilen manyetik özelliklerin oluşmasını engellemektedir. Bu tez çalışmasında gösterilmiştir ki FeAl sisteminde lazer ile manyetik örgüleme deneylerinde kullanılacak en uygun parametrenin fs atma süresine sahip lazer sistemiyle elde edilendir. fs lazer sistemi deneylerimizde kullanılan en düşük enerji 0.1 μJ' de dahi bölgesel olarak manyetik örgüleme oluşturulabilmiştir. Daha yüksek enerji değerlerinde özellikle 0.5 μJ' den daha yüksek enerji düzeylerinde film yüzeyinde bozulmalar oluşmakta ve manyetik olarak istenilen özellikler elde edilememektedir. Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, lazer ile manyetik örgüleme çalışmalarında 0.1 μJ' den daha düşük enerjilerde fs atma süresine sahip lazer kullanılarak örgüleme işlemi yapılabilir.

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlara göre fs atma süresine sahip lazer sistemi ile atma başına en düşük enerji olan 0.1 μJ' de ince film yüzeyinde yine de düzgün şekilli manyetik bölgeler elde etmek mümkündür. Bundan sonraki çalışmalarda FeAl sisteminde lazer ile manyetik örgüleme, bu tez çalışmasındaki gibi ince film yüzeyinde bölgeler oluşturmak yerine, lazer girişim yöntemi kullanılarak da yapılabilir diye düşünülmektedir. Bu yöntemde iki veya daha fazla lazer demeti ince film yüzeyinde bir girişim demeti meydana getirecek şekilde bir araya getirilir. Oluşan girişim demeti üzerindeki aydınlık noktalar lazer demetinin ince film yüzeyinde etki oluşturduğu noktalar olacaktır. Lazer girişim yönteminde ince film üzerinde oluşan girişim sonucunda ince film üzerine düşen lazer demetinin atma başına enerjisi çok düşük olsa dahi yukarıda anlatılan sonuca göre manyetik örgüleme yapmak mümkündür. Bu yöntemin avantajı tek seferde tüm ince film yüzeyinin örgülenebilmesidir. Böylece zamansal olarak daha hızlı bir şekilde örgüleme yapılabilir. Buna yönelik çalışmalarımız halen devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre halen devam etmekte olan TÜBİTAK 1001 projesinde yapılması planlanan pompa-gözlem deneyleri için bir alt yapı oluşturulmuştur. Pompa-gözlem deneylerinde ince film yüzeyini bozmadan bilgi almak önem arz eder. Bu tez çalışması sonucunda ince film yüzeyinde hangi enerji değerlerinde bozulmalar meydana geldiği belirlenmiştir. Bunun dışında FeAl sisteminde daha önce iyon bombardımanı ile gözlenen ferromanyetik bölgelerin lazer demeti ile de oluşturulabileceği gösterilmiştir. Bu tez çalışmamız devam ederken, bu konu ile ilgili olarak herhangi bir yayın bulunmamakta idi, ancak benzer bir çalışma 2018'de bir Alman araştırma grubu tarafından yayınlanmıştır (Bali, vd. 2018). Bu yayında manyetik bölgeler sadece fs atma süresine sahip lazer kullanılarak elde edilmiştir. Bizim yapmış olduğumuz çalışma ile fs atma süresine sahip lazerin yanı sıra ps atma süresine sahip lazer ile de benzer sonuçlar elde edilebileceğini göstermiş bulunmaktayız.

KAYNAKLAR

Available at <url: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/ Community College/MagParticle/Physics/HysteresisLoop.htm> [Acessed: 31 January 2013].

Bader, S.D. and Qiu, Z.Q. 2000 'Surface magneto-optic Kerr effect' https://doi.org/10.1063/1.1150496

Bali R. Ehrler J, He M, Shugaev MV, Polushkin NI, Wintz S, Liersch V, Cornelius S, Hübner R, Potzger K, Lindner J, Fassbender J, Ünal AA, Valencia S, Kronast F, Zhigilei LV, 2018. 'Laser-Rewriteable Ferromagnetism at Thin-Film Surfaces 'ACS Appl Mater Interfaces. 2018 May 2;10(17):15232-15239. doi: 10.1021/acsami.8b01190. Epub Apr 17.

Bjørn, R., 2011 'Development of a Surface Magneto-Optic Kerr Eect Setup'

Bruce M. Moskowitz. 1991. Hitchhiker's Guide to Magnetism, Available at <url: http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_c/hg2m_c.html.> [Accessed: 27th, Jan, 2013].

Chapman, J.N. "The investigation of magnetic domain structures in thin foils by electron microscopy", J. Phys. D: Appl. Phys. 17, 623 (1984).

Choi, B.C., Belov, M. Hiebert, W. K., Ballentine, G.E. and Freeman M. R.; 'Ultrafast Magnetization Reversal Dynamics Investigated by Time Domain Imaging' Phys. Rev. Lett. 86, 728 – Published 22 January 2001

Chvykov, P., Stoica, V., Clarke, R., 'Real-time MOKE microscopy made simple' arXiv preprint arXiv:1212.3259, 2012

Davis, J.P., Vick,. D.D., Fortin, C., Burgess, J. A.., Hiebert, W. K. and Freeman, M. R. "Nanotorsional resonator torque magnetometry", Appl. Phys. Lett. 96, 072513 (2010).

Faraday, M. 1846."On the magnetisation of light and the illumination of magnetic lines of force", Philosophical Transactions of the Royal Society (London) 136, 1-20

Fassbender, J. 2008. McCord / Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 579–596

Fassbender, J. Liedke, M. O., Strache, Möller, T. W., Menéndez, E., Sort,J., Rao, K. V., Deevi, S. C. and Nogués, J. 2008. 'Ion mass dependence of irradiation-induced local creation of ferromagnetism in Fe60Al40 alloys' Phys. Rev. B 77, 174430 – Published 28 May

Florczak, J. M. and Dahlberg, E. Dan 1990. "Detecting two magnetization compo-nents by the magneto-optical Kerr effect", J. Appl. Phys. 67, 7520

Haidara, F., Record, M.C., Duployer, B. 2011. 'Dominique Mangelinck, Phase formation in Al–Fe thin film systems' Intermetallics Elsevier Volume 23, April 2012, Pages 143-147 https://doi.org/10.1016/j.intermet.

Hankemeier, S., Kobs, A., Fro¨mter, R. and Oepen, H. P., 2010. "Controlling the properties of vortex domain walls via magnetic seeding fields", Phys. Rev. B 82,064414

Hennen, T. A. 2014. 'Magneto-Optic Kerr Effect Microscopy' Electrical and Computer Engineering Department, University of Californa, San Diego 9500 Gilman Dr, La Jolla, CA 92093, USA (Dated: December 9,

Hubert, A. Schäfer, R. Magnetic Domains,The analysis of magnetic micro-structures, (Berlin) Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG (1999).

Huffman, G. P. and Fisher, R. M., J. Appl. Phys. 38, 1967, p735

Hujan, Z. B. H., 2013; 'Magneto-Optical Kerr Effect Microscopy Investigation on Permalloy Nanostructures

https://yusufbilgen.wordpress.com/2015/01/16/ince-film-teknikleri/

Kesserwan, H., 2011 'Ultrafast Magnetization dynamics of magnetic nanostructures'

Kittel, C., 'Introduction to solid state physics, 8th Edition'

Krause,S., Herzog,G., Stapelfeldt,T., Berbil-Bautista, L., Bode, M., Vedmedenko, E. Y., and Wiesendanger, R. "Magnetization Reversal of Nanoscale Islands: How Size and Shape Affect the Arrhenius Prefactor", Phys. Rev. Lett. 103, 127202 (2009).

Krinchik, G. S. and Artem'ev, V. A. "Magneto-optical Properties Of Ni, Co, And Fe In The Ultraviolet Visible, And Infrared Parts Of The Spectrum", Soviet Physics Jept Volume 26, No 6 1968 [Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53, 1901-1912 (December, 1967)].

Kronmuller H., and Fahnle M., Micromagnetisation and the microstructure of ferromagnetic solids Cambridge University Press, Cambridge (2003).

Landry, J. P., 'Optical Oblique-Incidence Reflectivity Difference Microscopy: Application to Label-free Detection of Reactions in Biomolecular Microarrays' 2008.

Lysne, E. N., 2017 ' Ultrafast Optical and Magneto-Optical Kerr Effect Spectroscopy on Condensed Matter'

Lichte, H. and Lehmann. M., "Electron holography—basics and applications", Rep. Prog. Phys. 71, 016102 (2008).

Liedke, M. O. , Anwand, W., Bali, R., Cornelius, S., Butterling, M. ,Trinh, T. T., Wagner, A., Salamon, S., Walecki, D., Smekhova, A., Wende, H. and Potzger K. ; Open volume defects and magnetic phase transition in $Fe_{60}Al_{40}$transition metal aluminide Journal of Applied Physics 117, 163908 (2015); https://doi.org/10.1063/1.4919014

Mardare A. I., Hassel A. W. ; 'A combinatorial properties study of thin film Al-Fe alloys' First published: 12 February 2013 https://doi.org/10.1002/pssa.201200737

Menéndez E, Liedke MO, Fassbender J, Gemming T, Weber A, Heyderman LJ, Rao KV, Deevi SC, Suriñach S, Baró MD, Sort J, Nogués J. ; 'Direct magnetic patterning due to the generation of ferromagnetism by selective ion irradiation of paramagnetic FeAl alloys' Small. 2009 Feb;5(2):229-34. doi: 10.1002/smll.200800783.

McCord, J., 'Progress in magnetic domain observation by advanced magneto-optical microscopy' Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 48, Number 33

McCord, J., Urs, N. O., Mozooni, B., Mazalski, P., Kustov, K., Hayes, P. Deldar,S., Quandt, E., AIP Advances 6, 055605 (2016); Advanced magneto-optical microscopy: Imaging from picoseconds to centimeters - imaging spin waves and temperature distributions (invited) https://doi.org/10.1063/1.4943760

Nakayama, S., Okano, M., Nozaki, Y., and Watanabe, S. 'Magneto-optic Kerr effect CCD imaging with polarization modulation technique' AIP Advances 7, 056802 (2017); https://doi.org/10.1063/1.4974023

Plazaola F., Apiñaniz E., Rodriguez, D. M., Legarra, E. and Garitaonandia, J. S. ; 'Fe-Al Alloys' Magnetism'

Rantej Bali, Sebastian Wintz, Falk Meutzner, René Hübner, Richard Boucher, Ahmet A. Ünal, Sergio Valencia, Andreas Neudert, Kay Potzger, Jürgen Bauch… 'Printing Nearly-Discrete Magnetic Patterns Using Chemical Disorder Induced Ferromagnetism' Cite This:Nano Lett.2014142435-441 Publication Date:December 30, 2014 https://doi.org/10.1021/nl404521c

Robert C. O'Handley, Modern Magnetic Materials Principles and Applications, Wiley-Interscience Publication (2003), p 184, 289.

serc.carleton.edu./research-education

Spaldin, N. A., 'Magnetic Materials Fundamentals and Applications' second edition, 2010

Tatsuya Abe, Tetsuroh Kawai, Masaaki Futamoto, Mitsuru Ohtake, Nobuyuki Inaba; 'Fe-Al alloy single-crystal thin film preparation for basic magnetic measurements' AIP Advances 8, 047710 (2018); https://doi.org/10.1063/1.4991910

Thiele, J. U., Buess, M., and Christian H. Back Appl. Phys. Lett. 85, 2857 (2004); Spin dynamics of the antiferromagnetic-to-ferromagnetic phase transition in FeRh on a sub-picosecond time scale https://doi.org/10.1063/1.1799244

You, C-Y., Shin, S-C., Derivation of simplified analytic formulae for magneto-optical Kerr effects Applied Physics Letters Volume 69, Issue 9 10.1063/1.117579

You, C-Y., Shin S-C., Journal of Applied Physics 84, 541 (1998); Generalized analytic formulae for magneto-optical Kerr effects https://doi.org/10.1063/1.368058

Zak, J., Moog, E. R., Liu, C., Bader, S. D. Journal of Applied Physics 68, 4203 (1990); Fundamental magneto-optics https://doi.org/10.1063/1.346209

Zamanzade, M., Barnoush, A., Motz. A., ‘A Review on the Properties of Iron Aluminide Intermetallics’ crystals Review Received: 31 August 2015; Accepted: 4 January 2016; Published: 14 January 2016

Wernsdorfer, W. “From micro- to nano-SQUIDs: applications to nano-magnetism”, Supercond. Sci. Technol. 22, 064013 (2009).

Wilkes, A. W., ‘The experımental ultrafast magneto-optıcal kerr effect’ Williamsburg, Virginia April 2000

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuğçe BOZDAĞ

Doğum Yeri : Salihli/MANİSA

Doğum Tarihi : 04.09.1991

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise	Şirinyer Lisesi (2006-2009)
Lisans	Ankara Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2015)
	Umeå Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Fakültesi, Fizik Bölümü (Erasmus- 2014)
Yüksek Lisans	Ankara Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2016 – Haziran 2019)