

**MANYETİK HAFIZA SİSTEMLERİ İÇİN NANO
ÖLÇEKLİ IrMn/CoFe İNCE FİLM SİSTEMLERİNDE
MANYETİK-YAPISAL ÖZELLİK İLİŞKİSİNİN
BELİRLENMESİ**

Okan DENİZ

Yüksek Lisans Tezi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı - Nanoteknoloji

Mayıs 2012

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1103F043**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Okan Deniz'in "Manyetik Hafıza Sistemleri için Nano Ölçekli IrMn/CoFe İnce Film Sistemlerinde Manyetik-Yapısal Özellik İlişkisinin Belirlenmesi" başlıklı İleri Teknolojiler Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 04.05.2012 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı):	Doç. Dr. R. Mustafa ÖKSÜZOĞLU
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Feridun AY
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Erhan AYAS

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MANYETİK HAFIZA SİSTEMLERİ İÇİN NANO ÖLÇEKLİ IrMn/CoFe İNCE FİLM SİSTEMLERİNDE MANYETİK-YAPISAL ÖZELLİK İLİŞKİSİNİN BELİRLENMESİ

Okan DENİZ

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. R. Mustafa Öksüzoğlu

2012, 93 sayfa

Bu tez çalışmasında magnetron sıçratma tekniği ile üretilen Ta(5nm)/Ru(25nm)/Ta(5nm)/NiFe(6nm)/IrMn(10nm)/CoFe(2nm)/Ta(5nm) çoklu tabaka değiş-tokuş sistemlerinde NiFe tabakasının büyütülmesi sırasında uygulanan atmalı DC güç tipinin atma frekansları (10, 20, 30 ve 50 kHz) değiştirilerek bunun IrMn tane boyutu ve antiferromanyetik/ferromanyetik ara yüzeyinde oluşan değiş-tokuş özelliklerine etkileri incelendi. X- Işını kırınımı, yansıması, sıyırma açısı kırınımı ve salınım eğrisi ölçümleri yapısal analiz teknikleri olarak kullanıldı. Yapısal karakterizasyon sonuçlarına göre 10 kHz NiFe ile üretilen çoklu tabaka sisteminde en yüksek IrMn tane boyutu ve kristal örgü değişkeni bulundu. Yine aynı numunenin en yüksek Ru ve IrMn kristal yönelim oranına sahip olduğu gözlemlendi. Manyetizasyon ölçümlerine göre CoFe serbest ferromanyetik tabakanın H_{ex} (değiş tokuş alanı) değerleri önemli derecede değişmediği, ancak CoFe ve NiFe tabakalarının H_c (zorlayıcı alan) değerlerinin düştüğü gözlemlendi. Bu duruma göre en yüksek H_{ex}/H_c oranına 10 kHz frekans ile üretilen numunede rastlandı. Bu sonuçlara karşın düşük tane boyutuna sahip olan 50 kHz frekansıyla üretilen numune en yüksek J_k (değiş-tokuş ara yüzey çiftlenim enerjisi) değerini gösterdi. Bu veriler doğrultusunda büyüyen tane boyutundaki domain yapılarının değiş-tokuş etkisine önemli ölçüde etki ettiği anlaşıldı. Çalışmanın ikinci deney serisi kapsamında üretilen Ta(5nm)/Ru(10nm)/Ta(5nm)/NiFe(6nm)/IrMn(10nm)/CoFe(2nm)/Ta(5nm) çoklu tabaka değiş-tokuş sistemlerinde PDC ters voltaj süresinin Ru/Ta, NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülüklerine etkisi incelenmiş ve bunların Ru ark sayısı ile birlikte değiştiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Değiş Tokuş etkisi, Ferro- Antiferromanyetik Filmler, Yapısal Karakterizasyon, Değiş Tokuş ve Zorlayıcı Alanı

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DETERMINATION OF CORRELATION BETWEEN MAGNETIC AND STRUCTURAL PROPERTIES IN NANO-SCALE IrMn/CoFe THIN FILM SYSTEMS FOR MAGNETIC STORAGE SYSTEMS

Okan DENİZ

Anadolu University
Graduate School of Science
Department of Advanced Technologies

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. R. Mustafa Öksüzoğlu
2012, 93 pages

In this study, the effect of pulsing frequency (10, 20, 30 and 50 kHz) on exchange bias properties of Ta(5nm)/Ru (25nm)/Ta(5nm)/NiFe(6nm)/IrMn(10nm)/CoFe (2nm)/Ta(5nm) thin film stack, where the pulsing frequency was changed during NiFe deposition was investigated. Then the frequency change was correlated to IrMn grain size and antiferromagnetic/ferromagnetic interface's magnetic properties. Structural characterization techniques such as X-ray diffraction, reflection, grazing angle and rocking curve techniques were utilized. It was found that 10kHz NiFe sample has the largest IrMn grain size and lattice constant. The same sample showed the highest Ru and IrMn crystalline texture ratio. According to the magnetic characterizations, H_c fields of CoFe and NiFe layers were decreased where CoFe free layer's H_{ex} field remained constant. Therefore, the highest H_{ex}/H_c ratio was obtained from the 10kHz sample. However, the 50kHz sample, having one of the smallest grain sizes, showed highest exchange bias coupling energy (J_k). Consequently, it is understood that the domain structure changes with increasing grain size have an effect on the exchange bias properties. The second sample series (Ta(5nm)/Ru(10nm)/Ta(5nm)/NiFe(6nm)/IrMn(10nm)/CoFe (2nm)/Ta(5nm)) was studied for investigating the pulsing reverse time on the interface roughness values inside the whole exchange bias system. It was observed that, the Ru/Ta, NiFe/IrMn and IrMn/CoFe interface roughnesses depend on the Ru arc counts during deposition.

Keywords: Exchange Bias Effect, Ferro- Antiferromagnetic Films, Structural Characterization, Exchange and Coercive Fields

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübelerini bana yapıcı bir şekilde aktaran ve destek veren değerli hocam sayın Doç. Dr. Ramis Mustafa ÖKSÜZOĞLU'na teşekkür ederim. Laboratuarda üç yıl birlikte çalıştığım, her zaman deneyimleri ve desteğinden faydalandığım, çalışma arkadaşım Mustafa YILDIRIM'a, ayrıca yardımlarını hiçbir zaman benden esirgemeyen eski çalışma arkadaşım Hakan ÇINAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere kadar gelmemi borçlu olduğum ve hayatım boyunca her konuda bana verdikleri sınırsız destek için aileme sonsuz teşekkür ederim.

Okan DENİZ

Mayıs 2012

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL BİLGİLER	3
2.1. Manyetizma	3
2.1.1. Ferromanyetizma	3
2.1.2. Antiferromanyetizma	4
2.1.3. Manyetokristalin tek yönlülük	5
2.1.4. Manyetik domain	7
2.2. Değiş Tokuş Etkisi	8
2.2.1. Değiş tokuş etkisinin mekanizması.....	10
2.2.2. Dengeli ve dengesiz spin yapıları	11
2.2.3. Değiş tokuş etkisini etkileyen faktörler	13
2.3. Uygulama Alanları	16
3. DENEYSEL METODLAR	18
3.1. Çalışmanın Amacı	18
3.2. Tabaka ve Tabaka Kalınlığı Seçimi	19
3.3. Numune Hazırlama İşlemleri	24
3.4. Magnetron Sıçratma Sistemi	25
3.4.1. Atmalı doğru akım tekniği	29

3.5. X-Işını Teknikleri	32
3.5.1. X-Işını kırınımı tekniği	34
3.5.2. X-Işını yansıma tekniği	35
3.5.3. Salınım eğrisi tekniği	38
3.5.4. Sıyırma açısı X-Işını kırınımı tekniği	39
3.6. Dört Nokta İğne Tekniği	40
3.7. Titreşimli Örnek Manyetometresi	42
4. DENEYSEL SONUÇLAR	43
4.1. Üretimi Yapılan Numuneler	43
4.2. Yapısal Özellikler	44
4.2.1. X-Işını kırınımı sonuçları	44
4.2.2. Sıyırma açısı X-Işını kırınımı sonuçları	51
4.2.3. X-Işını yansıma tekniği sonuçları	53
4.2.4. Salınım eğrisi tekniği analizi	60
4.3. Manyetik Özellikler Ölçümü Sonuçları	64
4.3.1. CoFe ve NiFe tabakalarının H_{ex} alanları ile ilgili sonuçlar	67
4.3.2. CoFe ve NiFe tabakalarının H_c alanları ile ilgili sonuçlar	71
4.3.3. Üretilen EB sistemlerinde tabakaların H_{ex} - H_c alanları arasındaki ilişkiler	75
4.4. Elektriksel Karakterizasyon Ölçümü Sonuçları	78
5. GENEL SONUÇ ve ÖNERİLER	81
5.1. PDC Frekansı Değişimi ile Üretilen EB Sistemleri	81
5.2. PDC Ters Voltaj Süresi Değişimi ile Üretilen EB Sistemleri	84
5.3. Öneriler	85
KAYNAKLAR	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. Yıllara göre gelişim gösteren işlemciler ve artan transistör sayıları [1]	1
1.2. HDD kayıt ortamı üzerindeki manyetik domainlerin a) geçmiş ve b) günümüzde kullanılan boyutları [1]	2
2.1. Ferromanyetik malzemelerde gözlenen tipik histerezis eğrisi [9]	3
2.2. Antiferromanyetik malzemenin 2 boyutlu spin düzeni	5
2.3. Demir ve nikel tek kristal yapılarının farklı kristal yönleri boyunca ölçülen manyetizasyon eğrileri [9]	6
2.4. Denge halindeki domain yapısının manyetik alan altındaki davranışı [11].....	7
2.5. İki domain yapısı arasında bulunan domain duvarı ve spin durumu [11].....	8
2.6. EB etkisi nedeniyle gerçekleşen histerezis kayması [2]	9
2.7. EB etkisi gösteren bir AFM/FM ikili tabakasının histerezis eğrisi ve evreleri	10
2.8. AFM tabakasının FM ara yüzeyinde gözlenen a) dengeli ve b) dengesiz spin yapıları	12
2.9. Spin vanası sisteminde spine bağlı elektron taşınımı ve direnç modeli.....	17
3.1. Üretimi yapılmış EB sistemlerinin tabakalı yapısı.....	20
3.2. Ru kalınlığına bağlı Ru tane boyutu ve Ru/Ta ara yüzey pürüzlülüğünün değişimi.....	22
3.3. 5x5 mm ve 10x10 mm boyutlarında kesilmiş 3 inç çapındaki (76 mm) Si/SiO ₂ altlık.....	24
3.4. Magnetron sıçratma tekniğinin şematik gösterimi.....	26
3.5. Anadolu Üniversitesi İnce Film Laboratuvarı Magnetron Sıçratma Sistemi... 28	
3.6. PDC sıçratma tekniğinde a) elektriksel arkların oluşumu ve b) oluşan arkların giderilme yöntemi [60,61].....	30
3.7. Güç kaynağının hedef malzemeye uyguladığı ideal PDC dalgası	31
3.8. Anadolu Üniversitesi X-Işınları Laboratuvarı' nda bulunan Bruker D8 Advance X-Işını kırınımı cihazı	32
3.9. XRD ölçüm ve X-Işını kırınım geometrisi.....	34
3.10. Örnek bir XRR ölçüm eğrisi	35
3.11. Dağılmış saçılma yapabilmek için; a) numunedeki arka plan gürültüsünü bulan salınım ve b) dağılmış saçılma ölçüm eğrileri	36

3.12. XRD ölçümünde: a) yüksek açı ve b) sıyırma açı ölçüm geometrileri	39
3.13. Anadolu Üniversitesi İnce Film Laboratuvarı altyapısında bulunan FPP ölçüm düzeneği	40
3.14. FPP ölçüm şematiği	41
3.15. Titreşimli örnek magnetometresi özelliğine sahip Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü altyapısında bulunan PPMS sistemi [63]	42
4.1. PDC frekansının değişimine bağlı olarak üretilen EB sistemlerinin XRD desenleri	45
4.2. XRD desenlerinden elde edilen FWHM değerlerinden Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan a) IrMn ve b) Ru tane boyutlarının PDC frekansına göre değişimi	47
4.3. IrMn kristal örgü değişkeninin PDC frekansına bağımlılığı	49
4.4. Farklı PDC ters voltaj sürelerinde üretilen ince film sistemlerinin XRD kırınım desenleri	50
4.5. Ru tane boyutunun PDC ters voltaj süresine göre değişimi	51
4.6. 10 kHz PDC frekansı ile üretilen NiFe tabakasına sahip EB sisteminin sıyırma açısı X-Işını kırınım deseni	52
4.7. Değişen PDC frekansı ile üretilen NiFe tabakasına sahip EB sistemlerinin XRR ölçüm ve teorik modelleme eğrileri	53
4.8. PDC frekansına göre IrMn tane boyutu ile NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülük değerleri	55
4.9. Farklı PDC ters voltaj sürelerinde üretilmiş EB sistemlerinin XRR ölçüm ve teorik modelleme eğrileri; a) 7,5-10 μ s ve b) 5-7 μ s	56
4.10. PDC ters voltaj süresine göre Ru hedefinde gözlenen ark sayısı ve Ru/Ta ara yüzey pürüzlülük değerleri	58
4.11. PDC ters voltaj sürelerine göre değişen Ru/Ta, NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülük değerleri	59
4.12. Değişen PDC frekansına göre üretilen EB sistemlerinin a) Ru (0002) kırınım doruğu üzerinden ölçülen RC eğrileri, b) RC eğrilerinden elde edilen FWHM ve şiddet değerleri ve c) üretim sırasına göre gözlenen ark sayılarının PDC frekansına göre değişimi	60
4.13. PDC frekansına göre değişen IrMn <111> yönelim oranı	62

4.14. Değişen PDC ters voltaj süresine göre değişen a) Ru(0002), b) IrMn(111) doruklarının RC profilleri ve c) Ru(0002) ve IrMn(111) fazlarının kristal yönelim oranları.....	63
4.15. NiFe/IrMn/CoFe EB sisteminin örnek manyetizasyon eğrisi [4]	64
4.16. Farklı PDC frekans değerleriyle a) 10 kHz, b) 20 kHz, c) 30 kHz ve d) 50 kHz üretilen NiFe tabakasına sahip EB sistemlerinin M-H döngüleri	66
4.17. PDC frekansına bağlı EB sistemlerinde ölçülen IrMn/CoFe ve NiFe/IrMn H_{ex} değerlerinin değişimi	67
4.18. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu ve IrMn/CoFe H_{ex} alanı ...	69
4.19. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu ve NiFe/IrMn H_{ex} alanı....	70
4.20. PDC frekansına göre değişen CoFe ve NiFe tabakalarının H_c alanları.....	71
4.21. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu, IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülüğü ve CoFe H_c alanları	72
4.22. PDC frekansına göre değişen IrMn tercihli yönelim derecesi ve CoFe H_c alanı.....	73
4.23. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu ve NiFe H_c alanı	73
4.24. PDC frekansına göre değişen NiFe yüzey pürüzlülüğü ve H_c alanı.....	74
4.25. PDC frekansına göre değişen CoFe tabakasına ait H_{ex}/H_c oranı ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülüğü.....	75
4.26. PDC frekansına göre a)NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülüklerinin ve b) NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzeylerinin H_c değerlerinin değişimi	76
4.27. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu, tabaka kalınlığı ve IrMn/CoFe ara yüzey enerjisi	77
4.28. PDC frekansının değiştirildiği EB numunelerinin; a) PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu ile çoklu tabakaların yaprak dirençleri ve b) PDC frekansına göre değişen yaprak direnç ve öz dirençleri	79
4.29. EB numune serisinin PDC ters voltaj sürelerine göre değişen öz direnç değerleri ve Ru hedefindeki ark sayıları	80
5.1. H_{ex} -NiFe alanının IrMn tane boyutuna göre değişimi	83

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Tez çalışması kapsamında kullanılan ferromanyetik malzemelerin T_C değerleri	4
3.1. Ru kalınlığı değişimine bağlı olarak Ta ve Ru tabakalarının ara yüzey pürüzlülük değerleri	21
3.2. Sıçratma tekniğinin başlıca süreç değişkenleri ve etkileri	28
4.1. Tek tabaka kalınlık optimizasyonlarından elde edilen kaplama hızları	44
4.2. Üretilen EB sistemlerinin kalınlık, Ru ve IrMn tane boyutu değerleri	46
4.3. EB numunelerindeki IrMn tabakalarının doruk pozisyonları ve hesaplanan örgü değişkenleri.....	48
4.4.Değişen PDC frekansına göre üretilen numunelerdeki tabakaların gerçek kalınlık değerlerinin değişimi	53
4.5.Değişen PDC frekansına göre üretilen numunelerdeki tabakaların üst ara yüzey pürüzlülük değerleri.....	54
4.6.Değişen PDC ters voltaj süresine göre üretilen numunelerdeki tabakaların gerçek kalınlık değerlerinin değişimi.....	57
4.7.Değişen PDC ters voltaj süresine göre üretilen numunelerdeki tabakaların üst ara yüzey pürüzlülük değerleri.....	57
4.8. Farklı PDC frekans değerleriyle üretilen NiFe tabakasına sahip EB sistemlerinin H_{ex} ve H_c değerleri.	67
4.9. PDC frekansına göre her numune serisinden elde edilen yaprak dirençlerin hesaplanan standart sapması	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

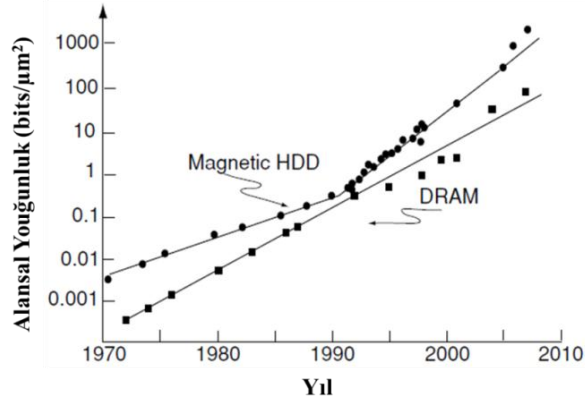
AFM	: Antiferromanyetik
CPP	: Düzleme dik akım (Current Perpendicular to Plane)
DC	: Doğru akım (Direct Current)
EB	: Değiş-Tokuş Etkisi (Exchange Bias effect)
FC	: Alan altında soğutma (Field Cooling)
FM	: Ferromanyetik
FPP	: Dört nokta prob (Four Point Probe)
FWHM	: Yarı yükseklik genişliği (Full Width at Half Maximum)
GIXD	: Sıyırma açısı X-Işını kırınımı (Grazing Incidence X-Ray Diffraction)
GMR	: Dev manyetodirenç (Giant Magneto Resistance)
H_c	: Zorlayıcı manyetik alan (Coercive field) (Oe)
H_{ex}	: Değiş-Tokuş manyetik alanı (Exchange field) (Oe)
HDD	: Sabit disk sürücüsü(Hard Disc Drive)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paketlenme
J_k	: Değiş-tokuş ara yüzey çiftlenim enerjisi (erg/cm^2)
k.b.	: Keyfi birim
M_{FM}	: Ferromanyetik tabakanın doyum manyetizasyonu (Oe)
M_r	: Kalıcı manyetizasyon (Remenant magnetization) (emu)
M_s	: Doyum manyetizasyonu (Saturation magnetization) (Oe)
MR	: Manyetodirenç (Magneto Resistance)
(M)RAM	: (Manyetik) Rastgele erişim hafızası ((Magnetic) Random Access Memory)
M-H	: Uygulanan manyetik alana karşılık gözlenen manyetizasyon

NM	: Manyetik olmayan (Non Magnetic)
PDC	: Atmalı doğru akım (Pulsed Direct Current)
PPMS	: Fiziksel özellik ölçüm sistemi (Physical Property Measurement System)
PVD	: Fiziksel buhar depolama (Physical Vapor Deposition)
RC	: Salınım eğrisi (Rocking Curve)
RF	: Radyo frekansı (Radio Frequency)
t_{AFM}	: Antiferromanyetik tabaka kalınlığı (nm)
T_B	: Blocking Sıcaklığı (K)
T_C	: Curie Sıcaklığı (K)
t_{FM}	: Ferromanyetik tabaka kalınlığı (nm)
TMR	: Tünel manyetodirenç (Tunneling Magneto Resistance)
T_N	: Néel Sıcaklığı
UDA	: Tek manyetik alan eksenli tavlama (Unidirectional field Annealing)
UHV	: Ultra yüksek vakum (Ultra High Vacuum)
VSM	: Titreşimli örnek magnetometresi (Vibrating Sample Magnetometer)
XRD	: X-Işını kırınımı (X-Ray Diffraction)
XRR	: X-Işını yansıması (X-Ray Reflection)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

1. GİRİŞ

Son yıllarda yapılan çalışmaların ardından günümüz teknolojilerinde ve uygulamalarında nanoteknoloji bilim dalından fayda sağlanması, bilim ve mühendislik dallarında büyük gelişmeler yaşanmasına neden olmuştur. Bilinen kaba malzemelerin yerini boyut skalalarında kısıtlanmış halleri aldıkça yeni fenomenler keşfedilmiştir. Nanoteknolojiyi kullanan bir uygulama dalı da ince filmlerdir. İnce filmler iki boyutta sınırlandırılmış malzemeler olduğundan ötürü yapısal, manyetik, elektriksel gibi birçok özelliğinin değiştiği görülmüştür. Güncel ve gelecek vaat eden uygulamaların performanslarının yükselmesi beklentisi ise kendi alanında ince filmlerin özelliklerinin geliştirilme zorunluluğunu arttırmıştır.

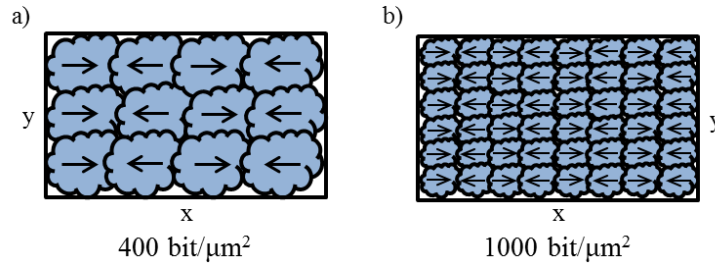
Performansının sürekli artan talebe göre artması beklenen bir sektör de bilgi kayıt teknolojisidir. Özellikle hard disk uygulamalarında gün geçtikçe bilgi depolama kapasitesinin ve bilgi okuma hızının artırılması en önemli hedeflerdir. Bu sebeple hard disk bilgi okuyucu kafaların geliştirilmesi gerekir ki bu durumda okuyucu elementi oluşturan ince film algılayıcısı kilit bir rol üstlenir. Şekil 1.1’de gösterilen bilgi kayıt teknolojisinin yıllara göre değişimi (Moore Yasası’na paralel olarak) ince filmlerin özelliklerinin geliştirilerek daha iyi performans göstermeleri gerektiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 1.1. Yıllara göre gelişim gösteren işlemciler ve artan transistör sayıları [1]

Bilgi kayıt teknolojisinin gelişiminde, malzemenin manyetik ve elektriksel özelliklerin birleşiminden doğan “spintronik” bilim dalı kullanılmaya başlandı. Bu uygulama dalında elektronun sadece elektriksel yükü değil, spinlerinin durumu da

uygulamaya katıldı [2,3]. Spintronik dalının ilk uygulamalarından olan GMR etkisi bilgisayarlardaki bilgi depolama sistemi olan HDD aygıtlarının, manyetik okuma kafalarının manyetik alanlar altında çok daha hassas çalışmasını sağlayarak bilginin sabit disk üzerinde, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi, daha küçük bölgelere yazılabilmek olanağını sağladı. Böylece bilgi depolama kapasiteleri artmış oldu. Günümüzde çoğu HDD okuma kafası aygıtları GMR ve TMR etkisinden faydalanmaktadır [2,4].



Şekil 1.2. HDD kayıt ortamı üzerindeki manyetik domainlerin a) geçmiş ve b) günümüzde kullanılan boyutları [1]

Bunların yanı sıra spintronik uygulamalarının farklı bir çeşidi olan MRAM sistemleri RAM sistemlerine göre daha az enerji harcama ve bilgiyi güç kesintisinde içerisinde tutabilme gibi avantajlar sağlamaktadır [5,6]. MRAM sistemleri GMR etkisine benzeyen TMR etkisini kullanır [7,8]. GMR ve TMR etkilerini kullanan ve HDD okuma kafalarında kullanılan manyetik algılayıcılara ise spin vanası adı verilir. Bu kadar geniş uygulama alanları bulabilen “spintronik”, sonuç olarak gelecek elektronik teknolojilerinin çoğunda kullanılma potansiyeline sahip bir bilim dalıdır.

Nanoteknolojinin devreye girdiği bu uygulama aralığında nano boyuttaki manyetizma etkilerinin anlaşılması ve etkilerin nereden kaynaklandığının bulunması bu tip uygulamalarda çalışılan ince filmlerin geliştirilmesi için önemlidir. Bilindiği gibi HDD aygıtlarında bilgi disk üzerine manyetik etkiler kullanılarak yazılır. Aynı şekilde bilginin okunması da manyetik yolla gerçekleşir. Okuma sürecinde kullanılan etkiye MR yani manyetik alana bağlı olarak değişen direnç değeri denir. Bu değer yüzde olarak verilir ve spin vanasının performansı direkt olarak belirler. Bu süreçte bilgilerin hızlı ve tutarlı bir şekilde okunması için ince film algılayıcısının manyetik özelliklerinin geliştirilmesi gerekir.

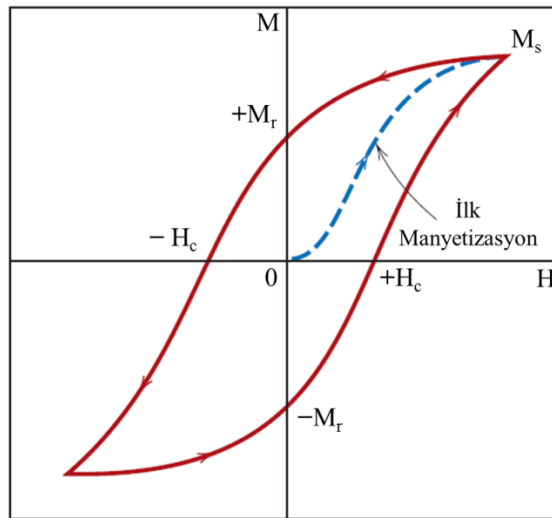
2. TEMEL BİLGİLER

2.1. Manyetizma

EB etkisi AFM ve FM tipi yapılarda gözleendiği için aşığında bu iki temel manyetik davranış ve temel bilgiler hakkında kısaca bahsedildi.

2.1.1. Ferromanyetizma

Ferromanyetizma, paramanyetik davranışın bir türüdür. Ancak paramanyetik malzemelerin spinleri manyetik alan altında yönlenirken alan çekildiğinde yönlenmelerini kaybederler. Ferromanyetik malzemeler aksine alan altındaki spin yönlenmelerini alan çekildiğinde de çoğunlukla korurlar. Bu nedenle bir ferromanyetik malzemeye ilk kez alan uygulanmasının oluşturduğu ilk manyetizasyon eğrisi (bakir eğri) her ne kadar ters alan uygulansa da gözlenemez. Bunun yerine negatif ve pozitif yöndeki manyetik alanlar altında ferromanyetik malzemelerin manyetizasyon eğrisi bir histerezis gösterir. Ferromanyetik malzemelerin korudukları manyetizasyon derecesine M_r manyetizasyonu, kalıcı manyetizasyonu ortadan kaldırmak için uygulanması gereken alan (uygulanmış ilkin manyetizasyon ortadan kaldırmak için uygulanması gereken alan (uygulanmış ilkin manyetizasyon ortadan kaldırmak için uygulanması gereken alan (uygulanmış ilkin manyetizasyon ortadan kaldırmak için uygulanması gereken alan) H_c alanı olarak tanımlanır. Malzemenin çıkabileceği en yüksek manyetizasyon değeri ise M_s olarak gösterilir. Bu özellikler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Ferromanyetik malzemelerde gözlenen tipik histerezis eğrisi [9]

Ferromanyetik malzeme, yukarıda bahsedilen değişkenlerin değerlerine göre (M_r ve H_c) göre sert magnet ya da yumuşak magnet olarak belirlenir. Sert magnetlerde histerezis eğrisi daha genişken (yuksek zorlayıcı alan), yumuşak magnetlerde histerezis alanı daha azdır (düşük zorlayıcı alan).

Ferromanyetik malzemelerle ilgili önemli bir özellikte Curie Sıcaklığı'dır. Ferromanyetik malzemeler bu sıcaklığın üzerine çıktığında paramanyetik özellik göstermeye başlarlar. Bunun nedeni ferromanyetik malzeme içerisindeki domain yapıların spin anizotropilerini kaybetmeleridir. Bu etki geri dönürülebilir bir etkidir. Yani T_C 'nin altında aynı malzeme yine ferromanyetik özellik gösterir. Curie-Weiss Yasası'na göre malzemenin manyetik alınganlığı (χ) (2.1) ile değişir. C malzemeye özel bir katsayı ve T sıcaklığı ifade eder.

$$\chi = \frac{C}{T-T_C} \quad (2.1)$$

Bu çalışmada kullanılan ferromanyetik malzemelerin T_C 'leri Çizelge 2.1'de verilmiştir [9].

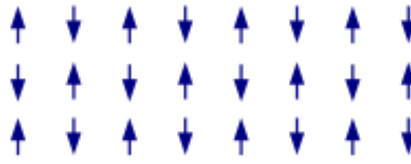
Çizelge 2.1. Tez çalışması kapsamında kullanılan ferromanyetik malzemelerin T_C değerleri

Malzeme	T_C (K)
Co	842
Fe	497
Ni	82

2.1.2. Antiferromanyetizma

Antiferromanyetizma özelliğine sahip malzemeler de ferromanyetik malzemeler gibi kritik bir sıcaklığın üzerinde paramanyetik etki gösterir. Ferromanyetik malzemeler için bu sıcaklık Curie Sıcaklığı olarak tanımlanırken, antiferromanyetik malzemeler için bu sıcaklığa Néel Sıcaklığı adı verilir. Bu çalışmada kullanılan IrMn antiferromanyetik malzemesi hakkında detaylı bilgiler "Tabaka ve Kalınlık Seçimi" bölümünde verilmiştir.

Antiferromanyetik malzemelerde komşu spinler birbirlerine göre ters yönde düzene girerler. Bu yapı, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi iki farklı spin yönelimine sahip kristal yapının iç içe geçmiş şekli olarak da tanımlanabilir [10]. Antiferromanyetik malzemeler genellikle iyonik bileşiklerden oluşur. İçerdiği elementlerin spin yapılarından dolayı elementlerin birbirlerine göre olan manyetik moment farkına bağlı antiferromanyetik malzemenin net manyetizasyonunu sıfırlar ya da belirli bir değerde net manyetizasyon gösterir [9,10]. İdeal durumda bir antiferromanyetik malzemesinin 2 boyutlu spin yapısı Şekil 2.2’de verildi.



Şekil 2.2. Antiferromanyetik malzemenin 2 boyutlu spin düzeni

EB sisteminde antiferromanyetik malzemenin diğer etkileri “Değiş Tokuş Etkisi” bölümünde açıklandı.

Antiferromanyetik malzemelerle ilgili önemli bir özellikte Bloklama (*Blocking*) Sıcaklığı’dır (T_B). Bu sıcaklıkta EB etkisi ortadan kalkar. Genelde T_B kaba malzemenin T_N ’sinden düşüktür. Antiferromanyetik malzemeler T_N sıcaklığında ise paramanyetik duruma geçerler. Bu çalışmada kullanılan antiferromanyetik malzeme olan IrMn ’nin T_B ’ si 400-520K arası değişir ve T_N ’si 690K civarındadır [2]. AFM özelliği gösterebilen paramanyetik malzemeler bu nedenle AFM T_N üzerine çıkacak şekilde ısıtılır ve FC uygulanır. Bunun sonucunda AFM düzende bir malzeme elde edilir.

2.1.3. Manyetokristalin tek yönlülük

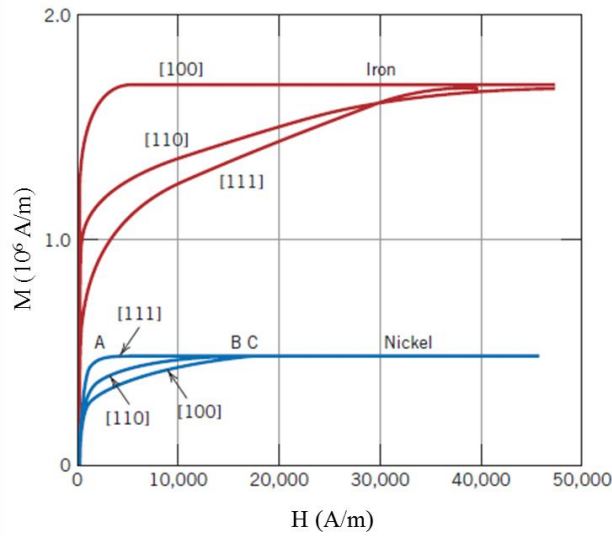
Ferromanyetik malzemeler için önemli bir diğer değişken de manyetik alanın malzemeye hangi yönde uygulandığıdır. Bilindiği gibi malzemeler doğada olduğu gibi ince film boyutlarında da belirli kristal yapılara sahiptirler. Yani kristal yapının tipine göre yapıdaki atomların yerleri ve kristal düzlemlerindeki atom yoğunlukları değişecektir. Böylelikle uygulanan manyetik alan farklı malzemelerin farklı boyutlarda manyetize olmasına neden olacaktır. Buna bağlı

olarak malzemelerin doyum manyetizasyonlarına ulaşmaları da aynı malzemenin farklı kristal yönleri için farklı manyetik alanlarda gerçekleşecektir.

Ferromanyetik malzemelerin farklı histerezis eğrisi göstermesinin nedenleri olarak [9]:

- Malzemenin tek kristal ya da çok kristalli olması,
- eğer çok kristalli ise tanelerin tercihli yöneliminin olması,
- yapıda kusurların ya da safsızlıkların bulunması,
- sıcaklık ya da yapıdaki stres derecesi olarak listelenebilir.

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi demir ve nikel malzemeleri tek kristal düzeninde farklı kristal yönlerinde farklı alanlarda manyetik doyuma ulaşmaktadırlar. Örneğin demir için manyetik doyuma en zor ulaşılan kristal yönü [111] iken, nikel için [111] kristal yönü en düşük alanda manyetik doyuma ulaşır.

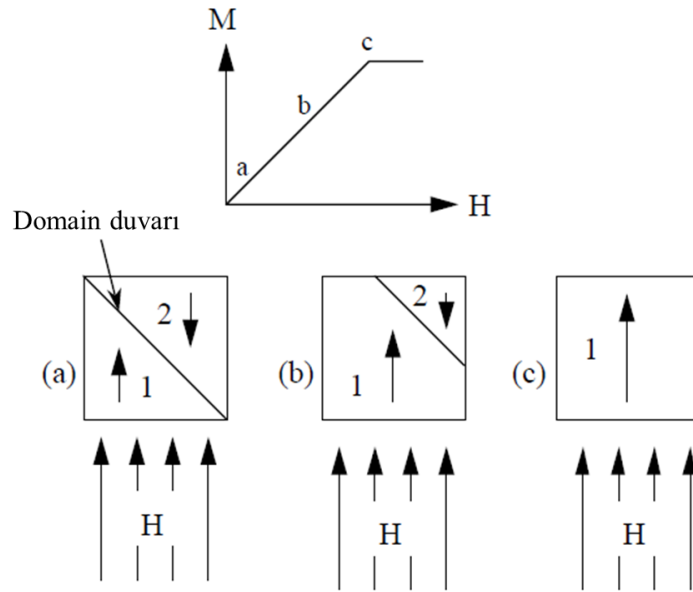


Şekil 2.3. Demir ve nikel tek kristal yapılarının farklı kristal yönleri boyunca ölçülen manyetizasyon eğrileri [9]

Bu grafiklere göre istenen ferromanyetik malzemenin hangi kristal yönde en kolay manyetize olduğu anlaşılır. Örneğin nikel malzemesi için bu yön [111] yönüdür. Diğer taraftan demir için [111] ve nikel için [100] yönleri manyetik doyuma zor ulaşan yönlerdir [9]. Kristal yöneliminin manyetik davranış üzerine etkisi manyetik tek yönlülük ya da manyetokristalin tek yönlülük (*magnetocrystalline anisotropy*) olarak tanımlanır.

2.1.4. Manyetik domain

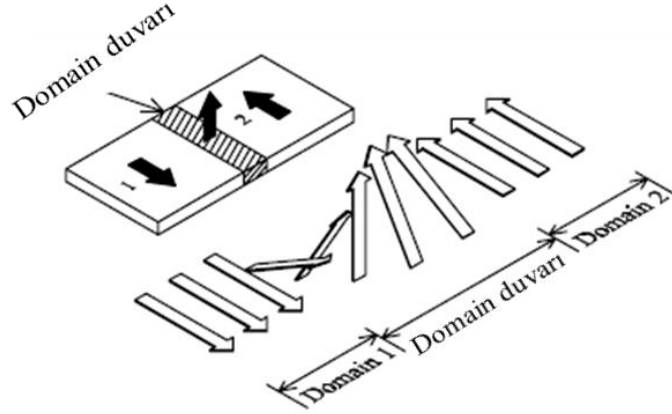
Manyetik domainler bir ferro veya antiferromanyetik malzeme içerisinde aynı spin yönelimine sahip bölgeler olarak tanımlanır. Spinler arası bu paralel yönelimin nedeni birbirlerini kuvvetli manyetik etkileşim ile etkilemeleridir. Çok kristalli malzemelerde bir tane kendi içerisinde tek kristal olsa bile domainler bu tane içerisinde birden çok bulunabilir. Yani, tane boyutu ile domain boyutu her zaman eşit değildir [1]. Ancak tane sınırları domainleri de sınırlar. Bu durumda domain sayısı en az tane sayısı kadardır. Domainler büyüklüklerine göre malzemenin net manyetizasyonuna etki ederler. Manyetik alan altında ise ferromanyetik malzemelerde bulunan farklı spin yönelimine sahip domainler uygulanan alan yönüne doğru manyetize olup ideal durumda sadece bir tane domain varmış gibi hareket ederler. Net manyetizasyonu sıfır olan bir domain grubunun manyetik alan altında davranışı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Denge halindeki domain yapısının manyetik alan altındaki davranışı [11]

İnce film sistemlerinde manyetik domainleri etkileyen faktörler; kalınlık, tane boyutu ve ara yüzey pürüzlülüğü olarak sıralanabilir. İnce filmlerde değiştirilen bu özellikler domain duvarlarına direkt olarak etki eder. Domain

duvarları spin yöneliminin komşusu olan iki domainin ara bölgesi olarak düşünülebilir. Şekil 2.5'te domain duvarı ve spin yönelimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. İki domain yapısı arasında bulunan domain duvarı ve spin durumu [11]

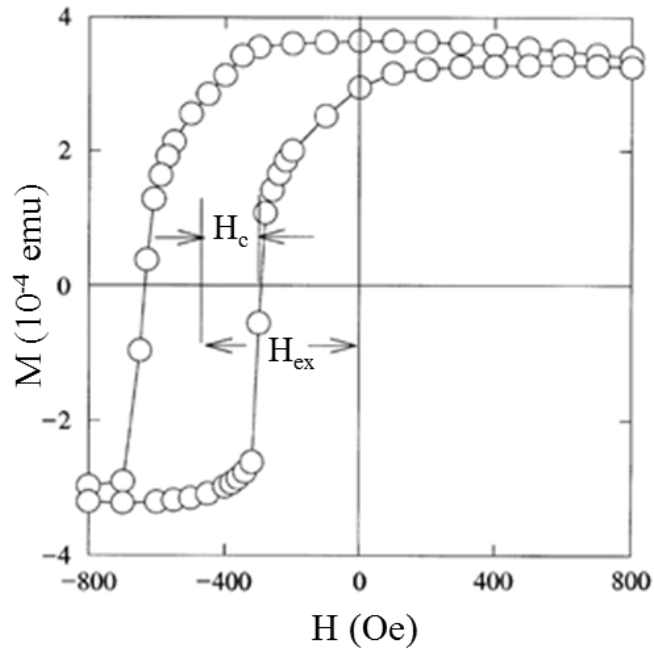
Domain duvarları, malzemenin manyetik etkinliğini etkileyen faktörlerden biridir. Domain duvarları içerisinde spin yönelimi belirsizlik taşıdığı için domain duvarları ne kadar genişse malzemenin manyetik özelliği de o derecede değişecektir. Bu durum kaba malzemeler için (kaba malzemelerde domain duvarı genişliği 10-100 nm arası değişir [11]) büyük bir sorun teşkil etmese de nano malzemelerde önem kazanır. Örneğin ince filmlerde domain genişliği (1-100nm) ince film kalınlığı kadar ya da daha düşük olabilir.

2.2. Değiş Tokuş Etkisi

EB etkisi manyetik bir etkileşme olup, temasta bulunan AFM ve FM malzemenin oluştuğu bir yapıda FM malzemenin manyetik yöneliminin AFM malzemenin yönelimine bağlı olarak düzene girmesidir. Bu etki ilk kez 1957 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından CoO kaplı Co nano parçacıklarda gözlenmiştir [12,13]. Ferromanyetik malzemenin bilindiği şekilde manyetik alana bağlı manyetizasyon histerезisi gösterir. Ancak antiferromanyetik tabaka tarafından tek bir manyetizasyon yönüne sabitlenen bir ferromanyetik tabaka histerезis eğrisinde Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bir manyetizasyon kayması yaşar. Bu kaymanın nedeni FM'de oluşan EB etkisidir.

EB etkisi birçok tip sistemde oluşturulabilir. Ancak günümüzde özellikle uygulamaları da dikkate alınır, EB etkisi ince film sistemleri kullanılarak elde edilmektedir. Bunun nedeni EB etkisinin meydana geldiği AFM ve FM tabakaları arasındaki ara yüzeyin daha kolay kontrol edilebilmesi ve aygıt üretiminde tavlama işlemlerine daha dayanıklı olmasıdır [2].

Günümüzde birçok manyetik uygulamada yer bulan bu fiziksel etki, gelecek yıllardaki manyetik kayıt teknolojilerinin; GMR ve TMR gösteren spin vanaları ve MRAM aygıtlarının gelişimi için önemli bir rol oynamaktadır.

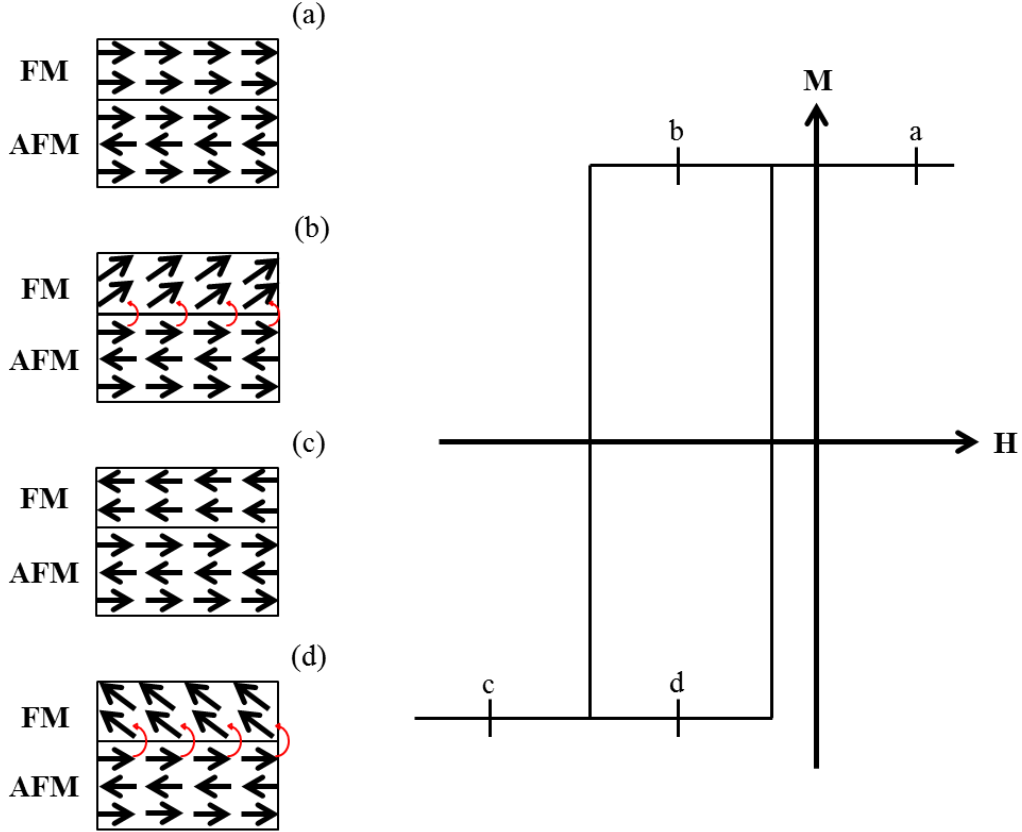


Şekil 2.6. EB etkisi nedeniyle gerçekleşen histerezis kayması [2]

Genel olarak EB etkisinin oluşması için öncelikle paramanyetik düzende bulunan malzemeyi AFM haline getirmek gerekir (bkz. 2.1.2. Antiferromanyetizma bölümü). Bunun için malzeme Néel Sıcaklığı üzerine çıkarılır ve ardından manyetik alan altında oda sıcaklığına soğutulur (FC). Bu durumda FM tabaka AFM tabakanın manyetik yönüne göre spinlerini döndürür ve EB etkisi gösterir.

2.2.1. Değiş tokuş etkisinin mekanizması

AFM tabakanın T_N altındaki bir sıcaklıkta manyetizasyon eğrisi ölçülen bir ince film EB sistemini ele alırsak, FM tabakasının manyetizasyon yönünün manyetik alana bağlı değişimi Şekil 2.7’de gösterildiği gibi merkezden kaydığı zaman aşağıda belirtilen ideal evrelerden (Şekil 2.7) geçer.



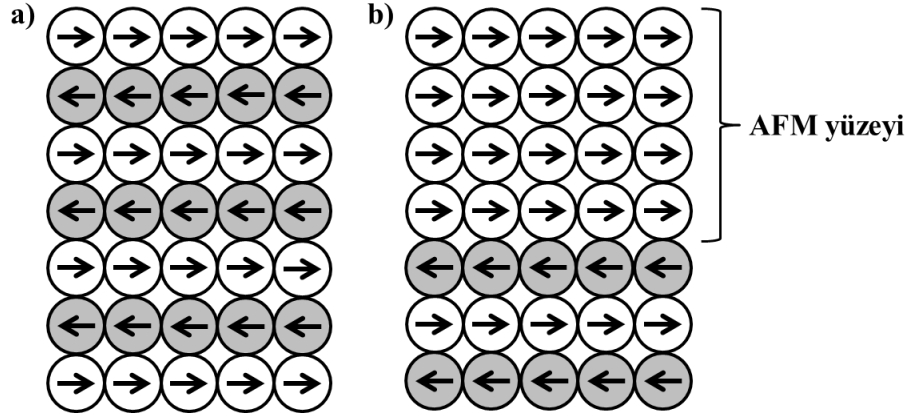
Şekil 2.7. EB etkisi gösteren bir AFM/FM ikili tabakasının histerezis eğrisi ve evreleri

- a) Histerezis eğrisinin bu bölümünde uygulanan manyetik alan üretim sırasında uygulanan alan ile aynı yönde iken, AFM tabakasının FM ile olan ara yüzeyindeki spinlerin hepsi FM tabakasının spinleri ile aynı yönelimde bulunur. Bu durumda FM spinleri ile AFM yüzey spinleri uygulanan manyetik alanla aynı yönelimi alırken, AFM tabakasının geri kalan spinleri ardışık olarak birbirlerine ters yönelimde oldukları için tabakanın kendi içerisindeki net manyetizasyonu sıfırdır.

- b) Manyetik alan negatif bölgeye geçtiğinde FM spinleri bu yönde yani ters yöne dönme eğilimine girerler. Ancak bu eğilimleri AFM tabakasının tek yönlülüğünün gücüne göre engellenir. Yeterli tek yönlülüğe sahip AFM spinleri FM spinlerinin bu yönelim değişikliğine izin vermezken, göreceli düşük tek yönlülüğe sahip spinler ilk manyetizasyonlarını kaybeder. Bu sebeple Şekil 2.7’de ideal durumda verilen FM histerezis eğrisi köşeli iken, deneysel FM histerezislerinde özellikle çok kristalli örneklerde her zaman köşelerde kıvrımlar görülür. Buna rağmen çoğunlukta bulunan yeterli tek yönlülüğe sahip AFM spinleri FM spinlerinin dönmeleri için mikroskobik tork ile zorladığı için bu zorlayıcı alan yönünde FM spinleri tek yönlü düzene (*unidirectional anisotropy*) sahip olurlar.
- c) Negatif yönde uygulanan manyetik alanın şiddeti yeteri kadar büyük olduğu zaman, FM spinlerinin hepsi AFM spinlerinin tek yönlülüğüne karşı gelip alan yönünde manyetize olurlar.
- d) Manyetik alan histerezis eğrisinin başındaki yöne (pozitif) doğru ilerlerken, bu kez FM spinleri AFM spinlerinin de verdiği tork etkisi ile normal bir ferromanyetik malzemeye göre daha düşük alanlarda aynı yönde düzene girerler. Bu manyetik alan farkı EB etkisi olarak tanımlanır.

2.2.2. Dengeli ve dengesiz spin yapıları

Yukarıda bahsedilen EB mekanizmasının etki gösterebilmesi için AFM tabakasının FM ara yüzeyindeki spin durumu önemlidir. AFM spinleri için dengeli (*compensated*) ve dengesiz (*uncompensated*) olmak üzere iki tip temel durum söz konusudur. Bu durumlar Şekil 2.8’de gösterildiği gibi dengeli durumda AFM tabakasının yüzeyinin net manyetizasyonu sıfırken, dengesiz durumda spinler tek bir yöne doğru manyetize olduğu için yüzeyin net manyetizasyonu sıfırdan farklıdır.



Şekil 2.8. AFM tabakasının FM ara yüzeyinde gözlenen a) dengeli ve b) dengesiz spin yapıları

EB etkisinin çıkış noktası dengesiz (uncompensated) durumda bulunan AFM tabakasının yüzey spinleri ile FM spinlerinin manyetik çiftleşmesidir [14,15]. Meiklejohn ve Bean de [13] tamamiyle dengesiz spin durumuna sahip bir AFM/FM ara yüzeyinin EB etkisi göstereceği yaklaşımında bulunmuşlardır. AFM tabakasındaki spinlerin yönelimlerinin değişmesi ısıl aktif olaylardır. Oda sıcaklığı veya AFM T_N altındaki sıcaklıklarda ve düşük alanlardaki ölçümlerde bu spinlerden sadece bazıları sabitlenir. Sabitlenen bu spinler ile FM tabakadaki spinler arasında oluşan etkileşim EB etkisinin temelini oluşturur. Ara yüzeydeki dengesiz spinlerin çoğunluklu bölümü ise EB etkisine katkıda bulunmazlar, çünkü sabitlenmiş durumda değildirler. Bu spinler FM tabakanın ters manyetizasyon durumunda FM spinleri ile birlikte sürüklenirler ve H_{ex} yerine H_c 'ye katkıda bulunurlar [16]. Buna ek olarak H_c 'deki artış, FM tabakası ile etkileşimde bulunan AFM yüzeyindeki bölgesel spinlerin FM tabakasının ters manyetizasyonu ile kararlı bir şekilde spin durumunu koruyamamasından kaynaklanır. Bu durumda bu spinler eş yönlü tek yönlülük (*unidirectional anisotropy*) yerine eş eksenli tek yönlülüğe (*uniaxial anisotropy*) katkıda bulunurlar [17].

Dengeli ve dengesiz spin dağılımlarının ara yüzey özellikleri ile ilişkili olabileceği ve histerezis döngüsündeki kaymanın ara yüzey değişimlerinden (pürüzlülük, kimyasal kompozisyon, vb. gibi) kaynaklanabileceği tartışılmaktadır [15,18-24].

2.2.3. Değiş tokuş etkisini etkileyen faktörler

Değiş tokuş etkisi üzerine yapılan detaylı çalışmalar sonrasında bu etkinin geliştirilmesi için tabaka sistemi içerisinde hangi fiziksel özelliklerin rol oynadığı tam olarak açığa çıkarılamasa da büyük ölçüde keşfedilmiştir. Bu faktörler aşağıda açıklandı.

EB etkisinde H_{ex} alanının tabakaların kristallik oranına, FeMn veya IrMn tabakaları için özellikle $L1_2$ fazını sağlayan $\langle 111 \rangle$ yönelimine bağlı olduğunu belirten çalışmaların [13,17,18,25-29] yanı sıra, diğer çalışmalar H_{ex} 'in AFM tabakanın $\langle 111 \rangle$ kristal yönelimi derecesine bağlı olmadığını [30], H_{ex} 'in (111) yönelimi derecesi arttıkça düştüğünü [31], bu ilişkinin tane boyutu [13,26,30,32], taneciklerin hacimsel dağılımı, gelişi güzel düzlem içi kristallografik yönelimi [13,33], ara yüzey pürüzlülüğü [13,26] veya manyetik etkilerden [33,34] dolayı oluştuğu gözlenmiştir. Literatürde AFM tane boyutunun kristal yönelimi ile önem karşılaştırılması sonucu kristal yönelimin EB etkisini arttırmada daha etkin olduğu [17] iddia edilmiştir. Yani EB sistemlerine yapısal yaklaşımlarda bir belirsizlik söz konusudur. Bu belirsizliğin nedeni ince film EB sistemlerinin deney tasarımlarında, bir fiziksel özellik kontrollü olarak değiştirilirken diğer tüm özelliklerin sabit tutulmasının çok zor olmasıdır.

Bunların yanı sıra, sıçratma tekniği nedeniyle çoklu kristal yapıya sahip AFM tabakası içerisinde ikiz tane sınırlarının (*twinning*) oluşması, tabakadaki düzlem içi (*in plane*) net manyetizasyonu değiştirmemektedir. Ancak bu tane sınırları, düzlem dışı (*out of plane*) simetrisinde manyetik bozulmalara (*frustration*) neden olacağı için H_{ex} 'i etkileyebilmektedir [35]. Bir başka manyetik bozulma kaynağı da tane sınırlarının olduğu bölgelerdir. Taneler arası yapısal geçiş gösteren bu bölgelerin keskinliğine göre bu taneler arası oluşabilecek manyetik etkilenmeler de beklenebilir [33].

Tane boyutu ile ilgili olarak, küçük AFM tane boyutunda çoğu AFM tanesi süper paramanyetik etkiye sahiptir. Bu durumda $H_{ex} = 0$ 'dır ve H_c iyileştirilmesi yoktur. AFM kalınlığı EB etkisi için kritik değere (IrMn'de AFM özellik için 7,5 nm ve üstü [36]) yaklaşırken, çoğu AFM tanesi ısı olarak kararlıdır, yani bütün taneler FM'nin manyetizasyonu sırasındaki spin hareketine göre dönebilir. Bu dönebilen AFM taneleri eş eksenli tek yönlülüğe (*uniaxial anisotropy*) katkıda

bulunarak yukarıda da bahsedildiği gibi H_c yi arttırır. AFM tabaka kalınlığı kritik değerin biraz üstüne çıktığında bir kısım AFM tanesi dönmemeye başlar [37]. Bu durumda H_{ex} 0'dan farklı olur. Daha fazla dönebilen AFM tanesi ile H_c artmaya devam eder. Bu durumda eğer AFM tane boyutu artarsa, daha fazla dönebilen AFM tanesi dönemeyen durumuna geçer, H_{ex} artar ancak H_c düşer. Bu dönen ve dönmeyen AFM tanelerinin bazılarının ise, FM tabakasının manyetizasyonundan gelen manyetik etkiye göre denge durumundan denge olmayan duruma geçiş gösterebildikleri önerilmiştir [37]. Takano ve ark. [38] NiFe/CoO ikili tabakalarında H_{ex} 'in AFM tabakasının tane boyutunun artması ile azaldığını rapor etmiştir. Ancak O'Grady ve ark. [39] IrMn AFM malzemesinin 12 nm kalınlığında üretildiğinde H_{ex} 'in 6 nm tane boyutuna kadar yükselip maksimum yaptığı, daha geniş tane boyutlarında düştüğünü gözlemlemiştir.

AFM/FM ara yüzeyindeki pürüzlülük derecesi de EB etkisini direkt olarak etkiler [2,13,26,37,39,40-42]. Dengesiz spin düzenine sahip bir AFM yüzeyinde artan pürüzlülük ile yüzeyde FM tabakanın sabitlenmesini sağlayan AFM spinlerinin sayıları, oluşan farklı spin yönelim bölgeleri nedeniyle azalır. Bu sebeple pürüzlülük AFM domain yapısını ve sonuç olarak H_{ex} alanını etkiler [2]. Tek yönlülük etkilerinin ara yüzey özelliklerine etkisinin yanı sıra [40], en uygun AFM kalınlığının ve tane boyutunun H_{ex} 'i nasıl değiştirdiği halen araştırmaya açık sorulardır [39]. Ancak bazı çalışmalar [37,39] sonucunda, ara yüzey yapısına bağlı olarak, H_{ex} 'in t_{FM} ile ters orantılı olduğu, H_c 'nin ise t_{FM} arttıkça azaldığı gözlenmiştir. EB etkisinin uygulamadaki diğer bir değişkeni de H_{ex} alanının AFM tabaka kalınlığına göre (t_{AFM}) değişkenliğidir. Genel kanı olarak bu iki değer arasındaki ilişki $H_{ex} \propto 1/t_{AFM}^\lambda$ olarak gösterilmektedir. λ değerinin 0,3 [41] ile 1 [42] arasında değiştiği bildirilmiştir. Yapılan çalışmalarda H_{ex} 'in t_{AFM} ile birlikte arttığı düşük kalınlıktaki filmler için gözlenmiştir. Bunun nedeni ise kritik kalınlıkta AFM içerisinde manyetik domainlerin oluşması olarak açıklanmıştır [39]. Yukarıda verilen ilişki geniş tane boyutlarında da gözlenmiştir. Fakat deneysel bulguları kesin olarak destekleyen teorik bir model mevcut değildir. Bu yüzden film kalınlığı ve tane boyutunun H_{ex} değerinin üzerine etkisi halen açıklanamamıştır [39].

Öte yandan AFM tabakasının yapısal özelliklerinin ince film çekirdeklenme ve tampon tabakalarına bağlı olduğu literatürde [4] bilinmektedir.

IrMn için yapılan güncel çalışmalarda, $\langle 111 \rangle$ yöneliminin H_{ex} alanını arttırmaya yönelik etkili bir büyüme yönü olduğu, ayrıca AFM tabakanın ısı kararlılığını da arttırdığı açığa çıkarılmıştır [17]. Buna ek olarak IrMn'nin (111) düzlemindeki spin yoğunluğunun da diğer düzlemlerine göre en yüksek değerde olduğu bilinmektedir [43]. IrMn $\langle 111 \rangle$ yönelimini sağlamak için AFM tabakasından önce büyütülecek alt tabaka seçimi önem arz etmektedir. Tsunoda ve ark. [45] Ru alt tabakasının hegzagonal c eksenine (fiber yönünde) büyüdüğünü ve bunun IrMn AFM tabakasının (111) tercihli yönelimde büyümesine sebep olduğunu rapor etmiştir. Ru'nun diğer bir etkisi ise erime noktası yüksek olduğu için IrMn ile alt tabakalar arası oluşabilecek difüzyonu engellemesidir.

EB sistemleri ile ilgili bir diğer önemli fenomen de bu sistemlerinin ardı arkasına pek çok kez ölçüm yapılması sonucu EB etkisinin (H_{ex} değerinin) değişmesidir. Sistemin ilk ölçümde gösterdiği H_{ex} alanı ile son ölçümde gösterdiği H_{ex} alanı arasındaki fark “manyetik yorulma” (*training*) etkisi ile açıklanır. EB sistemi içinde hiç dönmeyen AFM taneleri olmaksızın $H_{ex} = 0$ dır ve *training* etkisi yoktur. Manyetik yorulma etkisinin sıçratma tekniği ile de üretilen çok kristalli AFM yapılarına sahip EB sistemlerinde yoğun şekilde gözlenirken, tek kristal AFM yapılarında gözlenmez [2]. Bu etkinin temeli AFM domainlerinin FM spin dönmesi ile bölgesel olarak dönmesinden kaynaklanır. AFM spinleri her FM spin dönüşünde enerjik olarak en kararlı durumda düzen alırlar.

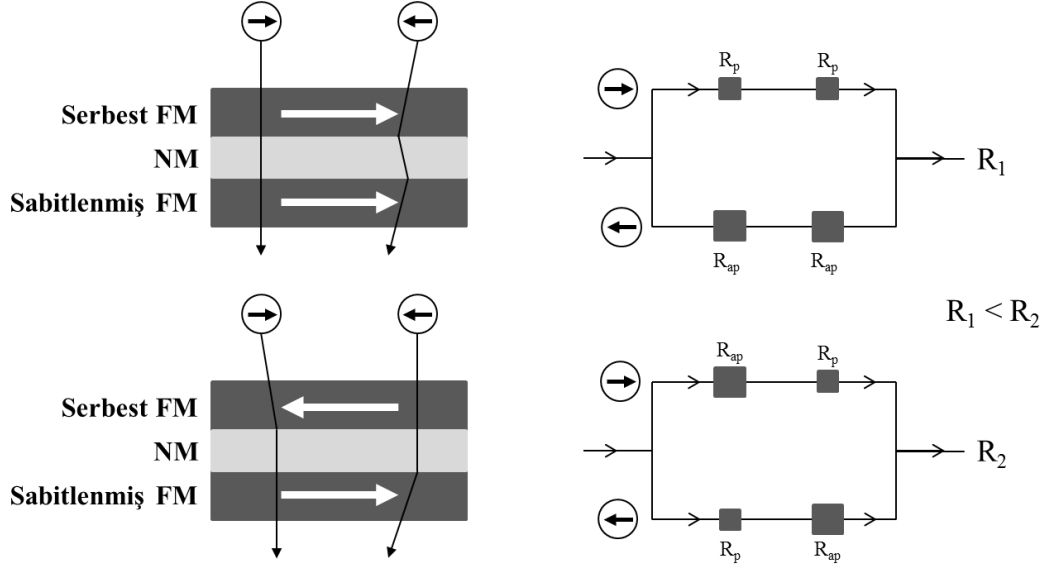
Manyetik yorulma etkisi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların sonucunda AFM kritik kalınlık değerleri elde edilmiştir. Genel görüş, yaklaşık 6 nm'den daha kalın AFM tabakası içeren EB sistemlerinde manyetik yorulma etkisinin bastırıldığıdır [33,37]. Bunun yanı sıra, manyetik yorulma etkisinin AFM tane boyutu arttıkça zayıfladığı tespit edilmiştir [45].

2.3. Uygulama Alanları

MR etkisi, elektronun spinine bağılı taşınması sonucu içerisinde geçtiği malzemenin spin durumuna göre elektriksel direncinin değişmesidir. Bu etki günümüzde manyetik kayıt teknolojisinde HDD okuma kafası olarak çalışan spin vanalarında yaygın şekilde kullanılır. Spin vanası kendi içerisinde FM, AFM ve NM metalik (TMR için metal oksit NM tabaka da içerir) ince film tabakaları bulduran çok tabakalı bir algılayıcıdır [46,47]. GMR etkisi gösteren ilk spin vanası sistemi ise IBM tarafından geliştirilmiştir [48]. GMR tipi spin vanası sisteminde iki FM metalik tabaka bir iletken tabaka ile ayrılırken, TMR tipi spin vanasında bu ayırıcı tabaka yalıtıcıdır. İki FM tabakadan birisi bir AFM tabaka ile temas halindedir ve “sabitlenmiş” FM tabaka olarak anılır. Diğer FM tabaka ise “serbest” tabaka olarak adlandırılır, çünkü sabitlenmiş tabaka manyetik alanlardan etkilenmezken serbest tabaka etkilenir. Eğer bu iki FM tabakanın manyetik yönelimleri aynı yönde (paralel) ise iletilen elektron, tabakaların anti paralel yönelimleri durumuna göre daha serbest yani daha düşük dirençle geçer [45,46]. MR etkisi ise paralel durumdaki direnç ile anti paralel durumdaki direnç farkının yüzde olarak hesaplanması ile elde edilir. Paralel ve anti paralel durumu belirleyen sabitlenmiş FM tabakanın manyetizasyon yönünü belirleyen komşu AFM tabaka ile arasındaki manyetik etkileşim de EB etkisidir [13]. Sabitlenmiş tabakanın sabit olan manyetizasyon yönü spin vanalarında referans manyetizasyon yönü olarak belirlenir. Diğer tarafta bulunan serbest FM tabaka ise dışarıdan uygulanan manyetik alana veya spin polarize akımına göre sabitlenmiş FM tabaka ile paralel veya antiparalel duruma getirilir. Bu sebeple değiş tokuş etkisi GMR veya TMR spin vanaları için temel bir öneme sahiptir.

Manyetodirenç etkisi, HDD üzerindeki tek yönlü manyetik bölgenin (Şekil 2.9) manyetizasyonunun okuyucu kafa algılayıcısında bulunan serbest manyetizasyona sahip FM tabakanın manyetizasyonuna etki etmesi ve onu kendi yönüne döndürmesi ile başlar. Serbest FM tabakanın manyetizasyon yönü algılayıcı içerisinde bulunan sabitlenmiş FM tabakanın yönü ile paralel ya da anti paralel durumuna göre algılayıcı içinden geçen akımın elektronları spinlerine bağılı taşınır ve algılayıcının direnç değerini paralel durumda düşük, anti paralel durumda yüksek gösterir. Elektronun spin vanasında spinine bağılı taşınımı ve

elektriksel direnç modeli Şekil 2.9’da gösterildi. Bilgilerin okunmasında düşük direnç “0”, yüksek direnç “1” şeklinde kodlanır.



Şekil 2.9. Spin vanası sisteminde spine bağlı elektron taşınımı ve direnç modeli

CPP uygulanan spin vanası sistemlerinde Şekil 2.9’da gösterilen tabakalar birbirlerine elektriksel olarak seri şekilde bağlanmış olurlar. Üst kısımda gösterilen direnç modelinde paralel spin eşleşmesi gösteren elektrik akımı en düşük direnç gösteren taraftan kısa devre yapar. Aşağıdaki direnç yapısında ise akımın her iki spin durumunda da direnç avantajı sağlayacağı bir yol yoktur. Bu nedenle R_2 , R_1 ’e göre yüksek direnç değeri verir. Bu direnç durumuna göre MR etkisi yüzde olarak (2.2) ile hesaplanır.

$$MR (\%) = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}} \times 100 \quad (2.2)$$

3. DENEYSEL METODLAR

Bu tez çalışmasında FM ve AFM tabakaları arasındaki EB etkisi incelendi. Yukarıda bahsedilen birçok teorik ve deneysel çalışmanın sonucunda EB etkisinin tabakaların yapısal durumları ile arasında olan ilişkisi halen tartışılmaktadır. EB etkisi bu yönden karmaşık olup FM/AFM tabaka arası ara yüzey etkileri çok az bilinmektedir. Bu tez çalışmasında, uygulamada kullanılmaya yönelik değişik tokuş sistemlerinin daha yüksek performans göstermesi için yapısal anlamda ne gibi geliştirmeler yapılabileceği incelendi.

3.1. Çalışmanın Amacı

EB sistemlerinin uygulamalarda üstün performans gösterebilmesi için AFM/FM arası değişik tokuş alanının yüksek (dolayısıyla yüksek J_k (0,01-0,19 erg/cm² arasında [2])) ve zorlayıcı alanın da uygun bir değerde olması gerekmektedir. Zorlayıcı alanın yüksek olması uygulamada kullanılan sensörün ısınmasına ve kararlılığını kaybetmesine yol açacaktır. Bu nedenle H_c alanının H_{ex} 'in yaklaşık 4 ya da 5'te biri olması önemlidir [1]. Bunların yanı sıra uygulamalarda kullanılan EB sistemlerinin çok kristalli ince film çoklu tabakalarından oluştuğu da göz önüne alındığında bu sistemlerin sıcaklığa bağlı yapısal ve manyetik bozulmalardan etkileneceği de açıktır [16]. Bu sebeple EB sistemini oluşturan AFM ve FM tabakalarının yüksek sıcaklıklarda yapısal özelliklerini korumaları gerekir. EB etkisini kontrol eden önemli değişkenler; ara yüzey etkileri [6-8,18-23,40,49], yapısal özellikler (AFM tane boyutu, fazı, yönelimi ve ara yüzey pürüzlülüğü) [13,17,26,39,43,49], AFM kalınlığı [17,28,39] ve AFM malzemesinin kimyasal bileşik oranı [38,41,42] çeşitli çalışma grupları tarafından araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda EB etkisini büyük ölçüde etkileyen fenomenler AFM/FM ara yüzeyinde bulunmuştur [39], ancak tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır.

Bu çalışmanın kapsamı, EB etkisi gösteren ve magnetron sıçratma tekniği ile üretilmiş nano ölçekli IrMn/CoFe EB sistemlerinin EB alanının yapısal faktörlerle ilişkisi üzerinedir. Bu durumda, AFM özelliğe sahip IrMn tabakasının FM özelliğine sahip CoFe tabakasını kendi manyetizasyon yönüne etkili bir

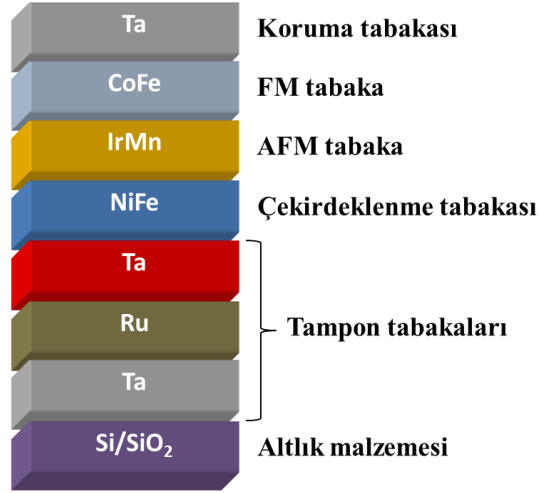
şekilde döndürmesi için AFM tabakanın tane boyutu, kristal yapı yönelimi ve ara yüzey pürüzlülüğünün araştırılması gerekir. Bahsedilen bu özellikler yapı ile ilişkili olduğundan dolayı, AFM tabakasının yapısal özelliklerine çekirdeklenme tabakasının etkisi bilinmelidir. Çekirdeklenme tabakası, IrMn AFM tabakasını istenen manyetik özelliklerin ön plana çıktığı <111> yöneliminde büyütülmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı ise çok kristalli (polikristal) çoklu tabakaların yapısal durumu ile EB etkisi arasında nasıl bir ilişki olduğunu açığa çıkarmaktır. Bu amaca yönelik olarak ince film sistemindeki NiFe çekirdeklenme tabakasıyla ilgili yapılan üretim değişkeni değişimleriyle bunun IrMn AFM tabakasına etkisi yapısal ve manyetik anlamda tartışılmıştır. Bu tez çalışmasından önce, benzer bir istife sahip IrMn/CoFe temelli EB sistemleriyle ilgili yapılan çalışmada [4] tampon ve çekirdeklenme tabakalarının kalınlıkları değiştirilerek tane büyüme etkisi çalışılmıştır. Bu çalışmada ise sabit kalınlıkta sadece çekirdeklenme tabakasının büyütülmesinde PDC frekansının değiştirilmesiyle tane boyutunda değişim elde edilmesi ve tane boyutu değişiminin ara yüzey yapısına etkisinin incelenerek yapısal-manyetik özellik ilişkisinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise Ru tabakasının kaplanması sırasında PDC tipi uygulanan voltajın ters voltaj süresi (*reverse time*) değiştirilerek bütün ince film sistemi içerisindeki ara yüzey pürüzlülüklerinin nasıl bir değişim göstereceğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları yapısal anlamda, özellikle Ru/Ta, NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzeylerinin pürüzlülük değerleriyle incelenmiştir.

3.2. Tabaka ve Tabaka Kalınlığı Seçimi

Bu tez çalışmasında üretilmesi için seçilen çoklu tabaka sistemi Si/SiO₂ (400nm) altlık üzerine aşağıdan yukarıya Ta(5nm)/Ru(25nm)/Ta(5nm)/NiFe(6nm)/IrMn(10nm)/CoFe(2nm)/Ta(5nm) dizilimi ile Şekil 3.1’de gösterildiği gibidir. Tabaka ve kalınlık seçimi için bilgiler aşağıda verildi.



Şekil 3.1. Üretimi yapılmış EB sistemlerinin tabakalı yapısı

EB sistemleri, AFM tabakanın bulunduğu yere göre iki gruba ayrılır. Eğer AFM tabaka FM tabakanın altında ise bu sistem alt EB sistemi (*bottom type*), AFM tabakası FM tabakanın üstünde bulunuyorsa bu sistem üst EB sistemi (*top type*) olarak tanımlanır. Alt ve üst EB sistemlerinin birbirlerine göre farkları vardır. Spin vanası ve EB sistemlerinde, alt düzene sahip sistemlerin, üst düzene sahip sistemlere göre manyetik alan tavlamasından sonra daha yüksek EB alanı gösterdiği bulunmuştur [17,25,26]. Alt ve üst düzene sahip EB sistemleri arasındaki H_{ex} farkının, IrMn'nin $\langle 111 \rangle$ film yöneliminden kaynaklandığı iddia edilmiştir [17,25-27]. Ancak bu durumun her EB sistemi için geçerli olup olmadığı tartışılmaktadır [16]. Bu sonuca göre, IrMn $\langle 111 \rangle$ yöneliminin dışında tane boyutu, ara yüzey pürüzlülüğü ve IrMn tabakası ve IrMn/CoFe ara yüzey bölgesindeki kusurlar da H_{ex} 'i etkilemektedir [16]. Yapısal dayanıklılık olarak alt EB sistemlerinin üst EB sistemlerine göre IrMn'den diğer tabakalara doğru daha az Mn difüzyonu gösterdiği tespit edilmiştir [50]. IrMn AFM tabakasının kalınlığının 10nm olarak seçilmesinin nedeni ise bu kalınlıktaki EB sisteminde H_{ex} alanının doyuma ulaşmasıdır [39].

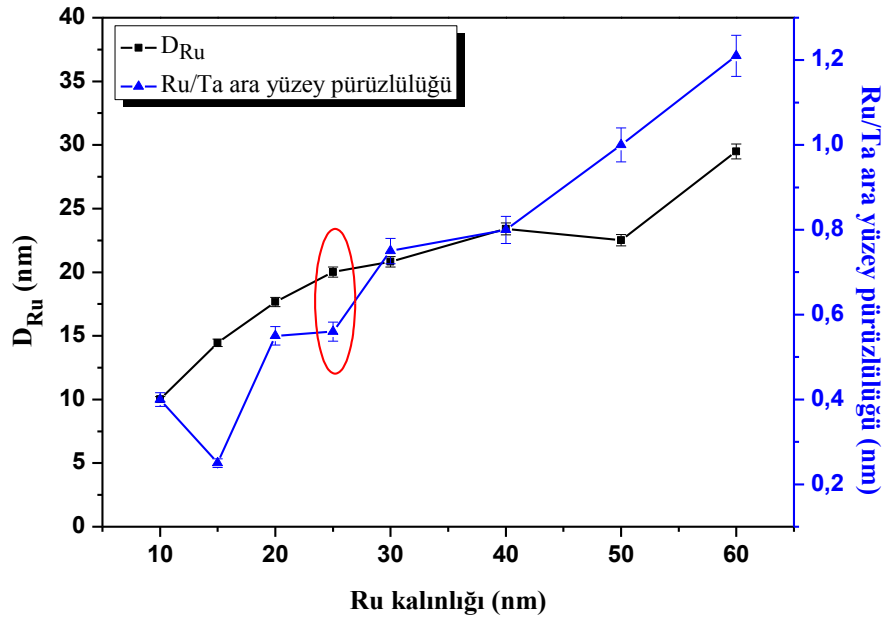
Tampon tabaka olarak kullanılan Ta/Ru/Ta üçlü tabaka grubu öncelikle tane boyutuna etkisi, daha sonra EB tabakalarının difüzyon nedeniyle altlıkla birleşmesini engellemek için kullanıldı. Ta tabakasının başka bir önemi EB sisteminin manyetik özelliğini kaybettiği T_B sıcaklığını yükseltmesidir [17]. Bu grubun içerisinde en alttaki Ta tabakası amorf yapıdaki SiO₂ altlık tabakasının

üzerine büyüdüğü için kendisi de amorf yapıya dönüşür [51]. Ta tabakasının Ru tabakasına bir alt tabaka olacak şekilde büyütüldüğü de gözlenmiştir [36]. Ancak EB sistemleri için kristal yapı ve yönelimler yüksek önem taşıdığı için Ru tabakası hem kristal bir yapı oluşturmak hem de başlangıç tane boyutunu arttırmak için büyütülmüştür. Ru tabakası aynı zamanda kolonsal büyüme [36] için de kullanılır. Ru üzerine büyütülen ikinci Ta tabakası ise Ru'nun kristal yapıda olmasından dolayı kristal yapıda büyür. Ta tabakasının ayrıca NiFe ve IrMn tabakasının kristal yönelim kalitesini artırma etkisi de bulunduğundan [52], ikinci Ta tabakası manyetizasyon performansı için önemlidir. Kristal yapı hakkında daha fazla bilgi "Deneysel Sonuçlar" kısmında anlatıldı.

Bu tez çalışmasında üretilecek EB sistemlerinde bulunan Ru tabakasının kalınlığı, Mustafa Yıldırım'ın doktora tez çalışmasında büyüttüğü Ta/Ru/Ta/CoFeB/Ta düzenindeki filmlerden elde edilen Ru/Ta ara yüzey pürüzlülüğü (XRR tekniği ile) ve ortalama düzleme dik tane boyutu (*Scherrer* eşitliği ile) sonuçlarına göre seçildi. Bahsedilen bu değerler Çizelge 3.1 ve Şekil 3.2'de verildi.

Çizelge 3.1. Ru kalınlığı değişimine bağlı olarak Ta ve Ru tabakalarının ara yüzey pürüzlülük değerleri

Ru kalınlığı (nm)	Ta/Ru/Ta ara yüzey pürüzlülükleri (nm)		
	Ta/Ru	Ru/Ta	Ta/NiFe
10	0,25	0,40	0,37
15	0,20	0,25	0,38
20	0,38	0,55	0,56
25	0,26	0,56	0,58
30	0,30	0,75	0,65
40	0,30	0,80	0,76
50	0,30	1,00	0,9
60	0,71	1,21	1,12



Şekil 3.2. Ru kalınlığına bağlı Ru tane boyutu ve Ru/Ta ara yüzey pürüzlülüğünün değişimi

Şekil 3.2’de verilen Ru kalınlık ve Ru/Ta ara yüzey pürüzlülük değerlerine bağlı olarak 25nm Ru kalınlığında en uygun tane boyutu – pürüzlülük eşleşmesi gözlemlendiği için bu kalınlık direkt olarak EB sistemlerine entegre edildi.

Bu tez çalışmasının amacına ulaşması için başlangıç olan çekirdeklenme tabakası $Ni_{81}Fe_{19}$ olarak seçildi. NiFe malzemesi bu kompozisyonda permalloy, yani mıknatıs geçirgenliği (*magnetic permeability*) yüksek bir alaşım oluşturur. NiFe malzemesinin alt düzene sahip EB sisteminde çekirdeklenme tabakası olarak kullanılmasının nedeni, IrMn AFM tabakasında $\langle 111 \rangle$ yöneliminin oluşmasını sağlamaktır [4,17]. Ayrıca NiFe düşük eş eksenli tek yönlülük gösterir. İdeal bir yumuşak magnettir ve CoFe’de olduğu gibi manyetik tek yönlülük dağılımı yoktur [53]. NiFe’nin kalınlığı ile ilgili olarak; daha ince permalloy filmler, uygulamalarda fonksiyon alanlarını düşürmesi ve devredeki akımın yazma ve okumada kullanılan biti (*byte*) bulması açısından önemlidir [54]. Öksüzoğlu ve ark. [4] yaptığı, alt düzene sahip IrMn/CoFe EB sistemlerinde değişen çekirdeklenme tabakası ($Ni_{81}Fe_{19}$) kalınlığı ile ilgili çalışmalar doğrultusunda, 6 nm kalınlıktaki NiFe’nin XRD deseninde (111) kırınım doruğu göstermeye başladığı gözlemlenmiş ve yine bu kalınlığın IrMn ve CoFe’nin kübik yapısının oluşması için gerekli olduğu vurgulanmıştır. Bunun yanı sıra, aynı çalışmada [4]

6nm NiFe'nin IrMn L₁₂ fazının kristal örgü değişkenlerini sağlarken, manyetizasyon ölçümlerinde de en iyi EB etkilerinden birini gösterdiği bulunmuştur.

IrMn malzemesi literatürde [4,16,17,33,39,40,49] sıkça kullanılan bir malzemedir. AFM tabaka olarak kullanılan IrMn tabakasının kristal özellikleri ve büyüme yönü değiş tokuş etkisini önemli ölçüde belirleyen bir faktördür. IrMn <111> yönü AFM/FM ara yüzeyine paralel büyür ve bu düzlem en yüksek paketlenme oranına sahip olduğu için en yüksek ara yüzey spin yoğunluğu ve en yüksek tek yönlülük katsayısını bulundurur [49]. IrMn fazları arasından IrMn₃ L₁₂ fazı <111> yönünde büyür ve EB etkisinin artmasına büyük katkı sağlamaktadır. IrMn kaba durumda 690 K T_N'ye sahiptir ve IrMn₃ bileşiğindeki L₁₂ fazında (111) düzlemi üzerinde spinleri dizilmiştir [36,54]. Konvansiyonel EB malzemelerinden Fe₅₀Mn₅₀ ve NiO'nun T_B'leri sırasıyla 420K ve 470K'dir [17]. Bu malzemeler yüksek sıcaklık uygulamaları için yetersizdir. Örneğin TMR etkisi gösteren spin vanası uygulamalarında aygıt çalışma sıcaklığı 400°C civarına kadar çıkmaktadır [55]. Ancak yaklaşık %20 atomik Ir'ye sahip Ir_xMn_y malzemesi 470K üstü uygulamalar için uygun T_B'ye (400-520K [2]) sahiptir ve daha yüksek EB etkisi gösterir [17,31]. Ir_xMn_y'nin kalınlığı ile AFM özelliği değişebilmektedir. IrMn 3 nm kalınlığında süper paramanyetik, 7,5 nm'den daha kalın büyütüldükten sonra AFM davrandığı gözlenmiştir [36,52]. Ayrıca L₁₂ fazındaki IrMn₃ bileşiğinin Co₇₀Fe₃₀ tabakasının difüzyonunu engellediği iddia edilmiştir [44]. Bu çalışmada kullanılan IrMn tabakası 10 nm sabit kalınlıkta seçilmiştir. Bu kalınlıktaki IrMn tabakası sabit bir değiş tokuş tek yönlülüğüne (*exchange anisotropy*) sahipken en yüksek EB etkisini gösterdiği [4,51,56,57] bildirilmiştir.

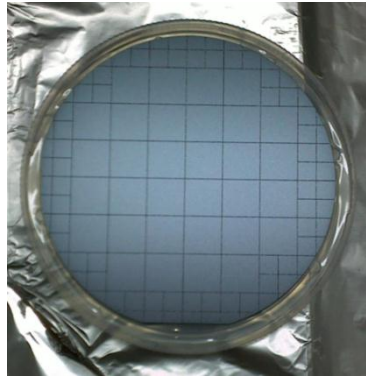
FM tabakası olarak CoFe tabakası sert magnet özelliği gösterir. Yani histerezis eğrisi geniş, H_c alanı yüksektir. IrMn tabakasının EB etkisini CoFe tabakası üzerinde tam olarak gösterebilmesi ve CoFe FM tabakasının kalınlığı ile H_{ex} alanı arasında ters bir orantı olduğu bilindiği [2] için CoFe yeterince ince bir kalınlıkta (2 nm) büyütüldü. Bu kalınlıkta CoFe tabakasının birkaç tek tabakanın bir araya gelmesiyle oluşması ve EB etkisi göstermesi, bu çalışmanın başarısını kanıtlamıştır.

Tez çalışmasının ikinci numune serisinde (PDC ters voltaj süresi) yukarıda bahsedilen tabakalar Ru dışında aynı kalınlıkta kaplanmıştır. Ru'nun kalınlığı ise 25nm yerine 10nm'ye düşürülmüştür. Bunun nedeni Ru'nun bu kalınlıkta düşük ara yüzey pürüzlülüğü göstermesi (Şekil 3.2) ve XRD ölçümlerinde göstereceği Ru(0002) doruğunun şiddetinin azalmasından dolayı diğer tabakalara ait dorukların daha kolay bir şekilde gözlenebilmesidir.

Bu çalışmada, öncelikle altlıkların kesimi ve temizliği işlemleri uygulandı. Numunelerin üretimi için magnetron sıçratma tekniği, yapı analizleri için Bruker AXS D8 Advance X-Işını cihazı, elektriksel karakterizasyonlar için dört nokta ölçüm düzeneği (Lucas Lab Pro-4), manyetik karakterizasyonlar için Quantum Design Model 600 PPMS (VSM seçeneği) magnetometre sistemi kullanıldı. Bu sistemlerin kullanım amaçları ve çalışma prensipleri aşağıda açıklandı.

3.3. Numune Hazırlama İşlemleri

İnce film sistemlerinin üzerine büyütüldüğü altlık tabakası nano seviyede büyütülecek filmler için yüksek önem taşır. Özellikle, bu çalışmada da olduğu gibi, elektro-manyetik uygulamalarda kullanılacak ince film sistemlerine taban oluşturacak altlıkların elektriksel ve ısı olarak yalıtkan, yüzey pürüzlülüğünün düşük ve araştırma faaliyetleri için de maliyetinin uygun olması gerekir. Üretim öncesi altlıkların temiz olması ise aşırı önem taşır. Çünkü uygulama esnasında altlıkların üzerinde bulunabilecek mikro düzeydeki kirlilikler (toz parçacıkları, organik kirler, yağlar vs.) bile ince filmlerin çekirdeklenme sürecinin bozulmasına ve sonuç olarak aşırı pürüzlü büyümesine neden olur.

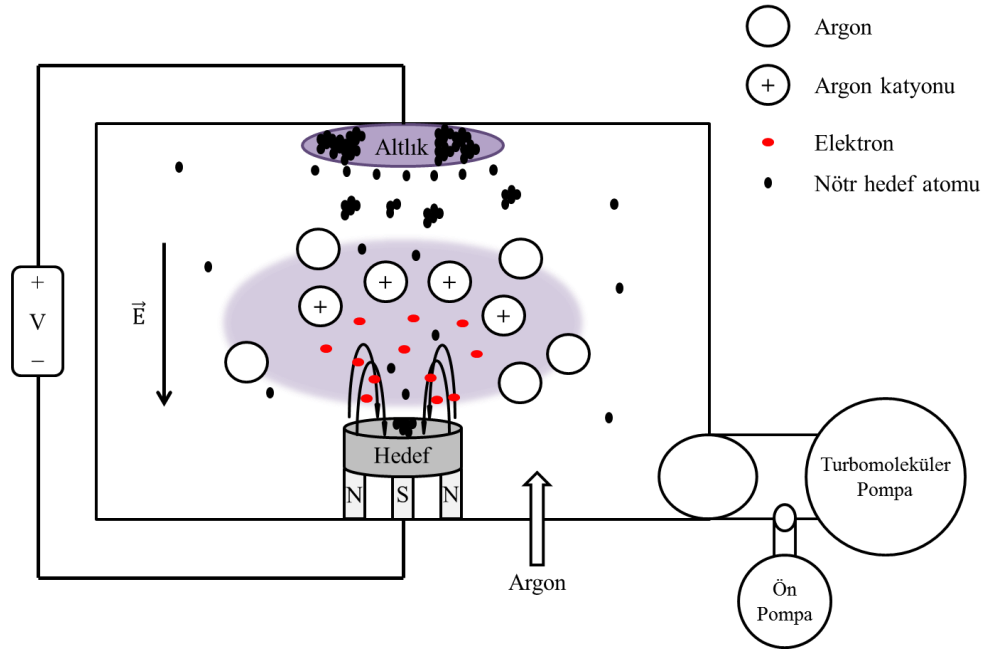


Şekil 3.3. 5x5 mm ve 10x10 mm boyutlarında kesilmiş 3 inç çapındaki (76 mm) Si/SiO₂ altlık

Bu çalışmada kullanılan atlıklar n^- tipi Si(100) üzerine termal oksit ile kaplanmış 400nm kalınlığında SiO_2 'den (Şekil 3.3) oluşmaktadır. Bu tip bir altlığın seçilmesinin nedeni, oksit tabakanın elektriksel ve ısı yalıtkan olması ve amorf bir yapıya sahip olduğundan ötürü pürüzlülüğünün düşük olmasıdır. Atlıklar 3 inç olarak alındı ve ardından maliyetleri düşürmek amacıyla kesici testere kullanılarak (*dicing saw*) 10x10mm ve 5x5mm boyutlarına bölündü. Böylece bir 3 inç altlık kullanmak yerine bunun yaklaşık 1/8'i kadarıyla bir numune serisi çıkarılabilmektedir. Yukarıda bahsedilen altlıkların temizliğinin öneminden ötürü belirli bir temizlik yöntemi oluşturuldu. Bu yöntemde göre altlıklar sırasıyla aseton, propanol ve saf su ile banyo edilip %99,995 saflıktaki azot gazı ile kurutuldu. Temizliği tamamlanan altlıklar numune tutucularına yerleştirilip üretim sisteminin yükleme odacığına yüklendi. Üretimi tamamlanan 10x10mm boyutundaki numuneler X-Işınları ve elektriksel direnç deneyleri için, 5x5mm boyutundaki numuneler ise manyetizasyon deneyleri için kullanıldı.

3.4. Magnetron Sıçratma Sistemi

Sıçratma işlemi (*sputtering*) bir PVD yöntemi olup ince filmlerin büyütülmesi için endüstride de yaygın kullanılan bir üretim tekniğidir. Bu teknikte plazma kullanılarak kaplanmak istenen malzemenin (hedef) atomları fiziksel yollarla koparılıp bir altlık üzerine biriktirilir. Şekil 3.4'te gösterilen magnetron sıçratma sistemi bu çalışma kapsamındaki çok tabakalı ince film numunelerinin üretimi için kullanıldı.



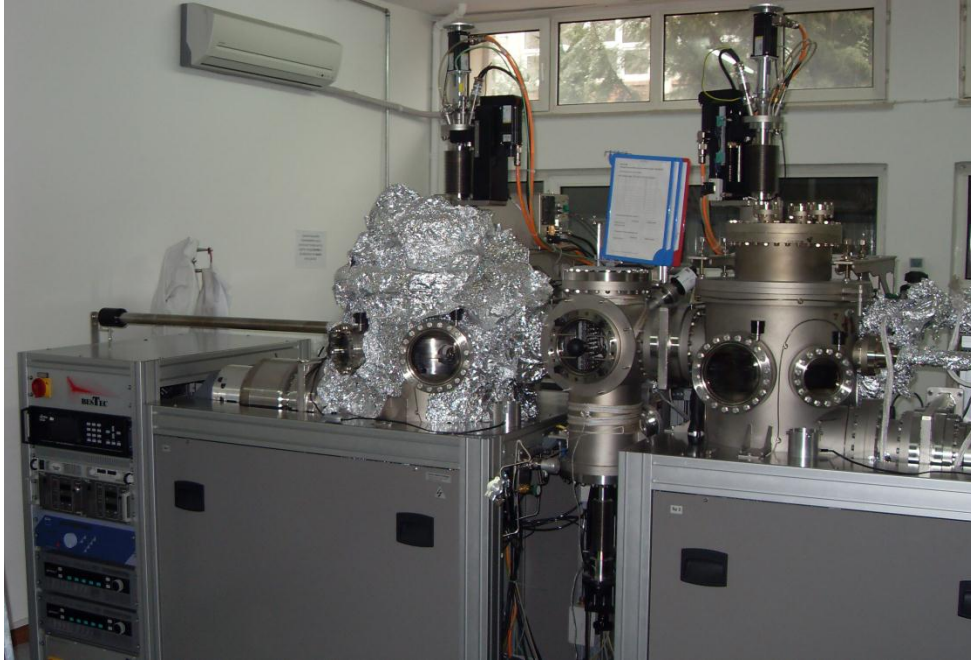
Şekil 3.4. Magnetron sıçratma tekniğinin şematik gösterimi

Bir sıçratma sistemi; vakum pompaları ile UHV (yaklaşık 5×10^{-9} Torr arka plan basıncı) altında tutulan bir odacık, altlık (*wafers*), gaz sistemi, hedef malzeme (*target*) ve güç kaynağı bileşenlerinden oluşur. Sıçratma sürecinin çalışma prensibi ise şu şekildedir: UHV’de bulunan odacığa, soy gaz olması nedeniyle ve plazma oluşturmak amacıyla Argon gazı gönderilir. Bu nedenle UHV’si bozulmuş (yaklaşık 3×10^{-3} Torr) bir odacıkta süreç başlar. DC sıçratma sürecinde hedef malzeme ile altlık arasında DC potansiyel fark uygulanır. Bu voltaj altında hedef eksi, hedefin bulunduğu kaynağın diğer kısımları artı yük ile yüklenir, yani hedef tarafında bulunan serbest elektronlar hedeften altlığa yönlendirilirken elektrik alan ise tam tersi yönde, altlıktan hedefe doğru yönelir. Hedefteki elektronlar altlığa doğru ilerlerken odacık içerisinde bulunan Argon gaz taneleri ile çarpışarak Argon atomlarını uyarır ve Ar^+ iyonları ve ikincil elektronlar oluşturur. Elektronların ve iyonların bulunduğu bu madde haline plazma adı verilir. Ar^+ iyonları ise artı yüklü parçacıklar olduğu için elektrik alanının yönünde hızlanır ve kazandığı kinetik enerji ile hedefe çarpar. Kazandığı bu enerjiyi harcayan Ar^+ iyonu bunun sonucunda hedef malzemeden nötr atom veya atom grupları koparır. Kopan parçacıklar odacık içerisinde Ar^+ iyonlarının çarpması ile kazandıkları enerjiyle geliş güzel dağılır ve bazıları altlık üzerine gider ve orada enerjisi harcayıp

fiziksel olarak altlık ile bağ yaparak film büyümesini gerçekleştirir. Argon atomunun iyonize olurken dışarıya bıraktığı elektronlar (ikincil elektronlar) ya tekrardan argon iyonu ile birleşir ya da altlığı döyerek altlığın ısınmasına neden olur. Magnetron sıçratma sisteminin, DC sıçratma işleminden farkı ise hedef malzeme altına yerleştirilmiş kalıcı mıknatısların, bahsedilen serbest ve ikincil elektronları oluşturdukları manyetik alan altında hapsedebilmeleridir. Bu durumda plazma daha düşük gerilimlerde hedef üzerinde oluşur ve sıçratma verimini artırır. Magnetron sıçratma tekniği dengeli ve dengesiz olmak üzere ikiye ayrılır. Yöntemler temelde aynı olmasına rağmen hedef malzeme önünde oluşturulan plazmanın kapanma şeklindeki farklılık nedeniyle birbirinden ayrılmaktadır. Dengeli magnetron sıçratma yönteminde hedef malzemesinin ön kısmında plazmanın yoğun olduğu kapalı plazma bölgesi oluşur. Yoğun plazma bölgesi içindeki altlık, film büyümesi sırasında yeterli miktarda iyon bombardımanına uğradığından filmin fiziksel ve kimyasal özellikleri istenildiği gibi değiştirilebilir. Dengesiz manyetik alan yönteminde ise manyetik alanın dış mıknatısları merkezdeki mıknatısa göre daha kuvvetli seçilerek plazmanın manyetik alan çizgilerini takip etmesi ve altlığa kadar yayılması sağlanabilir. Manyetik alanın dengesini bu şekilde bozarak plazmanın hedef ve altlık arasında manyetik alan yardımıyla kapanması sağlanır. Sıçratma işleminin süreç değişkenleri, ince filmin özelliklerini belirlemek adına değiştirilebilir. Bu değişkenlerden başlıcaları Çizelge 3.2’de etkileri ile birlikte verildi. Güç kaynağının değişkenleri ise bu tez kapsamında incelendi.

Çizelge 3.2. Sıçratma tekniğinin başlıca süreç değişkenleri ve etkileri

Sıçratma süreci değişkeni	Sürece etkisi
Arka plan basıncı	Filmin saflığına etki eder.
Süreç basıncı	Hedeften kopan malzemenin atlık üzerine biriktirilme hızını etkiler.
Süreç gazının / gazlarının akış hızı	Süreç basıncını etkiler.
Hedef – atlık arası mesafe, hedefin altlığa bakış açısı, altlığın merkezi etrafında dönüş hızı	Filmin atlık üzerinde homojen olarak kaplanmasını ve büyüme oranını etkiler
Hedefe uygulanan güç değişkenleri	Filmin yapısal özelliklerine etki eder.
Altlığa uygulanan ısı	Kaplanma hızını ve filmin yapısal özelliklerini etkiler.



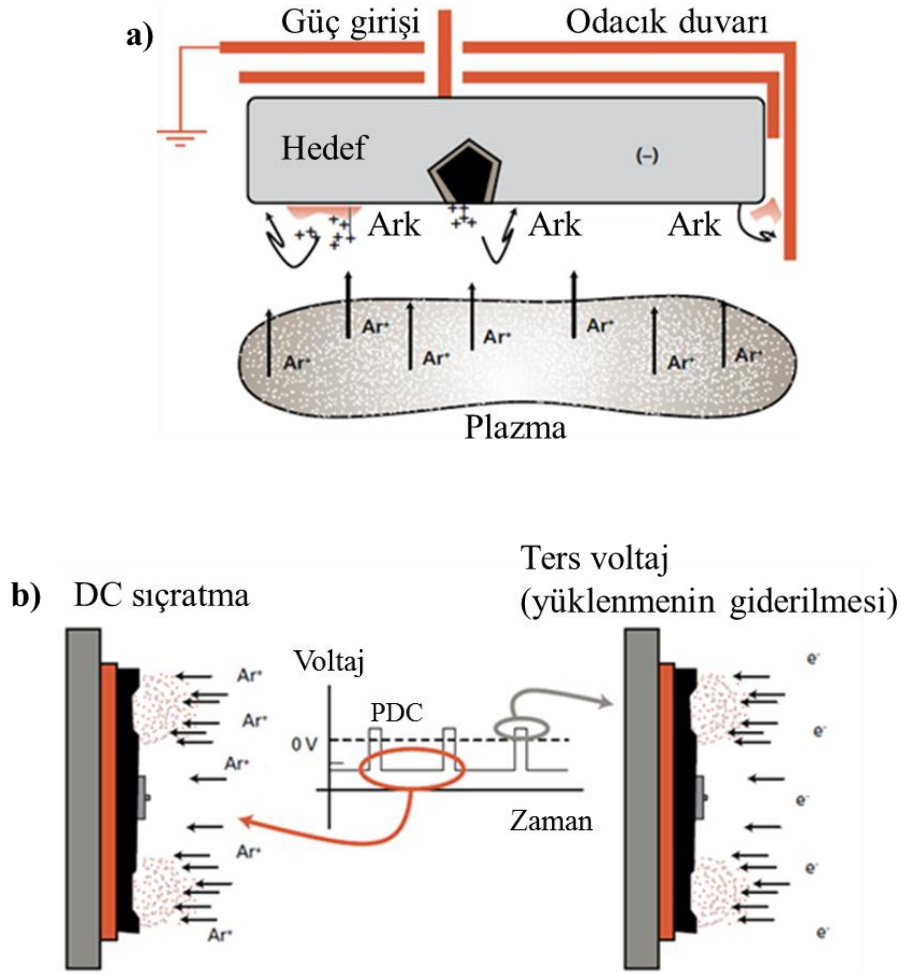
Şekil 3.5. Anadolu Üniversitesi İnce Film Laboratuvarı Magnetron Sıçratma Sistemi

Bu çalışmada kullanılan sıçratma sistemi (Şekil 3.5) Doç. Dr. R. Mustafa Öksüzoğlu'nun tasarımı olup Almanya'nın BESTEC GmbH şirketi tarafından üretilmiştir. Sistem; iki süreç odacığı, bir yükleme odacığı ve manyetik alan altında ısıtma özelliğine sahip bir tavlama odacığından oluşmaktadır. Odacıkların hepsi döner (*scroll*) ön pompa ve turbomoleküler ana pompa ile UHV seviyesinde

vakum altındadır. Sıçratma işlemi aynı odaklı (*confocal*) geometride (hedef aşağıda, altlığa doğru açı ile bakıyor) yapılmaktadır. Film kaplama homojenliğini sağlamak amacıyla hedef malzemelerin bulunduğu kaynakların açıları değiştirilebilmektedir ve numuneyi taşıyan manipülatörün yükseklik ayarı ve dönme özelliği bulunmaktadır. Magnetron özelliği olan bütün kaynaklarda DC sıçratma yanı sıra, PDC ve bazı kaynaklarda RF sıçratma seçenekleri de mevcuttur. Atmalı doğru akım üretim yöntemi aşağıda detaylı olarak anlatıldı.

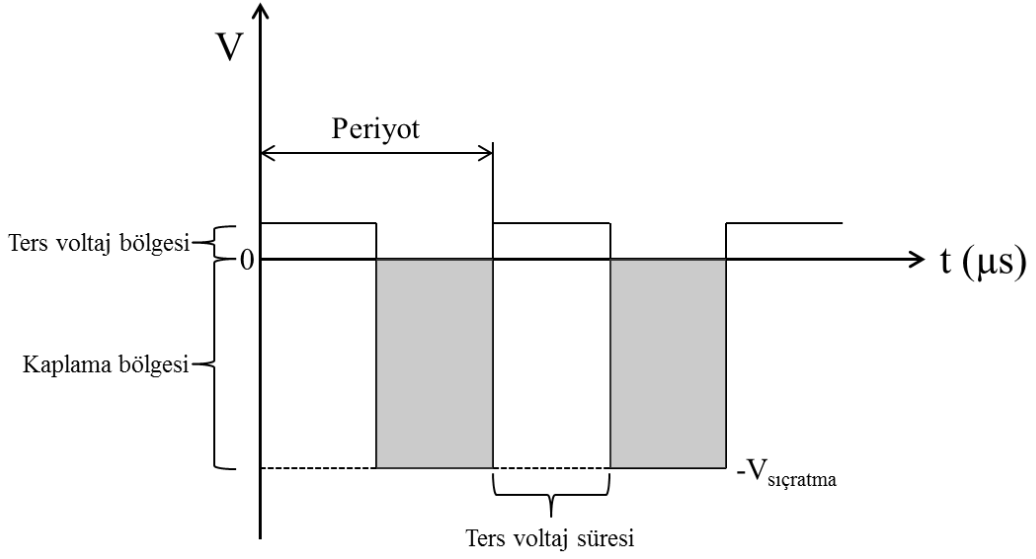
3.4.1. Atmalı doğru akım tekniği

Atmalı DC üretim tekniği ince filmlerin büyütülmesinde ilk olarak yalıtkan hedef malzemeler üzerinde reaktif sıçratma tekniği içerisinde kullanılmıştır [58]. Ancak PDC tekniği bu malzemelerin yanı sıra metalik malzemelerin kaplanmasında da kullanılmaya elverişlidir. Buna ek olarak PDC tekniği, uygun değişkenlerle, metalik malzemelerin en az zararlı ve en yüksek kaplama verimiyle ince film kaplanabilmesine olanak sağlar. PDC'nin avantajlarından en önemlisi DC süreçte hedef malzeme üzerinde oluşan arkların engellenmesidir. Bilinen DC sıçratma tekniklerinde metalik hedef malzemeye sürekli aynı değerde bir voltaj uygulanır. Uzun kaplama sürelerinde, zamanla plazmadaki sıçratma işlemini gerçekleştiren Ar^+ iyonları ile hedef (negatif yüklü) arasındaki etkileşimden dolayı hedefin kaplama yapan yüzeyi ve/veya bütün yüzeyinde kalan parçacıklar ve bölgeler, hedefe göre elektriksel olarak ters yüklenir. Bu durumda bu iki zıt yüklenmiş kütle arasında arklar (Şekil 3.6(a)) oluşur ki bunlar ince filmdeki kusur sayısını artırır, yani film kalitesini direkt olarak etkiler. Ancak PDC tipi güç (Şekil 3.6(b)) uygulandığında voltaj belirli aralıklarla (*reverse time*) ters verildiği için (hedef malzemeye (+) yük veriliyor) hedef üzerindeki yük dengesizliği ortadan kaldırılır (Şekil 3.6(b)). Sonuç olarak kıvılcım görmeyen hedefin büyüttüğü filmin daha büyük taneli olması beklenir [59].



Şekil 3.6. PDC sıçratma tekniğinde a) elektriksel arkların oluşumu ve b) oluşan arkların giderilme yöntemi [60,61]

Bu çalışma kapsamında numunelerin üretimi için Advanced Energy firmasının Pinnacle Plus +5kW modelli PDC güç kaynağı kullanıldı. Maksimum 800V çıkış voltajı verebilen bu güç kaynağı 10 μ s dönme zamanı ve 350kHz frekansa kadar çalışabilmektedir. Hedef malzeme üzerindeki ters yüklenmeleri gidermek için sıçratma nominal voltajının %10'u kadar ters voltaj uygulamaktadır. Güç kaynağının uyguladığı PDC dalgasının bir örneği Şekil 3.7'de gösterildi.



Şekil 3.7. Güç kaynağının hedef malzemeye uyguladığı ideal PDC dalgası

Bu tez çalışmasında PDC güç kaynağının frekans değişkeni çalışıldı. PDC'nin frekans etkileri aşağıda tartışıldı.

PDC frekans değeri; kare sinyal olarak verilen voltajda (Şekil 3.7) uygulanan frekanstır. Bu değişken sıçratma sürecine direkt olarak etki eder. Düşük frekans değerlerinde yukarıda gösterilen PDC dalgasında kaplama voltajı uygulayan bölgenin kapsadığı zaman, yüksek frekanstakine göre aynı zaman aralığında daha fazladır. Bu durumda film kaplaması ters voltaj uygulamaları nedeniyle daha az kesintiye uğrar. Ancak düşük frekansın dezavantajı hedef malzemenin ark oluşturma ihtimalini arttırmasıdır. Bunun nedeni PDC dalga içerisinde bulunan ters voltaj bölgelerinin azalan frekansla birlikte azalmasıdır.

Bunların yanı sıra, PDC frekansı ile ilgili yapılan çalışmalar PDC frekansının azaldıkça tane boyutunun arttığını, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün de minimum değere indiğini [62] göstermiştir. Ancak buna karşın, EB sistemleri ile yapılan bir çalışmada [33] IrMn tane boyutunun arttıkça yüzey pürüzlülüğünün de buna bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu farklı çalışmalar göz önünde bulundurularak bu çalışmada üretilen EB sistemlerinin tane boyutu ve ara yüzey özellikleri incelenmiştir. Frekansın bu etkisinin yanı sıra, frekans azaldıkça uygulanan sıçratma voltajındaki hedef aşma (*overshoot*) probleminin ortadan kalktığı [59] görülmüştür. Buna karşılık frekans arttıkça

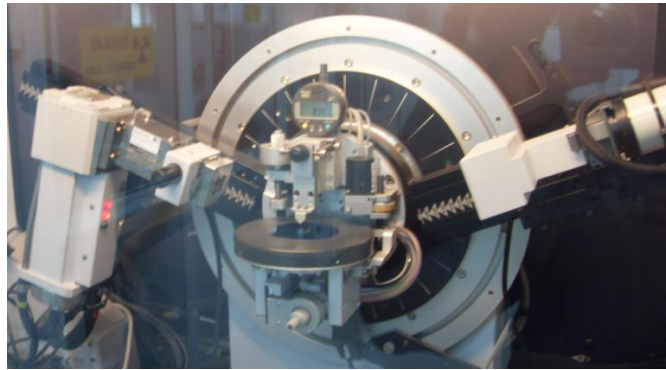
plazma içerisinde iyonize olan atomların sayısının arttığı ve bunların numune yüzeyini daha fazla dövmeye başladığı ki bu durumda pürüzlülüğün arttığı ve tane boyutunun düştüğü [59,62] gözlenmiştir.

PDC ters voltaj sürelerini tam olarak incelendiği çalışmalara rastlanmamıştır. Ancak ters voltaj süresinin artması ile hedef malzeme üzerinde oluşan arkların sayılarının azalacağı tahmin edilmiştir. Bu çalışma öncesinde yapılan araştırmalara göre, ters voltaj süresinin azalmasıyla kaplama hızının değişeceği ve hedef üzerinde ark oluşma olasılığının arttığı, bunun yanı sıra pozitif kısımdaki voltajın hedefi aşacağı (*overshoot*) beklenmektedir. Frekans ile ilgili olarak ise frekansın azalmasıyla ark oluşumunun artması bilinir. Bu durumda Ru tabakasının en az ark ile en büyük tane boyutu verecek şekilde büyütülmesi için bu tabaka düşük frekans (10kHz) ve yüksek ters voltaj süresiyle (10 μ s) kaplandı. Ark oluşma ihtimalinin artması göz önüne alınarak geri dönüş zamanı için 5 μ s alt limit olarak seçildi.

3.5. X-Işını Teknikleri

X-Işını tekniklerinin kullanım amacı üretilen filmlerin yapısal özelliklerini incelemektir. X-Işını tekniklerinin seçilmesinin en önemli nedeni numune hazırlama işlemine gerek duymaması ve numuneye zarar vermemesidir.

Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü altyapısında bulunan Bruker AXS D8 Advance X-ışını diffraktometresi (Şekil 3.8) bu çalışmada üretilen numunelerin yapısal karakterizasyonlarının yapılması amacıyla kullanıldı.



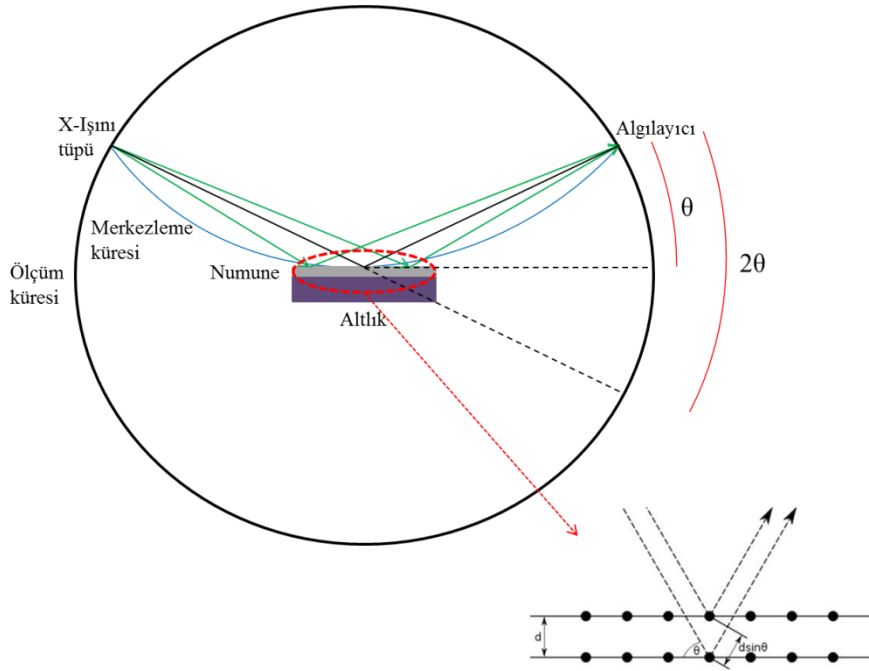
Şekil 3.8. Anadolu Üniversitesi X-Işınları Laboratuvarı'nda bulunan Bruker D8 Advance X-Işını kırınımı cihazı

Şekil 3.8’de gösterilen 3 eksenli diffraktometre, ince filmlerin incelenmesi için Doç. Dr. R. Mustafa Öksüzoğlu tarafından ek optik ataçmanlar alınarak (TÜBİTAK 106M517 no’lu proje kapsamında) kalibre edilmiştir. Sisteme, ince filmlerin incelenebilmesi için önemli olan paralel X-Işınını elde edebilmek için Göbel aynası, vakumlu, 3 eksenli örnek tutucu sistemi ve ince aralık (*slit*) bileşenleri eklenmiştir.

X-Işını kaynağı olarak Cu hedef metali kullanıldı. Cu K_{α} ışınması 40kV gerilim ve 40mA akım değerlerinde elde edildi. Cu X-Işınları içerisinde K_{α} ve K_{β} ışınları bulundurulur. Ayrıca X-ışınları tek bir noktadan yayılıp ilerlediği için iraksayan bir yapıya sahiptir. Iraksayan ışınlar nano boyuttaki malzemelerin karakterizasyonunda istenmez. Bunun nedeni iraksayan ışınların numune üzerine farklı geliş açılarıyla yaklaşması ve kırınımına farklı açılarda uğrayacakları için kırınım deseninde doruk kaymalarına sebep olmasıdır. Bu ışınların paralel düzene geçirmek için ve ayrıca düşük dalga boyuna sahip fakat düşük şiddet gösteren K_{β} kısmı engellemek ve yüksek şiddetteki Cu K_{α} ışınını elde etmek amacıyla Göbel aynası kullanılır. Bu ayna kalınlıkları 1,5nm ile 10nm arası değişen 20 ile 100 tabaka ince filmin (W/Si ya da Ni/C) konkav bir yapıda üst üste dizilmesinden oluşur. Cu K_{α} ışınları elde edildikten sonra ışın şiddetlerinin istenen değerlere göre düzenlenmesi ise soğurucu ile gerçekleştirilir. İnce filmlerin incelenmesi için yüksek şiddet elde etmek önemlidir. Çünkü nano boyuttaki malzemenin gerçekleşecek X-Işını etkileşimleri kaba bir malzemeye göre daha az olacaktır. Ancak, bu yüksek şiddet detektöre zarar vermemelidir ki bu sebeple soğurucular kullanılır. Cihazın numune tutucusu; yükselme, dönme ve eğilme olmak üzere 3 eksene sahiptir ve küçük bir vakum pompası ile numuneyi sabit tutabilmektedir. Numune tutucusunun üzerindeki bulunan bir bıçak, Göbel aynasından yansıyan, yanlış odaklanan veya istenmeyen ışınları kesmesi için kullanılır. Bıçak sadece dikey yönde hareket edebilir. X-Işını yansıma tekniğinde bu bıçak, kaynaktan gelen ışınları belirli bir açıya kadar numune yüzeyinde toplamak ve iraksayan ışınları engelleyerek numuneden yansıyan ışınların şiddetini arttırmak için kullanıldı. Ölçümün belirlenmiş kısmında sırasında numune yüzeyi ile bıçak arası 0,05 mm mesafe bırakıldı.

3.5.1. X-Işını kırınımı tekniği

XRD tekniği numunenin içerisinde hangi fazların olduğunu ve ince filmin ya da hacimsel malzemenin hangi yönde oluştuğunu tayin etmek için kullanılır. XRD ölçümü, Bragg yansıması (Şekil 3.9) ile numunenin atomlarından yansıyan ışınlar arasında aynı fazda olanların yapıcı girişim yaparak kırınım deseni oluşturması ile gerçekleşir. Bu teknikte X-Işınları numune üzerine farklı açılarla (θ) gönderilir. Bu ışınlar malzeme içerisindeki kristal düzende bulunan atomların oluşturduğu düzlemlerden Bragg açılarındaki yani Bragg Yasası'nı sağlayan durumlarda kırınıma uğrarlar (2θ , kırınım açısı) ve detektörde toplanırlar. Elde edilen kırınım desenleri belirli bir faz grubuna ait olduğu için, numune içerisindeki filmlerin kristal yapıları ve büyüme doğrultuları hakkında bilgi elde edilir. Ölçüm geometrisi Şekil 3.9'da gösterildi.

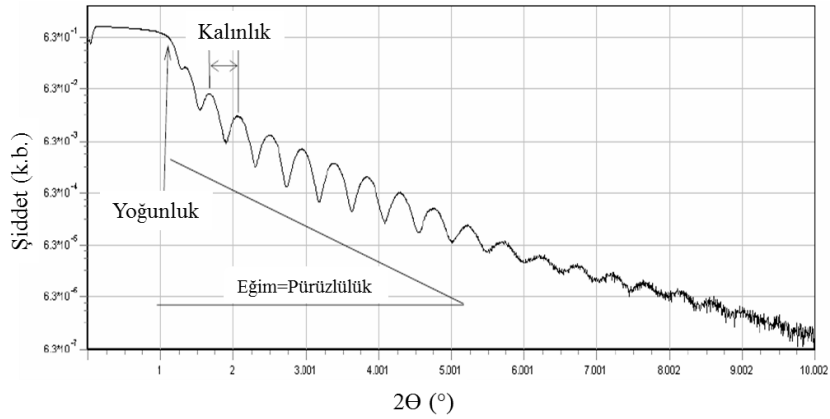


Şekil 3.9. XRD ölçüm ve X-Işını kırınım geometrisi

Bu çalışma kapsamında üretilen EB sistemlerinin XRD ölçüm desenlerindeki tabakaların fazlarına ait doruklar TOPAS (v 3.0) paket programı kullanılarak doruk profil fiti ile analiz edildi. Analiz sonuçlarından Ru ve IrMn tabakalarının tane boyutları hesaplandı.

3.5.2. X-Işını yansımaya tekniği

XRR tekniğinde XRD tekniğinden farklı olarak ışınların kırınımı yerine numune içerisindeki ara yüzeylerden yansımaları incelenir. Bu teknik, tabakaların elektron yoğunluklarının farkını esas alarak sonuç verir. Gelen ışınların açısı tam yansımaya (aynasal yansımaya) durumunu sağlayan kritik açı değerinden biraz daha yüksektir ($\theta_{\text{kritik}} \approx 0,4^\circ$). Bu durumda ışınlar numune içerisine girmeye başlayacak ve açı arttıkça numune içine daha derin girecektir. Işınların girme derinliği arttıkça numune içerisinde farklı kırınım indislerine sahip malzemelerin tabakalarından farklı yansımalar oluşturur ve daha çok kalınlığı gördüğü için şiddeti düşecektir. Farklı yansıyan ışınlar farklı girişimler gösterir ve salınım örüntüsünü (*Kiessing* saçakları) meydana getirir. XRR tekniği ile 200 nm'ye kadar kalın olan ince filmler analiz edilebilir. Şekil 3.10'da örnek bir XRR eğrisi grafiği verildi.

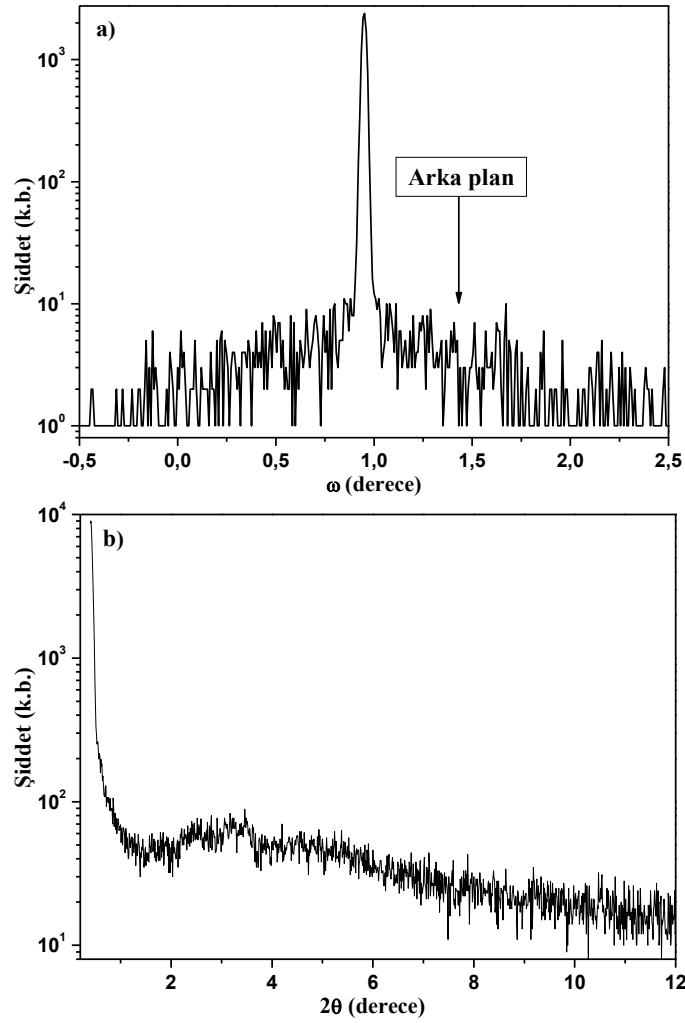


Şekil 3.10. Örnek bir XRR ölçüm eğrisi

XRR tekniği ile ince film numunesinin toplam ve tabaka kalınlıkları, yüzey ve ara yüzey pürüzlülük değerleri ve tabakaların yoğunluğu elde edilen salınım grafiğinden (Şekil 3.10) modelleme ile elde edilebilir. Bu çalışmada modelleme işlemi Bruker LEPTOS (v 7.0) paket programı ile yapıldı.

Nano boyuttaki yapıların, özellikle sıçratma süreci ile elde edilen çok kristalli yapıların, kristal kusurları aynı malzemelerin kaba hallerine göre daha fazladır. Bu hatalar ise her zaman X-Işınlarının Bragg Yasası'na uyarak kırınımına uğramalarını engelleyecektir. Bunun sebebi ideal bir kristal yapıda düzlemlerde

her atomun olması gerektiği yerde olmamasıdır. Aynı durum XRR tekniğinde ara yüzey ve yüzey için de geçerlidir. Eğer X-Işınları ideal ara yüzeylerden kırınıma uğrayamazsa ölçüm sonucunda arka plan adı verilen şiddetler çıkacaktır. X-Işını yansıma tekniğinde ışınlar numune içerisindeki ara yüzeylerden yansyarak toplanırken dağılmış saçılmada XRR (*Diffuse Scattering XRR*) tekniğinde görülmeyen ve ölçüm sonucuna arka plan ekleyen tabakalar içerisinde saçılmaya uğrayan ışınlar toplanır. Bu durumda bu iki ölçüm sonucunun farkı gerçek yansıyan ışınların verdiği salınımları gösterir.



Şekil 3.11. Dağılmış saçılma yapabilmek için; a) numunedeki arka plan gürültüsünü bulan salınım ve b) dağılmış saçılma ölçüm eğrileri

Bu ölçüm için X-Işınları numuneye XRR tekniğine göre daha yüksek açıda gönderilip numunenin içerisindeki saçılmaları toplamak (yani tüpü arka plana odaklamak) (Şekil 3.11(a)) gerekir. Bu durumda elde edilen veriler numunenin

içerisinde dağılan X-Işınlarnın saçılmış hallerini gösterir. Şekil 3.11(b)'de dağılmış saçılma XRR ölçüm eğrisi gösterildi.

XRR ölçümü ile elde edilen eğriler teorik modelleme ile analiz edilir ve ince filmlerin kalınlık yoğunluk ve ara yüzey pürüzlülük değerleri elde edilir. Teorik modellemeler ile ilgili temel eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad (3.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte (3.1) n refraktif indeksini, δ dispersiyon ve β absorpsiyon katsayılarını simgeler [9].

Snell Yasası'na (3.2) göre iki farklı ortamın refraktif indeksinin oranı gelen ve yansıyan ışınlarının kosinüslerinin oranına eşittir

$$n_1 \cos\theta = n_2 \cos\theta' \quad (3.2)$$

Varsayım olarak absorpsiyon göstermeyen bir filmdeki ($\beta=0$) yansıma ele alındığında (3.3) ve bu eşitlik, üst yüzeyi hava olan ($n_{\text{hava}}=1$) bir ince filmde Snell Yasası (3.2) ile birleştirildiğinde (3.4) elde edilir.

$$n = 1 - \delta \quad (3.3)$$

$$\frac{\cos\theta}{\cos\theta'} = 1 - \delta \quad (3.4)$$

Kritik açı (θ_c) ise (3.5), (3.6) ve (3.7) kullanılarak (3.8) ile elde edilir.

$$1 - \delta = \cos\theta_c \quad (3.5)$$

$$\approx 1 - \frac{\theta_c^2}{2} \quad (3.6)$$

$$\theta_c \approx \sqrt{2\delta} \quad (3.7)$$

$$\theta_c = \sqrt{\frac{r_0 \lambda^2}{\pi} N_A \frac{(z+f')}{A} \rho} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte (3.8) r_0 Bohr atom yarıçapını, N_A Avogadro sayısını, λ dalgaboyunu, Z atom başına elektron sayısını, ρ yoğunluğu, A atomik ağırlığı ve f' atomik faktörü ifade eder [9].

3.5.3. Salınım eğrisi tekniği

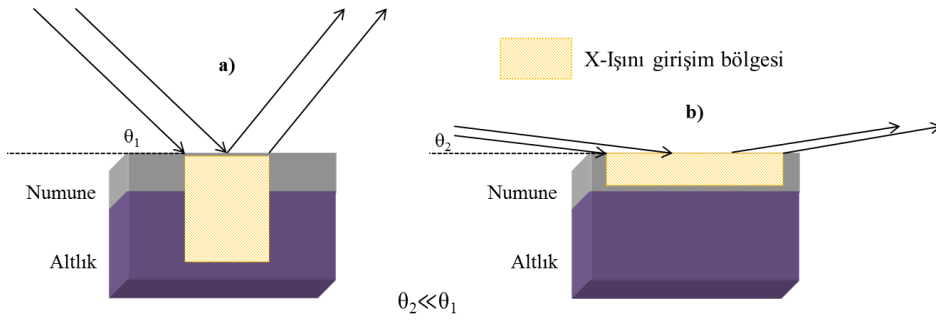
RC tekniğinde numunenin XRD ölçümünde görülen herhangi bir kristal fazın 2θ açısı değeri üzerinde tüp ve detektörün senkronize şekilde hareketi ile kristal yönelimi istenilen açı değerleri arasında

X-ışınına maruz bırakılır ve kırınimleri toplanır. Böylece RC, sadece seçilmiş yansıma şiddetlerini kullanılarak daha güçlü bir yapısal analiz yapmayı amaçlar. Çıkarılan sonuç ise üzerinde RC yapılan kristal kırınım düzleminin kalitesinin (tercihli yöneliminin) ne kadar iyi olduğudur. Eğer elde edilen doruk dar (düşük FWHM) ve şiddeti yüksekse bu, kristalin en yüksek yönelime ve *heteroepitaxy* büyümeye sahip olduğunu gösterir. Bu teknikte XRD tekniğinden farklı olarak, algılayıcı 2θ dairesi üzerinde incelenecek Bragg doruğunun 2θ merkez pozisyonunda sabitlenir. Numuneye gelen ışınlar ise θ açısı cinsinden ayarlanır. Algılayıcıdaki 2θ açısı ile kaynaktaki θ açısı arasındaki fark ω açısı olarak tanımlanır. Ölçüm, sabit 2θ açısında, ω açısı ($-\theta$) ile ($+\theta$) arasında tarama yapacak şekilde sınırlandırılır. Bu sınırlar dışında saçılan ışınlar algılanmadığı için ince filmdeki istenilen tabakanın kristal kırınım düzlemi dışındaki bir tabaka ya da düzlemden yönelim bilgisi elde edilmez.

Bu çalışmada üretilen numune serilerinde yapılan XRD ölçümleri sonucunda Ru (0002) kırınım doruğu ($2\theta \approx 42^\circ$) üzerinden RC ölçümleri yapılmasına karar verildi. Bunun nedeni Ru doruğunun çok şiddetli bir kırınım vermesi ve yöneliminin inceleneceği IrMn (AFM) tabakasının XRD şiddetinin Ru şiddeti altında kesin bir şekilde görülememesidir. RC eğrisinin elde edilmesi için $2\theta \approx 42^\circ$ 'deki Ru fazının θ değeri olan 21° 'yi görebilmek için RC ölçümü 10° - 30° aralığında yapıldı.

3.5.4. Sıyırma açısı X-Işını kırınımı tekniği

GIXD tekniğinin uygulanma amacı, ince film sistemlerinin nanometre boyutunda büyütülmesinden dolayı X-Işınının ölçüm sırasında yarattığı derine inme problemidir. Bilinen XRD ölçümleri yüksek geliş açılarında numune içerisine giriş yaptığı (Şekil 3.12(a)) için ince film sisteminde altlık tabakasında da kırınımlar oluşturacaktır. Ancak GIXD tekniğinde ışının geliş açısı aynı XRR tekniğinde olduğu gibi total yansıma açısının biraz üstünde ($0,3^\circ \leq \theta \leq 1[43]$) numuneye gönderilir. Bu durumda yüzeyden aşağıya biraz girip altlık ile etkileşmeyen ışın, ince filmin içerisinden daha çok geçerek (Şekil 3.12(b)) film hakkında daha fazla bilgi verir. Ölçüm sonucunda ince filmde gelen sinyalin arka plan gürültüsüne oranı yükselir.



Şekil 3.12. XRD ölçümünde: a) yüksek açı ve b) sıyırma açısı ölçüm geometrileri

Bu ölçüm yöntemi ileri X-Işını tekniklerinden birisidir. Ölçümün sağlıklı olabilmesi için X-Işınının paralel ışınlar şeklinde numuneye gelmesi gerekir. Bruker X-Işını cihazında paralel ışın geometrilerinde kullanılan soller slitler olmasa da, dar slitler ve Göbel aynası kullanılarak ışınlar, bu tekniği uygulayabilecek kadar paralel konuma getirilmiştir. Ölçüm esnasında ışın kaynağı düşük açıda sabit tutulurken algılayıcı verilen 2θ açı değerleri arasında hareket ettirilerek numunedeki kırınımına uğrayan ışınları toplar. X-Işınının geliş açısına göre numune içerisine giriş derinliği (x , *penetration depth*) (3.9) ile ifade edilir. K_x numuneye giren ve çıkan ışın şiddetleri oranını, θ ışının geliş açısını, μ numunenin soğurma katsayısını temsil eder [9].

$$x = \frac{K_x \sin \theta}{2\mu} \quad (3.9)$$

3.6. Dört Nokta İğne Tekniği

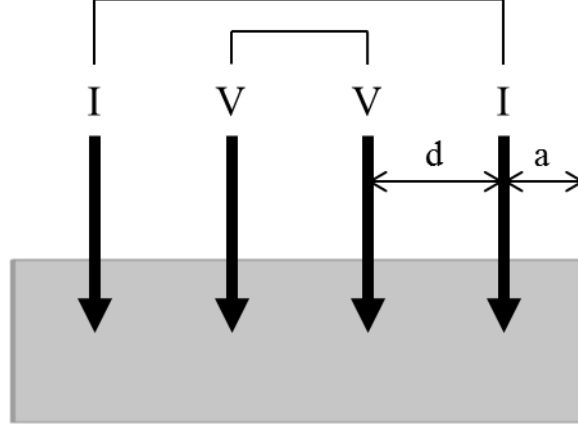
Bu proje kapsamında üretilen numunelerin elektriksel özelliklerini karakterize etmek için FPP tekniği (Şekil 3.13) kullanıldı.



Şekil 3.13. Anadolu Üniversitesi İnce Film Laboratuvarı altyapısında bulunan FPP ölçüm düzeneği

FPP ile ince filmlerin yaprak direnç (*sheet resistance*) ve alan başına direnç (*resistivity/area*) ölçümleri yapılır. FPP ölçüm cihazının iki bileşeni vardır; bunlardan biri dört nokta ölçümünü sağlayacak olan lineer düzende iğneleri olan dörtlü iğne ölçüm kafası, diğeri de elektriksel karakterizasyon için gereken akımı verecek ve voltajı ölçecek olan sistemdir (Şekil 3.13) (*sourcemeter*). Dört tane iğnenin yani kontakın olma nedeni iki nokta durumunda rastlanan aynı iğne üzerinden hem akım verip hem voltaj ölçmenin direnci artırma etkisinin düşürülmesidir. Ölçüm sırasında numune ile dört nokta kafası arasında direkt bir kontak olmalıdır. Prensip olarak dört nokta kafasının iğneleri, akımın numunenin yüzeyinden yani filmde geçmesi amacıyla birbirine olabildiğince yakın (küçük d mesafesi (Şekil 3.14)) olmalıdır. Ayrıca yine bu lineer dört nokta numunenin kenarlarından olabildiğince uzakta (yüksek a mesafesi (Şekil 3.14)) olmalıdır. Bunun nedeni ise ölçümün, numunenin kenarlarında oluşan girdap akımlarından (*eddy currents*) etkilenip yanlış sonuç verebilme olasılığındandır. Nano boyuttaki

ince filmlerin elektriksel karakterizasyonu için d/a oranının kaba malzeme ölçen FPP sistemine göre yüksek olması gerekir. Bunun nedeni d/a oranının akımın numune içerisine girme derinliğini etkilemesidir. Yüksek d/a oranına sahip FPP düzeninde akım numune yüzeyine yakından geçer ve altlıktan gelen etkiyi azaltır.



Şekil 3.14. FPP ölçüm şematığı

Dört nokta kafası içerisindeki hassas yaylar sayesinde numune üzerine bastırdıktan sonra akım kaynağı devreye girer ve lineer düzende olan iğnelerin dışta kalan ikisinden yazılıma ölçüm başlangıcında girilen numune kalınlığını temel olarak otomatik şekilde yaklaşık akım değerleri verir. Uygun olan akım değeri saptandıktan sonra yine aynı akım kaynağı ile numune üzerindeki voltajı ölçer ve yazılımın kendi hesaplamalarıyla filmin direncini ve alan başına direncini verir. Yaprak direnci ile (3.10) öz direnç arasındaki ilişki (3.11) şeklindedir.

$$\rho_s (\Omega/\square) = \frac{\rho y}{A} = \frac{\rho}{h} \quad (3.10)$$

Burada h film kalınlığını, A ise iletkenlik yolunun kesit alanını ifade eder.

$$\rho_s = \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \times \left(\frac{V}{I}\right) = 4,53 \frac{V}{I} = 4,53R \quad (3.11)$$

3.7. Titreşimli Örnek Manyetometresi

Bu tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin manyetik histerezis eğrileri VSM tekniği ile elde edildi.

VSM tekniğinin temeli manyetik alan altında mıknatıslandırılan bir numunenin titreştirilmesi ve numunenin titreşiminin bobinlerdeki akı değişimine neden olur. Şekil 3.15'te gösterilen numuneye salınım yaptıran titreştirici ile manyetize olmuş numuneye verilen hareketin oluşturduğu etki Hall algılayıcısında emk indüklenme olarak gözlenir. Aynı zamanda titreşen referans numunesi de referans bobinlerinde bir indüklenmeye neden olur. VSM kendi yazılımı ile bu iki indüklenme gerilimi arasındaki farkı alır ve numunenin manyetizasyon değeri ile orantılı olan gerilimi elde eder.



Şekil 3.15. Titreşimli örnek magnetometresi özelliğine sahip Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü altyapısında bulunan PPMS sistemi [63]

Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin histerezis eğrileri Quantum Design Model 600 PPMS içerisinde bulunan VSM ölçüm tekniği ile elde edildi. Sistem ± 9 T alan verebilme özelliğine sahip olup ölçüm gürültüsü 10^{-6} emu'dur [64]. Ölçümler oda sıcaklığında ± 3000 Oe manyetik alan arasında en düşük 10 Oe aralıklarla ölçüldü.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Üretimi Yapılan Numuneler

Bu tez çalışması kapsamındaki numunelerin üretimi için Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü altyapısında bulunan ve koordinatörlüğünü Doç. Dr. R. Mustafa Öksüzoğlu'nun devam ettirdiği İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bulunan magnetron sıçratma (*sputtering*) sistemi PDC güç kaynağı seçeneği ile kullanıldı. EB sistemini oluşturan çoklu ince film tabakaları “Tabaka ve Kalınlık Seçimi” bölümünde verildi. Sıçratma sistemi, kapladığı filmin kalitesinin yüksek olması amacıyla 5×10^{-9} Torr arka plan basıncında tutuldu. Bütün üretimler, tabakalar arası difüzyonu engellemek için oda sıcaklığında tamamlandı. Üretimler 2 sccm Argon akış oranı ile gerçekleştirildi. Üretim sırasında düzlem içi 0,5 kOe manyetik alan, tabakaların büyümesi sırasında manyetik kolay eksen (*easy axis*) vermesi için sürekli uygulandı. Böylece yumuşak manyetik NiFe tabakası manyetik alan altında $\langle 111 \rangle$ yönelimini alır ve bu yönelimi üzerine büyütülen IrMn AFM tabakasına aktarır. Üretimi tamamlanan numuneler, H_{ex} değerini arttırmak amacıyla, 200°C altında 1 saat manyetik alan altında UDA işlemine tabi tutuldu. Tavlama işleminden sonra ise yine aynı manyetik alan altında (0,5 kOe) FC yapıldı. Bunun sonucunda AFM/FM ara yüzeyi ve AFM yapısının yapısal özellikleri, yapısal kusurlar giderilerek iyileştirildi. Manyetik alanın sürekli uygulanması sonucunda da AFM/FM ara yüzeyi EB etkisi gösterecek şekilde manyetik düzene getirildi.

Bu çalışma kapsamında üretilen ilk numune serisi ince filmlerin kalınlık optimizasyonları için yapıldı. Bu aşamada filmler tek tabaka olarak üretildi ve kalınlıkları yine LEPTOS paket programı kullanılarak XRR ölçümlerinden modellendi. Buradan elde edilen kaplama hızları (Çizelge 4.1) kullanılarak EB serisi numunelerindeki istenen tabaka kalınlıkları için üretim süreleri her tabaka için hesaplandı.

Çizelge 4.1. Tek tabaka kalınlık optimizasyonlarından elde edilen kaplama hızları

Tabaka	Kaplama hızı (nm/s)
IrMn	0,028
CoFe	0,029
NiFe	0,024
Ta	0,016
Ru	0,013

Tez çalışmasının amacı AFM tabakasının yapısal özelliklerinin geliştirilmesi olduğu için üretim değişkeni olan PDC frekansı, AFM tabakasını yapısal anlamda direkt olarak etkileyecek çekirdeklenme tabakasında incelendi. Üretimler sırasında NiFe tabakası hariç diğer tüm tabakalar, sabit PDC değişkenleri olan 50kHz frekans ve 5µs ters voltaj süresi ile üretildi. PDC frekansı NiFe'nin büyütülmesinde 10kHz ile 50kHz arasında tarandı.

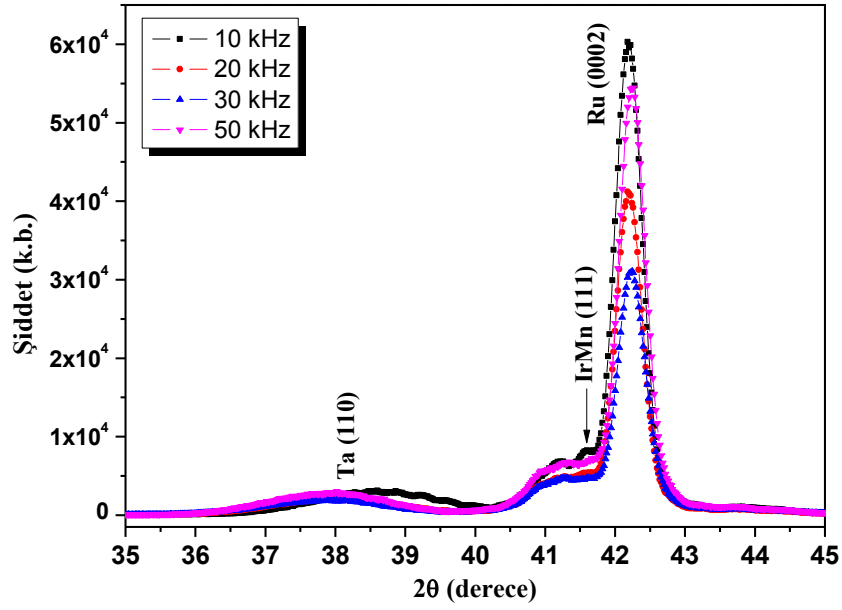
Tezin ikinci numune serisinde Ru tabakasının kaplanması sırasında uygulanan PDC gücün ters voltaj süresi 10kHz frekansta 10,0µs'den 5,0µs'ye 0,5µs adımlarla tarandı. Diğer tabakaların PDC parametreleri ise 50kHz 5,0µs olarak seçildi. Böylece Ru tabakasında yapılan üretim parametresi değişimi ile bunun tüm ince film sisteminin yapısal özelliklerine etkisi incelendi.

4.2. Yapısal Özellikler

4.2.1. X-Işını kırınımı sonuçları

XRD ölçümlerinden elde edilen doruk desenlerine göre faz analizi (Şekil 4.1) yapıldı ve NiFe tabakasından önce büyütülen Ru tabakası ile NiFe'den sonra büyütülen IrMn tabakasının ortalama düzleme dik (*out of plane*) tane boyutu, Scherrer formülü (4.1) kullanılarak hesaplandı. Böylece NiFe tabakasının üretimindeki PDC frekans değişikliğinin AFM tabaka üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu incelendi.

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos\theta} \quad (4.1)$$



Şekil 4.1. PDC frekansının değişimine bağlı olarak üretilen EB sistemlerinin XRD desenleri

Şekil 4.1’de gösterilen XRD ölçümlerinden elde edilen pik desenlerinde $2\theta=38^\circ$ civarında bulunan geniş pikin içerisinde amorf fazda bulunan Ta oksit ve Ru tabakasının üzerine büyütülen HMK Ta (110) nano-kristal fazı bulunmaktadır. Ta tabakalarında bu şekilde bir farkın olmasının nedeni amorf SiO_2 altlık üzerine ilk büyütülen 5nm kalınlığındaki Ta’nın amorf yapıda büyümesidir. $2\theta=42,2^\circ$ civarında kırınım gösteren Ru HSP (0002) kristal yapısı, üzerindeki Ta tabakasını etkileyerek onun kübik kristal yapıda $\langle 110 \rangle$ yönünde büyümesine neden olur [51]. $2\theta=41,6^\circ$ civarındaki doruk NiFe çekirdeklenme tabakasının yapısal olarak etkilediği $\langle 111 \rangle$ yönünde büyüyen IrMn_3 (IrMn L_{12} fazı) yapısını gösterir. Diğer tabakalarla ilişkili olarak, bu ölçümlerde belirgin bir doruk şiddeti alınamamıştır. Bunun nedeni yaklaşık 25 nm kalınlığında ve yüksek bir tercihli yönelime sahip Ru tabakasının HSP $\langle 002 \rangle$ yöneliminin doruk pozisyonunun diğer tabakaların beklenen [4] yönelimleri olan, NiFe YMK(111) ($2\theta=43,7^\circ$) ve CoFe HMK(110) ($2\theta=44,8^\circ$) yönelimlerinin doruk pozisyonlarına yakın olması ve yüksek şiddet gösterdiğinden dolayı bu dorukları içerisinde bulundurmasıdır. Buradan çıkan sonuç, NiFe çekirdeklenme tabakası istenildiği gibi $\langle 111 \rangle$ yöneliminde büyüüp IrMn tabakasının da $\langle 111 \rangle$ yönünde büyümesine etken olmasıdır. Bu yönelimde L_{12} fazına sahip IrMn_3 tabakası YMK kristal düzenindeki (111) düzleminde diğer

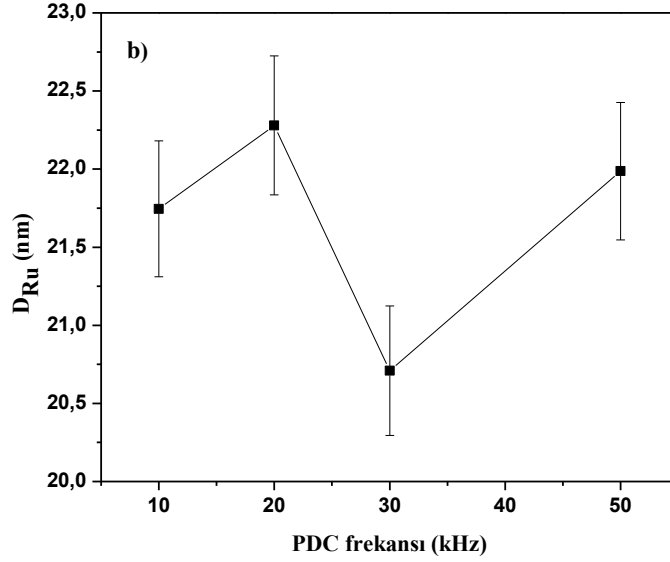
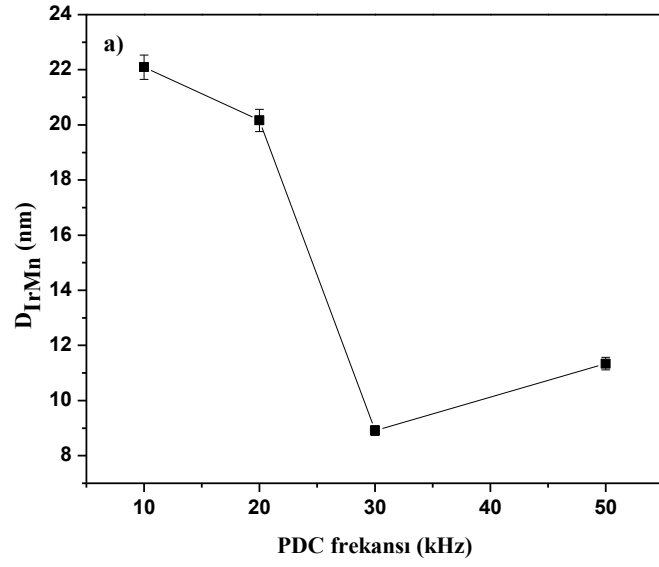
düzlemlerine göre en çok atom bulundurmasından dolayı yüksek spin manyetik moment yoğunluğuna sahip olacaktır [2,54].

XRD ölçüm sonuçlarından elde edilen bir başka bulgu ise PDC frekansının filmlerin yönelim derecesini etkilemesidir. Şekil 4.1'deki XRD kırınım desenlerinde 10kHz frekansla üretilen NiFe içeren numunenin IrMn(111) doruğunu direkt olarak etkilediği ve en belirgin doruğa sahip yani en iyi kristal düzende olan, IrMn fazının yine bu numunede olduğu gözlenmiştir. IrMn(111) doruğu üzerinden yapılan fit değerleri de bunu destekler niteliktedir.

Numunelerin XRD (θ - 2θ) ölçümlerinden elde edilen, ilgili tabakaların doruklarının FWHM değerleri TOPAS paket programı kullanılarak bulundu ve Scherrer formülü (4.1) ile istenilen tabakaların dikey ortalama tane boyutları hesaplandı (Çizelge 4.2). Buna göre elde edilen PDC frekans–tane boyutu ilişkisi Şekil 4.2(a, b)'de verildi.

Çizelge 4.2. Üretilen EB sistemlerinin kalınlık, Ru ve IrMn tane boyutu değerleri

PDC frekansı (kHz)	Toplam film kalınlığı (nm)	Ru tane boyutu (nm)	IrMn tane boyutu (nm)
10	59,21	21,75+/-0,43	22,09+/-0,44
20	59,74	22,28+/-0,45	20,16+/-0,40
30	60,07	20,71+/-0,41	8,91+/-0,25
50	60,63	21,99+/-0,44	11,34+/-0,23



Şekil 4.2. XRD desenlerinden elde edilen FWHM değerlerinden Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan a) IrMn ve b) Ru tane boyutlarının PDC frekansına göre değişimi

Şekil 4.2’de verilen sonuçlara göre Ru tabakasının PDC frekansına bağımlılığı gözlenemezken, IrMn tabakası için tane boyutunun PDC frekansı azaldıkça arttığı görülür. Bunun nedeni, üretim değişkeni olan PDC frekansının sadece NiFe tabakasında değiştirilmesidir. Yani NiFe tabakasından önce büyütülen Ru tabakası bu değişimden etkilenmez. Buradan çıkan sonuç ise beklendiği gibi çekirdeklenme tabakasının düşük frekansla büyütülmesinin filmdeki tane boyutunu ve dolayısıyla AFM tabakanın tane boyutunu arttırdığıdır.

Bu sebeple AFM tane sınırlarından kaynaklanan, FM tabakanın manyetizasyonunu ve EB performansını düşüren tane sınırına bağlı manyetik bozunuma uğramış spinlerin tabaka içerisindeki oranının azalması beklenir.

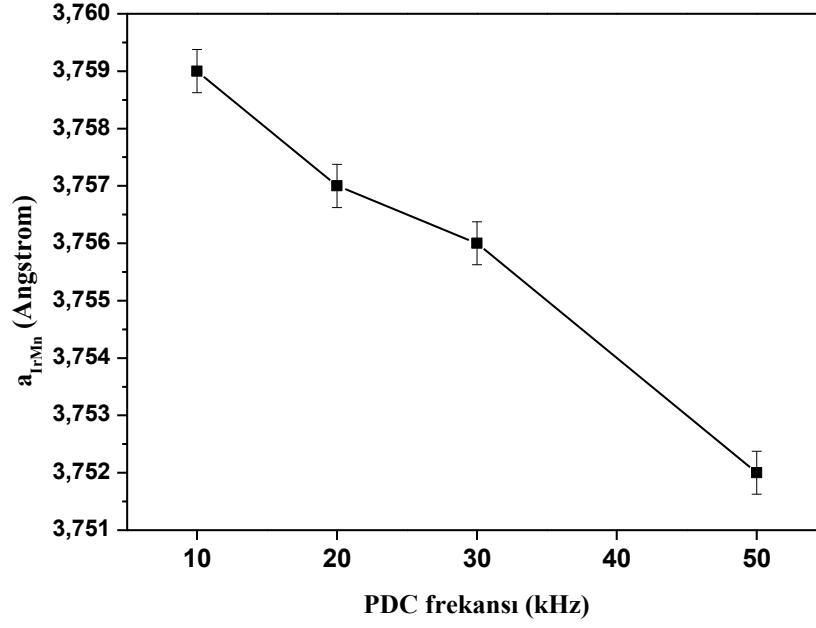
Bu analizlerin yanı sıra, yapılan XRD ölçümleri sonucu gözlenen IrMn'ye ait dorukların, XRD kırınım desenindeki açı pozisyonlarına göre (θ) Bragg Kanunu (4.2) ve kübik kristal sistemler için geçerli olan düzlemler arası mesafe (d) – örgü değişkeni (a) ilişkisi (4.3) kullanılarak IrMn için örgü değişkenleri hesaplandı. Sonuçlar aşağıda (Çizelge 4.3 ve Şekil 4.3) verildi.

$$\lambda=2d \sin \theta \quad (4.2)$$

$$d=\frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (4.3)$$

Çizelge 4.3. EB numunelerindeki IrMn tabakalarının doruk pozisyonları ve hesaplanan örgü değişkenleri.

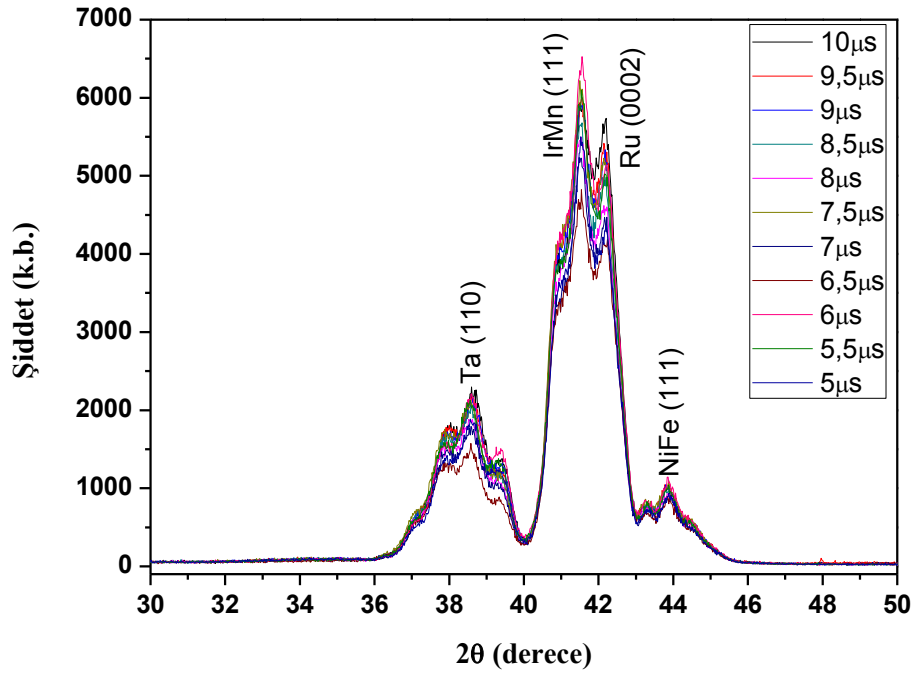
Frekans (kHz)	IrMn doruk pozisyonu (Θ°)	a_{IrMn} (Å)
10	20,79	3,759 +/- 3,76x10 ⁻⁴
20	20,80	3,757 +/- 3,76x10 ⁻⁴
30	20,80	3,756 +/- 3,76x10 ⁻⁴
50	20,83	3,752 +/- 3,75x10 ⁻⁴



Şekil 4.3. IrMn kristal örgü değişkeninin PDC frekansına bağımlılığı

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi a_{IrMn} artan PDC frekansı ile azalmaktadır. Bu değişim, XRD θ -2 θ ölçümlerinden elde edilen bulguları destekler niteliktedir. Yukarıda bahsedilen PDC frekans – tane boyutu ilişkisi göz önüne alındığında, düşük frekanslarda büyütülen tabakaların büyük taneler oluşturduğu ve bunun sonucunda bu tanelerin içerisinde diğer numunelerden göreceli olarak daha düşük stres göstermesi beklenir. Bu durumda iki boyutta sınırlandırılmış tabakadaki fazın kristal örgü değişkeni, kaba (*bulk*) halindeki örgü değişkenine (L1_2 IrMn₃ için 3,776 Å [65]) yakın olur.

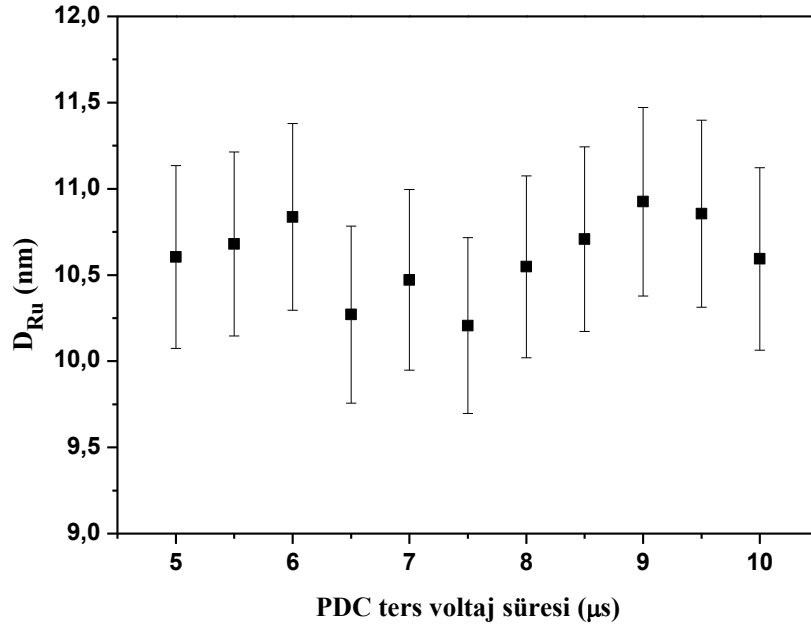
İkinci numune serisinin XRD kırınım desenleri ve doruk pozisyonlarındaki kristal fazlar Şekil 4.4'te gösterildi.



Şekil 4.4. Farklı PDC ters voltaj sürelerinde üretilen ince film sistemlerinin XRD kırınım desenleri

Şekil 4.4'te gösterilen XRD kırınım desenlerinde beklenildiği gibi Ru tabakasının kalınlığının 25nm'den 10nm'ye düşürülmesi IrMn(111) ve özellikle NiFe(111) doruklarının daha belirgin hale gelmesine neden olmuştur. Ta(110), IrMn(111) ve NiFe(111) doruklarının etrafındaki doruklar ise herhangi bir kristal yapı ile ilişkilendirilemedi. Bu dorukların, düşük ara yüzey pürüzlülüğüne sahip ince film sistemlerinde gözlenen uydu doruklar (*satellite peaks*) olduğu düşünüldü. Numunelerin doruk pozisyonlarının herhangi bir değişime uğramadığı gözlemlendi.

Bu numune serisinde de Ru ve IrMn tane boyutları, önceki seride olduğu gibi hesaplandı. IrMn tabakasının tane boyutları değişen PDC ters voltaj süresine göre anlamlı bir değişim göstermezken, Ru tane boyutları Şekil 4.5'te verildi.

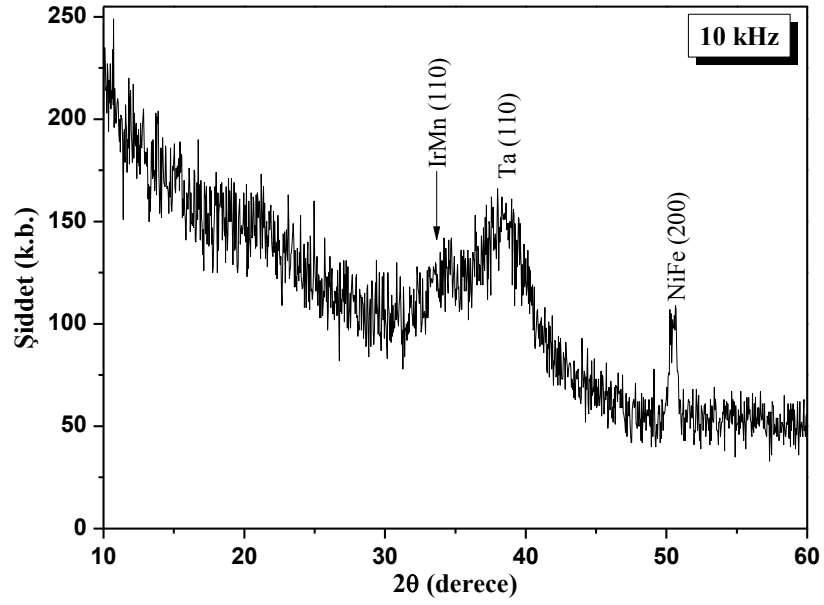


Şekil 4.5. Ru tane boyutunun PDC ters voltaj süresine göre değişimi

Şekil 4.5'te gösterilen Ru tane boyutunun değişimi, Ru gerçek tabaka kalınlığının 8,5-9,0 nm arasında değiştiği düşünülürse anlamlı bir değişim gösterdiği sonucu çıkmaktadır. Bu sonucun ayrıca manyetizasyon ölçümleri ile desteklenmesi gerekmektedir.

4.2.2. Sıyırma açısı X-Işını kırınımı sonuçları

Magnetron sıçratma tekniği ile üretilen çoklu kristal yapısındaki numunelerden daha fazla kristal bilgisi almak amacıyla, bu numunelerden en düşük PDC frekansı (10 kHz) ile üretilmiş numune GIXD tekniği ile karakterize edildi. Kırınım deseni Şekil 4.6'da verildi.

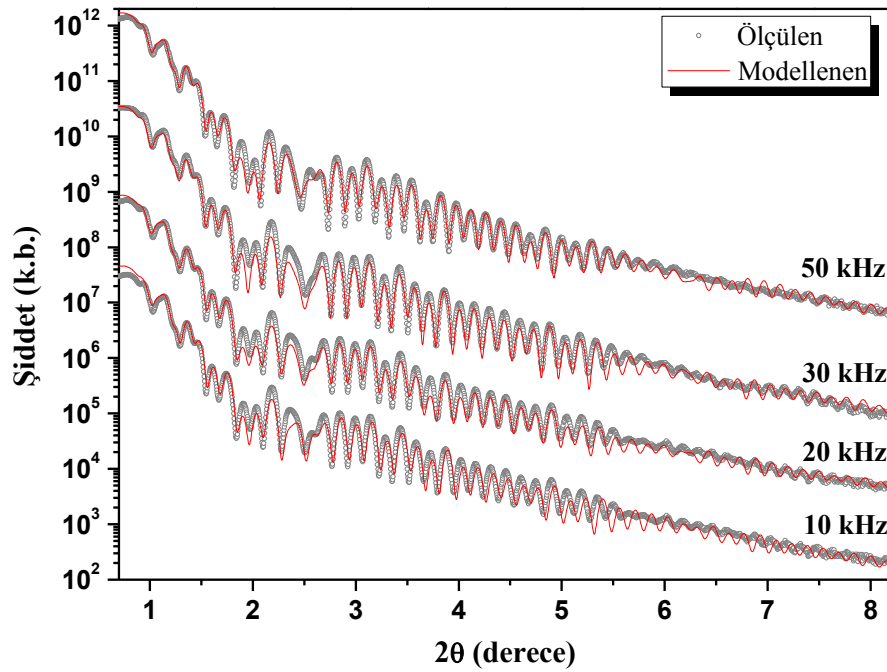


Şekil 4.6. 10 kHz PDC frekansı ile üretilen NiFe tabakasına sahip EB sisteminin sıyırma açısı X-ışını kırınım deseni

Bu kırınım deseninde $2\theta=38^\circ$ civarında Ta HMK fazına ait (110) kırınım düzlemi görülmektedir. Bunun yanı sıra $2\theta=50^\circ$ civarında ise NiFe tabakasına ait YMK (200) düzleminden bir kırınım elde edilmiştir. Bu doruk, NiFe YMK (111) düzleminden sonra en yüksek şiddet veren YMK düzlemlerinden birisidir. Buna göre NiFe tabakasının $\langle 111 \rangle$ yöneliminin dışında büyüme gösterdiği anlaşılmıştır. NiFe tabakasının bu yöreimde büyüdüğü, literatürde permalloy NiFe/FeMn ikili tabakalarının XRD kırınım desenlerinde de gözlenmiştir [37]. $2\theta=33^\circ$ civarında ise $\text{IrMn}_3 L_1$ fazına ait (111) düzleminin oluşturduğu süper örgüye (*superlattice*) ait (110) düzleminin [57,66] kırınımı görülür. Bu kırınım, süper örgülerin X-ışını kırınım desenlerinde karakteristik olarak görülen uydu doruklarından birisi olarak düşünülebilir.

4.2.3. X-Işını yansıma tekniği sonuçları

Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerin XRR ölçümleri, dağılmış saçılma ölçümü çıkarılıp elde edildi. Sonuçlar (Şekil 4.7) LEPTOS paket programı kullanılarak modellendi. Modelleme sonucu numunelerin içerisindeki tabakaların kalınlık, yüzey/ara yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk değerleri elde edildi. PDC frekansının değiştirildiği EB sistemlerini oluşturan tabakaların kalınlık (Çizelge 4.4) ve pürüzlülük değerleri (Çizelge 4.5) gösterildi.



Şekil 4.7. Değişen PDC frekansı ile üretilen NiFe tabakasına sahip EB sistemlerinin XRR ölçüm ve teorik modelleme eğrileri

Çizelge 4.4. Değişen PDC frekansına göre üretilen numunelerdeki tabakaların gerçek kalınlık değerlerinin değişimi

PDC frekansı (kHz)	Tabakaların gerçek kalınlıkları (nm)							
	Ta	Ru	Ta	NiFe	IrMn	CoFe	Ta	Ta ₂ O ₅
10	5,46	24,26	3,97	6,19	10,84	2,27	4,23	2,00
20	5,43	21,88	6,41	6,27	11,07	2,09	4,49	2,09
30	6,46	24,90	3,10	6,53	10,48	1,59	4,78	2,23
50	6,63	24,90	3,16	6,52	10,50	2,10	4,44	2,38

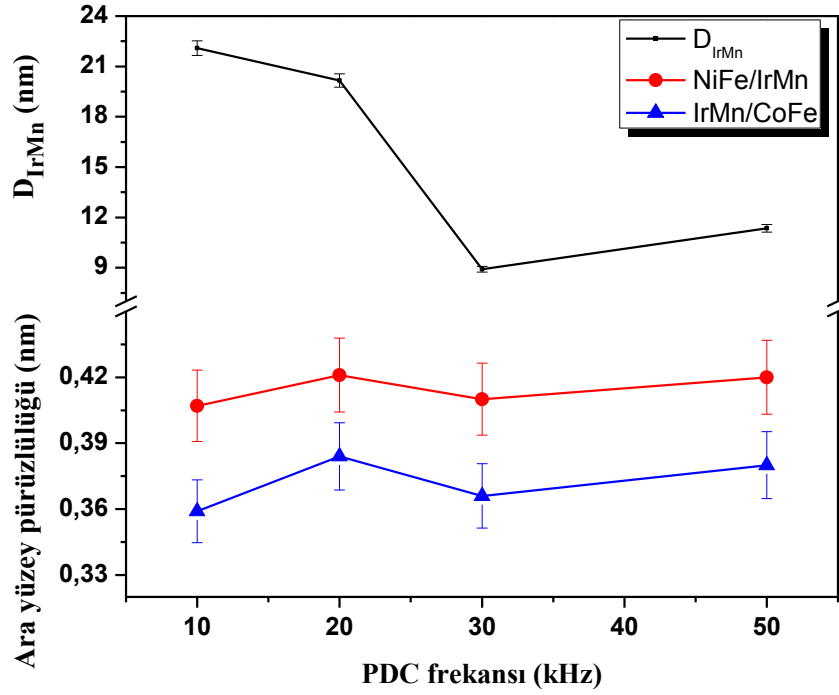
Çizelge 4.5. Değişen PDC frekansına göre üretilen numunelerdeki tabakaların üst ara yüzey pürüzlülük değerleri

PDC frekansı (kHz)	Tabakaların üst ara yüzey pürüzlülükleri (nm)							
	Ta	Ru	Ta	NiFe	IrMn	CoFe	Ta	Ta ₂ O ₅
10	0,47	1,23	0,55	0,41	0,36	0,52	0,43	0,44
20	0,36	0,41	0,55	0,42	0,38	0,53	0,38	0,42
30	0,49	0,91	0,54	0,41	0,37	0,53	0,49	0,49
50	0,91	0,99	0,55	0,42	0,38	0,53	0,42	0,42

Çizelge 4.4'te verilen gerçek tabaka kalınlıklarına bakıldığında, 20 kHz PDC üretimine ait numunede Ru tabakasıyla, öncesinde ve sonrasında büyütülen Ta tabakalarının kalınlıkları diğer numunelerinkine göre oldukça farklı değerlere sahiptir. Ayrıca Çizelge 4.5'te verilen ara yüzey pürüzlülüğü değerlerinde de Ru ve ikinci Ta tabakasının pürüzlülük değerleri de diğer numunelere göre farklılık gösterdi. Ancak Ta/Ru/Ta üçlü tabakasının toplam kalınlığı bütün numuneler için yaklaşık aynı değere sahiptir.

NiFe tabakası kalınlığı ile ilgili olarak, Yen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [62], PDC frekansı düştükçe kaplama hızının artması beklenirken, NiFe tabakası için bütün frekanslarda yaklaşık aynı kalınlık elde edildiği için, böyle bir etki gözlenmedi. NiFe tabakasında gözlenen bir diğer etki ise, NiFe tabakasının altındaki Ta tabakası ile olan difüzyonu sonucunda oluşan manyetik ölü tabaka (*magnetic dead layer*) bölgesidir. Kowalewski ve arkadaşları [54] Ta çekirdek tabakası kullanılan filmlerde [Ta/Ni₈₁Fe₁₉/Cu] NiFe permalloy ile olan ara yüzeyde $0,6 \pm 0,2$ nm kalınlığında manyetik ölü tabaka gözlemişlerdir. Zhao ve arkadaşları [69] bu tabakayı 1,6 nm olarak bulmuşlardır. Öksüzoğlu ve arkadaşları [4] ise 2 nm civarında bir kalınlığı rapor etmişlerdir. Ta'nın yüzey enerjisi ($3,15 \text{ J/m}^2$) Ni'ninkinden ($2,45 \text{ J/m}^2$ [54]) daha yüksek olduğu için alt tabaka olan Ta üzerine büyütülen NiFe tabakası belirli bir derinliğe kadar tabakalar arası karışım oluşturabilir [4,54,69].

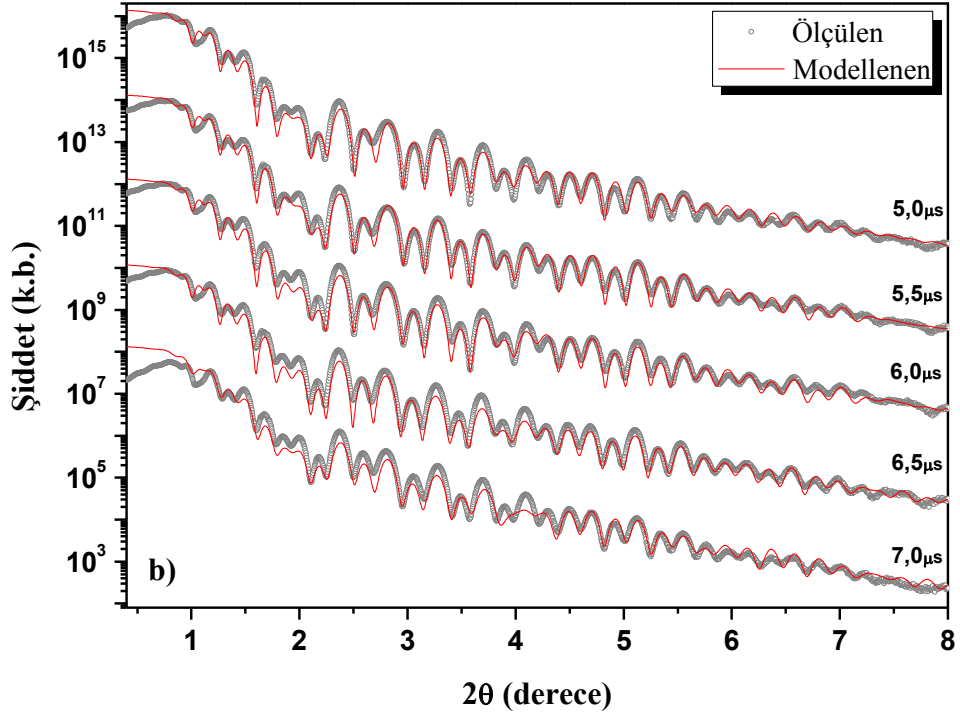
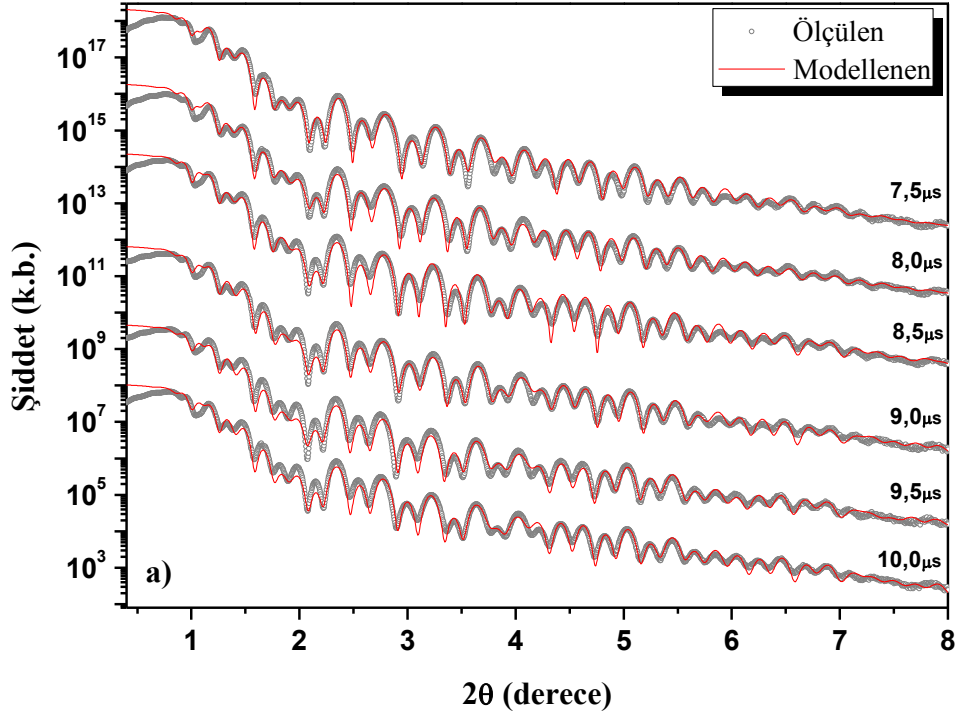
Üretilen sistemlerdeki, NiFe, IrMn ve CoFe tabakalarının pürüzlülük değerleri IrMn tane boyutu ile birlikte Şekil 4.8'de gösterildi.



Şekil 4.8. PDC frekansına göre IrMn tane boyutu ile NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülük değerleri

NiFe tabakasının ara yüzey pürüzlülük değerleri arasında en düşük pürüzlülüğe sahip numuneler 10 ve 30kHz PDC frekansı ile üretilmiş numuneler olarak görülmektedir. Buna karşın en yüksek IrMn, dolayısıyla NiFe tane boyutlarına 10 ve 20kHz numuneleri sahiptir. Buradan çıkan sonuç, PDC frekansının azalması ile tane boyutunun artarken, yüzey pürüzlülüğünün bundan bağımsız değiştiğidir. IrMn tabakası da NiFe'nin PDC frekansı ile pürüzlülük değişimine benzer değişim gösterdi.

PDC ters voltaj süresinin değiştirildiği EB sistemlerini oluşturan tabakaların kalınlık (Çizelge 4.6) ve pürüzlülük değerleri (Çizelge 4.7) gösterildi.



Şekil 4.9. Farklı PDC ters voltaj sürelerinde üretilmiş EB sistemlerinin XRR ölçüm ve teorik modelleme eğrileri; a) 7,5-10 μs ve b) 5-7 μs

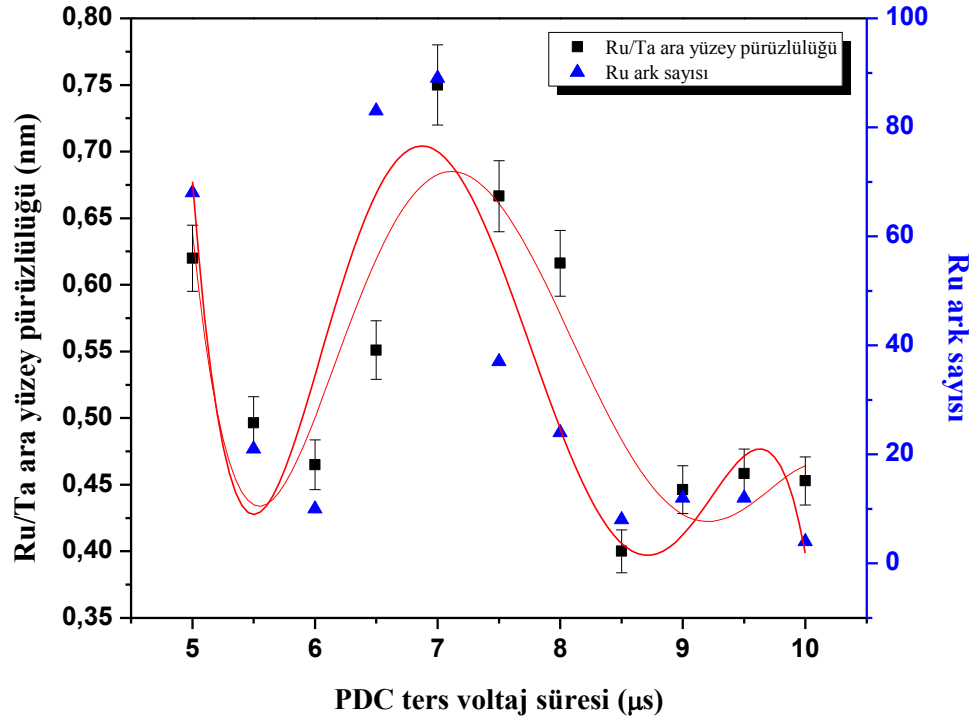
Çizelge 4.6. Değişen PDC ters voltaj süresine göre üretilen numunelerdeki tabakaların gerçek kalınlık değerlerinin değişimi

PDC ters voltaj süresi (µs)	Tabakaların gerçek kalınlıkları (nm) (+/- %2)							
	Ta	Ru	Ta	NiFe	IrMn	CoFe	Ta	Ta ₂ O ₅
10,0	5,93	8,53	4,52	5,85	10,71	1,73	4,79	1,49
9,5	5,95	8,62	4,50	5,69	10,71	1,85	4,76	1,49
9,0	5,58	9,03	4,41	5,75	10,39	2,03	4,64	1,53
8,5	5,85	8,52	4,55	5,85	10,82	1,48	4,66	1,56
8,0	5,96	8,51	4,26	5,99	10,66	1,52	4,57	1,64
7,5	5,94	8,19	4,51	5,86	10,40	1,78	4,71	1,60
7,0	5,94	8,18	4,59	6,01	10,15	1,74	4,57	1,70
6,5	5,44	8,85	4,34	5,91	10,24	1,99	4,64	1,49
6,0	5,38	8,63	4,47	5,79	10,65	1,70	4,58	1,61
5,5	5,28	8,50	4,72	5,73	10,46	1,91	4,51	1,70
5,0	5,46	8,51	4,62	5,87	9,99	2,05	4,65	1,66

Çizelge 4.7. Değişen PDC ters voltaj süresine göre üretilen numunelerdeki tabakaların üst ara yüzey pürüzlülük değerleri

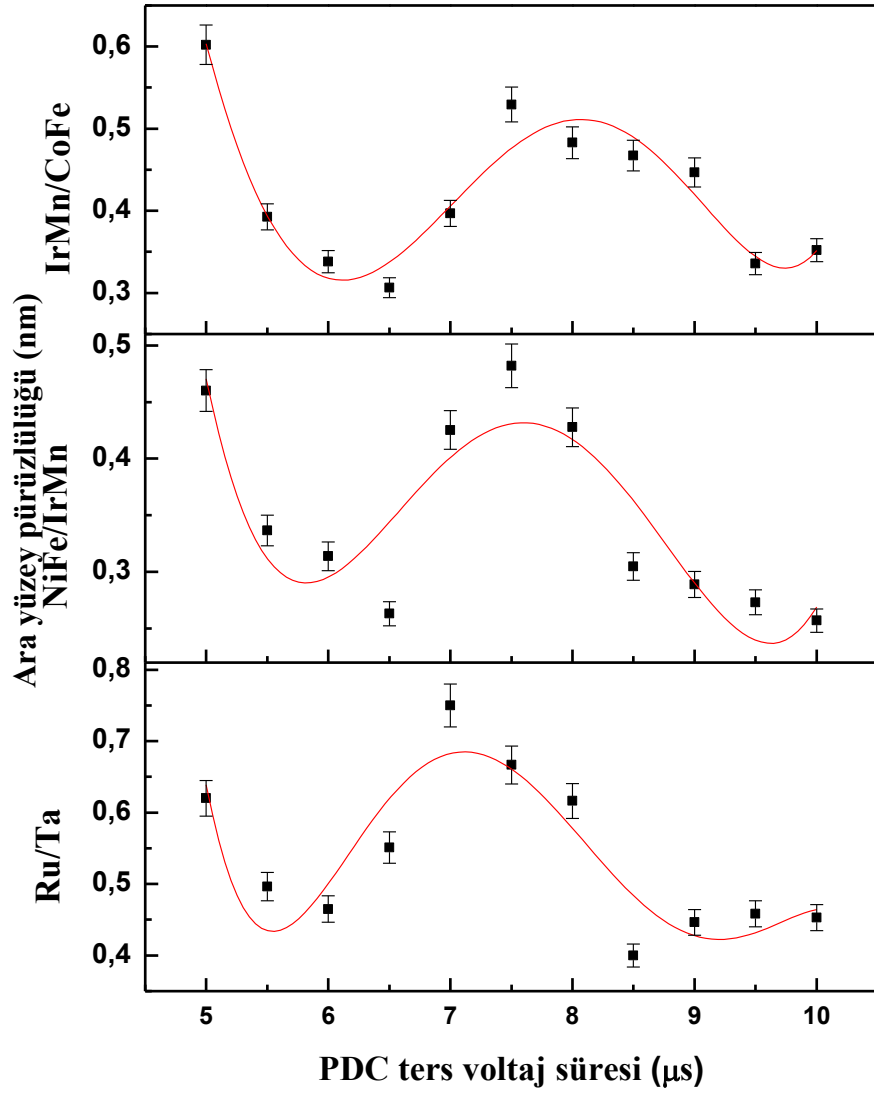
PDC ters voltaj süresi (µs)	Tabakaların üst ara yüzey pürüzlülükleri (nm) (+/- %2)							
	Ta	Ru	Ta	NiFe	IrMn	CoFe	Ta	Ta ₂ O ₅
10,0	0,44	0,45	0,46	0,26	0,35	0,48	0,44	0,49
9,5	0,45	0,46	0,44	0,27	0,34	0,49	0,47	0,45
9,0	0,46	0,45	0,44	0,29	0,45	0,47	0,48	0,43
8,5	0,42	0,40	0,46	0,30	0,47	0,57	0,46	0,50
8,0	0,60	0,62	0,56	0,43	0,48	0,63	0,48	0,54
7,5	0,62	0,67	0,53	0,48	0,53	0,71	0,54	0,53
7,0	0,79	0,75	0,49	0,43	0,40	0,41	0,48	0,46
6,5	0,60	0,55	0,55	0,26	0,31	0,55	0,48	0,47
6,0	0,47	0,47	0,45	0,31	0,34	0,51	0,45	0,46
5,5	0,55	0,50	0,48	0,34	0,39	0,50	0,44	0,46
5,0	0,65	0,62	0,56	0,46	0,60	0,53	0,47	0,54

Bu numune serisinde Ru/Ta ara yüzey pürüzlülüğünün üretim sırasında gözlenen ark sayısı değişimi ile bağlantılı olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. PDC ters voltaj süresine göre Ru hedefinde gözlenen ark sayısı ve Ru/Ta ara yüzey pürüzlülük değerleri

Bunun yanı sıra, serideki numunelerin Ru/Ta, NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülük değerlerinin de birbirlerinden etkilendiği gözlemlendi. Sonuçlar Şekil 4.11’de verildi.

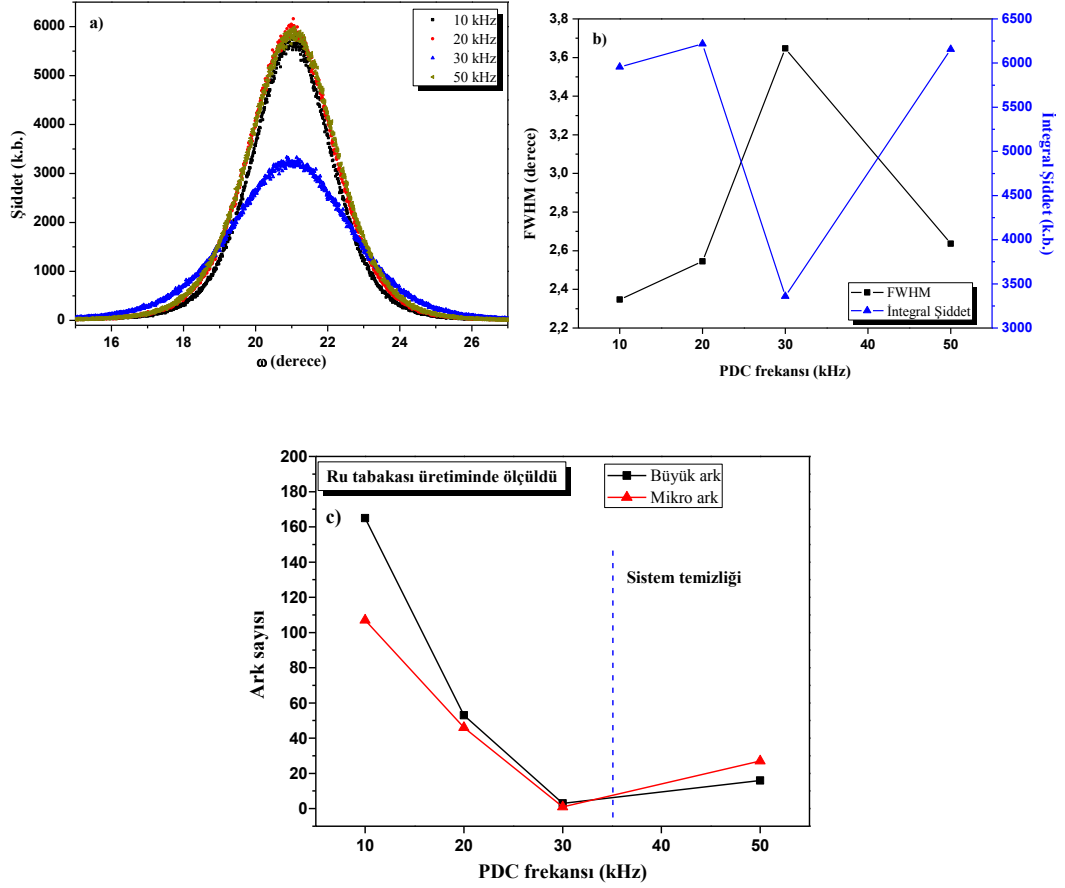


Şekil 4.11. PDC ters voltaj sürelerine göre değişen Ru/Ta, NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülük değerleri

Şekil 4.11'deki grafikler göz önüne alındığında PDC ters voltaj süresinin, Ru/Ta ara yüzeyinden başlayarak sistem içerisindeki bütün ara yüzeylere etki ettiği sonucu çıkmaktadır.

4.2.4. Salınım eğrisi tekniği analizi

PDC frekansı değiştirilerek üretilen numunelerin XRD θ - 2θ ölçümlerinden elde edilen ve en yüksek şiddete sahip olan Ru HSP (0002) fazının üzerinden yapılan RC ölçümleri sonucunda elde edilen RC eğrileri ve ilgili sonuçları Şekil 4.12(a, b, c)'de verildi.

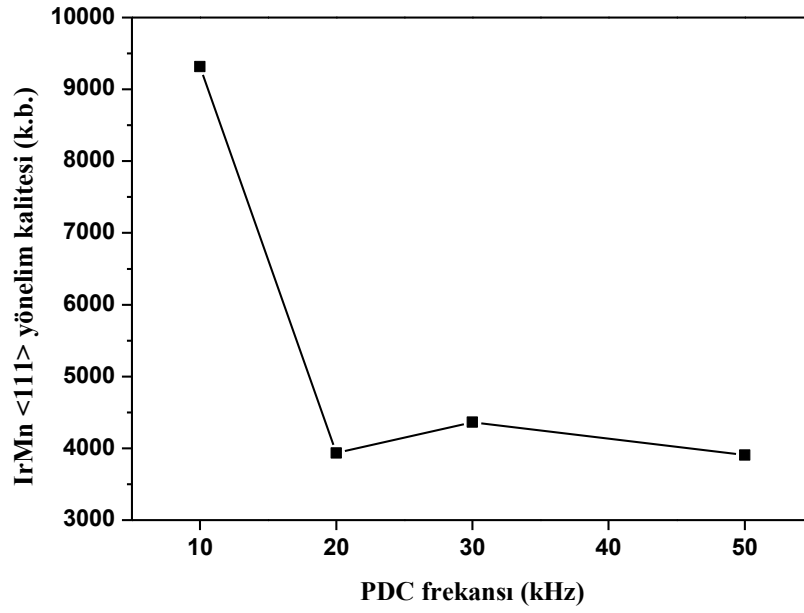


Şekil 4.12. Değişen PDC frekansına göre üretilen EB sistemlerinin a) Ru (0002) kırınım doruğu üzerinden ölçülen RC eğrileri, b) RC eğrilerinden elde edilen FWHM ve şiddet değerleri ve c) üretim sırasına göre gözlenen ark sayılarının PDC frekansına göre değişimi

Şekil 4.12(a) ve Şekil 4.12(b)'de görüldüğü gibi 30kHz PDC frekansı ile üretilen numunedeki Ru HSP kristali fazının kristal kalitesi, diğer numunelere göre düşüktür. Şekil 4.12 (b)'de gösterilen doruk profil fiti sonucunda elde edilen FWHM/integral şiddet grafiğinde, integral şiddet değerleri, alansal şiddet yerine doruğun şiddeti olarak grafiğe aktarıldı. Bunun nedeni Ru HSP (0002) fazının kırınım doruğu altında IrMn, NiFe ve CoFe tabakalarının da doruklarının

bulunmasından dolayı alansal şiddette bu tabakaların doruklarının da hesaba katılacağından şiddet değerinin sapma ihtimalinin olmasıdır. Şekil 4.12 (c)'de ise üretim sırasına göre Ru tabakasının büyütülmesi sırasında gözlenen büyük ve mikro arkların (kıvılcım) sayısı gösterildi. NiFe tabakasının 50 ve 30kHz PDC frekansları ile büyütüldüğü üretimleri arasında Ru hedefinin bulunduğu kaynağın parçaları aşırı derecede Ru malzemesi ile kaplandığı ve bunların hedef üzerine dökülerek ark sayısını arttırdığı bilindiği için (Şekil 4.12(c)) temizlendi. Vakum odacığının açılması gerektiği için ve ardından temizlenmiş parçaların takılmasından dolayı, yeteri kadar ön-temizleme süreci (*pre-cleaning sputtering*) yapılmasına rağmen sistemin aynı kristal kalitesinde Ru büyütmediği, yani önceki kondisyonunu yakalayamadığı, elde edilen RC eğrileri üzerinden yapılan doruk profil fiti eğrilerinden elde edilen değerlerden (Şekil 4.12(b)) anlaşıldı. Aynı numunenin tabaka kalınlıklarında (Çizelge 4.4) $\langle 110 \rangle$ yönünde büyüyen CoFe tabakasının diğer numunelerden daha ince olması da düşük kristal yönelimi nedeniyle açıklanabilir. Bu sonuç XRD doruklarından hesaplanan Ru tane boyutlarına da (Şekil 4.2(b)) yansımaktadır. Düşük kristal kalitesi olan, yani düşük kırınım şiddeti ve geniş bir FWHM değeri veren 30 kHz PDC üretimi numunesinin Ru tabakasında düşük tane boyutu gözlenmesinin nedeni sistemin yeteri kadar kondisyona ulaşmadığı için ortamdaki kirliliklerin Ru tabakasının büyümesine etki ettiği düşünülebilir. Buna karşılık Şekil 4.12(b)'den elde edilen doruk profil fit değerlerine göre 10kHz ile NiFe üretimi yapılan numune en ideal kristal kalitesine sahiptir. Bunun sebebi, yüksek tane boyutuna sahip NiFe tabakasının ısıtma işlemi sırasında Ta tabakası üzerinden Ru tabakasının yapısını etkilediği ve kristal kalitesini düzenlemesi olabilir.

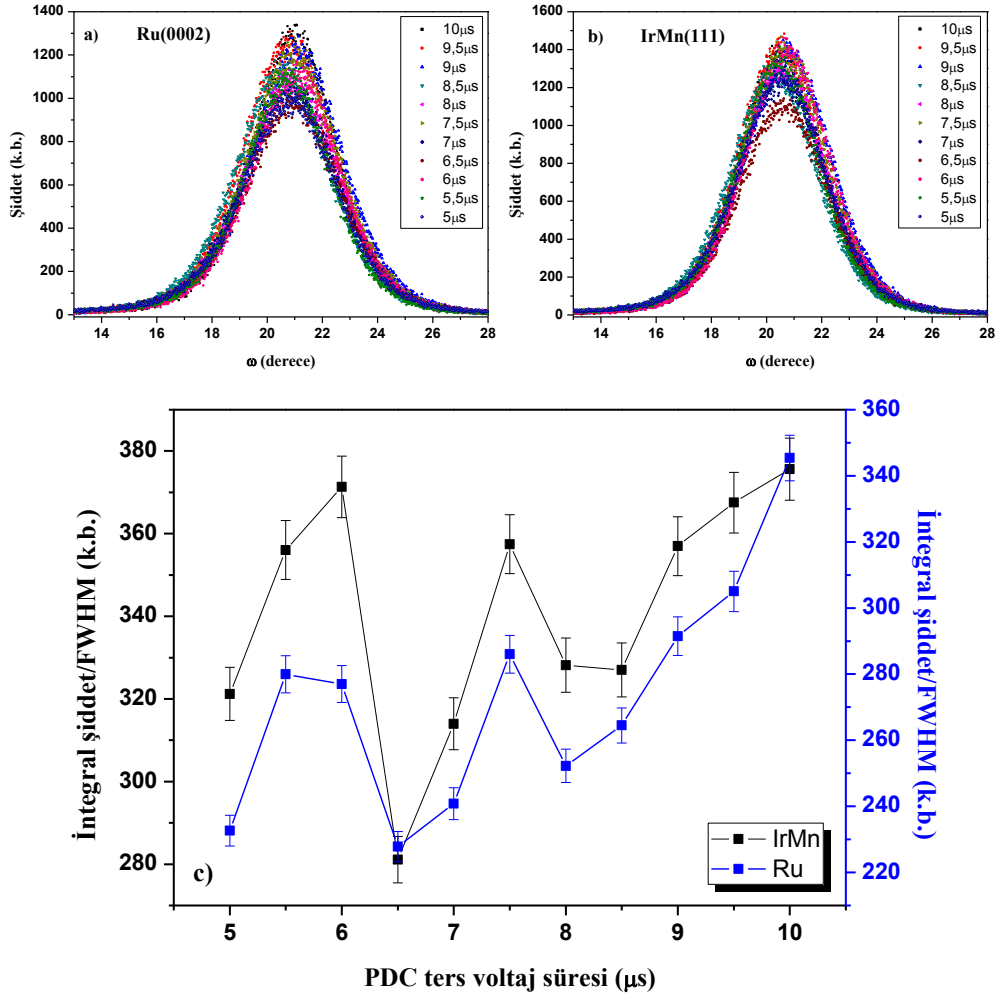
Numunelerin RC ölçümlerinden IrMn yönelimi belirlenemediğinden XRD θ - 2θ ölçümlerinden elde edilen kırınım desenlerinden yapılan IrMn doruk profil fit değerlerinden FWHM ve alansal integral şiddet değerleri elde edildi ve kristal yönelim oranı (alansal integral şiddet/WHM şeklinde) hesaplandı. Yönelim kalitesinin PDC frekansına göre değişimi Şekil 4.13'te gösterildi.



Şekil 4.13. PDC frekansına göre değişen IrMn <111> yönelim oranı

Şekil 4.13'te gösterilen grafiğe göre en yüksek <111> kristal yönelimine sahip numune 10 kHz PDC frekansı ile üretilen numunedir.

PDC ters voltaj süresi değiştirilerek üretilen numunelerin XRD ölçümlerinde YMK IrMn(111) ve HSP Ru(0002) dorukları belirgin bir şekilde gözlemlendiği için bu seride hem IrMn(111) hem de Ru(0002) dorukları üzerinden RC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm eğrileri ve bu eğrilerden elde edilen kristal yönelim oranları Şekil 4.14'te verilmiştir.

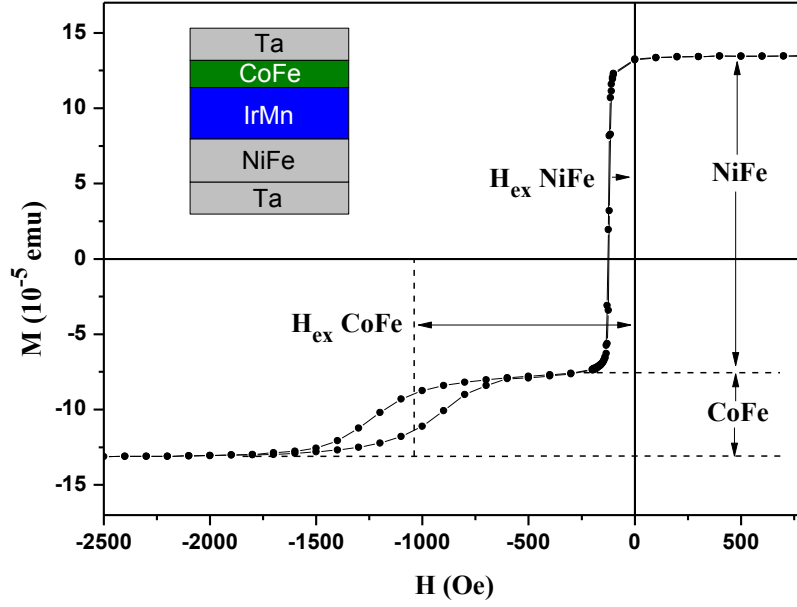


Şekil 4.14. Değişen PDC ters voltaj süresine göre değişen a) Ru(0002), b) IrMn(111) doruklarının RC profilleri ve c) Ru(0002) ve IrMn(111) fazlarının kristal yönelim oranları

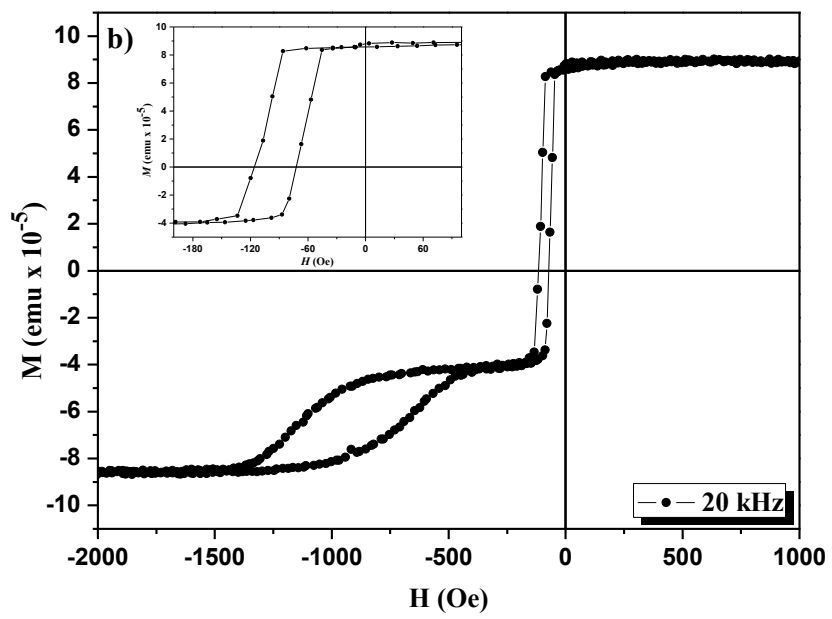
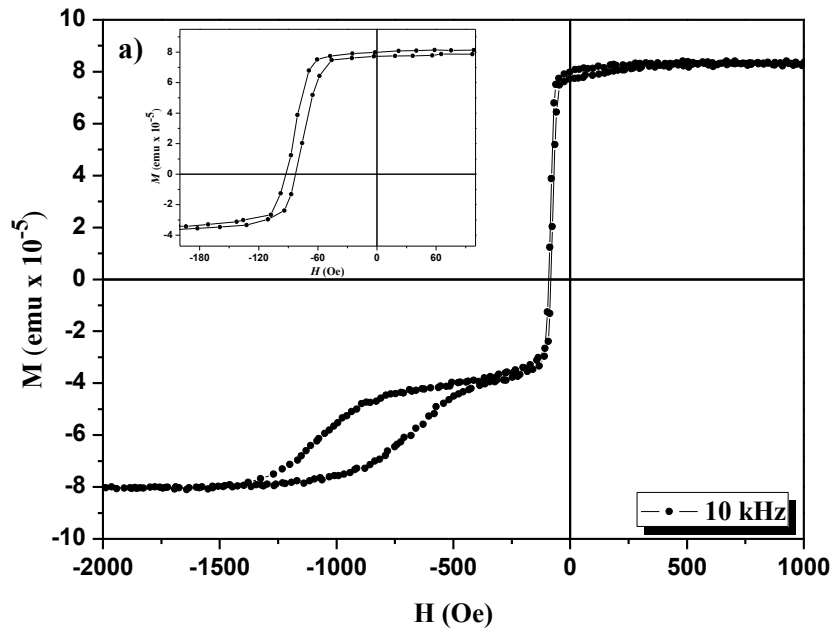
Şekil 4.14'te görüldüğü gibi yüksek ters voltaj sürelerinde hem Ru(0002) hem de IrMn(111) kristallerinin yönelim oranlarında bir iyileşme olmaktadır.

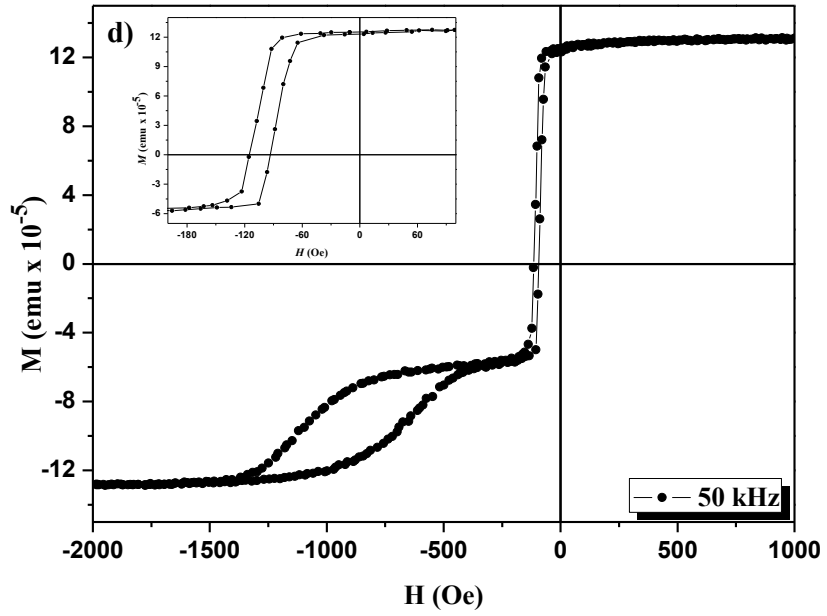
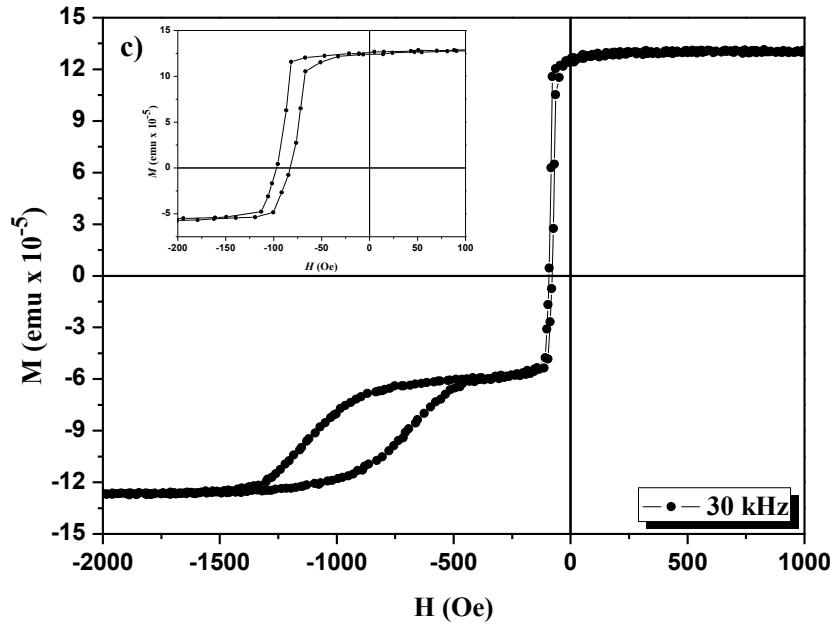
4.3. Manyetik Özellikler Ölçümü Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin manyetik histerezis ölçümleri Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü'nde bulunan, Doç. Dr. Şadan Özcan'ın sorumluluğundaki PPMS'nin VSM tekniği ile oda sıcaklığında tamamlanmıştır. Ölçüm sonuçları (Şekil 4.16(a, b, c, d)) ve histerezis eğrilerinden elde edilen NiFe ve CoFe tabakalarına ait H_{ex} H_c alanları Çizelge 4.8'de verildi. Bu değerler elde edilirken herhangi bir modelleme kullanılmadı. Şekil 4.15'te gösterilen örnek bir manyetizasyon grafiğinde NiFe ve CoFe tabakalarının H_{ex} alanlarının eğri üzerindeki yerleri gösterildi. NiFe tabakasının H_{ex} değeri NiFe/IrMn ara yüzeyindeki etkileşimi ifade ederken, CoFe tabakasının H_{ex} değeri IrMn/CoFe ara yüzeyindeki manyetik etkileşmeyi gösterir.



Şekil 4.15. NiFe/IrMn/CoFe EB sisteminin örnek manyetizasyon eğrisi [4]





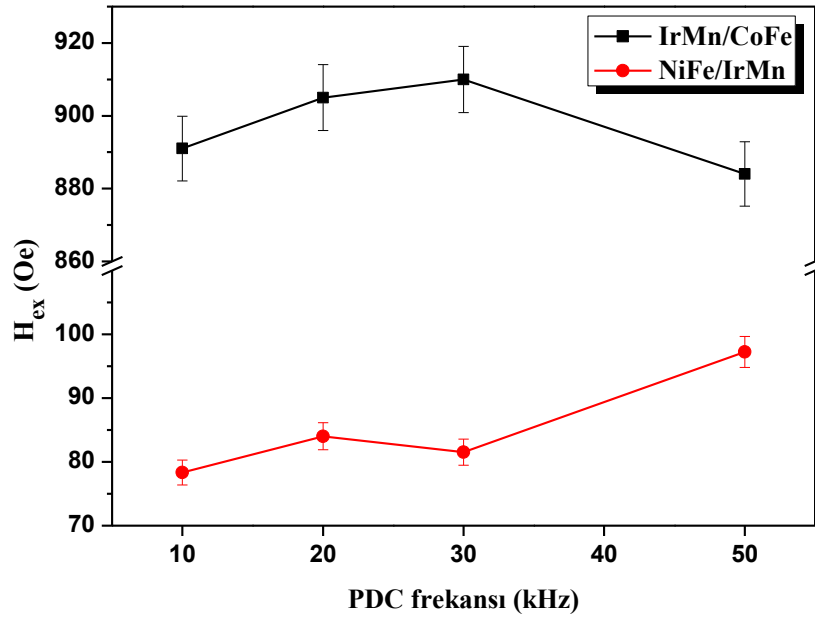
Şekil 4.16. Farklı PDC frekans değerleriyle a) 10 kHz, b) 20 kHz, c) 30 kHz ve d) 50 kHz üretilen NiFe tabakasına sahip EB sistemlerinin M-H döngüleri

Çizelge 4.8. Farklı PDC frekans değerleriyle üretilen NiFe tabakasına sahip EB sistemlerinin H_{ex} ve H_c değerleri.

PDC Frekans (kHz)	CoFe		NiFe		D_{IrMn} (nm)
	H_{ex} (Oe)	H_c (Oe)	H_{ex} (Oe)	H_c (Oe)	
10	891	182	78,32	5,2	22,09
20	905	218	84,02	20,4	20,16
30	910	192	81,51	7,25	8,91
50	884	201	97,22	10,25	11,34

4.3.1. CoFe ve NiFe tabakalarının H_{ex} alanları ile ilgili sonuçlar

Üretilen numunelerin CoFe ve NiFe tabakalarının H_{ex} alanları ile ilgili sonuçlar aşağıda verildi.

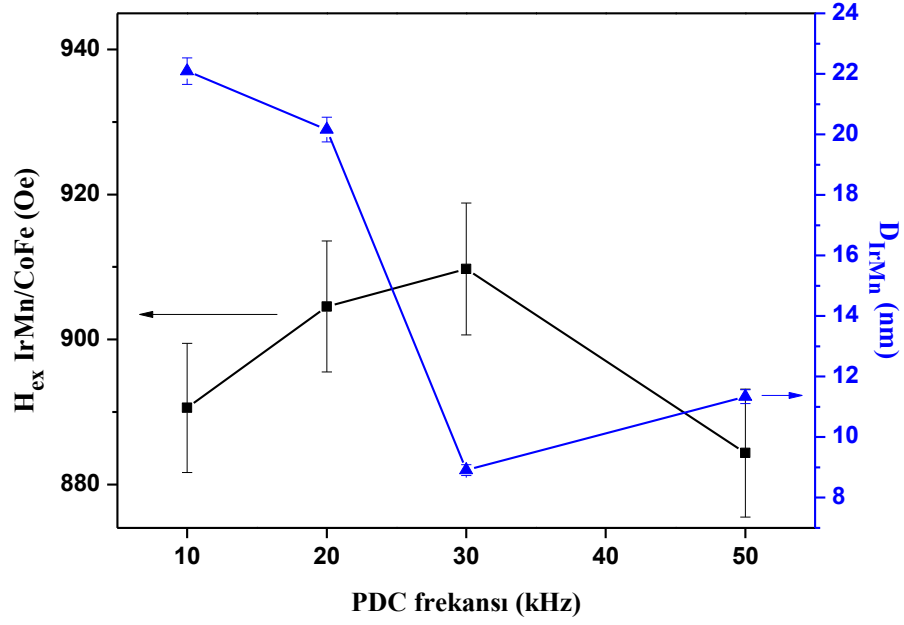


Şekil 4.17. PDC frekansına bağlı EB sistemlerinde ölçülen IrMn/CoFe ve NiFe/IrMn H_{ex} değerlerinin değişimi

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi PDC frekansına bağlı olarak CoFe tabakasının H_{ex} alanı, hata payları da dikkate alınırca dikkat çekici bir şekilde değişmemektedir. Hata paylarının CoFe tabakası için daha fazla olmasının nedeni

bu tabakanın histerezis eğrisinin NiFe tabakasına göre daha çok eğriliğe sahip olması ve bu nedenle Şekil 4.17’de gösterilen H_{ex} değeri elde edilirken %1 lik bir sapma göstermesidir. Ancak NiFe tabakasının, büyük tane boyutuna sahip 10kHz PDC frekansıyla üretilen tabakanın H_{ex} alanı diğer numunelere göre daha düşüktür. Buna göre, tane boyutu arttıkça büyüyen domain boyutları ile NiFe H_{ex} alanının düştüğü şeklinde yorumlanabilir. Literatürde tane boyutu ile H_{ex} alanının etkilendiğini belirten çalışmalar [13,26,28,30,32,33] mevcuttur. Bu çalışmalarda genel görüş, tane boyutunun artması ile H_{ex} alanının artacağı yönündedir. Ancak bahsedilen tane boyutları film kalınlığıyla yaklaşık eşit olduğunda bu yorum yapılır. Bu çalışmada elde edilen tane boyutları (IrMn için) en yüksek 22 nm en düşük 9 nm aralığında olduğundan ötürü tane boyutları yaklaşık olarak en az film kalınlığı kadardır. Tane boyutunun değişimi NiFe tabakasından kaynaklandığı için aynı etki NiFe tabakasında da beklenir. Bu durumda geniş tanelerde domain yapılarının genişlemesiyle manyetik olarak set edilemeyecek domainler gözlenir [39]. Yapılan başka bir çalışmada da [68] AFM ve FM domain yapılarında domain duvarlarının kritik bir kalınlıktan sonra duvar içerisinde bulunan dengesiz manyetizasyona sahip spinlerden dolayı EB etkisinin kayba uğrayacağı [69] ileri sürülmüştür. Bu durumda böyle bir etkinin varlığı düşünülebilir. CoFe ve NiFe tabakalarının farklı H_{ex} davranışları göstermelerinin nedeni NiFe/IrMn sisteminin alt, IrMn/CoFe sisteminin üst EB sistemi şeklinde davranmasıdır. Tabaka ve Kalınlık Seçimi Bölümü’nde bahsedildiği gibi alt ve üst düzene sahip EB sistemleri arasındaki H_{ex} farkının, IrMn’nin <111> film yöneliminden kaynaklandığı iddia edilmiştir [17, 25-27].

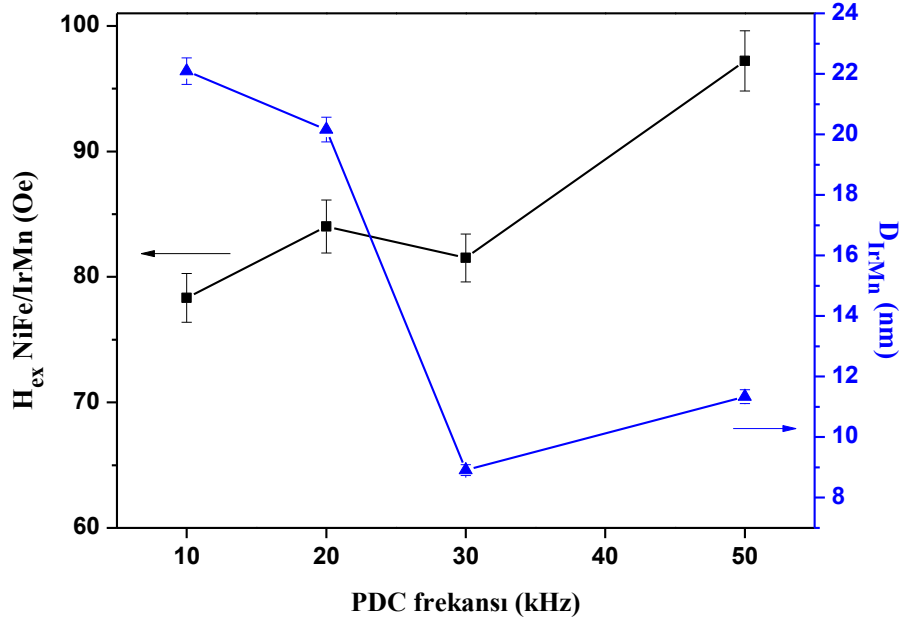
Üretilen çoklu tabakalardaki CoFe tabakasının H_{ex} alanlarının IrMn tane boyutuna göre değişimi Şekil 4.18’de gösterildi.



Şekil 4.18. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu ve IrMn/CoFe H_{ex} alanı

Şekil 4.18'deki grafik incelendiğinde, CoFe tabakasının H_{ex} alanının IrMn tane boyutu ile bütün numunelerde ters orantılı olarak değiştiği gözlemlendi. Bu ilişkinin nedeni tam olarak bilinmemektedir [39], ancak tane içerisindeki yapı durumlarından [16,33,35,56,69-71], tavlama işlemi sonrası değişen tane boyutu dağılımından [35] veya tane içerisindeki manyetik durumlardan kaynaklandığı tahmin edildi. H_{ex} 'in kristal yönelim kalitesi ile arasında bir ilişki [17,26,28,31,49,52,72] bulunamadı. Bu duruma benzer örnekler literatürde [16,30] mevcuttur.

Üretilen çoklu tabakalardaki NiFe tabakasının H_{ex} alanlarının IrMn tane boyutuna göre değişimi Şekil 4.19'da gösterildi.

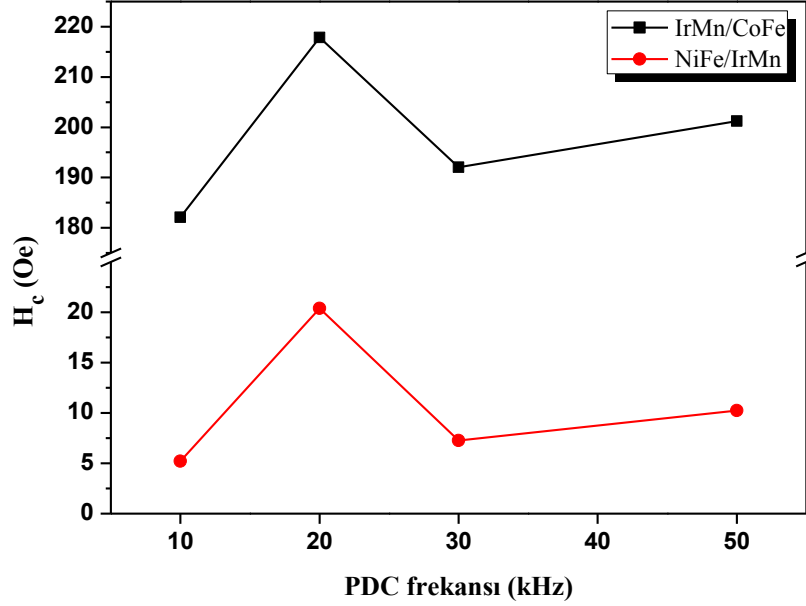


Şekil 4.19. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu ve NiFe/IrMn H_{ex} alanı

Şekil 4.19'da gösterilen grafik incelendiğinde IrMn AFM tabakasının CoFe'ye olduğu kadar NiFe tabakasına da EB etkisi uyguladığı, bu durumda üretilen sistemlerin FM/AFM/FM üçlü tabakalar gibi davrandığı ve her iki AFM/FM ara yüzeyinde EB etkisinin var olduğu sonucu çıkar. NiFe tabakasının H_{ex} alanının, CoFe tabakasındaki H_{ex} alanlarından farklı olarak IrMn tane boyutu ile yüksek IrMn tane boyutlarında, tane boyutuyla ters orantılı olarak değiştiği gözlemlendi. Tane boyutu H_{ex} ilişkisi; tane boyutu yüksek filmlerin, geniş domain boyutlarından dolayı IrMn tarafından sabitlenmesinin zorlaşması ve sonuç olarak H_{ex} alanının düşmesi şeklinde açıklanır. 10 kHz numunesi bu durum için bir örnektir. Yani tane boyutu film kalınlığının üzerinde bir değere ulaştığında, tane içerisindeki domainlerin manyetik olarak set edilmesi zorlaşmaktadır. Bu da etkisini H_{ex} alanını düşürerek gösterir.

4.3.2. CoFe ve NiFe tabakalarının H_c alanları ile ilgili sonuçlar

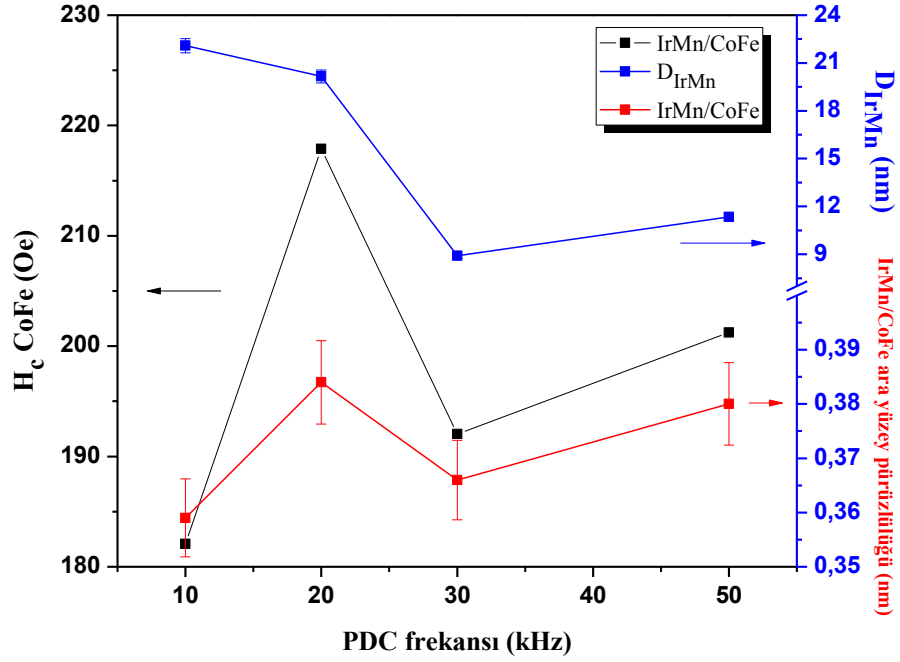
Üretilen numunelerin CoFe ve NiFe tabakalarının H_c alanları ile ilgili sonuçlar aşağıda verildi.



Şekil 4.20. PDC frekansına göre değişen CoFe ve NiFe tabakalarının H_c alanları

Şekil 4.20’de gösterilen PDC frekansı H_c alanları ilişkilerinde CoFe ve NiFe tabakaları aynı eğilimi gösterdi. H_c alan değerlerinin ara yüzey pürüzlülükleri ile arasında literatürdeki gibi [73] bir ilişki bulunmuştur. Ara yüzeyde görülemeyen manyetik düzensizliklerin H_c alanına etki ettiği de [40,71] bilinmektedir. Teknolojik uygulamalar için FM tabakanın H_c değerinin düşük olması istendiği [74] için H_c açısından en iyi numune 10 kHz numunesi olarak seçilir.

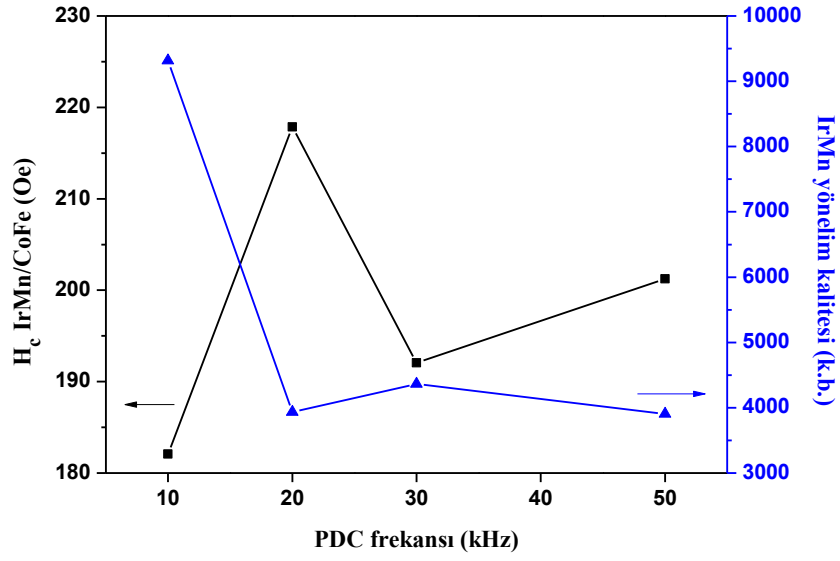
Üretilen çoklu tabakalardaki CoFe tabakasının H_c alanlarının, IrMn tane boyutunun ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülüğünün PDC frekansı ile değişimi Şekil 4.21’de gösterildi.



Şekil 4.21. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu, IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülüğü ve CoFe H_c alanları

Şekil 4.21’de gösterilen grafikteki sonuçlara göre CoFe tabakasının H_c alanının IrMn yüzey pürüzlülüğü ile uyumlu bir şekilde değiştiği gözlemlendi. Bu durumda ara yüzey etkilerine bağlı olan H_c alan değeri 20 kHz numunesinde AFM/FM ara yüzeyinde bulunan ve FM tabakanın manyetizasyon dönüşlerinde FM spinleri ile sürüklenen ve sonuçta H_c’yi arttıran AFM spin bölgelerinin varlığı [16] düşünülebilir. Düşük pürüzlülük gösteren diğer numunelerin ara yüzeylerinde AFM ve FM domainlerindeki spin yapıları birbirinden ayrı şekilde oluştuğu için manyetizasyonu bozulmuş spin bölgelerinin bulunmadığı, bunun sonucunda H_c alanının azaldığı tahmin edildi. Bunun yanı sıra CoFe-H_c değerinin IrMn tane boyutu ile 10kHz numunesi dışında benzer eğilimde değiştiği gözlemlendi.

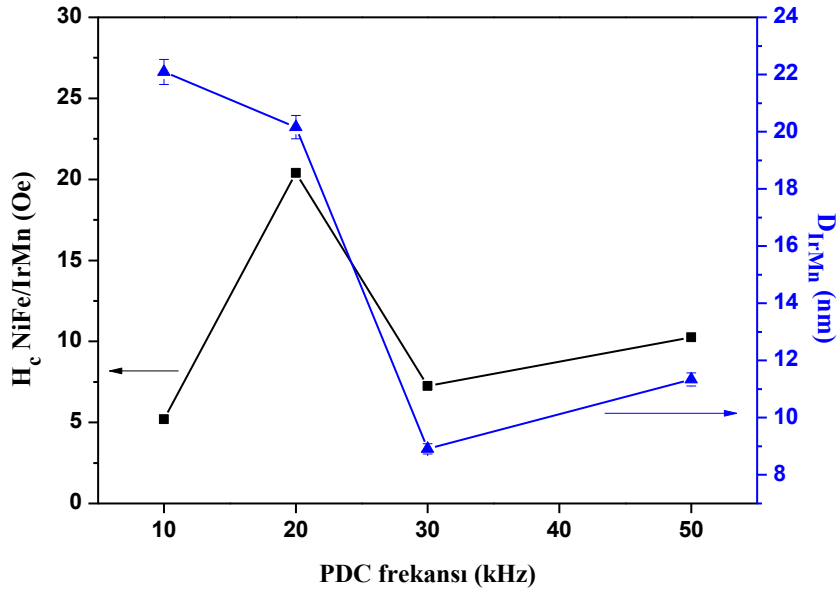
H_c alanının IrMn’nin <111> yönelimine bağlı değiştiği literatürde [52] gözlemlenmiştir. Bu ilişkiyi incelemek için XRD θ -2 θ ölçümlerinden elde edilen kırınım desenlerinde yapılan IrMn doruk profil fit değerlerinden FWHM ve alansal integral şiddet değerleri kullanılarak kristal yönelim kalitesi (integral şiddet/WHM şeklinde) hesaplandı. Yönelim kalitesine bağlı H_c alanının değişimi Şekil 4.22’de gösterildi.



Şekil 4.22. PDC frekansına göre değişen IrMn tercihli yönelim derecesi ve CoFe H_c alanı

Şekil 4.22'de gösterilen grafiğe göre IrMn kristal yöneliminin de, CoFe- H_c alanını 10 kHz numunesinde etkilediği sonucu çıkar. En yüksek IrMn tane boyutuna sahip ve en iyi IrMn kristal yönelim oranında büyüyen 10 kHz numunesi en düşük CoFe- H_c alanını gösterdi.

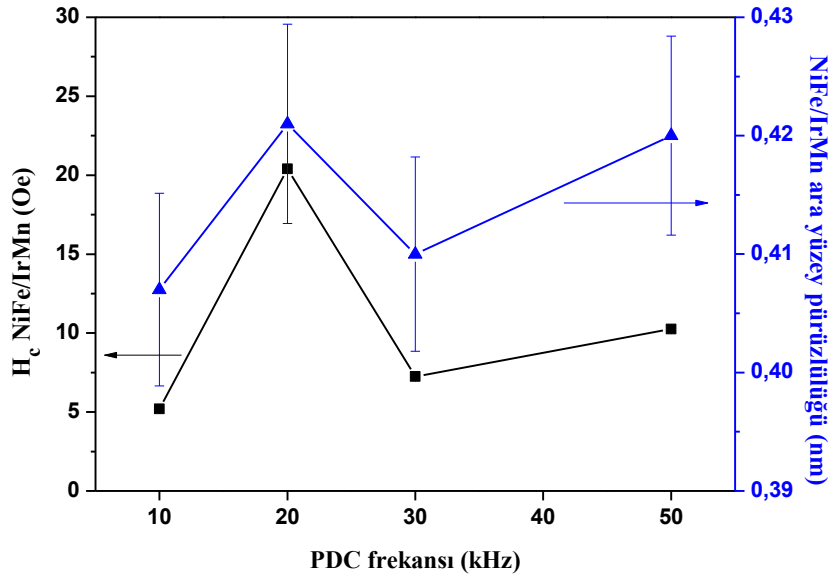
Üretilen numunelerin NiFe tabakasının H_c alanlarındaki değişimin IrMn, dolayısıyla NiFe tane boyutuna bağlı olduğu gözlemlendi. Tane boyutu H_c ilişkisi Şekil 4.23'te gösterildi.



Şekil 4.23. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu ve NiFe H_c alanı

Şekil 4.21 ve Şekil 4.23'e göre hem NiFe hem de CoFe H_c alanlarının tane boyutuna bağlı olduğu gözlemlendi. Tane boyutuna göre doğru orantılı değişen NiFe- H_c alan değerleri arasında en büyük tane boyutuna sahip 10 kHz numunesi bu eğilimin dışında davrandı. Bunun sebebi, genişleyen IrMn tanelerinin domain boyutları büyüdükçe, NiFe/IrMn ara yüzeyindeki NiFe domainlerinin manyetizasyonu IrMn tabakasındaki domainlerin hepsi yerine kısıtlı bir kısmını manyetize etmesidir. AFM tabakasının FM tabakası manyetizasyonundan, tane boyutu veya tabaka kalınlığına bağlı olarak etkilenmesi spin eşlenmesi ve eşlenmenin bozulması (*spin coupling/decoupling*) olarak bilinir. 10 kHz numunesinde spin eşlenmesinin bozulması olgusunun var olduğu düşünüldü. Üst düzene sahip EB sistemlerinde bu etki literatürde [52] gözlenmiştir.

Bunların yanı sıra, NiFe tabakasının H_c değeri ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki Şekil 4.24'te verildi.



Şekil 4.24. PDC frekansına göre değişen NiFe yüzey pürüzlülüğü ve H_c alanı

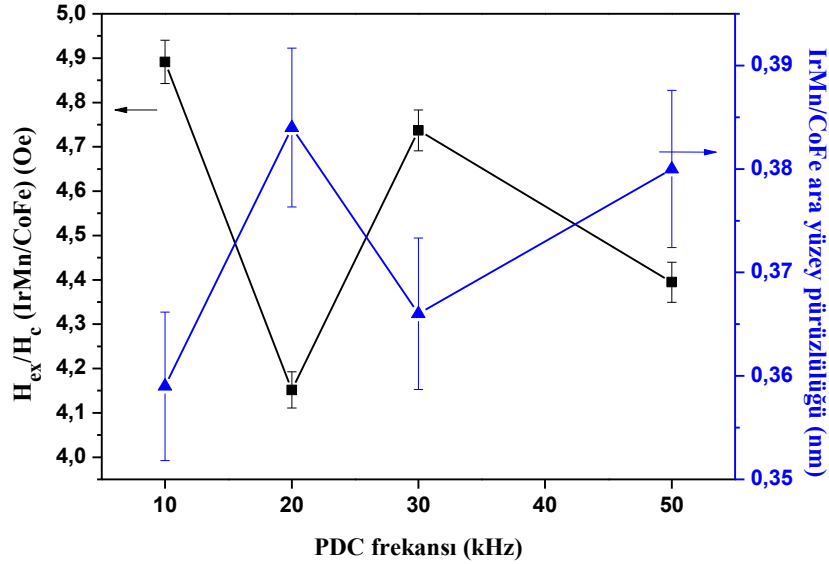
Şekil 4.24'te gösterilen ilişkiye göre NiFe tabakasının H_c alan değeri yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı olarak değişir. Bu etki CoFe tabakasında da gözlemlendiği gibidir. NiFe tabakasının H_c alanının, IrMn tabakasının kristal yönelimi ile arasında H_c -CoFe'deki gibi bir ilişki bulundu. Burada beklenen ise NiFe tabakasının IrMn tabakasından önce büyütülmesinden dolayı, bir üst düzene sahip EB sistemi oluşmasıdır. Alt düzene sahip EB sistemlerinde AFM tabakası önce büyütüldüğü için domain yapılanması kristallografik yönelimde oluşur ve bu

yapı, üzerine büyütülen FM tabakasını manyetik tek yönlülüğüne göre manyetize eder. Ancak üst düzene sahip EB sistemlerinde FM tabaka daha önce büyütüldüğü için AFM tabakasının uyguladığı manyetokristalin tek yönlülüğe bağlı olmadan büyür. Buna karşın bu numunelerde IrMn kristal yönelim oranına göre farklı değişimler gösteren H_c -CoFe ve H_c -NiFe değerleri gözlenmedi.

4.3.3. Üretilen EB sistemlerinde tabakaların H_{ex} - H_c alanları arasındaki ilişkiler

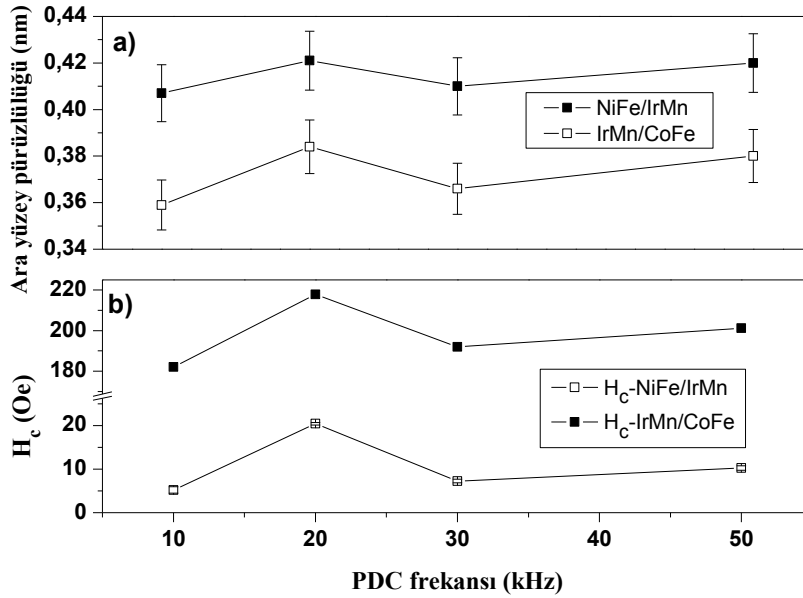
EB sistemlerinin teknolojik uygulamalarda kullanılması için CoFe tabakasının H_{ex} değerinin yanında H_{ex}/H_c oranının da dikkate alınması gerekir. Uygulamalarda yüksek H_{ex} ile birlikte düşük H_c , yani H_{ex}/H_c oranının yüksek olması beklenir. Örneğin Komagaki ve ark. [75] 2007 yılında IrMn/CoFe temelli EB sistemlerinde H_{ex} alanını H_c 'nin 4 katı olarak elde etmişlerdir. 2008 yılında ise Fernandez-Outon ve ark. [74] H_{ex} 'i H_c 'nin 5 katından daha fazla alan değerine çıkarmışlardır. Sonuç olarak H_{ex}/H_c oranı EB fenomenini meydana getiren AFM/FM ara yüzeyinin kalitesini belirlemede kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında üretilen EB sistemlerindeki CoFe tabakasının H_{ex}/H_c değerleri Şekil 4.25'te gösterildi.



Şekil 4.25. PDC frekansına göre değişen CoFe tabakasına ait H_{ex}/H_c oranı ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülüğü

Şekil 4.25'te görüldüğü gibi en yüksek H_{ex}/H_c oranı en büyük NiFe ve IrMn tane büyüklüğüne sahip 10 kHz PDC üretimine ait numunedir. Bu numunede H_{ex} H_c 'nin yaklaşık 4,9 katıdır ve bu durumda yukarıda bahsedilen çalışmalardaki [74,75] değerlere ulaşmıştır. Diğer numuneler de 20 kHz numunesi dışında göreceli olarak yüksek H_{ex}/H_c oranı gösterdiler. Ayrıca Şekil 4.25'ten ara yüzey pürüzlülüğünün H_{ex}/H_c oranına ciddi şekilde etki ettiği de gözlemlendi. Ara yüzey pürüzlülüğü ile H_{ex}/H_c oranı arasında ters orantılı bir uyum bulundu. Sonuç olarak, EB kalitesini iyileştiren önemli faktörlerden birisinin AFM tane boyutu olduğu, bir diğerinin ise AFM/FM ara yüzey pürüzlülüğü olduğu anlaşılır (Şekil 4.26).

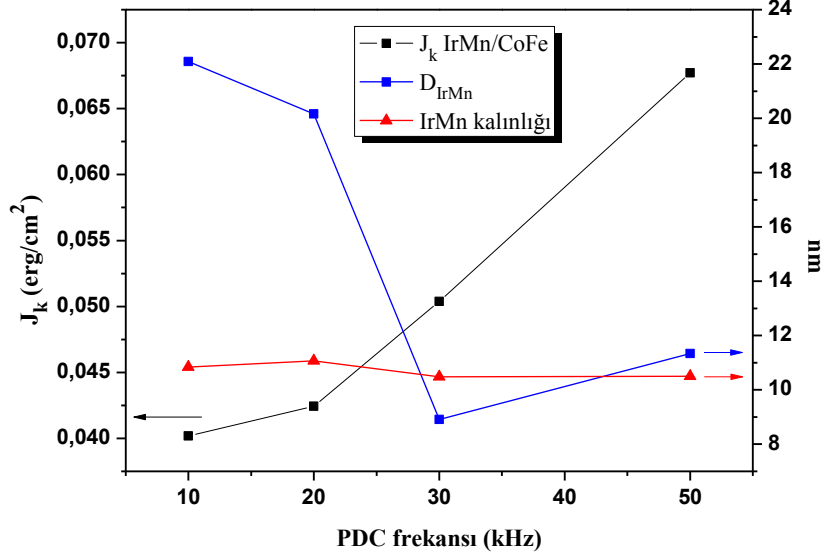


Şekil 4.26. PDC frekansına göre a)NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzey pürüzlülüklerinin ve b) NiFe/IrMn ve IrMn/CoFe ara yüzeylerinin H_c değerlerinin değişimi

Burada, tane boyutları yaklaşık en az film kalınlığı kadar büyük olduğundan dolayı domain duvarlarının AFM/FM ara yüzeyine paralel olması mümkün değildir [74]. Mauri [69] bu durumda manyetik eşleşme enerjisinin domain duvarları içerisinde saklanması öngören bir model sunmuştur. Buna göre tane boyutu arttıkça domain duvarlarının sayıları azalacağından EB etkisinde bir iyileşme olması beklenir ve Şekil 4.25'teki sonuç da bunu destekler niteliktedir.

Üretilen EB sistemlerinin IrMn/CoFe ara yüzey enerjileri (4.4) ile hesaplandı. Hesaplanan değerler Şekil 4.26'da gösterildi.

$$J_k = M_{FM} \cdot t_{FM} \cdot H_{ex} \quad (4.4)$$



Şekil 4.27. PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu, tabaka kalınlığı ve IrMn/CoFe ara yüzey enerjisi

Şekil 4.27'de gösterilen değerlere göre en yüksek J_k değerine sahip olan iki numune (30 ve 50 kHz numuneleri) en düşük tane boyutlarına sahip numuneler olarak bulundu. Bu sonuca göre J_k enerjisinin tane boyutuna göre ters orantılı olarak değiştiği anlaşılır. EB etkisi bir ara yüzey etkisi olduğundan ve ara yüzey enerjisinin Şekil 4.27'de görüldüğü gibi AFM tane boyutuna bağlı olmasından ötürü, tanelerin ve domainlerin boyutlarının ara yüzeylerde herhangi bir değişime uğramadığı sonucu çıkarılır. Manyetik özelliklerle ilişkili olarak, büyüyen tane boyutlarındaki spin yönelim dengesizliklerinin ara yüzey enerjisine ciddi şekilde etki ettiği görülmektedir.

4.4. Elektriksel Karakterizasyon Ölçümü Sonuçları

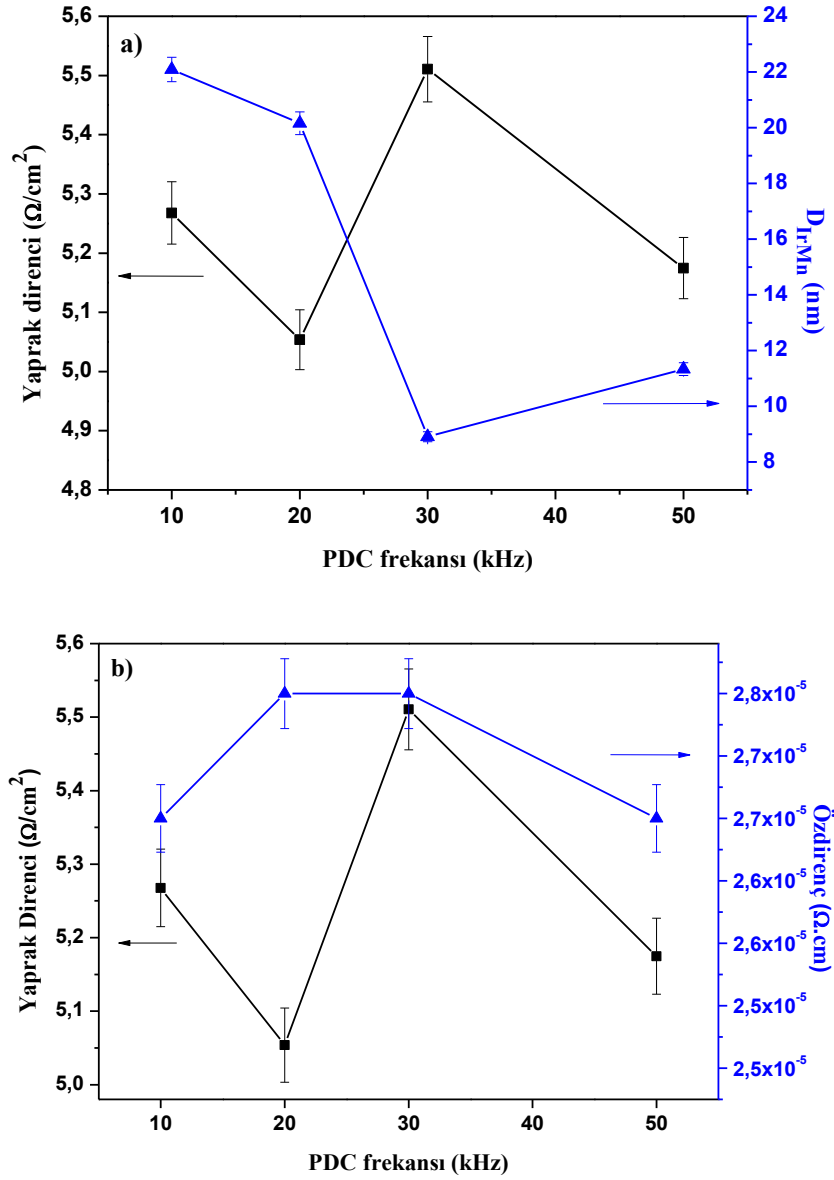
Bu çalışma kapsamında, PDC frekansı değişimiyle üretilen numunelerin elektriksel yaprak direnç ve öz direnç ölçümleri FPP cihazında tamamlandı. Numune serileri içerisinde üretilen 10x10 mm boyutlarındaki numunelerin, tutucuya yerleştirildiği pozisyonlarına göre elektriksel direnç ölçümleri üzerinden kaplama homojenliği testleri yapıldı. Kaplama homojenliği açısından bilgi edinebilmek için her serideki 5 adet numunenin seri içerisindeki standart sapma değerleri hesaplandı ve Çizelge 4.9’da gösterildi

Çizelge 4.9. PDC frekansına göre her numune serisinden elde edilen yaprak dirençlerin hesaplanan standart sapması

Numune	Yaprak dirençinde standart sapma	Özdirenç ($10^{-5}\Omega.cm$)
10 kHz	0,09	2,70
20 kHz	0,05	2,80
30 kHz	0,03	2,80
50 kHz	0,04	2,70

Çizelge 4.9’daki değerlere göre en yüksek standart sapma %9 seviyesinde görüldü. Bu değerlere göre kaplama işleminin tutucu üzerindeki atlıkları homojen olarak kapladığı söylenebilir.

Çoklu tabakaların elektriksel yaprak direnci ve öz direnci ile ilgili sonuçlar Şekil 4.28(a, b)’de verildi.

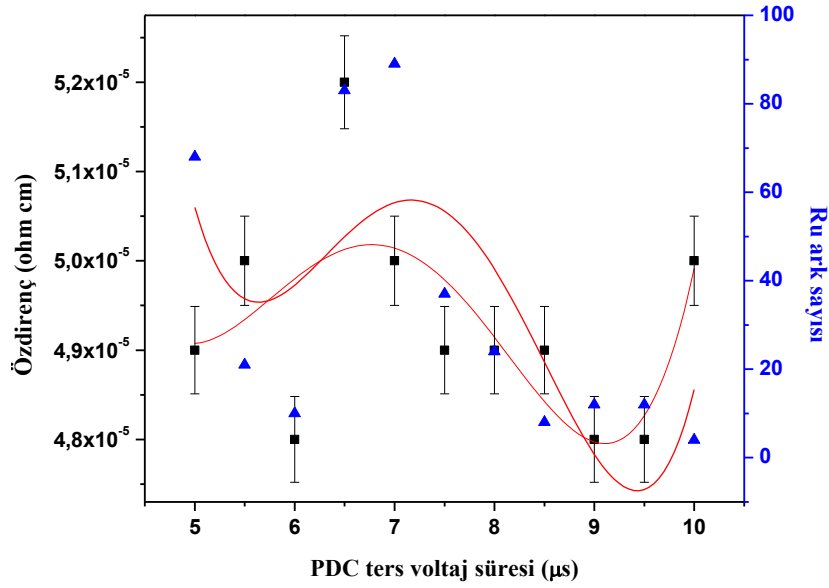


Şekil 4.28. PDC frekansının değiştirildiği EB numunelerinin; a) PDC frekansına göre değişen IrMn tane boyutu ile çoklu tabakaların yaprak dirençleri ve b) PDC frekansına göre değişen yaprak direnç ve özdirençleri

Şekil 4.28(a)'deki değerler göz önüne alındığında yaprak direncin tane boyutu ile ters orantılı olarak değiştiği anlaşıldı. 10 kHz numunesinden 20 kHz numunesine geçişte ise yaprak direncinin tane boyutu ile doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlendi. Bu farklılığın, 20 kHz numunesinin diğer numunelere göre daha yüksek ara yüzey pürüzlülüğü göstermesi nedeniyle olduğu tahmin edildi. Ancak sonuç olarak yaprak dirençleri arasında ciddi farklar görülmedi.

Şekil 4.28(b)'deki değerlere göre, yine 20 kHz numunesi dışındaki diğer numunelerdeki yaprak direnç ve öz direnç değerleri uyum gösterdi. Bu numunede gözlenen fark FPP cihazının ölçüm sırasında hesaba kattığı ince filmin geometrik faktöründen (numune boyutları ve kaplama alanı) gelir.

Çalışmanın ikinci serisi PDC ters voltaj süresinin değişimine göre üretilen EB sistemlerinin öz direnç değerlerinin Ru hedefinde gözlenen ark sayılarıyla ilişkisi Şekil 4.29'da verildi.



Şekil 4.29. EB numune serisinin PDC ters voltaj sürelerine göre değişen öz direnç değerleri ve Ru hedefindeki ark sayıları

Şekil 4.29'da gösterilen ilişkiye göre EB sistemlerinin öz direnç değerleri, 5, 5,5 ve 10µs numuneleri dışında Ru hedefinde gözlenen ark miktarıyla uyumlu olarak değişmiştir. Ark miktarının artması ile film içerisinde kusur yoğunluğunun artması ve bunların da direnci artırması beklendiği için öz direnç artışı ark sayısının artışıyla yorumlanır. Ancak bu ilişkiye uymayan numunelerde film içerisindeki tane şekli ve en boy oranı (*aspect ratio*) değişiklikleri nedeniyle akımın film içerisinde izlediği yolda karşılaştığı direncin değiştiği tahmin edilebilir.

5. GENEL SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında EB sistemleri iki farklı üretim parametresinin değişimine göre incelendi. Üretim parametrelerinin EB sistemlerinde hangi yapısal veya manyetik özellikleri etkilendiği araştırıldı. Yapılan çalışmaların sonuçları iki grupta detaylı şekilde açıklandı.

5.1. PDC Frekansı Değişimi ile Üretilen EB Sistemleri

Bu kısımda tabaka kalınlıklarını değiştirmeden, üretimde uygulanan PDC frekansı ile NiFe ve IrMn tane boyutlarını değiştirerek, bunların EB sistemlerinin (Ta (5nm)/Ru (25nm)/Ta (5nm)/NiFe (6nm)/IrMn (10nm)/ CoFe (2nm)/Ta (5nm)) yapısal ve manyetik özelliklerine olan etkileri incelendi.

Üretimi tamamlanan numuneler öncelikle yapısal analize tabi tutuldu. Elde edilen sonuçlara göre, düşük PDC frekansı ile üretilen numunelerde, yüksek IrMn tane boyutlarının oluştuğu tespit edildi. Bunun yanı sıra, düşük PDC frekansında üretilen numunelerde IrMn tabakasının örgü değişkeninin L_{12} (111) fazının örgü değişkenine en yakın değerde büyüdüğü gözlemlendi.

Numunelerin XRD ölçümlerinden elde edilen faz ve yönelim sonuçlarından daha farklı bir bilgi elde edebilmek amacıyla en yüksek tane boyutuna sahip 10 kHz PDC frekansı ile üretilen numuneye GIXD ölçümü uygulandı. Kırınım deseninde XRD ölçümlerinde gözlenen Ta(110) düzlemi yanı sıra, IrMn(110) ve NiFe(200) düzlemlerinden kırınım elde edildi. IrMn(110) düzleminde IrMn₃ L₁₂ fazına ait (111) düzleminin oluşturduğu süper örgü (*superlattice*) [57,66] kırınımı görüldü. NiFe(200) düzlemi de XRD ölçümlerinde görülemeyen düzlemlerden biri olarak dikkat çekti. Bu düzlemin NiFe <111> yöneliminin dışında büyüdüğü tahmin edildi.

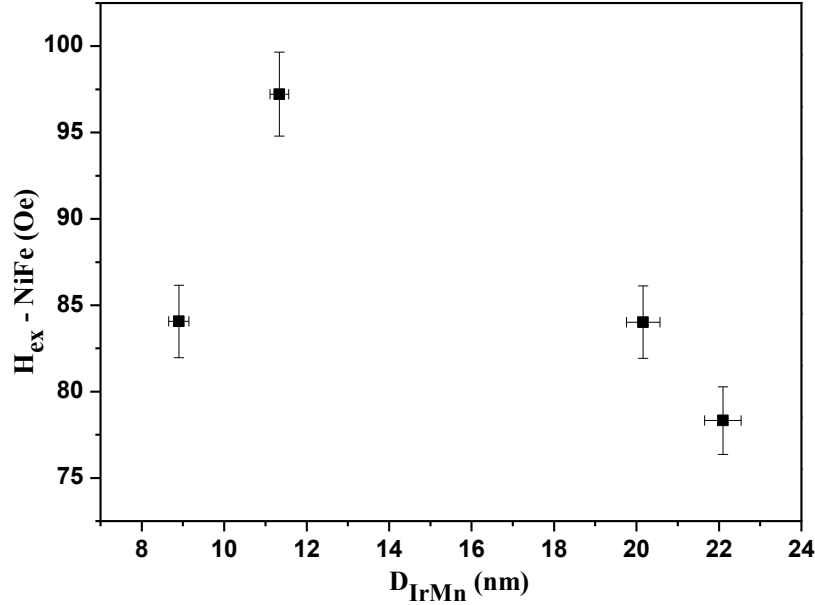
Bu sonuçlardan sonra, yapısal analizlere XRR ölçümleri ile devam edildi. Modelleme sonuçlarına göre tabakaların gerçek kalınlıkları birbirlerine yakın değerlerde bulundu. Bu durumda PDC frekans değeri değişimi ile tabaka kalınlığı değiştirilmeden tane boyutunun değiştirilebilmesi kanıtlandı. NiFe tabakasının altında büyütülen Ta tabakasının kalınlık değerleri 20 kHz numunesi dışında 3 ile 4 nm arasında bulundu. Büyütülmesi hedeflenen Ta kalınlığı 5 nm olduğuna göre aradaki kaybın bu iki tabaka arasındaki ara yüzeyde oluşan manyetik ölü tabaka

olabileceği düşünöldü. Pürüzlölük değerleri arasında ise 20 kHz numunesi yüksek ara yüzey pürüzlölük değerleri ile dikkat çekti.

Üretilen numunelerdeki kristal yönelim kalitesini belirlemek amacıyla Ru(0002) doruğu üzerinden RC ölçümleri yapıldı. Ölçüm eğrilerine göre elde edilen FWHM ve integral şiddet değerlerinin belirlenmesi sonucunda en düşük FWHM en yüksek integral şiddet ikilisi 10 kHz PDC frekansı ile üretilen numunede gözlemlendi. Ayrıca IrMn tabakasının <111> kristal yönelim kalitesi hakkında bilgi edinebilmek amacıyla XRD ölçümlerindeki IrMn(111) doruğuna doruk profil fiti uygulanarak FWHM ve alansal integral şiddet değerleri bulundu. IrMn'nin en yüksek <111> yönelimi, yine 10 kHz numunesinde gözlemlendi. Sonuç olarak IrMn ve Ru'nun en iyi kristal yönelim kalitesi en düşük PDC frekansı ile üretilen numunede bulundu.

Yapısal analizleri tamamlanan numune serilerinden 5x5 mm boyutlarındaki örneklerin manyetik özellikleri incelendi. Ölçümler sonucunda IrMn tabakasının altındaki NiFe ve üstündeki CoFe tabakalarına EB etkisi uyguladığı göröldü. Ancak CoFe ve NiFe tabakalarının H_{ex} değerlerinin PDC frekansına göre değişimlerinin farklı şekillerde olduğu gözlemlendi. Bu durum NiFe tabakasının üst düzene sahip EB sistemi gibi davranırken, CoFe tabakasının alt düzene sahip EB sistemi gibi davranmasıyla ilişkilendirildi. CoFe tabakasının H_{ex} alanının IrMn tane boyutu ile tam bir ilişkisi kurulamadı. Bunun nedeni, IrMn'nin <111> yönelimini NiFe çekirdeklenme tabakasından aldığı için NiFe'deki tane boyutu değişimlerinden etkilenirken, CoFe(110) yapısının IrMn(111) yapısıyla yapı uyumsuzluğu göstermesinden dolayı IrMn tabakasının tane boyutu değişimlerinden etkilenmemesidir. Buna ek olarak literatürde çalışılan EB sistemlerinin çoğunda AFM tane boyutları tabaka kalınlığıyla eşit büyüklükte olması, bu çalışmada ise elde edilen AFM tane boyutlarının AFM tabaka kalınlığının 2 katına kadar çıkmasından dolayı H_{ex} ve tane boyutu arasında farklı ilişkiler görülmesine neden oldu. Bu durumda en büyük sorun, manyetik domainlerin tane boyutu ile birlikte büyümesinin domain içerisindeki ve duvarlarındaki manyetik düzensizliklere neden olması olarak gösterildi. NiFe tabakasının H_{ex} alan değerleri ile ilgili olarak, H_{ex} değerinin yüksek IrMn tane boyutlarında düşük, düşük tane boyutlarında daha yüksek olduğu (Şekil 5.1)

gözlendi. Bu durum yüksek tane boyutuna sahip NiFe tabakasının manyetik olarak set edilememesi ve sonuç olarak IrMn tabakası ile arasındaki H_{ex} alanının, set edilemeyen domainler tarafından azalması olarak gözlendi.



Şekil 5.1. H_{ex} -NiFe alanının IrMn tane boyutuna göre değişimi

Üretilen numunelerin CoFe ve NiFe tabakalarının H_c alanları da H_{ex} alanları gibi M-H ölçümlerinden elde edildi. Ara yüzey pürüzlülükleri de H_c 'yi kontrol eden önemli bir etken olarak dikkat çekmektedir. CoFe tabakasının H_c alanının IrMn tane boyutuna bağlı değiştiği gözlendi. Bu durumda IrMn yüzey pürüzlülüğü ile CoFe H_c alan değerleri incelendiğinde H_c 'nin pürüzlülük ile doğru orantılı olarak değiştiği gözlendi. Pürüzlülüğü yüksek filmlerde ara yüzeylerde FM spinlerinin dönmesiyle sürüklenmeye uğrayan AFM spinlerinin H_c 'yi arttırdığı [16] düşünüldü. Tersine durumda ise daha düşük pürüzlülüğe sahip ara yüzeylerde, tabakalar birbirinden daha dengeli bir ara yüzeyle ayrıldığı için domain yapılarının sınırlarının daha belirgin olup sürüklenmeye uğrayarak H_c 'ye katkıda bulunan AFM spinlerinin oranının azaldığı tahmin edildi. Bunların yanı sıra CoFe tabakasının H_c alanının IrMn $\langle 111 \rangle$ yönelimine de bağlı değişime uğradığı gözlendi. Buna göre yüksek manyetokristalin tek yönlülüğe sahip IrMn $\langle 111 \rangle$ kristal yöneliminde bulunan, yoğun spin düzlemine sahip EB sisteminde manyetik dengesizlikte bulunan spinlerin oranı azdır. NiFe tabakasının H_c alan

değerleri CoFe gibi IrMn (yani NiFe) tane boyutu ile 10 kHz numunesi dışında tam bir uyum gösterdi. 10 kHz numunesinde düşük H_c gözlenmesinin nedeni yüksek tane boyutlarında oluşabilecek spin eşlenmesi/eşlenmenin bozulması etkisi ile açıklandı. Bunun yanı sıra NiFe tabakasının H_c alanının NiFe pürüzlülüğü ile doğru orantılı olarak değiştiği de gözlemlendi.

Üretilen EB sistemlerinde teknolojik uygulamalar için önemli olan H_{ex}/H_c oranını hesaplamak için CoFe tabakasının H_{ex} ve H_c değerleri oranlandı. AFM/FM ara yüzeyleri kaliteli olan EB sistemlerinin yüksek H_{ex}/H_c oranı gösterdiği [74] için üretilen numunelerden en iyi manyetik ara yüzey kalitesine sahip olan sistemin 10 kHz PDC frekansı ile üretilmiş numune olduğu belirlendi. AFM tane boyutunun yanı sıra H_{ex}/H_c oranına ciddi anlamda etki eden diğer bir özellik de AFM/FM ara yüzey pürüzlülüğüdür.

Ara yüzey enerjisini hesaplanan EB sistemlerinde H_{ex}/H_c oranı sonucuna göre farklı bir sonuç elde edildi. Buna göre IrMn tane boyutu düşük EB sistemlerinde yüksek J_k değerleri gözlemlendi. Buradan elde edilen sonuca göre büyük tane boyutlarında manyetik olarak düzensiz veya doyurulamayan domain yapılarının ara yüzey enerjisini ciddi şekilde etkilediği yorumuna varılabilir.

5.2. PDC Ters Voltaj Süresi Değişimi ile Üretilen EB Sistemleri

Bu kısımda EB sistemlerinin (Ta (5nm)/Ru (10nm)/Ta (5nm)/NiFe (6nm)/IrMn (10nm)/ CoFe (2nm)/Ta (5nm)) üretimi sırasında Ru tabakasına uygulanan PDC gücün ters voltaj süresi değiştirilerek, bunun EB sistemlerinin yapısal özelliklerine etkileri incelendi.

Bu numune serisinde EB sistemini direkt olarak etkileyen faktörün sıçratma sırasında Ru hedef malzemesinde gözlenen ark sayıları olduğu anlaşıldı. XRR teorik modellemeleri sonucunda Ru/Ta ara yüzeyinin Ru ark sayılarıyla yüksek bir uyum gösterdi. Buna karşın Ru ark sayısı Ru düzleme dik tane boyutunu ciddi bir şekilde değiştirmezken, IrMn tane boyutunu hiçbir şekilde etkilemedi.

Ru tabaka kalınlığının 10 nm olarak seçilmesinin avantajı ise yapılan XRD ölçümlerinde görüldü. İlk seride tam olarak gözlenemeyen YMK IrMn(111) ve YMK NiFe(111) dorukları bu seride net olarak elde edildi. Bu sayede ilk seride Ru(0002) doruğunun yüksek şiddeti nedeniyle üzerinden RC ölçümü yapılamayan

IrMn(111) doruğu bu seride yapılabildi. Buradan çıkan sonuca göre IrMn(111) ve Ru(0002) kristal yapılarının en iyi kristal yönelim oranı $10\mu\text{s}$ 'de gözlemlendi.

Yapısal durum hakkında daha detaylı bilgi edebilmek amacıyla yapılan FPP ölçümlerinin sonuçlarına göre EB sistemlerinin öz direnç değerlerinin Ru ark sayısına büyük oranda bağlı olduğu gözlemlendi.

5.3. Öneriler

Bu çalışmalar kapsamında üretimi ve karakterizasyonları gerçekleştirilen numunelerin sonuçlarına göre, bu konuda yapılacak olan gelecek çalışmalar hakkında öneriler aşağıda sıralandı:

- PDC ters voltaj süresinin değiştirildiği ikinci serideki numunelerin yapısal özellikleri ile manyetik özellikleri arasındaki ilişkinin açığa çıkarılması için bu numunelerin manyetik özellik ölçümlerinin tamamlanması gerekmektedir.

- Elde edilen XRD kırınım desenlerinden hesaplanan tane boyutları düzlem dik ortalama tane boyutu değerini verir. Ancak tane boyutlarının düzlem içinde ne kadar büyük olduğu bilinemez. Bu sebeple düzlem içi tane boyutlarını ölçmek için geçirimsiz elektron mikroskobu gibi başka teknikler kullanılabilir.

- Manyetizasyon ölçümlerinde adım başına uygulanan alanın süresinin arttırılıp, ölçüm aralıklarının 10 Oe yerine 2 Oe değerlerine kadar indirilmesi gerekir. Bu durumda elde edilen H_{ex} , H_c ve FM tabakanın doyum manyetizasyonu değerleri daha doğru bir şekilde elde edilebilir.

- Ara yüzeylerdeki manyetizasyon ve domain durumlarını detaylı şekilde inceleyip yorumlayabilmek için alternatif teknikler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Coey, J.M.D., *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press (ISBN-13 978-0-521-81614-4), 19, 2009.
- [2] Nogués, J. ve Schuller, Ivan K., “Exchange bias”, *J. Magn. Magn. Mater.*, **192**, 203-232 (1999).
- [3] Berkowitz, A.E. ve Takano, K., “Exchange anisotropy - a review”, *J. Magn. Magn. Mater.*, **200**, 552-570 (1999).
- [4] Öksüzoğlu, R.M., Yıldırım, M., Çınar, H., Hildebrandt, E. ve Alff, L., “Effect of Ta buffer and NiFe seed layers on pulsed-DC magnetron sputtered Ir₂₀Mn₈₀/Co₉₀Fe₁₀ exchange bias”, *J. Magn. Magn. Mater.*, **323**, 1827-1834 (2011).
- [5] Tsunoda, M. ve arkadaşları, “Enhancement of exchange bias by ultra-thin Mn layer insertion at the interface of Mn-Ir/Co-Fe bilayers”, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **244**, 4470-4473 (2007).
- [6] Halloran, S.T., da Silva, F.C.S., Fardi, H.Z. ve Pappas, D.P., “Permanent-magnet-free stabilization and sensitivity tailoring of magnetoresistive field sensors”, *J. Appl. Phys.*, **102**, 033904 (2007).
- [7] Liu, Y., Fu, Y., Jin, C. ve Feng, C., “Discrepancy of the magnetic behaviors and crystalline structure on the Co/FeMn and FeMn/Co interfaces with ultrathin Pt spacer”, *Rare Metals*, **29**, 473-479 (2010)
- [8] Ni, J., Cai, J.W., Lai, W.Y., An, Y.K. ve Mai, Z.H., “Enhancement of exchange bias in Ir–Mn/Co_{0.9}Fe_{0.1} bilayers by inserting an ultra-thin Co_{0.6}Fe_{0.4} layer”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 730-733 (2006).
- [9] Callister, W.D.Jr., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7. baskı, John Wiley & Sons (ISBN-13: 978-0-471-73696-7), 2007.
- [10] Hummel, R.E., *Electronic Properties of Materials* 3. baskı, Springer (ISBN 978-0-387-95144-7), 2000.
- [11] Ong, K.G. ve Grimes, C.A., *Magnetostrictive Nanomaterials for Sensors*, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology (ISBN: 1-58883-061-6), **5**, 1-27, 2004.

- [12] Imakita, K.-I., Tsunoda, M. ve Takahashi, M., “Giant exchange anisotropy observed in Mn-Ir/Co-Fe bilayers containing ordered Mn₃Ir phase”, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 3812-3814 (2004).
- [13] Meiklejohn W.H. ve Bean, C.P. “New magnetic anisotropy”, *Phys. Rev.*, **102**, 1413–1414 (1956).
- [14] Hase, T.P.A., Fulthorpe, B.D., Wilkins, S.B., Tanner, B.K., Marrows, C.H. ve Hickey, B.J., “Weak magnetic moment on IrMn exchange bias pinning layers”, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 985-987 (2001).
- [15] Ohldag, H., Scholl, A., Nolting, F., Arenholz, E., Maat, S., Young, A.T., Carey, M. ve Stöhr, J., “Correlation between Exchange Bias and Pinned Interfacial Spins”, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 017203 (2003).
- [16] Kerr, E., van Dijken, S. ve Coey, J.M.D., “Influence of the annealing field strength on exchange bias and magnetoresistance of spin valves with IrMn”, *J. Appl. Phys.*, **97**, 093910 (2005).
- [17] van Driel, J., De Boer, F.R., Lensen, K.-M.H. ve Coehoorn, R., “Exchange biasing by Ir₁₉Mn₈₁: Dependence on temperature, microstructure and antiferromagnetic layer thickness”, *J. Appl. Phys.*, **88**, 975-982 (2000).
- [18] Jungblut, R., Coehoorn, R., Johnson, M.T., aan de Stegge, J. ve Reinders, A., “Orientational dependence of the exchange biasing in molecular-beam-epitaxy-grown Ni₈₀Fe₂₀/Fe₅₀Mn₅₀ bilayers (invited)”, *J. Appl. Phys.*, **75**, 6659-6665 (1994).
- [19] van der Zaag, P.J., Ball, A.R., Feiner, L.F., Wolf, R.M. ve van der Heijden, P.A.A., “Exchange biasing in MBE grown Fe₃O₄/CoO bilayers: The antiferromagnetic layer thickness dependence”, *J. Appl. Phys.*, **79**, 5103-5106 (1996).
- [20] Shen, J.X. ve Kief, M.T., “Exchange coupling between NiO and NiFe thin films”, *J. Appl. Phys.*, **79**, 5008-5011 (1996).
- [21] Park, C.M., Min, K.I. ve Shin, K.H., “Effects of surface topology and texture on exchange anisotropy in NiFe/Cu/NiFe/FeMn spin valves”, *J. Appl. Phys.*, **79**, 6228-6231 (1996).
- [22] Jungblut, R., Coehoorn, R., Johnson, M.T., Sauer, C., van der Zaag, P.J., Ball, A.R., Rijks, T.G.S.M., aan de Stegge, J. ve Reinders, A., “Exchange

- biasing in MBE-grown Ni₈₀Fe₂₀/Fe₅₀Mn₅₀ bilayers”, *J. Magn. Magn. Mater.*, **148**, 300-306 (1995).
- [23] Lee, S.S., Hwang, D.G., Park, C.M., Lee, K.A. ve Rhee, J.R., “Effects of crystal texture on exchange anisotropy in NiO spin valves”, *J. Appl. Phys.*, **81**, 5298-5301 (1997).
- [24] Ali, M., Marrows, C.H. ve Hickey, B.J., “Antiferromagnetic layer thickness dependence of the IrMn/Co exchange-bias system”, *Phys. Rev. B*, **68**, 214420 (2003).
- [25] Anderson, G., Huai, Y. ve Miloslawsky, L., “CoFe/IrMn exchange biased top, bottom, and dual spin valves”, *J. Appl. Phys.*, **87**, 6989-6992 (2000).
- [26] Pakala, M., Huai, Y., Anderson, G. ve Miloslawsky, L., “Effect of underlayer roughness, grain size, and crystal texture on exchange coupled IrMn/CoFe thin films”, *J. Appl. Phys.*, **87**, 6653-6655 (2000).
- [27] Lee, S.S., Kim, B.-K., Lee, J.-Y., Hwang, D.-G., Kim, S.-W., Kim, M.-Y., Hwang, J.-Y. ve Rhee, J.-R., “Exchange biasing field of NiFe/[IrMn–Mn]/CoFe multilayers depending on Mn content”, *J. Appl. Phys.*, **95**, 7525-7528 (2004).
- [28] Hoshino, K., Nakatani, R., Hoshiya, H., Sugita, Y. ve Tsunashima, S., “Exchange Coupling between Antiferromagnetic Mn–Ir and Ferromagnetic Ni–Fe Layers”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 607-612 (1996).
- [29] Kools, J., “Exchange-biased spin-valves for magnetic storage”, *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3165-3184 (1996).
- [30] Ro, J.C., Choi, Y.S., Suh, S.J. ve Lee, H.J., “Effect of microstructures on exchange anisotropy in Mn-Ir/Ni-Fe exchange-biased multilayers with various stacking structures”, *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3925-3927 (1999).
- [31] Devasahayam, A.J., Sides, P.J. ve Kryder, M.H., “Magnetic, temperature, and corrosion properties of the NiFe/IrMn exchange couple”, *J. Appl. Phys.*, **83**, 7216-7219 (1998).
- [32] Fuke, H.N., Saito, K., Yoshikawa, M., Iwasaki, H. ve Sahashi, M., “Influence of crystal structure and oxygen content on exchange-coupling properties of IrMn/CoFe spin-valve films”, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3680-3683 (1999).

- [33] Kohn, A., Dean, J., Kovacs, A., Zeitser, A., Carey, M.J., Geiger, D., Hrkac, G., Schrefl, T. ve Allwood, D., “Exchange-bias in amorphous ferromagnetic and polycrystalline antiferromagnetic bilayers: Structural study and micromagnetic modeling”, *J. Appl. Phys.*, **109**, 083924 (2011).
- [34] Malinowski, G., Hehn, M., Robert, S., Lenoble, O., Schuhl, A. ve Panissod, P., “Magnetic origin of enhanced top exchange biasing in Py/IrMn/Py multilayers”, *Phys. Rev. B.*, **68**, 184404 (2003).
- [35] Ali, M., Marrows, C.H. ve Hickey, B.J., “Controlled enhancement or suppression of exchange biasing using impurity δ layers”, *Phys. Rev. B.*, **77**, 134401 (2008).
- [36] Srinivasan, K., Piramanayagam, S.N., Sbiaa, R., Kay, Y.S., Tan, H.K. ve Wong, S.K., “Antiferromagnetic iridium-manganese intermediate layers for perpendicular recording media (invited)”, *J. Appl. Phys.*, **105**, 07B738 (2009).
- [37] Gao, T.R., Shi, Z., Zhou, S.M., Chantrell, R., Asselin, P., Bai, X.J., Du, J. ve Zhang, Z.Z., “Exchange bias, training effect, hysteretic behavior of angular dependence, and rotational hysteresis loss in NiFe/FeMn bilayer: Effect of antiferromagnet layer thickness”, *J. Appl. Phys.*, **105**, 053913 (2009).
- [38] Takano, K.H., Kodama, R.H., Berkowitz, A.E., Cao, W. ve Thomas, G., “Interfacial Uncompensated Antiferromagnetic Spins: Role in Unidirectional Anisotropy in Polycrystalline Ni₈₁Fe₁₉/CoO Bilayers”, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 1130 (1997).
- [39] O’Grady, K., Fernandez-Outon, L.E. ve Vallejo-Fernandez, G., “A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films”, *J. Magn. Magn. Mater.*, **322**, 883-899 (2010).
- [40] Mishra, S.K., Radu, F., Valencia, S., Schmitz, D., Schierle, E., Dürr H.A. ve Eberhardt, W., “Dual behavior of antiferromagnetic uncompensated spins in NiFe/IrMn exchange biased bilayers”, *Phys. Rev. B.*, **81**, 212404 (2010).
- [41] Sang, H., Du, Y.W., Chien. ve C.L., *J. Appl. Phys.*, **85**, 4931 (1999).
- [42] Ambrose, T. ve Chien., C.L., *J. Appl. Phys.*, **83**, 6822 (1998).

- [43] Aley, N.P., Vallejo-Fernandez, G., Kroeger, R., Lafferty, B., Agnew, J., Lu, Y. ve O'Grady, K., "Texture Effects in IrMn/CoFe Exchange Bias Systems", *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 2820-2823 (2008).
- [44] Tsunoda, M., Imakita, K., Naka, M. ve Takahashi, M., "L12 phase formation and giant exchange anisotropy in Mn₃Ir/Co-Fe bilayers", *J. Magn. Mater.*, **304**, 55-59 (2006).
- [45] Fernandez-Outon, L.E., Vallejo-Fernandez, G., Manzoor, S. ve O'Grady, K., "Thermal instabilities in exchange biased systems", *J. Magn. Mater.*, **303**, 296-301 (2006).
- [46] Baibich, M., Broto, J., Fert, A., v. Dau, F., Petroff, F., Etienne, P., Greuzet, G., Friederich, A. ve Chazelas, J., "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices", *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 2472-2475 (1988).
- [47] Binash, G., Grünberg, P., Saurenbach, F. ve Zinn, W., "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange", *Phys. Rev. B.*, **39**, 4828-4830 (1989).
- [48] Dieny, B., Speriosu, V.S., Parkin, S.S.P., Gurney, B.A., Wilhoit, D.R. ve Mauri, D., "Giant magnetoresistive in soft ferromagnetic multilayers", *Phys. Rev. B.*, **43**, 1297-1300 (1991).
- [49] Massalski, T.B., *Binary alloy phase diagram*, 2. baskı, ASM International, Metals Park, 1990
- [50] Kim, Y.K., Park, G.-H., Lee, S.-R., Min, S.-H., Won, J.Y. ve Song, S.A., "Interface and microstructure evolutions in synthetic ferrimagnet-based spin valves upon exposure to postdeposition annealing", *J. Appl. Phys.*, **93**, 7924-7927 (2003).
- [51] Karthik, S.V., Takahashi, Y.K., Ohkubo, T., Ikeda, S. ve Ohno, H., "Transmission electron microscopy investigation of CoFeB/MgO/CoFeB pseudospin valves annealed at different temperatures", *J. Appl. Phys.*, **106**, 023920 (2009).
- [52] Chen, Y.-T., "The Effect of Interface Texture on Exchange Biasing in Ni₈₀Fe₂₀/Ir₂₀Mn₈₀ System", *Nanoscale Res. Lett.*, **4**, 90-93 (2009).

- [53] Hammann, C., McCord, J., Schultz, L., Toperverg, B.P., Bröhl, K.T., Wolff, M., Kaltofen, R. ve Mönch, I., “Competing magnetic interactions in exchange-bias-modulated films”, *Phys. Rev. B.*, **81**, 0244420 (2010).
- [54] Kowalewski, M., Butler, W.H., Moghadam, N., Stocks, G.M., Schulthess, T.C., Song, K.J., Thompson, J.R., Arrott, A.S., Zhu, T., Drewes, J., Katti, R.R., McClure, M.T. ve Escorcia, O., “The effect of Ta on magnetic thickness on permalloy (Ni₈₁Fe₁₉) films”, *J. Appl. Phys.*, **87**, 5732-5734 (2000).
- [55] Parkin, S.S.P., Kaiser, C., Panchula, A., Rice, P.M., Hughes, B., Samant, M. ve Yang, S.-E., “Giant tunneling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers”, *Nat. Mat.*, **3**, 862-867 (2004).
- [56] Vallejo-Fernandez, G., Kaeswurm, B. ve O’Grady, K., “Defect and impurity effects in exchange bias systems”, *J. Appl. Phys.*, **109**, 07D738 (2011).
- [57] Imakita, K., Tsunoda, M. ve Takahashi, M., “Thickness dependence of exchange anisotropy of polycrystalline Mn₃Ir/Co-Fe bilayers”, *J. Appl. Phys.*, **97**, 10K106 (2005).
- [58] Belkind, A., Zhao, Z., Carter, D., Mahoney, L., McDonough, G., Roche, G., Scholl, R. ve Walde, H., “Pulsed-DC Reactive Sputtering of Dielectrics: Pulsing Parameter Effects”, *Society of Vacuum Coaters*, 43rd Annual Technical Conference Proceedings, ISSN 0737-5921, **505**, 86-90 (2000).
- [59] Lee, J.-W., Tien, S.-K. ve Kuo, Y.-C., “The Effects of Substrate Bias, Substrate Temperature, and Pulse Frequency on the Microstructure of Chromium Nitride Coatings Deposited by Pulsed Direct Current Reactive Magnetron Sputtering”, *Journal of Electronic Materials*, **34**, 1484-1492 (2005).
- [60] Carter, D.C., Arent, R.A. ve Christie, D.J., *50 Years of Vacuum Coating Technology and the Growth of the Society of Vacuum Coaters; Society of Vacuum Coaters Conference Proceedings*, ISBN 978-1-878068-27-9, 2007
- [61] Carter, D., Sproul, W.D., Christie, D., *50 Years of Vacuum Coating Technology and the Growth of the Society of Vacuum Coaters; Vacuum Technology Coatings*, 60-67 (2006).

- [62] Yen, W.T., Lin, Y.C., Yao, P.C., Ke, J.H. ve Chen, Y.L., “Growth characteristics and properties of ZnO:Ga thin films prepared by pulsed DC magnetron sputtering”, *Applied Surface Science*, **256**, 3432-3437 (2010).
- [63] Hacettepe Üniversitesi Süperiletkenlik ve Nanoteknoloji Grubu web sayfası: <http://www.sntg.hacettepe.edu.tr/>
- [64] Ünsal, T., *FePt Nanoparçacıkların Kimyasal Yöntem ile Sentezlenmesi ve Magnetik Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2009.
- [65] Okamoto, H., “The Ir-Mn System”, *Journal of Phase Equilibria*, **17**, 60 (1996).
- [66] Tsunoda, M., Sato, T., Hashimoto, T. ve Takahashi, M., “Exchange anisotropy of polycrystalline Mn-Ir/Co-Fe bilayers enlarged by long-time annealing”, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 5222-5224 (2004).
- [67] Zhao, H., Yu, G., Hong, S.I., *J. Mater. Sci. Technol.*, **20**, 239 (2004).
- [68] Tong, H.C., Qian, C., Miloslavsky, L., Funada, S., Shi, X., Liu, F. ve Dey, S., “Studies on antiferromagnetic/ferromagnetic interfaces” *J. Magn. Magn. Mater.*, **209**, 56-60 (2000).
- [69] Mauri, D., Siegmann, H.C., Gagus, P.S. ve Kay, E., “Simple model for thin ferromagnetic films exchange coupled to an antiferromagnetic substrate”, *J. Appl. Phys.*, **62**, 3047 (1987).
- [70] Malozemoff, A.P., “Random-field model of exchange anisotropy at rough ferromagnetic-antiferromagnetic interfaces”, *Phys. Rev. B.*, **35**, 3679-3682 (1987).
- [71] Leighton, C., Nogués, J., Jönsson-Åkerman, B.J. ve Schuller, I.K., “Coercivity Enhancement in Exchange Biased Systems Driven by Interfacial Magnetic Frustration”, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 3466-3469 (2000).
- [72] Fecioru-Morariu, M., Güntherodt, G., Rührig, M., Lamperti, A. ve Tanner, B., “Exchange coupling between an amorphous ferromagnet and a crystalline antiferromagnet”, *J. Appl. Phys.*, **102**, 053911 (2007).
- [73] Vallejo-Fernandez, G., Vopsaroiu, M., Fernandez-Outon, L.E. ve O’Grady, K., “The Role of Interfaces in CoFe/IrMn Exchange Biased Systems”, *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 3008 (2006).

- [74] Fernandez-Outon, L.E., O'Grady, K., Oh, S., Zhou, M. ve Pakala, M., "Large Exchange Bias IrMn/CoFe for Magnetic Tunnel Junctions", *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 2824 (2008).
- [75] Komagaki, K., Yamada, K., Noma, K., Kanai, H., Kobayashi, K., Uehara, Y., Tsunoda, M. ve Takahashi, M., "Large Exchange Bias and High Blocking Temperature of MgO-Barrier-MTJs With L₁₂-Ordered Mn₃Ir", *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 3535-3537 (2007).