

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NiFe/X/IrMn (X: Cu, Cr, Pt)-TABANLI PLANAR HALL ETKİSİ
SENSÖRLERİNİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

HASAN PİŞKİN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2020

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NiFe/X/IrMn (X: Cu, Cr, Pt)-TABANLI
PLANAR HALL ETKİSİ SENSÖRLERİNİN
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

HASAN PİŞKİN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. NUMAN AKDOĞAN

GEBZE

2020

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF
NiFe/X/IrMn (X: Cu, Cr, Pt)-BASED
PLANAR HALL EFFECT SENSORS

HASAN PİŞKİN
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. NUMAN AKDOĞAN

GEBZE

2020

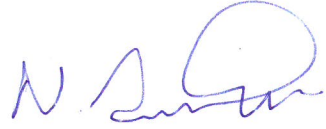
GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/01/2020 tarih ve 2020/07 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24/02/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hasan Pişkin'in tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

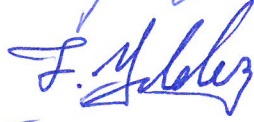
: Prof. Dr. Numan Akdoğan



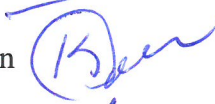
ÜYE : Prof. Dr. Bulat Rami



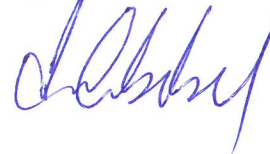
ÜYE : Doç. Dr. Fikret Yıldız



ÜYE : Prof. Dr. Kemal Özdoğan



ÜYE : Doç. Dr. Doğan Erbahar



ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Düzlemsel Hall etkisine (PHE: planar Hall effect) dayanan manyetik alan sensörleri miliTesla ve pikoTesla aralığındaki manyetik alanları ölçmek için kullanılmaktadır. Son zamanlarda bu konuda yapılan çalışmaların ana hedefi ise PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetlerini artırmaktır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, exchange bias etkisi içeren iki tabakalı NiFe/IrMn, üç tabakalı NiFe/Cu/IrMn ve spin vanası NiFe/Cu/NiFe/IrMn yapıları kullanılarak hazırlanmış çapraz eklem, eğik çapraz eklem ve Wheatstone köprüsü geometrilerindeki PHE sensörleri sistematik olarak araştırılmıştır. Bu çalışmalar arasında Wheatstone köprüsü ve üç tabakalı sensör yapısı kullanılarak üretilen PHE sensörlerinin manyetik alana daha duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Fakat, Cu elementinin çok iyi bir iletken olması nedeniyle sensörlerden elde edilen manyetik alan hassasiyeti sınırlanmıştır. Bu tez çalışmasında ise Pt ve Cr elementlerinin Cu elementine kıyasla çok daha yüksek bir öz dirence sahip oldukları göz önünde bulundurularak, literatürde ilk defa üç tabakalı NiFe/Pt/IrMn ve NiFe/Cr/IrMn yapılarında üretilen PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetleri, aradaki Pt ve Cr tabaka kalınlıkları 0-1 nm arasında değiştirilerek araştırılmıştır. Pt ve Cr ara tabakalarının kullanılmasıyla, Cu ara tabakasının PHE sinyali üzerindeki olumsuz etkisinin giderildiği deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca, sıcaklığa bağlı olarak yapılan deneyler, üretilen sensörlerin 390 K sıcaklığında bile düzgün bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Zamana bağlı olarak kaydedilen PHE sinyallerinde ± 100 nV seviyesinde bir gürültü olduğu belirlenmiş, sinyallerin uygulanan manyetik alanın büyüklüğüne ve yönüne oldukça duyarlı ve kararlı oldukları gözlenmiştir. Elde edilen gürültü seviyesiyle PHE sensörleri 380 nanoTesla değerinde bir manyetik alan çözünürlüğüne ulaşmıştır. Bu özellikleri sayesinde NiFe/Pt/IrMn ve NiFe/Cr/Pt yapılarındaki PHE sensörlerinin zayıf manyetik alanları ölçmeyi gerektiren birçok uygulamada kullanılabilir oldukları tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Manyetik alan sensörü, düzlemsel Hall etkisi (PHE), exchange bias (EB) etkisi, manyetodirenç (MR), şönt akımı.

SUMMARY

The magnetic field sensors based on planar Hall effect (PHE) have been used for detecting the magnetic fields in the range of miliTesla and picoTesla. The main objective of the recent investigations is to increase the magnetic field sensitivity of PHE sensors. In the literature, the systematic studies have been done by using the exchange biased NiFe/IrMn bilayer, NiFe/Cu/IrMn trilayer and NiFe/Cu/NiFe/IrMn spin valve structures with the cross junction, tilted cross junction, and Wheatstone bridge geometries. Among them, the trilayer structure fabricated with a bridge geometry is found to be more sensitive to the low magnetic fields. However, the very good electrical conductivity of Cu spacer layer limits the sensor's magnetic field sensitivity. In this thesis, considering that the Pt and Cr materials have higher resistances compared to the Cu material, the magnetic field sensitivity of PHE sensors consisting of the NiFe/Pt/IrMn and NiFe/Cr/IrMn trilayer structures have been investigated as a function of Pt and Cr spacer layer thicknesses in the range of 0-1 nm. The insertion of the Pt and Cr spacer layers between NiFe and IrMn have significantly increased the magnetic field sensitivities of PHE sensors. It has been experimentally shown that the negative effect of the Cu spacer layers is repaired via Pt and Cr spacer layers. Besides, the temperature-dependent experiments show that the produced PHE sensor kept working even at 390 K with an increasing sensitivity. The time-dependent experiments reveal that the sensors have very stable responses to the magnitude and polarity of the external magnetic field with a ± 100 nV noise level. With this noise level a 380 nanoTesla resolution achieved for 5 mA dc current. These properties make NiFe/Pt/IrMn and NiFe/Cr/Pt based PHE sensors very promising for practical detection of low magnetic fields.

Key words: Magnetic field sensor, planar Hall effect (PHE), exchange bias (EB) effect, magnetoresistance (MR), shunt current.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, her türlü desteği ve imkânı sağlayan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Numan Akdoğan'a çok teşekkür ederim.

Litografi teknikleri ve temiz oda hakkında bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim değerli Hocam Doç. Dr. Hüseyin Kurt'a çok teşekkür ederim.

Doktora süresince her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim kıymetli Hocalarım Dr. Erdem Demirci ve Dr. Mustafa Öztürk'e çok teşekkür ederim.

Deneyisel yöntemlerde fikir danıştığım değerli Hocalarım Dr. Şafak Gök, Dr. Perihan Aksu ve arkadaşlarım Dr. Bayram Kocaman, Sevde Ömeroğlu ve Emrah Anigi'ye çok teşekkür ederim.

Tez çalışması sırasında birlikte çalıştığım değerli arkadaşlarım Dr. Selahattin Çelik ve Burak Özer'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca, manyetizma konusunda kıymetli bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim değerli Hocalarım Prof. Dr. Bekir Aktaş, Prof. Dr. Bulat Rami, Doç. Dr. Fikret Yıldız, Dr. Sinan Kazan, Doç. Dr. Leyla Çolakerol Arslan ve Dr. Ali Cemil Başaran'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımı destekledikleri için 116F083 numaralı proje çerçevesinde TÜBİTAK'a ve 2018-A-102-14 numaralı proje çerçevesinde Gebze Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımın tüm aşamalarında maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anne-baba ve kardeşlerimi hürmetle anıyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL KAVRAMLAR ve TEORİK BİLGİLER	4
2.1. Manyetizmanın Temel Kavramları	4
2.1.1. Manyetik Malzemeler	4
2.1.2. Manyetik Anizotropi	5
2.1.3. Manyetik Histerezis Eğrisi	9
2.2. Exchange Bias Etkisi	11
2.3. Maddelerin Elektriksel Direnci ve Hall Etkileri	17
2.3.1. Normal Direnç ve Normal Manyetodirenç (OMR)	17
2.3.2. Anizotropik Manyetodirenç (AMR)	19
2.3.3. Hall Etkileri (OHE, AHE, PHE)	23
2.4. PHE Sensörü, Sinyali ve Özellikleri	28
2.5. PHE Sensör Sinyalinin Uygulanan Manyetik Alanın Açısına Bağlı Davranışı	32
2.6. PHE Sensör Sinyalinin Anizotropi Eksenine Bağlı Davranışı	35
2.7. Kullanılan Sensör Malzemelerinin AMR ve PHE Sinyallerine Etkisi	36
2.8. Sensör Geometrilerinin PHE Sinyaline Etkisi	39
2.8.1. Çapraz Eklem	40
2.8.2. Eğik Çapraz Eklem	40
2.8.3. 1-Halka Eklemi	42
2.8.4. Çoklu Halka Eklem	48
2.9. Sıcaklığın PHE Sensör Sinyaline Etkisi	49

2.10. PHE Sinyalindeki Gürültü Kaynakları ve PHE Sensörlerinin Manyetik Alan Çözünürlükleri	50
2.11. Esnek (Flexible) PHE Sensörü	53
3. ARAŞTIRMA TEKNİKLERİ	55
3.1. Litografi Teknikleri	55
3.1.1. Doğrudan Litografi Yöntemi	56
3.1.2. Maskeleme Yöntemi	60
3.1.3. Baskı Yöntemi (Soft Litography/Imprinting)	65
3.1.4. Söküp Alma (Lift-off) Yöntemi	68
3.1.5. Aşındırma Yöntemi	70
3.2. Mikroakışkan Kanal Üretimi	71
3.3. Sıçratma (Sputtering) Tekniği ile İnce Film Hazırlama	74
3.4. Manyetodirenç Ölçüm Sistemi	77
3.4.1. Döndürülebilir Örnek Tutucusunun Tasarımı	77
3.4.2. Döndürülebilir Örnek Tutucusunun Manyetodirenç Ölçüm Sistemine Eklenmesi	79
3.4.3. Manyetodirenç Ölçüm Sistemi Yazılımı	81
4. DENEYSEL SONUÇLAR	85
4.1. PHE Sensörlerinin Tasarımı ve Üretimi	85
4.1.1. Fotomaske Tasarımı ve Üretimi	85
4.1.2. PHE Sensör Geometrilерinin Tasarımı	88
4.1.3. PHE Sensörlerinin Üretimi	90
4.1.4. Sensörlerin Sıçratma Sisteminde Büyütülmesi	90
4.2. NiFe/Pt/IrMn Yapısındaki PHE Sensörlerinin Yapısal, Manyetik ve Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması	94
4.2.1. Giriş	94
4.2.2. Sensör Malzemelerinin Yapısal Özellikleri	95
4.2.3. Sensör Yapılarının Manyetik Özellikleri	97
4.2.4. Sensör Yapılarının Elektriksel Özellikleri	100
4.2.5. Sensör Geometrilерinin Manyetik Alan Hassasiyetine Etkisi	109
4.2.6. Sonuçlar	111
4.3. NiFe/Cr/IrMn Yapısındaki PHE Sensörlerinin Yapısal, Manyetik ve Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması	113

4.3.1. Giriş	113
4.3.2. Sensör Malzemelerinin Yapısal Özellikleri	114
4.3.3. Sensör Yapılarının Manyetik Özellikleri	114
4.3.4. Sensör Yapılarının Elektriksel Özellikleri	116
4.3.5. Sonuçlar	122
4.4. Cu, Pt ve Cr Ara Tabakalarının PHE Sensör Hassasiyetine Etkisi	123
4.4.1. Giriş	123
4.4.2. Sensör Malzemelerinin Yapısal Özellikleri	123
4.4.3. Sensör Yapılarının Manyetik Özellikleri	124
4.4.4. Sensör Yapılarının Elektriksel Özellikleri	127
4.4.5. Sonuçlar	131
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	132
KAYNAKLAR	137
ÖZGEÇMİŞ	150
EKLER	151

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	: Kesit alanı
AF	: Antiferromanyetik
AHE	: Anormal Hall etkisi (anomalous Hall effect)
AMR	: Anizotropik manyetodirenç (anisotropic magnetoresistance)
Ar	: Argon
Au	: Altın
°C	: Sıcaklık birimi (derece santigrat)
Cu	: Bakır
cm ³	: Hacim birimi (santimetre küp)
Cr	: Krom
DI	: De-iyonize, iyonlarından arındırılmış
dk	: Dakika
DM	: Diyamanyetik
$\mathbf{E}$	: Elektrik alan vektörü
E	: Enerji
E_Z	: Zeeman enerjisi
EB	: Exchange bias
$\mathbf{F}, F$	: Kuvvet vektörü, kuvvetin büyüklüğü
Fe	: Demir
FM	: Ferromanyetik
g	: Gram
$\mathbf{H}, H, \Delta H$	: Manyetik alan vektörü, Manyetik alanın büyüklüğü, manyetik alan farkı
H _C	: Sıfırlayıcı alan
H _{EB}	: Exchange bias alanı
i	: Akım
i_x	: x eksenini boyunca uygulanan akım
i_{FM}	: Ferromanyetik malzeme içinden geçen akım
IPA	: İzopropil alkol (isopropanol)

$\mathbf{J}, J$	: Akım yoğunluğu vektörü, akım yoğunluğunun büyüklüğü
J_{EB}	: Birim alan başına değiş-tokuş çiftlenim enerjisi
IrMn	: İridyum mangan
K	: Sıcaklık birimi (Kelvin)
K_{FM}, K_{AF}	: FM malzemeye ve AF malzemeye ait anizotropi sabitleri
l, w, t	: Uzunluk (length), genişlik (width), kalınlık (thickness)
$\mathbf{M}, M$	: Mıknatıslanma vektörü, mıknatıslanmanın büyüklüğü
mA	: Akım birimi (mili Amper)
mbar	: Basınç birimi (mili bar)
MOKE	: Manyeto-optik Kerr etkisi
M_s	: Doyum mıknatıslanması
M_R	: Kalıcı mıknatıslanma
MIF	: Metal iyonu içermeyen (metal ion free)
MR	: Manyetodirenç (magnetoresistance)
N ₂	: Azot gazı
Ni	: Nikel
NiFe	: Permalloy
nm	: Uzunluk birimi (nano metre)
Oe	: Manyetik alan birimi (Ørsted)
OHE	: Normal Hall etkisi (ordinary Hall effect)
OMR	: Normal manyetodirenç (ordinary magnetoresistance)
PCB	: Baskılı devre kartı (printed circuit board)
PDMS	: Polydimethylsiloxane
PM	: Paramanyetik
Pt	: Platin
PHE	: Düzlemsel Hall etkisi (planar Hall effect)
$R, \Delta R$	: Direnç, direnç farkı
$\rho, \Delta \rho$	: Öz direnç, öz direnç farkı
RIE	: Reaktif iyon aşındırma (reactive ion etching)
rpm	: Dakikadaki devir sayısı (rotation per minute)
S_{PHE}	: PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyeti
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Silisyum dioksit

SOC	: Spin yörünge etkileşmesi (spin-orbit coupling)
Ta	: Tantal
t_{AF}	: Antiferromanyetik malzemenin tabaka kalınlığı
t_{Cr}	: Krom tabakasının kalınlığı
t_{FM}	: Ferromanyetik malzemenin tabaka kalınlığı
t_{Pt}	: Platin tabakasının kalınlığı
T	: Sıcaklık simgesi
T_C	: Curie sıcaklığı
T_N	: Néel sıcaklığı
$\mu T, pT$	: Manyetik alan birimi (mikroTesla, pikoTesla)
XRD	: X-ışını kırınımı (x-ray diffraction)
XRR	: X-ışını yansıması (x-ray reflection)
UV	: Ultraviyole (mor ötesi)
$V, \Delta V$	: Voltaj, voltaj farkı
V_{AHE}	: Anormal Hall etkisi voltajı
V_{AMR}	: AMR voltajı
V_{Hall}	: Hall voltajı
V_{OHE}	: Normal Hall etkisi voltajı
V_{PHE}	: Düzlemsel Hall etkisi voltajı
v_d	: Sürüklenme hızı (drift velocity)
W	: Güç birimi (Watt)
$\parallel$	: Paralel simgesi
$\perp$	: Dik simgesi
$\theta, \phi, \beta,$	: Açılar belirtmek için kullanılan simgeler
φ, γ, ζ	: Açılar belirtmek için kullanılan simgeler
σ	: Elektriksel iletkenlik
q	: Elektriksel yük

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: a) FM, b) AF ve c) PM malzemelerde manyetik momentlerin dizilimi.	5
2.2: Tek eksenli anizotropinin a) üç boyutlu uzaydaki ve b) iki boyutlu uzaydaki enerji profillerinin temsili birer gösterimi.	7
2.3: Kolay eksenle θ açısı yapacak şekilde uygulanmış bir manyetik alan ve bu manyetik alanın etkisiyle mıknatıslanmanın kolay eksenle β açısı kadar dönmesinin şematik bir gösterimi. Burada mıknatıslanma ve manyetik alan arasındaki açı ϕ ile gösterilmiştir.	8
2.4: Manyetik histerezis eğrisinin temsili bir gösterimi. Burada doyum mıknatıslanması M_S , Doyum için gerekli olan manyetik alan H_S , sıfır manyetik alandaki mıknatıslanma değeri M_R , mıknatıslanmayı sıfır yapan manyetik alan değeri ise H_C simgeleriyle gösterilmiştir.	10
2.5: Tek eksenli manyetik anizotropiye sahip bir FM malzemenin a) kolay ve b) zor eksenleri için elde edilen histerezis eğrilerinin temsili birer gösterimi.	11
2.6: a) Tek tabakalı FM malzemenin histerezis eğrisi ve b) EB içeren iki tabakalı AF/FM manyetik bir sistemin histerezis eğrisi.	12
2.7: Meiklejohn ve Bean modeline göre EB etkisini açıklamak için kullanılan parametrelerin vektör diyagramı.	14
2.8: Elektronun madde içerisindeki hareketinin temsili bir gösterimi a) Yalnızca elektrik alan varlığında. b) Elektrik alan ve manyetik alan birlikte uygulandığında.	19
2.9: Anizotropik manyetodirenç ölçümü için temsili bir gösterim.	20
2.10: AMR etkisinden kaynaklı voltaj değişiminin temsili bir gösterimi. Burada uygulanan akım sabittir.	20
2.11: Manyetik alanın akıma paralel ve dik uygulandığı durumlar için elde edilen AMR voltajları. Burada Hall bar geometrisindeki FM malzemenin kolay eksenine akım eksenine paraleldir.	23
2.12: Hall voltajı ölçümünün şematik gösterimi.	24

2.13:	Mıknatıslanmanın koordinat eksenini de içeren bir Hall voltajı ölçümünün şematik gösterimi.	26
2.14:	a) AHE ve b) PHE voltajlarının θ_M ve φ_M açılara bağlı davranışı.	27
2.15:	PHE sensörünün şematik bir gösterimi ve ölçüm şartları.	29
2.16:	y eksenı boyunca uygulanmış manyetik alana karşılık ölçülen PHE sensör sinyali.	31
2.17:	a) xy-düzlemine paralel ve akımla φ_H açısı yapacak şekilde uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonu olarak mıknatıslanmanın yön değıştirmesi. b) Uygulanan manyetik alanın x ve y eksenlerindeki bileşenlerine ayrılması.	33
2.18:	a) $\varphi_H=80^\circ, 85^\circ, 90^\circ, 95^\circ, 100^\circ$ açıları için elde edilmiş PHE sensör sinyali. b) Çember içerisinde kalan bölgenin büyütölmüş hali.	34
2.19:	a) Manyetik kolay eksenin ve EB yönünün xy-düzleminde ve akım eksenine göre γ açısı yapacak şekilde hizalandığı durum için y eksenı boyunca uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonu olarak mıknatıslanmanın yön değıştirmesi. b) Anizotropi alanlarının x ve y eksenlerindeki bileşenlerine ayrılması	35
2.20:	$\gamma = -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ açıları için elde edilmiş PHE sensör sinyali (iç şekil) PHE sinyallerinin manyetik alan profili.	36
2.21:	a) PHE sensör yapısını oluşturan tabakaların temsili bir gösterimi ve b) bu tabakaların paralel bağlanmış dirençler olarak ele alınması.(CAP: koruyı tabaka).	37
2.22:	Çapraz eklem geometrisine sahip bir PHE sensörü.	40
2.23:	Eğik-çapraz eklem geometrisine sahip bir PHE sensörü.	41
2.24:	a) PHE sinyali karakteristiğı, b) AMR sinyali karakteristiğı. c) Eğik-çapraz eklem geometrisine sahip bir sensörün sinyal karakteristiğı AMR ve PHE sinyallerinin toplamı şeklindedir.	42
2.25:	a) 1-halka eklemi geometrisindeki PHE sensörü. b) Wheatstone köprüsü.	43
2.26:	a) Elmas görünümlü manyetik köprü sensörünün şematik bir gösterimi. b) Kolay yönün x-eksenı boyunca olması sonucunda oluşan $R1=R4$ ve $R2=R3$ durumu.	45

2.27:	Halka eklemi geometrisindeki (Wheatstone köprüsü şeklindeki) PHE sensörünün y eksenini boyunca uygulanan manyetik alana karşılık sağladığı sinyalin görünümü, çapraz eklem geometrisindeki PHE sensör sinyaline benzemektedir.	47
2.28:	5-halka eklemi geometrisine sahip bir PHE sensörü.	48
2.29:	Bir PHE sensörünün iki farklı sıcaklıkta ölçülen sinyallerinin temsili gösterimi ($T_2 > T_1$). Kırmızı sinyal sıcaklığı (T_2) temsil ederken, mavi sinyal soğukluğu (T_1) temsil etmektedir.	49
2.30:	Bir PHE sensörünün içerdiği gürültü çeşitleri ve bunların PHE sinyaline etkileri.	51
2.31:	Bir PHE sensörünün 2 Oe manyetik alana karşılık ürettiği sinyalin zamana bağlı ölçümü. Burada sinyal gürültüsü yaklaşık 100 nV mertebesindedir.	52
3.1:	Lazer yazıcı kullanılarak yapılan doğrudan litografi işlemleri.	57
3.2:	GTÜ, Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda bulunan HEIDELBERG DWL 66fs doğrudan litografi cihazının bir fotoğrafı.	58
3.3:	HEIDELBERG doğrudan litografi cihazının içerisinde bulunan optik ve hareketli parçaların bir fotoğrafı.	60
3.4:	a) HEIDELBERG doğrudan litografi cihazının iç kısmında bulunan optik yolunun ve b) ışık şiddetinin ayarlandığı mekanik filtrenin birer fotoğrafı.	60
3.5:	Maskeleme yöntemi kullanılarak yapılan litografi işlemleri.	61
3.6:	GTÜ, Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda bulunan Karl SÜSS MJB4 maske hizalama cihazının bir fotoğrafı.	62
3.7:	Maskenin ve alttaşın yerleştirilip hizalandığı platformun bir fotoğrafı.	63
3.8:	Alttaşın yerleştirildiği platformun bir fotoğrafı.	64
3.9:	Farklı ebatlardaki vakumlu maske tutucuları ve alttaş platformlarının bir fotoğrafı.	65
3.10:	Baskı yöntemi ile yapılan litografi işlemlerinin şematik bir gösterimi.	66

3.11:	a) SU-8 (3050) kullanılarak SiO ₂ alttaş üzerine üretilmiş PDMS kalıbının bir fotoğrafı. b) Hazırlanan PDMS damganın bir fotoğrafı. c) Baskı işleminin bir fotoğrafı.	68
3.12:	Lift-off yöntemi kullanılarak yapılan litografi işlemlerinin şematik bir gösterimi.	69
3.13:	Aşındırma yöntemi kullanılarak yapılan litografi işlemleri.	70
3.14:	Mikro akışkan kanal paketleme işlemi.	71
3.15:	Mikroakışkan kanal üretmek için tasarlanmış bir fotomaskenin fotoğrafı.	72
3.16:	a) Pasif akışlı mikroakışkan kanal için mikroskop camı (lam) üzerine üretilmiş PDMS kalıbının bir fotoğrafı. b) Mikroskop camı kullanılarak paketlenmiş pasif akışlı bir mikroakışkan kanalın fotoğrafı. c) Mikroakışkan kanalın yandan bir görünümü.	74
3.17:	Sıçratma tekniğinin şematik bir gösterimi.	75
3.18:	a) GTÜ, NASAM bünyesindeki sıçratma sistemi. b) Sıçratma sistemi içerisinde bulunan tabancalar. c) Tabancalara yerleştirilen hedef malzemeler.	76
3.19:	Sıçratma sisteminin a) 3-boyutta ve b) 2-boyutta şematik birer gösterimi. Burada hedef malzemelerinden çıkan plazma akısı alttaş düzlemine 45° açı ile gelmektedir. Alttaş üzerine büyütülen NiFe hedef malzemesinin kolay eksenine plazma akısına dik yönde oluşmaktadır.	77
3.20:	a) Döndürülebilir örnek tutucunun gerçek fotoğrafı. b) Örnek tutucunun uç tarafına sabitlenmiş dişi PCB. (c) Dişi PCB ile uyumlu erkek PCB'nin arka ve d) ön yüzü.	78
3.21:	Döndürülebilir örnek tutucunun tasarımı.	79
3.22:	a) Manyetodirenç ölçüm sisteminin gerçek fotoğrafı. b) Döndürülebilir örnek tutucunun elektromıknatısların ortasına yerleştirilmiş görüntüsü. c) Bağlantı istasyonunun detaylı görünümü.	80
3.23:	Manyetodirenç ölçüm sisteminin şematik gösterimi. KEPCO BOP 20-50 güç kaynağı elektromıknatısa uygulanan akımı kontrol ederken, Keithley 2400 cihazıyla sensöre sabit akım uygulanıp,	81

	Keithley 2182a cihazı ile de sensörün manyetik alana karşılık ürettiği voltaj ölçülmektedir.	
3.24:	Değişken manyetik alan altında manyetodirenç ölçümü yapmak için hazırlanmış labview programının ekran görüntüsü.	83
3.25:	Zamana bağlı ve sabit manyetik alan altında manyetodirenç ölçümü yapmak için hazırlanmış labview programının ekran görüntüsü.	84
4.1:	Tasarlanan ve üretilen foto-maskelerin fotoğrafları.	88
4.2:	a) $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alttaşın bir yarısında Hall bar geometrisi varken diğer yarısında sürekli film bulunmaktadır. b) Çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5 halka eklemi geometrilerindeki PHE sensörlerinin $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alttaş üzerindeki tasarımı.	89
4.3:	a) Altı uçlu Hall bar geometrisi, b) çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5 halka eklemi geometrilerindeki PHE sensörlerinin tasarım detayları.	90
4.4:	a) PCB üzerinde bağlantıları yapılmış Hall bar geometrisinde ve sürekli film şeklinde üretilen sensörün bir fotoğrafı. b) çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrilerinde üretilen sensörün bir fotoğrafı.	93
4.5:	10 watt dc güç kullanılarak, 10 dakika süresince SiO_2 alttaş üzerine büyütülen Pt malzemesine ait XRR ölçümü (siyah daire) ve GlobalFit programından elde edilen analiz sonucunun (kırmızı çizgi) uyumu.	96
4.6:	NiFe ve IrMn arasındaki Pt ara tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişen histerezis eğrileri. Burada, manyetik alan, akım yoluna paraleldir. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.	98
4.7:	NiFe ve IrMn arasındaki Pt ara tabakasının kalınlığının bir fonksiyonu olarak değişen H_{EB} (siyah, kare) ve H_C (kırmızı, daire) değerleri.	99
4.8:	Manyetik alan ile akım yolunun dik olduğu durumda, $t_{Pt}=0.5 \text{ nm}$ ve $t_{Pt}=1.0 \text{ nm}$ için ölçülen histerezis eğrileri.	100
4.9:	NiFe(10)/Pt(0.5)/IrMn(8) (nm) sensör yapısına ait AMR ölçüm sonuçları. Burada manyetik alan ile akımın paralel ve dik olduğu durumlar için ayrı ayrı ölçümler yapılmıştır.	101

4.10:	a) NiFe(10)/IrMn(8) (nm) ve NiFe(10)/Pt(1.0)/IrMn(8) (nm) sensör yapılarına ait PHE ölçüm sonuçları. b) Sensörlerin tepeden tepeye ve doğrusal bölgelerinden hesaplanan manyetik alan hassasiyetleri.	103
4.11:	Pt ara tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişen AMR oranı (%) ve ΔV_{PHE} .	104
4.12:	NiFe(10)/Pt(0.3)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensöründen elde edilen sıcaklığa bağlı sensör sinyali ve manyetik alan hassasiyeti.	105
4.13:	300 K ve 390 K sıcaklığındaki ve NiFe(10)/Pt(0.3)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensörü için elde edilen sinyallerin gürültü seviyeleri.	106
4.14:	NiFe(10)/Pt(0.9)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensörü için elde edilmiş gerçek zamanlı PHE sinyali. Ölçüm oda sıcaklığında yapılmıştır.	107
4.15:	NiFe(10)/Pt(0.9)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensörü için manyetik gecikme ölçümleri. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.	108
4.16:	NiFe(10)/Pt(0.8)/IrMn(8) (nm) yapısında ve a) çapraz eklem b) eğik-çapraz eklem c) 1-halka eklemi d) 5-halka eklemi geometrilerindeki PHE sensörleri için elde edilen PHE sinyalleri. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.	110
4.17:	NiFe(10)/Pt(0.8)/IrMn(8) (nm) yapısında ve farklı geometrilerde üretilen PHE sensörlerinden elde edilen hassasiyet değerleri.	111
4.18:	Manyetik alanın akıma paralel uygulandığı durumda NiFe(10)/IrMn(8) (nm) yapısı için elde edilen a) kolay eksen histerezis eğrisi ve b) AMR sinyali.	115
4.19:	NiFe(10)/Cr(t_{Cr})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr} :0-1nm) sensör yapılarının H_C ve H_{EB} değerlerinin Cr ara tabakasının bir fonksiyonu olarak değişimi.	116
4.20:	a) t_{Cr} = 0.0 nm ve b) t_{Cr} =1.0 nm kalınlığında Cr ara tabakaları içeren sensör yapıları için elde edilmiş AMR sinyalleri.	118
4.21:	a) t_{Cr} = 0.0 nm ve t_{Cr} =1.0 nm kalınlığında Cr ara tabakaları içeren sensör yapıları için elde edilmiş PHE sinyalleri. b) Sinyallerin	120

	tepeden tepeye ve doğrusal bölgelerinden hesaplanmış manyetik alan hassasiyetleri (eğim).	
4.22:	NiFe(10)/Cr(t_{Cr})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr} :0-1nm) sensör yapıları için elde edilen AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerlerinin Cr ara tabakasının bir fonksiyonu olarak değişimi.	121
4.23:	NiFe(10)/Cr(0.7)/IrMn(20) (nm) yapısındaki PHE sensörünün gerçek zamanlı PHE sinyali. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.	122
4.24:	a) İki tabakalı NiFe(10 nm)/IrMn(8 nm) sensör yapısı için ve b) Cu, c) Pt ve d) Cr ara tabakası içeren sensör yapıları için elde edilmiş kolay eksen histerezis eğrileri. Buradaki ara tabakalar 0.5 nm kalınlığındadır ve ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.	125
4.25:	Üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Pt, Cr, Au, Cu) sensör yapılarının histerezis eğrileri üzerinden belirlenmiş H_c ve H_{EB} değerleri.	126
4.26:	Üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Cu, Pt, Cr) sensör yapılarındaki çapraz eklemlerden elde edilmiş PHE sinyalleri. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.	128
4.27:	Cu, Pt ve Cr ara tabakalarına sahip çapraz eklem geometrisindeki PHE sensörlerinden elde edilen hassasiyet değerleri ve Cu, Pt ve Cr elementlerinin öz direnç değerleri arasındaki uyum.	129
4.28:	Üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Cu, Pt, Cr) yapılarında ve çapraz eklem geometrisinde üretilmiş PHE sensörlerinin oda sıcaklığındaki sinyal gürültüleri.	130

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: Birinci sensör serisindeki sensör yapılarında kullanılan hedef malzemeler için uygulanan güç değerleri, elde edilen tabaka kalınlıkları, yoğunlukları, pürüzlük değerleri ve tabakaların büyüme hızları.	96
4.2: İkinci örnek serisindeki sensör yapılarında kullanılan hedef malzemeler için uygulanan güç değerleri, elde edilen tabaka kalınlıkları, yoğunlukları, pürüzlük değerleri ve tabakaların büyüme hızları.	114
4.3: Üçüncü örnek serisindeki sensör yapılarında kullanılan hedef malzemeler için uygulanan güç değerleri, elde edilen tabaka kalınlıkları, yoğunlukları, pürüzlük değerleri ve tabakaların büyüme hızları.	124

1. GİRİŞ

Düzlemsel Hall etkisine (PHE: planar Hall effect) dayanan manyetik alan sensörleri miliTesla ile pikoTesla aralığındaki zayıf manyetik alanların yönünü ve büyüklüğünü çok hassas bir şekilde ölçmede kullanılmaktadır [1–4]. PHE sensörlerinin kolay üretilmesi, çok küçük boyutu [5], düşük güç tüketimi [6], sıcaklık dalgalanmalarından çok fazla etkilenmemesi [7,8], yüksek sinyal/gürültü oranı [9,10] ve zayıf manyetik alanlardaki doğrusal tepkisi [11] gibi özellikleri bulunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde PHE sensörlerinin bulaşıcı hastalıklar gibi çok düşük konsantrasyona sahip biyolojik hedefleri teşhis etme [12–14], kalp atışı ve kan basıncı ölçme [15], dokunsal algılama (tactile sensing) [15], çok hassas mikro-elektronik pusula [16], metallerdeki mikro çatlakların tespiti [6], akım sensörü [17], çip üstü manyetometre [18], biyolojik uygulamalar için çok hassas termometre [19] gibi uygulama alanları vardır. PHE sensörü alanında yapılan güncel çalışmaların ana hedefleri ise PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetlerini ve çözünürlüklerini arttırmakla birlikte [1,4,20], bu sensörleri esnek (giyilebilir) hale getirmektir [21–23]. Daha hassas ve çözünürlüğü yüksek sensörlerin üretilmesi, biyolojik uygulamalarda daha düşük konsantrasyonlardaki hastalıkların teşhisine imkân sağladığı gibi, diğer uygulamalarda da yapılan ölçümlerin doğruluğunu arttırmaktadır. Ayrıca, sensörün esnek olarak üretilmesi ve manyetik alan hassasiyetinin bükülmelerden çok fazla etkilenmemesi bu sensörün esnek veya düzlemsel olmayan yüzeylerde kullanılmasına imkân sağlamaktadır [17,21].

PHE sensörünün manyetik alan hassasiyeti sensörün geometrisi ve yapısı olmak üzere iki ana parametreden etkilenmektedir. Literatürde şimdiye kadar sensör geometrileri olarak çapraz eklem [7,11,19,24–27], eğik çapraz eklem [28], halka [20,29] ve elmas [3,30] görünümündeki Wheatstone köprüleri incelenmiştir. Bu sensör geometrileri arasında Wheatstone köprüsü şeklinde üretilen sensörlerin manyetik alan hassasiyetleri çapraz eklemlere kıyasla çok daha fazladır. Ayrıca, sensör geometrisine ek olarak, sensör yapısında kullanılan her bir tabaka şönt akımı oluşturarak ve/veya algılama katmanının anizotropi enerjisini değiştirerek sensör sinyali üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Şimdiye kadar literatürde sensör yapısı olarak tek tabakalı Ni ince film [31], iki tabakalı NiFe/IrMn [11,19,32], üç tabakalı NiFe/X/IrMn (X: Cu [4], Au [24,33]) ve dört tabakalı NiFe/Cu/NiFe/IrMn (spin vanası) [22,34] sensör

yapıları araştırılmıştır. Bu sensör yapıları arasında üç tabakalı PHE sensör yapısı, iki tabakalı PHE sensörlerine kıyasla daha zayıf kaydırma etkisi (EB: exchange bias) ve spin vanası yapılarına kıyasla daha düşük şönt akımı nedeniyle en yüksek sensör hassasiyetini sağlamaktadır [4]. Bunlara ek olarak, üç tabakalı sensör yapılarında kullanılan ara tabakanın cinsi ve kalınlığı da sensör sinyalini çok fazla etkilemektedir. Şimdiye kadar iki çalışma grubunun altın (Au) ara tabaka kullanması hariç [24,33], bütün üç tabakalı PHE sensörlerinde bakır (Cu) ara tabakası kullanılmıştır [4,25,30,35,36]. Cu ara tabakası NiFe algılama tabakasını manyetik açıdan daha yumuşak hale getirmesine rağmen [37,38], bakırın düşük öz direnci nedeniyle sensörün çıkış voltajında bir azalmaya sebep olmaktadır [4]. Bakır ara tabakasının sensör hassasiyeti üzerindeki bu olumsuz etkisi, özellikle kullanılan daha kalın Cu ara tabakalar için baskın hale gelmektedir. Bu olumsuz etkilerden kaçınmak için, PHE sensör uygulamalarında en uygun kalınlıkta daha yüksek dirençli bir ara tabaka malzemesi kullanılmalıdır.

Bu tez çalışmasında, platin (Pt) ve krom (Cr) elementlerinin altın ve bakıra kıyasla daha yüksek öz dirençlere sahip olduğu, Pt elementinin güçlü spin-yörünge etkileşimi ve Cr elementinin zayıf spin-yörünge etkileşimine sahip olduğu göz önünde bulundurularak, literatürde ilk defa üç tabakalı NiFe (10 nm)/Pt (t_{Pt})/IrMn (8 nm) (t_{Pt} = 0-1 nm) ve NiFe (10 nm)/Cr (t_{Cr})/IrMn (8 nm) (t_{Cr} = 0-1 nm) yapılarında üretilen PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyeti Pt ve Cr ara tabaka kalınlıklarının bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Ayrıca, üretilen sensörlerde anizotropik manyetodirenç ölçümleri, sıcaklığa bağlı PHE sensör davranışları, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklardaki sensörün sinyal/gürültü oranı ve gerçek uygulamalar açısından manyetik alanın varlığında/yokluğunda sensörün nasıl tepki verdiğini anlamak için zamana bağlı sensör sinyali ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sensör hassasiyetini daha fazla artırmak için, 0.8 nm kalınlığında Pt ara tabakası içeren sensör yapısı çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrilerinde üretilmiş ve bu sensörlerden elde edilen manyetik alan hassasiyetleri literatürle kıyas edilmiştir. Son olarak, 0.5 nm kalınlığında Cu, Pt ve Cr ara tabakaları içeren üç tabakalı NiFe(10 nm)/NM (0.5 nm)/IrMn(8 nm) PHE sensörleri çapraz eklem geometrisinde ve sürekli film şeklinde üretilip, sensörlerin manyetik alan hassasiyeti ara tabakanın cinsinin bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır.

Sonuç olarak, Pt ara tabakasının kullanılması sayesinde Cu ara tabakalı sensörlerde şönt etkisi sebebiyle gözlenen çıkış voltajındaki azalma giderilmiştir [39].

Ayrıca, Pt ara tabakasının kalınlığı 1 nm'ye kadar artırıldıkça sensör yapılarının AMR oranları ve tepeden tepeye ölçülen PHE voltajlarında salınımlı bir şekilde artış gözlenmiştir. Bu sonuç, PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetini beklenenden daha fazla artırmıştır. Sensör yapılarında Cr ara tabakası kullanıldığında ise tepeden tepeye ölçülen PHE voltajlarında sistematik olarak bir azalma gözlenmesine rağmen, sensörlerin manyetik alan hassasiyetlerinde önemli ölçüde bir artış gözlenmiştir. Tezin son kısmında, aynı kalınlıkta Cu, Pt ve Cr ara tabakaları içeren sensörlerin manyetik alan hassasiyetleri incelendiğinde, Pt ve Cr ara tabakaları içeren sensör yapılarının Cu ara tabakası içeren sensör yapısına göre daha iyi sonuçlar verdiği deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca, üretilen sensörlerin sıcaklığa ve zamana bağlı ölçümlerinde, sensörlerin uygulanan sabit manyetik alanın şiddetine ve yönüne karşı sağladığı sinyallerin oldukça kararlı oldukları gözlenmiştir. Bu özellikleriyle, tez çalışması kapsamında üretilen Pt ve Cr ara tabakalı PHE sensörlerinin zayıf manyetik alanları ölçmeyi gerektiren birçok uygulamada kullanılabilir oldukları tespit edilmiştir.

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Bundan sonraki ikinci bölümde PHE sensörlerinin üretildiği manyetik malzemeler ve elektriksel ölçümler için çok önemli olan direnç, manyetodirenç, Hall etkileri, PHE sensörü ve PHE sinyali hakkında teorik bilgiler anlatılmıştır. Tezin üçüncü bölümünde sensör tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu için kullanılan cihazlar ve deneysel teknikler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, tez çalışması kapsamında üretilen sensörlerin yapısal, manyetik ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler ve deneylerden elde edilen bulgular sunulmuştur. Beşinci bölümde ise tüm sonuçlar değerlendirilip, tez kapsamında üretilen sensörlerin gelecekte iyileştirilebilmeleri için öneriler verilmiştir.

2. TEMEL KAVRAMLAR ve TEORİK BİLGİLER

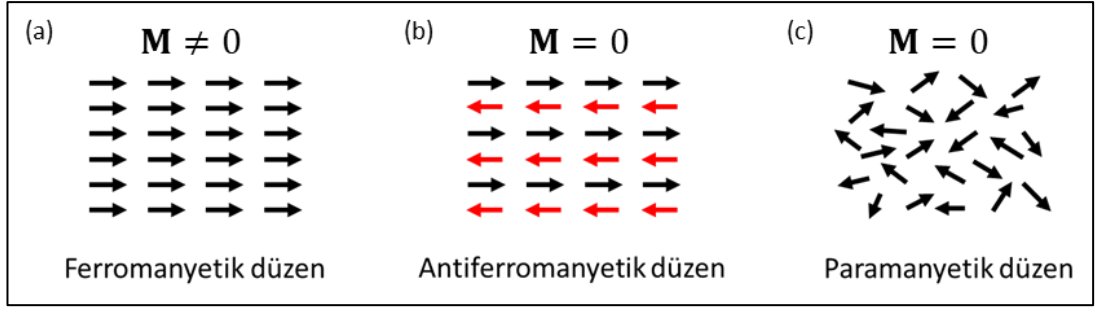
Bu bölümde öncelikle, PHE sensörlerinin üretildiği manyetik malzemeler hakkındaki temel kavramlar anlatılmıştır. Sonrasında, sensörlerden okunan elektriksel sinyaller malzemelerin dirençleri ile ilgili olduğundan, normal direnç, manyetodirenç, normal Hall etkisi, anormal Hall etkisi ve düzlemsel Hall etkisi konularına burada yer verilmiştir. En son olarak, PHE sensörlerinin elde edilmesi, sensör sinyalleri ve bu sinyallerin özellikleri hakkında teorik bilgiler sunulmuştur.

2.1. Manyetizmanın Temel Kavramları

Manyetizma açısından maddeler genel olarak diyamanyetik (DM), paramanyetik (PM), ferromanyetik (FM), ferrimanyetik ve antiferromanyetik (AF) olarak sınıflandırılır [40]. Tez çalışmasında çoğunlukla FM ve AF malzemeler kullanıldığı için bu başlık altında FM ve AF malzemelerin özellikleri anlatılmıştır. Burada, manyetik moment ve mıknatıslanma kavramlarının da iyi bilinmesi gerekmektedir. Fakat, bu konulara tezde detaylı olarak yer verilmemiştir. Manyetik malzemeler hakkında detaylı bilgiler veren Türkçe ve İngilizce çok sayıda kaynak bulunmaktadır. [40–44].

2.1.1 Manyetik Malzemeler

Manyetik bir malzeme içerisindeki her bir atomun manyetik momentini bir vektör ile temsil edilirse, malzemenin toplam mıknatıslanması ve mıknatıslanma yönü bu vektörlerin toplamı olarak tarif edilebilir [40]. FM, AF ve PM malzemelerdeki manyetik momentlerin serbest haldeki (yani manyetik alanın sıfır olduğu ve uygun sıcaklıktaki) yerleşim düzenleri Şekil 2.1: a) FM, b) AF ve c) PM Şekil 2.1’de gösterildiği gibidir. FM malzemelerdeki manyetik momentler aynı yöne bakmaya meyilliyken, AF malzemelerdeki manyetik momentler zıt yönlerde bakmaya meyillidir. PM malzemelerdeki manyetik momentler ise rastgele yönlerde bakmaktadır. Bu sebeple, serbest haldeki FM malzemelerde toplamda net bir mıknatıslanma gözlemlenirken, AF ve PM malzemelerin sıfır manyetik alandaki ortalama mıknatıslanmalarının sıfır olması beklenir.



Şekil 2.1: a) FM, b) AF ve c) PM malzemelerde manyetik momentlerin dizilimi.

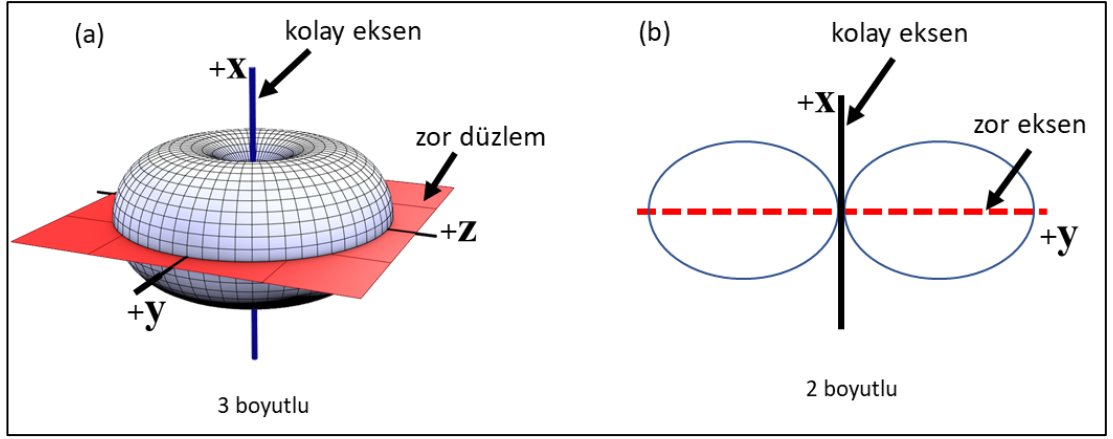
FM ve AF malzemelerdeki manyetik momentlerin düzenleri bu malzemelerin sıcaklıklarına da bağlıdır [40,45]. Eğer FM malzemenin sıcaklığı belirli bir seviyenin üzerine çıkartılırsa, malzemenin ferromanyetik özelliği kaybolur ve manyetik momentler rastgele yönlere bakmaya başlar. Böylece FM malzeme artık paramanyetik malzeme gibi davranır ve malzemenin sıfır manyetik alandaki ortalama mıknatıslanması sıfır olur. FM özelliğin kaybolduğu bu sıcaklığa Curie sıcaklığı (T_C) denir. Benzer şekilde AF malzemenin AF düzeninin bozulduğu sıcaklığa Néel sıcaklığı (T_N) denir. Her FM malzemenin Curie sıcaklığı ve her AF malzemenin Néel sıcaklığı kendine özgüdür. Ayrıca, ultra ince film şeklinde üretilen FM malzemelerin Curie sıcaklıkları ve AF malzemelerin Néel sıcaklıkları bu malzemelerin tabaka kalınlıklarına da bağlıdır [46,47]. FM ve AF malzemelerin Curie ve Néel sıcaklıklarının oda sıcaklığının çok üzerine olması, oda sıcaklığında çalışan cihazların üretilmesine imkân sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında da Curie ve Néel sıcaklığı oda sıcaklığının çok üzerinde olan $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ($T_C > 550 \text{ K}$) [48] ve $\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$ ($T_N > 400 \text{ K}$) [47] malzemeleri kullanılmıştır.

2.1.2. Manyetik Anizotropi

Manyetik anizotropi, bir manyetik malzemenin mıknatıslanmasının yöne bağlı olmasıdır. Mıknatıslanmanın yöne bağlılığı malzemenin kristal yapısına özgü (crystal anisotropy) olabileceği gibi [40], malzemenin şekline ve kalınlığına (shape anisotropy) [49], malzemedeki gerilmelere (stress induced anisotropy) [50,51] ve daha sonra anlatılacak olan exchange bias etkisine (exchange anisotropy) [52,53] de bağlıdır. Doğadaki manyetik malzemeler farklı kristal yapılarına sahip olduğundan, malzemelerin manyetik özellikleri de kristal yapılarına göre farklılıklar

göstermektedir. Örneğin, Fe elementi hacim merkezli kübik bir kristal yapıya sahip olduğundan, kübik manyetik anizotropiye sahiptir. Diğer bir ifade ile Fe elementinin (100) kristal yönelimlerindeki mıknatıslanması diğer (110) ve (111) yönlerindeki mıknatıslanmasına kıyasla daha kolaydır [40]. Manyetik anizotropi hakkındaki detaylı bilgi için ilgili kaynaklara bakılmalıdır [40,53–55]. PHE sensörlerini üretmek için kullanılan NiFe malzemesinin ise tek eksenli manyetik anizotropiye sahip olması istenmektedir [7,9,56]. Bu başlık altında PHE sensörlerinde kullanılan NiFe gibi manyetik malzemelerdeki tek eksenli manyetik anizotropi kavramı izah edilmiştir.

Ultra ince film şeklinde ve tek eksenli manyetik anizotropiye sahip bir FM malzemenin manyetik momentleri, dış manyetik alanın yokluğunda, bir eksen üzerinde durmayı tercih ederler. Bu eksene kolay eksen denir. FM malzemenin manyetik momentlerinin tamamı kolay eksen üzerinde aynı yönde durabileceği gibi, bir kısmı bir yöne bakarken, diğer kısmı da 180° farklı yöne bakabilir. Ayrıca kolay eksene eşlik eden bir de zor eksen vardır. Kolay eksen ve zor eksen aslında tek bir manyetik sistemin en yüksek ve en düşük enerji durumunu tarif etmek için kullanılır. Üç boyutlu uzayda, tek eksenli manyetik anizotropinin enerji profili Şekil 2.2.a)'da gösterildiği gibi simit (torus) şekline benzer [55]. Burada enerjinin merkezden dışa doğru gittikçe arttığı ve serbest halde (sıfır manyetik alan ve uygun sıcaklıkta) sistemin en düşük enerji seviyesini tercih ettiği göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla, simit şeklinin kutupsal bölgeleri kolay ekseni (en düşük enerjiyi) tarif ederken, Ekvator bölgesi de zor düzlemi (en yüksek enerjiyi) tarif etmektedir. Fakat, üç boyutlu enerji profili iki boyutta tarif edilirse, zor düzlem ancak ve ancak Şekil 2.2.b)'deki gibi bir eksen şeklinde gösterilebilir. Bu durumda, tek eksenli anizotropiye sahip manyetik malzemelerde zor eksen olarak tarif edilen kavramın üç boyutlu uzayda bir düzlemi temsil ettiğine dikkat edilmelidir.



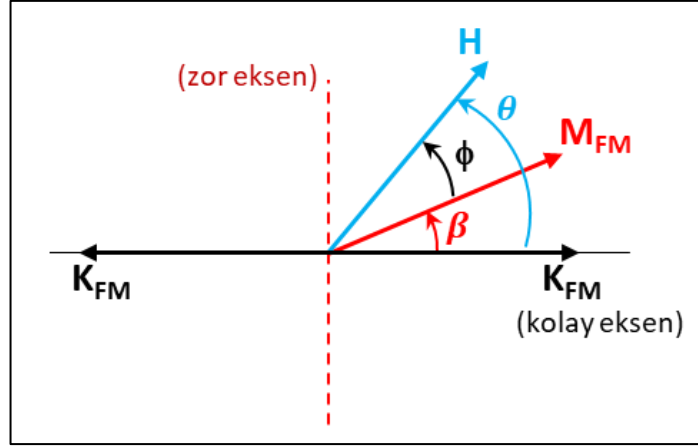
Şekil 2.2: Tek eksenli anizotropinin a) üç boyutlu uzaydaki ve b) iki boyutlu uzaydaki enerji profillerinin temsili birer gösterimi.

Şekil 2.2’de gösterilen tek eksenli anizotropiye sahip manyetik bir malzemenin kolay ve zor eksenini aşağıdaki enerji denklemi ile tarif edilir [40,55];

$$E = K_0 + K_{FM} \sin^2 \beta \quad (2.1)$$

Burada manyetik momentler ile kolay eksen arasındaki açı Şekil 2.3’te verildiği gibi β ile gösterilmiştir. Birinci terim (K_0) yönden bağımsız (izotropik) bir enerjidir. İkinci terim ($K_{FM} \sin^2 \beta$) ise β yönüne bağlı olup (anizotropik), K_{FM} değeri manyetik momentleri kolay eksenle tutma kuvvetinin bir ölçüsüdür. Ayrıca, K_{FM} teriminin işareti de önemlidir. Tek eksenli manyetik anizotropiye sahip manyetik malzemelerin K_{FM} terimi yalnızca pozitif değerlere sahiptir. Manyetik momentler kolay eksenle paralel ($\beta=0^\circ, 180^\circ$) olduğu zaman, enerji ifadesi en düşük ($E = K_0$), dik ($\beta=90^\circ, 270^\circ$) olduğu zaman ise enerji ifadesi en yüksek ($E = K_0 + K_{FM}$) durumunda olur. Bu sistem serbest bırakılırsa (sıfır manyetik alan ve uygun sıcaklık için), manyetik momentler kendilerine en yakın en düşük enerji durumunu tercih edeceğinden, manyetik momentler kendilerine en yakın kolay eksen üzerinde kararlı bir şekilde dururlar. Eğer böyle bir sisteme kolay eksenle θ açısı yapacak şekilde bir de dış manyetik alan uygulanırsa, malzemenin mıknatıslanma davranışı Şekil 2.3’te gösterildiği gibi olur. Uygulanan manyetik alanın etkisiyle manyetik momentler kolay eksenle sapaarak manyetik alan yönüne doğru dönmeye başlar. Manyetik alanın büyüklüğü arttırıldıkça, manyetik momentler alan yönünde bir doyuma ulaşır. Burada mıknatıslanmanın ($\mathbf{M}$) kolay eksenle yaptığı açı β , uygulanan manyetik alanın ($\mathbf{H}$)

kolay eksenle yaptığı açı θ , ve manyetik alan ile mıknatıslanma arasındaki açı da ϕ ile gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Kolay eksenle θ açısı yapacak şekilde uygulanmış bir manyetik alan ve bu manyetik alanın etkisiyle mıknatıslanmanın kolay eksen β açısı kadar dönmesinin şematik bir gösterimi. Burada mıknatıslanma ve manyetik alan arasındaki açı ϕ ile gösterilmiştir.

Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilen sistemin manyetik serbest enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilir [40,55];

$$E = K_0 + K_{FM} \sin^2 \beta - \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} \quad (2.2)$$

$$E = K_0 + K_{FM} \sin^2 \beta - MH \cos \phi \quad (2.3)$$

Buradaki $\mathbf{M} \cdot \mathbf{H} = MH \cos \phi$ terimine Zeeman enerjisi (E_Z) denir. Uygulanan manyetik alan tek yönlü olduğundan, bu terim yön belirten $\cos \phi$ ile tarif edilir. Bu nedenle uygulanan manyetik alan, enerji ifadesi içerisinde tek yönlü bir anizotropiye sebep olur. Ayrıca, böyle bir manyetik sistemde, uygulanan manyetik alana karşılık, manyetik momentlerin durmayı tercih ettiği yön (β) açısı, enerjinin en az olduğu yöndür. Manyetik sistemin en düşük enerji değerini bulabilmek için $\theta = \beta + \phi$ eşitliği denklem (2.3) içerisinde kullanılarak, θ ve β açılarına bağlı analitik bir enerji ifadesi elde edilir;

$$E = K_0 + K_{FM} \sin^2 \beta - MH \cos(\theta - \beta) \quad (2.4)$$

Burada dış manyetik alanın kolay eksene göre uygulanma yönü (yani θ değeri) bilindiğinden, Denklem (2.4) içindeki β açısı 0° - 360° aralığında taranırsa, en düşük enerji ifadesinin hangi β değerinde olduğu bulunabilir. Böylece, uygulanan her bir manyetik alan adımı için en düşük enerji durumları bulunarak, herhangi bir deney için β değerleri hesaplanabilir. Burada kolaylık olması açısından K_0 değeri sıfır olarak alınabilir. Çünkü sistemin asıl davranışını $K_{FM} \sin^2 \beta$ ve $\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}$ terimleri belirlemektedir.

Denklem (2.4) Stoner-Wohlfarth modeli olarak da bilinmektedir [57]. Bu modelde, FM malzeme içindeki manyetik momentlerin tek domen olarak tutarlı bir şekilde döndüğü (coherent rotation) varsayılmaktadır. Ayrıca, denklem (2.4) içerisinde FM malzemenin kalınlığına ve sıcaklığına bağlı bir parametre olmadığına dikkat edilmelidir.

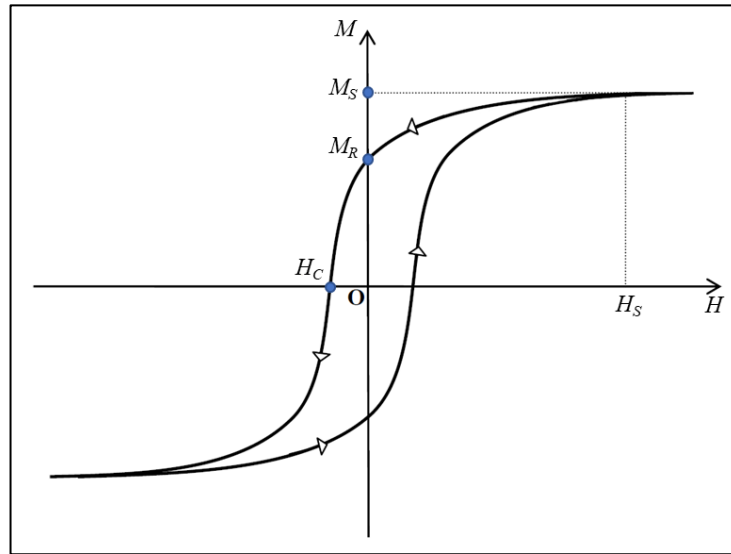
2.1.3. Manyetik Histerezis Eğrisi

Bir maddenin manyetik alan altındaki mıknatıslanma davranışını gösteren eğriye manyetik histerezis eğrisi denir [40,54,55]. Şekil 2.4'te temsili bir manyetik histerezis eğrisi gösterilmiştir. Histerezis eğrisinin düşey ekseni mıknatıslanmayı (M), yatay ekseni ise uygulanan dış manyetik alanı (H) ifade etmektedir. Uygulanan manyetik alanın büyüklüğü arttırıldıkça, mıknatıslanma değeri bir doyuma ulaşır. Buna doyum mıknatıslanması (saturation of magnetization) denir ve M_s ile gösterilir. Doyum mıknatıslanması manyetik malzeme içerisindeki manyetik momentlerin tamamının uygulanan manyetik alan yönünde döndüğünü ifade etmektedir. Dolayısıyla, bu doyum noktasından sonra manyetik alanın artırılması mıknatıslanmada bir artış meydana getirmez. Doyum mıknatıslanmasının gözlemlendiği bu manyetik alan değerine de doyum alanı (saturation field) denir ve H_s ile gösterilir. Manyetik alan uygulanıp kaldırıldıktan sonra (sıfır manyetik alanda), manyetik alanın uygulanma yönündeki mıknatıslanma değerine de kalıcı mıknatıslanma (remanent magnetization) denir ve M_R ile gösterilir. Manyetik alan tersi (eksi) yönde arttırılırsa mıknatıslanmanın sıfır olduğu bir manyetik alan değeri görülür. Bu noktaya sıfırlayıcı ya da zorlayıcı alan (coercive field) denir ve H_C ile gösterilir. Bu noktadan sonra manyetik alan daha fazla

arttırılırsa mıknatıslanma değeri eksi yöndeki manyetik alan yönünde bir doyuma ulaşır. Benzer şekilde, manyetik alan eksi yönden artı yöne doğru taranmaya devam ederse histerezis eğrisi tamamlanmış olur. FM malzemeler için elde edilen histerezis eğrilerinin, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, sıfır noktası etrafında simetrik olması beklenir. Ayrıca, H_C değeri manyetik malzemedeki K_{FM} anizotropi değerinin de bir fonksiyonudur ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir [40];

$$H_C = \frac{2K_{FM}}{M_S} \quad (2.5)$$

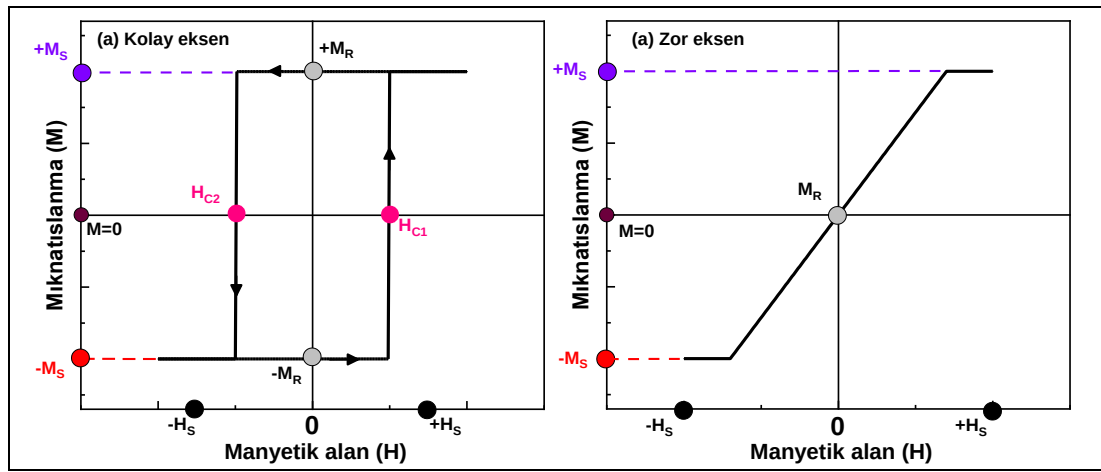
Denklem (2.5)'ten de anlaşılabileceği gibi, anizotropisi yüksek (yani K_{FM} değeri yüksek) olan FM malzemelerin mıknatıslanmasının yön değiştirebilmesi için daha şiddetli bir dış manyetik alan uygulanması gerekir.



Şekil 2.4: Manyetik histerezis eğrisinin temsili bir gösterimi. Burada doyum mıknatıslanması M_S , doyum için gerekli olan manyetik alan H_S , sıfır manyetik alandaki mıknatıslanma değeri M_R , mıknatıslanmayı sıfır yapan manyetik alan değeri ise H_C simgeleriyle gösterilmiştir.

PHE sensör uygulamalarında tek eksenli manyetik anizotropiye sahip FM malzemeler kullanılır. Tek eksenli manyetik anizotropiye sahip bir ferromanyetik malzemenin dış manyetik alan altındaki mıknatıslanma davranışı (histerezis eğrisi) ise temsili olarak Şekil 2.5'te verilmiştir [40]. Buradaki mıknatıslanma değeri, manyetik kolay eksen boyunca ($\theta=0^\circ$) ve manyetik zor eksen boyunca ($\theta=90^\circ$) olmak üzere iki

farklı açıda uygulanan manyetik alan altında incelenmektedir. Kolay eksen boyunca ölçülen histerezis eğrisi Şekil 2.5.a)'da gösterildiği gibi oldukça köşeli bir görünüme sahiptir ve histerezis eğrisinin $\pm M_R$ değeri $\pm M_S$ değerine eşittir. Çünkü, mıknatıslanma sıfır manyetik alanda zaten kolay eksenini tercih ettiğinden, bütün manyetik momentler uygulanan alan yönünde durmaya devam etmektedir. İdeal bir zor eksen histerezis eğrisinde ise, Şekil 2.5.b)'de gösterildiği gibi, M_R değeri sıfır olur. Çünkü manyetik alan sıfır olduğunda manyetik momentler kendilerine en yakın kolay eksene dönmeyi tercih edeceğinden dolayı uygulanan manyetik alan doğrultusunda bir mıknatıslanma bileşeni kalmaz.

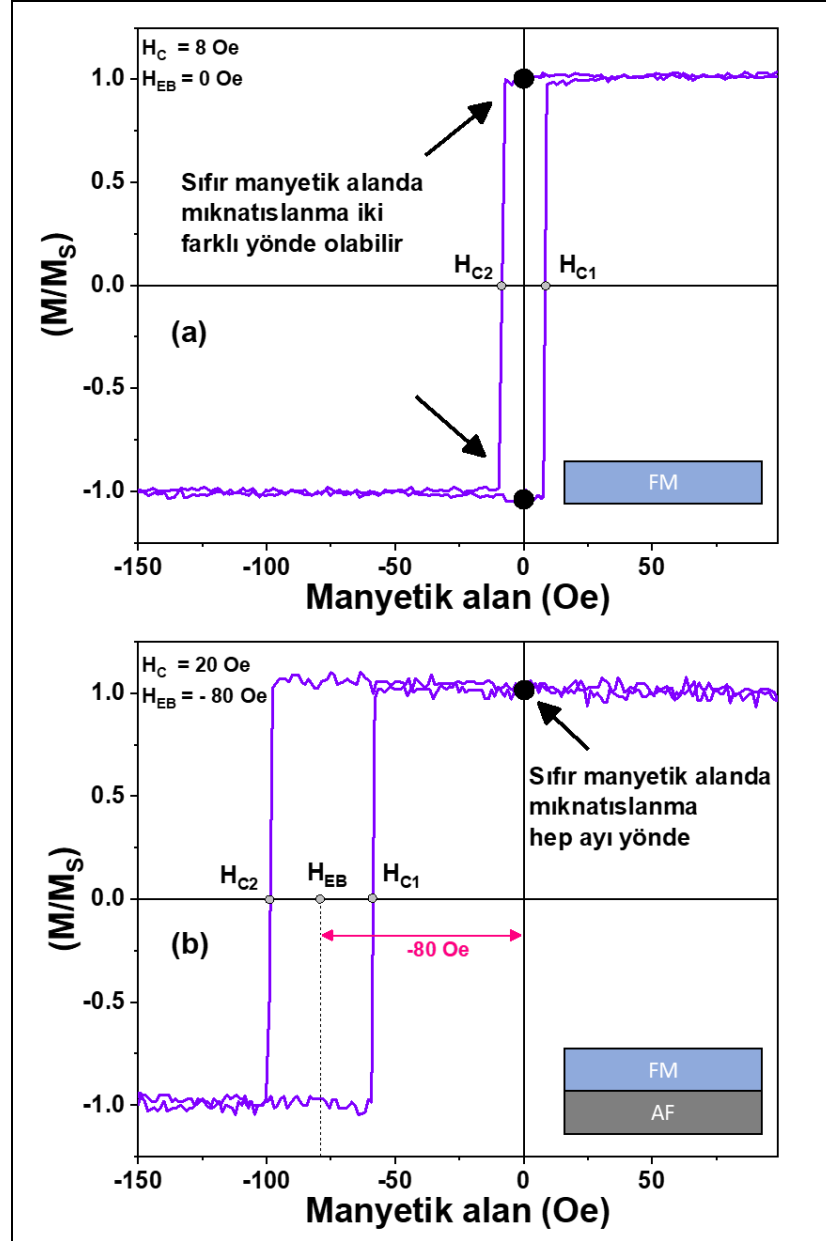


Şekil 2.5: Tek eksenli manyetik anizotropiye sahip bir FM malzemenin a) kolay ve b) zor eksenleri için elde edilen histerezis eğrilerinin temsili birer gösterimi.

2.2. Exchange Bias Etkisi

Bir FM malzeme ile bir AF malzemenin arayüz oluşturmaları sonucunda, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi FM malzemenin histerezis eğrisinde bir genişleme ve manyetik alan ekseninde bir kayma gözlenir [52,53,58]. Bu olaya exchange bias (EB) etkisi denir ve histerezis eğrisindeki kayma miktarına da exchange bias alanı (H_{EB}) denir. EB etkisi sayesinde, sıfır manyetik alanda, FM malzemedeki manyetik momentler yalnızca bir yönde durmaya zorlanırlar. Dışarıdan manyetik alan uygulandığında, FM malzemenin manyetik momentleri manyetik alan yönünde dönse bile, manyetik alan kaldırıldığında, EB etkisi sayesinde FM malzemedeki manyetik momentler EB etkisinin kurulduğu başlangıç durumuna geri dönerler. Böylece, AF malzeme sayesinde FM malzeme içerisinde tek yönlü anizotropi (unidirectional anisotropy)

oluşturulmuş olur ve buna exchange anizotropisi denir [40]. Tek yönlü anizotropiye sahip spintronik cihazlar (PHE sensörleri dâhil) manyetik alan altında tekrar edilebilir bir cihaz sinyali sağlar.



Şekil 2.6: a) Tek tabakalı FM malzemenin histerezis eğrisi ve b) EB içeren iki tabakalı AF/FM manyetik bir sistemin histerezis eğrisi.

Şekil 2.6.b)'de gösterilen histerezis eğrisinin H_{EB} ve H_C değerleri, histerezis eğrisi üzerindeki H_{C1} ve H_{C2} noktaları kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenebilir [53];

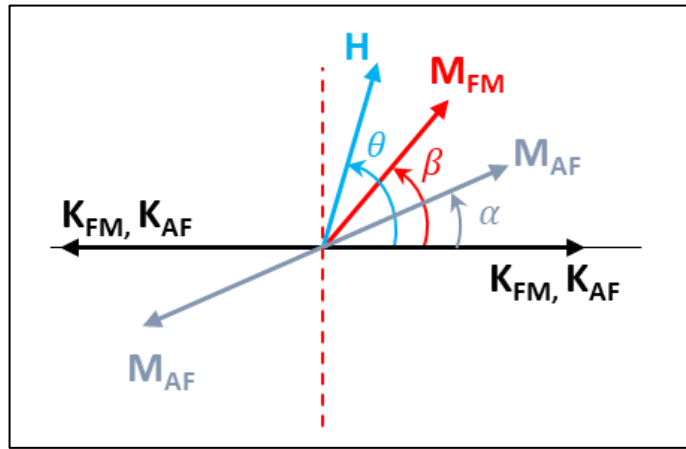
$$H_{EB} = \frac{H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (2.6)$$

$$H_C = \frac{-H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (2.7)$$

EB etkisi ilk defa 1956 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından gözlenmiştir [52]. Üzerinde çalıştıkları Co parçacıklarının yüzeyinin doğal olarak oksitlenmesi sonucunda, parçacıkların yüzeyinde CoO oluşmuştur ve parçacıkların içerisinde hâlâ oksitlenmemiş Co atomları da bulunmaktadır. Burada, doğal olarak bir CoO/Co (AF/FM) ara yüzeyi oluşmuştur ve bu sayede düşük sıcaklıklarda elde ettikleri histerezis eğrilerinde bir kayma gözlemlemişlerdir. EB etkisinin ilk defa gözlenmesinden bu yana, EB etkisinden kaynaklanan histerezis eğrilerindeki değişimleri izah etmek için birçok model önerilmiştir [59–67]. Bu modeller çok özel durumları izah etmede kullanılabilmektedir. Fakat, EB etkisinin tüm katkılarını içeren ve bütün deneysel sonuçlara uygulanabilen bir matematik model henüz önerilememiştir. EB etkisini açıklamak için önerilen ilk teorik yaklaşım Meiklejohn ve Bean tarafından yapılmıştır [59]. EB etkisini izah etmek için, bu iki bilim adamı bazı varsayımlarda bulunmuşlardır. Bu varsayımlar aşağıdaki gibidir;

- FM malzemedeki manyetik momentler ve AF malzemedeki manyetik momentler tek domen (single domain) durumunda bulunurlar ve uygulanan manyetik alana karşılık, manyetik momentler tutarlı bir şekilde dönerler (coherent rotation).
- FM/AF arayüzeyi atomik olarak pürüzsüzdür.
- AF malzemenin yüzeyindeki manyetik momentlerin tamamı eşleşmemiştir (fully uncompensated). Bu sebeple, AF malzemenin yüzeyi net bir mıknatıslanmaya sahiptir.
- FM/AF arayüzeyindeki manyetik momentler arayüzey boyunca değiş-tokuş etkileşmesi yaparlar. Bu etkileşmeyi temsil eden parametreye birim alan başına değiş-tokuş çiftlenim (exchange coupling) enerjisi denir ve J_{EB} ile gösterilir.
- AF tabakası düzlem içinde tek yönlü bir $\mathbf{K}_{AF}$ anizotropisine sahiptir ve anizotropi yönü manyetik alanla değişmemektedir.

Bütün bu varsayımlar temel alınarak, manyetik alan ve mıknatıslanmanın koordinat eksenlerini de içeren iki boyutlu şematik bir gösterim Şekil 2.7’de sunulmuştur. Burada, $\mathbf{K}_{FM}$ ve $\mathbf{K}_{AF}$ sırasıyla FM malzemenin ve AF malzemenin anizotropi yönlerini ve büyüklüklerini belirten vektörlerdir. Sıfır manyetik alanda $\mathbf{M}_{FM}$ ve $\mathbf{M}_{AF}$ vektörleri $\mathbf{K}_{FM}$ ve $\mathbf{K}_{AF}$ yönünde durmaktadırlar. Uygulanan manyetik alanın etkisiyle $\mathbf{M}_{FM}$ ve $\mathbf{M}_{AF}$ manyetik alan yönüne doğru dönmektedirler. Burada, $\mathbf{M}_{AF}$ ile $\mathbf{K}_{AF}$ arasındaki açı α simgesiyle, $\mathbf{M}_{FM}$ ile $\mathbf{K}_{FM}$ arasındaki açı β simgesiyle ve $\mathbf{H}$ ile anizotropi eksenleri arasındaki açı ise θ simgesiyle gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Meiklejohn ve Bean modeline göre EB etkisini açıklamak için kullanılan parametrelerin vektör diyagramı.

Şekil 2.7’de gösterilen vektör diyagramına göre, FM ve AF malzemelerin kalınlıklarını da içeren, sistemin toplam enerji ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [53,59];

$$E = K_{FM}t_{FM} \sin^2(\beta) + K_{AF}t_{AF} \sin^2(\alpha) - \mu_0 M_{FM} H t_{FM} \cos(\theta - \beta) - J_{EB} \cos(\beta - \alpha) \quad (2.8)$$

Burada ilk terim FM malzemenin anizotropi enerjisi, ikinci terim AF malzemenin anizotropi enerjisi, üçüncü terim Zeeman enerjisi ve dördüncü terim ise değiş-tokuş çiftlenim enerjisidir. Eğer manyetik alan, manyetik anizotropi yönünde (kolay eksen boyunca) uygulanırsa θ değeri sıfır olur. Bu durumda, enerjinin minimum değerlerini elde etmek için, enerji ifadesinin α ve β açılarına göre türevlerinin alınıp sıfıra

eşitlenmesi gerekmektedir. İlk olarak enerji ifadesinin α açısına göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \frac{K_{AF}t_{AF}}{J_{EB}} \sin(2\alpha) - \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad (2.9)$$

ifadesi elde edilir. Burada exchange bias gözlenebilmesi için bir kritik durum ifadesi çıkarılabilir. Buna göre;

$$\frac{K_{AF}t_{AF}}{J_{EB}} \geq 1, \text{ EB görülür.} \quad (2.10)$$

$$\frac{K_{AF}t_{AF}}{J_{EB}} < 1, \text{ EB gözülmez ancak } H_C \text{ artar} \quad (2.11)$$

durumları elde edilir. Denklem (2.10)'da $K_{AF}t_{AF}$ değerinin J_{EB} değerine eşit veya bu değerden büyük olması durumunda EB görülür. Eğer küçük ise, EB görülmez ancak histerezis eğrisinin H_C değeri artar. İkinci durumda, t_{AF} kalınlığı artırılarak, $K_{AF}t_{AF}$ değerinin J_{EB} değerinden büyük olması sağlanabilir ve bu şekilde EB gözlenebilir.

İkinci olarak, enerji ifadesinin β açısına göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{\partial E}{\partial \beta} = \mu_0 M_{FM} H t_{FM} \sin(\beta) + K_{FM} t_{FM} \sin(2\beta) + J_{EB} \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad (2.12)$$

ifadesi bulunur. Eğer denklem (2.12), $\beta = 0$ ve $\beta = \pi$ değerleri için çözülürse, sıfırlayıcı alan değerleri;

$$H_{C1} = -\frac{2K_{FM}t_{FM} + J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (2.13)$$

$$H_{C2} = \frac{2K_{FM}t_{FM} - J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (2.14)$$

olarak bulunur. Buradaki H_{C1} ve H_{C2} ifadeleri denklem (2.6) ve (2.7) içerisine yerleştirilirse;

$$H_{EB} = \frac{-J_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (2.15)$$

$$H_C = \frac{2K_{FM}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (2.16)$$

elde edilir.

EB etkisi PHE sensör yapılarında sıfır manyetik alanda FM malzemenin mıknatıslanma yönünü sabitlemek için kullanılır. Bu sayede PHE sensörleri tekrar edilebilir bir sensör sinyali sağlamaktadır. Ayrıca, PHE sensör yapılarında, yukarıda bahsedildiği gibi, $\mathbf{K}_{FM}$ ve $\mathbf{K}_{AF}$ anizotropi vektörleri aynı yöne bakmaktadır. Bu sebeple PHE sensör uygulamalarında, FM malzeme içerisindeki manyetik momentleri kolay eksene çağıran kuvvet, manyetik alan cinsinden $H_C + H_{EB}$ olarak verilir.

Literatürde, EB etkisinin belirli bir mesafeye kadar etkili olduğuna dair çalışmalar da vardır [4,33,68,69]. AF tabaka ile FM tabaka arasına, manyetik olmayan (NM: non-magnetic) çok ince üçüncü bir tabaka daha yerleştirildiğinde, EB etkisi ara tabakanın kalınlığının bir fonksiyonu olarak azalmaktadır. Yeterince kalın kullanılan ara tabakalar için EB etkisi kaybolmaktadır. Araya yerleştirilen üçüncü tabaka EB etkisini azalttığından, FM malzemenin manyetik momentlerinin iki tabakalı AF/FM yapılarına kıyasla daha serbest hareket etmesi sağlanmaktadır. Böylece, üç tabakalı AF/NM/FM yapıları sayesinde, PHE sensörleri manyetik alana daha duyarlı hale getirilmektedir.

Ayrıca literatürde, iki farklı FM tabaka, manyetik olmayan (NM) üçüncü bir tabakayla ayrıldığında, bu iki FM tabakanın mıknatıslanmalarının da birbirini etkilediği gözlenmiştir. Birbirinden NM tabaka ile ayrılmış iki FM tabaka arasında gözlenen bu etkileşmeye RKKY (Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida) etkileşmesi denir ve üç tabakalı AFM/NM/FM yapısındakine benzer şekilde aradaki NM tabakanın kalınlığı arttıkça RKKY etkileşmesi azalmaktadır [70]. RKKY etkileşmesi sonucunda da üç tabakalı FM/NM/FM yapısının histerezis eğrisinde bir kayma gözlenebilmektedir. Bunu yapmak için, FM tabakanın bir tanesinde güçlü anizotropi

olması gerektiğinden, FM tabakalardan bir tanesindeki manyetik momentler bir AF tabaka yardımıyla sabitlenmektedir. Böylece dört tabakalı AF/FM/NM/FM spin vana yapısı elde edilmektedir. Bu sayede, diğer serbest FM tabakada RKKY etkileşmesi sayesinde tek yönlü anizotropi oluşturulabilmektedir [34,71].

2.3. Maddelerin Elektriksel Direnci ve Hall Etkileri

Manyetik malzemelerle yapılan sensör uygulamaları için direnç kavramının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple, bu başlık altında normal direnç, normal manyetodirenç, anizotropik manyetodirenç, normal Hall direnci, anormal Hall direnci ve düzlemsel Hall direnci kavramları anlatılmıştır.

2.3.1. Normal Direnç ve Normal Manyetodirenç (OMR)

Elektrik akımı (i), bir madde (veya ortam) içinden birim zamanda geçen elektrik yükü (q) miktarı olarak tarif edilmektedir [72]. Bir ortamdaki elektrik alan ($\mathbf{E}$), bu ortamda bulunan q yüküne etki eden Lorentz kuvveti ($\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$) sebebiyle elektrik akımına sebep olabileceği gibi, bir maddedeki bölgesel sıcaklık farkı da elektrik akımına sebep olabilmektedir [73]. Bu başlıkta yalnızca ortamdaki elektrik alan sebebiyle oluşan elektrik akımı ele alınmıştır.

Eğer bir ortama (maddeye) elektrik alan ($\mathbf{E}$) uygulanırsa o ortamda oluşan elektriksel akımın yoğunluğu ($\mathbf{J}$) ortamın elektriksel iletkenliği (σ) ile doğru orantılıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir [72];

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.17)$$

Ayrıca, akım yoğunluğunun büyüklüğü (J), birim kesit alandan geçen akım miktarı (i/A) olarak ifade edilip, elektrik alanın büyüklüğü (E) de iki nokta arasındaki potansiyel fark ($\Delta V/l$) şeklinde ifade edilirse, denklem (2.17) aşağıdaki gibi yazılır;

$$\frac{i}{A} = \sigma \frac{\Delta V}{l} \quad (2.18)$$

$$i = \frac{\sigma A}{l} \Delta V \quad (2.19)$$

Denklem (2.19), l uzunluğundaki iki nokta arasına ΔV kadarlık bir potansiyel fark uygulanıp, ortamda elektrik alan oluşturulduğunda, oluşacak akım miktarının tamamen ortamın geometrisiyle ve ortamın elektriksel iletkenliğiyle ilgili olduğunu göstermektedir. Elektriksel iletkenliğin tersi ($1/\sigma$), ortamın öz direnci anlamına gelmektedir ve ρ simgesi ile gösterilir. Öz direnç ifadesi denklem (2.19) içerisinde yerine yazılıp denklem düzenlenirse;

$$i = \frac{A}{\rho l} \Delta V \quad (2.20)$$

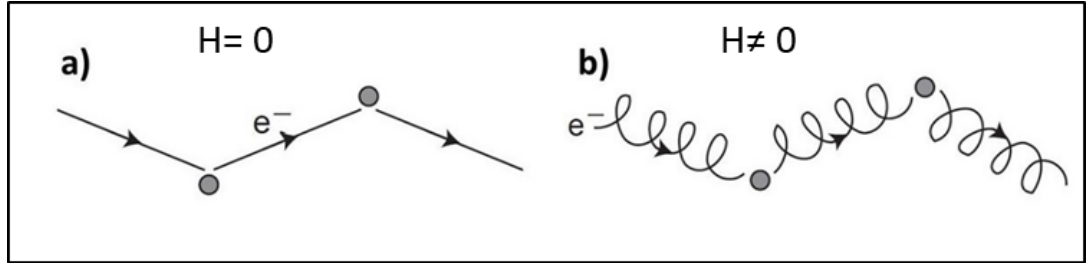
$$i = \frac{\Delta V}{\frac{\rho l}{A}} \quad (2.21)$$

$$i = \frac{\Delta V}{R} \quad (2.22)$$

Ohm yasası olarak da bilinen denklem (2.22) elde edilir. Burada, $\rho l/A$ terimi ortamın toplam direnç ifadesini oluşturduğundan, bu terime ortamın elektriksel direnci denmektedir ve kısaca R (resistance) harfi ile gösterilmektedir. Denklem (2.17-2.22) ifadelerine dayanarak sıradan direnç; bir ortamın veya malzemenin kendi içinden geçen akıma karşı zorluk göstermesinin bir ölçüsüdür denilebilir.

Normal manyetodirenç (OMR: ordinary magnetoresistance) ise uygulanan $\mathbf{E}$ elektrik alanına ek olarak, ortamda bir de $\mathbf{H}$ manyetik alanı varsa ortaya çıkmaktadır [54,74]. Bu durumda ortamdaki elektronlara etki eden Lorentz kuvveti $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$ ifadesine dönüşür. Burada, yüklü parçacığın madde içerisindeki sürüklenme hızı $\mathbf{v}_d$ ile ve uygulanan $\mathbf{H}$ manyetik alanına karşılık madde içinde oluşan manyetik indüksiyon $\mathbf{B}$ ile gösterilmiştir ($\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}$). Uygulanan manyetik alan nedeniyle oluşan manyetik kuvvet, elektronun $\mathbf{v}_d$ yönündeki hareketine diktir. Yani manyetik alanın varlığı, elektronun $\mathbf{E}$ alanı içindeki ortalama doğrusal hareketini bozmaktadır ve elektronun yolunu uzatmaktadır. Bu sebeple manyetik alanın varlığında ölçülen

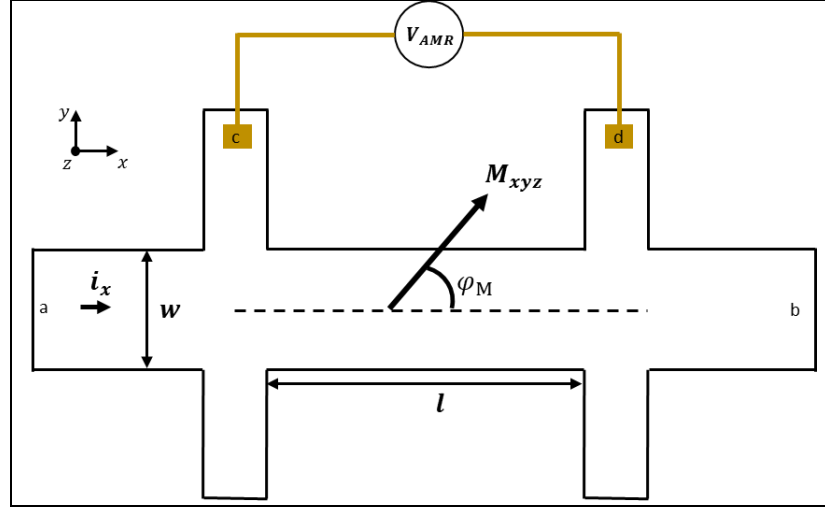
direnç değeri normal direnç değerine kıyasla bir miktar artmaktadır ve bu direnç değeri manyetik alanın şiddetine de bağlıdır. Ayrıca, OMR olayı bütün iletkenlerde görülür. Şekil 2.8’de manyetik alanın yokluğu ve varlığı için elektronun madde içerisindeki hareketi temsilen gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Elektronun madde içerisindeki hareketinin temsili bir gösterimi. a) Yalnızca elektrik alan varlığında. b) Elektrik alan ve manyetik alan birlikte uygulandığında.

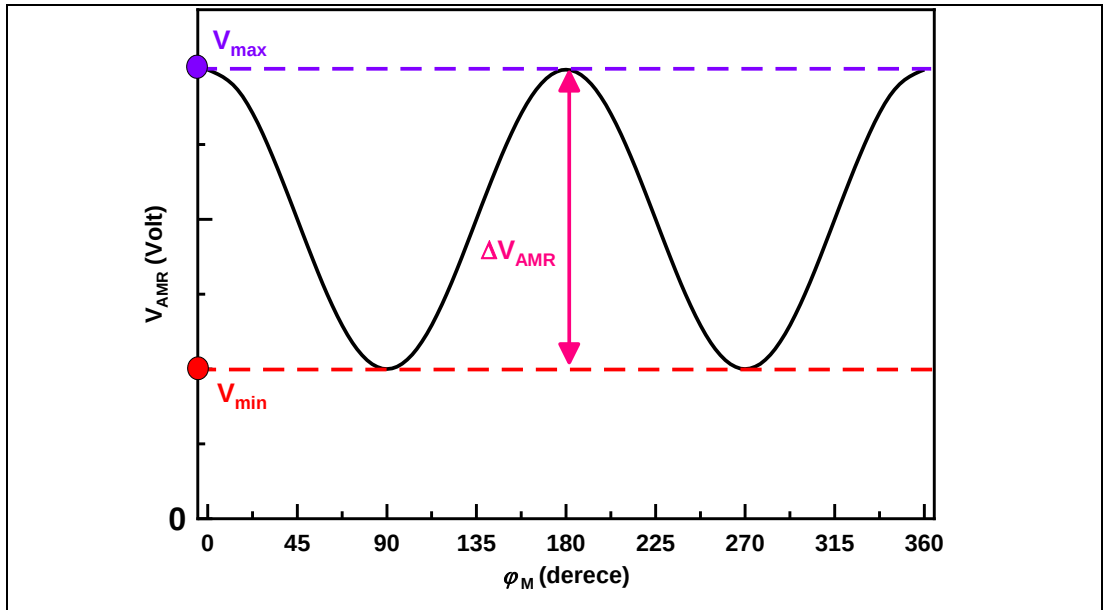
2.3.2. Anizotropik Manyetodirenç (AMR)

FM malzemelerin direnci, malzemenin geometrisine ek olarak, akım ile manyetik momentler arasındaki açığa da bağlıdır ve bu etkiye anizotropik manyetodirenç (AMR: anisotropic magnetoresistance) denir [75]. AMR etkisi ilk defa 1856 yılında Lord Kelvin olarak da bilinen William Thomson tarafından gözlenmiştir [76]. Literatürde, anizotropik manyetodirencin FM malzemelerdeki spin-yörünge etkileşmesinden (SOC: spin-orbit coupling) kaynaklandığı belirtilmektedir [74,75]. AMR etkisinin gözlenmesi için sabit akım altında, uygulanan manyetik alana karşılık sıradan bir voltaj ölçümü gerçekleştirmek yeterlidir. Şekil 2.9’da bu ölçüm düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Burada a-b uçları arasından sabit i_x akımı uygulanıp c-d uçları arasından voltaj ölçülmektedir.



Şekil 2.9: Anizotropik manyetodirenç ölçümü için temsili bir gösterim.

Şekil 2.9’da gösterilen ölçüm düzeneğinde, eğer manyetik momentler şiddetli bir dış manyetik alan yardımıyla 360° döndürülüp, her bir açı değeri için voltaj kaydedilirse, Şekil 2.10’da gösterildiği gibi, manyetik momentlerin akıma paralel ($\varphi_M=0^\circ, 180^\circ$) olduğu durumlar için en yüksek voltaj ($V_{\max}$) değeri, dik ($\varphi_M=90^\circ, 270^\circ$) olduğu durumlar için ise en düşük voltaj ($V_{\min}$) değeri gözlenir. Diğer açılar için ölçülen voltaj değerleri ise bu en yüksek ve en düşük voltajlar arasında sistematik bir şekilde değişir.



Şekil 2.10: AMR etkisinden kaynaklı voltaj değişiminin temsili bir gösterimi. Burada uygulanan akım sabittir.

FM malzemenin geometrisi ve üzerinden geçen akımın sabit olduğu kabul edildiğinden, gözlenen bu voltaj değişimi öz dirençteki değişime atfedilmektedir [74]. Eğer manyetik momentler ile akım birbirine paralel ($\varphi_M=0^\circ, 180^\circ$) olduğunda öz direnç $\rho_{\parallel}$ olarak, eğer dik ($\varphi_M=90^\circ, 270^\circ$) olduğunda öz direnç $\rho_{\perp}$ olarak gösterilirse, AMR etkisi sebebiyle gözlenen bu voltaj değişimi aşağıdaki denklem ile ifade edilir [74,75,77,78];

$$V_{AMR} = \frac{i_x l}{wt} [\rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \varphi_M] \quad (2.23)$$

Burada φ_M açısına değerler verilerek denklem (2.23) test edilirse, $\varphi_M=0^\circ$ (paralel) olduğu durum için $\cos^2 \varphi_M=1$ olur ve içteki parantez olduğu gibi açılır. Dolayısıyla köşeli parantez içerisinde yalnızca $\rho_{\parallel}$ ifadesi kalır ve akımla manyetik momentlerin paralel olduğu durumdaki voltaj değeri elde edilir.

$$V_{\parallel} = \frac{i_x l}{wt} [\rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2(0)] \quad (2.24)$$

$$V_{\parallel} = \frac{i_x l}{wt} [\rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})] \quad (2.25)$$

$$V_{\parallel} = \frac{i_x l}{wt} \rho_{\parallel} = i_x R_{\parallel} \quad (2.26)$$

Benzer şekilde $\varphi_M=90^\circ$ (dik) olduğu durum için $\cos^2 \varphi_M=0$ olur ve köşeli parantez içerisinde yalnızca $\rho_{\perp}$ ifadesi kalır ve akımla manyetik momentlerin dik olduğu durumdaki voltaj değeri elde edilir

$$V_{\perp} = \frac{i_x l}{wt} [\rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2(90)] \quad (2.27)$$

$$V_{\perp} = \frac{i_x l}{wt} \rho_{\perp} = i_x R_{\perp} \quad (2.28)$$

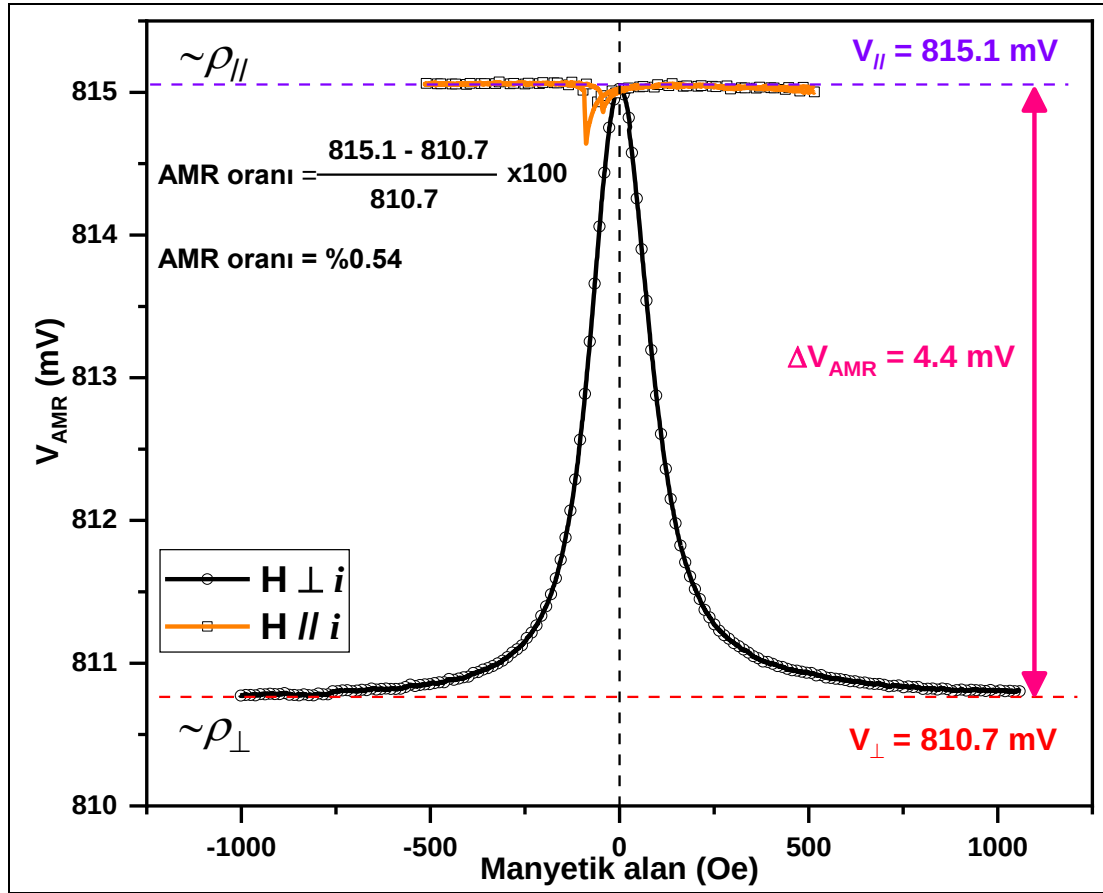
Ayrıca, FM malzemelerde en yüksek direncin en düşük dirence göre yüzde olarak ne kadar değiştiğini gösteren ifadeye de AMR oranı denir ve aşağıdaki gibi hesaplanır [74,75];

$$AMR \text{ oranı } (\%) = \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}} \times 100 = \frac{R_{\parallel} - R_{\perp}}{R_{\perp}} \times 100 \quad (2.29)$$

Burada ($R_{\parallel} - R_{\perp}$) en yüksek ve en düşük direnç arasındaki farktır ve ΔR_{AMR} olarak gösterilir. AMR oranı yüksek malzemeler daha hassas sensörlerin üretilmesine imkân sağladığı gibi, spintronik cihazların da daha düşük akımlarla çalışmasına olanak sağlamaktadır.

$R_{\parallel}$ ve $R_{\perp}$ değerlerini belirlemek için manyetik momentlerin 360° döndürülmesine gerek yoktur. Bu direnç değerleri daha basit bir şekilde belirlenebilir. Bunu yapmak için manyetik momentleri doyurmaya yetecek kadar şiddetli bir manyetik alan doğrudan akım eksenine paralel ve dik olacak şekilde uygulanır ve voltaj kaydedilir. Manyetik alanın akıma paralel uygulandığı durum için $R_{\parallel}$ değeri elde edilirken, manyetik alanın akıma dik uygulandığı durum için $R_{\perp}$ değeri elde edilir. Bu yöntem kullanılarak, Şekil 2.11’de manyetik bir sistemin $R_{\parallel}$ ve $R_{\perp}$ değerlerinin elde edilmesi gösterilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi manyetik alanın akıma dik uygulandığı durum için manyetik alan pozitif ve negatif yönde arttırıldıkça AMR voltajı azalmaktadır ve bir doyuma ulaşmaktadır. Burada sıfır manyetik alanda en yüksek voltajın gözlenmesi, manyetik kolay eksenin akım eksenine paralel hizalandığını göstermektedir. Manyetik alanın akıma paralel uygulandığı durum için ise ölçülen voltaj değeri manyetik alanla çok fazla değişmemektedir. Yine bu sonuç da manyetik kolay eksenin akım yoluna paralel hizalandığının bir göstergesidir. Ayrıca, manyetik alanın paralel uygulandığı durumda ölçülen bu AMR voltajı üzerinde iki adet dip nokta görülmektedir. Bu dip noktalar yaklaşık olarak histerezis eğrisindeki H_C değerlerine karşılık gelmesi beklenir. Çünkü mıknatıslanma pozitif yönden negatif yöne doğru dönerken akımla bir miktar açı yaparak dönmektedir. Bu sebeple tam dönme sırasında dirençte bir azalma gözlenmektedir. Ölçümdeki bu dip noktalar sayesinde, bu manyetik sistemdeki H_{EB} değeri de belirlenebilmektedir. Ölçüm sırasında uygulanan akım sabit olduğundan, doğrudan manyetik alanın akıma paralel ve dik uygulandığı durumlar için ölçülen voltaj değerleri akım değerlerine bölünerek $R_{\parallel}$ ve $R_{\perp}$ direnç değerleri belirlenir. Ek olarak, AMR oranı hesabı için voltaj değerleri

de doğrudan kullanılabilir. Çünkü AMR oranı ifadesindeki akım terimleri birbirini sadeleştirmektedir.

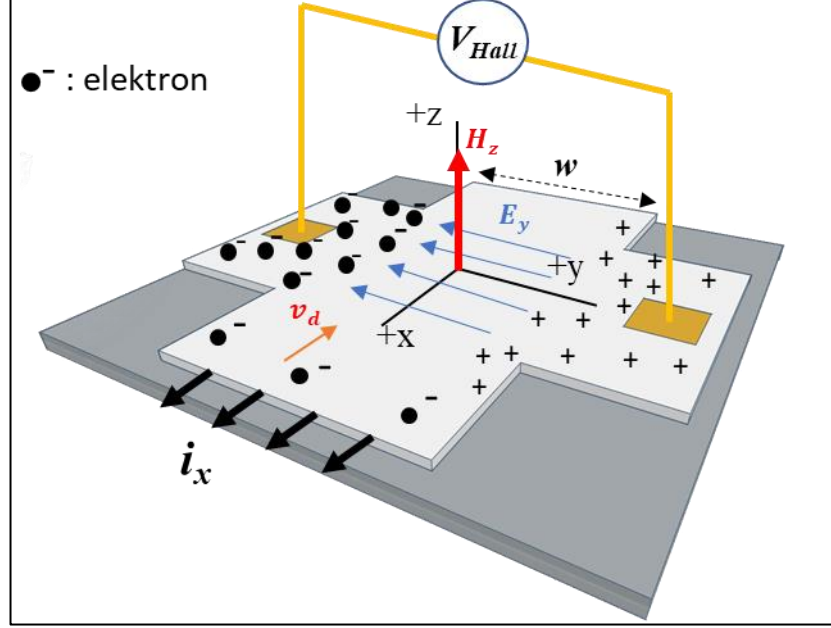


Şekil 2.11: Manyetik alanın akıma paralel ve dik uygulandığı durumlar için elde edilen AMR voltajları. Burada Hall bar geometrisindeki FM malzemenin kolay eksenine akım eksenine paraleldir.

2.3.3. Hall Etkileri (OHE, AHE, PHE)

Normal Hall etkisi (OHE: ordinary Hall effect) 1879 yılında Edwin Hall tarafından keşfedilmiştir [79]. Normal direnç ölçümlerinden farklı olarak, Hall direnci (ya da Hall voltajı) akım yolu boyunca değil, akım yoluna dik olacak şekilde karşılıklı noktalardan ölçülmektedir [79,80]. Şekil 2.12’de bir Hall voltajı ölçümü şematik olarak gösterilmiştir. Burada dış manyetik alan $+z$ yönünde ve akım $+x$ yönünde uygulanmıştır. Bu durumda iletken içerisindeki serbest elektronlar akıma ters yöndeki bir sürüklenme hızıyla (v_d : drift velocity) $-x$ yönüne doğru hareket etmektedir. $+z$ yönünde uygulanan H_z manyetik alanı sebebiyle elektronlar $-y$ yönünde bir kuvvet ($F_y = qv_d \times B_z$) hissetmektedir ve malzemenin $-y$ tarafında negatif yükler

birikmektedir. Bu sebeple malzeme içerisinde -y yönünde bir elektrik alan (E_y) oluşmaktadır.



Şekil 2.12: Hall voltajı ölçümünün şematik gösterimi.

-y yönünde oluşan elektrik alanının sebebi, +z ekseninde indüklenen B_z manyetik alanı olduğundan, elektrona etki eden bu iki kuvvet birbirine eşitlenebilir. Böylece,

$$F_y = qE_y = qv_d B_z \quad (2.30)$$

$$E_y = v_d B_z \quad (2.31)$$

elde edilir. Ayrıca, malzeme içerisinde oluşan elektrik alan (E_y), ölçülen Hall voltajı (ΔV_{OHE}) değeri ve malzeme genişliğinin (w) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [72];

$$E_y = \frac{\Delta V_{OHE}}{w} \quad (2.32)$$

Malzeme içerisindeki elektronların sürüklenme hızı (v_d) ise birim hacimdeki serbest yüklerin sayısına (n), elektronun yüküne (q), malzemenin kalınlığına (t) ve genişliğine (w) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [72];

$$v_d = \frac{i_x}{wt n q} \quad (2.33)$$

Denklem (2.32) ve (2.33) ifadeleri denklem (2.31) içerisine yerleştirilirse;

$$\frac{\Delta V_{OHE}}{w} = \frac{i_x}{wt n q} B_z \quad (2.34)$$

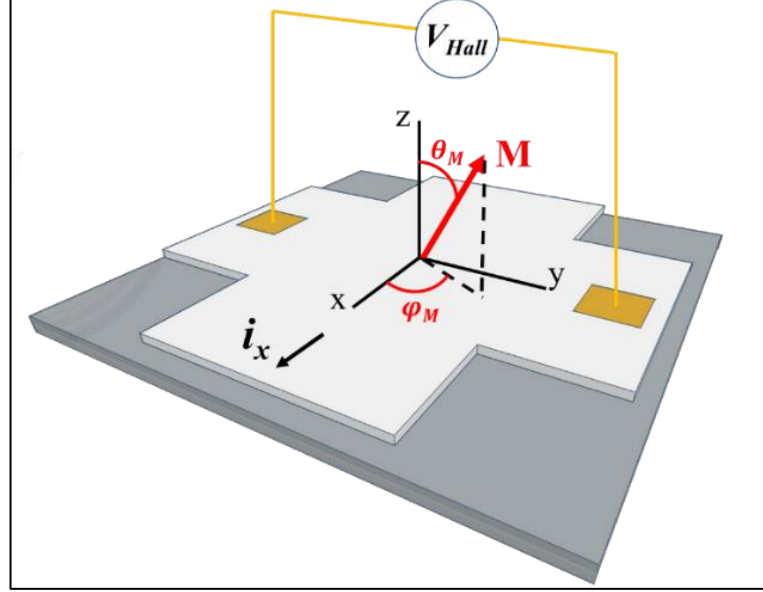
$$\Delta V_{OHE} = \frac{i_x}{t n q} B_z \quad (2.35)$$

$$n = \frac{i_x}{\Delta V_{OHE} t q} B_z \quad (2.36)$$

elde edilir. Denklem (2.36) içerisindeki uygulanan akım (i_x), malzeme kalınlığı (t), elektronun yükü (q) ve uygulanan H_z manyetik alanına karşılık ölçülen normal Hall voltajı (ΔV_{OHE}) ifadeleri bilindiğinden, denklemde bilinmeyen tek parametre birim hacimdeki serbest yüklerin sayısıdır (n) ve bu parametre malzemenin cinsine bağlıdır. Buradaki n terimi bir defa elde edilirse, Hall olayında ölçülen voltaj değeri incelenerek, değeri bilinmeyen manyetik alanların şiddetini ölçebilecek bir manyetik alan sensörü üretilebilir. Ayrıca, denklem (2.35)'ten de anlaşılabileceği gibi ölçülen ΔV_{OHE} değeri H_z değeri ile doğru orantılıdır. Diğer bir ifadeyle, böyle bir sensörün manyetik alana karşılık ürettiği sinyal doğrusaldır.

Anormal Hall etkisi ("AHE: Anomalous Hall effect" ya da "EHE: Extraordinary Hall Effect") 1881 yılında Edwin Hall tarafından keşfedilmiştir [81]. Düzlemsel Hall etkisi ise 1965 yılında Vu Dinh Ky tarafından keşfedilmiştir [82]. Anormal Hall etkisi ve düzlemsel Hall etkisi manyetik malzemelerde gözlenmektedir. Burada ölçülen Hall voltajındaki değişim, AMR etkisindeki gibi, akım ile manyetik momentler arasındaki açığa bağlıdır. Şekil 2.13'te mıknatıslanmanın koordinat sistemini de içeren bir Hall

ölçümü şematik olarak gösterilmiştir. Burada mıknatıslanmanın z-ekseni ile yaptığı açı (kutupsal açı) θ_M ve mıknatıslanmanın xy-ekseni üzerindeki iz düşümünün x-ekseni ile yaptığı açı da (azimut ya da ekvatorial açı) φ_M ile gösterilmiştir. Mıknatıslanmanın z-eksenindeki bileşeni AHE sinyalinin oluşmasına sebep olurken, mıknatıslanmanın xy düzlemindeki bileşeni ise PHE sinyalinin oluşmasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.13: Mıknatıslanmanın koordinat eksenini de içeren bir Hall voltajı ölçümünün şematik gösterimi.

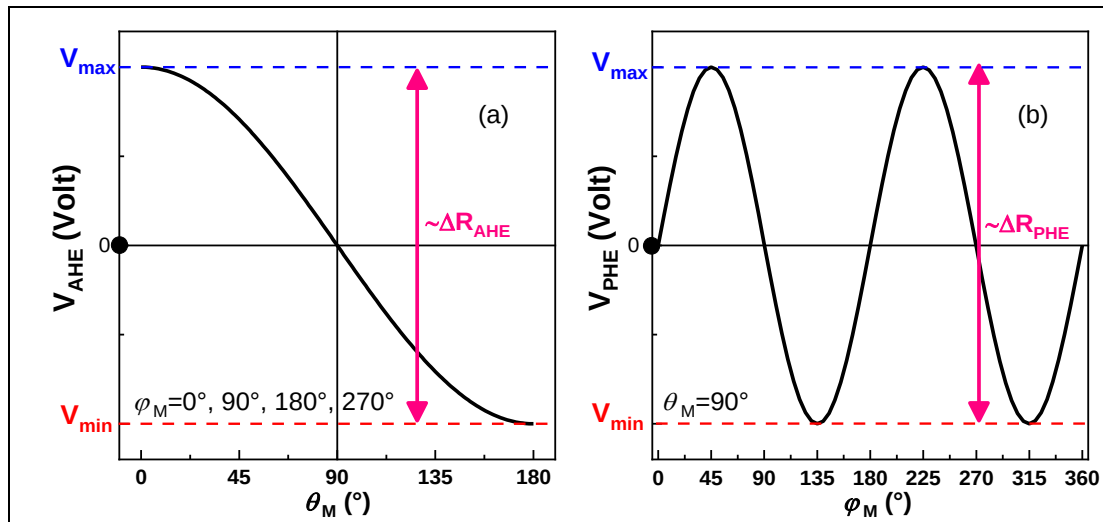
Şekil 2.13'te verilen ölçüm geometrisinden elde edilen Hall voltajı (V_{Hall}) OHE, AHE ve PHE sinyallerinden katkılar içermektedir ve aşağıdaki denklemle ifade edilir [83];

$$V_{Hall} = V_{OHE} + V_{AHE} + V_{PHE} \quad (2.37)$$

Denklem (2.37) içerisindeki V_{OHE} terimi zayıf manyetik alanlar için ve xy düzleminde uygulanan manyetik alanlar için ihmal edilmektedir [83]. Bu durumda Hall voltajı yalnızca AHE ve PHE sinyallerinden katkılar içerir. Ayrıca, AHE ve PHE sinyallerinin θ_M ve φ_M açılarına bağlılıkları aşağıdaki gibi ifade edilir [83];

$$V_{Hall} = i_x \left(\frac{1}{2} \Delta R_{AHE} \cos \theta_M \right) + i_x \left(\frac{1}{2} \Delta R_{PHE} \sin 2\varphi_M \sin^2 \theta_M \right) \quad (2.38)$$

Denklem (2.38)'de parantez içerisindeki ilk terim AHE direncinin (ΔR_{AHE}) açığa bağlılığını, ikinci terim ise PHE direncinin (ΔR_{PHE}) açığa bağlılığını tarif etmektedir. AHE direnci θ_M açısının bir fonksiyonu iken, PHE direncinin θ_M ve φ_M açılarının bir fonksiyonu olduğuna dikkat edilmelidir. Denklem (2.38)'de verilen AHE ve PHE voltajları, sabit i_x akımı için θ_M ve φ_M açılarının bir fonksiyonu olarak ayrı ayrı grafiklere çizdirilirse Şekil 2.14'te gösterilen sinyal karakteristikleri elde edilir. AHE voltajı, Şekil 2.14.a)'da gösterildiği gibi, $\theta_M=0^\circ$ olduğunda en yüksek voltaj değerindeyken, $\theta_M=180^\circ$ olduğunda en düşük voltaj değerinde olmaktadır. $\theta_M=90^\circ$ olduğunda ise AHE voltajı sıfır olmaktadır. PHE voltajı ise, Şekil 2.14.b)'de gösterildiği gibi $\varphi_M=45^\circ$ ve $\varphi_M=225^\circ$ açılarında en yüksek voltaj değerine sahipken, $\varphi_M=135^\circ$ ve $\varphi_M=315^\circ$ açılarında en düşük voltaj değerine sahiptir. Ayrıca, AHE ve PHE voltajları teorik olarak sıfır voltaj etrafında çift kutuplu (bipolar) bir sinyal karakteristiğine sahiptir. Diğer bir ifade ile, normal dirençlerden okunan voltaj değerleri yalnızca pozitif değerler alırken, bundan farklı olarak, AHE ve PHE voltajları, mıknatıslanma ile akım arasındaki açığa bağlı olarak pozitif veya negatif değerler alabilmektedir [11].



Şekil 2.14: a) AHE ve b) PHE voltajlarının θ_M ve φ_M açılarına bağlı davranışı.

Hall voltajı içerisindeki her bir katkıyı ayırıştırabilmek için özel şartlar altında deneylerin gerçekleştirilip ΔR_{AHE} ve ΔR_{PHE} değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

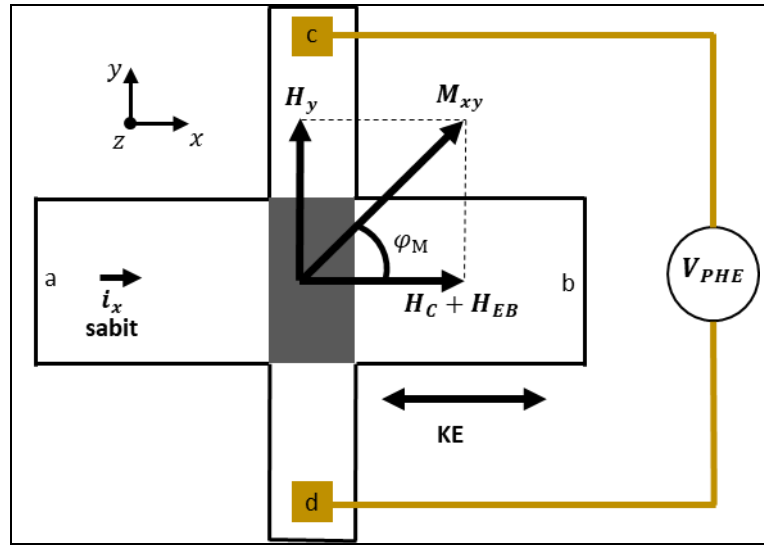
z-ekseninde uygulanan nispeten şiddetli manyetik alanlar için OHE sinyali baskın hale gelirken, zayıf manyetik alanlar için AHE ve PHE sinyalleri baskın hale gelmektedir. Ayrıca, PHE sinyali $\sin^2 \theta_M$ ifadesi içerdiğinden dolayı, $\theta_M=0^\circ$ ve 180° açıları için $V_{Hall} = V_{AHE}$ durumu oluşur. AHE sinyali ise bu $\theta_M=0^\circ$ ve 180° açılarında sırasıyla en yüksek ve en düşük voltaj değerlerini aldığından, manyetik momentlerin $\theta_M=0^\circ$ ve 180° açılarında doyurulması saf bir AHE direnci farkı (ΔR_{AHE}) ölçülmesine imkân sağlamaktadır. Benzer şekilde, $\theta_M=90^\circ$ açısı için $\cos \theta_M=0$ olduğundan AHE sinyali sıfır olur ve φ_M açısına bağlı olarak saf bir PHE direnci farkı (ΔR_{PHE}) elde edilir. Bu sayede, denklem (2.38) içerisindeki i_x akım değeri, ΔR_{AHE} ve ΔR_{PHE} değerleri bilindiğinden, mıknatıslanmanın yönüne bağlı olarak ölçülen sinyaller teorik olarak tahmin edilebilir.

2.4. PHE Sensörü, Sinyali ve Özellikleri

Düzlemsel Hall etkisine dayanan manyetik alan sensörlerini üretmek için aşağıdaki özel koşulların gerçekleştirilmesi gerekmektedir [11,27,84–86];

- Kontrol edilebilir bir PHE sensör sinyali için FM malzeme tek eksenli manyetik anizotropiye sahip olmalıdır.
- FM malzemenin kolay eksenini Şekil 2.15'te gösterilen akım yoluna paralel olmalıdır. Bu durumda, sıfır manyetik alan için $\theta_M=90^\circ$ olur ve denklem (2.38)'de verilen AHE voltajı sıfır olur.
- Eğer sensör yapısında AF malzeme kullanıldıysa, EB yönü de akım yoluna paralel olmalıdır ki AF malzemenin kolay yönü ile FM malzemenin kolay eksenini aynı doğrultuda olsun. Bu durumda anizotropi alanının H_C+H_{EB} olduğuna dikkat edilmelidir.
- Dış manyetik alan akıma dik olacak şekilde ve örnek düzlemine paralel uygulanmalıdır.
- Sensör üzerine sabit akım uygulanıp Hall voltajı ölçülmelidir.
- Sensör sıcaklığı sabit tutulmalıdır. PHE sensörünün hassasiyeti küçük sıcaklık dalgalanmalarından çok fazla etkilenmemesine rağmen, sensör sıcaklığının 10°C kadar değişmesi sensör hassasiyetinin bir miktar değişmesine sebep olmaktadır.

Yukarıda verilen şartlar Şekil 2.15'te bir çapraz eklem geometrisi üzerinde şematik olarak gösterilmiştir. Burada, a-b uçları arasından sabit i_x akımı uygulanmaktadır ve c-d uçları arasından Hall voltajı kaydedilmektedir. Kolay eksen (KE) x eksenine paralel olacak şekilde ve exchange bias (EB) ise +x yönüne bakacak şekilde gösterilmiştir. Manyetik alan y eksenini boyunca uygulanmıştır. Mıknatıslanma ile akım arasındaki açı φ_M ile gösterilmiştir. Tezin bu kısmından itibaren PHE sensörü sinyali denildiğinde burada verilen şartlar altında yapılan PHE voltajı ölçümü kastedilecektir.



Şekil 2.15: PHE sensörünün şematik bir gösterimi ve ölçüm şartları.

Şekil 2.15'te mıknatıslanma örnek düzleminde ($\theta_M=90^\circ$) olduğu için AHE voltajı sıfır olmaktadır. Bu nedenle y eksenine paralel uygulanan manyetik alana karşılık ölçülecek Hall voltajı yalnızca PHE katkısı içermektedir [2,7,10,26];

$$V_{Hall} = \frac{i_x}{2} \Delta R_{PHE} \sin 2\varphi_M = i_x \Delta R_{PHE} \sin \varphi_M \cos \varphi_M \quad (2.39)$$

Burada ΔR_{PHE} terimi, FM malzemenin öz direnç farkı ($\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$) ifadesinin ve t_{FM} kalınlığının bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi ifade edilir [11];

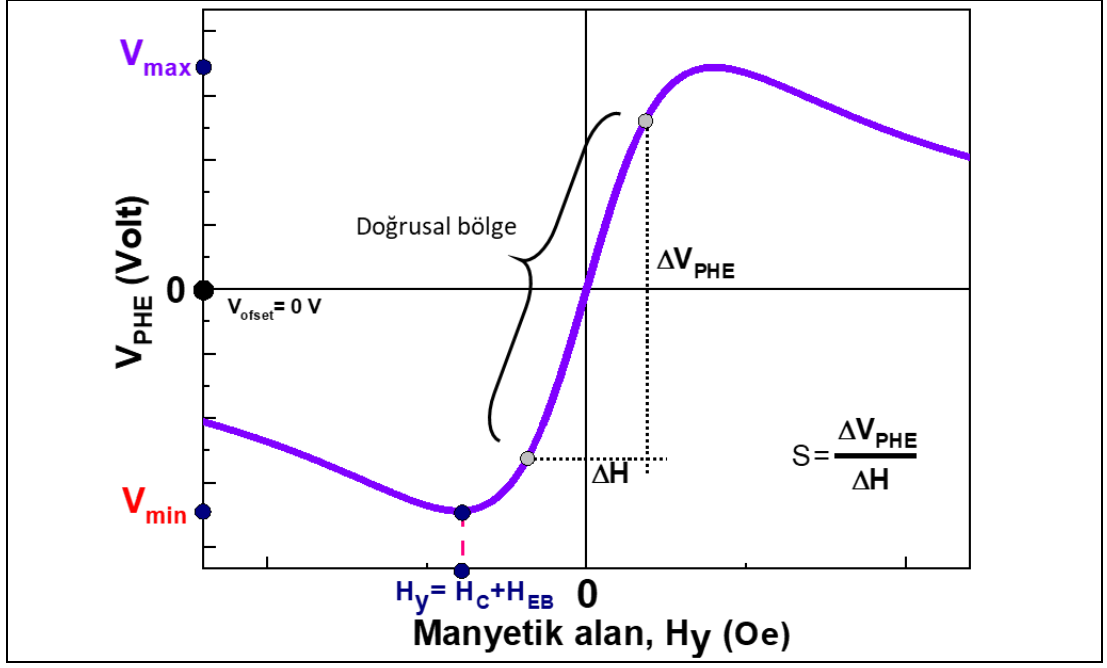
$$\Delta R_{PHE} = \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t_{FM}} \quad (2.40)$$

Buradaki ΔR_{PHE} ifadesinin sensörün l uzunluğu ve w genişliğinden bağımsız olduğuna dikkat edilmelidir. Denklem (2.40) ifadesi denklem (2.39) içerisine yerleştirildiğinde;

$$V_{Hall} = i_x \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t_{FM}} \sin \varphi_M \cos \varphi_M \quad (2.41)$$

elde edilir.

Denklem (2.41) ifadesi ve Şekil 2.15'te gösterilen ölçüm şartları kullanılarak oluşturulmuş bir PHE sensör sinyali Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Burada, düşey eksen sensörden ölçülen Hall voltajı değerini, yatay eksen ise uygulanan manyetik alan değerini ifade etmektedir. PHE sinyali düşük manyetik alanlarda oldukça doğrusal bir bölgeye sahiptir. Bu doğrusal bölge sensörün çalışma aralığıdır ve doğrusal bölgenin eğimi de sensörün manyetik alan hassasiyetini (S: sensitivity) göstermektedir. PHE sensörünün sıfır manyetik alanda sağladığı voltaja ofset voltajı denir. +y yönünde uygulanan manyetik alan için, PHE sensörü ofset değerine göre pozitif voltaj sağlarken, -y yönünde uygulanan manyetik alan için ofsete göre negatif voltaj sağlamaktadır. Teorik olarak, aynı şiddette uygulanan pozitif ve negatif yöndeki manyetik alanlar için ölçülen pozitif ve negatif voltajların büyüklüğünün birbirine eşit olması beklenmektedir. Ayrıca, teorik olarak ofset voltajının $\theta_M=90^\circ$ ve $\varphi_M=0^\circ$ koşulunda sıfır olması beklenmektedir. Deneysel olarak sensör geometrisinde ve anizotropi ekseninin akım eksenine hizalanması sırasında yapılan hatalar bir ofset voltajı gözlenmesine sebep olmaktadır [16,27].



Şekil 2.16: y eksenini boyunca uygulanmış manyetik alana karşılık ölçülen PHE sensör sinyali.

PHE sensörünün manyetik alan hassasiyeti ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [1,11,18];

$$S_{PHE} = \frac{\Delta V_{PHE}}{\Delta H} \quad (2.42)$$

Burada ΔV_{PHE} ifadesi, Şekil 2.16’da gösterilen PHE sinyalinin doğrusal bölgesi üzerinden seçilen iki nokta arasındaki voltaj farkıdır ve ΔH ifadesi de bu iki nokta arasındaki manyetik alan farkıdır. Düşük manyetik alanlardaki doğrusal bölgenin eğimi diğer bölgelere kıyasla daha yüksektir. Yani zayıf manyetik alanlarda yapılan ölçümlerde bu doğrusal bölgenin eğiminin sensörün gerçek manyetik alan hassasiyetini gösterdiğine dikkat edilmelidir. PHE sensörünün manyetik alan hassasiyetinin bilinmesiyle değeri bilinmeyen manyetik alanların ölçülmesi mümkün olmaktadır.

PHE sensör malzemesinin mıknatıslanması sırasında, y-ekseni boyunca uygulanan manyetik alan büyüklüğüne ve yönüne karşılık oluşacak φ_M değerleri ise Şekil 2.15’te gösterilen vektör diyagramı kullanılarak yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [87];

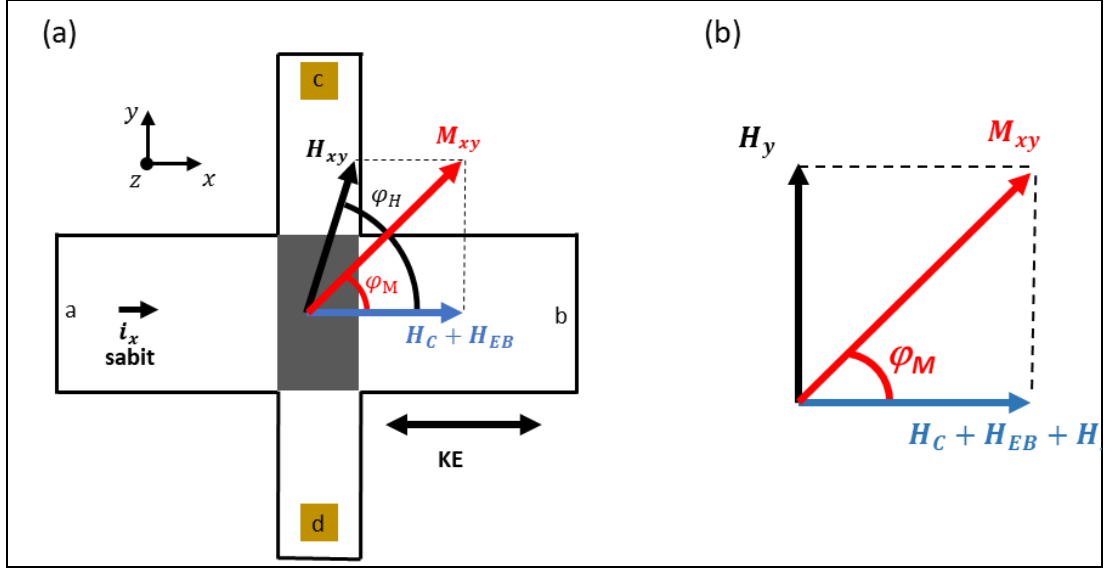
$$\varphi_M \approx \tan^{-1} \left(\frac{H_y}{H_C + H_{EB}} \right) \quad (2.43)$$

Denklem (2.43) içerisindeki H_C ve H_{EB} değerleri manyetik histerezis eğrisinden elde edilebileceği gibi, PHE sinyalinin tepe noktası da yaklaşık olarak bu anizotropi alanlarının toplamını göstermektedir [87]. Bu sayede φ_M açısı yaklaşık olarak hesaplanabilir ve sensörün uygulanan manyetik alana karşılık üreteceği voltaj miktarı teorik olarak tahmin edilebilir. Buradaki φ_M açısının daha hassas bir şekilde hesaplanması için manyetik serbest enerji ifadesi deneye uygun bir şekilde düzenlenip kullanılmalıdır [87]. Ek olarak, PHE sensör sinyali $\varphi_M=45^\circ$ olduğunda sensör en yüksek voltaj değerini sağlarken, $\varphi_M=-45^\circ$ olduğunda sensör en düşük voltaj değerini sağlamaktadır. Buradaki $\varphi_M=\pm 45^\circ$ durumu Şekil 2.15'te gösterilen vektör diyagramından da anlaşılabileceği gibi $H_y=H_C + H_{EB}$ koşulunda oluşmaktadır.

2.5. PHE Sensör Sinyalinin Uygulanan Manyetik Alanın Açısına Bağlı Davranışı

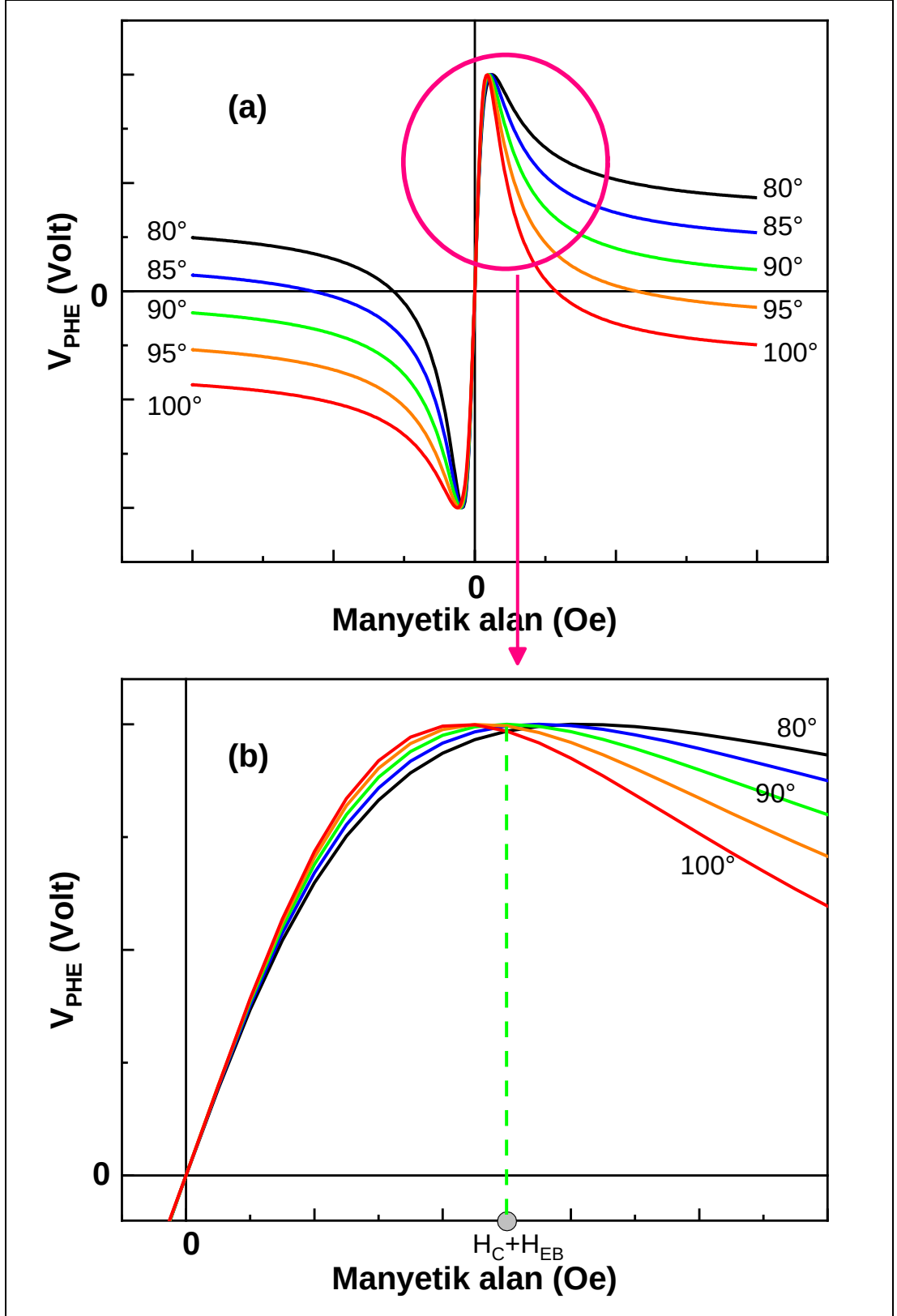
Uygulanan manyetik alanın yönüne ve şiddetine karşılık ölçülen Hall voltajı da φ_M açısının bir fonksiyonu olduğundan, φ_M açısının manyetik alanla nasıl değiştiği önem arz etmektedir [88]. Manyetik alanın akım eksenine (yani x-eksenine) göre herhangi bir açıda uygulandığı durum Şekil 2.17.a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Burada manyetik alan yine xy-düzleminde uygulandığından $\theta_M=90^\circ$ olur ve bu sebeple Hall voltajı sadece PHE sinyali içerir. Örnek düzleminde uygulanan manyetik alanın Şekil 2.17.b)'de gösterildiği gibi hem x ekseninde hem de y ekseninde bir bileşeni olduğuna dikkat edilmelidir. Uygulanan manyetik alanın bu eksenler üzerindeki vektör bileşenleri kullanılarak, φ_M açısının değişimi yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\varphi_M \approx \tan^{-1} \left(\frac{H_y}{H_C + H_{EB} + H_x} \right) \quad (2.44)$$



Şekil 2.17: a) xy-düzlemine paralel ve akımla φ_H açısı yapacak şekilde uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonu olarak mıknatıslanmanın yön değiştirmesi. b) Uygulanan manyetik alanın x ve y eksenlerindeki bileşenlerine ayrılması.

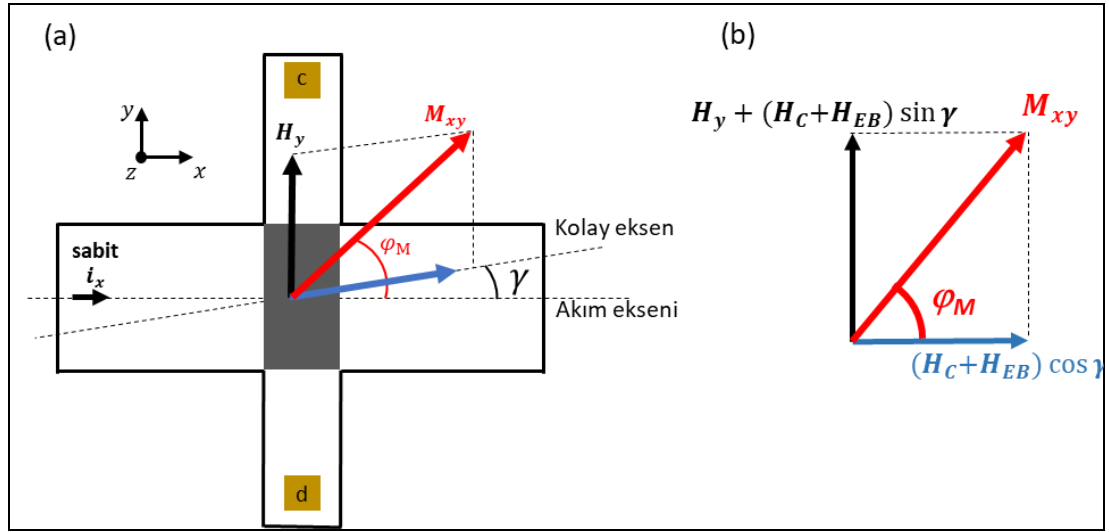
Denklem (2.41) ve (2.44) kullanılarak, $\varphi_H = 80^\circ, 85^\circ, 90^\circ, 95^\circ, 100^\circ$ açı değerleri için elde edilen PHE sinyalleri Şekil 2.18.a)'da sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi manyetik alanın uygulanma açısının bir fonksiyonu olarak PHE sinyalinin şekli değişmektedir. $\varphi_H = 90^\circ$ için elde edilen PHE sinyali (0, 0) noktası etrafında simetrik iken diğer açılar için elde edilen sinyallerdeki simetrinin bozulduğu açıkça görülmektedir [88]. Şekil 2.18.a)'da çember içerisinde gösterilen bölge büyütülerek Şekil 2.18.b)'de gösterilmiştir. 90° 'den farklı φ_H açılarında ölçülen PHE sinyallerinin doğrusal bölgeleri zayıf manyetik alanlar için neredeyse aynı eğime sahipken, sinyallerin tepe noktalarının manyetik alan eksenlerinde sağa ve sola doğru kaymalar görülmektedir. Dolayısıyla, manyetik alanın uygulanma açılarında yapılan 5° - 10° 'lık hatalar, zayıf manyetik alanlar için elde edilen manyetik alan hassasiyeti için çok değişim göstermezken PHE sensörünün tepeden tepeye hesaplanan manyetik alan hassasiyetinde küçük hatalara sebep olur.



Şekil 2.18: a) $\phi_H=80^\circ, 85^\circ, 90^\circ, 95^\circ, 100^\circ$ açıları için elde edilmiş PHE sensör sinyali. b) Çember içerisinde kalan bölgenin büyütülmüş hali.

2.6. PHE Sensör Sinyalinin Anizotropi Eksenine Bağlı Davranışı

Anizotropi ekseninin akım ekseninden γ açısı kadar sapması durumu Şekil 2.19.a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Bu durumda φ_M açısının hesaplanabilmesi için $H_C + H_{EB}$ anizotropilerinin x ve y eksenleri üzerindeki iz düşümlerinin alınması gerekmektedir. Burada manyetik alanın y eksenine boyunca uygulandığına dikkat edilmelidir.



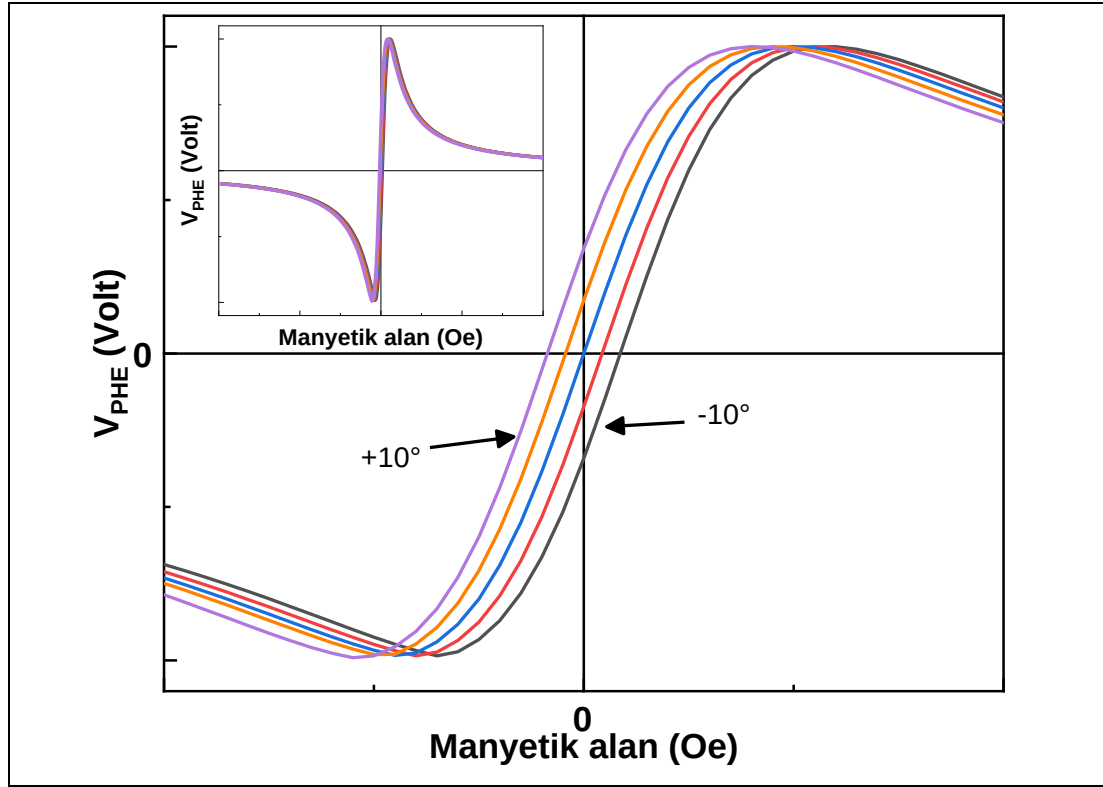
Şekil 2.19: a) Manyetik kolay eksenin ve EB yönünün xy-düzleminde ve akım eksenine göre γ açısı yapacak şekilde hizalandığı durum için y eksenine uygulanmış manyetik alanın bir fonksiyonu olarak mıknatıslanmanın yön değiştirmesi. b) Anizotropi alanlarının x ve y eksenlerindeki bileşenlerine ayrılması.

Bu şartlar altında φ_M açısı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\varphi_M \approx \tan^{-1} \left(\frac{H_y + (H_C + H_{EB}) \sin \gamma}{(H_C + H_{EB}) \cos \gamma} \right) \quad (2.45)$$

Denklem (2.41) ve (2.45) kullanılarak $\gamma = -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ açıları için elde edilen PHE sensör sinyalleri Şekil 2.20'de sunulmuştur. Farklı γ açıları için elde edilen sinyallerin eğimleri neredeyse aynı olmasına rağmen sinyallerin manyetik alan ekseninde kayması sıfır manyetik alan için farklı ofset voltajlarının oluşmasına sebep olmaktadır [27]. Bu sebeple PHE sensörlerinde okunan ofset voltajı sensör sinyalinden çıkartılıp (yani sıfır ofset haline getirilip), sensörden okunan voltaj farkı (ΔV_{PHE})

değerlendirilmelidir. Ayrıca, bu γ açısının varlığı pozitif ve negatif yönde uygulanan aynı şiddetteki manyetik alanlar için ölçülen voltaj değişimlerinin birbirinden farklı olmasına da sebep olabilir. Çünkü sinyalin sıfır manyetik alanda okuduğu ofset voltajı sinyal üzerinde simetrik olmayan bir noktaya kaymıştır.

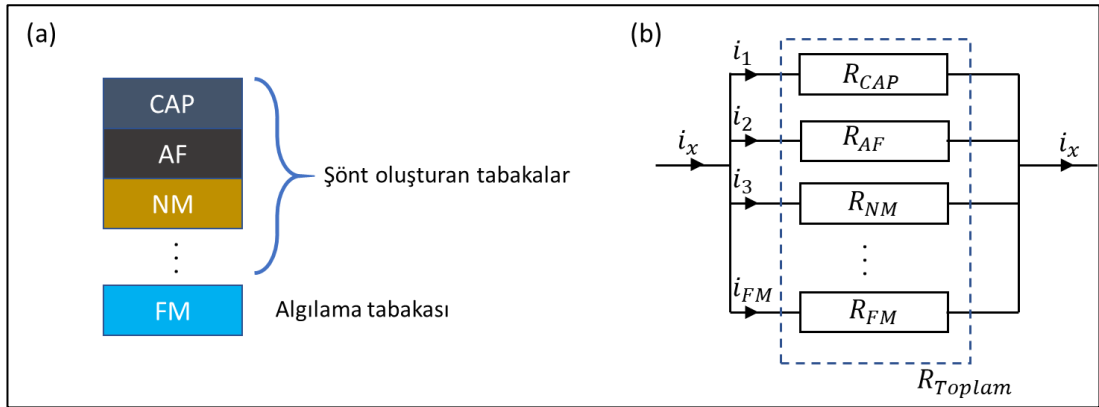


Şekil 2.20: $\gamma = -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ açıları için elde edilmiş PHE sensör sinyali (iç şekil) PHE sinyallerinin manyetik alan profili.

2.7. Kullanılan Sensör Malzemelerinin AMR ve PHE Sinyallerine Etkisi

Bu başlık altında sensör yapılarında kullanılan malzemelerin yalnızca dirençlerinin AMR ve PHE sinyallerine nasıl etki ettiğinin izahı yapılmıştır. Sensör yapısı içerisinde AMR ve PHE sinyalleri baskın olarak FM malzemelerde ortaya çıktığından, PHE sensörlerinin asıl algılama tabakasını FM malzemeler oluşturmaktadır. Diğer tabakalar ise Şekil 2.21.a) ve b)'de gösterildiği gibi sensör yapısı içerisinde bir şönt (paralel direnç) oluşturmaktadır. Sensör yapısına eklenen her bir iletken tabakanın temelde beklenen iki türlü etkisi vardır. Birincisi, örnek yapısına eklenen her bir tabaka paralel direnç oluşturduğundan dolayı FM algılama tabakası

üzerinden geçen akımı azaltmaktadır (shunt current). İkincisi ise eklenen her bir tabaka paralel direnç oluşturduğundan akım boyunca ölçülen toplam direnci azaltmaktadır. Teorik olarak, FM algılama tabakasından geçen akımın azalması, PHE sinyalinde tepeden tepeye ölçülen ΔV_{PHE} değerinde bir azalmaya sebep olurken, akım boyunca toplam direncin azalması, sensör yapısı için ölçülen AMR oranında bir azalmaya sebep olmaktadır [89,90]. Sensör malzemesinde yapılan her bir değişiklik ΔV_{PHE} ve AMR oranına eş zamanlı olarak etki ettiğinden, bu iki parametrenin davranışı da birbirini desteklemektedir.



Şekil 2.21: a) PHE sensör yapısını oluşturan tabakaların temsili bir gösterimi ve b) bu tabakaların paralel bağlanmış dirençler olarak ele alınması. (CAP: koruyucu tabaka).

Sensör malzemesindeki yapılan değişiklikler ve bunların AMR ve PHE voltajlarına etkileri aşağıdaki şekilde izah edilebilir. Şekil 2.21’de gösterilen sensör yapısındaki her bir tabaka birbirine paralel bağlanmış dirençler olarak ele alınırsa, her bir tabakanın toplam dirence katkısı aşağıdaki gibi tarif edilmektedir [24];

$$\frac{1}{R_{Toplam}(\varphi_M)} = \frac{1}{R_{FM}(\varphi_M)} + \frac{1}{R_{AF}} + \frac{1}{R_{NM}} + \frac{1}{R_{CAP}} + \dots \quad (2.46)$$

Buradaki FM dışındaki her bir malzemenin direnci sabit kabul edilmektedir ve FM malzemenin direnci denklem (2.23)’te gösterildiği gibi φ_M açısının bir fonksiyonudur. Bu sebeple sensör yapısının toplam direnci de doğrudan φ_M açısının bir fonksiyonu haline gelmektedir. Diğer bir ifadeyle, sensör yapısının toplam direnci anizotropik olmaktadır. Sensör malzemesi üzerine akıma paralel ve dik olacak şekilde şiddetli

manyetik alan uygulanırsa sırasıyla sensör yapısının toplamdaki $R_{\parallel}$ ve $R_{\perp}$ dirençleri doğrudan elde edilebilir.

$$\frac{1}{R_{\parallel}} = \frac{1}{R_{FM}(\parallel)} + \frac{1}{R_{AF}} + \frac{1}{R_{NM}} + \frac{1}{R_{CAP}} + \dots \quad (2.47)$$

$$\frac{1}{R_{\perp}} = \frac{1}{R_{FM}(\perp)} + \frac{1}{R_{AF}} + \frac{1}{R_{NM}} + \frac{1}{R_{CAP}} + \dots \quad (2.48)$$

Dolayısıyla böyle bir direnç sistemi için, denklem (2.23)'te verildiği gibi, AMR sinyali ifadesi yazılabilir;

$$V_{AMR} = i_x R_{Toplam}(\varphi_M) \quad (2.49)$$

$$V_{AMR} = i_x [R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2 \varphi_M] \quad (2.50)$$

Buradaki $R_{\parallel}$ ve $R_{\perp}$ arasındaki direnç farkı ΔR_{Toplam} olarak ifade edilirse, teorik olarak sensör yapısına eklenen her bir tabaka sensör yapısında paralel bir direnç oluşturup, gözlenebilir ΔR_{Toplam} değerini azaltmaktadır. Bu etkiye şönt etkisi (shunt effect) denir. PHE sinyali ise yalnızca FM malzemede olduğundan dolayı çok tabakalı sensör yapısı içerisinde yalnızca FM tabakadan geçen i_{FM} akımı dikkate alınmalıdır. Bu sebeple çok tabaka içeren PHE sensörleri için denklem (2.34)'te verilen V_{PHE} ifadesi içerisinde i_x yerine aşağıdaki gibi i_{FM} yazılmalıdır;

$$V_{PHE} = i_{FM} \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t_{FM}} \sin \varphi_M \cos \varphi_M \quad (2.51)$$

Çok tabakalı PHE sensöründeki FM algılama tabakasından geçen i_{FM} akımı azaldıkça okunan V_{PHE} değerinin azalacağı açıktır. Sensör yapısına V voltajı uygulandığı zaman sensörden geçen toplam akım i_x ve yalnızca FM tabakadan geçen akım i_{FM} olarak gösterilirse, i_{FM} akımının toplam i_x akımına oranı aşağıdaki gibi hesaplanır [24];

$$\frac{i_{FM}}{i_x} = \frac{\frac{V}{R_{FM}}}{\frac{V}{R_{toplaml}}} = \frac{R_{toplaml}}{R_{FM}} \quad (2.52)$$

Bu sayede uygulanan akımın voltajdan bağımsız olarak ne oranda FM algılama tabakasından geçtiği tespit edilebilir. Gerçek deneylerde ayrı ayrı tabakaların direnç değerlerini elde etmek nispeten zor olsa da bu direnç ve akım değerlerinin teorik olarak hesaplanması PHE sensörü tasarlarken yardımcı olabilir.

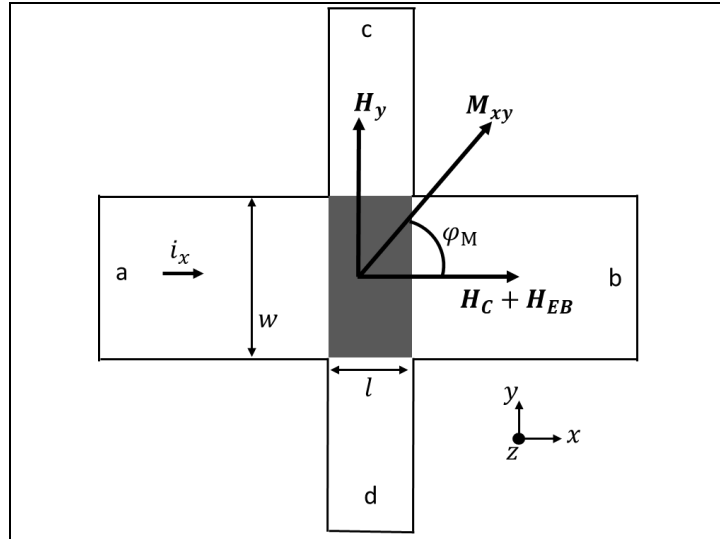
Sonuç olarak sensör yapısına eklenen her bir iletken tabakanın AMR oranı ve PHE voltajını olumsuz etkilemesi beklenmektedir. Fakat, bu sensörlerin gerçek uygulamalarda kullanılabilmesi için özellikle FM malzemenin oksitlenmesini engelleyen bir koruyucu tabakanın (cap layer) kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, PHE sensörlerinde FM malzemedeki manyetik momentlerin başlangıç yönünü belirlemek ve tekrar edilebilir bir sensör sinyali elde etmek için AF tabaka kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, AF malzeme ile FM malzeme arasındaki EB etkileşmesinin çok kuvvetli olmaması için AF/FM ara yüzeyine bir NM tabakanın yerleştirilmesi gerekmektedir. Sensör yapılarına eklenen her bir tabakanın olumsuz etkilerine rağmen, diğer yandan sensöre kazandırdığı kabiliyetler sayesinde bu sensörler çeşitli uygulamalarda kullanılabilir hale gelmiştir. Kullanılabilir, en hassas PHE sensör yapısını elde etmek için her bir tabakanın cinsinin ve en iyi kalınlık değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir [39].

2.8. Sensör Geometrilerinin PHE Sinyaline Etkisi

Şimdiye kadar bahsedilen PHE sensör geometrisi sensörün çapraz yapısından dolayı çapraz eklem olarak isimlendirilmiştir. PHE sensörlerinin hassasiyetlerini arttırabilmek için çapraz eklem geometrisine ek olarak literatürde eğik çapraz eklem [28], 1-halka eklemi [20] ve çoklu halka eklemi [3,91,92] gibi bazı sensör geometrileri araştırılmıştır. Bu sensör geometrilerinin çapraz eklemlerden farkı PHE sinyali içerisine AMR sinyalinin de dâhil edilmesidir. Burada maksat FM malzemenin AMR özelliğini de kullanarak PHE sensör sinyalindeki doğrusal bölgenin eğimini arttırmaktır. Bu başlık altında sensör geometrilerinin tarifi ve bu geometrilere tasarlanan sensörlerden elde edilen sinyallerin özellikleri izah edilmiştir.

2.8.1. Çapraz Eklem

Şekil 2.22’de çapraz eklem geometrisine sahip bir PHE sensörünün şematik gösterimi sunulmuştur. Burada FM malzemenin kolay eksenine akım eksenine paraleldir ve manyetik alan y eksenine boyunca uygulanmıştır. Sensör genişliği w ve sensör uzunluğu l ile gösterilmiştir. Burada a-b uçları arasından akım uygulanıp, c-d uçlarından voltaj ölçülmektedir. Çapraz eklem geometrisine sahip bir PHE sensörü için denklem (2.41) ve (2.51)’de verilen V_{PHE} ifadesi sensörün w genişliğinden ve l uzunluktan bağımsız olup, sensörün t_{FM} kalınlığı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Sensörün bu özelliği sayesinde farklı uygulamalar için çeşitli boyutlarda çapraz eklem geometrileri üretmek mümkündür. Çapraz eklemlerle ilgili her bir detay başlık 2.4 ve devamında verildiğinden burada tekrar anlatılmamıştır.



Şekil 2.22: Çapraz eklem geometrisine sahip bir PHE sensörü.

2.8.2. Eğik-Çapraz Eklem

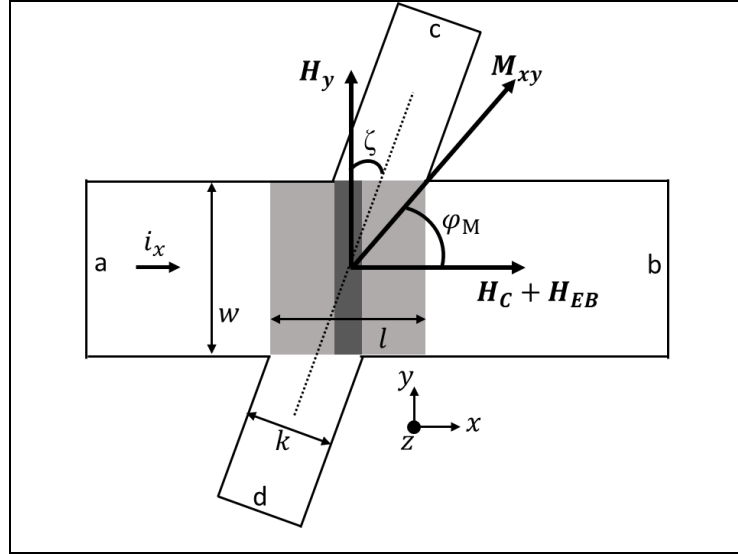
Eğik-çapraz eklem geometrisine sahip bir PHE sensörünün şematik gösterimi Şekil 2.23’te verilmiştir [28]. Sensör genişliği w simgesiyle ve sensör uzunluğu l simgesiyle gösterilmiştir. Sensörün c-d uçlarını oluşturan eksen, y eksenine göre ζ açısı kadar döndürülmüştür. Burada a-b uçlarından akım uygulanıp, c-d uçlarından voltaj kaydedilmektedir. Voltajın ölçüldüğü kolların genişliği ise k ile gösterilmiştir. Böyle bir sensör geometrisinde koyu gri ile gösterilen bölgede yalnızca PHE sinyali oluşurken açık gri ile gösterilen bölgeden yalnızca AMR sinyali oluşmaktadır.

Yukarıda bahsedildiği gibi PHE sinyali sensörün w genişliği, l ve k uzunluklarından bağımsızdır. Fakat AMR sinyali doğrudan bu parametrelere bağlıdır [28]. Böyle bir sensörden ölçülen voltaj ($V_{sensör}$) değeri AMR sinyali ile PHE sinyalinin toplamı şeklinde tarif edilmektedir;

$$V_{sensör} = V_{PHE} + V_{AMR} \quad (2.53)$$

$$V_{sensör} = i_{FM} \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t_{FM}} \sin \varphi_M \cos \varphi_M + i_x [R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2 \varphi_M] \quad (2.54)$$

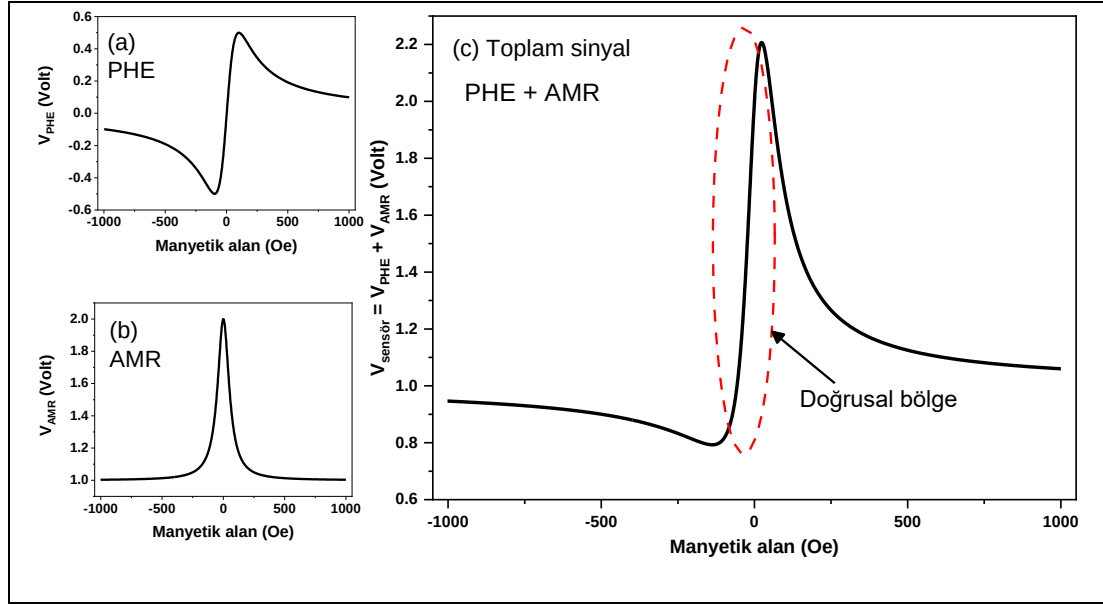
Denklem (2.54)'te PHE sinyali için i_{FM} akımı kullanılırken, AMR sinyali için i_x akımının kullanıldığına dikkat edilmelidir. $R_{\parallel}$ ve $R_{\perp}$ terimleri ise sensörün toplam direnci için yazılmıştır ve bunları hesaplamak için Şekil 2.23'te gösterilen w genişliği ve l uzunluğu kullanılmalıdır. Ayrıca sensör geometrisindeki l uzunluğunun ζ açısının ve k uzunluğunun bir fonksiyonu olduğuna dikkat edilmelidir.



Şekil 2.23: Eğik-çapraz eklem geometrisine sahip bir PHE sensörü.

Eğik çapraz eklem geometrisine sahip ve Şekil 2.23'te verilen şartlar için teorik olarak hesaplanan PHE, AMR ve toplam sinyal (PHE+AMR) karakteristikleri Şekil 2.24'te temsilen gösterilmiştir. Eğer bu sensörde ζ açısının bir fonksiyonu olarak, ΔV_{PHE} baskın ise ölçülen sinyalin görünümü Şekil 2.24.a)'da gösterilen sinyal şekline daha çok benzer. Eğer ΔV_{AMR} baskın ise ölçülen sinyalin görünümü daha çok

Şekil 2.24.b)’de gösterilen sinyal şekline benzer. İkisi birbirine eşitse ($\Delta V_{PHE} = \Delta V_{AMR}$) ölçülen sinyal Şekil 2.24.c)’de gösterildiği gibi olur [28]. Şekil 2.24.c)’de gösterilen doğrusal bölgenin manyetik alan hassasiyeti, aynı malzeme ile üretilmiş çapraz eklemnin manyetik alan hassasiyetinden bir miktar daha yüksektir. Eğik çapraz eklemlerden elde edilen sinyallerin çalışma aralığının çapraz eklemlerden biraz farklı olduğuna da dikkat edilmelidir.

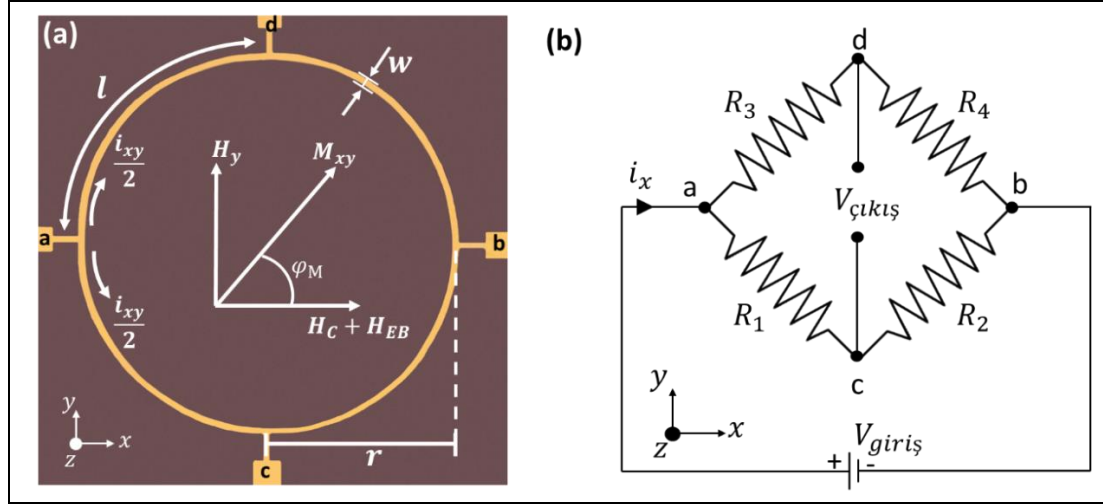


Şekil 2.24: a) PHE sinyali karakteristiği, b) AMR sinyali karakteristiği. c) Eğik-çapraz eklem geometrisine sahip bir sensörün sinyal karakteristiği AMR ve PHE sinyallerinin toplamı şeklindedir.

2.8.3. 1-Halka Eklemi

Literatürde 1 adet halka içeren sensör yapısı 1-halka eklemi (1-ring junction) olarak isimlendirildiği gibi, sensörlerin geometrisi, Şekil 2.25’te gösterildiği gibi, Wheatstone köprüsü olduğundan bu sensörlere manyetik köprü sensör (magnetic bridge sensor) de denmektedir [29,92]. Sensör yapısında, aynı çapraz eklemdeki gibi, manyetik kolay eksen ve EB alanının yönü +x yönündedir ve manyetik alan y-ekseni boyunca uygulanmıştır. Bu şartlar altında köprü sensörünün manyetik alana karşı ürettiği voltaj aynı PHE voltajına benzemektedir. Burada halkanın genişliği w , çeyrek halka uzunluğu l ve halkanın yarıçapı da r ile gösterilmiştir. Sensör geometrisini oluşturan çeyrek halkaların dirençleri Şekil 2.25.b)’de gösterildiği gibi R_1 , R_2 , R_3 ve R_4 olarak düşünülmelidir. Sensörün a-b uçlarından sabit I_x akımı uygulanıp, c-d

uçlarından voltaj ölçülmektedir. Uygulanan i_x akımı sensör malzemesi içerisinde geçeceğinden dolayı akımın yönü sensörün şekline göre xy-düzlemi içerisinde değişmektedir. Ayrıca, sensör geometrisi halkanın merkezine göre simetrik olduğundan dolayı akımın tam olarak ikiye bölünmesi beklenmektedir.



Şekil 2.25: a) 1-halka eklemi geometrisindeki PHE sensörü. b) Wheatstone köprüsü.

Böyle bir sensörden okunan voltajı anlamak için öncelikle Wheatstone köprüsünü anlamak gerekir [93]. Wheatstone köprüsünden okunan voltaj aşağıdaki gibi tarif edilir [94];

$$V_{çıkış} = V_{giriş} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (2.55)$$

Burada sensöre a-b uçlarından giriş voltajı ($V_{giriş}$) uygulanmış ve c-d uçları arasından çıkış voltajı ($V_{çıkış}$) ölçülmüştür. PHE sinyali için sensöre uygulanan sabit akım miktarı önemli olduğundan, Wheatstone köprüsüne sabit i_x akımı çerçevesinde bakmak gerekir. Bu sebeple denklem (2.55) içerisinde $V_{giriş} = i_x R_{toplam}$ ifadesi kullanılmalıdır. Buradaki R_{toplam} yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\frac{1}{R_{toplam}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} \quad (2.56)$$

$$R_{toplam} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (2.57)$$

Denklem (2.55) içerisine (2.57) ifadesi yerleştirilip, denklem yeniden düzenlenirse;

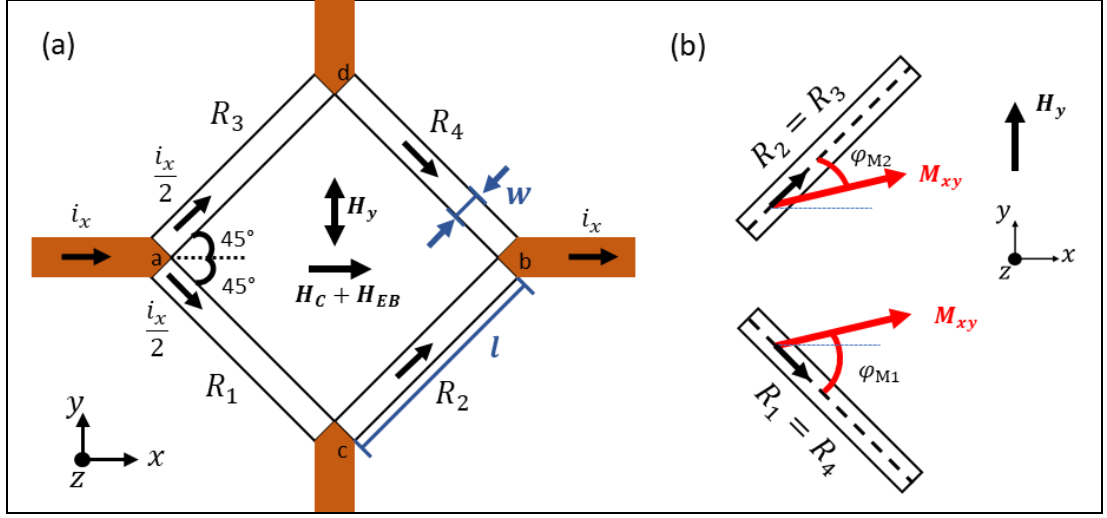
$$V_{ıkış} = i_x \left(\frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (2.58)$$

$$V_{ıkış} = i_x \left(\frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right) \quad (2.59)$$

elde edilir. Denklem (2.59)'da karşılıklı dirençler çarpımı birbirine eşit ($R_2 R_3 = R_1 R_4$) olduğunda çıkış voltajı sıfır olur. Bu koşul Wheatstone köprüsünün en bilinen özelliklerinden birisidir. Halka geometrisine sahip PHE sensörü için sensör geometrisinin simetrik olmasına rağmen (yani her bir direnç değerinin aynı olması beklenmesine rağmen), kullanılan FM malzemenin AMR özelliğinden dolayı her bir R direnci akım ile manyetik momentler arasındaki açıya bağlı olarak değişmektedir. Direnlerdeki bu değişim bir çıkış voltajına sebep olmaktadır. Bu sayede manyetik alana duyarlı bir köprü sensör elde edilmiş olur.

Halka eklemiindeki akım yolu doğrusal olmadığından akımın yönü xy-düzlemi içerisinde değişmektedir. Böyle bir sensör geometrisi için oluşan direnç değişimlerini ve çıkış voltajını tahmin etmek ilk bakışta zordur. Bu sebeple uygulanan manyetik alana karşılık dirençlerin nasıl değiştiğini anlamak için, ilk başta yolların dairesel değil de doğrusal olduğu durum ele alınıp, AMR etkisinden kaynaklı bilinen direnç değişimi sisteme uygulanmalıdır [95]. Doğrusal yollara sahip manyetik köprü sensörünün şematik gösterimi şekil 2.26'da verilmiştir. Burada görüldüğü gibi akımın yarısı st kollardan akarken diğer yarısı da alt kollardan akmaktadır. Doğrusal yollara sahip bir sensör geometrisi için akım yönlerini tarif etmek daha kolaydır. Kprdeki R_2 ve R_3 dirençleri üzerinden geçen akım yönü +x-ekseni ile $+45^\circ$ açı yaparken R_1 ve R_4 dirençleri üzerinden geçen akım yönü +x-ekseni ile -45° açı yapmaktadır. Uygulanan manyetik alan etkisiyle manyetik momentlerin ortak hareket ettiği (coherent rotation) kabul edilirse, manyetik momentlerin akım ile yaptėı açılar R_2 ve R_3 için aynı

olmaktadır. Bu sebeple bu iki kolun dirençleri birbirine eşit olur. Aynı durum R_1 ve R_4 dirençleri için de geçerlidir.



Şekil 2.26: a) Elmas görünümlü manyetik köprü sensörünün şematik bir gösterimi. b) Kolay yönün x-ekseni boyunca olması sonucunda oluşan $R_1=R_4$ ve $R_2=R_3$ durumu.

Doğrusal yollara sahip köprü sensöründeki $R_1=R_4$ ve $R_2=R_3$ direnç değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [92];

$$R_1 = R_4 = i_{-45} [R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2 \varphi_{M1}] \quad (2.60)$$

$$R_2 = R_3 = i_{+45} [R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2 \varphi_{M2}] \quad (2.61)$$

Denklem (2.59) içerisine $R_1 = R_4$ ve $R_2 = R_3$ şartları yerleştirilirse;

$$V_{çıkış} = i_x \left(\frac{R_2 R_2 - R_1 R_1}{R_1 + R_2 + R_2 + R_1} \right) \quad (2.62)$$

$$V_{çıkış} = i_x \left(\frac{R_2^2 - R_1^2}{2(R_1 + R_2)} \right) = i_x \left(\frac{(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)}{2(R_1 + R_2)} \right) \quad (2.63)$$

$$V_{\text{çıkış}} = i_x \left(\frac{R_2 - R_1}{2} \right) = i_x \left(\frac{\Delta R}{2} \right) \quad (2.64)$$

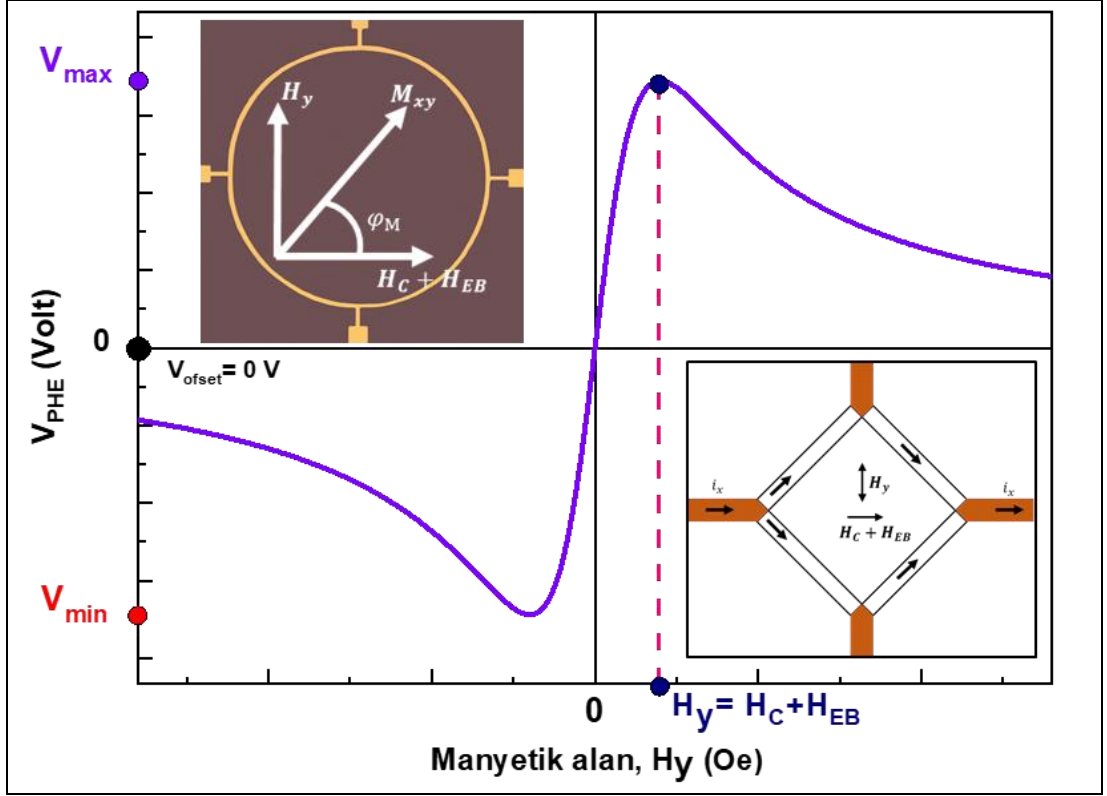
elde edilir. Denklem (2.64), manyetik köprü sensöründen okunan $V_{\text{çıkış}}$ değerinin sensörün kollarında oluşan direnç farkıyla doğrudan orantılı olduğunu göstermektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, kolların geometrisi aynı olduğundan, R_1, R_2, R_3 ve R_4 direnç değerlerinin birbirine eşit olması beklenir. Fakat, FM sensör malzemesinin AMR özelliği bu direnç farkına sebep olmaktadır. Şekil 2.26’da gösterilen sensör geometrisi için manyetik momentlerin +x-ekseni ile $0^\circ, +45^\circ$ ve $+90^\circ$ yaptığı durumlar aşağıda sırasıyla ele alınmıştır.

Manyetik momentler ile +x-ekseni arasındaki açı 0° olduğunda, $R_1 = R_4$ dirençleri üzerinden geçen akım ile manyetik momentler arasında $\varphi_{M1}=+45^\circ$ açısı oluşurken, $R_2 = R_3$ dirençleri üzerinden geçen akım ile $\varphi_{M2}=-45^\circ$ açısı oluşur. Bu değerler denklem (2.64) içerisinde yerine konduğunda $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ durumu oluşur. Bu durumda Wheatstone köprüsünün çıkış voltajı $V_{\text{çıkış}} = 0$ Volt olur.

Manyetik momentler ile +x-ekseni arasındaki açı 45° olduğunda, $R_1 = R_4$ dirençleri üzerinden geçen akım ile manyetik momentler arasında $\varphi_{M1}=90^\circ$ açısı oluşurken, $R_2 = R_3$ dirençleri üzerinden geçen akım ile manyetik momentler arasında $\varphi_{M2}= 0^\circ$ açısı oluşur. Bu değerler denklem (2.60) ve (2.61) içerisinde yerine koyulduğunda $R_1 = R_4 = \frac{i_{xy}}{2} [R_\perp]$ ve $R_2 = R_3 = \frac{i_{xy}}{2} [R_\parallel]$ elde edilir. Burada, $R_\parallel > R_\perp$ olduğundan $R_2 > R_1$ olur. Dolayısıyla sensörden pozitif voltaj okunur. Ayrıca, $R_\parallel$ ve $R_\perp$ sırasıyla en yüksek ve en düşük dirençler olduğundan, köprü geometrisindeki sensörden okunabilecek en yüksek voltaj değeri elde edilir.

Manyetik momentler ile +x-ekseni arasındaki açı 90° olduğunda yine $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ durumu oluşur ve $V_{\text{çıkış}} = 0$ Volt olur.

Özetle, manyetik köprü sensöründen okunan sinyalin görünümü de Şekil 2.27’de gösterildiği gibi, çapraz eklem geometrisindeki PHE sensörlerinden elde edilen sinyale benzemektedir. Manyetik momentlerle +x-ekseni arasındaki açı 0° ya da 90° olduğunda sensör sıfır voltaj (ya da ofset voltajı) sağlarken, $\pm 45^\circ$ olduğunda ise sırasıyla en yüksek ve en düşük voltajı sağlamaktadır.



Şekil 2.27: Halka eklemi geometrisindeki (Wheatstone köprüsü şeklindeki) PHE sensörünün y eksenı boyunca uygulanan manyetik alana karşılık sağladığı sinyalin görünümü, çapraz eklem geometrisindeki PHE sensör sinyaline benzemektedir.

Böyle bir sensör sinyalinin manyetik alan hassasiyeti denklem (2.42) ile hesaplanabilir. Çapraz eklem geometrisindeki PHE sensörlerinde manyetik alan hassasiyeti sensörün genişliğinden ve uzunluğundan bağımsızken, köprü şeklindeki sensörlerde manyetik alan hassasiyeti (l/w) ile doğru orantılıdır. Diğer bir ifade ile köprü geometrisine sahip PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyeti doğrudan sensör geometrisinin bir fonksiyonudur;

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta H} = \frac{i_x(\Delta R)}{\Delta H} \quad (2.42)$$

$$S = \frac{i_x(R_2 - R_1)}{\Delta H} = \frac{i_x(R_{\parallel} - R_{\perp})}{\Delta H} \quad (2.65)$$

$$S = \left(\frac{l}{w}\right) \left[\frac{i_x(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t} \right] \frac{1}{\Delta H} \quad (2.66)$$

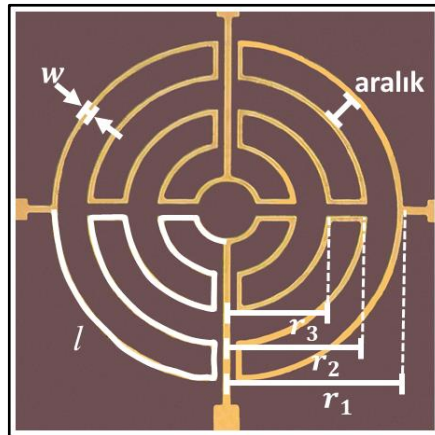
Sonuç olarak, Şekil 2.25.a)'da gösterilen 1-halka eklemi geometrisindeki sensörden okunan voltaj değerleri için de aynı hesaplar geçerlidir. Fakat, burada köprüyü oluşturan kollardaki akım yönünün değiştiğine dikkat edilmelidir. Bu sebeple toplam direnci hesaplarken integral alınabilir veya sonlu elemanlar metodu ile halka geometrisi doğrusal küçük parçalar kullanılarak tarif edilebilir [95].

2.8.4. Çoklu Halka Eklem

5-halka geometrisine sahip bir PHE sensörü Şekil 2.28'de gösterilmiştir [36]. Burada halkanın genişliği w ve her bir halkanın yarıçapı da r_n ile gösterilmiştir. Çoklu halka eklemi geometrisine sahip PHE sensörlerinde de sensör sinyali ve sensörün manyetik alan hassasiyeti 1-halka eklemi ile aynı şekilde hesaplanır. Aradaki tek fark çeyrek halkanın l uzunluğunu arttırabilmek için çoklu halka eklemi kıvrımlı yollara sahiptir. Bu sayede l/w oranı arttığından sensör hassasiyeti de artmaktadır. Çoklu halka eklemesindeki çeyrek halkaların oluşturduğu yolun uzunluğu (l) aşağıdaki gibi yaklaşık olarak hesaplanabilir;

$$l = \frac{2\pi}{4} \sum r_n \quad (2.67)$$

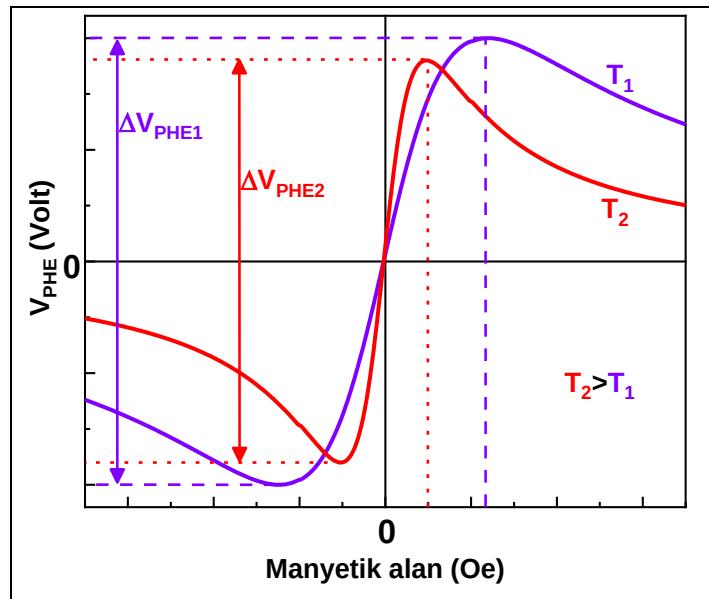
$$l = \frac{\pi}{2} (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + \dots + r_n) \quad (2.68)$$



Şekil 2.28: 5-halka eklemi geometrisine sahip bir PHE sensörü.

2.9. Sıcaklığın PHE Sensör Sinyaline Etkisi

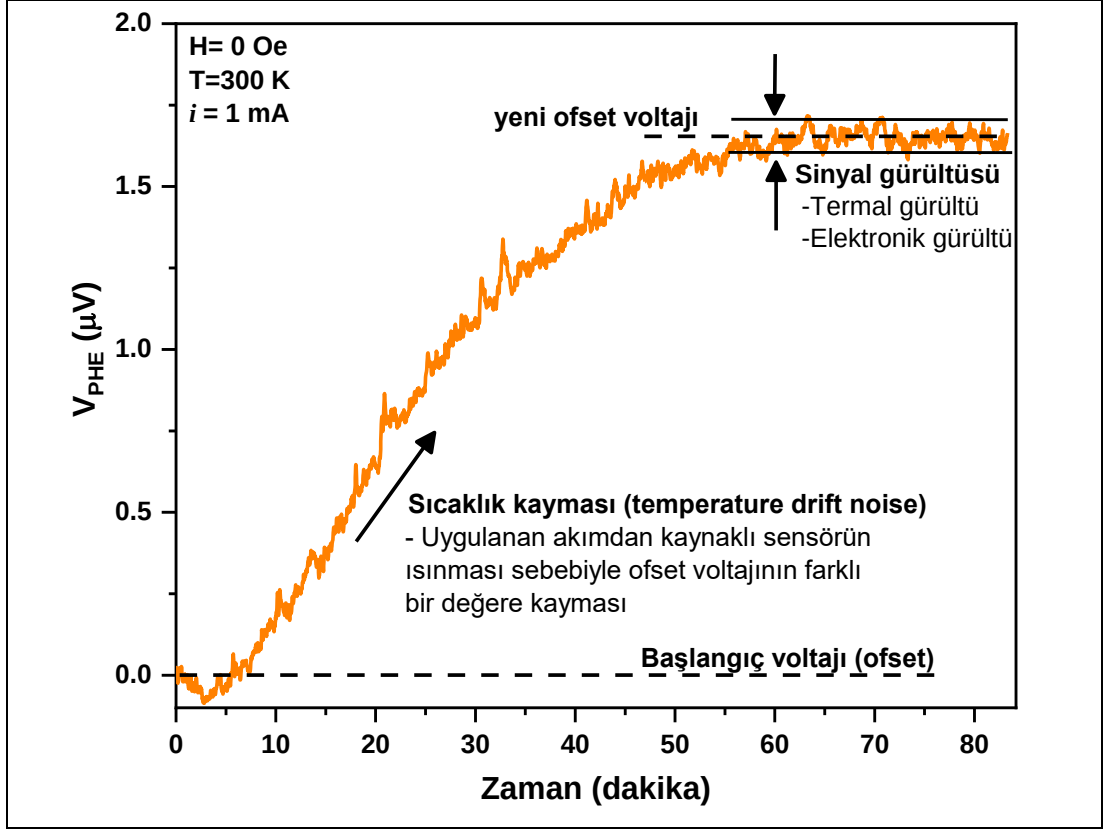
FM ve AF malzemelerde manyetik anizotropi ve manyetodirenç özellikleri sıcaklığın da bir fonksiyonudur. Sıcaklık arttıkça FM malzemelerin H_C ve $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ değerlerinde bir azalma beklenirken [96,97], EB içeren manyetik bir sistem için, sıcaklık arttıkça H_{EB} değerinin azalması beklenir [19,47]. Bir PHE sensörünün iki farklı sıcaklıktaki manyetik alan profilleri Şekil 2.29’da temsilen gösterilmiştir. Burada mavi ve kırmızı renkler ile gösterilen sensör sinyalleri sırasıyla soğuk ve sıcak temsil etmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, sıcaklığın artmasıyla H_C ve H_{EB} değerlerinin azalması PHE sinyalinin tepe noktalarını manyetik alan ekseninde sıfıra doğru yaklaştırırken, $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ değerinin azalması tepeden tepeye ölçülen ΔV_{PHE} değerinde bir azalmaya sebep olmaktadır. Tepe noktalarının sıfıra doğru yaklaşması sensörün manyetik alan hassasiyetini arttırıcı bir şekilde etki ederken, ΔV_{PHE} değerinin azalması, sensörün hassasiyeti azaltacak şekilde etki eder. Kısacası, sensör sıcaklığına bağlı olarak manyetik sistemin anizotropisi ve manyetodirenç değerleri değiştiğinden sensörün manyetik alan hassasiyeti de değişebilmektedir. Bu sebeple, PHE sensörleri ile çalışmadan önce, çalışmanın yapılacağı sıcaklıkta sensörün manyetik alan hassasiyetinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, nispeten yüksek sıcaklıklarda EB kaybolduğundan sensörlerin en yüksek çalışma sıcaklığı da belirlenmelidir.



Şekil 2.29: Bir PHE sensörünün iki farklı sıcaklıkta ölçülen sinyallerinin temsili gösterimi ($T_2 > T_1$). Kırmızı sinyal sıcaklığı (T_2) temsil ederken, mavi sinyal soğuk (T_1) temsil etmektedir.

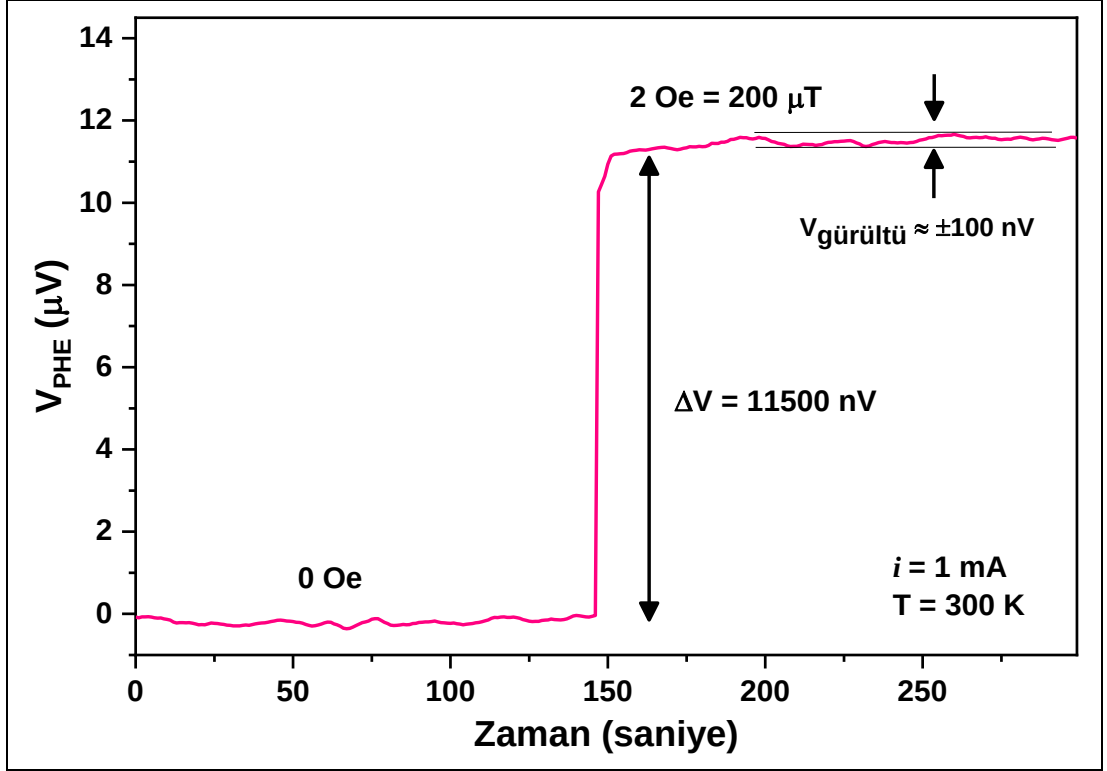
2.10. PHE Sinyalindeki Gürültü Kaynakları ve PHE Sensörlerinin Manyetik Alan Çözünürlükleri

Diğer sensör çeşitlerine kıyasla PHE sensörlerinden okunan sinyal gürültüleri oldukça düşüktür. Bu sebeple sensörün ürettiği voltaj çok küçük olmasına rağmen sensörün sinyal gürültü oranı diğerlerine kıyasla çok yüksektir. DC akım uygulanarak kaydedilen PHE voltajında gözlenen toplamda üç ana gürültü kaynağı vardır. Bunlar; sıcaklık kayması (temperature drift) [6], termal gürültü (thermal noise) [2] ve elektronik gürültü (electronic noise) [2] olarak özetlenebilir. Bahsedilen bu gürültü etkileri Şekil 2.30'da ayrı ayrı gösterilmiştir. Sensör üzerine bir i_x akımı uygulandığında sensörde bir ısınma meydana gelir. Bu ısınma miktarı akım ile doğru orantılıdır. Sıfır manyetik alanda zamana bağlı PHE sinyali ölçülürse ve ilk okunan PHE voltaj değerine sıfır denirse, sensör ısınmasından kaynaklı ofset kayması gözlenebilir. Buna sıcaklık kayması (temperature drift) denir. Bu kaymanın sebebi sensör yapısındaki AMR, H_C ve H_{EB} değerlerinin sıcaklığa bağlı olmasındandır. Şekilden de görüldüğü gibi sensöre akım uygulanıp sensörün termal dengeye gelmesi beklenirse bu etki tamamen giderilebilir. Sensör termal olarak her ne kadar dengeye gelse de, sıcaklık belirli bir değer etrafında küçük de olsa salınım yaptığından, sensör sinyali de bu dalgalanmalardan etkilenmektedir. Buna termal gürültü (thermal noise) denir. Ayrıca ölçüm yapmak için kullanılan cihazların içindeki elektroniğin gürültüsü de önemlidir. Buna elektronik gürültü (electronic noise) denir. Örneğin uygulanan 1 mA sabit akım denildiğinde virgülden sonraki hata payı çok önemli hale gelmektedir (1.00 ± 1 ve 1.00000 ± 1 arasındaki fark gibi). Akımdaki bu dalgalanma sensör sinyalinde de bir dalgalanmaya sebep olmaktadır. Diğer yandan voltaj ölçmek için kullanılan voltmetrenin de doğruluk payı çok önemlidir. Örneğin dijital bir voltmetre kullanıldığı zaman yapılan ölçümün hassasiyeti voltmetrenin tanıdığı dijital basamaklarla sınırlanır. Bu sebeple voltmetrenin de içindeki çözebildiği en küçük dijital adımlardan gelen gürültü katkıları vardır. Sonuç olarak, ölçülen sinyalin toplam gürültüsü bu üç gürültünün toplamı olarak tarif edilir.



Şekil 2.30: Bir PHE sensörünün içerdiği gürültü çeşitleri ve bunların PHE sinyaline etkileri.

Sensörlerin çözünürlük (R: resolution) değeri ise, sensörlerin algılayabileceği en küçük manyetik alan değeri olarak tarif edilir [98]. Sensörlerin ölçebileceği en küçük manyetik alan değeri ise sensör sinyalindeki gürültü ile sınırlıdır. Çözünürlük değerinin belirlenebilmesi için, büyüklüğü iyi bilinen bir manyetik alan değerine karşılık sensörün sağladığı voltaj miktarı zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülmelidir. Bu sayede sinyaldeki gürültü mertebesi gözlenebilir. Bir PHE sensörünün zamana bağlı ölçümü Şekil 2.31’de gösterilmiştir. Öncelikle, 150 saniye boyunca 0 Oe manyetik alan için sensör sinyali kaydedilmiştir. Ardından, 150’nci saniyede 2 Oe manyetik uygulanmıştır. Zamana bağlı bu sensör sinyalindeki gürültü mertebesi yaklaşık ± 100 nV civarındadır. Uygulanan 2 Oe (200 μ T) manyetik alan değeri için sensör yaklaşık 11500 nV mertebesinde bir voltaj sağlamıştır.



Şekil 2.31: Bir PHE sensörünün 2 Oe manyetik alana karşılık ürettiği sinyalin zamana bağlı ölçümü. Burada sinyal gürültüsü yaklaşık 100 nV mertebesinde.

PHE sensörleri zayıf manyetik alanlara doğrusal tepki verdiği için, burada doğru orantı kurularak 100 nV değerinde bir voltaj üretecek manyetik alan değeri hesaplanmalıdır. Sensörün 100 nV sinyal üretmesi için uygulanması gereken manyetik alan değeri sensörün çözünürlük değeridir ve Şekil 2.31’de gösterilen sinyal için doğru orantı kurularak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$\frac{200 (\mu T)}{R} = \frac{11500 (nV)}{100 (nV)} \quad (2.69)$$

$$\text{Çözünürlük (R)} = 1.74 \mu T \quad (2.70)$$

2.11. Esnek (Flexible) PHE Sensörü

Son yıllarda manyetodirenç tabanlı, esnek, bükülebilir ve giyilebilir (flexible, bendable, wearable) cihazlar/sensörler en önemli araştırma alanlarından birisi haline gelmiştir [99–108]. Fakat, literatürde esnek alttaş kullanılarak üretilmiş çok az sayıda PHE sensörü çalışması vardır [17,21–23]. Bu çalışmalardan bir tanesinde 1-halka geometrisinde üretilmiş bir PHE sensörü için bükülme sırasında sensörün anizotropisi değiştiğinden dolayı sensörün manyetik alan hassasiyetinin değiştiğinden bahsedilirken [23], diğer çalışmalarda çapraz eklem geometrisinde üretilen PHE sensörlerinin hassasiyetinin bükülmelerden etkilenmediği gösterilmiştir [17,21,22]. Bükülme sırasında sensör hassasiyetinin değişmesinin bazı uygulamalar için avantajı olduğu gibi bazı uygulamalar için de dezavantajı vardır. Örneğin bükülme miktarı ile orantılı şekilde değişen ve tekrar edilebilen bir sinyal değişimi robotik ve dokunsal algılama uygulamaları için kullanılabilirken, kontrolsüz bir şekilde değişen bir sensör sinyali ise hiçbir işe yaramamaktadır. Ayrıca, sensör hassasiyetinin bükülmelerden etkilenmemesi, bu sensörün düzgün olmayan katı yüzeylerde veya insan vücudu gibi sürekli hareket halinde olan esnek yüzeylerde kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır. Kısacası bu sensörlerin ilgili uygulamalarda kullanılabilmesi için esnek bir PHE sensöründen okunan sinyalin iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu sebeple bükülme sırasında esnek bir AMR veya PHE sensöründe oluşabilecek olaylar ve bunların sensör sinyali üzerine etkileri burada izah edilmiştir.

Denklem (2.29)'da verilen AMR oranı ifadesi doğrudan $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ teriminin bir fonksiyonu iken, denklem (2.41)'de verilen V_{PHE} ifadesi doğrudan $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ ve φ_M terimlerinin bir fonksiyonudur;

$$AMR \text{ oranı (\%)} = \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}} \times 100 \quad (2.29)$$

$$V_{PHE} = i_x \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t_{FM}} \sin \varphi_M \cos \varphi_M \quad (2.41)$$

Bu sebeple bükülme sırasında uygulanan i_x akımının sabit olduğu kabul edilirse, bu $\Delta\rho$ ve φ_M parametrelerindeki değişim doğrudan AMR oranı ve PHE sinyaline de yansımaktadır.

Eğer malzemeye baskı uygulanırsa, malzemenin içerisindeki atomlar birbirine yaklaşır ve bu durumda $\rho_{\parallel}$ ve $\rho_{\perp}$ öz direnç değerlerinde bir azalma olması beklenir. Eğer malzemeye bir gerilme uygulanırsa, atomlar arasındaki mesafe artar ve bu sebeple $\rho_{\parallel}$ ve $\rho_{\perp}$ öz direnç değerlerinde bir artış olması beklenir. Denklem (2.29)'da verilen AMR oranı ifadesinin pay kısmında $\Delta\rho$ ve payda kısmında $\rho_{\perp}$ olduğu görülmektedir. Baskı veya gerilme sırasında $\rho_{\parallel}$ ve $\rho_{\perp}$ terimleri birlikte değiştiğinden, $\Delta\rho$ öz direnç farkı değişebilir veya değişmeden de kalabilir. Fakat paydada tek başına bulunan $\rho_{\perp}$ teriminin değişmesi, doğrudan AMR oranının değişmesine sebep olmaktadır. Baskı sırasında $\rho_{\perp}$ öz direnç değerinin düşmesi AMR oranında bir artışa sebep olurken, gerilme sırasında $\rho_{\perp}$ değerinin artması AMR oranında bir azalmaya sebep olur. Denklem (2.41)'de verilen V_{PHE} ifadesinde ise $\Delta\rho$ terimi tek başına durmaktadır. Bu sebeple $\Delta\rho$ değerindeki artış ve azalma PHE sinyalinin tepeden tepeye okunan ΔV_{PHE} değerinde sırasıyla bir artışa ve azalmaya sebep olur ve bu durum sensör hassasiyetinin değişmesine sebep olur. Eğer bükülme sırasında $\Delta\rho$ terimi değişmezse, PHE sinyalinin ΔV_{PHE} değeri de değişmez kalır. Ayrıca, denklem (2.41) içerisinde bulunan φ_M değeri denklem (2.43)'te gösterildiği gibi H_C ve H_{EB} parametrelerinin de bir fonksiyonudur;

$$\varphi_M \approx \tan^{-1} \left(\frac{H_y}{H_C + H_{EB}} \right) \quad (2.43)$$

Eğer bükülme sırasında H_C ve H_{EB} değerlerinde bir değişim olursa, sensör sinyalindeki tepe noktasının gözlendiği $H_y = H_C + H_{EB}$ tepe noktası manyetik alan ekseninde farklı bir değere kayar [23]. Sinyalin tepe noktasının farklı bir H_y değerine kayması da sensör hassasiyetinin değişmesine sebep olur. Eğer bükülme sırasında H_C ve H_{EB} değerlerinde bir değişim gözlenmezse sensör hassasiyeti de değişmez kalır. Sonuç olarak esnek bir AMR veya PHE tabanlı sensör için bükülme sırasında mümkün olan dört durum ortaya çıkmaktadır; (i) değişken $\Delta\rho$ ve değişken anizotropi, (ii) değişken $\Delta\rho$ ve sabit anizotropi, (iii) sabit $\Delta\rho$ ve değişken anizotropi, (iv) sabit $\Delta\rho$ ve sabit anizotropi. Kaynak [23]'te verilen PHE sensöründe (ii) durumu gözlenirken, diğer kaynaklarda sunulan PHE sensörlerinde (iv) durumu gözlenmiştir [17,21,22].

3. ARAŞTIRMA TEKNİKLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde PHE sensörlerinin üretilmesi ve karakterize edilmesi için kullanılan litografi yöntemleri, sıçratma (sputter) sistemi ve manyetodirenç ölçüm sistemi anlatılmıştır. Sensörlerin manyetik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi sırasında kullanılan manyeto-optik Kerr etkisi [42,109,110],[147],[148], X-ışını kırınımı (XRD: X-Ray Diffraction) [111] ve X-ışını yansımaları (XRR: X-Ray Reflectivity) [112,113] tekniklerine burada yer verilmemiştir. Bu teknikler hakkındaki detaylı bilgiler için ilgili kaynaklara bakılmalıdır.

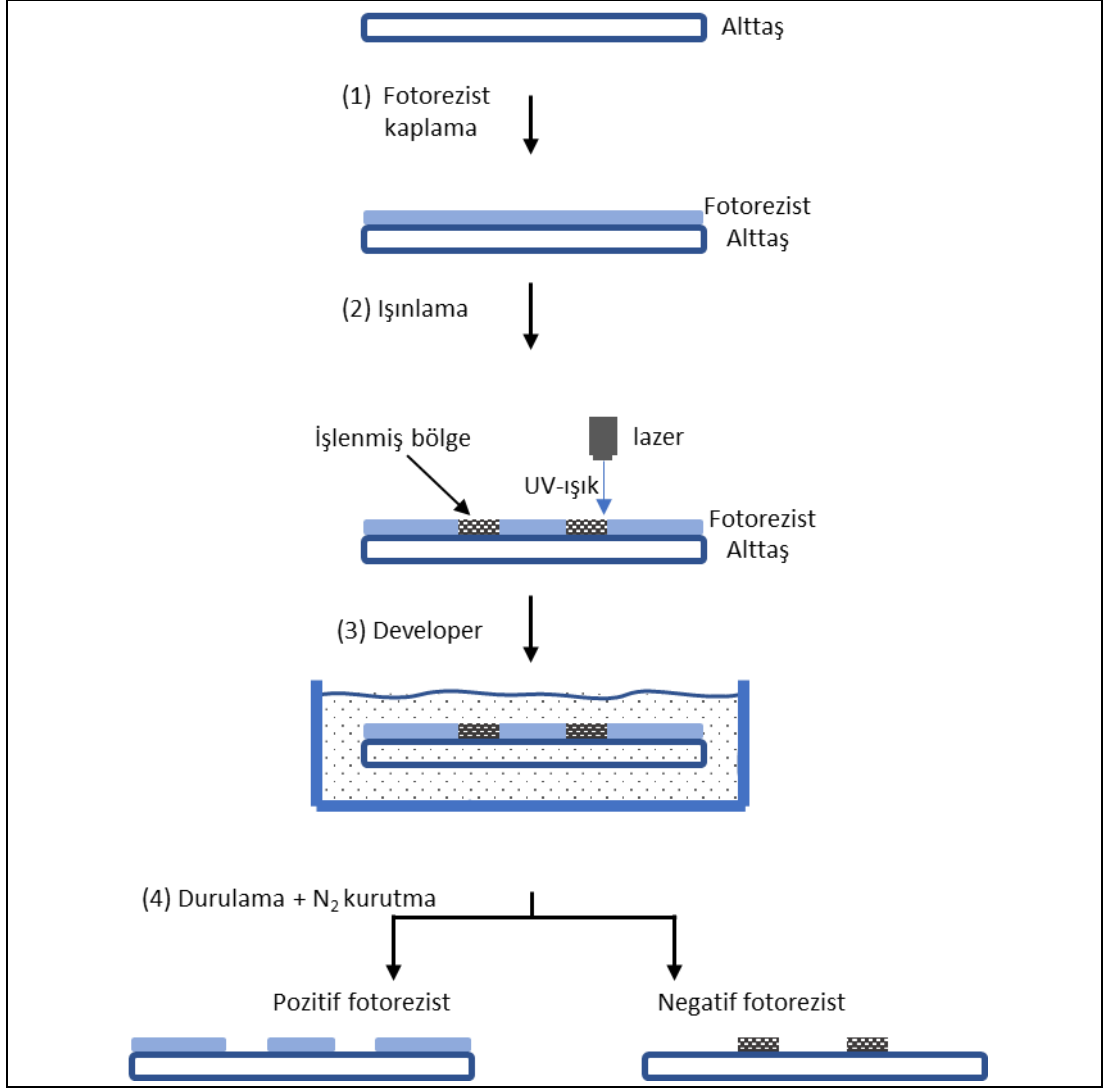
3.1. Litografi Yöntemleri

Litografi, bir yüzey üzerinde desen oluşturma işlemlerinin genel adıdır [114–117]. Günümüzde kullanılan litografik teknikler sayesinde gözle görülebilen desenler yapılabildiği gibi, mikro ve nano boyutta desenler üretmek de mümkündür. Litografi işlemleri ışık ve ışığa duyarlı malzemeler kullanılarak, baskılama veya aşındırma gibi yöntemlerle yapılabilmektedir. Işık kullanılarak yapılan desenleme işlemlerine özel olarak fotolitografi denmektedir. Fotolitografi yönteminde UV bölgesinde dalga boyuna sahip bir ışık kaynağı ve UV ışığa duyarlı bir sıvı kaplama malzemesi kullanılmaktadır. Bu ışığa duyarlı malzemelere “photoresist” (fotorezist) denmektedir. Fotorezist, cam, Si, SiO₂ ve metal gibi düzgün bir yüzeye sahip alttaşlar üzerine bir spin kaplama cihazı kullanılarak belirli bir döndürme hızı ile ince bir tabaka şeklinde kaplanmaktadır. Kaplamanın kalınlığı fotorezist sıvısının akışkanlığına ve kaplama sırasında kullanılan döndürme hızına bağlıdır. Fotorezist, negatif ve pozitif olmak üzere iki türdür. Negatif fotorezist ışığa maruz kaldığında kalıcı bir sertlik kazanırken, pozitif fotorezist ışığa maruz kaldığında atomları arasındaki bağları zayıflar. Bu sayede pozitif/negatif fotorezist üzerine, kontrollü bir ışık kaynağı kullanılarak, istenilen desenler lazerle yazı yazar gibi veya bir foto-maske kullanılarak işlenebilmektedir. İşlenmiş bir fotorezist tabakası uygun bir çözücü içerisine bırakıldığında, pozitif fotorezist tabakası üzerinde ışığa maruz kalan kısımlar tamamen açılıp yüzey üzerinde çukurlar oluşurken, negatif fotorezist üzerinde ışığa maruz kalan bölgeler sertleştiğinden, ışık görmeyen bölgeler çözücü içerisinde çözünmektedir. Bu sayede, istenilen desenler pozitif/negatif fotorezist kullanılarak oluşturulmaktadır. Fotorezisti çözen bu çözücü malzemelere “developer” denmektedir. Her fotorezistin

özücüsü kendisine özgüdür. Ayrıca, pozitif ve negatif fotorezistlerin farklı markalarda ve farklı akışkanlıklarda olmak üzere birçok çeşidi vardır. Bu farklı markalardaki fotorezistlerin kendi çözücülerini içerisinde çözünme hızları da önemlidir. Bu sebeple UV ışık altında işlenmiş fotorezistlerin kendi çözücüsü içerisinde kalma süreleri iyi ayarlanmalıdır. Son olarak, her bir fotorezistin kendine özgü teknik bilgi dosyası (technical data sheet) mevcuttur. Bu dosyada malzemeye özgü spin kaplama hızları, uygulanması gereken ışık miktarı, çözücü cinsi, çözücü içerisinde bekleme süreleri, malzemenin saklanması ve bertaraf edilmesi konularında bilgiler açıkça belirtilmiştir. Bu parametreler teknik bilgi dosyasında verilmesine rağmen en iyi sonucu elde etmek için, işlemlerin yapıldığı laboratuvarında litografi adımlarının yeniden belirlenmesi gerekir. Ayrıca, litografi işlemlerine başlamadan önce iş güvenliğine dikkat edilmelidir. Bu işlemler sırasında eldiven, maske ve önlük kullanılması gerekmektedir. Fotorezist ve developer malzemeleri ortama kötü koku yaydığından, işlemlerin yapıldığı ortamın da iyi havalandırılması gerekmektedir. Litografi işlemlerine başlamadan önce kullanılacak olan her bir malzemenin “malzeme güvenlik bilgi dosyası” (MSDS: material safety data sheet) kesinlikle incelenmelidir. Konunun devamında bazı litografi yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan işlem adımları anlatılmıştır.

3.1.1. Doğrudan Litografi Yöntemi

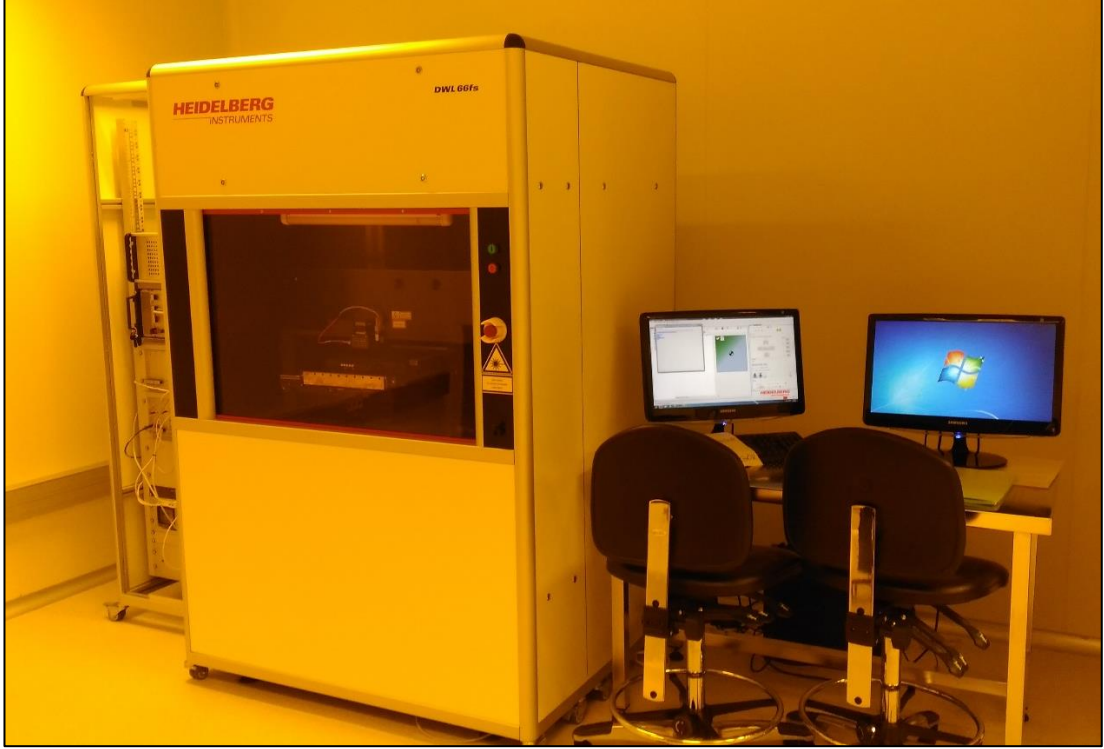
Doğrudan litografi yöntemiyle bir alttaş üzerindeki fotorezist tabakasında desen oluşturmak için, desenler bir lazer yazıcı yardımıyla doğrudan fotorezist tabakasına işlenir. Ardından, işlenen fotorezist tabakası kendi çözücü sıvısı (developer) içerisinde belirli bir süre bekletilir. Son olarak, alttaşlar iyonlarından arındırılmış (DI: de-iyonize) su ile durulanır ve basınçlı azot gazı (N_2) ile kurutulur. Bu işlemler adım adım Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Lazer yazıcı kullanılarak yapılan doğrudan litografi işlemleri.

Gebze Teknik Üniversitesi, Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda bulunan HEIDELBERG DWL 66fs doğrudan litografi cihazı (DWL: Direct Write Litography) en küçük 1 μm çizgi genişliğine sahip desenleri 20×20 cm² alan içerisinde işleyebilmektedir. Cihazın bir fotoğrafı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Cihazın yazdığı desenler çok küçük olduğundan, cihazın bulunduğu ortamın tozlarından arındırılmış ve iklimlendirilmiş olması çok önemlidir. Bu sebeple HEIDELBERG doğrudan litografi cihazı bir temiz oda içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca, cihazın kendi yapısı da kapalı bir kutu şeklinde olup, ikinci bir temiz oda özelliği taşımaktadır. Cihazın tekrar edilebilir bir şekilde desenleri yazabilmesi için, bünyesindeki hareketli tüm parçaların ısı dengede olması gerekmektedir. Bunu yapabilmek için cihaz kendi bünyesinde de bir iklimlendirme sistemi içermektedir ve kullanılmadan önce cihazın yaklaşık olarak

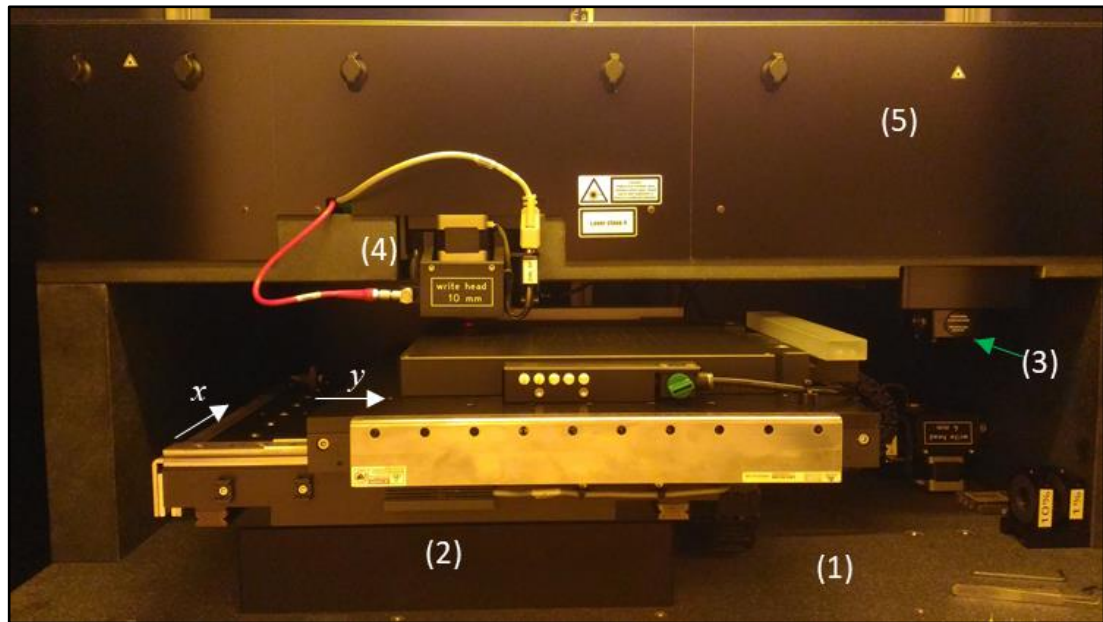
iki gün boyunca çalışır durumda olması tavsiye edilmektedir. Cihazın ön penceresi ve bazı hareketli parçaları ise basınçlı hava ve vana sistemiyle kontrol edilmektedir. Bu sebeple cihazda kullanılan basınçlı havanın kuru olması çok önemlidir. Ek olarak, cihazın ışık kaynağı 365 nm dalga boyuna sahip ve 120 mW/cm^2 değerinde ışık şiddeti sağlayabilmektedir.



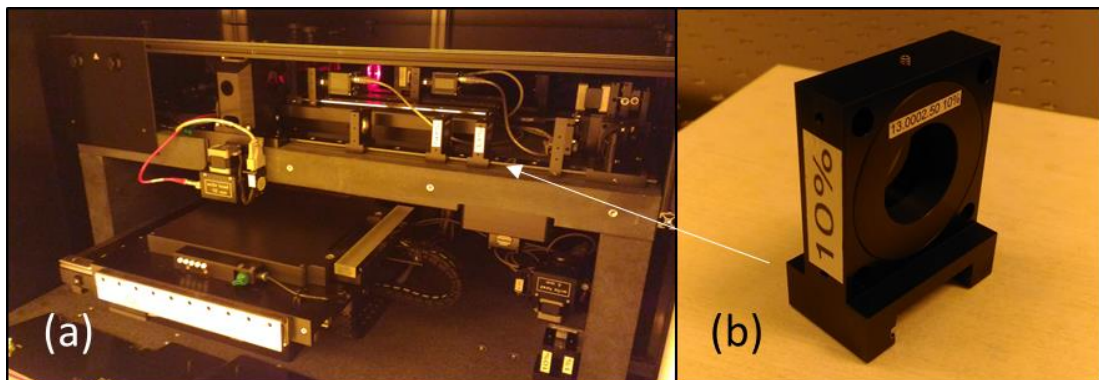
Şekil 3.2: GTÜ, Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda bulunan HEIDELBERG DWL 66fs doğrudan litografi cihazının bir fotoğrafı.

Cihazın iç kısmında bulunan optik ve hareketli parçaların bir fotoğrafı Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Fotoğraf üzerinde (1) ile gösterilen kısım titreşim önleyici bacaklar üzerine oturtulmuş ve mermer veya granit gibi bir taştan üretilmiş sabit bir platformdur. Cihazın içerisindeki diğer hareketli ve sabit parçalar bu taştan platform üzerine yerleştirilmiştir. (2) ile gösterilen kısım ise maskenin yerleştirildiği hareketli bir platformdur. Bu platformun alt kısmı taş platform üzerinde sabitlenmiştir. Bu sabitlenmiş parça üzerinde ise x ve y eksenleri boyunca 25 nm hassasiyetle hareketi sağlayan ve doğrusal motorlara sahip iki ayrı platform bulunmaktadır [153]. Bu hareketli platformların en üst kısmında ise maskenin yerleştirildiği platform bulunmaktadır. Maskenin yerleştirildiği platform üzerinde kademeli olarak yerleştirilmiş vakum hatları bulunmaktadır. Vakum hattı sayesinde, desenlerin

işlenmesi sırasında maskenin bu platform üzerinde hareketsiz olması sağlanmaktadır. Kullanılan maske veya alttaşın büyüklüğüne göre vakum kademeleri, bu platformun hemen ön tarafında görünen vana sistemi sayesinde kontrol edilebilmektedir. Fotoğraf üzerinde (3) ile gösterilen kısımda ise bu x ve y eksenlerinde hareket edebilen platformun pozisyonunu belirlemek için kırmızı ışığa sahip bir interferometre bulunmaktadır. İnterferometre, y ekseninde hareket eden parçanın (fotoğrafa göre) sağ tarafında bulunan bir ayna yardımıyla çalışmaktadır. Fotoğrafta (4) ile gösterilen kısımda ise sabitlenmiş yazıcı başlık (write head 10 mm) bulunmaktadır. Bu başlık istenilen desenleri yazmak için 50 μ m genişliğinde ışık şeridine sahiptir. Tasarlanan desenler bu 50 μ m genişliğindeki ışık şeridi içerisinde piksellerle tarif edilmektedir. 10 mm yazıcı başlık için desenlerin çözünürlüğü en küçük 1 μ m olarak tavsiye edilmektedir. Bundan daha küçük çözünürlüğe sahip desenler ise tutarsız bir şekilde işlenmektedir. Yazıcı başlığın içinde, bilgisayarla kontrol edilebilen hareketli bir mercek sistemi de vardır. Bu sayede istenilen desenlerin alttaş üzerinde düzgün bir şekilde oluşturulması sağlanmaktadır. Ayrıca, cihaza yerleştirilen kare veya daire şeklindeki alttaşların konumunu otomatik olarak bulmak için yazıcı başlık bir basınçlı hava sistemi de içermektedir. Bunu yapabilmek için, yazıcı başlık alttaş yüzeyinde otomatik olarak gezdirilmektedir. Yazıcı başlık, alttaşın sınırına geldiğinde ölçtüğü basınç kuvveti değişmektedir. Bu sayede sistem, yerleştirilen alttaşın büyüklüğünü ve alttaşın merkezini otomatik olarak belirlemektedir. (5) ile gösterilen kısımda ise yazma işlemi için gerekli olan ışık kaynağı ve desenlerin piksel olarak oluşturulduğu optik yolu bulunmaktadır. Cihazın kapalı kısmında bulunan optik yolu ise Şekil 3.4.a)'da gösterilmiştir. Burada yazdırma sırasında maske üzerine uygulanan ışığın şiddeti bilgisayardan yüzde (%) olarak ayarlanabildiği gibi, fotoğrafta ok ile gösterilen, optik yol üzerine yerleştirilmiş mekanik filtrelerle de ayarlanabilmektedir. Örnek olarak, Şekil 3.4.b)'de gösterilen mekanik filtre, gelen UV ışığın yalnızca %10 kadarını geçirmektedir. Özetle, HEIDELBERG doğrudan litografi cihazı, sabitlenmiş bir lazer yazıcı başlık içermektedir ve yazma işlemi x ve y eksenlerinde hareketli bir platform sayesinde 20×20 cm² (8×8 inç²) alan içerisinde 1 μ m çözünürlükle yapılabilmektedir.



Şekil 3.3: HEIDELBERG doğrudan litografi cihazının içerisinde bulunan optik ve hareketli parçaların bir fotoğrafı.

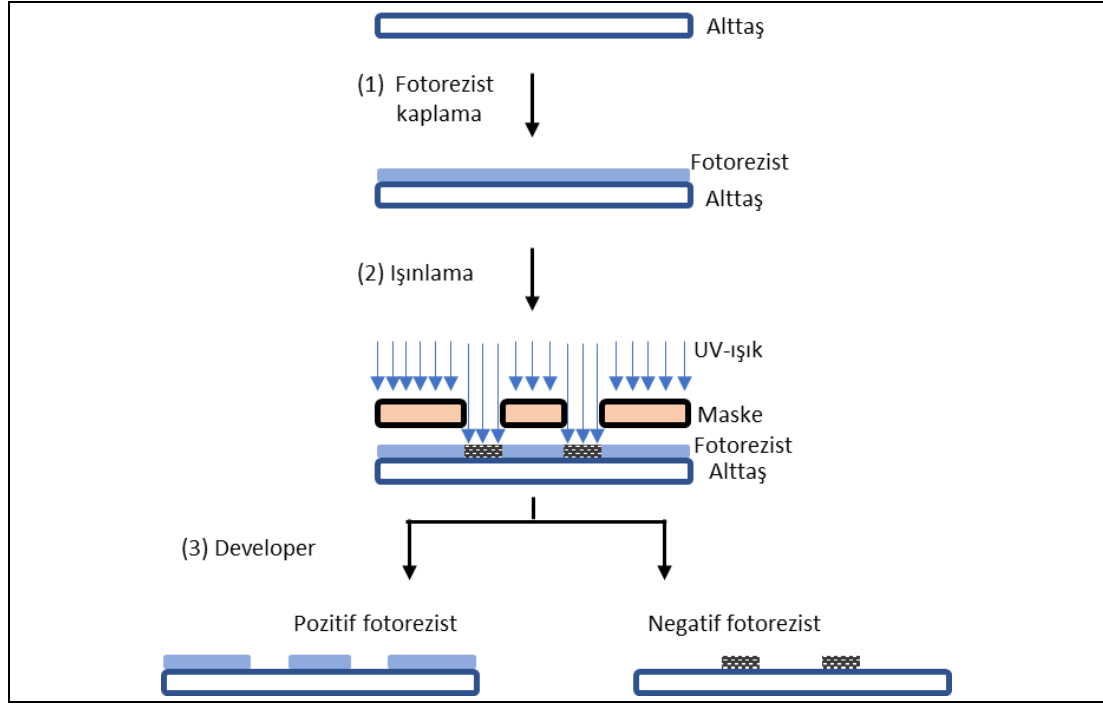


Şekil 3.4: a) HEIDELBERG doğrudan litografi cihazının iç kısmında bulunan optik yolunun ve b) ışık şiddetinin ayarlandığı mekanik filtrenin birer fotoğrafı.

3.1.2. Maskeleye Yöntemi

Doğrudan litografi yöntemi çok kullanışlı olmasına rağmen yavaş işleyen bir yöntemdir. Çünkü lazer yazıcı istenilen desenleri oluşturmak için alttaş üzerindeki her bir bölgeyi gezmek zorundadır. Bunun yerine daha önceden lazer yazıcı ile işlenmiş bir foto-maske kullanmak işlemleri hızlı hale getirmektedir. Fotorezist tabakası üzerindeki her bölgeye eşit miktarda enerji sağlayacak şekilde tasarlanmış bir ışık kaynağı altında, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, bir foto maske kullanılarak yalnızca istenilen bölgelere ışık düşmesi sağlanabilir. Böylece maske üzerindeki desen olduğu

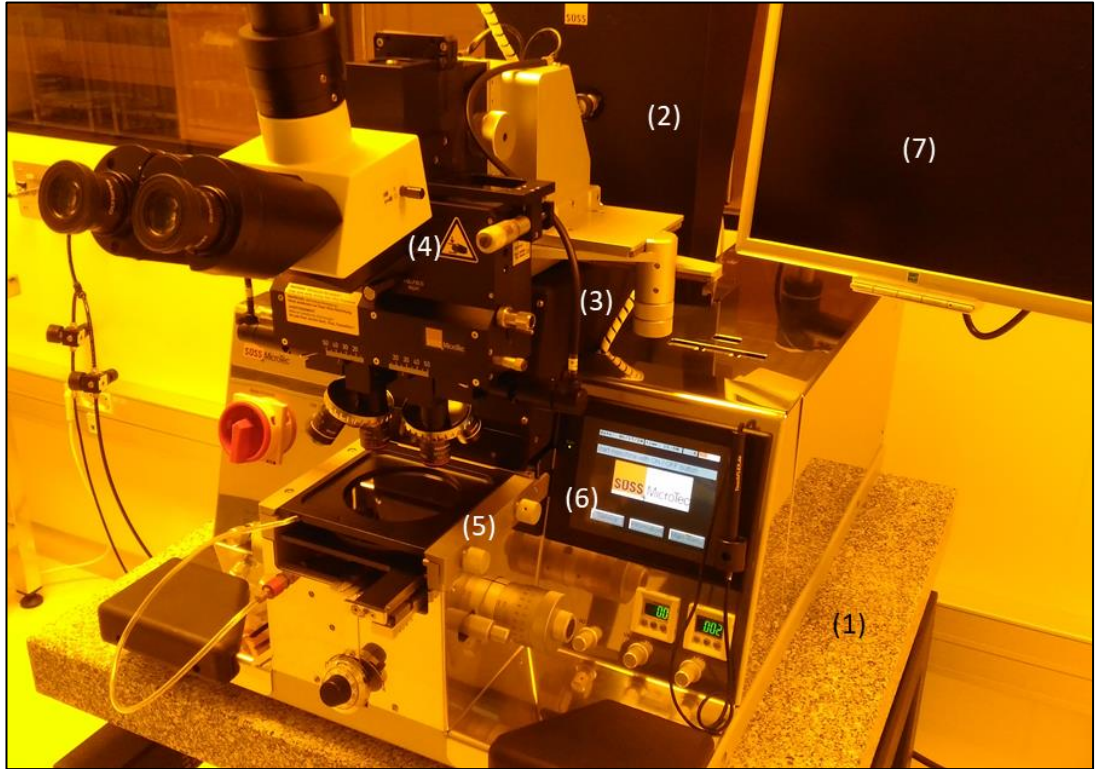
gibi fotorezist üzerine işlenir. Fotorezist kaplı alttaş maskelenmiş ışığa maruz bırakıldıktan sonra kendi çözücüsü (developer) içerisinde belirli bir süre bekletildiğinde istenilen desenler üretilmiş olur. Burada kullanılan ışığın paralel hâle getirilmiş olması (collimated), şiddeti ve uygulanma süresi önemlidir. Tekrar edilebilir en iyi sonucu elde etmek için bu parametrelerin hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.5: Maskeleme yöntemi kullanılarak yapılan litografi işlemleri.

Gebze Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Karl SÜSS MJB4 maske hizalama cihazının bir fotoğrafı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Cihazın bulunduğu ortamın tozlarından arındırılmış ve iklimlendirilmiş olması çok önemlidir. Bu sebeple Karl SÜSS MJB4 maske hizalama cihazı da bir temiz oda içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca cihazın çalıştırılabilmesi için basınçlı hava, vakum ve azot gazı gereklidir. Şekil 3.6'da verilen fotoğraf üzerinde cihazın bileşenleri numaralandırılmıştır. Fotoğraf üzerinde (1) ile gösterilen kısım zemindeki titreşimi engelleyen bacaklar üzerine yerleştirilmiş mermer veya granitten üretilmiş bir platformdur. Bütün sistem bu platform üzerinde bulunmaktadır. (2) ile gösterilen kapalı kısımda 350 W gücünde cıva lambası bulunmaktadır. Cıva lambası özel olarak 365 nm ve 405 nm dalga boylarına sahip bir ışık kaynağıdır. Çalışma sırasında cıva lambası çok ısındığından, 3 litre/dk değerinde

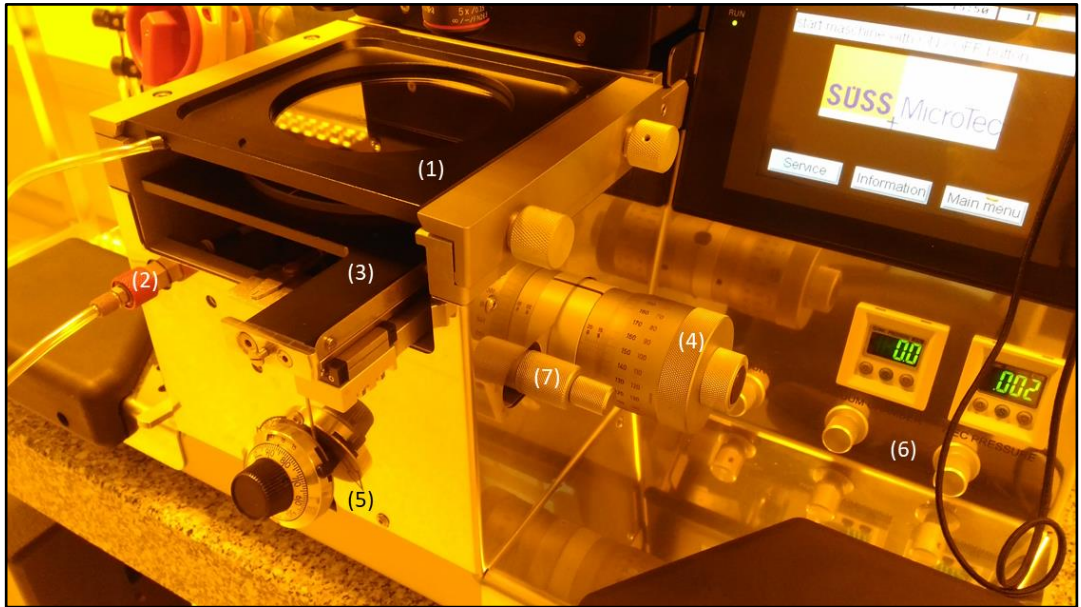
bir azot gazı akışıyla soğutulmaktadır. Azot akışı bu değerin altına düştüğünde cihaz çalışmayı durdurup uyarı vermektedir. Fotoğrafta (3) ile gösterilen kısım optik yoldur. Bu kısımda cıva lambasından çıkan ışık doğrusal (collimated) hâle getirilmektedir ve bu yol üzerindeki optik ekipmanlar sayesinde ışık demeti, 10 cm çapındaki bir alan üzerine 25 mW/cm^2 değerinde homojen ışık şiddeti sağlamaktadır. Fotoğrafta (4) ile gösterilen kısım alttaş ile maske üzerindeki desenleri hizalaması sırasında kullanılan ve sarı ışık kaynağına sahip bir mikroskoptur. (5) ile gösterilen kısım maskenin ve alttaşın yerleştirildiği bir platformdur. Bu kısım detaylı olarak daha sonra anlatılacaktır. (6) ile gösterilen kısım sistemi kontrol etmek için tasarlanmış bir kontrol ünitesidir. (7) ile gösterilen kısım mikroskopa bağlantılı olan bir ekrandır.



Şekil 3.6: GTÜ, Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda bulunan Karl SÜSS MJB4 maske hizalama cihazının bir fotoğrafı.

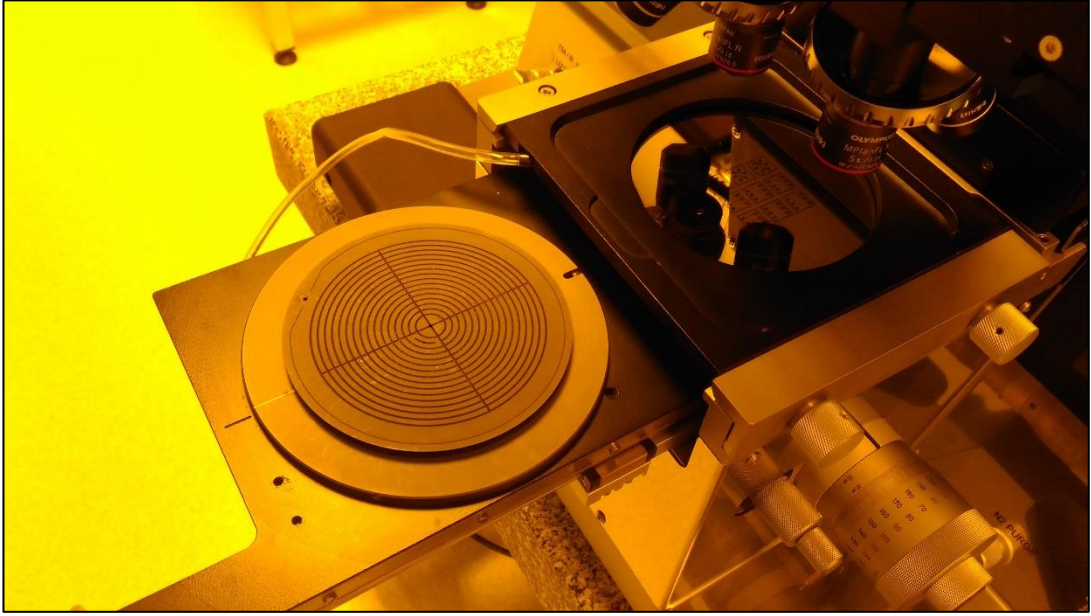
Şekil 3.6'da (5) ile numaralandırılmış kısmın büyük bir fotoğrafı Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Fotomaskenin ve alttaşın yerleştirildiği kısımdaki bileşenler fotoğraf üzerinde numaralandırılmıştır. Fotoğrafta (1) ile gösterilen kısım fotomaskenin yerleştirildiği çekmece gibi bir bölmedir. Fotomaske buraya yerleştirildikten sonra, çekmece kısmının sağ tarafında görülen sıkılama vidaları ile fotomaske sabitlenir.

Ayrıca, fotomaskeyi vakum aracılığıyla tutan ve çekmeceyle uyumlu ayrı bir maske tutucusu vardır. Bu maske tutucusunun vakumu (2) ile gösterilen kısımdan sağlanır. Litografi yapılacak olan alttaşlar (3) ile gösterilen platforma yerleştirilir. Bu platform çekmeceye benzemektedir ve platformun dışarı doğru çıkmasını sağlayan raylı bir kızak üzerine yerleştirilmiştir. Ayrıca, bu platform içeri yerleştirildikten sonra, bulunduğu yerde x, y ve z eksenlerinde mikrometre mertebesinde bir hassasiyetle hareket etme ve z ekseninde $\pm 45^\circ$ dönme kabiliyetlerine sahiptir. Bu sayede mikroskop altında alttaşlar ile maskedeki desenler hizalanabilmektedir. Fotoğrafta (4) ile gösterilen kısım, alttaş platformunu x ekseninde boyuna mikrometre mertebesinde hareket ettirmek için kullanılan bir konum ayarlayıcıdır. Bunun konum ayarlayıcısının aynısı y ekseninde için de vardır fakat fotoğrafta görünmemektedir. Fotoğrafta (5) ile gösterilen kısım alttaş ile maske arasında kalan boşluğu ayarlamak için z eksenindeki konum ayarlayıcıdır. Ayrıca, bu ayar sayesinde maske ile alttaşın birbirine sert bir şekilde temas (hard contact) etmesi de sağlanabilmektedir. (6) ile gösterilen kısımda ise bu temasın en yüksek basıncı ayarlanmaktadır. Bu sayede, temas sırasında aşırı basınçtan dolayı maskenin ve alttaşın kırılması önlenmektedir. Fotoğrafta (7) ile gösterilen kısım ise alttaşın bulunduğu platformu z ekseninde $\pm 45^\circ$ döndürmek için bir açı ayarlayıcıdır. Burada maske ve alttaş hizalandıktan sonra kontrol ünitesinden girilen süre miktarınca 25 mW/cm^2 sabit ışık şiddeti maske üzerine uygulanmaktadır. Burada en kısa 0.1 saniye ışık uygulanabilmektedir.



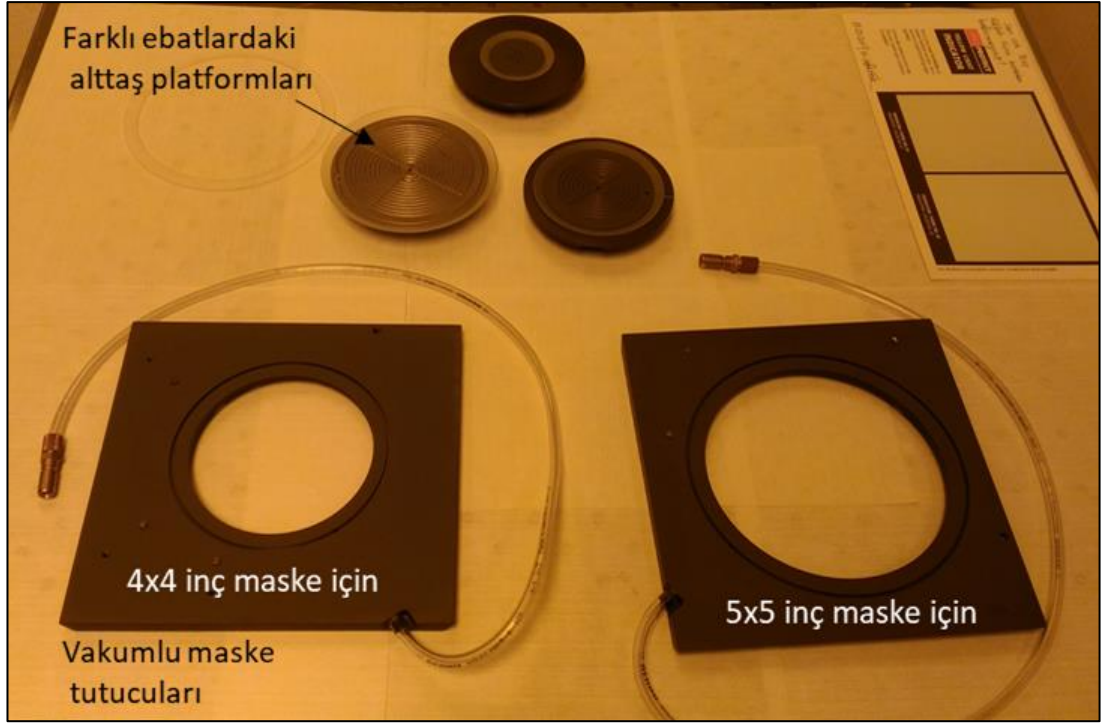
Şekil 3.7: Maskenin ve alttaşın yerleştirilip hizalandığı platformun bir fotoğrafı.

Alttaşın yerleştirildiği, çekmeceye benzer platformun dışarıya çıkartılmış bir fotoğrafı Şekil 3.8’de sunulmuştur. Bu platform üzerinde alttaşı sabitlemeye yarayan vakum kanalları bulunmaktadır. Bu sayede, alttaş ile maskenin teması sırasında alttaşın hareketsiz kalması sağlanmaktadır. Ayrıca platformun tam ortasında bulunan vakum kanalı küçük bir alttaş kullanıldığında kapalı olmalıdır. Eğer ışınlama sırasında bu vakum kanalı kapalı olmazsa, cihaz vakum uyarısı vermektedir ve çalışmayı durdurmaktadır.



Şekil 3.8: Alttaşın yerleştirildiği platformun bir fotoğrafı.

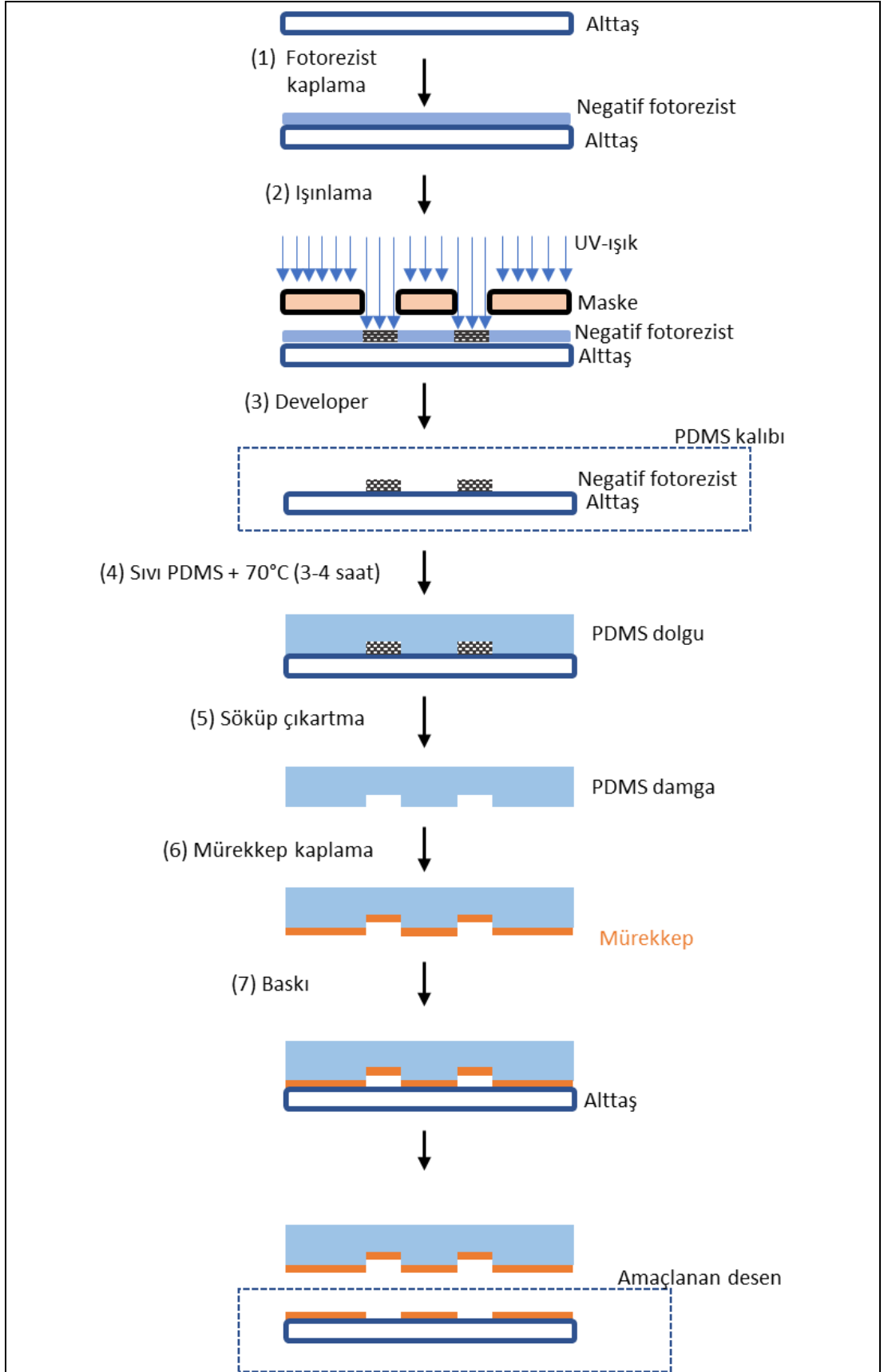
Son olarak, maske hizalama cihazının farklı ebatlarda vakumlu alttaş ve maske tutucuları vardır. Bu parçaların bir fotoğrafı Şekil 3.9’da verilmiştir. Burada, kare şeklindeki ve 5×5 inç² ebatlarındaki maskeler için tasarlanmış vakumlu tutucusunun ortasında 4 inç çapında dairesel bir boşluk varken, 4×4 inç² maskeler için tasarlanmış vakumlu maske tutucusunun ortasında 3 inç çapında dairesel bir boşluk vardır. Maske üzerine tasarlanan desenler bu boşluk kısma sığacak şekilde tasarlanmalıdır.



Şekil 3.9: Farklı ebatlardaki vakumlu maske tutucuları ve alttaşı platformlarının bir fotoğrafı.

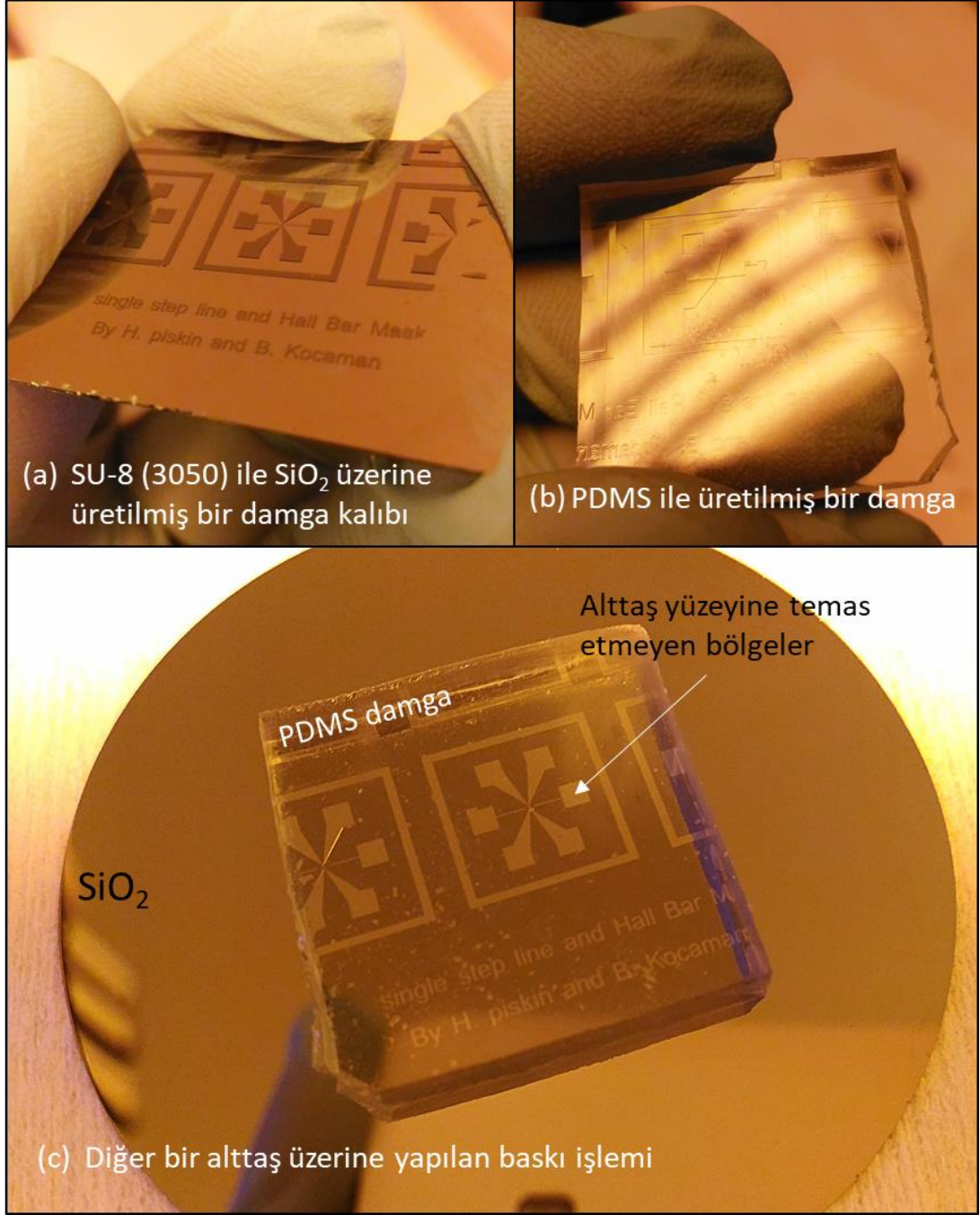
3.1.3. Baskı Yöntemi (Soft Litography/Imprinting)

Bu yöntem aynı damga baskısı gibidir. Daha önceden litografi ile hazırlanmış desenli ve nispeten sert bir yüzey bir mürekkep ile kaplanır ve desen yapılacak diğer bir yüzeye baskı yapılır [118–122]. Buradaki mürekkep olarak isimlendirilen malzeme, bir fotorezist olabileceği gibi, baskı yapılacak yüzeye tutunabilen farklı malzemeler de olabilir. Bu yöntemde damga olarak genelde PDMS (polidimetilsiloksan) malzemesi kullanılır. PDMS malzemesi, başlangıçta sıvı olup, katılaşabilen bir dolgu malzemesidir. PDMS katılaştırıldığında yumuşak ve esnek bir yapıya sahiptir. Bu sayede baskı yapılan yüzeye iyi bir şekilde yerleşebilmektedir. Ayrıca, PDMS ticari olarak satın alındığında kutu içerisinde iki farklı sıvı halinde gelir. Birinci sıvı temel polimerdir. İkinci sıvı ise kürlleme sıvısıdır. Bu iki sıvı 10/1 (temel/kür) oranında karıştırılıp, desen kalıbına dökülür. Ardından 70 C° sıcaklığında en az 3-4 saat kadar beklenirse PDMS katılaşır. Katılaşan PDMS yüzeyden nazikçe sökülüp alınır. Böylece PDMS damganın bir yüzeyinde tasarlanan desen üretilmiş olur. Bütün bu işlemler Şekil 3.10’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Baskı yöntemi ile yapılan litografi işlemlerinin şematik bir gösterimi.

GTÜ, Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda, maskeleme yöntemi ve SU-8 (3050) negatif fotorezist kullanılarak üretilmiş bir PDMS kalıbının fotoğrafı Şekil 3.11.a)'da gösterilmiştir. Burada kullanılan SU-8 (3050) negatif fotorezist yaklaşık 50 µm yüksekliğindedir. Bu sayede, pürüzsüz bir yüzeye sahip SiO₂ alttaş üzerinde 50 µm yüksekliğine sahip desenler üretilmiştir. Şekil 3.11.b)'de ise bu PDMS kalıbı kullanılarak üretilmiş bir PDMS damganın fotoğrafı verilmiştir. PDMS damgayı üretmek için, temel polimer ve küreme sıvıları 10/1 oranında karıştırılıp, çok yüksek olmayan ve uygun genişlikteki bir kap (cam petri kabı) içerisine yerleştirilen PDMS kalıbı üzerine dökülmüştür. Ardından, kapla birlikte PDMS gece boyunca 70 °C sıcaklığındaki ısıtıcı tabla (hot plate) üzerinde tavlama işlemine tâbi tutulmuştur. Bu sayede PDMS katılaştırılmıştır. Katılaştıran PDMS kalıp yüzeyinden söküldükten sonra, malzemesinin ilgili kısımları bir maket bıçağı ile kesilerek çıkartılmıştır. PDMS malzemesi görünür ışık altında oldukça şeffaf olduğundan, yüzeyde oluşan 50 µm derinliğindeki çukurları görmek biraz güçtür. Bu işlemden sonra PDMS damganın yüzeyinin bir mürekkep ile kaplanması gerekmektedir. Fakat burada mürekkep kaplama işlemi yapılmadan, temsili olarak, diğer bir SiO₂ alttaş üzerine yapılan baskı fotoğrafı Şekil 3.11.c)'de gösterilmiştir. Fotoğrafta açıkça görüldüğü gibi, PDMS damganın yüzeydeki çukurlar SiO₂ yüzeyine temas etmemektedir. Bu sayede PDMS damganın bir yüzeyinde tasarlanan desenler alttaşlar üzerine bir mürekkep kullanılarak işlenebilmektedir. Ayrıca, baskı sırasında, PDMS damganın mümkün olduğu kadar sabit tutulması da çok önemlidir. Yüzeyde kaydırılan PDMS damga, SiO₂ üzerinde oluşturulan desenlerin kalitesini azaltmaktadır. Ek olarak, PDMS baskı yöntemi el ile yapılabildiği gibi, baskı işlemini otomatik bir şekilde yapabilen ticari cihazlar da bulunmaktadır. Üretilen PDMS damga sayesinde çok hızlı bir şekilde diğer bir yüzeyde desen oluşturulduğundan, bu yöntem seri üretim gerektiren birçok uygulamada kullanılmaktadır [135].

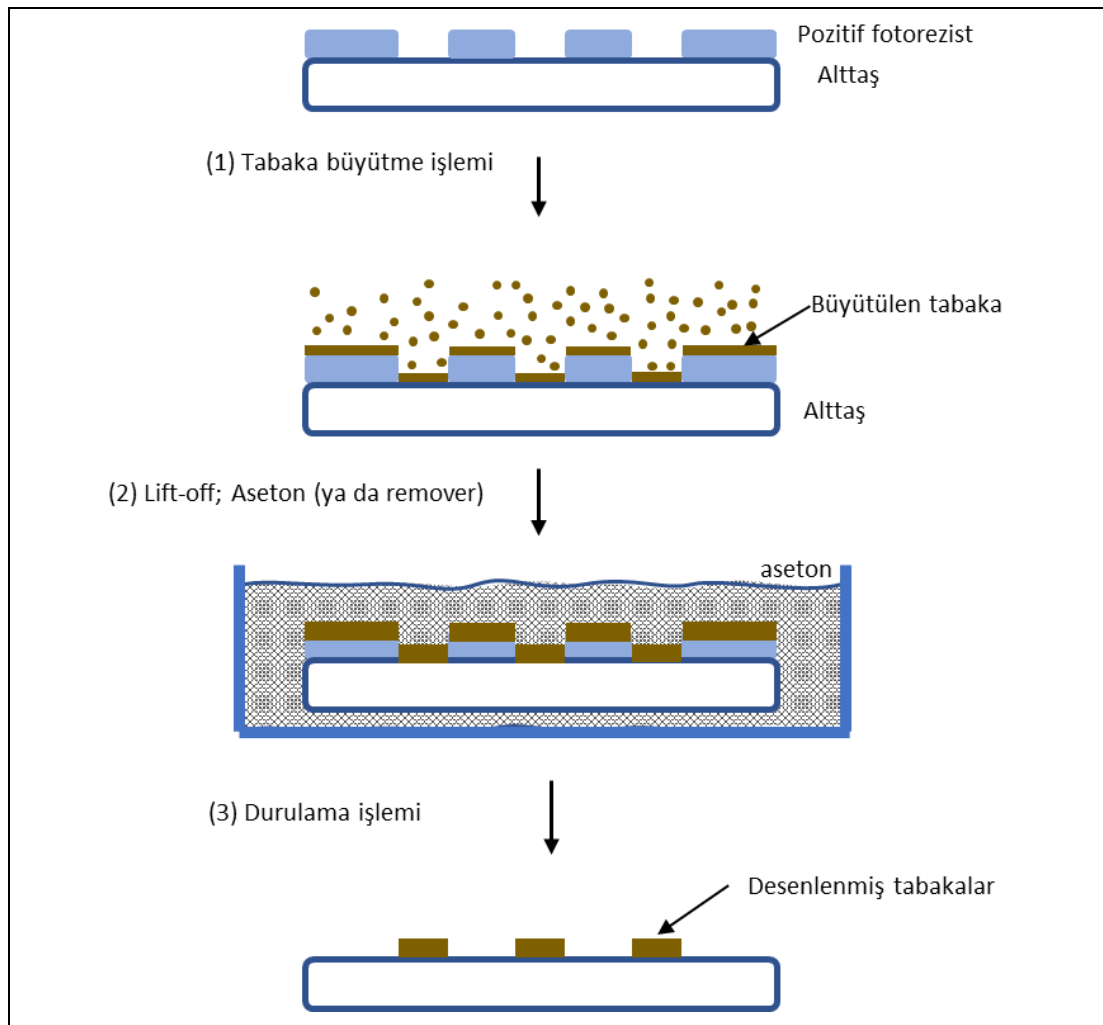


Şekil 3.11: a) SU-8 (3050) kullanılarak SiO₂ altaş üzerine üretilmiş PDMS kalıbının bir fotoğrafı. b) Hazırlanan PDMS damganın bir fotoğrafı. c) Baskı işleminin bir fotoğrafı.

3.1.4. Söküp Alma (Lift-off) Yöntemi

Buraya kadar anlatılan litografi yöntemlerinde altaş üzerindeki fotorezist tabakasının işlenerek, fotorezistin desenlenmesi tarif edilmiştir. Lift-off yöntemi sayesinde ise altaş üzerine büyütülen tabakaların desenlenmesi sağlanmaktadır [123–

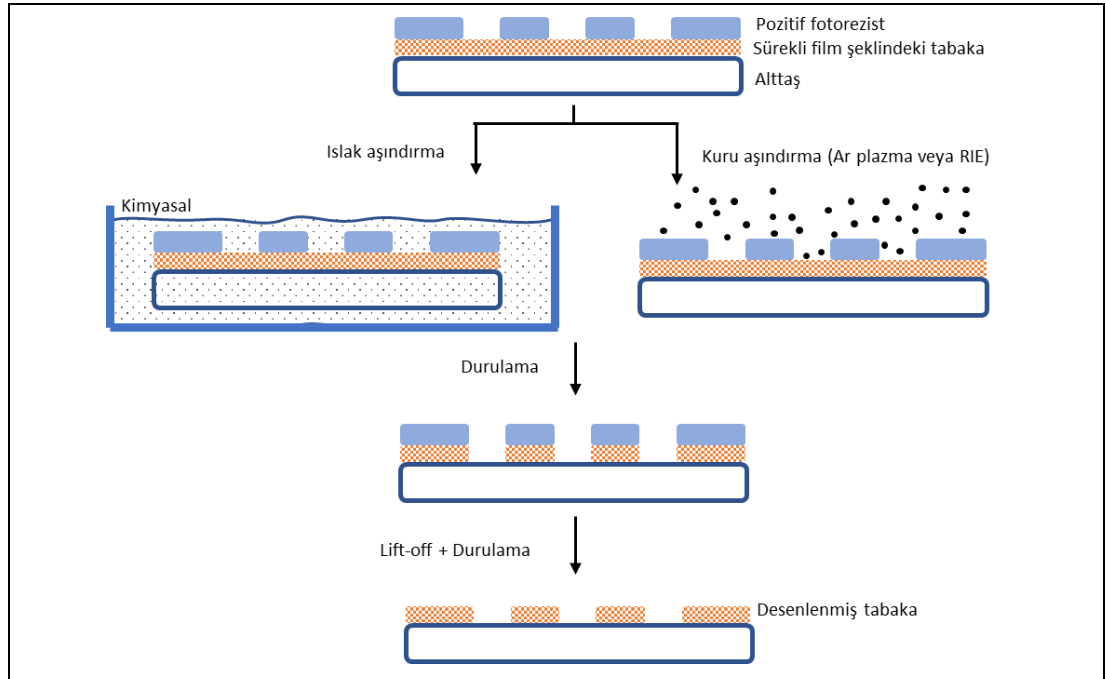
125]. Pozitif fotorezistler aseton içerisinde bırakıldığında hızlıca çözünmektedir. Pozitif fotorezist ile desen oluşturulmuş bir alttaş üzerine herhangi bir büyütme tekniği ile tabakalar büyütüldüğünde, Şekil 3.12’de gösterildiği gibi çukurlar dâhil alttaş ve fotorezistin üzerindeki her yer kaplanmaktadır. Büyütme işleminden sonra aseton veya “remover” içerisinde bekletilen alttaşın üzerindeki fotorezistli bölge tamamen çözünüp kalkmaktadır. Dolayısıyla alttaş üzerinde yalnızca daha önceden çukur olan bölgelerde birikmiş tabakalar kalmaktadır. Bu sayede desenli tabakalar üretilebileceği gibi, çok katlı litografi de yapılabilir. Lift-off yöntemi çok kullanışlı olmasına rağmen, pozitif fotorezist malzemelerinin 120° C sıcaklığa kadar dayanıyor olması üretim için kısıtlayıcı bir etmendir. Ayrıca, lift-off işlemi aseton veya remover ile yapıldığından, büyütme işlemleri ile kaplanan malzemelerin bu iki kimyasaldan etkilenmemesi gerekmektedir.



Şekil 3.12: Lift-off yöntemi kullanılarak yapılan litografi işlemlerinin şematik bir gösterimi.

3.1.5. Aşındırma Yöntemi

Aşındırma yöntemleriyle yapılan litografi işlemlerinde ise alttaşın kendisi veya alttaş üzerindeki başka bir tabaka aşındırılarak desen oluşturulabilir. Bunu yapmak için yukarıda bahsedilen litografi yöntemlerinden bir tanesi ile, aşındırılacak olan sürekli film şeklindeki tabaka üzerinde, fotorezist tabakadan bir desen oluşturulur. Bu fotorezist tabakası aşındırma sırasında desenli bir maske görevi görmektedir. Aşındırma işlemi Şekil 3.13'te gösterildiği gibi kimyasal olarak [126] veya argon plazma [127] ile yapılabileceği gibi reaktif iyon aşındırma (RIE: reactive ion etching) yöntemi [128,129] ile de yapılabilmektedir. Kimyasallarla yapılan aşındırma işlemine ıslak aşındırma (wet etching), argon plazma ve RIE kullanılarak yapılan aşındırma işlemine kuru aşındırma (dry etching) denir. Ayrıca, aşınacak bölgelerin yüzeylerinde hiçbir fotorezist kalıntısının olmaması kaliteli bir aşındırma için önemlidir. Aşındırma metodu, bütün tabakalar hazırlandıktan sonra yapıldığı için örnek üretiminde bir kısıtlama getirmemektedir. Ek olarak, ıslak aşındırma sırasında asit gibi kimyasallar kullanıldığı için kuru aşındırmaya göre daha tehlikelidir ve aşındırma işlemleri için her malzemenin kendine özgü kimyasal aşındırıcısının kullanılması gerekmektedir. Burada kullanılan kimyasal malzemelerin maskeleyen yapan fotorezist tabakasına hasar vermemesi de çok önemlidir.

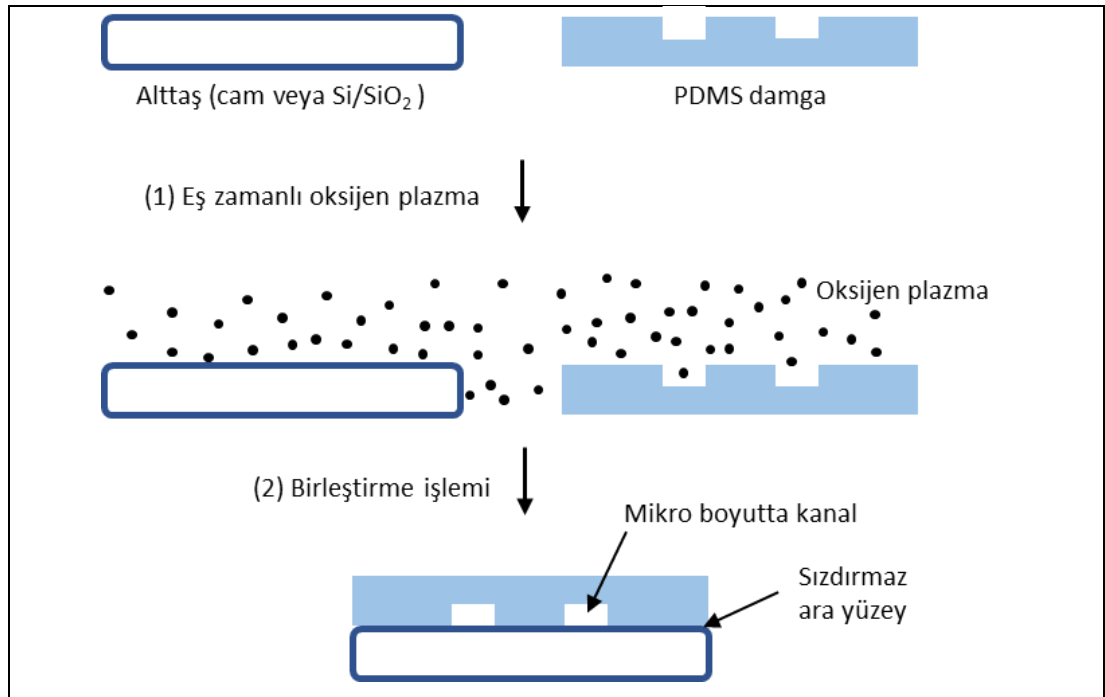


Şekil 3.13: Aşındırma yöntemi kullanılarak yapılan litografi işlemleri.

3.2. Mikroakışkan Kanal Üretimi

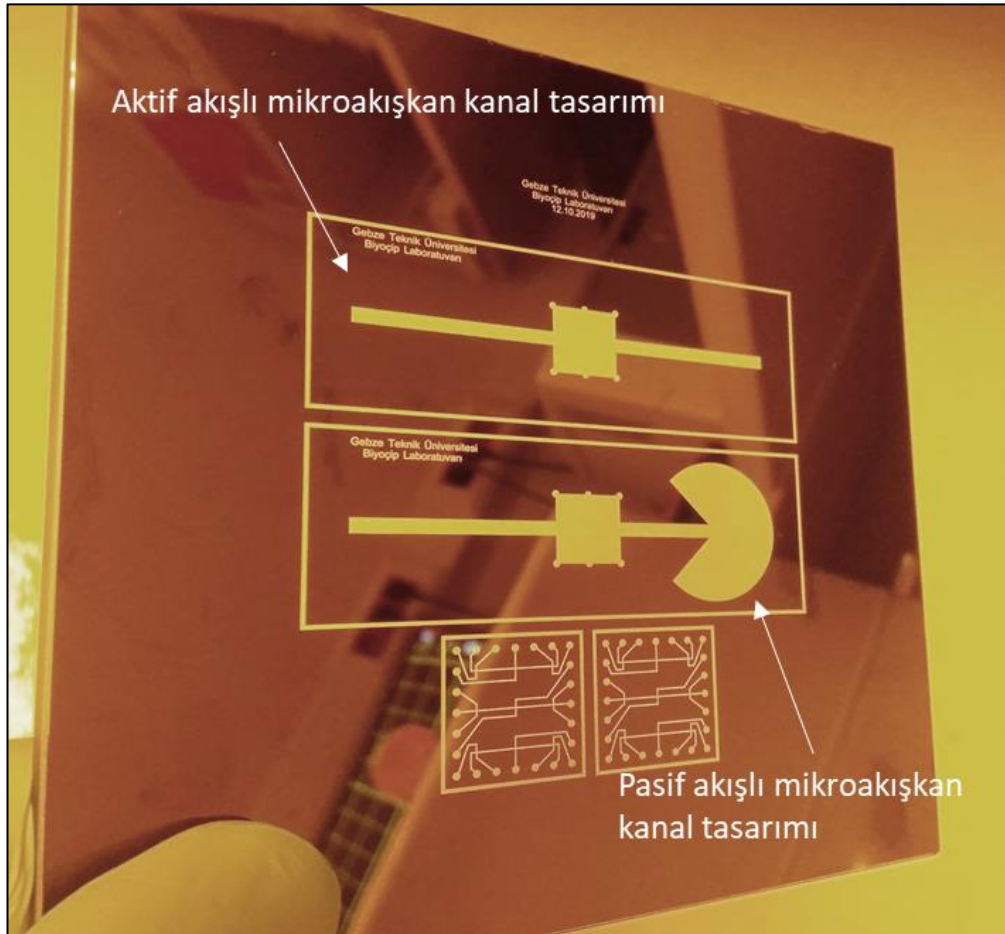
Mikroakışkan kanallar PHE sensörlerinin biyolojik ve çip üstü manyetometre gibi uygulamalarında kullanılmaktadır. Mikroakışkan kanal üretmenin birçok yöntemi vardır, fakat burada yalnızca PDMS kullanılarak üretilen mikro kanallardan bahsedilmiştir.

Baskı yöntemiyle yapılan litografi işlemlerinde, PDMS malzemesinin şekillendirilerek damga haline getirilmesi başlık 3.1.3'te tarif edilmişti. PDMS malzemesi üzerindeki çukurlar bir kanal şeklinde tasarlanıp, cam veya Si/SiO₂ alttaşlar üzerine baskı yapar gibi kapatıldığında, PDMS üzerindeki çukurlar mikro boyutta bir kanal oluşturmaktadır [130–135]. Bu kanalların sızdırmaz olması çok önemlidir. Bunu sağlamak için birleşecek olan alttaş ve PDMS yüzeylerin eş zamanlı olarak oksijen plazma içerisinde bekletilmesi gerekmektedir. Eş zamanlı olarak oksijen plazmaya maruz kalan PDMS ve alttaş yüzeylerindeki bazı atomlar bağ yapmaya müsait hale gelmektedir. Bu sayede oksijen plazmaya maruz kalan PDMS ve alttaş yüzeyleri Şekil 3.14'te gösterildiği gibi bir araya getirildiğinde artık geri dönüşü olmayan bir bağlanma oluşmaktadır. Bu kuvvetli bağlanma sayesinde PDMS ve alttaş arasında sızdırmaz bir ara yüzey oluşmaktadır. Buradaki kanal yüksekliği, sıvı PDMS malzemesinin döküldüğü kalıpta kullanılan negatif fotorezistin kalınlığına bağlıdır.



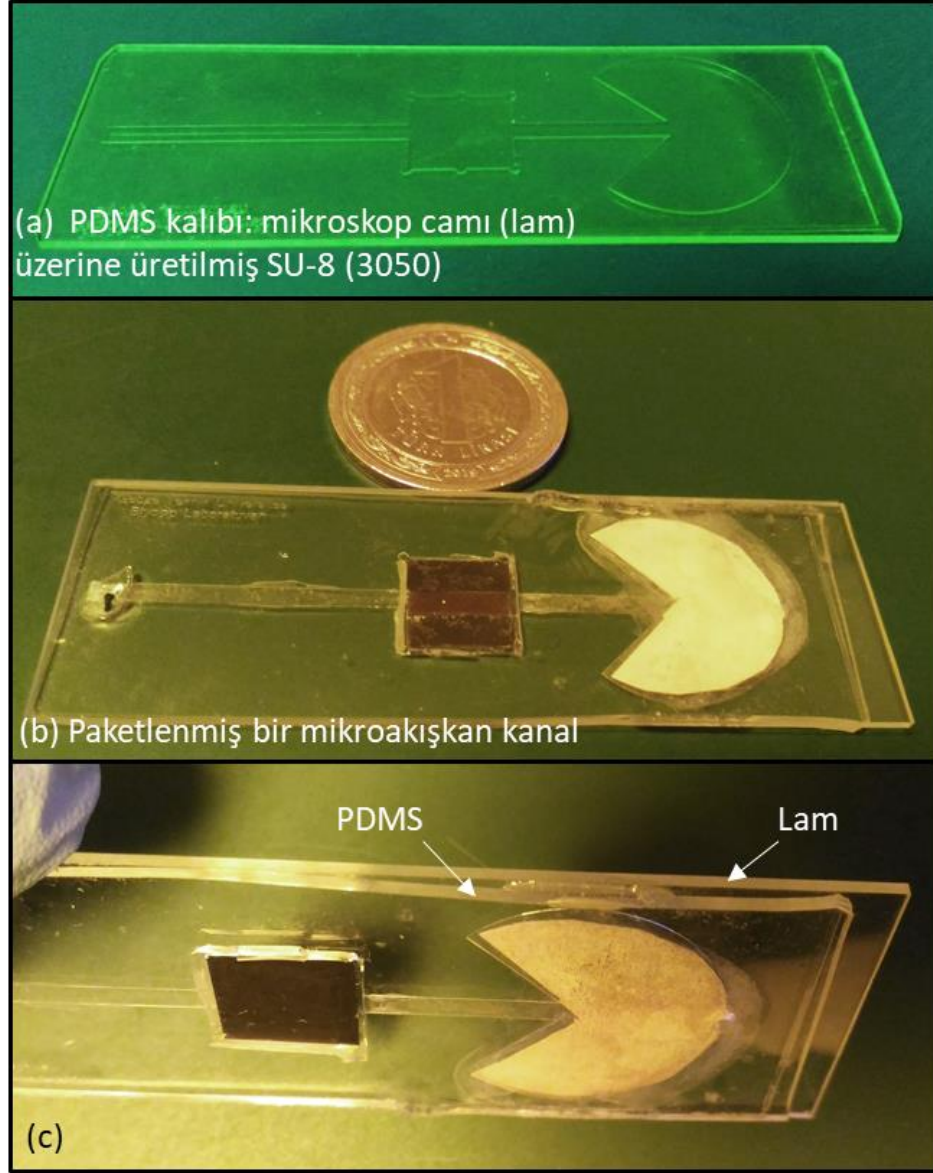
Şekil 3.14: Mikro akışkan kanal paketleme işlemi.

Mikroakışkan kanal üretmek için tasarlanmış bir fotomaskenin fotoğrafı Şekil 3.15'te sunulmuştur. Fotomaske ve üretimi ile ilgili detaylar burada verilmeyip, başlık 4.1.1'de anlatılmıştır. Fotoğrafta verilen fotomaske üzerinde, aktif ve pasif akışlı olmak üzere iki farklı mikroakışkan kanal tasarımı bulunmaktadır. Aktif akışlı mikrokanalların içerisinden geçirilen sıvının akışı bir mikro pompa yardımıyla sağlanırken, pasif akışlı mikrokanallarda sıvı akışı emici bir malzeme ile sağlanmaktadır. Pasif akışlı mikrokanallarda sabit bir sıvı akışı sağlamak için emici malzemenin şekli de önemlidir. Fotoğrafta verilen tasarımda sıvıyı emen malzeme için 270° yelpaze (fan) geometrisine sahip bir bölge bulunmaktadır. 270° yelpaze (fan) şeklindeki emici malzemenin mikroakışkan sistemlerde kullanımı ilk defa 2010 yılında Mendez vd. tarafından gösterilmiştir [150]. Daha sonra farklı grupların mikroakışkan sistemlerinde de 270° yelpaze (fan) şeklindeki emici malzeme kullanılmıştır [151,152]. Ayrıca, kanallar üzerinde çiplerin yerleştirilebilmesi için 1×1 cm² ebatlarında kare bir bölge de bulunmaktadır.



Şekil 3.15: Mikroakışkan kanal üretmek için tasarlanmış bir fotomaskenin fotoğrafı.

Fotomaske üzerindeki pasif akışlı mikroakışkan kanal tasarımı ve SU-8 (3050) negatif fotorezist kullanılarak bir mikroskop camı (lam: 26mm×76 mm) üzerine üretilen PDMS kalıbının bir fotoğrafı Şekil 3.16.a)'da gösterilmiştir. PDMS sıvısı ise başlık 3.1.3'te anlatıldığı gibi hazırlanarak kalıp üzerine dökülüp katılaştırılmıştır. Bu sayede PDMS malzemesinin bir yüzeyinde pasif akışlı mikroakışkan kanal geometrisine sahip çukurlar oluşturulmuştur. Kalıptan sökülen PDMS üzerindeki çip bölgesi maket bıçağı ile kesilip alınmıştır. Ardından, aynı ebatlardaki temiz bir mikroskop camı ve hazırlanan PDMS eş zamanlı olarak oksijen plazma temizliğine tâbi tutulmuş ve oksijen plazmaya maruz kalan yüzeyler hızlıca birleştirilmiştir. Bu sayede Şekil 3.16.b)'de gösterilen paketleme işlemi gerçekleştirilmiştir. 1×1 cm² büyüklüğündeki SiO₂ çip ise kanalla aynı yükseklikteki (50 µm) çift taraflı bant (double sided adhesive) kullanılarak yerleştirilmiştir. Çift taraflı bant, SiO₂ çipin ortasında boşluk bırakılacak şekilde yapıştırılmıştır. Bu sayede çipin cam yüzeyinden 50 µm kadar yükseltilmesi sağlanmış ve kanal içerisinde bir süreklilik sağlanmıştır. Paketlenen mikroakışkan kanalın sol tarafında ise sıvının kanala gönderilebilmesi için bir delik açılmıştır. Pasif akışlı mikroakışkan kanal tasarımında, sıvının kanal içerisinden ilerleyip emici malzemeye ulaşabilmesi için öncelikle sıvıya bir miktar basınç uygulanması gerekmektedir. Sıvı emici malzemeye ulaştıktan sonra basınç uygulanma işlemi durdurulup, kanaldaki sabit debili sıvı akışı emici malzeme sayesinde kendiliğinden sağlanmaktadır. Ayrıca, PDMS malzemesinin ve camın görünür ışık altında şeffaf olmaları çipin mikroskop altında incelenmesine de imkân sağlamaktadır. Pasif akışlı mikroakışkan kanalın yandan bir görünümü ise Şekil 3.16.c)'de verilmiştir. Burada kullanılan PDMS malzemesinin çalışmaya uygun bir kalınlıkta olması çok önemlidir. Çok ince kullanılan PDMS malzemelerinde akışı sağlamak için kullanılan parçaları PDMS üzerine tutturmak güç hale gelirken, çok kalın PDMS kullanılarak hazırlanan kanalların mikroskop altında incelenmesi zorlaşmaktadır.

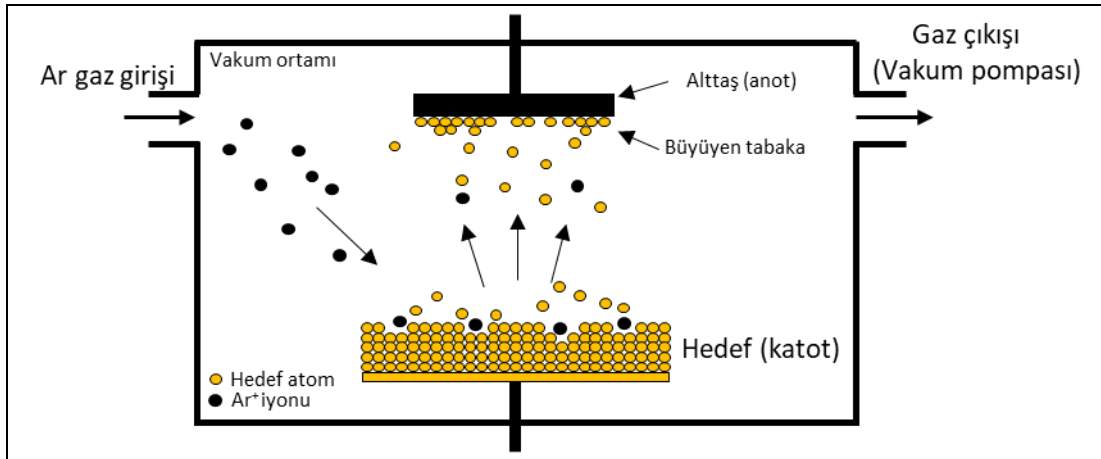


Şekil 3.16: a) Pasif akışlı mikroakışkan kanal için mikroskop camı (lam) üzerine üretilmiş PDMS kalıbının bir fotoğrafı. b) Mikroskop camı kullanılarak paketlenmiş pasif akışlı bir mikroakışkan kanalın fotoğrafı. c) Mikroakışkan kanalın yandan bir görünümü.

3.3. Sıçratma (Sputtering) Tekniği ile İnce Film Hazırlama

Sıçratma tekniği, bir alttaş (cam, metal, Si/SiO₂, ...) yüzeyine mikro, nano ve angström kalınlıklarda metal, yarı-metal ve seramik gibi malzemelerin kaplanmasına imkân sağlamaktadır [136]. Basit bir sıçratma sistemi Şekil 3.17’de şematik olarak gösterilmiştir. Sistem, bir vakum odasında bulunan hedef malzeme ve örneğin büyütüleceği alttaştan ibarettir. Büyütme işlemine başlamadan önce oda 10⁻⁷ mbar değerinden daha iyi bir vakuma alınır ve içeriye sabit bir debiyle Ar gazı gönderilir.

Ar gazı oda içerisinde iyonlaştırılarak Ar^+ iyonu haline getirilip hedef malzemeye yüksek bir hızla çarptırılır. Ar gazını iyonlaştırmak için, Ar gazı bir filaman ile ısıtılabilir veya hedef malzemeye negatif voltaj uygulanıp, malzemeyi saran tabanca duvarlarına pozitif voltaj uygulanarak vakum içerisinde yüksek bir elektrik alan oluşturularak da iyonlaştırma işlemi yapılabilir [137]. Ayrıca, büyütmenin yapılacağı alttaşa da pozitif voltaj uygulanır. Hedefe çarpan Ar^+ iyonu hedef yüzeyinden atomlar veya parça parça madde kopartır. Kopan parçalar vakum içerisinde hızla dağılmaya başlar ve bazıları da alttaş yüzeyine tutunur. Bu sayede alttaş yüzeyinde bir kaplama oluşturulur. Kaplanan tabancanın büyüme hızı hedef malzeme ve alttaş cinsine, hedef malzeme ve alttaş arasındaki mesafeye, bunlar arasında uygulanan elektrik alanın büyüklüğüne, vakum şartlarına ve Ar basıncına bağlıdır. Sıçratma tekniği hakkında daha detaylı bilgi edinmek için kaynaklara bakılmalıdır [44,136].

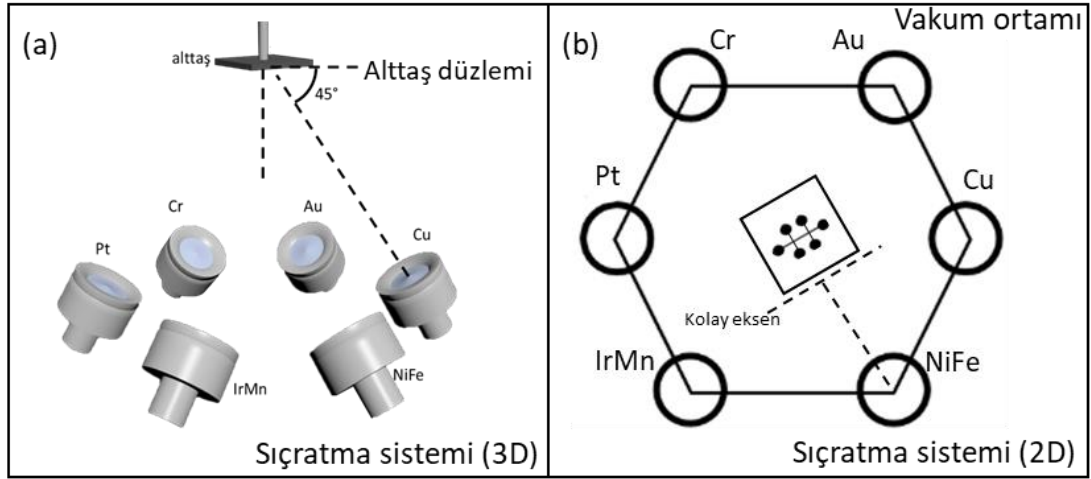


Şekil 3.17: Sıçratma tekniğinin şematik bir gösterimi.

Gebze Teknik Üniversitesi, Nanoteknoloji ve Spintronik Araştırma Merkezi'nde (NASAM) bulunan sıçratma sisteminin gerçek bir fotoğrafı Şekil 3.18.a)'da verilmiştir. Sıçratma sistemini vakuma almak için ve vakum değerini belirlemek için bir dizi pompa ve sensör düzeneği kurulmuştur. Ayrıca her bir tabancaya ait güç kaynağı ve soğutma sistemi vardır. Bunların hepsi bir bilgisayar ile kontrol edilmektedir. Şekil 3.18.b)'de sıçratma sisteminin içerisindeki 6 adet tabanca gösterilmiştir. Buradaki tabancalar içerisinde Şekil 3.18.c)'de gösterilen 2 inç çapında, birkaç mm kalınlığında ve %99.99 saflıkta hedef malzemeler yerleştirilmektedir. Tabancaların üzerindeki kapaklar motorize bir sistemle hareket ettirilebilmektedir. Bu kapaklar sayesinde, bir

Figure 1 consists of three panels. Panel (a) shows a large, complex industrial machine with various components, including a large cylindrical chamber, a motor, and a control panel. Panel (b) is a close-up view of the machine's internal components, showing several small, circular, metallic samples. Panel (c) is a close-up view of the machine's internal components, showing a large, irregular, metallic sample and a small, circular, metallic sample.

Sıçratma sistemi içerisinde bulunan 6 adet tabanca Şekil 3.19.a) gösterildiği gibi eş odaklı olup alttaş düzlemine 45° açıyla bakmaktadır. Böyle bir sistemde, alttaş üzerine büyütülen FM malzemelerin kolay ekseni Şekil 3.19.b)’de gösterildiği gibi hedeften çıkan plazma akısına dik yönde oluşmaktadır. Buna büyüme yönüne bağlı oluşan anizotropi (growth induced anisotropy) veya gölgeme etkisi (shadowing effect) denmektedir [138]. Bu tez çalışmasında, sensörleri üretme işlemleri sırasında kullanılan hedef malzemelerin yerleşimi ve sıçratma sistemine yerleştirilen SiO_2 alttaşın pozisyonları Şekil 3.19.b)’de gösterildiği gibi sabitlenmiştir.



Şekil 3.19: Sıçratma sisteminin a) 3-boyutta ve b) 2-boyutta şematik birer gösterimi.

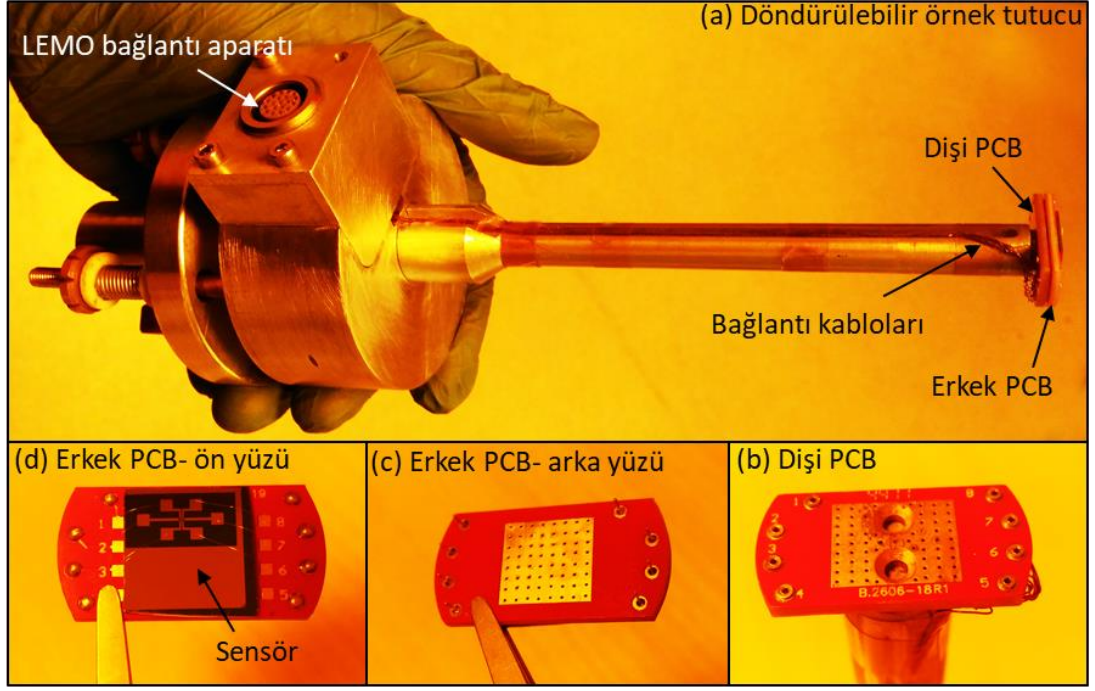
Burada hedef malzemelerinden çıkan plazma akısı alttaş düzlemine 45° açı ile gelmektedir. Alttaş üzerine büyütülen NiFe hedef malzemesinin kolay eksenini plazma akısına dik yönde oluşturmaktadır.

3.4. Manyetodirenç Ölçüm Sistemi

Açıya bağlı manyetodirenç ölçümü deneyini gerçekleştirebilmek için, kendi eksenini etrafında döndürülebilen bir örnek tutucu tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen örnek tutucu GTÜ Fizik Bölümü, MOKE Laboratuvarı'nda bulunan manyetooptik Kerr etkisi ve elektriksel transport ölçüm sistemiyle [42,139,140] uyumlu bir şekilde tasarlanmış ve sisteme eklenmiştir. Ayrıca, ölçümün otomasyonu için bir de bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır. Bütün bu işlemler ayrı ayrı başlıklarda aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

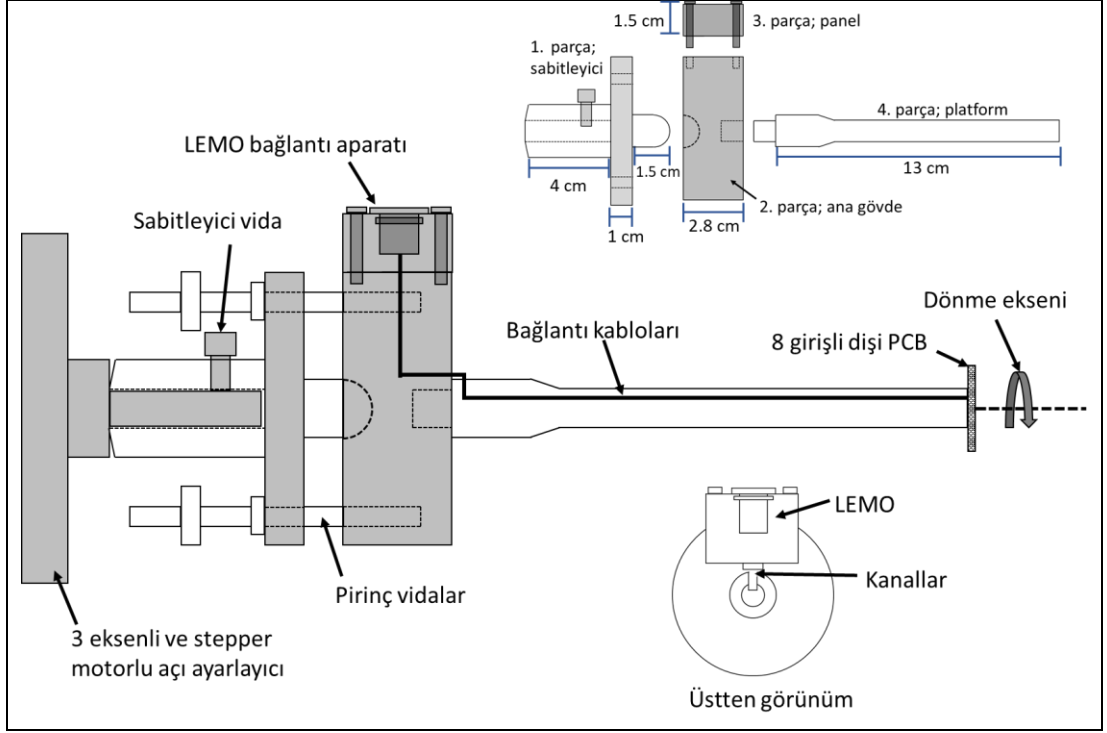
3.4.1 Döndürülebilir Örnek Tutucusunun Tasarımı

Üretilen örnek tutucunun gerçek fotoğrafı Şekil 3.20.a)'da gösterilmiştir. Örnek tutucu üzerinde ise Şekil 3.20.b)'de gösterilen dişi bir PCB bulunmaktadır. Dişi PCB ve LEMO bağlantı aparatı arasında dişi emaye kaplı bakır kablolar kullanılarak bağlantılar yapılmıştır. Dişi PCB üzerindeki her bir giriş, LEMO bağlantı aparatı üzerindeki bir girişe denk gelmektedir. Şekil 3.20.c) ve d)'de gösterilen, dişi PCB ile uyumlu bir erkek PCB ise sensörleri taşıma görevi görmektedir. Bu sayede farklı sensörlerin örnek tutucuya çok kolay bir şekilde yerleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Sensörler erkek bir PCB üzerine çift taraflı bantla yapıştırılıp, PCB ve sensör arasındaki bağlantılar bir tel bağlama cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.20: a) Döndürülebilir örnek tutucunun gerçek fotoğrafı. b) Örnek tutucunun uç tarafına sabitlenmiş dişi PCB. c) Dişi PCB ile uyumlu erkek PCB'nin arka ve (d) ön yüzü.

Döndürülebilir örnek tutucunun tasarımı Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Örnek tutucuyu üretmek için manyetik olmayan 4 parça alüminyum profil ve pirinç vidalar kullanılmıştır. Birinci parça, 3 eksenle hareket edebilen ve adım motor ile döndürülebilen bir platforma sabitlenmek üzere tasarlanmış bir sabitleyicidir. İkinci parça, diğer parçaları bir arada tutan gövdeyi oluşturmaktadır. Üçüncü parça, LEMO bağlantı aparatını ve sensörün elektriksel bağlantılarını sabitlemek için bir paneldir. Dördüncü parça, sensörü tutan bir platformdur. Sekiz girişi olan dişi bir PCB (printed circuit board) dört numaralı parçanın ucuna sabitlenmiştir. PCB üzerindeki her bir giriş için bağlantılar yapıp kablolar üçüncü ve dördüncü parçalar içerisindeki kanallardan LEMO bağlantı aparatının girişlerine bağlanmıştır. Bu sayede, bütün bağlantılar sabitlenmiş olup örnek tutucu üzerinde hareketsiz olması sağlanmıştır. Örnek tutucunun dönme ve x, y, z eksenlerindeki hareketini, daha önceden MOKE sisteminde kurulmuş olan, 3 eksenle hareket edebilen ve adım motoru bulunan manuel ya da bilgisayar kontrollü açılı ayarlayıcı mekanik sistem sağlamaktadır.

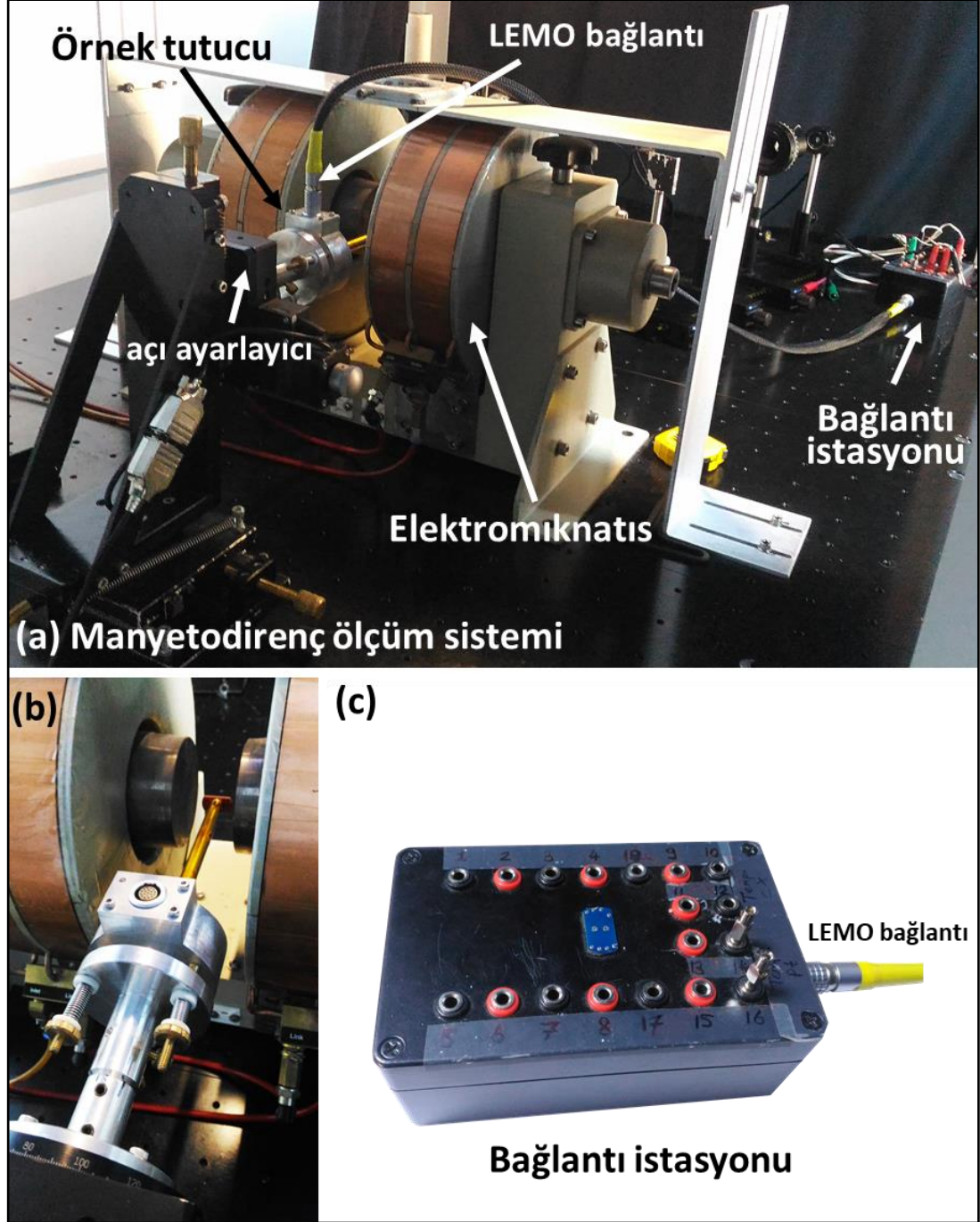


Şekil 3.21: Döndürülebilir örnek tutucunun tasarımı.

3.4.2. Döndürülebilir Örnek Tutucusunun Manyetodirenç Ölçüm Sistemine Eklenmesi

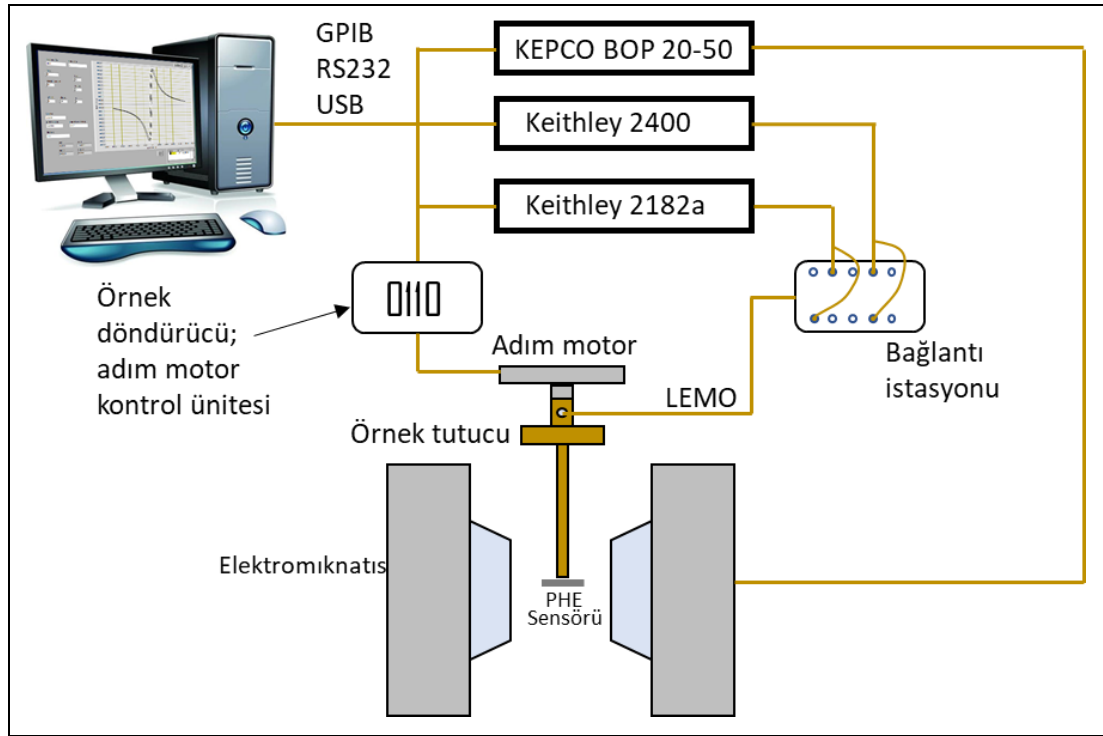
GTÜ MOKE laboratuvarında bulunan manyetodirenç ölçüm sisteminin fotoğrafı Şekil 3.22.a)'da gösterilmiştir [42,139,140]. Burada örnek tutucu, sistemde bulunan 3 eksenli ve adım motorlu açı ayarlayıcıya monte edilmiştir. Bu sayede, örnek tutucunun üç yöne de hareket edebilmektedir. Örnek tutucunun uç tarafı da Şekil 3.22.b)'de gösterildiği gibi elektromıknatısın kutuplarının tam ortasına kadar erişmektedir. Bu sayede örnek tutucunun uç tarafına yerleştirilen sensörler manyetik alan içerisinde döndürülebildiğinden, açığa bağlı manyetodirenç ölçümü deneyini gerçekleştirmek mümkün olmuştur. Örnek tutucunun tasarımı Longitudinal-MOKE ölçümlerine de olanak sağladığından, sensörün açısını bozmadan, manyetodirenç ölçümünün yapıldığı aynı açıda mıknatıslanma ölçümleri de yapılabilmektedir. Sensörden okunan direnç değeri mıknatıslanmanın bir fonksiyonu olduğundan, aynı açıda ölçülmüş mıknatıslanma ve manyetodirenç eğrilerinin birlikte yorumlanması çok önemlidir. Sensör üzerine uygulanan akım ve sensörden okunan voltaj ise örnek tutucu ile bağlantı istasyonu arasındaki LEMO bağlantı aracılığıyla yapılmaktadır. Bağlantı istasyonu Şekil 3.22.c)'de gösterilmiştir. Bağlantı istasyonu üzerindeki ilk sekiz giriş

PCB üzerindeki bağlantı noktalarını temsil etmektedir. Bu sayede hızlı bir şekilde hangi bağlantılardan akım uygulanıp hangi bağlantılardan voltaj okunacağı ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.22: a) Manyetodirenç ölçüm sisteminin gerçek fotoğrafı. b) Döndürülebilir örnek tutucunun elektromıknatısların ortasına yerleştirilmiş görüntüsü. c) Bağlantı istasyonunun detaylı görünümü.

Manyetodirenç ölçüm sisteminin şematik gösterimi ise Şekil 3.23'te verilmiştir. Sistemdeki bütün cihazlar bir bilgisayar yazılımıyla kontrol edilmektedir [42,139,140]. Sensör üzerine uygulanan manyetik alanın şiddeti, KEPKO BOP 20V-50A akım kaynağı tarafından elektromıknatısa uygulanan akım ile ayarlanmaktadır. Manyetodirenç ölçümünü gerçekleştirmek için akım kaynağı ve nano-voltmetreden çıkan kablolar bağlantı istasyonu üzerindeki ilgili girişlere takılmıştır. Ölçümün yapıldığı açıda ise bilgisayar yazılımından girilen değere göre adım motor kontrol ünitesi tarafından ayarlanmaktadır. Burada, manyetik alan altındaki sensöre KEITHLEY 2400 sourcemeter ile sabit akım uygulanıp, KEITHLEY 2182a nanovoltmeter ile de sensör voltajı kaydedilmiştir.



Şekil 3.23: Manyetodirenç ölçüm sisteminin şematik gösterimi. KEPKO BOP 20-50 güç kaynağı elektromıknatısa uygulanan akımı kontrol ederken, Keithley 2400 cihazıyla sensöre sabit akım uygulanıp, Keithley 2182a cihazı ile de sensörün manyetik alana karşılık ürettiği voltaj ölçülmektedir.

3.4.3. Manyetodirenç Ölçüm Sistemi Yazılımı

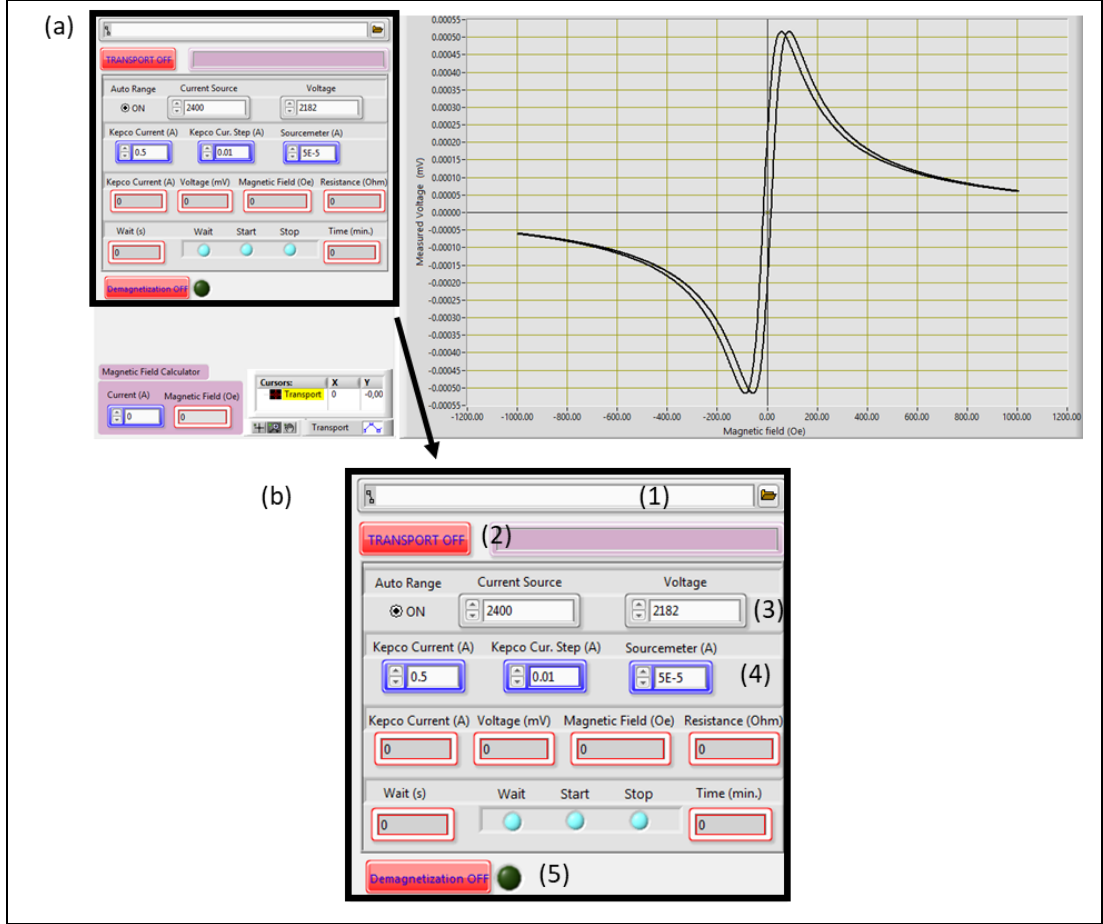
Manyetodirenç ölçüm sisteminde bulunan her bir cihaz Dr. Erdem Demirci tarafından, labview ile yazılmış bir bilgisayar programı ile kontrol edilmektedir [42]. Bu bilgisayar programının içerisinde MOKE ölçümü, elektronik transport ölçümü,

ölçüm açısını ayarlama ve ölçüm sıcaklığını ayarlama seçenekleri mevcuttur. Bu başlık altında yalnızca elektronik transport ölçümü seçenekleri anlatılmıştır. Sistemin diğer kabiliyetleri ve kullanımı için ilgili kaynaklara bakılmalıdır [42,139,140]. Manyetodirenç ölçümü iki türlü gerçekleştirilmiştir. Birinci ölçüm; değişken manyetik alan, sabit akım, sabit açı ve sabit sıcaklık için yapılmıştır. İkinci ölçümde ise sensörün gerçek uygulamalardaki davranışını anlamak için zamana bağlı PHE sinyali kaydedilmiştir.

Birinci ölçüm türü için hazırlanan bilgisayar programının ekran görüntüsü

Şekil 3.24.a)'da sunulmuştur. Programın sol tarafında deneyin yapılacağı parametreler bulunurken, sağ tarafında manyetik alana karşılık ölçülen voltaj değerlerinin grafiksel gösterimi bulunmaktadır. Sol tarafta kare çerçeveye alınmış bölge

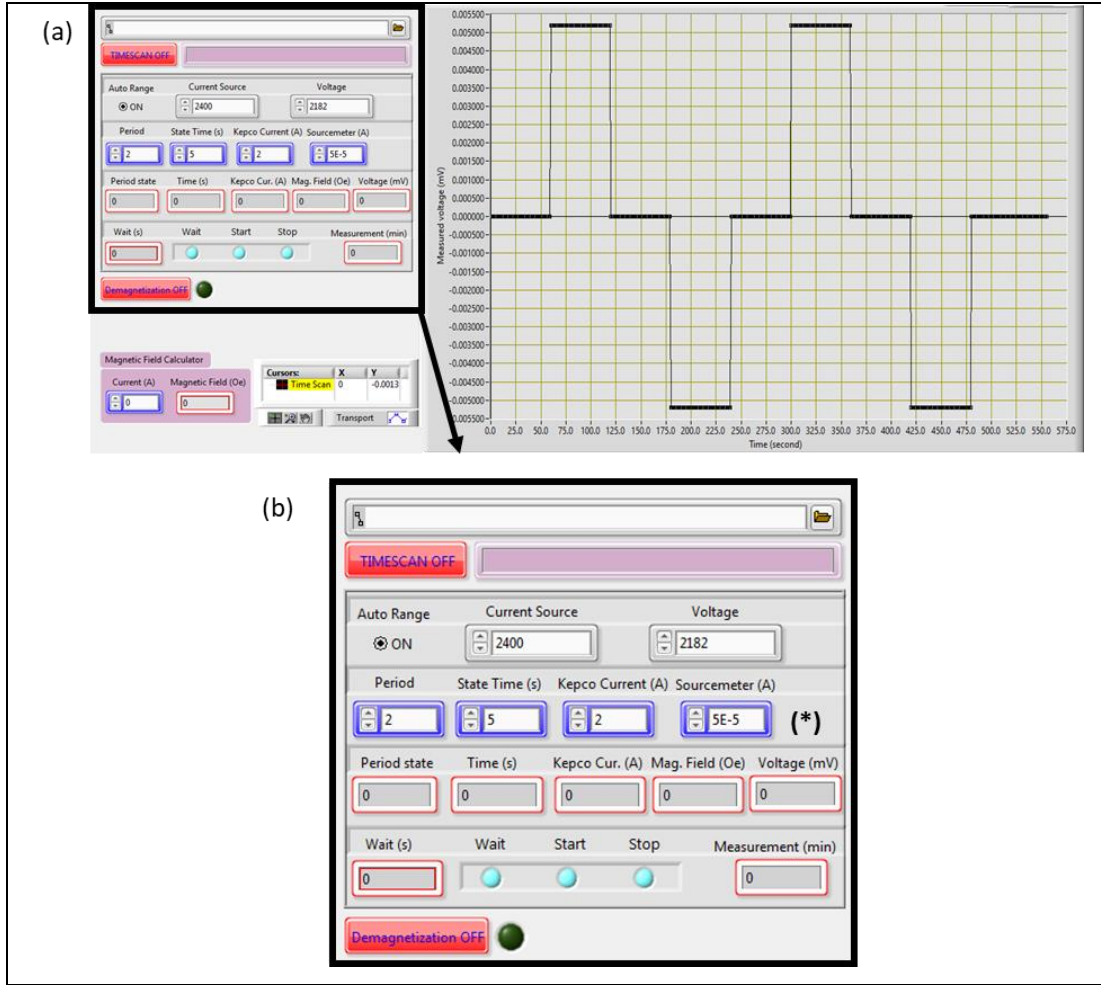
Şekil 3.24.b)'de büyütülerek gösterilmiştir. Burada (1) ile gösterilen kısım, ölçüm dosyasının adını ve dosyanın kaydedileceği klasörü seçmeye yarar. (2) ile gösterilen kısım, ölçümü başlatmak ve durdurmak için bir ON/OFF düğmesidir. (3) ile gösterilen kısım, sensöre uygulanan akım kaynağını ve ölçümü yapan voltmetreyi seçmek için bir açılır penceredir. (4) ile gösterilen kısım, manyetik alanın hangi aralıkta hangi adımlarla değişeceğini ayarlamak için KEPCO güç kaynağına ve sensöre uygulanan akım miktarını ayarlamak için KEITHLEY 2400 akım kaynağına komutlar gönderen birer girdi ekranlarıdır. (5) ile gösterilen kısımdaki düğme, ölçümün başında elektromıknatısın metal kutuplarında daha önceki ölçümlerden kalan, kalıntı mıknatıslanmayı azaltması için bir demanyetizasyon seçeneğidir. Diğer pencereler ise ölçüm sırasında cihazların davranışını takip etmek için birer gösterge ve ölçüm süresi için bilgilendirme pencereleridir. Bu ölçüm türünde manyetik alan önce pozitif yöndeki en yüksek değerinden başlayıp, girilen adım değeri ile negatif yöndeki en yüksek manyetik alan değerine kadar gitmektedir. Ardından, negatif yöndeki en yüksek manyetik alan değerinden başlayıp, aynı adım değerleriyle pozitif yöndeki en yüksek manyetik alan değerine ulaşmaktadır. Bütün bu süreç boyunca her bir manyetik alana karşılık sensör voltajları kaydedilmektedir. Bu manyetik alan çevrimi sayesinde sensör malzemelerinin histerezis özelliklerini inceleme imkânı sağlanmıştır.



Şekil 3.24: Değişken manyetik alan altında manyetodirenç ölçümü yapmak için hazırlanmış labview programının ekran görüntüsü.

Zamana bağlı manyetodirenç ölçümü için hazırlanan bilgisayar programının ekran görüntüsü Şekil 3.25.a)'da verilmiştir. Yine ekran görüntüsünün sol tarafında deneyle ilgili parametreler varken sağ tarafta ölçümün gösterildiği zamana karşılık ve uygulanan manyetik alana karşılık ölçülen voltaj grafiği bulunmaktadır. Parametre ekranı daha önce gösterilene çok benzeyip, yalnızca (*) ile gösterilen kısım farklıdır. Ayrıca program kendi içerisinde dört adımlık bir döngüden oluşmaktadır. Programın ilk adımında, sıfır manyetik alan için “State Time” olarak belirlenen süre boyunca voltaj ölçümü yapılmaktadır. İkinci adım olarak, yine “State Time” süresince artı yönde “Kepco Current” miktarınca elektromıknatısa akım, dolayısıyla sensör üzerine manyetik alan uygulanmaktadır. Üçüncü adımda, yine “State Time” süresince sıfır manyetik alanda ölçüm yapılmaktadır. Dördüncü adımda, “Kepco Current” miktarınca ve “State Time” süresince eksi yönde manyetik alan uygulanmaktadır. Bütün bu dört adım 1 periyodu oluşturmaktadır. Diğer bir ifade ile “Period” penceresi bu dört adımlık

işlemin kaç defa tekrar edeceğini ayarlamak için bir girdi ekranıdır. Yapılan bu ölçüm sayesinde, bilinen bir manyetik alan şiddeti ve yönüne karşılık sensörün nasıl ve ne kadar sürede tepki vereceği incelenebilmektedir. Bu işlemler gerçek uygulamalar açısından çok önemlidir. Ayrıca, zamana bağlı ölçümler sayesinde, sensörlerin ölçüm yapılan sıcaklıktaki sinyal/gürültü oranlarını tespit etme imkânı da sağlanmaktadır.



Şekil 3.25: Zamana bağlı ve sabit manyetik alan altında manyetodirenç ölçümü yapmak için hazırlanmış labview programının ekran görüntüsü.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında üç tabakalı PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetleri için üç farklı örnek serisi incelenmiştir. Birinci örnek serisi için literatürde ilk defa üç tabakalı NiFe(10)/Pt(t_{Pt})/IrMn(8) (nm) (t_{Pt} :0-1nm) yapısındaki PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetleri aradaki Pt tabakasının kalınlığının bir fonksiyonu olarak araştırılırken, ikinci örnek serisi için yine literatürde ilk defa üç tabakalı NiFe(10)/Cr(t_{Cr})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr} :0-1nm) yapısındaki PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetleri aradaki Cr tabakasının kalınlığının bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Üçüncü örnek serisinde ise üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Cu, Pt, Cr) yapısındaki PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetleri aynı kalınlıktaki ve farklı cinsteki ara tabakaların bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Bu bölümde öncelikle, her bir sensörü üretmek için kullanılan üretim detayları ve sensör geometrileri hakkında etraflıca bilgi verilmiştir. Ardından, her bir sensör serisi ayrı ayrı alt başlıklarda ele alınıp, sensör yapıları üzerinde yapılan deneyler ve deneylerden elde edilen sonuçlar kendi başlıkları içerisinde sunulmuştur.

4.1. PHE Sensörlerinin Tasarımı ve Üretimi

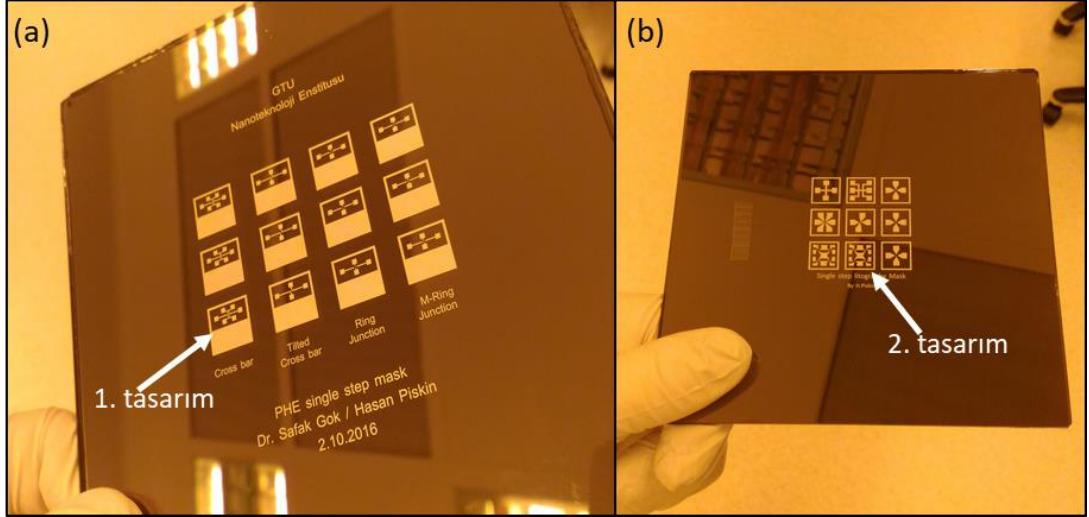
Sensörlerin mikro boyuttaki desenleri 3.1.2 ve 3.1.4'te anlatıldığı gibi maskeleme ve lift-off yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Bunu yapmak için, öncelikle sensör geometrilerini içeren bir fotomaske “CleWin5” programı kullanılarak tasarlanmış ve GTÜ Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Ardından SiO₂ alttaşlar üzerine pozitif fotorezist kaplanmış ve UV ışık altında maskedeki desenler fotoreziste işlenmiştir. Litografi ile hazırlanan alttaşlar üzerine başlık 3.3'te anlatıldığı gibi sıçratma sisteminde sensör yapıları büyütüldükten sonra, aseton içerisinde lift-off işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonucunda istenilen yapıda ve geometride sensörler üretilmiştir. Buradaki her bir adımın detayları aşağıda sunulmuştur.

4.1.1. Fotomaske Tasarımı ve Üretimi

Bu tez çalışmasında kullanılan 5×5 inç² ebatlarındaki soda lime fotomaskelerin bir yüzeyinde 100 nm kalınlığında Cr tabakası kaplıdır ve Cr tabakası üzerine de

AZ1505 kodlu 500 nm kalınlığında bir pozitif fotorezist tabakası kaplıdır. Bu fotomaske ticari olarak bu şekliyle satılmaktadır ve bir lazer yazıcı ile her an yazdırılmaya hazırdır. Maskelerin tasarımı CleWin5 programı kullanılarak hazırlanmıştır. Maske üzerindeki pozitif fotorezist tabakası Gebze Teknik Üniversitesi, Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda bulunan 1 µm çözünürlüğe sahip HEIDELBERG DWL 66fs cihazı kullanılarak doğrudan lazer yazıcı ile işlenmiştir. Pozitif fotorezist tabakasındaki ışığa maruz kalan bölgelerin açılması için foto-maskeler AZ726 MIF kodlu developer içerisinde 50-60 saniye kadar bekletilmiştir. Developer içerisinden çıkartılan foto-maskeler hemen deiyonize su altında durulanmış ve N₂ gazı ile kurutulmuştur. Bu işlemden sonra desenlerin istenilen büyüklükte açılıp açılmadığını kontrol etmek için maske üzerindeki desenler mikroskop altında incelenmiştir. Bu adımda mikroskop altındaki inceleme çok önemlidir. Çünkü lazer yazıcının ışık şiddeti ve odaklanma gibi parametreleri düzgün ayarlanmamışsa, maskede oluşan desenler tamamen açılmayabilir veya istenilen ebatlardan daha büyük açılmış da olabilir. Desenlerin düzgün bir şekilde yazdırıldığını kontrol ettikten sonra foto-maskeler “TechniEtch Cr01” adlı krom aşındırıcı sıvı (chrom etcher) içerisine bırakılmıştır. Bu sayede krom aşındırıcı sıvı fotorezist tabakasındaki açılmış bölgelerden girerek krom tabakasını aşındırmaktadır. Buradaki fotorezist kaplı bölgeler krom için bir maske oluşturmaktadır ve fotorezist kaplanmış bölgelerin altındaki Cr tabakası aşınmamaktadır. TechniEtch Cr01 adlı krom aşındırıcı ortalama olarak saniyede 1 nm kalınlığında krom aşındırmaktadır. Maske üzerindeki 100 nm krom tabakasını aşındırmak için maskeler krom aşındırıcı içerisinde en az 100 saniye bekletilmelidir. Maskelerin krom aşındırıcı içerisinde gereğinden fazla sürede bekletilmesi fotorezist tabakası altındaki krom tabakasının sınırlarından daha fazla genişlemesine sebep olur. Fakat bu genişleme oldukça yavaştır ve burada hızlı davranmaya gerek yoktur. Krom aşındırıcı içerisinden çıkartılan fotomaskedeki aşınmış Cr kalıntılarını temizlemek için fotomaske DI-su altında bir dakika kadar güzelce yıkanıp, N₂ ile kurutulmuştur. Bu adımdan sonra da fotomaskenin mikroskop altında incelenmesi çok önemlidir. Eğer krom tabakası yeterince açılmamışsa, maske krom aşındırıcı içerisinde bir süre daha bekletilip, ardından yıkama ve kurutma işlemi tekrar edilmelidir. Krom tabakasında istenilen desenler oluşturulduktan sonra maske üzerindeki kalıntı fotorezist tabakası AZ100 kodlu remover ile ya da aseton ile temizlenebilir. Maske üzerindeki fotorezistler sert tavlama işlemine tâbi tutulduğundan, maskeler aseton/remover içerisine bırakıldıktan sonra bile maske

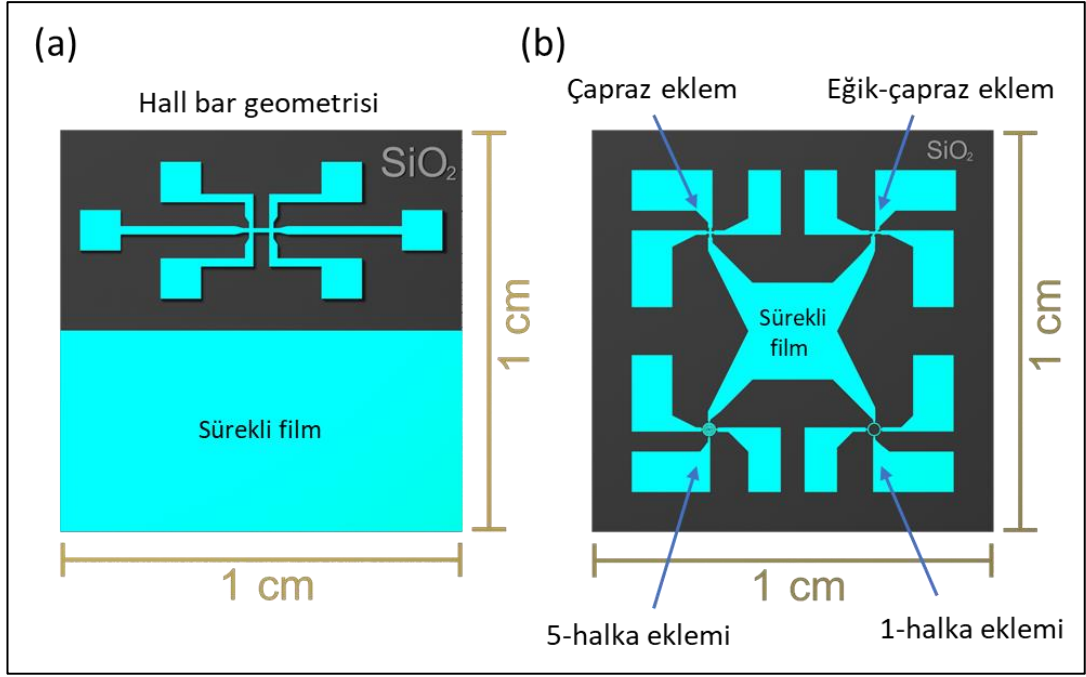
üzerinde bazı bölgelerde fotorezist kalıntısı olabilir. Maske remover/aseton içerisindeyken bu fotorezist kalıntıları bir kürdanla veya temiz oda süngeri denilen ve toz bırakmayan bir araçla hafif dokunuşlarla Cr tabakasına zarar vermeden temizlenmelidir. Ayrıca, AZ100 kodlu remover ile fotorezist temizliği yapılacaksa bu kimyasalın 80 °C sıcaklığa kadar ısıtılması gerekmektedir. Ayrıca, bu aseton ve remover ortama çok fazla kötü koku yaydığından, bütün bu işlemlerin bir çeker ocak içerisinde yapılması gerekmektedir. AZ100 remover kullanılarak yapılan fotorezist temizleme işleminden sonra maske doğrudan su ile durulanıp, N₂ ile kurutulmalıdır. Eğer temizlik için aseton kullanıldıysa, asetonun kalıntılarını gidermek için maske doğrudan IPA (izopropil alkol) içerisine bırakılmalıdır ve birkaç dakika IPA içerisinde bekletilmelidir. Burada asetondan çıkartılan maskenin IPA içerisine bırakma sırasında hızlı hareket etmek çok önemlidir. Aseton içerisinden çıkartılan maskenin üzerindeki asetonun kendiliğinden kuruması maske üzerinde geri dönüşü olmayan lekelerin oluşmasına sebep olabilir. Bu sebeple maskenin asetondan çıkartıldığı anda IPA içerisine bırakılması gerekmektedir. IPA temizliğinden sonra maske N₂ ile kurutulmalıdır. Bu temizlik işlemlerinden sonra da maske üzerinde kalıntı kalıp kalmadığı mikroskop altında incelenmelidir. Tez çalışması için üretilen fotomaskelerin birer fotoğrafı Şekil 4.1’de sunulmuştur. Şekil 4.1.a)’da gösterilen fotoğraftaki 5×5 inç² maske üzerinde, 1×1 cm² alana sığacak şekilde toplamda 4×3 matris şeklinde dizilmiş 12 adet sensör tasarımı bulunmaktadır. Burada 4 farklı tasarım için 3’er tane kopya oluşturulmuştur ve her bir tasarımın adı sütunların altında belirtilmiştir. Tez çalışmasında bu maske üzerinden yalnızca ok ile gösterilen altıbağlantılı Hall bar tasarımı (cross bar) kullanılmıştır. Şekil 4.1.b)’de gösterilen fotoğraftaki ikinci maskede ise bu 4 sensör geometrisi 1×1 cm² alana sığacak şekilde tasarlanmıştır (ok ile gösterilen tasarım). Maskeler üzerindeki diğer tasarımların tezde bir yeri bulunmamaktadır.



Şekil 4.1: Tasarlanan ve üretilen foto-maskelerin fotoğrafları. a) Hall bar (çapraz eklem) geometrisindeki sensör tasarımı. b) 4 farklı sensör geometrisi tasarımı.

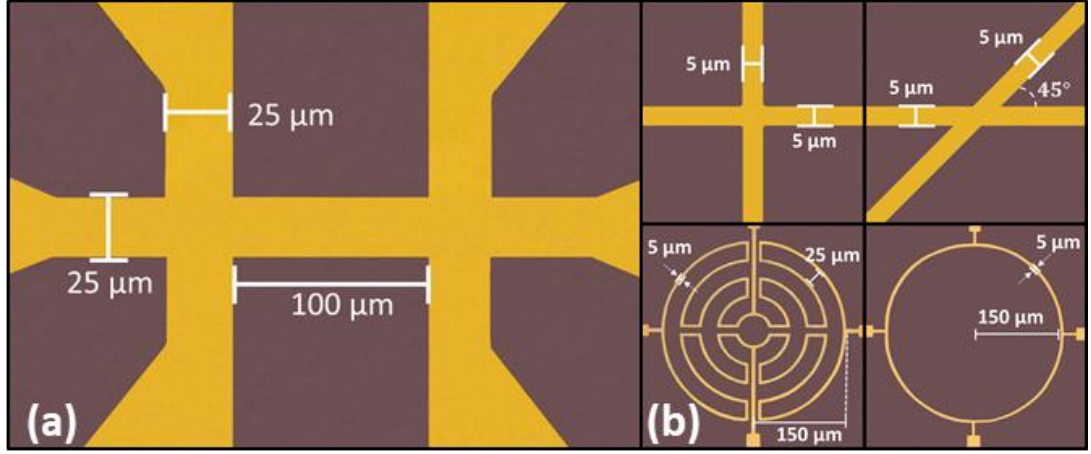
4.1.2. PHE Sensör Geometrilerinin Tasarımı

Tez çalışmasında kullanılan Si/SiO₂ alttaşlar yaklaşık 1×1 cm² boyutlarındadır. Bu ebatlardaki alttaşlar için, CleWin5 programı kullanılarak iki farklı sensör tasarımı yapılmıştır. Birinci tasarımda, Şekil 4.2.a)'da gösterildiği gibi 1×1 cm² alttaşın bir yarısında altı bağlantılı Hall bar geometrisi ve diğer yarısında sürekli film şeklinde sensör yapısı bulunmaktadır. Bu sayede sputter sisteminde, Hall bar geometrisi ve sürekli film şeklindeki sensör yapıları eş zamanlı olarak büyütülmüştür. Böylece, Hall bar geometrisiyle birlikte eş zamanlı büyütülen sensör yapılarının manyetik ve elektrik özelliklerinin birlikte yorumlanması mümkün olmuştur. Ayrıca, altı bacaklı Hall bar geometrisi sayesinde, PHE sinyallerine ek olarak, AMR sinyali de ölçülebildiğinden, AMR ve PHE sinyallerinin de birlikte yorumlanması mümkün olmuştur. İkinci tasarım, Şekil 4.2.b)'de gösterildiği gibi 1×1 cm² alttaşın tamamını kaplayacak şekilde dört farklı sensör geometrisi içermektedir. İkinci tasarım sayesinde çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi, 5 halka eklemi ve sürekli film geometrilerindeki sensör yapıları sputter sisteminde eş zamanlı olarak büyütülmüştür. Bu tasarım sayesinde, büyütme şartları eşit olan dört farklı sensör geometrisinin ve sürekli filmin karakteristik özellikleri kendi içerisinde kıyas edilebilmektedir.



Şekil 4.2: a) $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alttaşın bir yarısında Hall bar geometrisi varken diğer yarısında sürekli film bulunmaktadır. b) Çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrilerindeki PHE sensörlerinin $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alttaş üzerindeki tasarımı.

Tez kapsamında üretilen her bir sensörün geometrik ebatları Şekil 4.3'te detaylı olarak verilmiştir. Şekil 4.3.a)'da gösterilen Hall bar geometrisindeki çizgiler $25 \mu\text{m}$ genişliğinde olup, çapraz eklemlerin arasında $100 \mu\text{m}$ mesafe bulunmaktadır. Şekil 4.3.b)'de gösterilen çapraz eklem ve eğik çapraz eklem geometrileri $5 \mu\text{m}$ genişliğinde yollara sahip olup, eğik çapraz eklemin kolları arasında 45° açı bulunmaktadır. 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrileri $150 \mu\text{m}$ yarı çapındadır ve $5 \mu\text{m}$ genişliğinde yollara sahiptir. 5-halka eklemi geometrisindeki halkalar arası mesafe ise $25 \mu\text{m}$ genişliğindedir.



Şekil 4.3: a) Altı uçlu Hall bar geometrisi, b) çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5 halka eklemi geometrilerindeki PHE sensörlerinin tasarım detayları.

4.1.3. PHE Sensörlerinin Üretimi

Tez çalışmasında kullanılan althaşların yüzeyinin yalıtkan olması sensörlerin elektriksel karakterizasyonu için çok önemlidir. Bu sebeple üretilen PHE sensörleri için 500 nm kalınlığında oksit tabakası bulunan Si(100)/SiO₂ althaşlar tercih edilmiştir. Sensörlerin mikro boyuttaki desenleri Gebze Teknik Üniversitesi, Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'ndaki litografi alt yapısı kullanılarak üretilmiştir. Öncelikle, Şekil 4.1'de gösterilen maskeler ve AZ1505 kodlu pozitif fotorezist kullanılarak 1×1 cm² ebatlarındaki althaşlar üzerinde desenli fotorezist tabakası oluşturulup, ardından litografi ile hazırlanmış althaşlar üzerine sıçratma sisteminde sensör yapıları büyütülmüştür. Son olarak althaş üzerindeki fotorezistli bölgeler lift-off yöntemi ile temizlenerek, yalnızca althaşın yüzeyine yapışan sensör yapılarının kalması sağlanmıştır. Bu sayede Şekil 4.2'de gösterilen sensör tasarımları elde edilmiştir. Bütün bu aşamaların detayları aşağıda verilmiştir;

- 1×1 cm² ebatlarındaki althaşlar sırasıyla aseton ve IPA içerisinde 5'er dakika boyunca ultrasonik banyoda temizlenip, azot (N₂) gazıyla kurutulmuştur. Burada asetonun çıkan althaşın üzerindeki asetonun kurumaması beklemeden hemen IPA içerisine bırakılması çok önemlidir. Çünkü asetonun bir yüzeyde kuruması, o yüzeyde artık geri dönülmez kirliliklere sebep olabilmektedir.
- Azotla kurutulan althaş yüzeyinde kalabilecek su ve benzeri moleküllerin giderilmesi için althaşlar, fotorezist kaplanmadan önce, 110°C sıcaklığında 2

dakika süresince tavlannmıştır. Bu işlemin sonunda alttaşların oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir.

- Bir spin kaplama cihazı kullanılarak AZ 1505 kodlu pozitif fotorezist alttaşlar üzerine kaplanmıştır. Kaplama işlemi iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda, 500 rpm (rotation per minute) dönme hızıyla 5 saniye süresince kaplanan fotorezist homojen bir şekilde alttaşın her yerine yayılmaktadır. İkinci adımda ise 4000 rpm dönme hızıyla 45 saniye süresince kaplanan fotorezist 500 nm kalınlığına kadar incelmektedir. Burada kullanılan fotorezistin ince olması örnek büyütme sırasında oluşabilecek gölgeleme etkisini azaltmaktadır.
- Fotorezist kaplanan alttaşlar 110 °C sıcaklığındaki ısıtıcı tabla (hotplate) üzerinde 1 dakika süresince bekletilmiştir. Bu sayede fotorezist içerisindeki sıvı bir miktar buharlaşıp fotorezisti daha katı hale getirmektedir. Bu işleme hafif tavlama (soft bake) denmektedir ve süresi çok önemlidir. Çünkü hafif tavlama süresi fotorezistin sertliğini belirlediğinden, bu işlem doğrudan fotorezist üzerine uygulanması gereken UV ışık miktarına (süresine) etki etmektedir. Hafif tavlama işlemi yapıldıktan sonra alttaşların oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir.
- Fotorezist kaplanan alttaşlar, 25 mW/cm² güce sahip UV ışık kaynağı bulunan bir maske hizalama cihazına (KARL SUSS-MJB4 mask aligner) yerleştirilip, alttaşlar maskeye göre hizalanmıştır. Ardından 0.5 saniye süresince fotorezist kaplı alttaşlar maskelenmiş bir UV ışığa maruz (exposure) bırakılmıştır. Bu sayede ışığa maruz kalan bölgelerdeki fotorezistlerin bağları zayıflatılmıştır.
- Maskelenmiş UV ışığa maruz kalan fotorezist kaplı alttaşlar AZ 726 MIF (Metal Ion Free) çözücü (developer) içerisinde 1 dakika süresince bekletilmiştir. Bu sayede ışığa maruz kalan bölgelerde bulunan 500 nm kalınlığındaki fotorezistler tamamen çözünüp, alttaş yüzeyi çıplak hale getirilmiştir. Çözücü içerisine bırakılan alttaş üzerindeki desenler 10-20 saniye içerisinde gözle çok net bir şekilde görölmektedir. Alttaşlar çözücü içerisinde 1 dakika bekletildikten sonra çözücüden çıkartılıp de-iyonize su (DI water) ile durulanmış ve N₂ gazı ile kurutulmuştur.
- Fotoreziste işlenmiş desenlerin düzgün olup olmadığını anlamak için, litografik işlemlerden geçen her bir alttaş mikroskop altında incelenmiştir. Desenleri düzgün olmayan alttaşlar yeniden üretilmiştir. Alttaşlar üzerindeki desenlenmiş fotorezist tabaka aseton içerisinde tamamen temizlenebilmektedir. Bu sebeple

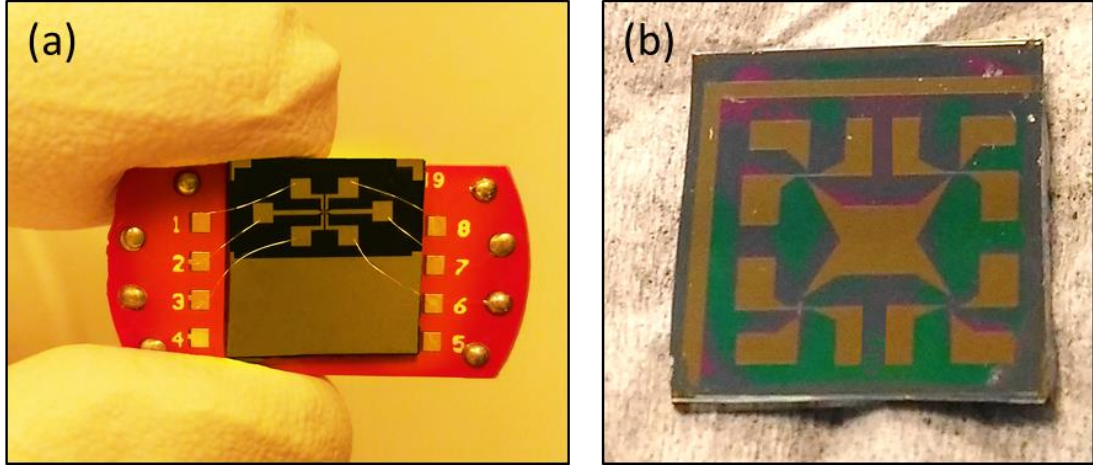
hatalı üretilen desenleri tekrar üretmek için, üretimin en başındaki aseton ve IPA ile yapılan temizlik işlemlerine geri dönülmelidir.

- Maskeleme yöntemi ile hazırlanan desenli alttaşlar mikroskopta incelendikten hemen sonra (sputter sistemine girmeden önce) ısıtıcı tabla üzerinde 110°C sıcaklıkta 5'er dakika tavlannmıştır. Bu sayede, açılan SiO₂ yüzeyinde en son yapılan durulama ve kurulama işlemlerinden kalan nem ve benzeri moleküller giderilmiştir. Bu işlem çok önemlidir. Bu işlemin atlanması sonucunda üretilen sensörlerin manyetik ve elektriksel özellikleri daha kötü olmaktadır.
- Litografi işlemlerinden geçen alttaşlar sensör yapılarının üretilmesi için sputter sistemine yerleştirilip daha sonra anlatılacak olan büyütme işlemlerinden geçirilmiştir. Bu sayede Şekil 3.12'te gösterildiği gibi alttaş üzerindeki fotorezist tabakası ve çukurlar sensör malzemesi ile kaplanmıştır.
- Sputter sisteminden çıkartılan alttaşlar lift-off işlemi için aseton içerisinde yaklaşık 1 dakika kadar kendi hâline bırakılıp, ardından ultrasonik banyoda 15-20 saniye daha aseton içerisinde bekletilmiştir. Bu işlem sayesinde alttaş üzerindeki fotorezistler kaldırılıp, yalnızca alttaş yüzeyinde desenlenmiş sensör yapıları kalmıştır. Asetondan çıkartılan sensör yapıları IPA içerisinde 1 dakika kadar temizlenip, N₂ gazı ile kurutulmuştur.

4.1.4. Sensörlerin Sıçratma Sisteminde Büyütülmesi

PHE sensör yapıları Gebze Teknik Üniversitesi, Nanomanyetizma ve Spintronik Laboratuvarı'nda bulunan manyetron sıçratma sisteminde hazırlanmıştır. Sensör malzemelerini büyütmeden hemen önce sıçratma sistemin temel basıncının (base pressure) 1×10^{-8} mbar değerinden daha iyi durumda olmasına dikkat edilmiştir. Litografi ile hazırlanmış alttaşlar üzerine Ni₈₀Fe₂₀, Pt, Cr, Au, Cu hedef malzemeleri için 10 watt dc güç uygulanırken, Ir₇₈Mn₂₂ hedef malzemesi için 20 watt dc güç uygulanmıştır. Büyütme işlemleri 5×10^{-3} mbar Ar gazı ortamında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Burada NiFe tabakasının manyetik kolay eksenini ile sensörlerin akım yolunun birbirine paralel olması Şekil 3.19.b)'de gösterildiği gibi büyüme yönüne bağlı anizotropi ile sağlanmıştır. Litografi ile hazırlanmış alttaşların üzerindeki akım yolu NiFe hedef malzemesinin plazma akısına dik bakacak şekilde hizalanmış ve bu pozisyonda sabitlenmiştir. Ayrıca, alttaş üzerine NiFe tabakasından önce büyütülen her bir tabakanın kristal yönelimi NiFe tabakasının anizotropi yönüne etki

ettiği gözlenmiştir. Bu sebeple SiO_2 tabakası üzerine ilk önce NiFe tabakası büyütülmüştür. Son olarak, sensör yapılarının oksitlenmelerini önlemek için 3 nm kalınlığında bir koruyucu Pt tabakası da sensör yapılarının en üstüne kaplanmıştır. Üretilen sensörlerin birer fotoğrafı Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.4: a) PCB üzerinde bağlantıları yapılmış Hall bar geometrisinde ve sürekli film şeklinde üretilen sensörün bir fotoğrafı. b) çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrilerinde üretilen sensörün bir fotoğrafı.

4.2. NiFe/Pt/IrMn Yapısındaki PHE Sensörlerinin Yapısal, Manyetik ve Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması

4.2.1. Giriş

Literatürde, üç tabakalı NiFe/NM/IrMn yapısındaki PHE sensörlerinde NM ara tabaka olarak çoğunlukla Cu elementi kullanılmıştır [4,25,30,35,36]. Cu ara tabakası PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetini önemli ölçüde arttırmasına rağmen, çok kalın kullanılan Cu ara tabakaları, şönt etkisi sebebiyle sensörlerin ΔV_{PHE} değerlerini azaltmaktadır [4]. Bu da sensör hassasiyetinin daha fazla artmasına engel olmaktadır. Bu tez çalışmasında, Cu ara tabakasının PHE sensörleri üzerindeki olumsuz etkisini gidermek için, Cu'ya kıyasla öz direnci çok daha yüksek olan ve güçlü spin-yörünge etkileşmesine sahip olan Pt elementi literatürde ilk defa PHE sensörlerinde ara tabaka olarak kullanılmıştır.

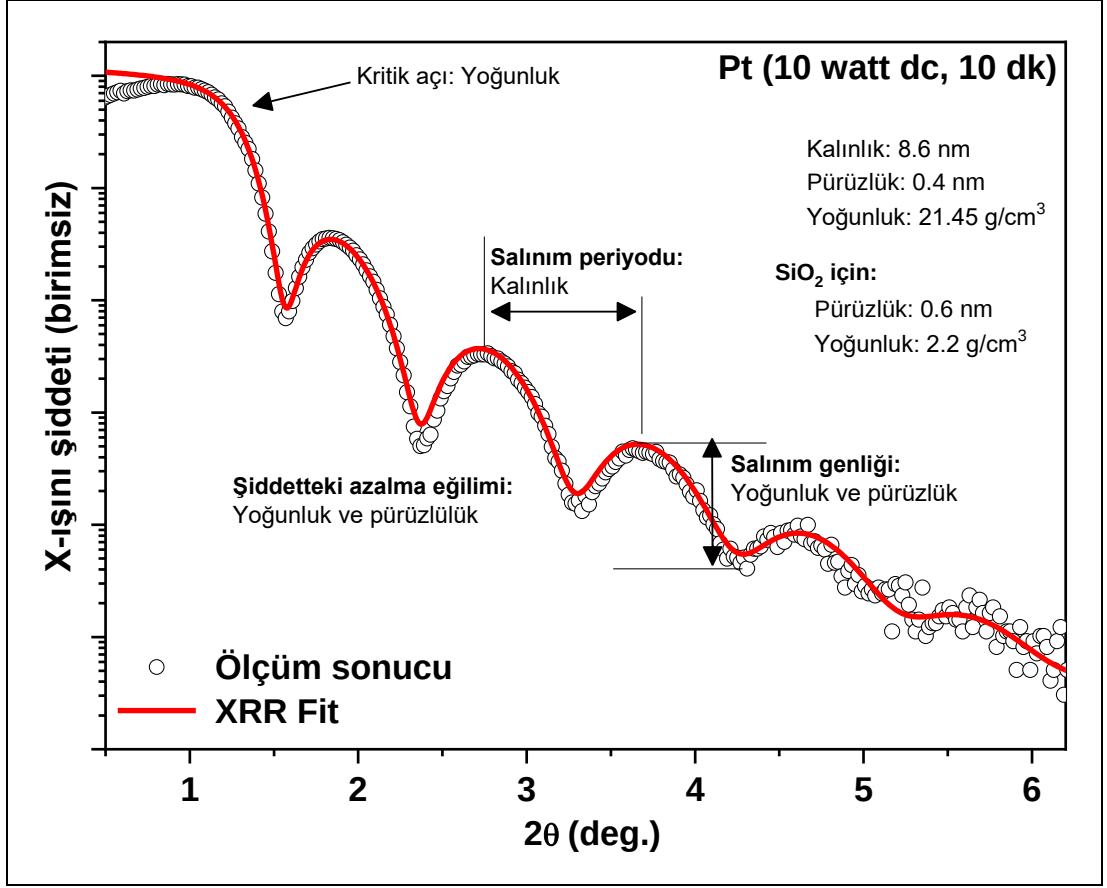
Üç tabakalı NiFe(10)/Pt(t_{Pt})/IrMn(8) (nm) (t_{Pt} :0-1nm) yapısındaki PHE sensörleri Şekil 4.4.a) ve b)'de Şekil 4.2 gösterilen altı bağlantılı Hall bar, çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi olmak üzere 5 farklı geometride ve sürekli film şeklinde üretilip, sensör yapılarının yapısal manyetik ve elektriksel özellikleri araştırıldı. Sensör yapılarını üretmeden önce, X-ışını yansıması (XRR) tekniği ile, her bir sensör malzemesinin büyüme oranı ve pürüzlük değerleri belirlendi. Daha sonra, üretilen sensörlerin manyetik özellikleri manyeto-optik Kerr etkisi (MOKE) tekniğiyle incelendi. Sensör yapılarının AMR oranları ve manyetik alan hassasiyetleri sırasıyla AMR ve PHE sinyallerinin analiz edilmesiyle belirlendi. Ek olarak, sıcaklığa bağlı ve zamana bağlı PHE sinyalleri analiz edilip, sensörlerin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklardaki manyetik alan hassasiyetleri, sinyal/gürültü oranları ve manyetik alan çözünürlükleri belirlendi. Sonuçlar literatür ile kıyas edildi. Bu bölümde verilen sonuçların bir kısmı “Sensors and Actuators A: Physical” dergisinde yayınlamıştır [39].

4.2.2. Sensör Malzemelerinin Yapısal Özellikleri

Sensör malzemelerinin istenilen kalınlıklarda üretilmesi için sıçratma sistemindeki hedef malzemelerine uygulanan güç değerlerine ve ortam şartlarına göre bir büyüme oranı belirlenmesi gerekmektedir. Bunu yapabilmek için sensör yapısında kullanılan her bir hedef malzeme ayrı ayrı Si/SiO₂ alttaşlar üzerine büyütülmüş ve her biri için “Rigaku Smartlab X-ray Difraktometre” cihazı kullanılarak X-ışını yansıması (XRR: X-Ray Reflectivity) ölçümleri yapılmıştır. XRR ölçüm sonuçları “GlobalFit 2.0” programı kullanılarak analiz edilmiştir. GlobalFit programı, içerisinde tabaka kalınlığını, tabaka pürüzlüğünü, tabaka yoğunluğunu içeren ve Parrat formalizm [113] olarak da bilinen bir matematik denklem sayesinde XRR ölçümlerinden elde edilen salınımlı sinyalleri taklit (simule) edebilmektedir. Bu sayede büyütülen tabakaların kalınlıkları, yoğunlukları ve pürüzlükleri analiz edilebilmektedir. 10 watt dc güç kullanılarak, 10 dakika süresince büyütülen Pt tabakasına ait XRR ölçümü ve GlobalFit programından elde edilmiş analiz sonucu

Şekil 4.5’te sunulmuştur. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi Pt için elde edilen XRR ölçüm sonucu ile GlobalFit 2.0 programından elde edilen sonuç (XRR Fit) oldukça uyumludur. Programa girilen sabit kalınlık, yoğunluk ve pürüzlük değerleri kullanılarak

Şekil 4.5 üzerinde gösterilen kritik açı, toplam ölçümün azalma eğilimi, salınım periyodu ve salınım genliği karakteristiklerinin hepsinin uyuşması önemlidir. Burada sunulan XRR fit sonucuyla ölçüm sonucu arasındaki uyumu elde etmek için Pt tabakasının kalınlık değeri 8.6 nm, tabaka pürüzlülüğü 0.4 nm ve tabakanın yoğunluğu 21.45 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kullanılan alttaşın yoğunluğu ve pürüzlülüğü de bu sonuca etki etmektedir. Kullanılan SiO₂ alttaş için yoğunluk 2.2 g/cm³ ve pürüzlük miktarı 0.6 nm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, Pt hedef malzemesine uygulanan 10 watt dc güç ve 5×10⁻³ mbar basıncındaki Ar gazı şartları için 0.86 nm/dk büyüme oranı elde edilmiştir. Diğer sensör malzemeleri için uygulanan güç değerleri, büyütme süreleri, tabakalar için belirlenen kalınlık, pürüzlük, yoğunluk değerleri ve tabakaların büyüme hızları Tablo 4.1’de özetlenmiştir.



Şekil 4.5: 10 watt dc güç kullanılarak, 10 dakika süresince SiO₂ alttaş üzerine büyütülen Pt malzemesine ait XRR ölçümü (siyah daire) ve GlobalFit programından elde edilen analiz sonucunun (kırmızı çizgi) uyumu.

Tablo 4.1: Birinci sensör serisindeki sensör yapılarında kullanılan hedef malzemeler için uygulanan güç değerleri, elde edilen tabaka kalınlıkları, yoğunlukları, pürüzlülük değerleri ve tabakaların büyüme hızları.

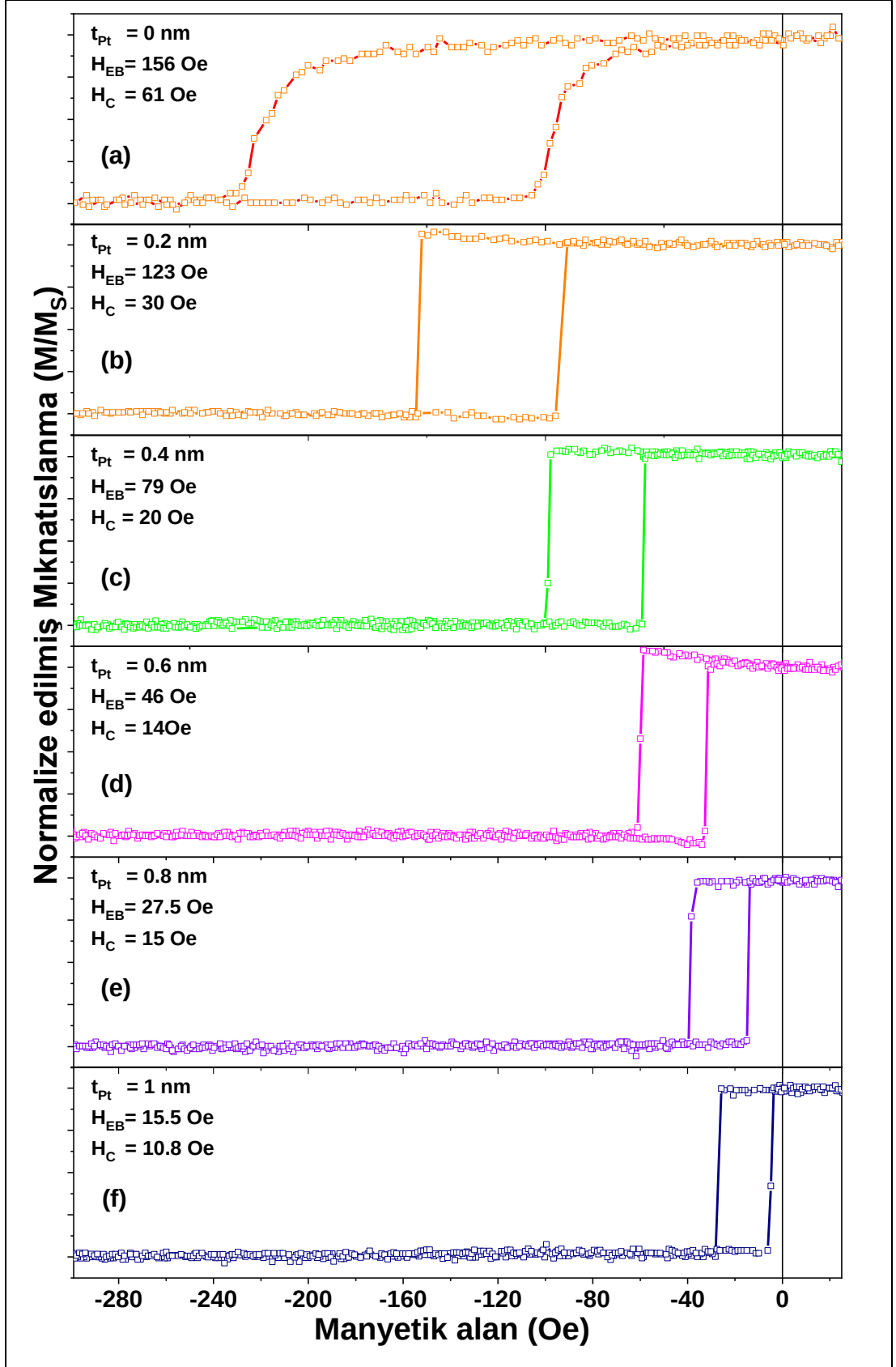
Hedef malzeme	Güç (watt) (dc)	Büyütme süresi (dk)	Kalınlık (nm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Pürüzlülük (nm)	Büyüme oranı (nm/dk)
Pt	10	10	8.6	21.45	~0.4	0.86
IrMn	20	25	19.8	10.59	~0.5	0.8
NiFe	10	45	13.05	8.68	~1	0.29
SiO ₂ (alttaş)	-	-	-	2.2	~0.6	-

4.2.3. Sensör Yapılarının Manyetik Özellikleri

Üç tabakalı NiFe(10)/Pt(t_{Pt})/IrMn(8) (nm) (t_{Pt} :0-1nm) yapılarında üretilen PHE sensörlerinin manyetik özellikleri Gebze Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, MOKE Laboratuvarı'nda bulunan manyeto-optik Kerr etkisi tekniği ile incelenmiştir [42]. Örneklerde, manyetik alanın akıma paralel ve dik uygulandığı durum olmak üzere iki farklı mıknatıslanma ölçümü yapılmıştır. Bu sayede NiFe tabakasının kolay ekseninin istenildiği gibi akım yoluna paralel olup olmadığı kontrol edilmiş ve elde edilen histerezis eğrileri incelenerek sensör yapılarının H_C ve H_{EB} değerleri belirlenmiştir. Farklı kalınlıklarda Pt ara tabakası içeren sensör yapılarında, manyetik alanın akım yoluna paralel uygulandığı durum için elde edilen histerezis eğrilerinin bazıları

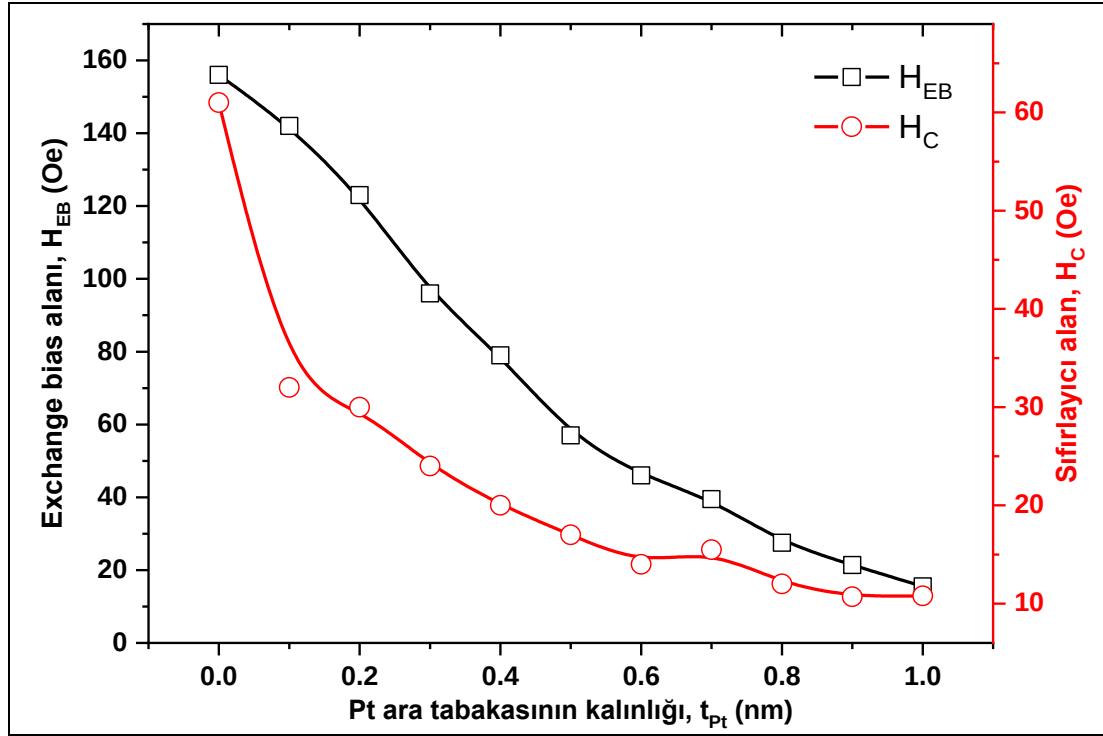
Şekil 4.6'da sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, histerezis eğrilerinin oldukça köşeli görünümde olması, kolay eksen ile akım yolunun oldukça paralel olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.6.a)'da gösterilen histerezis eğrisi, iki tabakalı NiFe/IrMn sensör yapısı için elde edilmiştir. Bu histerezis eğrisi serideki diğer sensör yapıları için bir referans niteliğinde olup, zorlayıcı alan değeri $H_C = 61$ Oe ve exchange bias alanı değeri $H_{EB} = 156$ Oe olarak belirlenmiştir. Diğer sensör yapıları için Pt ara tabakasının kalınlığı arttırıldıkça H_C ve H_{EB} değerlerinde sistematik olarak bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca, 1 nm kalınlığındaki Pt ara tabakası için elde edilen histerezis eğrisinde H_{EB} hâlâ kaybolmamıştır ve histerezis eğrisinin tamamı sol taraftadır. Bütün bu sonuçlar, tek yönlü anizotropiye sahip PHE sensörlerinin başarılı bir şekilde üretildiğini göstermektedir.



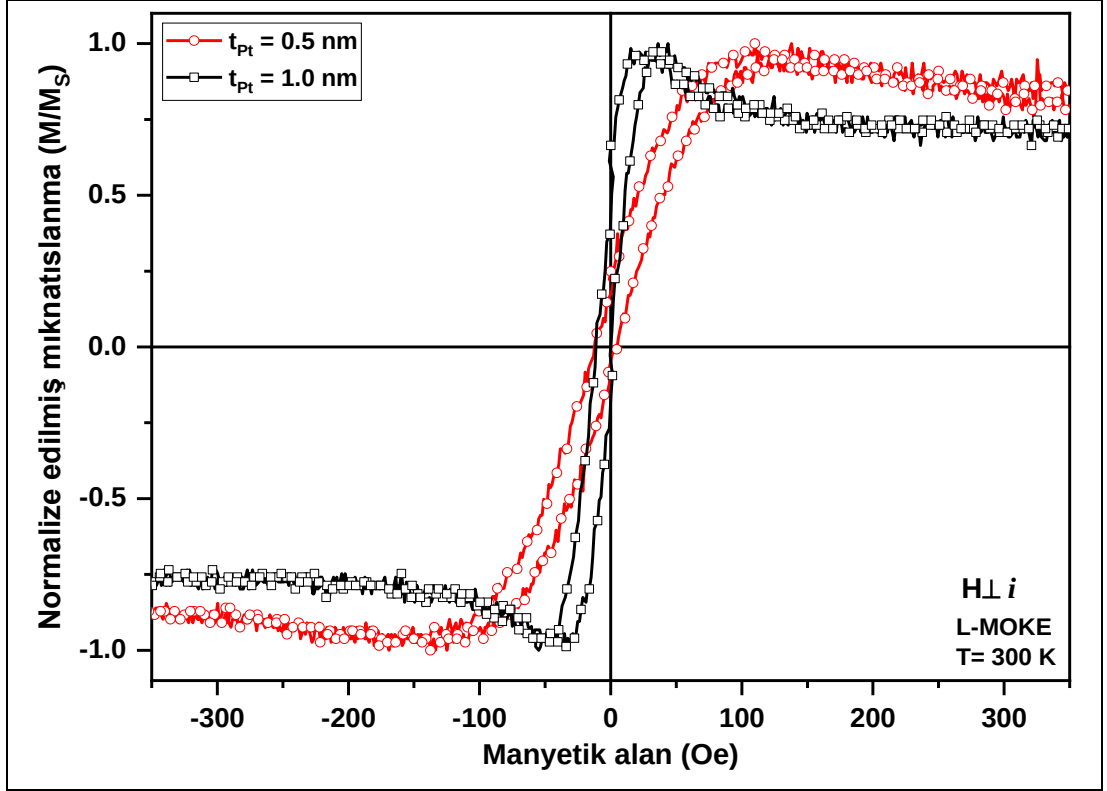
Şekil 4.6: NiFe ve IrMn arasındaki Pt ara tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişen histerezis eğrileri. Burada, manyetik alan akım yoluna paraleldir. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

Histerezis eğrilerinden elde edilen H_C ve H_{EB} değerleri Pt ara tabakasının bir fonksiyonu olarak Şekil 4.7’de özetlenmiştir. Pt ara tabakasının kalınlığı 1 nm’ye kadar arttırıldıkça $H_C=61$ Oe değerinden $H_C=10.8$ Oe değerine kadar azalırken, $H_{EB}= 156$ Oe değerinden $H_{EB}= 15.5$ Oe değerine kadar azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.7: NiFe ve IrMn arasındaki Pt ara tabakasının kalınlığının bir fonksiyonu olarak değişen H_{EB} (siyah, kare) ve H_C (kırmızı, daire) değerleri.

Manyetik alanın akım yoluna dik uygulandığı durum için ölçülen histerezis eğrileri Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Burada, Şekil 2.5.b)’de tarif edildiği gibi, sıfır ekseninden geçen zor eksen karakteristiği gözlenmiştir. Sade bir görünüm için yalnızca, $t_{Pt}=0.5$ nm ve $t_{Pt}=1.0$ nm için ölçülen zor eksen histerezis eğrileri sunulmuştur. Açıkça görüldüğü gibi daha kalın Pt ara tabakası içeren sensör yapıları için manyetik momentler daha düşük manyetik alanda doyuma ulaşmaktadır. Bu sonuç, manyetik alana daha duyarlı PHE sensörleri üretmek için önemlidir. Diğer bir yandan, zor ekseninde ölçülen histerezislerdeki çiftlenim PHE sensörleri açısından istenmeyen bir durumdur. Histerezis eğrilerindeki bu çiftlenim PHE sensör karakteristiğinde de bir çiftlenime sebep olmaktadır. Literatürde bu çift eğrinin sebebi manyetik momentlerin tutarsızca dönmesine (incoherent rotation) atfedilmektedir [33,141].



Şekil 4.8: Manyetik alan ile akım yolunun dik olduğu durumda, $t_{Pt}=0.5$ nm ve $t_{Pt}=1.0$ nm için ölçülen histerezis eğrileri.

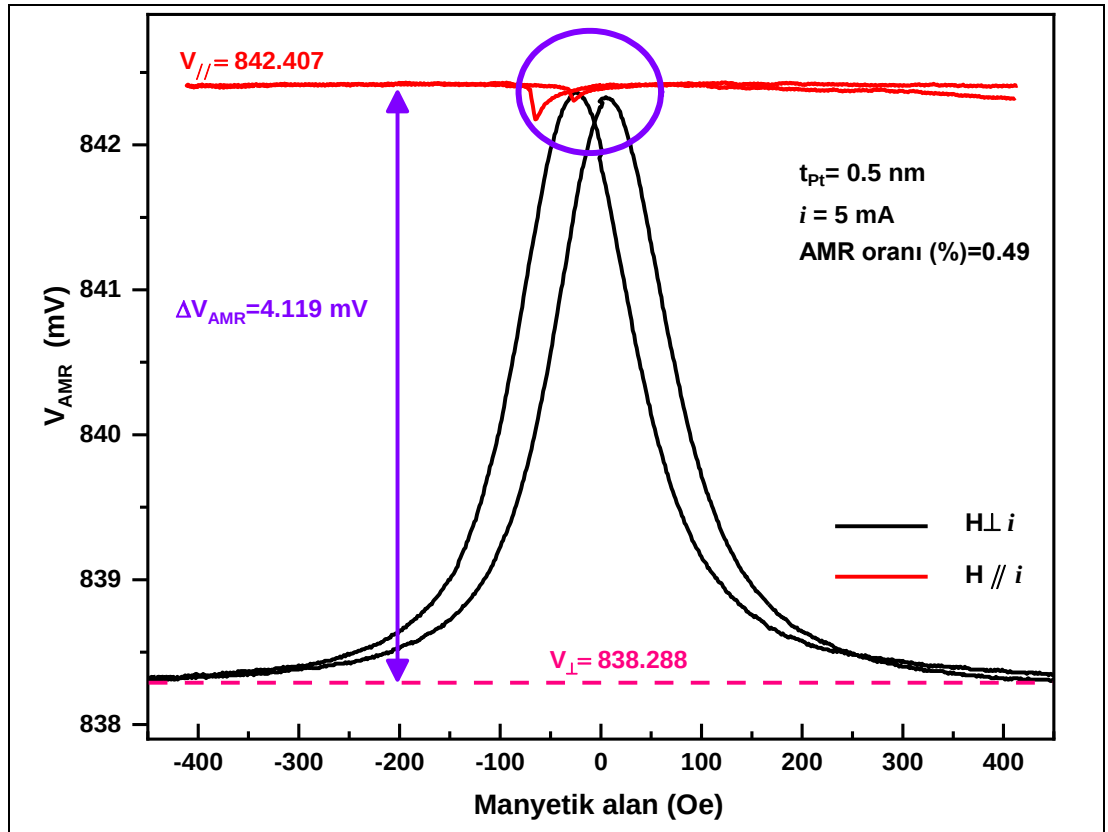
4.2.4. Sensör Yapılarının Elektriksel Özellikleri

Üç tabakalı NiFe(10)/Pt(t_{Pt})/IrMn(8) (nm) (t_{Pt} :0-1nm) yapılarında üretilen sensörlerin elektriksel özellikleri Gebze Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, MOKE Laboratuvarı'nda bulunan manyetodirenç ölçüm sistemi kullanılarak incelenmiştir. Hall bar geometrisindeki sensörler üzerine 5 mA dc akım uygulanıp AMR ve PHE voltajları kaydedilmiştir.

AMR ölçümleri, manyetik alanın akıma dik ve paralel uygulandığı iki farklı durum için yapılmıştır. Şekil 4.9'da 0.5 nm kalınlığında Pt ara tabakasına sahip sensör yapısından elde edilen AMR ölçüm sonuçları sunulmuştur. Manyetik alanın akıma paralel uygulandığı durumda doyum mıknatıslanması için $V_{||}=842.407$ mV ($R_{||}=168.481 \Omega$) değeri elde edilirken manyetik alanın akıma dik olduğu durumda doyum mıknatıslanması için $V_{\perp}=838.288$ mV ($R_{\perp}=167.657 \Omega$) değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla $\Delta V_{AMR}=4.119$ mV olarak ölçülmüştür. Ohm yasası kullanılarak, AMR özelliğinden kaynaklı oluşan direnç farkı $\Delta R_{AMR}=0.824 \Omega$ olarak hesaplanmıştır. Denklem (2.23) ile tarif edilen AMR oranı ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$AMR \text{ oranı (\%)} = \frac{\Delta R_{AMR}}{R_{\perp}} \times 100 = \frac{0.824}{167.66} \times 100 = 0.49 \quad (4.1)$$

Pt ara tabakası içeren her bir sensör için AMR oranları hesaplanıp Şekil 4.11’de özetlenmiştir. Pt ara tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişen AMR oranı daha sonra ΔV_{PHE} değişimleriyle birlikte ele alınacaktır. Burada, manyetik alanın akım yoluna dik uygulandığı durum için, sıfır manyetik alan civarında ölçülen voltaj değerinin, en yüksek AMR voltaj değerine yaklaşık olarak eşit olması, manyetik kolay eksenin akım yolu boyunca hizalandığının diğer bir ispatıdır (Şekil 4.9’da çember içerisinde gösterilen kısım). Çünkü AMR ölçümlerinde akım ile manyetik momentler birbirine paralel olduğunda en yüksek voltaj, dik olduğunda ise en düşük voltaj gözlenmektedir.



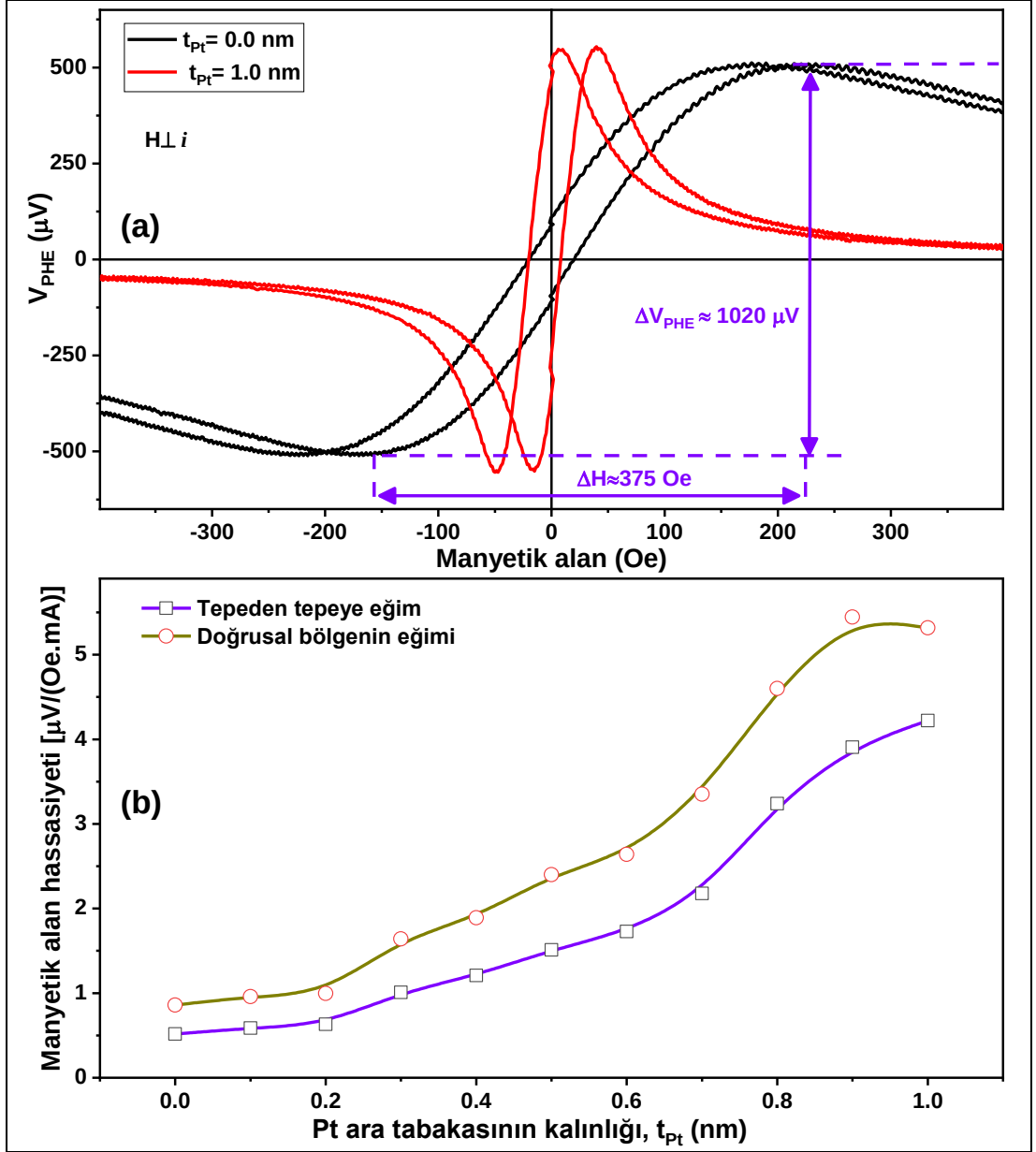
Şekil 4.9: NiFe(10)/Pt(0.5)/IrMn(8) (nm) sensör yapısına ait AMR ölçüm sonuçları. Burada manyetik alan ile akımın paralel ve dik olduğu durumlar için ayrı ayrı ölçümler yapılmıştır.

Sensörlerin PHE ölçümleri, manyetik alanın yalnızca akıma dik yönde uygulandığı durum için yapılmıştır. Şekil 4.10.a)’da $t_{Pt}=0.0$ nm ve $t_{Pt}=1.0$ nm

kalınlığında Pt ara tabakası içeren sensör yapıları için, uygulanan manyetik alana karşılık ölçülen PHE voltajı grafiği sunulmuştur. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, Pt ara tabakasının kalınlığı 1 nm 'ye kadar arttırıldıkça PHE sinyallerinin tepe noktaları daha zayıf manyetik alan değerlerine doğru kaymıştır. Sensörlerden okunan ΔV_{PHE} değerlerinde şönt etkisinden dolayı bir azalma gözlenmesi beklenirken, aksine ΔV_{PHE} değerlerinde bir artış gözlenmiştir (Bu artış davranışı daha sonra Şekil 4.11'de AMR oranıyla birlikte ele alınacaktır). IrMn ile NiFe tabakaları arasına yerleştirilen Pt ara tabakası PHE sinyalindeki doğrusal bölgenin eğimini (yani sensörün manyetik alan hassasiyetini) arttırmıştır. Şekil 4.10.a)'da $t_{Pt}=0$ nm için verilen PHE sinyalinin manyetik alan hassasiyeti denklem (2.35) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$S_{PHE} = \frac{\Delta V_{PHE}}{\Delta H} = \frac{1020}{375} = 2.72 \mu V/(Oe) \quad (4.2)$$

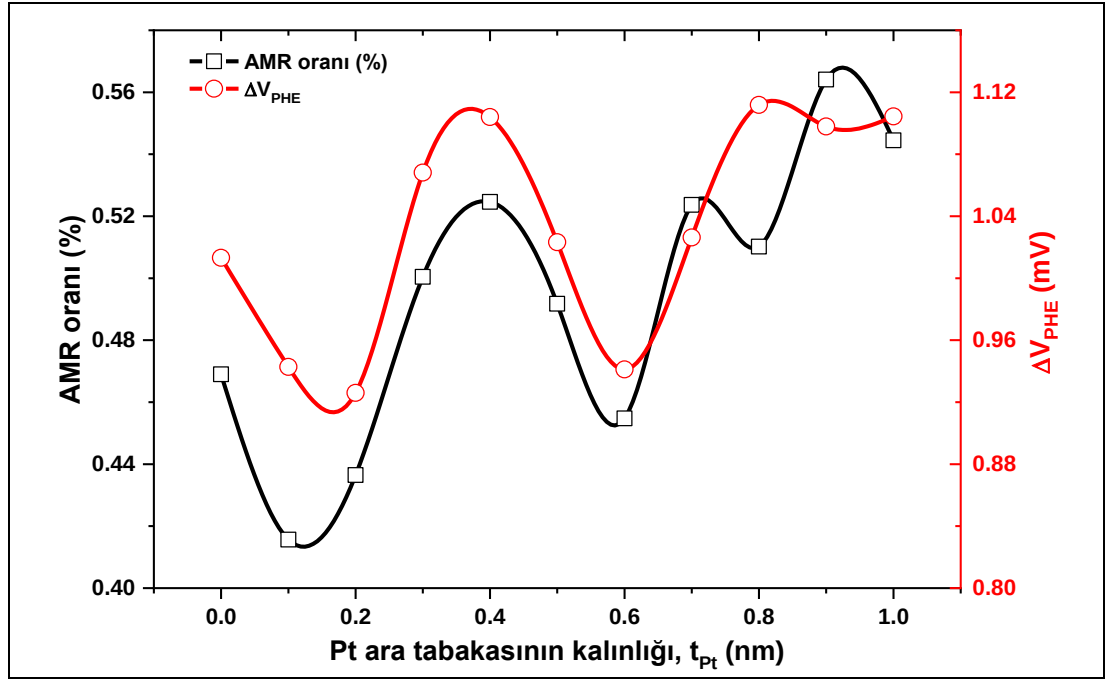
Burada ΔV_{PHE} ve ΔH değerleri sinyalin en yüksek ve en düşük tepe noktaları alınarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, doğrusal bölgenin eğimi ise PHE sinyalinin doğrusal bölgesi üzerinden alınan iki farklı nokta için ΔV_{PHE} ve ΔH değerlerinin belirlenmesiyle $4.30 \mu V/(Oe)$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu $2.72 \mu V/(Oe)$ ve $4.30 \mu V/(Oe)$ hassasiyet değerleri uygulanan 5mA akım içindir. Sensör hassasiyetlerinin literatürle kıyas edilebilmesi için uygulanan akım başına sensör hassasiyeti hesaplanmalıdır. Bu sebeple elde edilen hassasiyet değerleri 5 mA akım değerine bölünürse tepeden tepeye hassasiyet $0.54 \mu V/(Oe \cdot mA)$ olarak belirlenirken, doğrusal bölgenin eğimi $0.86 \mu V/(Oe \cdot mA)$ olarak belirlenmiştir. Pt ara tabakasının kalınlığı 1 nm 'ye kadar arttırıldığında, PHE sinyallerinin doğrusal bölgelerinden hesaplanan manyetik alan hassasiyetleri Şekil 4.10.b)'de gösterildiği gibi $0.86 \mu V/(Oe \cdot mA)$ değerinden $5.45 \mu V/(Oe \cdot mA)$ değerine kadar arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sensörün tepeden tepeye hesaplanan manyetik alan hassasiyetleriyle, sinyaldeki doğrusal bölgenin eğiminden hesaplanan manyetik alan hassasiyetleri arasında ciddi bir fark vardır. PHE sensörleri zayıf manyetik alanları ölçmek için kullanıldığından, sensörün uygulamalardaki gerçek davranışının doğrusal bölgedeki eğim olduğuna dikkat edilmelidir. Bu sebeple tepeden tepeye yapılan hassasiyet hesabı sensörlerin hassasiyet değerleri hakkında fikir verse de sensörün manyetik alana karşılık verdiği gerçek tepkisi sinyaldeki doğrusal bölgedir. Serideki her bir örnek yapısı için elde edilen manyetik alan hassasiyetleri Şekil 4.10.b)'de özetlenmiştir.



Şekil 4.10: a) NiFe(10)/IrMn(8) (nm) ve NiFe(10)/Pt(1.0)/IrMn(8) (nm) sensör yapılarına ait PHE ölçüm sonuçları. b) Sensörlerin tepeden tepeye (kareler) ve doğrusal bölgelerinden (daireler) hesaplanan manyetik alan hassasiyetleri.

Pt ara tabakasının kalınlığı 1 nm 'ye kadar arttırıldıkça, aynı Cu ara tabakasında gözlemlendiği gibi [4], şönt etkisinden dolayı AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerlerinde bir azalma beklenmekteydi. Fakat bunun aksine, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, Pt ara tabakasının kalınlığı arttırıldıkça hem AMR oranında hem de ΔV_{PHE} değerinde salınımlı bir şekilde artış gözlenmiştir. Literatürde, NiFe ile arayüz oluşturan Pt [142], Ta [143] ve Au [33] gibi elementlerin doğrudan NiFe tabakasının $\Delta\rho$ değerini arttırdığı, dolayısıyla da AMR oranını arttırdığı bildirilmiştir. AMR oranı ve ΔV_{PHE}

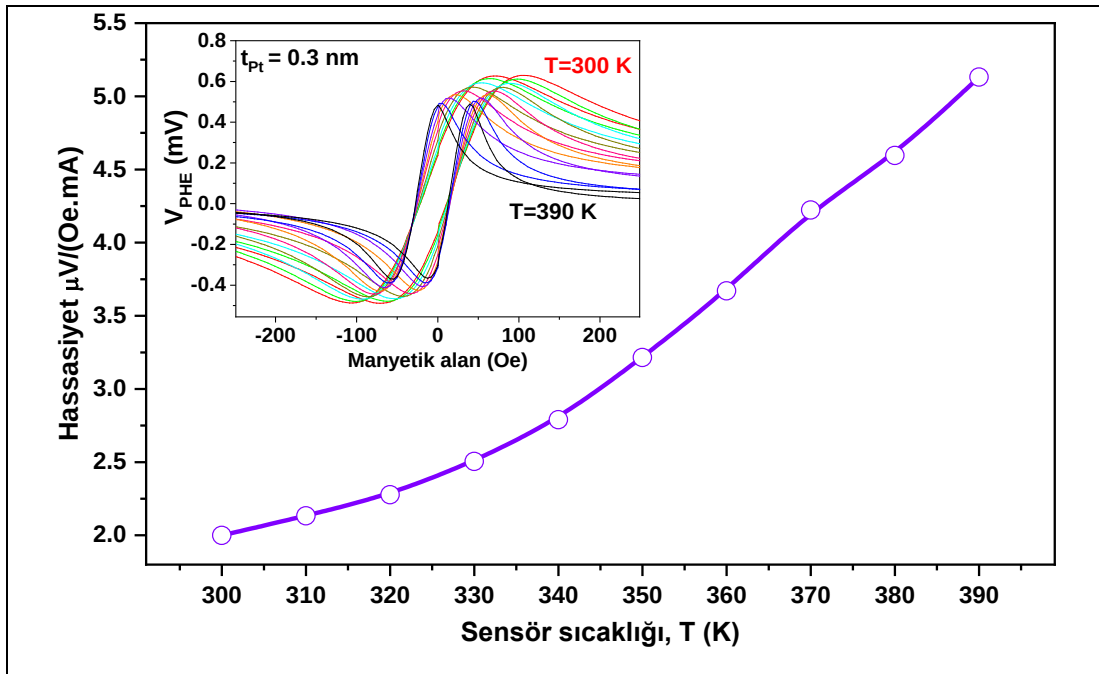
değerleri denklem (2.23) ve (2.41)'de gösterildiği gibi doğrudan $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ ifadesinin bir fonksiyonu olduklarından, bu deneyde gözlenen AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerlerindeki salınımlı artış davranışları da birbirini desteklemektedir. Cu ara tabakasının aksine, IrMn ile NiFe arasına yerleştirilen Pt ara tabakasının ΔV_{PHE} değerini arttırması PHE sensörünün manyetik alan hassasiyetini de arttırdığından, bu sonuç tez çalışmasının en önemli sonuçlarından bir tanesidir. Pt ara tabakasının kullanılması sayesinde Cu ara tabakası için gözlenen şönt etkisinden dolayı ΔV_{PHE} değerindeki azalma giderilmiştir. AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerlerindeki salınımlı davranışın sebebini anlamak için bu konu üzerinde daha fazla çalışmaların yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.11: Pt ara tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişen AMR oranı (%) ve ΔV_{PHE} .

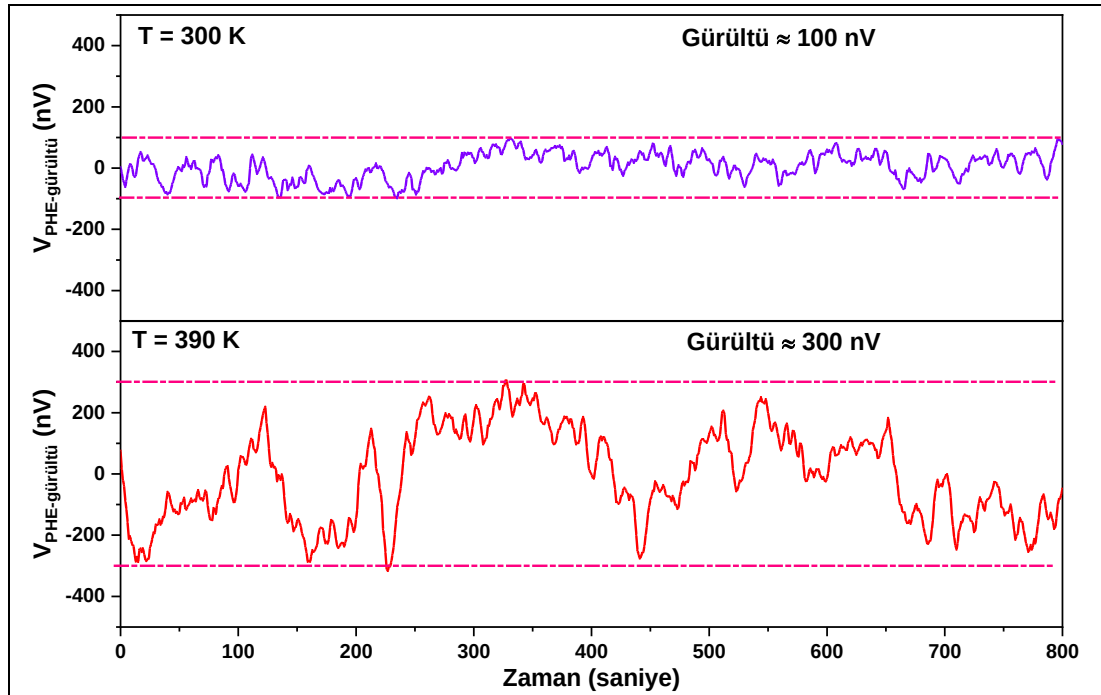
Bu örnek serisindeki NiFe(10)/Pt(0.3)/IrMn(8) (nm) PHE sensör yapısı için, sıcaklığın sensör hassasiyeti üzerine etkileri araştırılmıştır. Sıcaklık 300 K'den 390 K'e kadar 10 K adımlar ile arttırılıp her bir adımda PHE sinyali ölçülmüştür. Sensörlerden elde edilen sinyaller Şekil 4.12. iç şekil)'de gösterilmiştir. Artan sıcaklığa bağlı olarak sensör sinyalinde iki farklı değişim görülmüştür. Birinci değişim, PHE sensör sinyalindeki ΔV_{PHE} değerleri artan sıcaklığın bir fonksiyonu olarak azalmaktadır. Bunun sebebi, sıcaklığın artmasıyla birlikte NiFe tabakasının $\Delta\rho = \rho_{\parallel} -$

$\rho_{\perp}$ değerinde bir azalma olmasıdır. İkinci değişim ise PHE sinyallerinin tepe noktalarının gözlemlendiği manyetik alan değerleri daha düşük alanlara doğru kaymaktadır. Sinyaldeki tepe noktasının daha düşük manyetik alanlara doğru kaymasının sebebi ise sıcaklığın artmasıyla birlikte IrMn ve NiFe arasındaki exchange etkileşmesinin (H_{EB}) azalmasıdır. Burada $\Delta\rho$ değerinin azalması sensör hassasiyetine azaltıcı yönde etki ederken, H_{EB} değerindeki azalma sensör hassasiyetini arttırıcı yönde etki etmektedir. Sıcaklık arttırıldıkça H_{EB} değerindeki değişimin $\Delta\rho$ değerindeki değişimden daha hızlı olması toplamda PHE sensörünün manyetik alan hassasiyetini ciddi bir şekilde arttırmıştır. PHE sensörlerinin her 10 K sıcaklık artışına karşılık hesaplanan mA başına manyetik alan hassasiyeti Şekil 4.12’de sunulmuştur. Oda sıcaklığındaki (300 K) 0.3 nm Pt ara tabakası içeren PHE sensörü için manyetik alan hassasiyeti yaklaşık $2.0 \mu V/(Oe \cdot mA)$ olarak hesaplanırken, 390 K sıcaklığı için sensör hassasiyeti ciddi bir artış göstererek $5.2 \mu V/(Oe \cdot mA)$ olarak hesaplanmıştır. 390 K için elde edilen bu hassasiyet değeri yaklaşık olarak 1.0 nm kalınlığında ara tabaka içeren sensör yapısına eş değerdir. Sensörlerin 390 K sıcaklığında bile kararlı bir şekilde çalışıyor olması bu tez çalışmasının en önemli sonuçlarından bir tanesidir ve bu sonuç yüksek sıcaklıktaki PHE sensör uygulamaları için de önem arz etmektedir.



Şekil 4.12: NiFe(10)/Pt(0.3)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensöründen elde edilen sıcaklığa bağlı sensör sinyali ve manyetik alan hassasiyeti.

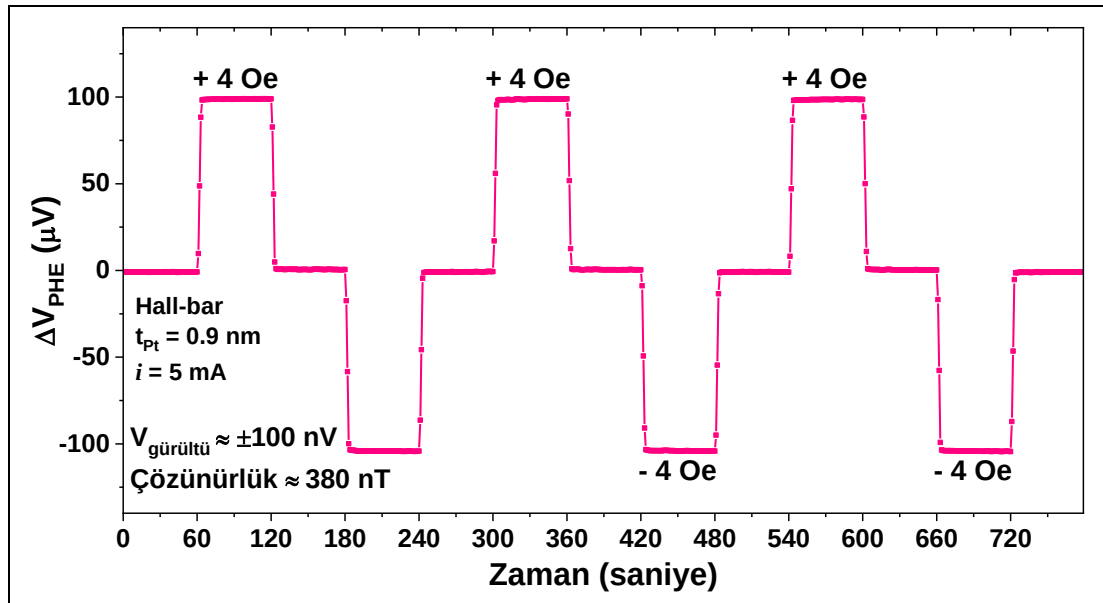
PHE sensörü uygulamalarındaki en önemli parametrelerden bir tanesi de sensörden okunan sinyalin gürültü (noise) mertebesidir. NiFe(10)/Pt(0.3)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensörünün gürültü mertebesini belirlemek için Keithley 2400 sourcemeter kullanılarak 5 mA sabit akım uygulanmış ve Keithley 2182A nanovoltmetre kullanılarak, zamana bağlı PHE sensör sinyali sıfır manyetik alan altında 800 saniye boyunca saniyede 1 ölçüm alınarak kaydedilmiştir. 300 K ve 390 K’de ölçülmüş sinyal gürültüleri Şekil 4.13’te sunulmuştur. PHE sensörünün 300 K sıcaklığındaki gürültüsü 100 nV mertebesinde iken, 390 K sıcaklığındaki gürültüsü yaklaşık olarak 300 nV olarak ölçülmüştür. Bu gürültü seviyeleriyle 0.3 nm Pt ara tabaka kalınlığı içeren PHE sensörü için oda sıcaklığında 1 μ T manyetik alan çözünürlüğü elde edilirken, 390 K sıcaklıkta 1.2 μ T manyetik alan çözünürlüğü elde edilmiştir.



Şekil 4.13: 300 K ve 390 K sıcaklığındaki ve NiFe(10)/Pt(0.3)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensörü için elde edilen sinyallerin gürültü seviyeleri.

PHE sensörlerinin gerçek uygulamalarında, farklı manyetik alan şiddetleri için sensörden okunan sinyallerin kararlılığı ve sensör sinyalinin tekrar edilebilirliği çok önemlidir. Üretilen sensörlerin manyetik alan altında bir manyetik alan değerinden diğerine geçerken nasıl tepki gösterdiğini ortaya koymak için, 0.9 nm kalınlığında Pt ara tabakasına sahip Hall bar geometrisindeki sensörün gerçek zamanlı PHE voltajı

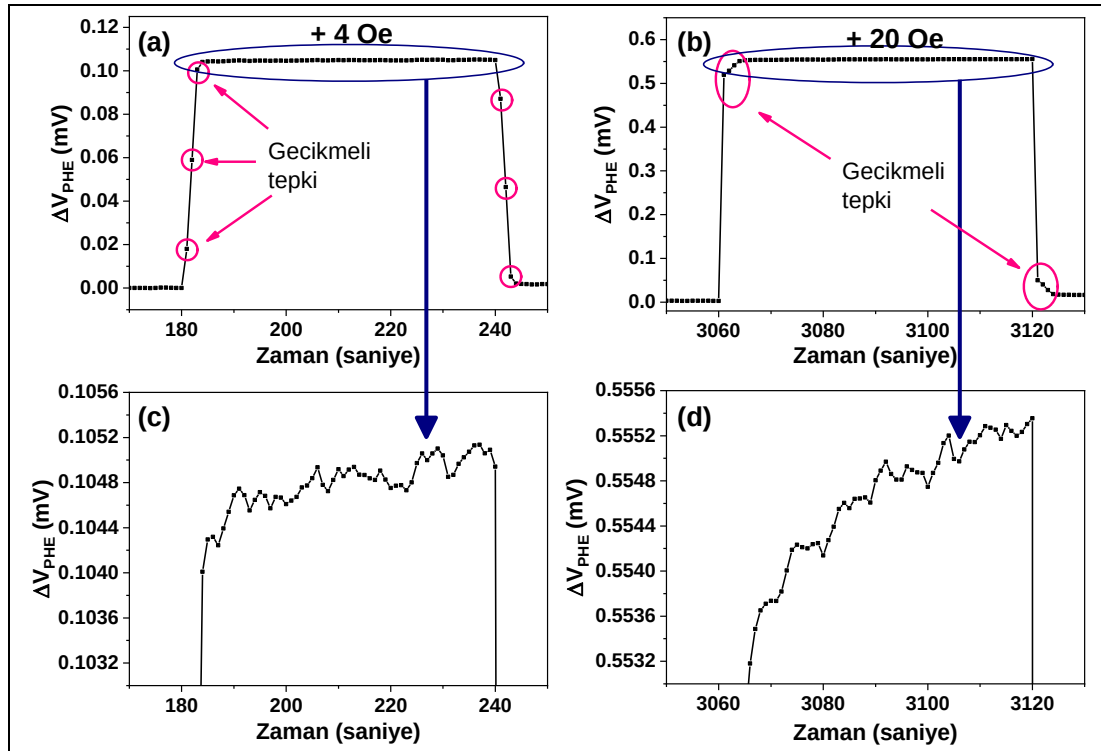
kaydedilmiştir. Elde edilen sensör davranışı Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Deneyde, öncelikle sıfır manyetik alan altında sensör voltajı 1 dakika boyunca kaydedilmiştir ve bu değer referans (0 V) olarak atanmıştır. İkinci adımda, akıma dik yönde 4 Oe manyetik alan uygulanmıştır. Üçüncü adımda tekrar manyetik alan kaldırılmıştır. Dördüncü adımda yine akıma dik fakat tersi yönde 4 Oe manyetik alan uygulanmıştır. Beşinci adımda manyetik alan tekrar kaldırılmıştır. Son olarak, bu adımlar 3'er defa tekrar edilmiştir. Şekil 4.14'te açıkça görüldüğü gibi sensör sinyali manyetik alanın yönüne ve şiddetine oldukça duyarlıdır ve sensör sinyalleri tekrar edilebilir durumdadır. Ayrıca, sensörler artı ve eksi yönde uygulanan sabit manyetik alan değerleri için sabit bir voltaj sağlamaktadır. Manyetik alan kaldırıldığında her seferde sensör sinyali başlangıç voltajına geri dönmektedir. Bu sonuçlar sensörlerden elde edilen sinyalin oldukça kararlı olduğunu göstermektedir. Burada sensör sinyalinden ölçülen gürültü seviyesi 100 nV civarındadır. Bu gürültü seviyesiyle 0.9 nm Pt ara tabakası içeren PHE sensörü yaklaşık 380 nT manyetik alan çözünürlüğüne ulaşmıştır.



Şekil 4.14: NiFe(10)/Pt(0.9)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensörü için elde edilmiş gerçek zamanlı PHE sinyali. Ölçüm oda sıcaklığında yapılmıştır.

PHE sinyalleri üzerinde manyetik alanın uygulandığı/kaldırıldığı andan itibaren Şekil 4.15.a)'da gösterildiği gibi birkaç tane ölçüm noktası görülmektedir. Bu ölçüm noktaları sensörün uygulanan manyetik alana gecikmeli olarak tepki verdiğini göstermektedir. Bu gecikmeli sensör tepkisi literatürde “manyetik gecikme etkisi”

(magnetic aftereffect) olarak bilinmektedir [40]. Bu gecikmeli davranışın uygulanan manyetik alanın şiddetine de bağlı olduğu belirlenmiştir. Uygulanan 4 Oe manyetik alan için gözlenen sinyal üzerindeki data noktaları, Şekil 4.15.b)’de gösterilen, 20 Oe manyetik alanda ölçülen sinyale kıyasla daha yayvan bir şekilde ortaya çıkmıştır. Ayrıca, sensörün uygulanan manyetik alana karşılık ürettiği sinyalin kararlı bölgesi Şekil 4.15.c) ve d)’de gösterildiği gibi genişletilip incelendiğinde, sensör sinyalinde hâlâ bir artma olduğu görülmektedir. Diğer bir ifade ile “manyetik gecikme etkisi” oldukça uzun bir süre gözlenebilmektedir. Fakat, sensörün 4 Oe ve 20 Oe manyetik alan değerlerine karşılık ürettiği sinyaller manyetik gecikme etkisinden dolayı gözlenen artışa kıyasla çok fazla olduğundan bu gecikmeli tepki ihmal edilebilir durumdadır.

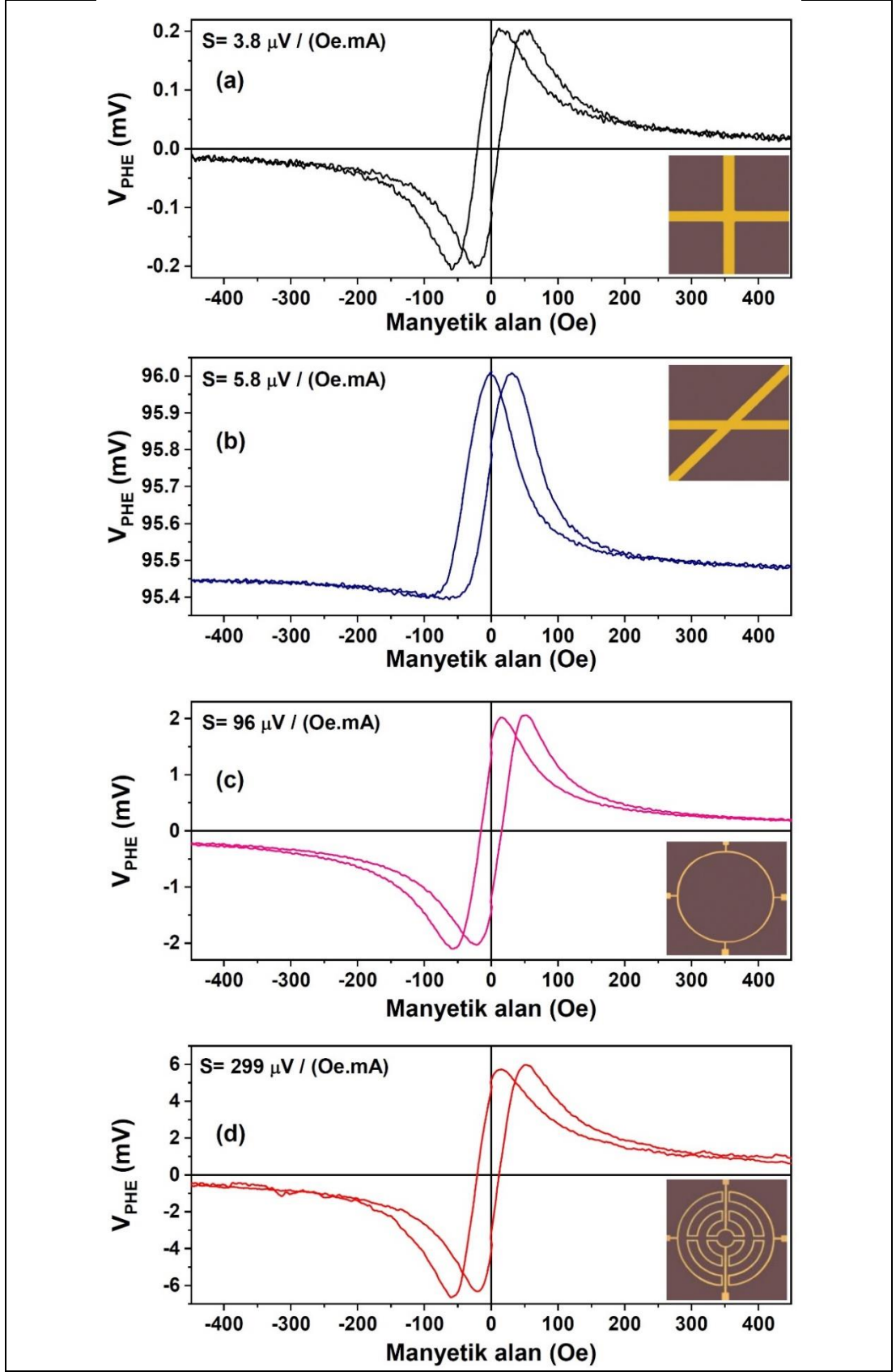


Şekil 4.15: NiFe(10)/Pt(0.9)/IrMn(8) (nm) yapısındaki PHE sensörü için manyetik gecikme ölçümleri. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

4.2.5. Sensör Geometrilerinin Manyetik Alan Hassasiyetine Etkisi

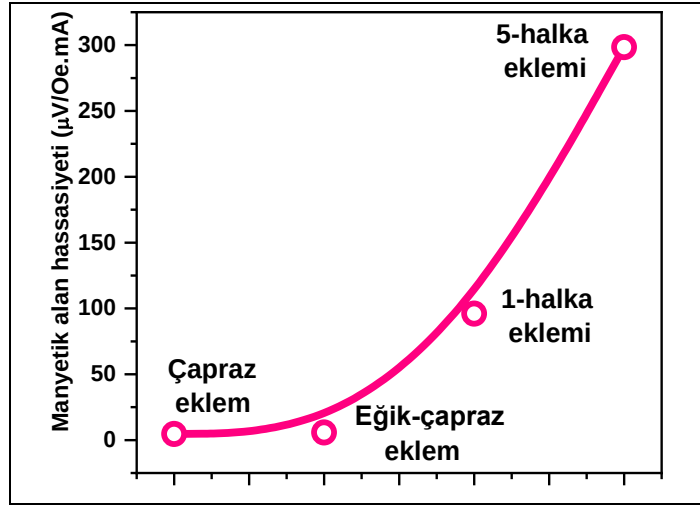
Üç tabakalı NiFe(10)/Pt(0.8)/IrMn(8) (nm) yapısı kullanılarak Şekil 4.3.b)'de gösterilen çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrisindeki PHE sensörleri üretilip, sensör geometrisinin manyetik alan hassasiyetine etkileri araştırılmıştır. PHE sensörlerine, Keithley 2400 sourcemeter kullanılarak 1 mA sabit akım uygulanıp sensör voltajları Keithley 2002 multimetreyle kaydedilmiştir. Her bir sensör geometrisi ve o geometri için ölçülen PHE sinyali Şekil 4.16'da sunulmuştur. 0.8 nm Pt ara tabakası içeren çapraz eklem geometrisindeki PHE sensöründen elde edilen $3.8 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$ manyetik alan hassasiyeti, daha önceki Hall bar geometrisinden elde edilen ($4.6 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$) hassasiyet değeriyle oldukça yakındır. Aradaki bu fark, çapraz eklemdeki $5 \mu\text{m}$ çizgi genişliğinden dolayı oluşan şekil anizotropisinden kaynaklı olabileceği gibi [56], Hall bar geometrisiyle aynı manyetik özelliklere sahip sensör yapısının oluşturulamaması ihtimali de vardır. Dolayısıyla eş zamanlı olarak üretilen diğer geometrilerdeki sensörlerin manyetik alan hassasiyetleri, eş zamanlı çapraz eklemde elde edilen hassasiyet değeri ile kıyas edilmiştir. Eğik çapraz eklem geometrisi için elde edilen sinyal görünümü ise

Şekil 2.24.c)'de tarif edilen sensör sinyali ile çok benzerdir. Eğik çapraz eklem geometrisindeki sensör için elde edilen sinyalin doğrusal bölgesinin $5.8 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$ manyetik alan hassasiyetine sahip olduğu belirlenmiştir. 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi için elde edilen sinyallerin doğrusal bölgelerinden ise sırasıyla $96 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$ ve $299 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$ manyetik alan hassasiyetleri elde edilmiştir.



Şekil 4.16: NiFe(10)/Pt(0.8)/IrMn(8) (nm) yapısında ve a) çapraz eklem b) eğik-çapraz eklem c) 1-halka eklemi d) 5-halka eklemi geometrilerindeki PHE sensörleri için elde edilen PHE sinyalleri. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

Farklı geometrilerdeki sensörler için elde edilen manyetik alan hassasiyetleri Şekil 4.17’de özetlenmiştir. Açıkça görüldüğü gibi manyetik köprü geometrilerinde üretilen sensörlerden elde edilen hassasiyet değeri çapraz eklemlere kıyasla çok daha fazladır. Çapraz eklem ile kıyas edildiğinde hassasiyet 1-halka eklemi için yaklaşık 25 kat ve 5-halka eklemi için yaklaşık 79 kat artmıştır.



Şekil 4.17: NiFe(10)/Pt(0.8)/IrMn(8) (nm) yapısında ve farklı geometrilerde üretilen PHE sensörlerinden elde edilen hassasiyet değerleri.

4.2.6. Sonuçlar

Bu kısımda üç tabakalı NiFe(10)/Pt(t_{Pt})/IrMn(8) (nm) sensör yapısındaki Pt ara tabakasının kalınlığı 0.0 nm – 1.0 nm aralığında değiştirilmiş ve Pt ara tabaka kalınlığının PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetini nasıl etkilediği araştırılmıştır. NiFe ile IrMn arasına yerleştirilen Pt ara tabakasının PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetini önemli miktarda arttırdığı gözlenmiştir. Oda sıcaklığındaki ve Hall bar geometrisindeki sensörler arasında 0.9 nm Pt ara tabakası içeren sensör yapısının en yüksek manyetik alan hassasiyetine sahip olduğu gözlenmiştir. Literatürde Cu ara tabakası kullanıldığında şönt etkisinden dolayı gözlenen ΔV_{PHE} değerindeki azalmanın aksine, Pt ara tabakası kullanıldığında ΔV_{PHE} değerinde bir artış gözlenmiş ve bu artış NiFe/Pt arayüzeyindeki spin saçılmaları nedeniyle $\Delta \rho$ değerindeki artışa atfedilmiştir. Bu sayede Cu ara tabakasının PHE sinyali üzerindeki negatif etkileri giderilmiştir. Ayrıca, 0.3 nm kalınlığında Pt ara tabakası içeren PHE sensörünün sıcaklığa bağlı davranışları, sensörün 390 K

sıcaklığında bile kararlı bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Sensörlerin zamana bağlı ölçümlerinde, sensörün uygulanan sabit manyetik alanın şiddetine ve yönüne duyarlı olduğu gösterilmiş ve üretilen PHE sensörlerinin sağladığı sinyallerin oldukça kararlı olduğu tespit edilmiştir. Bu özellikleriyle tez çalışması kapsamında Pt ara tabakası içeren Hall bar geometrisindeki PHE sensörlerinin mikro-elektronik pusula, çip üstü manyetometre, biyosensör, kaçak manyetik akı sensörü (magnetic flux leakage sensor), zayıf akım görüntüleme, kalp atışı ve kan basıncı ölçme gibi uygulamalarda kullanmaya uygun olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak 0.8 nm Pt ara tabakası içeren sensör yapısı için literatürdeki çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5 halka eklemi geometrilerindeki sensörler üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Teorik bilgilerde anlatıldığı gibi (başlık 2.8.2) , eğik çapraz eklemlerden elde edilen manyetik alan hassasiyeti, aynı sensör yapısıyla üretilmiş çapraz eklemlerden daha yüksek olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrisindeki sensörlerden elde edilen manyetik alan hassasiyetinin çapraz eklemlerden elde edilen hassasiyet değerinden sırasıyla 25 kat ve 79 daha fazla oldukları da deneysel olarak gösterilmiştir.

4.3. NiFe/Cr/IrMn Yapısındaki PHE Sensörlerinin Yapısal, Manyetik ve Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması

4.3.1. Giriş

Üç tabakalı NiFe/NM/IrMn PHE sensör yapılarında kullanılan Cu ara tabakasının PHE sensörleri üzerindeki olumsuz etkilerini gidermek için, ikinci örnek serisinde öz direnci Cu'ya kıyasla çok daha yüksek olan ve zayıf spin-yörünge etkileşmesine sahip olan Cr elementi kullanılmıştır. Üç tabakalı NiFe(10)/Cr(t_{Pt})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr} :0-1nm) yapısındaki PHE sensörleri yalnızca Şekil 4.3.a)'da gösterilen altı uçlu Hall bar geometrisinde üretilip, sensörlerin yapısal manyetik ve elektriksel özellikleri araştırıldı. Bu seri için yeni bir Ni₈₀Fe₂₀ hedef malzemesi kullanılmıştır. Bu sebeple sensör yapılarını üretmeden önce, X-ışını yansıması (XRR) tekniği ile her bir sensör malzemesinin büyüme oranı ve pürüzlük değerleri tekrar belirlendi. Bu sensör serisinde 8 nm yerine 20 nm kalınlığında IrMn tabakası kullanıldığına dikkat edilmelidir. Bu serideki örneklerde 8 nm kalınlığında IrMn tabakası kullanıldığında elde edilen histerezis eğrilerinde Şekil 4.18.a)'da gösterildiği gibi EB olayı gözlenmesine rağmen histerezis eğrileri tamamen sol tarafa kaymamıştır. Bu PHE sensörleri için istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple IrMn tabakası 20 nm kalınlığa arttırılmış ve histerezis eğrisinin tamamının sol tarafa kayması sağlanmıştır. 20 nm kalınlığındaki IrMn tabakası MOKE ölçümleri için çok kalın olduğundan, bu sensör yapılarından MOKE tekniği kullanılarak histerezis eğrileri elde edilememiştir. Bu sebeple üretilen sensörlerin H_C ve H_{EB} değerleri kolay eksen boyunca ölçülen AMR sinyalleri incelenerek belirlenmiştir. Ayrıca, Hall bar geometrisinde üretilen sensörler için gerçekleştirilen AMR, PHE ve zamana bağlı PHE sinyallerinin ölçüm sonuçları analiz edilip, sensörlerin oda sıcaklığındaki manyetik alan hassasiyetleri, gürültü seviyeleri ve manyetik alan çözünürlükleri belirlenip, elde edilen sonuçlar literatürle kıyas edilmiştir.

4.3.2. Sensör Malzemelerinin Yapısal Özellikleri

Bu serideki sensör yapılarını üretmeden önce sıçratma sistemi açılıp içerisine yeni bir NiFe hedef malzemesi takıldığı için NiFe ve IrMn hedefleri de dâhil sistemdeki her bir hedef malzemenin yapısal karakterizasyonları yeniden yapılmıştır. Sensör malzemelerinin yapısal özellikleri başlık 4.2.2’de anlatıldığı gibi XRR ölçümlerinden elde edilen salınımların Global fit programında analiz edilmesiyle belirlenmiştir. Bu serideki sensör malzemeleri için uygulanan güç değerleri, büyütme süreleri, tabakalar için belirlenen kalınlık, pürüzlülük, yoğunluk değerleri ve tabakaların büyüme hızları Tablo 4.2’de özetlenmiştir. Burada, sıçratma sistemindeki Pt, IrMn, NiFe ve Cr hedef malzemelerine uygulanan sırasıyla 10 watt dc, 20 watt dc, 10 watt dc ve 10 watt dc güç değerleri ve 5×10^{-3} mbar Ar basıncı için oda sıcaklığında sırasıyla 0.71 nm/dk, 0.90 nm/dk, 0.31 nm/dk ve 0.31 nm/dk büyüme hızları elde edilmiştir.

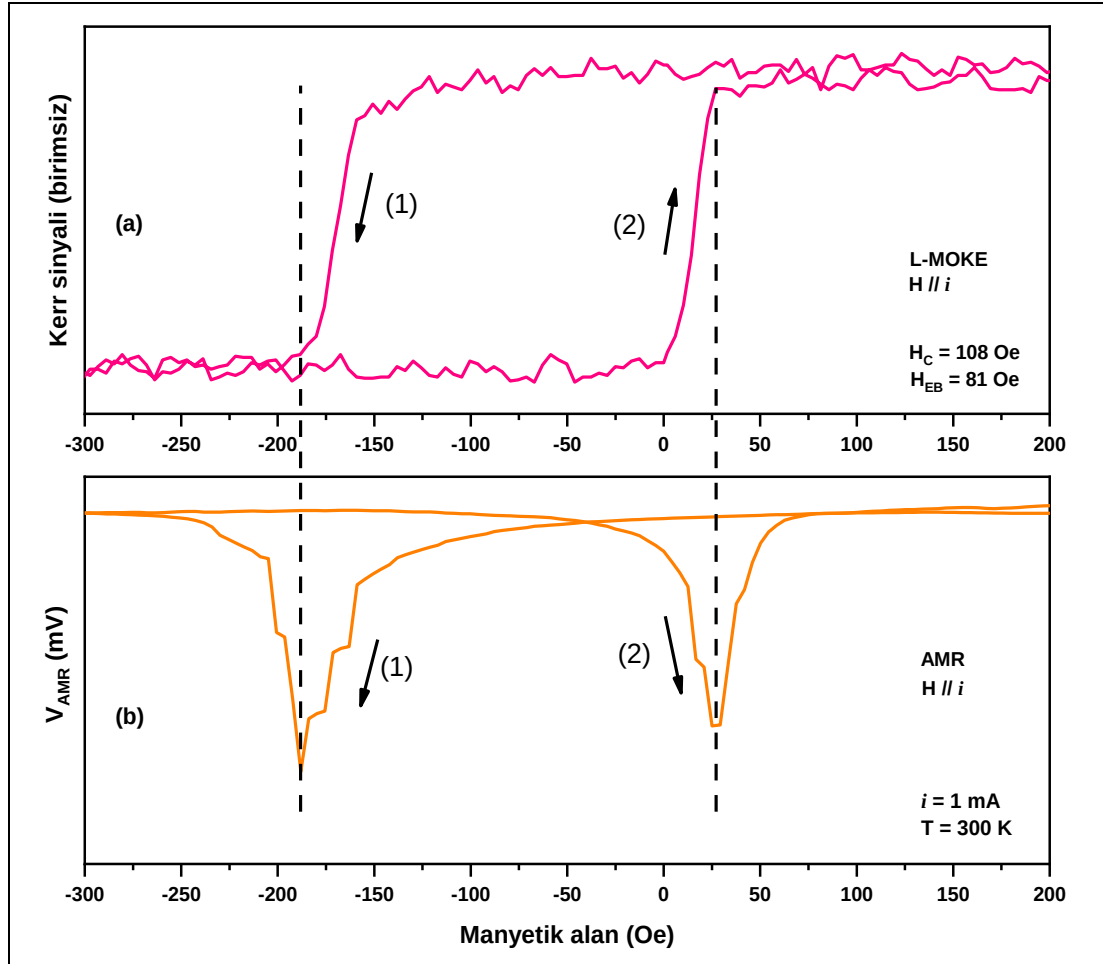
Tablo 4.2: İkinci örnek serisindeki sensör yapılarında kullanılan hedef malzemeler için uygulanan güç değerleri, elde edilen tabaka kalınlıkları, yoğunlukları, pürüzlük değerleri ve tabakaların büyüme hızları.

Hedef malzeme	Güç (watt) (dc)	Büyütme süresi (dk)	Kalınlık (nm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Pürüzlülük (nm)	Büyüme oranı (nm/dk)
Pt	10	15	10.65	21.45	~0.4	0.71
IrMn	20	15	13.52	10.59	~0.5	0.90
NiFe	10	45	13.05	8.68	~1.0	0.31
Cr	10	25	7.74	7.19	~0.5	0.31
SiO ₂	-	-	--	2.2	~0.6	-

4.3.3. Sensör Yapılarının Manyetik Özellikleri

Üç tabakalı NiFe(10)/Cr(t_{Pt})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr}:0-1nm) sensör yapısındaki IrMn tabakasının kalınlığı 20 nm olduğundan dolayı MOKE ölçümlerinde histerezis eğrisi gözlenememiştir. Bu sebeple sensör yapılarının H_C ve H_{EB} değerlerini elde etmek için kolay eksen boyunca uygulanan manyetik alan altında ölçülen AMR sinyalleri analiz edilmiştir. Bunu yapmak için Hall bar geometrisindeki sensör yapılarına Keithley 2400 akım kaynağı kullanılarak 1 mA sabit akım uygulanmış ve Keithley 2182a nanovoltmetre kullanılarak AMR sinyalleri kaydedilmiştir. AMR sinyalleriyle

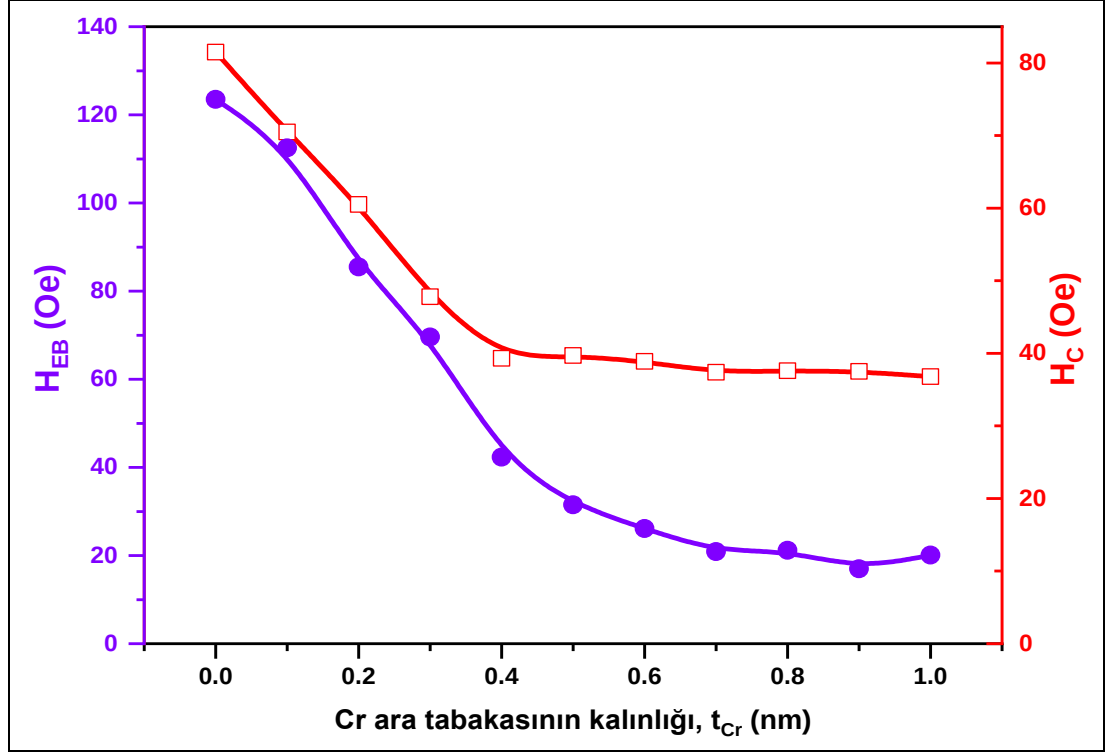
histerezis eğrilerinin uyumunu göstermek için Şekil 4.18’de NiFe(10)/IrMn(8) (nm) sensör yapısına ait histerezis eğrisi ve AMR sinyali birlikte sunulmuştur. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi AMR sinyalindeki dip noktalar yaklaşık olarak histerezis eğrisindeki mıknatıslanmanın yön değiştirdiği manyetik alan değerlerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.18: Manyetik alanın akıma paralel uygulandığı durumda NiFe(10)/IrMn(8) (nm) yapısı için elde edilen a) kolay eksen histerezis eğrisi ve b) AMR sinyali.

Üç tabakalı NiFe(10)/Cr(t_{Pt})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr} :0-1nm) sensör yapıları için AMR sinyallerinden belirlenmiş H_C ve H_{EB} değerleri ise Şekil 4.19’da özetlenmiştir. Bu örnek serisi için üretilen iki tabakalı NiFe(10)/IrMn(20) (nm) PHE sensör yapısından elde edilen $H_C=80$ Oe ve $H_{EB}=120$ Oe değerleri serideki diğer sensör yapıları için referans olarak kabul edilmiştir. Cr ara tabakasının kalınlığı 1 nm ’ye kadar arttırıldıkça $H_C=39$ Oe değerine kadar azalırken, $H_{EB}=20$ Oe değerine kadar azalmıştır. 0.4 nm kalınlığındaki Cr ara tabakası için histerezis eğrileri tamamen sol

tafaftayken ($H_C \approx H_{EB}$) bundan daha kalın Cr ara tabakaları için histerezis eğrileri sıfır manyetik alan eksenini geçmiştir ($H_C > H_{EB}$).



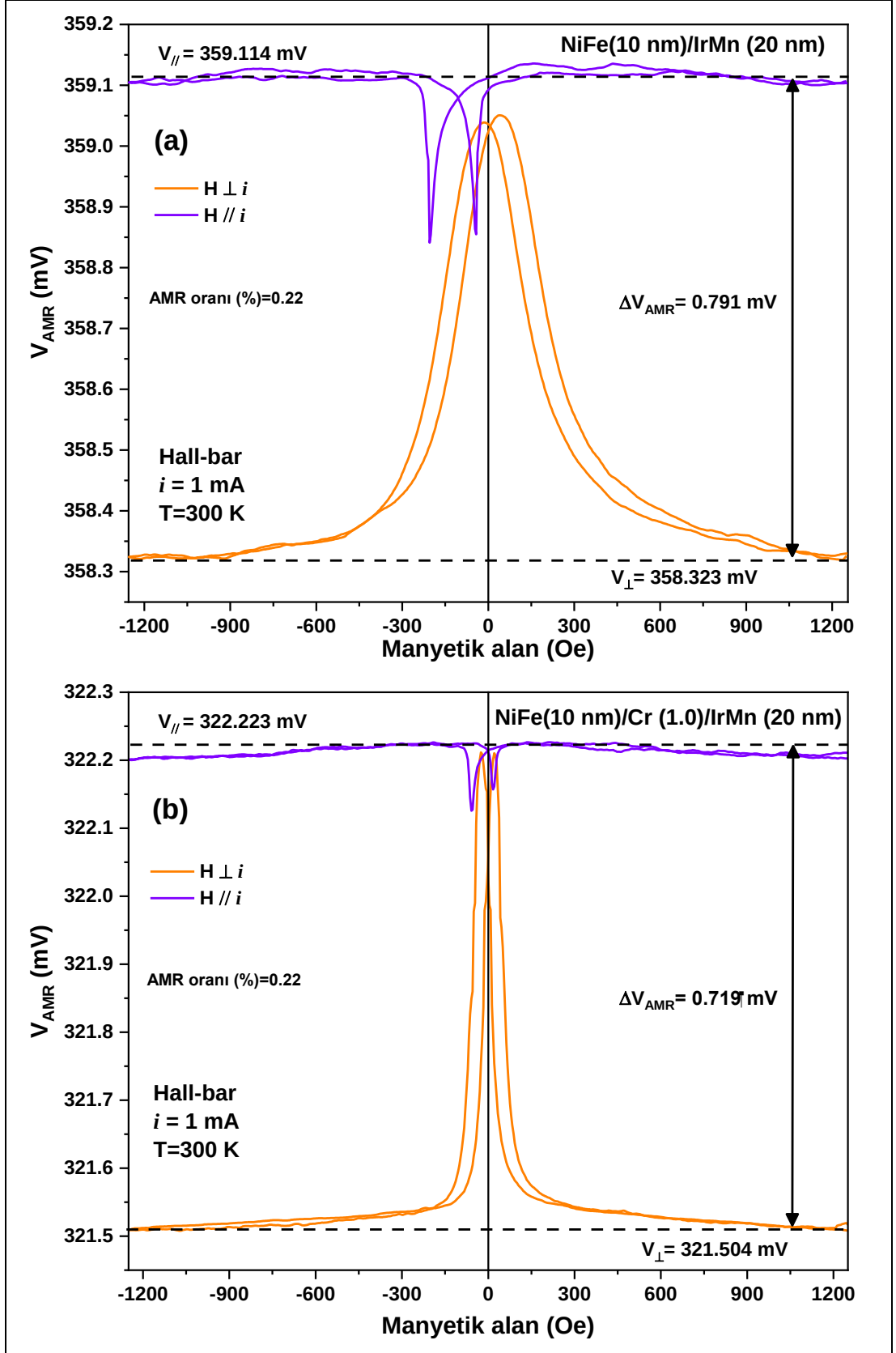
Şekil 4.19. NiFe(10)/Cr(t_{Cr})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr} :0-1nm) sensör yapılarının H_C ve H_{EB} değelerinin Cr ara tabakasının bir fonksiyonu olarak değişimi.

4.3.4. Sensör Yapılarının Elektriksel Özellikleri

NiFe(10)/Cr(t_{Cr})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr} :0-1nm) yapılarında üretilen PHE sensörlerinin elektriksel özelliklerini incelemek için Hall bar geometrisindeki sensörler üzerine 1 mA dc akım uygulanıp, manyetik alan altında AMR ve PHE voltajları kaydedilmiştir. Bu serideki sensör yapılarının AMR oranlarının ve PHE sensör hassasiyetlerinin nasıl hesaplandığı başlık 4.2.4 içerisinde verildiği için burada yalnızca analiz sonuçları ve yorumları sunulmuştur.

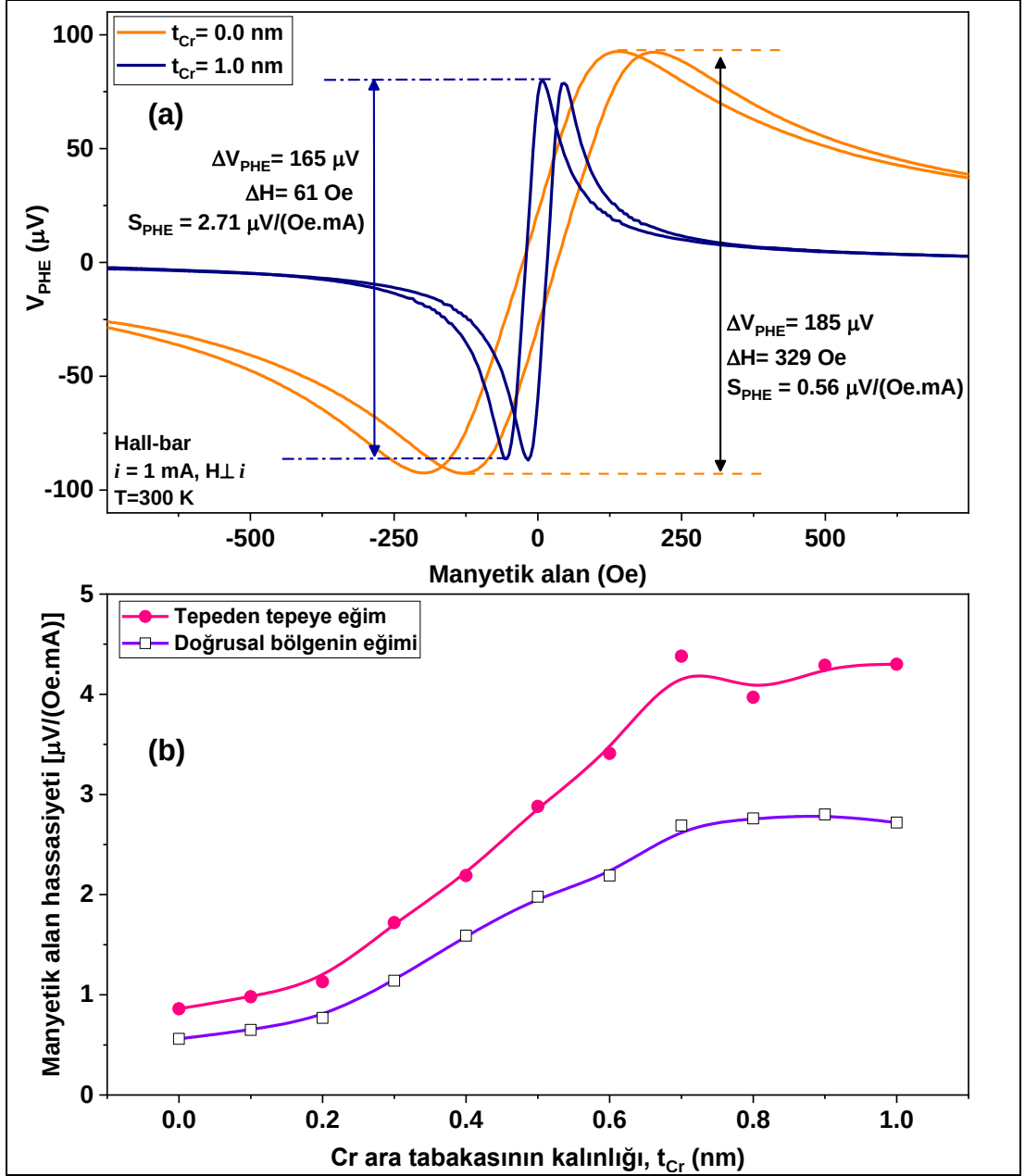
Cr ara tabakası içeren sensör yapıları için AMR ölçümleri manyetik alanın akıma dik ve paralel uygulandığı iki farklı durum için yapılmıştır. Şekil 4.20’de t_{Cr} = 0.0 nm ve t_{Cr} =1.0 nm kalınlıklarında Cr ara tabakalarına sahip sensör yapıları için elde edilmiş AMR sinyalleri gösterilmiştir. Manyetik alanın akıma dik uygulandığı durum için, sıfır manyetik alanda ölçülen AMR sinyallerinin en yüksek AMR voltajı değerlerine kadar ulaşıyor olması, sensörlerin kolay ekseninin başarılı bir şekilde akım yoluna paralel

hizalandığını göstermektedir. Ayrıca, manyetik alanın akıma dik uygulandığı durum için, 1 nm kalınlığında Cr ara tabakası içeren sensör yapısının manyetik momentleri iki tabakalı sensör yapısındakine kıyasla Şekil 4.20’de gösterildiği gibi daha zayıf manyetik alanlarda doyuma ulaşmaktadır. Bu sonuç Cr ara tabakası içeren sensör yapılarındaki manyetik momentlerin iki tabakalı sensör yapısına kıyasla uygulanan manyetik alana daha duyarlı olduğunu göstermektedir. İki tabakalı NiFe(10 nm)/IrMn(20 nm) sensör yapısından elde edilen AMR sinyali 358-359 mV mertebesindeyken üç tabakalı NiFe(10 nm)/Cr(1 nm)/IrMn(20 nm) sensör yapısından elde edilen AMR sinyali 321-322 mV mertebesinde dir. Dirençteki bu azalma Cr tabakasının bir şönt oluşturmasından kaynaklıdır. Daha önce de başlık 2.7’de anlatıldığı gibi, sensör yapısına eklenen Cr tabakası bir şönt oluşturduğundan dirençteki bu azalma şönt etkisine atfedilmiştir. Fakat, AMR voltajındaki bu azalmaya rağmen AMR oranı bu iki sensör yapısı için neredeyse aynı kalmıştır. Cr ara tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak AMR oranındaki değişim Şekil 4.22’de özetlenmiştir ve AMR oranındaki değişim daha sonra ΔV_{PHE} değerindeki değişimle birlikte ele alınacaktır.



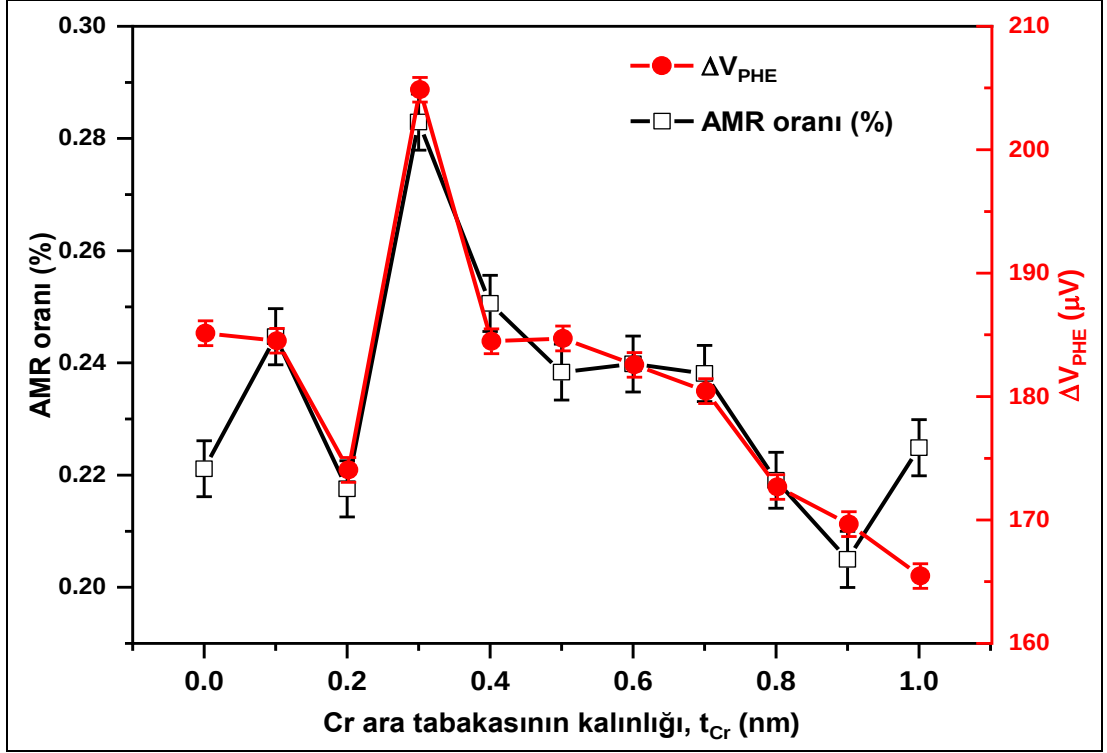
Şekil 4.20: a) $t_{\text{Cr}} = 0.0 \text{ nm}$ ve b) $t_{\text{Cr}} = 1.0 \text{ nm}$ kalınlığında Cr ara tabakaları içeren sensör yapıları için elde edilmiş AMR sinyalleri.

Sensörlerin PHE sinyalleri ise manyetik alanın yalnızca akıma dik yönde uygulandığı durum için ölçülmüştür. 0.0 nm ve 1.0 nm kalınlığında Cr ara tabakasına sahip sensör yapıları için elde edilmiş PHE sinyalleri Şekil 4.21.a)'da sunulmuştur. Burada Cr ara tabakasının kalınlığı 1 nm 'ye kadar arttırıldığında, Pt ara tabakasının aksine, ΔV_{PHE} değerinde bir azalma gözlenmiştir. ΔV_{PHE} değerindeki bu azalma sensörün manyetik alan hassasiyetini azaltıcı bir şekilde etki etse de H_C ve H_{EB} değerlerindeki azalma sensörün hassasiyetinde bir artışa sebep olmuştur. Sensörlerin manyetik alan hassasiyetleri sinyallerin tepe noktalarından ve doğrusal bölgelerinden hesaplanarak Şekil 4.21.b)'de özetlenmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, 0.7 nm kalınlığında Cr ara tabakasına sahip PHE sensörü en yüksek manyetik alan hassasiyetine sahiptir. Bundan daha kalın Cr ara tabakaları için şönt etkisinin baskın hale gelmesinden dolayı hassasiyet değerinde yavaşça bir azalma meydana gelmiştir. İki tabakalı NiFe (10 nm)/IrMn (20 nm) yapısına sahip PHE sensörü için 0.86 $\mu V/(Oe \cdot mA)$ manyetik alan hassasiyeti elde edilirken, 0.7 nm kalınlığında Cr ara tabakasına sahip PHE sensörü için hassasiyet 4.4 $\mu V/(Oe \cdot mA)$ değerine kadar yükselmiştir.



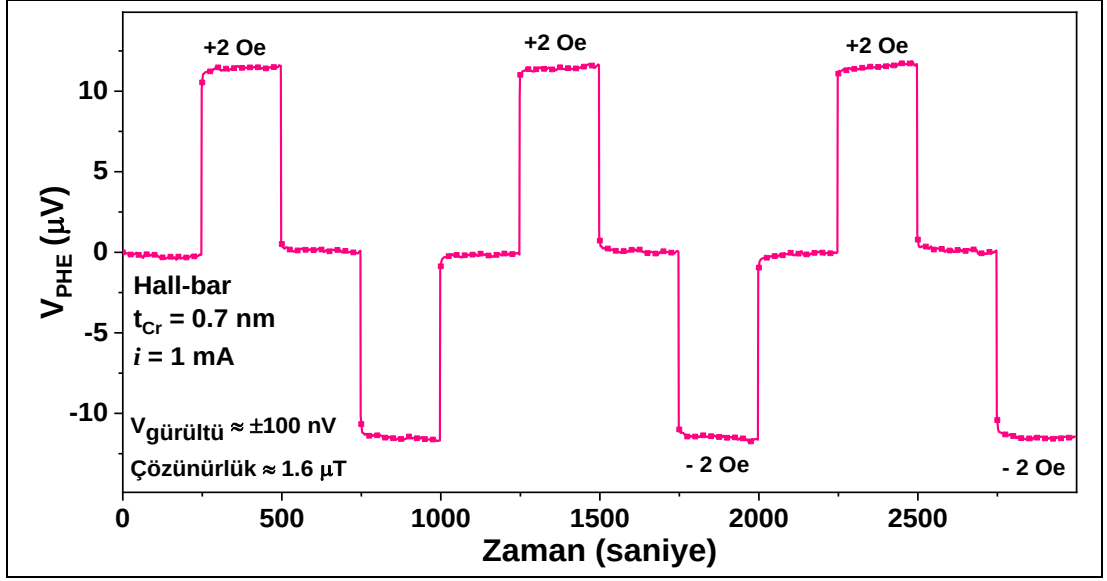
Şekil 4.21: a) $t_{Cr} = 0.0$ nm ve $t_{Cr} = 1.0$ nm kalınlığında Cr ara tabakaları içeren sensör yapıları için elde edilmiş PHE sinyalleri. b) Sinyallerin tepeden tepeye ve doğrusal bölgelerinden hesaplanmış manyetik alan hassasiyetleri (eğim).

Sensör yapılarının AMR oranları ve ΔV_{PHE} değerlerindeki değişim Cr ara tabakasının kalınlığının bir fonksiyonu olarak Şekil 4.22’de sunulmuştur. Burada AMR oranları ve ΔV_{PHE} değerlerindeki değişimin birbirini desteklediği gözlenmiştir. 0.3 nm Cr ara tabakası içeren sensör yapısı için en yüksek AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerleri elde edilirken, Cr ara tabaka kalınlığının arttırılması bu iki parametrenin sistematik olarak azalmasına sebep olmuştur. AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerlerindeki bu azalmanın sebebi, başlık 2.7 içerisinde bahsedildiği gibi, şönt etkisine atfedilmiştir.



Şekil 4.22: NiFe(10)/Cr(t_{Cr})/IrMn(20) (nm) (t_{Cr} :0-1nm) sensör yapıları için elde edilen AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerlerinin Cr ara tabakasının bir fonksiyonu olarak değişimi.

Cr ara tabakası içeren sensörlerin uygulanan manyetik alana karşılık nasıl tepki verdiğini ortaya koymak için 0.7 nm kalınlığında Cr ara tabakası içeren sensörün zamana bağlı PHE voltajı kaydedilip, Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Ölçümler ± 2 Oe manyetik alan, 1 mA akım ve Şekil 4.14 için anlatılan ölçüm prosedürü kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır. PHE sinyalinin zaman profilinden de açıkça görüldüğü gibi sensör sinyali manyetik alanın yönüne ve şiddetine oldukça duyarlıdır ve sensör sinyalleri tekrar edilebilir durumdadır. Manyetik alan kaldırıldığında her seferde sensör sinyalinin başlangıç voltajına geri dönmesi PHE sensörü uygulamaları için çok önemli bir sonuçtur. Sensör sinyalinin gürültüsü 100 nV olarak belirlenmiş ve bu gürültü seviyesiyle 0.7 nm Cr ara tabakası içeren PHE sensörü için yaklaşık olarak 1.6 μT manyetik alan çözünürlüğü elde edilmiştir. Ayrıca, Cr ara tabakası içeren sensörlerde de bir miktar manyetik gecikme etkisi gözlenmiştir. Fakat sensörün sağladığı sinyal bu gecikme etkisinden kaynaklı voltaj değişiminden çok büyük olduğundan, gecikme etkisi ihmal edilebilir durumdadır.



Şekil 4.23: NiFe(10)/Cr(0.7)/IrMn(20) (nm) yapısındaki PHE sensörünün gerçek zamanlı PHE sinyali. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

4.3.5. Sonuçlar

Bu kısımda, üç tabakalı NiFe(10)/Cr(t_{Cr})/IrMn(20) (nm) yapısındaki PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyeti Cr ara tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Burada Cr ara tabakasının kalınlığı 0.0 nm ile 1.0 nm arasında 0.1 nm adımlarla değiştirilmiştir. Bu ikinci sensör serisi için 0.7 nm Cr ara tabakası içeren sensör yapısından en yüksek manyetik alan hassasiyeti ($4.4 \mu V / (Oe \cdot mA)$) elde edilmiştir. Cr ara tabakası içeren PHE sensörlerinden elde edilen sinyallerde de aynı Cu ara tabakasındaki gibi, şönt etkisinden dolayı ΔV_{PHE} değerinde bir azalma gözlenmiştir. Fakat Cr ara tabakası içeren sensörler için bu azalma Cu ara tabakasına kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir [4]. 0.7 nm Cr ara tabakası içeren PHE sensöründen elde edilen $4.4 \mu V / (Oe \cdot mA)$ hassasiyet değeri ve $\pm 100 \text{ nV}$ gürültü mertebesiyle (çözünürlük $1.6 \mu T$), bu sensörün çeşitli uygulamalarda kullanılabilir özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir.

4.4. Cu, Pt ve Cr Ara Tabakalarının PHE Sensör Hassasiyetine Etkisi

4.4.1. Giriş

PHE sensörlerinde FM ve AF tabakalarının arasına yerleştirilen NM malzemelerin kalınlığı ve cinsi, FM/AF arasındaki exchange bias etkisine [69] ve sensör malzemelerinin toplam direncine [4] etki etmektedir. Üçüncü sensör serisi için NiFe (FM) ve IrMn (AF) malzemeleri arasına literatürde en çok kullanılan Cu ara tabakası ve bu tez çalışmasıyla literatürde ilk defa kullanılan Pt ve Cr ara tabakaları aynı kalınlıkta kullanılıp, ara tabaka cinsinin sensör hassasiyeti üzerine etkileri incelenmiştir.

Üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Cu, Pt Cr) yapılarındaki PHE sensörleri Şekil 4.3.b)'de gösterilen çapraz eklem geometrisinde ve sürekli film şeklinde eş zamanlı üretilip, sensör yapılarının yapısal, manyetik ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. Sensör yapısında kullanılan her bir malzemenin büyüme oranları ve pürüzlük miktarları XRR ölçümlerinin analiz edilmesiyle tespit edilmiştir. Sensör yapılarının H_C ve H_{EB} değerleri MOKE tekniğiyle elde edilen histerezis eğrileri üzerinden belirlenmiştir. Sensör yapılarının manyetik alan hassasiyetlerini elde etmek için sensörlerin PHE sinyali manyetik alanın bir fonksiyonu olarak kaydedilmiştir. Sensörlerin gürültü seviyelerini ve manyetik alan çözünürlüklerini elde etmek için zamana bağlı PHE ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

4.4.2. Sensör Malzemelerinin Yapısal Özellikleri

Üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Cu, Pt, Cr) yapısındaki sensörler üretilmeden önce, sensör yapısında kullanılan her bir hedef malzemenin oda sıcaklığındaki büyüme hızları ve pürüzlük değerleri başlık 4.2.2'de anlatıldığı gibi XRR ölçümlerinden elde edilen salınımlı sinyallerin GlobalFit 2.0 programında analiz edilmesiyle belirlenmiştir. Bu serideki sensör malzemeleri için uygulanan güç değerleri, büyütme süreleri, tabakalar için belirlenen kalınlık, pürüzlülük, yoğunluk değerleri ve tabakaların büyüme hızları Tablo 4.3'te özetlenmiştir. Burada IrMn hedef malzemesi için 20 watt dc güç uygulanırken, NiFe, Cu, Pt ve Cr hedef malzemeleri için 10 watt dc güç uygulanmıştır. Uygulanan bu güç değerleri ve 5×10^{-3} mbar Ar basıncındaki IrMn için 0.9 nm/dk, NiFe için 0.31 nm/dk, Cu için 0.61 nm/dk, Cr için

0.31 nm/dk ve Pt için 0.71 nm/dk büyüme hızları elde edilmiştir. NiFe hariç, diğer tabakaların pürüzlük değerleri 0.5 nm civarındayken, NiFe tabakasının pürüzlük değeri 1.0 nm civarında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.3: Üçüncü örnek serisindeki sensör yapılarında kullanılan hedef malzemeler için uygulanan güç değerleri, elde edilen tabaka kalınlıkları, yoğunlukları, pürüzlük değerleri ve tabakaların büyüme hızları.

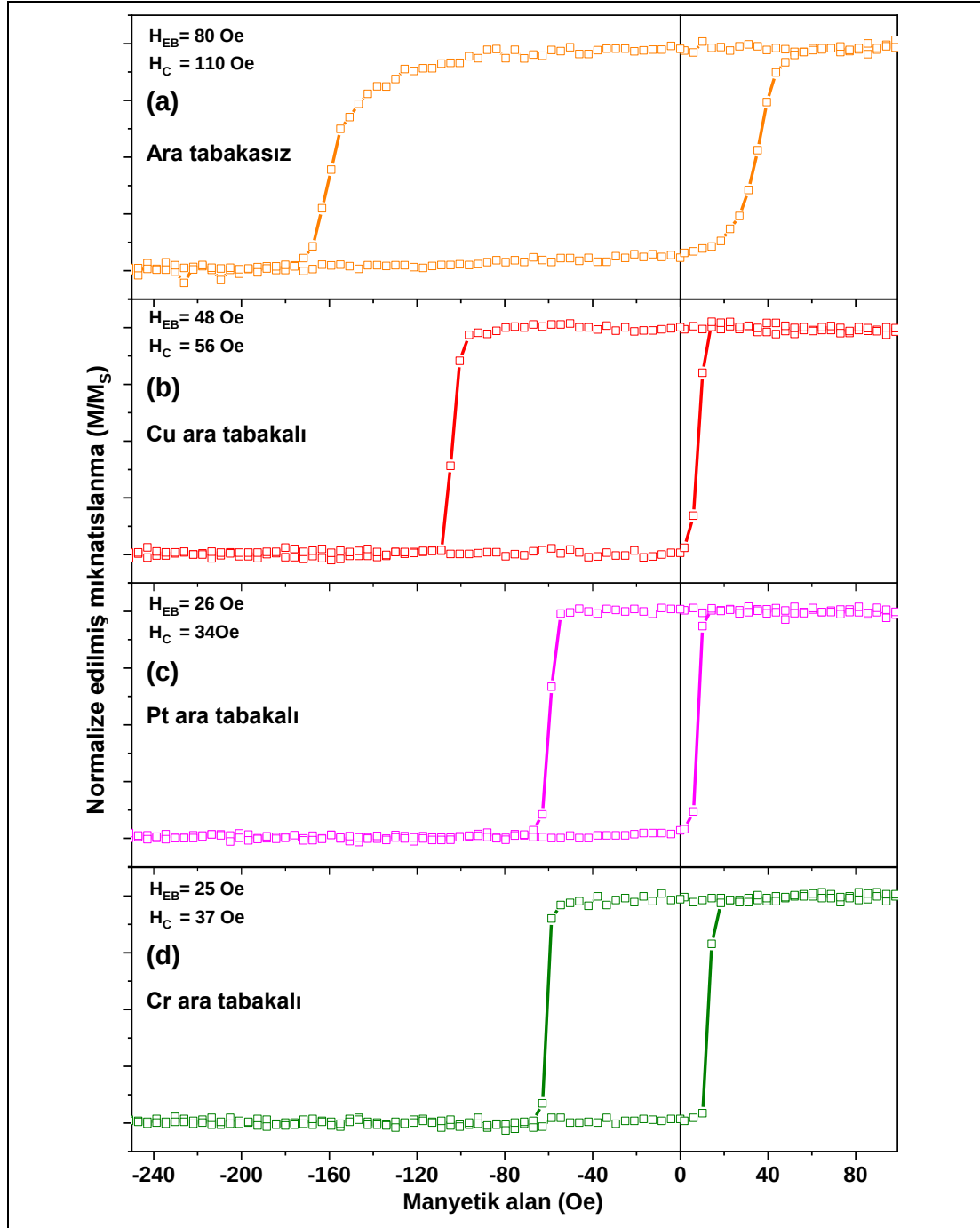
Hedef malzeme	Güç (watt) (dc)	Büyütme süresi (dk)	Kalınlık (nm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Pürüzlülük (nm)	Büyüme oranı (nm/dk)
IrMn	20	15	13.52	10.59	~0.5	0.90
NiFe	10	45	13.05	8.68	~1.0	0.31
Cu	10	15	9.1	8.96	~0.4	0.61
Cr	10	25	7.74	7.19	~0.5	0.31
Pt	10	15	10.65	21.45	~0.4	0.71
SiO ₂	-	-	--	2.2	~0.6	-

4.4.3. Sensör Yapılarının Manyetik Özellikleri

Bu serideki sensör yapılarının H_C ve H_{EB} değerleri, manyetik alanın akım yoluna paralel uygulandığı durum için elde edilen manyetik histerezis eğrileri üzerinden belirlenmiştir. Şekil 4.24'te gösterilen histerezis eğrilerinin oldukça köşeli olması, kolay eksenle akım yolunun paralel olduğunun bir göstergesidir. Ara tabaka içermeyen NiFe(10 nm)/IrMn(8 nm) sensör yapısı için elde edilen histerezis eğrisi Şekil 4.24.a)'da sunulmuştur. Bu histerezis eğrisi serideki diğer sensör yapıları için bir referans niteliği taşımaktadır ve histerezis eğrisinin tamamının sol tarafa kaymadığı görülmektedir ($H_C=110$ Oe > $H_{EB}=80$ Oe). Ayrıca, NiFe ile IrMn arasına yerleştirilmiş 0.5 nm kalınlığında Cu, Pt ve Cr ara tabakaları içeren sensör yapılarından elde edilen histerezis eğrilerinin de tamamen sol tarafa kaymadığı gözlenmiştir. Bu durum PHE sensörlerinde istenen bir özellik değildir. Fakat, sensörlerin hazırlandığı manyetron sıçratma sistemi müsait olmadığı için yeni örnekler hazırlanamamıştır. Bu nedenle farklı ara tabakalar içeren sensörlerin özellikleri üretilen sensörler üzerinden incelenmiştir.

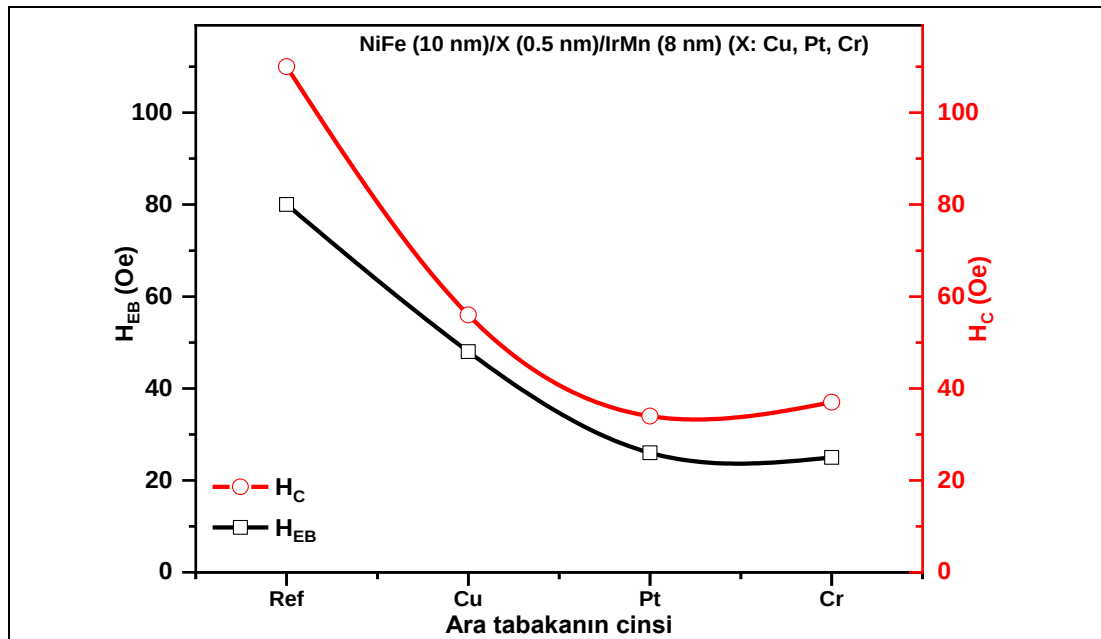
Cu ara tabakası içeren sensör yapısı için yaklaşık $H_C=56$ Oe ve $H_{EB}=48$ Oe değerleri elde edilirken, Pt ara tabakasına sahip sensör yapısı için $H_C=34$ Oe ve

$H_{EB}=26$ Oe, Cr ara tabakası içeren sensör yapısı için $H_C=37$ Oe ve $H_{EB}=25$ Oe değerleri elde edilmiştir. Bu serideki sensör yapılarının histerezis eğrilerinin tamamı sol tarafa kaymadığından, deneysel olarak elde edilen sonuçlar, teorik olarak beklenen sonuçlardan bir miktar farklılıklar gösterebilir.



Şekil 4.24: a) İki tabakalı NiFe(10 nm)/IrMn(8 nm) sensör yapısı için ve b) Cu, c) Pt ve d) Cr ara tabakası içeren sensör yapıları için elde edilmiş kolay eksen histerezis eğrileri. Buradaki ara tabakalar 0.5 nm kalınlığındadır ve ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

Her bir sensör yapısı için elde edilen H_C ve H_{EB} değerleri ise Şekil 4.25'te özetlenmiştir. Burada aynı kalınlıktaki farklı ara tabakaların, histerezis eğrileri üzerindeki etkilerinin de farklı olduğu görülmektedir. Aynı kalınlıkta Cr ve Pt ara tabakaları kullanıldığında, Cu ara tabakasına kıyasla, H_C ve H_{EB} değerleri daha fazla azalmıştır. Bunun sebebi ise, Pt ve Cr atomlarının net bir manyetik momente sahip olmalarıyla açıklanabilir. FM ve AF tabakaları arasına yerleştirilen, Pt ve Cr ara tabakaları içerisindeki serbest elektronların spin bilgilerini kaybetmeden ilerleme mesafeleri (spin diffusion length) Cu'ya kıyasla çok daha kısadır [144–146]. Bu sebeple aynı kalınlıktaki Pt ve Cr ara tabakalarının, Cu'ya kıyasla, FM ve AF tabakaları arasındaki etkileşmeyi çok daha hızlı yok etmesi beklenmektedir. Fakat, bu konuda bilgi sahibi olmak için daha fazla çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, yalnızca PHE sensörleri için önemli olan H_C , H_{EB} değerleri ve kullanılan malzemelerin iletkenlikleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.25. Üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Cu, Pt, Cr) sensör yapılarının histerezis eğrileri üzerinden belirlenmiş H_C ve H_{EB} değerleri.

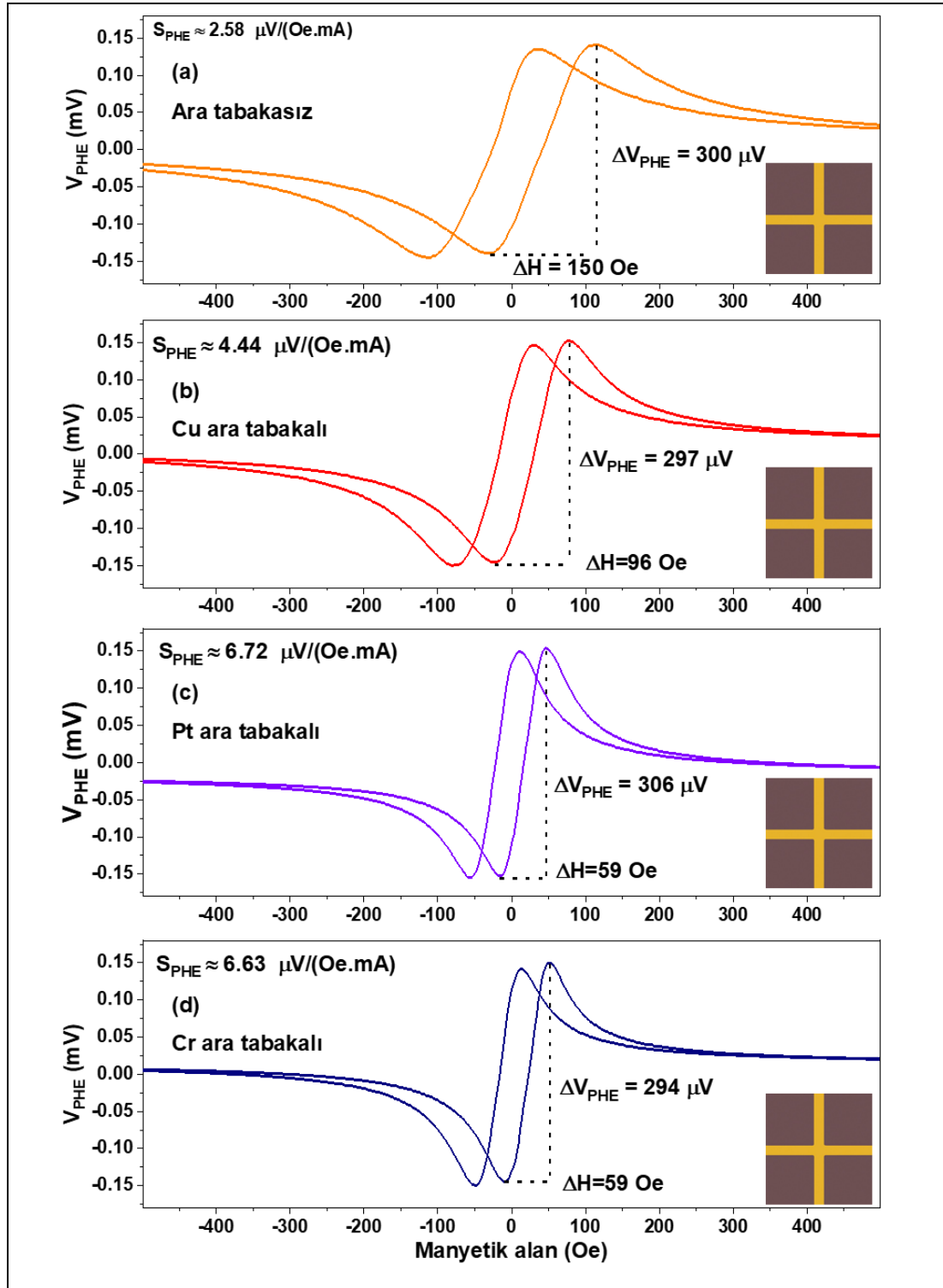
Cu elementinin öz direnci ($\rho_{Cu}=17 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$), platin ($\rho_{Pt}=105 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$) ve krom ($\rho_{Cr}=130 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$) elementlerinin öz dirençlerinden çok daha düşüktür. Ayrıca, Cu ara tabakası içeren sensör yapısının H_C ve H_{EB} değerleri, Pt ve Cr ara tabakalı sensör yapılarına kıyasla daha yüksektir. Bu iki sebepten dolayı Cu ara tabakasına sahip PHE sensörünün manyetik alan hassasiyetinin diğerlerine kıyasla daha düşük olması

beklenmektedir. Aynı kalınlıktaki (0.5 nm) Pt ve Cr ara tabakaları içeren sensör yapılarının H_C ve H_{EB} değerleri ise birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir. Manyetik momentlerin tutarsız davranışının ihmâl edilmesi durumunda, bu iki sensör yapısı için elde edilen sinyallerdeki farklılıkların şönt etkisinden ve FM malzemelerin $\Delta\rho$ değerlerindeki değişiminden kaynaklı olması beklenmektedir.

4.4.4. Sensör Yapılarının Elektriksel Özellikleri

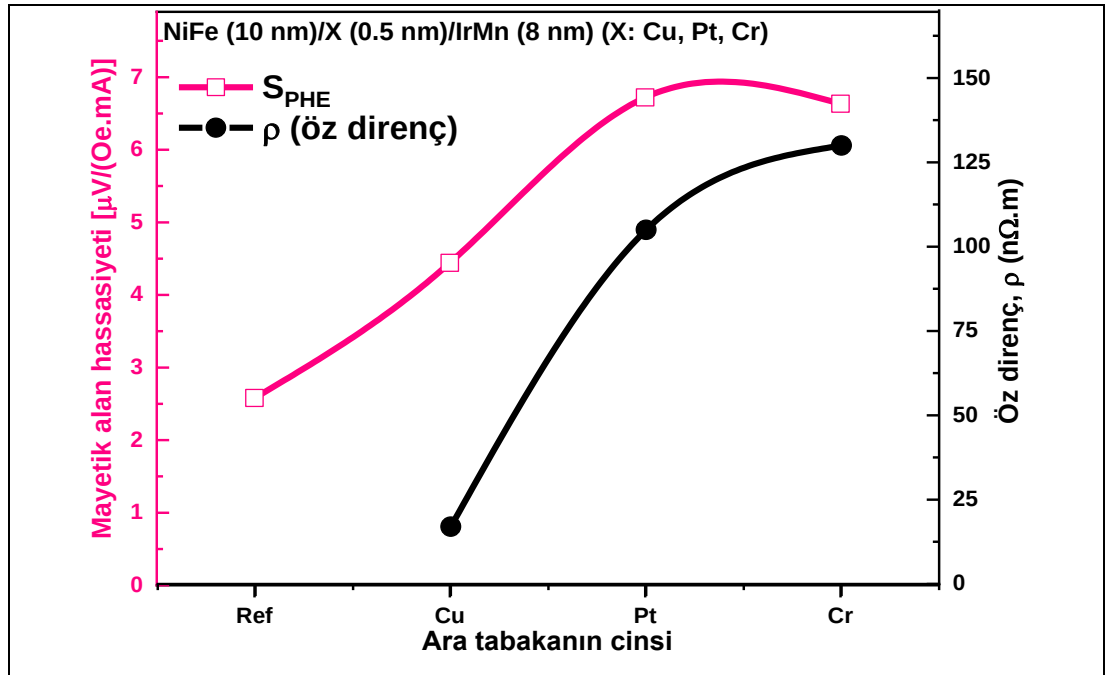
Farklı ara tabakalar içeren ve çapraz eklem geometrisindeki sensörlerden elde edilen PHE sinyalleri Şekil 4.26'da sunulmuştur. Sensör yapıları için elde edilen histerezis eğrilerinin tamamının sol tarafa kaymamış olmamasına rağmen, sensörlerden elde edilen sinyallerin oldukça kararlı olduğu görülmektedir. Ara tabakasız sensör yapısı için elde edilen ΔV_{PHE} değeri yaklaşık 300 μV değerindeyken, Cu ara tabakasına sahip sensör yapısı için $\Delta V_{PHE} = 297 \mu V$, Pt ara tabakasına sahip sensör yapısı için $\Delta V_{PHE} = 306 \mu V$ ve Cr ara tabakasına sahip sensör yapısı için $\Delta V_{PHE} = 294 \mu V$ değerinde olduğu belirlenmiştir. Cu ve Cr ara tabakaları kullanıldığında, sensörden okunan ΔV_{PHE} değerlerindeki azalma denklem (2.51)'e göre şönt etkisine atfedilebilirken, Pt ara tabakası kullanıldığında ΔV_{PHE} değerindeki artış denklem (2.51)'e göre FM malzemenin $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ değerindeki artışa atfedilebilir [39,142]. Ayrıca, PHE sinyallerindeki tepe noktaları arasındaki manyetik alan farkı ΔH , ara tabakasız sensör yapısı için 150 Oe civarındayken, Cu ara tabasına sahip sensör yapısı için $\Delta H = 96$ Oe, Pt ara tabakasına sahip sensör yapısı için $\Delta H = 59$ Oe ve Cr ara tabakasına sahip sensör yapısı için $\Delta H = 59$ Oe olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, Şekil 4.24'te gösterilen histerezis eğrileriyle de desteklenmektedir. Sensörlerin doğrusal bölgelerinin eğiminden, ara tabakasız sensör yapısı için manyetik alan hassasiyeti $S_{PHE} = 2.58 \mu V/(Oe \cdot mA)$, Cu ara tabakasına sahip sensör yapısı için $S_{PHE} = 4.44 \mu V/(Oe \cdot mA)$, Pt ara tabakasına sahip sensör yapısı için $S_{PHE} = 6.72 \mu V/(Oe \cdot mA)$ ve Cr ara tabakasına sahip sensör yapısı için $S_{PHE} = 6.63 \mu V/(Oe \cdot mA)$ olarak belirlenmiştir. Cr ara tabakalı sensör yapısından elde edilen ΔV_{PHE} değeri diğerlerinden daha düşük olmasına rağmen, Cr ara tabakası H_C ve H_{EB} değerlerini hızlıca düşürdüğünden, sensör hassasiyetinde ciddi bir artışa sebep olmuştur. Bununla birlikte, teorik olarak, Cu ara tabakasının Cr'ye kıyasla daha iyi bir iletken olması sebebiyle, aynı kalınlıktaki Cu ara tabakasına sahip sensör için elde edilen ΔV_{PHE} değerinin en düşük olması beklenmekteydi. Bunun aksine Cr ara tabakası için en düşük ΔV_{PHE} değeri elde

edilmiştir. Bunun sebebi, küçük bir miktar da olsa manyetik momentlerin tutarsız davranışına atfedilebilir.



Şekil 4.26: Üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Cu, Pt, Cr) sensör yapılarındaki çapraz eklemlerden elde edilmiş PHE sinyalleri. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

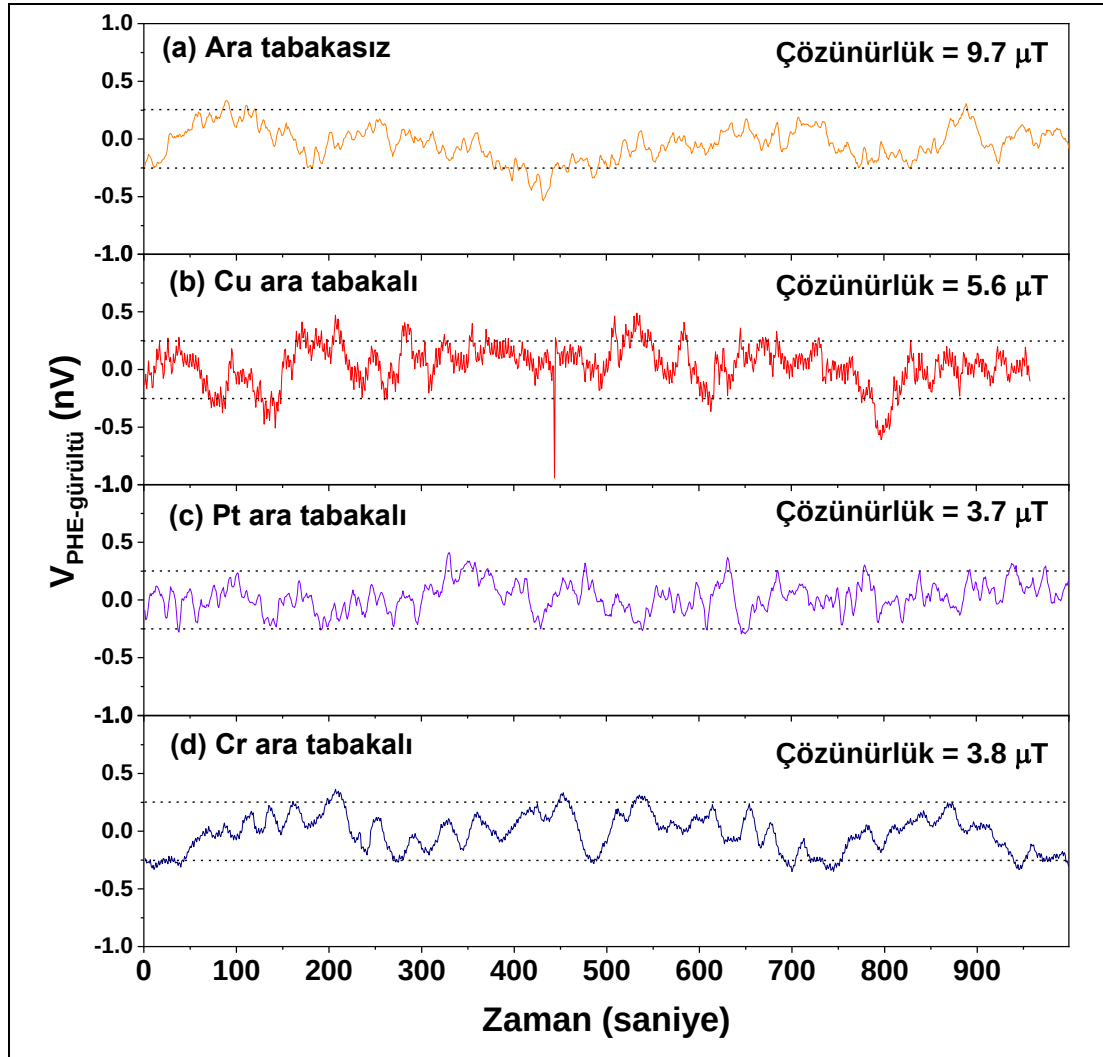
Üçüncü serideki her bir PHE sensör sinyalinin doğrusal bölgelerinden elde edilmiş manyetik alan hassasiyetleri ve ara tabaka olarak kullanılan malzemelerin öz dirençleri Şekil 4.27’de sunulmuştur. Burada denklem (2.51) ve (2.52)’ye göre ara tabaka olarak kullanılan malzemelerin öz dirençleri ile sensörlerden elde edilen manyetik alan hassasiyetleri arasında bir uyum olması beklenir. Fakat, daha önce başlık 4.2.4 içerisinde bahsedildiği gibi, NiFe ile arayüz oluşturan Pt [142], Ta [143] ve Au [33] gibi elementlerin doğrudan NiFe tabakasının $\Delta\rho$ değerini artırdığından, Pt için elde edilen sensör hassasiyeti beklenen davranışın üzerinde çıkmıştır.



Şekil 4.27: Cu, Pt ve Cr ara tabakalarına sahip çapraz eklem geometrisindeki PHE sensörlerinden elde edilen hassasiyet değerleri ve Cu, Pt ve Cr elementlerinin öz direnç değerleri arasındaki uyum.

Çapraz eklem geometrisindeki sensörlerin oda sıcaklığındaki sinyal gürültülerini belirlemek için sensör yapıları üzerine 1 mA sabit akım uygulanıp, sensörlerin PHE sinyalleri sıfır manyetik alanda 1000 saniye süresince Keithley 2182a nanovoltmetre ile kaydedilmiştir. Sensörlerin oda sıcaklığında sağladığı sinyal gürültüleri Şekil 4.28’de gösterildiği gibi ± 250 nV civarındadır. Elde edilen gürültü seviyeleriyle, ara tabakasız sensör yapısı için elde edilen manyetik alan çözünürlüğü $9.7 \mu T$ değerindeyken, Cu ara tabakalı sensör yapısı için çözünürlük $5.6 \mu T$, Pt ara tabakalı

sensör yapısı için $3.7 \mu\text{T}$ ve Cr ara tabakalı sensör yapısı için $3.8 \mu\text{T}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.28: Üç tabakalı NiFe(10)/X (0.5)/IrMn (8) (nm) (X: Cu, Pt, Cr) yapılarında ve çapraz eklem geometrisinde üretilmiş PHE sensörlerinin oda sıcaklığındaki sinyal gürültüleri.

4.4.5. Sonuçlar

Bu kısımda NiFe ile IrMn arasına yerleştirilmiş aynı kalınlıkta ve farklı iletkenliklerdeki Cu, Pt ve Cr ara tabakaları içeren NiFe/NM/IrMn yapısındaki PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetleri ara tabaka cinsinin bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Bu serideki sensörler arasında Pt ara tabakası içeren sensör yapısı en yüksek manyetik alan hassasiyetine ($6.72 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$) sahiptir. İkinci en yüksek manyetik alan hassasiyeti ($6.63 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$) ise Cr ara tabakası içeren sensör yapısından elde edilmiştir. Cu ara tabakası kullanıldığında ise, iki tabakalı sensör yapısına kıyasla, manyetik alan hassasiyeti önemli ölçüde artarak $2.58 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$ değerinden $4.44 \mu\text{V}/(\text{Oe}\cdot\text{mA})$ değerine yükselmiştir. Teorik olarak, Cr elementinin Cu ve Pt elementlerine kıyasla öz direncinin daha yüksek olması nedeniyle, en yüksek manyetik alan hassasiyeti Cr ara tabakalı sensör yapısından beklenmekteydi. Fakat, Pt ara tabakasının kullanılması sensörden elde edilen ΔV_{PHE} değerinde bir artışa neden olduğundan, diğerlerine kıyasla en yüksek manyetik alan hassasiyetini sağlamıştır. Ayrıca, Cr ara tabakası içeren sensörden elde edilen $\Delta V_{PHE}=294 \mu\text{V}$ değerinin Cu ara tabakası içeren sensörden ($\Delta V_{PHE}=297 \mu\text{V}$) daha yüksek ve ara tabakasız sensörden ($\Delta V_{PHE}=297 \mu\text{V}$) daha düşük olması beklenmekteydi. Teori ile deneydeki bu uyumsuzluk, sensör yapılarından elde edilen histerezis eğrilerinin tamamının sol tarafa kaymamasına atfedilmiştir. Ek olarak, zamana bağlı PHE ölçümleri sensörlerin yaklaşık olarak 250 nV mertebesinde gürültü seviyelerine sahip olduklarını göstermektedir. Bu gürültü seviyeleriyle, ara tabakasız sensör yapısı için çözünürlük $9.7 \mu\text{T}$ olarak belirlenirken, Cu ara tabakalı sensör yapısı için $5.6 \mu\text{T}$, Pt ara tabakalı sensör yapısı için $3.7 \mu\text{T}$ ve Cr ara tabakalı sensör yapısı için $3.8 \mu\text{T}$ olarak belirlenmiştir. Bu özellikleriyle, sensörlerin zayıf manyetik alan ölçmeyi gerektiren birçok uygulamada kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Düzlemsel Hall etkisine dayanan manyetik alan sensörleri günümüzde nano/piko Tesla mertebelerindeki çok zayıf manyetik alanların tespitini gerektiren biyolojik uygulamalar, çip-üstü manyetometre uygulamaları, akım görüntüleme, kaçak manyetik akı uygulamaları, çok hassas elektronik pusula, kalp atışı ve kan basıncı ölçme, çok hassas termometre gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan bilimsel çalışmaların ana hedefleri ise sensörlerin manyetik alan hassasiyetlerini ve sinyal/gürültü oranlarını arttırmaktır. Sensörlerin hassasiyetini arttırmak için şimdiye kadar iki çalışma grubunun Au ara tabakası kullanması hariç, yapılan bütün PHE çalışmalarında Cu ara tabakası kullanılmıştır. Fakat Cu ve Au ara tabakalarının öz dirençlerinin çok düşük olması, sensör yapılarında kullanılan çok kalın ara tabakalar için sensör sinyalinin ΔV_{PHE} değerinde azalmaya sebep olmaktadır. Bunun sonucunda sensör hassasiyeti çok kalın kullanılan Cu ara tabakaları için yavaşça azalmaktadır. Bu tez çalışmasında ise literatürde ilk defa Cu ($\rho_{Cu}=17 \text{ n}\Omega.\text{m}$) ve Au ($\rho_{Au}=22 \text{ n}\Omega.\text{m}$) elementlerine kıyasla öz direnci çok daha yüksek olan Pt ($\rho_{Pt}=105 \text{ n}\Omega.\text{m}$) ve Cr ($\rho_{Cr}=130 \text{ n}\Omega.\text{m}$) elementleri üç tabakalı PHE sensör yapılarında ara tabaka olarak kullanılmış ve tez kapsamında üretilen PHE sensörlerinin manyetik alan hassasiyetleri Pt ve Cr ara tabakalarının kalınlığının bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Burada Pt ve Cr ara tabakalarının kalınlıkları 0-1 nm arasında ve 0.1 nm adımlarla değiştirilmiştir. Üretilen PHE sensörlerinin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda sağladığı sinyallerin davranışları incelenmiştir. Literatürde iyi bilinen sensör geometrilerinde PHE sensörleri üretilip sensör geometrisinin sensör hassasiyeti üzerine etkileri araştırılmıştır.

Araştırma temelde beş adımdan oluşmaktadır:

Birinci adımda, elektriksel transport ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için döndürülebilir bir örnek tutucunun tasarımı, üretimi ve GTÜ laboratuvarlarında bulunan MOKE sistemine uyumlu bir şekilde kurulumu gerçekleştirildi.

İkinci ve üçüncü adımda, sensörleri üretmek için kullanılan fotomaske tasarımı ve üretimi gerçekleştirilip, SiO₂ alttaşlar üzerindeki fotorezist tabakasına fotolitografik yöntemler kullanılarak sensör desenleri işlendi. Bunu yapabilmek için sensörlerin Hall bar, çapraz eklem, eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrilerinin tasarımı “Clewins” programı kullanılarak yapıldı. Tasarlanan sensör

desenleri, HEIDELBERG dwl 66fs cihazı kullanılarak bir 5×5 inç² fotomaske üzerine işlendi. Ardından fotomaske üzerindeki desenler (MJB4 maske hizalama cihazı kullanılarak) maskeleme yöntemiyle SiO₂ alttaşlar üzerindeki fotorezist tabakalarına işlendi. Son olarak, Pt ve Cr ara tabakaları içeren sensör yapıları sıçratma sisteminde litografi ile hazırlanmış alttaşlar üzerine büyütüldükten sonra lift-off metodu ile üç tabakalı NiFe(10)/Pt (t_{Pt})/IrMn (8) (nm) ($t_{Pt}=0-1$ nm) ve NiFe(10)/Cr (t_{Cr})/IrMn (20) (nm) ($t_{Cr}=0-1$ nm) yapılarında ve Hall bar geometrilerinde PHE sensörleri üretildi. Burada Pt ve Cr ara tabakası içeren PHE sensörlerinin düzgün bir şekilde çalışması için gerekli olan sensör yapılarının manyetik kolay eksenini ile akım ekseninin paralel olması sıçratma sistemindeki büyümeye bağlı oluşan manyetik anizotropi ile sağlandı.

Dördüncü adımda, üretilen sensör yapılarının H_C ve H_{EB} değerleri kolay eksen boyunca ölçülen MOKE ve transport sinyallerin analiz edilmesiyle belirlendi. İstenilen manyetik özelliklerdeki sensör yapıları elde edildikten sonra da son kısma geçilmiştir.

Son kısımda ise üretilen sensör yapılarının AMR ve PHE sinyalleri ölçülerek, sensör yapılarının AMR oranları, PHE sensörlerinin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklardaki manyetik alan hassasiyetleri, PHE sensörlerin zamana bağlı tepkileri, PHE sinyalindeki gürültü mertebeleri ve PHE sensörlerinin manyetik alan çözünürlükleri tespit edilmiştir.

Pt ara tabakası kullanıldığında, Cu ara tabakası için gözlenen şönt etkisinden dolayı ΔV_{PHE} değerindeki azalmanın aksine bir artış gözlenmiş ve sensör hassasiyetinde beklenenden daha fazla bir artış elde edilmiştir. ΔV_{PHE} değerindeki bu artış AMR oranındaki değişim ile de desteklenmiştir. AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerlerindeki değişim birbiriyle oldukça uyumlu olarak salınımlı bir şekilde artış göstermiştir. Bu sonuç, tez çalışmasının en önemli sonuçlarından bir tanesidir. Pt ara tabakası içeren ve Hall bar geometrisinde üretilen sensör serisi için 0.9 nm kalınlığında ara tabaka içeren sensör yapısından en yüksek manyetik alan hassasiyeti elde edilmiştir. Burada, 0.3 nm Pt ara tabakası içeren sensör yapısı için gerçekleştirilen sıcaklığa bağlı PHE sinyalleri, bu sensörün artan bir hassasiyetle 390 K sıcaklığında bile kararlı bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Ayrıca, PHE sensörlerinin zamana bağlı ölçümleri sensör sinyallerinin tekrar edilebilir olduğunu göstermiştir. Hall bar geometrisindeki sensörler için oda sıcaklığında yaklaşık ± 100 nV değerinde bir sinyal gürültüsü ölçülürken, 390 K sıcaklığında yaklaşık ± 300 nV değerinde bir sinyal gürültüsü ölçülmüştür. Bu özellikleriyle 5 mA akım için, oda sıcaklığında, 0.9 nm kalınlığında Pt ara tabakası içeren Hall bar geometrisindeki sensörden 380 nT

manyetik alan çözünürlüğü elde edilmiştir. Sonuç olarak, tez kapsamında üretilen ve Pt ara tabakası içeren PHE sensörlerinin birçok zayıf manyetik alan ölçmeyi gerektirecek uygulamalarda kullanılabileceği gösterilmiştir. Ek olarak, literatürde kullanılan eğik çapraz eklem, 1-halka eklemi ve 5-halka eklemi geometrilerinde üretilen sensörlerden elde edilen hassasiyet seviyelerinin literatürdeki sensörlerle aynı mertebelerde olduğu görülmüştür.

Cr ara tabakası kullanıldığında ise Cu ara tabakası için olduğu gibi, ara tabakanın kalınlığı arttırıldıkça AMR oranı ve ΔV_{PHE} değerinde sistematik olarak bir azalma gözlenmiştir. Fakat, bu azalma Cu ara tabakasındakine kıyasla daha yavaştır. Cr ara tabakasının kalınlığı 0.7 nm 'ye kadar arttırıldıkça PHE sensör hassasiyetinde bir artış gözlenmiştir. Bundan daha kalın ara tabakalar için şönt etkisi baskın hâle geldiğinden, sensör hassasiyetinde yavaşça bir azalma gözlenmiştir. Sensörün zamana bağlı ölçümleri sensör sinyallerinin oldukça kararlı olduğunu göstermiştir. Hall bar geometrisindeki sensörler için oda sıcaklığında yaklaşık ± 100 nV değerinde bir sinyal gürültüsü ölçülmüştür. Bu özellikleriyle, 1 mA akım için 0.7 nm kalınlığında Cr ara tabakası içeren Hall bar geometrisindeki sensörden 1.6 μT manyetik alan çözünürlüğü elde edilmiştir. Sonuç olarak, tez kapsamında üretilen Cr ara tabakası içeren PHE sensörlerinin birçok zayıf manyetik alan ölçmeyi gerektirecek uygulamalarda kullanılabileceği gösterilmiştir.

Ek olarak, 0.5 nm kalınlığında ve farklı iletkenliklerdeki Cu, Pt ve Cr ara tabakaları içeren sensör yapıları çapraz eklem geometrisinde ve sürekli film şeklinde üretilip, sensörlerin manyetik alan hassasiyetleri aynı kalınlıktaki farklı ara tabakalar için araştırılmıştır. NiFe ile IrMn tabakaları arasına yerleştirilen Cu, Pt ve Cr ara tabakalarının sensör hassasiyetini önemli bir miktarda arttırdığı gözlenmiştir. Burada en yüksek manyetik alan hassasiyeti Pt ara tabakası içeren sensör yapısından elde edilmiştir. Cu ve Cr ara tabakası kullanıldığında ΔV_{PHE} değerlerinde bir azalma gözlenirken, Pt ara tabakası kullanıldığında bunun aksine ΔV_{PHE} değerinde bir artış gözlenmiştir. Üçüncü örnek serisinde elde edilen bütün bu sonuçlar birinci ve ikinci seride üretilen Pt ve Cr ara tabakalı sensörlerden elde edilen sonuçları desteklemektedir. Ayrıca, Cu ara tabakalı sensöre kıyasla, Pt ve Cr ara tabakası içeren sensörlerin daha hassas olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Ek olarak, üçüncü serideki sensörler üzerine uygulanan 1mA sabit akım altında ara tabakasız sensör yapısı için çözünürlük 9.7 μT olarak belirlenirken, Cu ara tabakalı sensör yapısı için

5.6 μT , Pt ara tabakalı sensör yapısı için 3.7 μT ve Cr ara tabakalı sensör yapısı için 3.8 μT olarak belirlenmiştir.

Bu sensörlerin gelecekte daha iyi hâle getirilebilmeleri için aşağıda bazı öneriler sunulmuştur;

Birinci öneri; sensörlerin üretilmesi sırasında, büyüme yönüne bağlı oluşan manyetik anizotropi kullanılması yerine, sensör yapılarının manyetik alan altında döndürülerek büyütülmeleri gerekmektedir. Bu şekilde sensör yapılarının homojen kalınlıklarda olması ve kolay ekseninin daha kararlı olması sağlanmaktadır. Çünkü, sensör yapılarının büyüme yönüne bağlı oluşan anizotropi kullanılarak büyütülmesi sonucunda oluşan kolay eksen, içerisinde çok küçükte olsa akım yönünden artı ve eksi yönleri doğru sapan bir anizotropiye sebep olabilmektedir. Sensörlerin alan altında büyütülmeleri sonucunda bu etkiler en aza indirgenebilir. Ayrıca, sensör yapılarında kullanılan FM malzemelerin büyüme yönüne bağlı oluşan anizotropi kullanılarak büyütülmesi sonucunda manyetik momentler kolay eksen üzerinde 180° farklı yönleri doğru da bakabilir. Bu durumda, FM malzeme üzerine büyütülen AF tabakası, exchange bias etkisi sonucunda, FM malzemedeki manyetik momentleri bu zıt yönleri bakar halde tutabilir ve bunun sonucunda sensörlerden okunan ΔV_{PHE} değerlerinde bir azalma gözlenebilir. Ayrıca, sensör yapılarının üretildikten sonra manyetik alan altında ve 250°C sıcaklığın üzerinde tavlama işlemi gerekmektedir. Alan altında tavlama işlemi sonucunda da büyütülen AF tabakanın anizotropisi daha düzgün hale gelmektedir. Bu iki işlem sayesinde PHE sensör sinyallerinde gözlenen histerezis davranışı en aza indirgenebilir.

İkinci öneri; bu tez çalışmasında üretilen sensör yapılarının altına (FM malzeme ile arayüz oluşturacak şekilde) 3-4 nm kalınlığa kadar Pt, Ta ve Au gibi bir tampon (buffer/seed) tabakasının yerleştirilmesi FM malzemenin $\Delta\rho$ değerini arttırmaktadır. Bu sayede sensörlerden okunan ΔV_{PHE} değerinde bir artış sağlanması ve sensör hassasiyetinde bir artış olması beklenmektedir. Kullanılan tampon tabakalarda şönt akımı oluşmasına rağmen, FM malzemenin $\Delta\rho$ değerindeki artış bu olumsuz etkiyi bastırmaktadır.

Üçüncü öneri; çapraz eklem geometrisindeki PHE sensörleri için sensör boyutunu büyük tutup daha fazla akım uygulanması sensörlerden elde edilen hassasiyetin artışına sebep olur. Çünkü, çapraz eklem geometrisindeki sensörlerden elde edilen ΔV_{PHE} değerleri uygulanan akım miktarının doğrudan bir fonksiyonu olup, sensörün l uzunluğu ve w genişliğinden bağımsızdır. Sensör geometrisinin w genişliği

arttırılıp, sensör üzerine daha fazla akım uygulanması doğrudan ΔV_{PHE} değerini, dolayısıyla sensör hassasiyetini artırır.

Dördüncü öneri; PHE sensör gürültüsünü azaltmak için kullanılan deneysel ekipmanların hassas olması sensörlerin sağladığı en küçük manyetik alan çözünürlüğünü arttırmaktadır. Sensör üzerine uygulanan akımdaki gürültü seviyesi doğrudan sensörden ölçülen V_{PHE} değerine yansımaktadır. Ayrıca, ölçümler sırasında Helmholtz bobini gibi manyetik çekirdeği olmayan elektromıknatısların kullanılması ve elektromıknatısa uygulanan akımın da hassas olması gerekmektedir. Çünkü uygulanan manyetik alandaki dalgalanma sensörden ölçülen V_{PHE} değerinde de bir dalgalanmaya sebep olmaktadır. Bu da sensörlerden ölçülen gürültü miktarını artırmaktadır. Ek olarak, literatürde sensör gürültüsünü azaltmak için ac akım ve lock-in tekniği kullanılarak yapılan ölçümler de vardır.

KAYNAKLAR

- [1] Nhalil H., Givon T., Das P.T., Hasidimn N., Mor V., Schultz M., Amrusi S., Klein L., Grosz A., (2019), “Planar Hall Effect Magnetometer With 5 pT Resolution”, IEEE Sensors Letters, 3 (12), 1-4.
- [2] Grosz A., Mor V., Paperno E., Amrusi S., Faivinov I., Schultz M., Klein L., (2013), “Planar hall effect sensors with subnanotesla resolution”, IEEE Magnetic Letters, 4, 6500104.
- [3] Østerberg F. W., Rizzi G., Henriksen A. D., Hansen M. F., (2014), “Planar Hall effect bridge geometries optimized for magnetic bead detection”, Journal of Applied Physics, 115, 184505.
- [4] Hung T.Q., Oh S., Sinha B., Jeong J.R., Kim D.Y., Kim C. G., (2010), “High field-sensitivity planar Hall sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure”, Journal of Applied Physics, 107, 09E715.
- [5] Hung T. Q., Oh S., Jeong J.R., Kim C. G., (2010), “Spin-valve planar Hall sensor for single bead detection”, Sensors and Actuators, A: Physical, 157, 42-46.
- [6] Pham H. Q., Tran B. V., Doan D. T., Le V. S., Pham Q.N., Kim K., Kim C. G., Terki F., Hung T. Q.,, (2018), “Highly sensitive planar Hall magnetoresistive sensor for magnetic flux leakage pipeline inspection”, IEEE Transactions on Magnetics, 54 (6), 1-5.
- [7] Tu B. D., Hung T. Q., Thanh N. T., Danh M. T., Duc N. H., Kim C. G., (2008), “Planar Hall bead array counter microchip with NiFe/IrMn bilayers”, Journal of Applied Physics, 104, 074701.
- [8] Mahfoud M., Hung T. Q., Wane S., Ngo D. T., Belarbi E. H., Boukra A., Kim M., Elzwawy A., Kim C. G., Reiss G., Dieny B., Bousseksou A., Terki F., (2019), “Reduced thermal dependence of the sensitivity of a planar Hall sensor”, Applied Physics Letters, 115 (7), 072402.
- [9] Schuhl A., Van Dau F. N., Childress J. R., (1995), “Low-field magnetic sensors based on the planar Hall effect”, Applied Physics Letters, 66 (20), 2751-2753.
- [10] Van Dau F. N., Schuhl A., Childress J. R., Sussiau M., (1996), “Magnetic sensors for nanotesla detection using planar Hall effect”, Sensors and Actuators, A: Physical, 53, 256-260.
- [11] Ejlsing L., Hansen M. F., Menon A. K., Ferreira H. A., Graham D. L., Freitas P. P., (2005), “Magnetic microbead detection using the planar Hall effect”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 293, 677-684.

- [12] Rizzi G., Dufva M., Hansen M. F., (2017), “Magnetoresistive sensors for measurements of DNA hybridization kinetics - Effect of TINA modifications”, *Scientific Reports*, 7, 41940.
- [13] Sinha B. Ramulu T. S., Kim K. W., Venu R., Lee J. J., Kim C. G., (2014), “Planar Hall magnetoresistive aptasensor for thrombin detection”, *Biosensors and Bioelectronics*, 59, 140–144.
- [14] Anandakumar S., Sudha R. V., Jeong J. R., Kim C. G., Kim K. W., Rao B. P., (2009), “Translocation of magnetic beads using patterned magnetic pathways for biosensing applications”, *Journal of Applied Physics*, 105, 07B312.
- [15] Oh S., Jung Y., Kim S., Kim S., Hu X., Lim H. Kim C. G., (2017), “Remote tactile sensing system integrated with magnetic synapse”, *Scientific Reports*, 7, 472-479.
- [16] Moutaigne F., Schuhl A., Van Dau F. N., Encinas A., (2000), “Development of magnetoresistive sensors based on planar Hall effect for applications to microcompass”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 81, 324-327.
- [17] Granell P. N., Wang G., Cañon Bermudez G. S., Kosub T., Golmar F., Steren L., Fassbender J., Makarov D., (2019), “Highly compliant planar Hall effect sensor with sub 200 nT sensitivity”, *npj Flexible Electronics*, 3 (3), 1-6.
- [18] Kim K. W., Reddy V., Torati S. R., Hu X. H., Sandhu A., Kim C. G., (2015), “On-chip magnetometer for characterization of superparamagnetic nanoparticles”, *Lab on a Chip*, 15, 696-703.
- [19] Jeong W., Kim M., Ha J. H., Binti Zulkifli N. A., Il Hong J., Kim C. G., Lee S., (2019), “Accurate, hysteresis-free temperature sensor for health monitoring using a magnetic sensor and pristine polymer”, *RSC Advances*, 9, 7885-7889.
- [20] Oh S., Patil P. B., Hung T. Q., Lim B., Takahashi M., Kim D. Y., Kim C. G., (2011), “Hybrid AMR/PHR ring sensor”, *Solid State Communications*, 151, 1248–1251.
- [21] Özer B., Pişkin H., Akdoğan N., (2019), “Shapeable planar Hall sensor with a stable sensitivity under concave and convex Bending” *IEEE Sensors Journal*, 19 (14), 5493-5498.
- [22] Oh S., Jadhav M., Lim J., Reddy V., Kim C. G., (2013), “An organic substrate based magnetoresistive sensor for rapid bacteria detection”, *Biosensors and Bioelectronics*, 41, 758–763.
- [23] Oh S., Yu J., Lim J., Jadhav M., Lee T., Kim D., Kim C. G., (2013), “Highly flexible magnetoelectronic device integrated with embedded Ag nanoparticle electrode”, *IEEE Sensors Journal*, 13, 3957-3961.

- [24] Talantsev A., Elzwawy A., Kim C. G., (2018), “Effect of NiFeCr seed and capping layers on exchange bias and planar Hall voltage response of NiFe/Au/IrMn trilayer structures”, *Journal of Applied Physics*, 123, 173902.
- [25] Zhao Z. D., Li M. H., Kang P., Zhao C. J., Zhang J. Y., Zhou L. J., Zhao Y. C., Jiang S. L., Yu G. H., (2015), “The influence of ultrathin Cu interlayer in NiFe/IrMn interface on rotation of the magnetic moments”, *Applied Surface Science*, 332, 710–715.
- [26] Ejsing L., Hansen M. F., Menon A. K., Ferreira H. A., Graham D. L., Freitas P. P., (2004), “Planar hall effect sensor for magnetic micro- and nanobead detection”, *Applied Physics Letters*, 84, 4729-4731.
- [27] Damsgaard C. D., Freitas S. C., Freitas P. P., Hansen M. F., (2008), “Exchange-biased planar Hall effect sensor optimized for biosensor applications”, *Journal of Applied Physics*, 103, 07A302.
- [28] Hung T. Q., Rao, B. P., Kim C. G., (2009), “Planar Hall effect in biosensor with a tilted angle of the cross-junction”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321, 3839-3841.
- [29] Sinha B., Oh S., Ramulu T. S., Lim J., Kim D. Y., Kim C. G., (2011), “Planar Hall effect ring sensors for high field-sensitivity”, *Advanced Materials Research*, 317, 1136-1140.
- [30] Hansen M. F., Rizzi G., (2017), “Exchange-biased AMR bridges for magnetic field sensing and biosensing”, *IEEE Transactions On Magnetics*, 53 (4), 4000211.
- [31] Ejsing L., Hansen M. F., Menon A. K., (2003), “Planar Hall Effect Magnetic Sensor for Micro-Bead Detection”, *Proc. 17th Eur. Conf. Solid-State Transducers, Eurosensors*, 1095–1098.
- [32] Henriksen A. D., Rizzi G., Østerberg F. W., Hansen M. F., (2015), “Optimization of magnetoresistive sensor current for on-chip magnetic bead detection using the sensor self-field”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 380, 209-214.
- [33] Li X. J., Feng C., Chen X., Zhang J. Y., Liu Y. W., Jiang S. L., Liu Y., Li M. H., Yu G. H., (2015), “Enhanced planar hall sensitivity with better thermal stability by introducing interfacial modification of Au spacer”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 381, 386-389.
- [34] Tu B. D., Cuong L. V., Hung T. Q., Giang D. T. H., Dang T. M., Duc N. H., Kim C. G., (2009), “Optimization of spin-valve structure NiFe/Cu/NiFe/IrMn for planar hall effect based biochips”, *IEEE Transactions On Magnetics*, 45 (6), 2378-2382.

- [35] Henriksen A. D., Rizzi G. Hansen M. F., (2016), “Planar Hall effect bridge sensors with NiFe / Cu / IrMn stack optimized for self-field magnetic bead detection”, *Journal of Applied Physics*, 119, 093910.
- [36] Hung, T. Q., Terki F., Kamara S., Kim K., Charar S., Kim C. G., (2015), “Planar Hall ring sensor for ultra-low magnetic moment sensing”, *Journal of Applied Physics*, 117, 154505.
- [37] Mizukami S., Ando Y., Miyazaki T., (2001), “The study on ferromagnetic resonance linewidth for NM/80NiFe/NM (NM=Cu, Ta, Pd and Pt) films”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 40 (1), 580-585.
- [38] Mizukami S., Ando Y., Miyazaki T., (2002), “Effect of spin diffusion on Gilbert damping for a very thin permalloy layer in Cu/permalloy/Cu/Pt films”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 66, 1044131.
- [39] Pişkin H., Akdoğan N., (2019), “Interface-induced enhancement of sensitivity in NiFe/Pt/IrMn-based planar hall sensors with nanoTesla resolution”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 292, 24-29.
- [40] Cullity B. D., Graham C. D., (2008), “Introduction to Magnetic Materials”, 2nd Edition, Wiley-IEEE Press.
- [41] Chikazumi S., (1994), “Physics of Ferromagnetism”, 2nd Edition, Oxford University Press.
- [42] Demirci E., (2016), “Manyetoelektrik Cr₂O₃ tabanlı ince film sistemlerinde dik exchange bias etkisinin incelenmesi”, *Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi*.
- [43] Öztürk M., (2016), “Co/CoO tabanlı ince filmlerde exchange bias’ın elektrik alan ile kontrolü”, *Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi*.
- [44] Kocaman B., (2018), “IrMn tabanlı spin-vana yapılarında şönt akımının azaltılması”, *Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi*.
- [45] Hou Z., Linder D., Hedström P., Boorgenstam A., Holmström E., Ström V., (2019), “Effect of carbon content on the Curie temperature of WC-NiFe cemented carbides”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 78, 27-31.
- [46] Zhang R., Willis R. F., (2001), “Thickness-dependent curie temperatures of ultrathin magnetic films: Effect of the range of spin-spin interactions”, *Physical Review Letters*, 86 (12), 2665-2668.
- [47] Kocaman B., Akdoğan N., (2018), “Reduction of shunt current in buffer-free IrMn based spin-valve structures”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 456, 17-21.

- [48] Yu P., Jin X. F., Kudrnovský J., Wang D. S., Bruno P., (2008), “Curie temperatures of fcc and bcc nickel and permalloy: Supercell and Green’s function methods”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 77, 054431.
- [49] Grosz A., Mor V., Paperno E., Amrusi S., Faivinov I., Schultz M., Klein L., (2013), “Planar Hall Effect Sensors With Subnanotesla Resolution”, *IEEE Magnetism Letters*, 4, 6500104.
- [50] Staycy F. D., (1960), “Stress induced magnetic anisotropy of rocks”, *Nature*, 188, 134-135.
- [51] Asai, R., Ota S., Namazu T., Takenobu T., Koyama T., Chiba D., (2016), “Stress-induced large anisotropy field modulation in Ni films deposited on a flexible substrate”, *Journal of Applied Physics*, 120, 083906.
- [52] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1956), “New Magnetic Anisotropy”, *Physical Review*, 102 (5), 1413-1414.
- [53] Radu F., (2005), “Fundamental aspects of exchange bias effect in AF/F bilayers and multilayers”, *Doctoral Thesis, Ruhr-Universität Bochum*.
- [54] Spaldin N. A., (2003), “Magnetic Materials: Fundamentals and Applications”, 2nd Edition, Cambridge University Press.
- [55] Getzlaff M., (2008), “Fundamentals of Magnetism”, Springer Publishing.
- [56] Donolato M., Dalslet B. T., Damsgaard C. D., Gunnarsson K., Jacobsen C. S., Svendlindh P., Hansen M. F., (2011), “Size-dependent effects in exchange-biased planar Hall effect sensor crosses”, *Journal of Applied Physics*, 109, 064511.
- [57] Stoner E. C., Wohlfarth E. P., (1948), “A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogenous Alloys”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 240 (A826), 599-642.
- [58] Nogués J., Schuller I. K., (1999), “Exchange bias”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 192, 203-232.
- [59] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1957), “New magnetic anisotropy”, *Physical Review*, 105 (3), 904-913.
- [60] Néel L., (1967), “Étude théorique du couplage ferro-antiferromagnétique dans les couches minces”, *Annales De Physique*, 14, 61-80.
- [61] Malozemoff A. P., (1987), “Random-field model of exchange anisotropy at rough ferromagnetic- antiferromagnetic interfaces”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 35 (7), 3679-3682.

- [62] Malozemoff A. P., (1988), “Mechanisms of exchange anisotropy (invited)”, *Journal of Applied Physics*, 63, 3874-3879.
- [63] Miltényi P., Gierlings M., Keller J., Beschoten B., Güntherodt G., Nowak U., Usadel K. D., (2000), “Diluted antiferromagnets in exchange bias: Proof of the domain state model”, *Physical Review Letters*, 84 (18), 4224-4227.
- [64] Nowak U., Usadel K. D., Keller J., Miltényi P., Beschoten B., Güntherodt G., (2002), “Domain state model for exchange bias. I. Theory”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 66, 014430.
- [65] Mauri D., Siegman H. C., Bagus P. S., Kay E., (1987), “Simple model for thin ferromagnetic films exchange coupled to an antiferromagnetic substrate”, *Journal of Applied Physics*, 62, 3047-3049.
- [66] Von Kim J., Stamps R. L., (2005), “Hysteresis from antiferromagnet domain-wall processes in exchange-biased systems: Magnetic defects and thermal effects”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 71, 094405.
- [67] Schlenker C., Parkin S. S. P., Scott J. C., Howard K., (1986), “Magnetic disorder in the exchange bias bilayered FeNi-FeMn system”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 54-57, 801-802.
- [68] Yoo Y. G., Min S. G., Yu S. C., (2006), “Influence of spacer layer in exchange coupled NiFe/Cu/IrMn trilayer structure”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304, e718–e720.
- [69] Thomas L., Kellock A. J., Parkin S. S. P., (2000), “On the exchange biasing through a nonmagnetic spacer layer”, *Journal of Applied Physics*, 87, 5061-5063.
- [70] Parkin S. S. P., Mauri D., (1991), “Spin engineering: Direct determination of the Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida far-field range function in ruthenium”, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 44 (13), 7131-7134.
- [71] Graham D. L., Ferreira H. A., Freitas P. P., Cabral J. M. S., (2003), “High sensitivity detection of molecular recognition using magnetically labelled biomolecules and magnetoresistive sensors”, *Biosensors and Bioelectronics*, 18, 483-488.
- [72] Serway R. A., Jewett John W. J., (2010), “Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics”, 9th Edition, Physical Sciences: Mary Finch.
- [73] Latham J., Mason B. J., (1961), “Electric Charge Transfer Associated with the Temperature Gradients in Ice”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 260, 523-536.

- [74] Coey J. M. D., (2009), "Magnetism and Magnetic Materials", Cambridge University Press.
- [75] McGuire T. R., Potter R. I., (1975), "Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3D Alloys", IEEE Transactions on Magnetics, 11 (4), 1018-1038.
- [76] Thomson W., (1856), "On the Electro-Dynamic Qualities of Metals: Effects of Magnetization on the Electric Conductivity of Nickel and of Iron", Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 8, 546-550.
- [77] Kim D. Y., Kim C. G., Park B. S., Park C. M., (2000), "Thickness dependence of planar Hall resistance and field sensitivity in NiO (30 nm)/NiFe (t) bilayers", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215-216, 585-588.
- [78] Tanh N. T., Tu L. T., Ha N. D., Kim C. O., Kim C. G., Shin K. H., Parvatheeswara R. B., (2007), "Thickness dependence of parallel and perpendicular anisotropic resistivity in Ta/NiFe/IrMn/Ta multilayer studied by anisotropic magnetoresistance and planar Hall effect", Journal of Applied Physics, 101, 053702.
- [79] Hall E. H., (1879), "On a New Action of the Magnet on Electric Currents", American Journal of Mathematics, 2 (3), 287-292.
- [80] Kittel C., (2005), "Introduction to Solid State Physics", 8th Edition, Wiley & Sons.
- [81] Hall E. H., (1881), "On the rotational coefficient in nickel and cobalt", Philosophical Magazine Series, 5 (12:74), 157-172.
- [82] Ky V. D., (1966), "Plane Hall effect in ferromagnetic metals", Journal of Experimental and Theoretical Physics, 50, 809-813.
- [83] Hayashi M., Kim J., Yamanouchi M., Ohno H., (2014), "Quantitative characterization of the spin-orbit torque using harmonic Hall voltage measurements", Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 89, 144425.
- [84] Tanh N. T., Chun M. G., Ha N. D., Kim K. Y., Kim C. O., Kim C. G., (2006), "Thickness dependence of exchange anisotropy in NiFe/IrMn bilayers studied by Planar Hall Effect", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 305, 432-435.
- [85] Tanh N. T., Parvatheeswara R. B., Duc N. H., Kim C. G., (2007), "Planar Hall resistance sensor for biochip application", Physica Status Solidi (A): Applications and Materials Science, 204, 4053-4057.
- [86] Hung T. Q., Oh S., Anandakumar S., Jeong J. R., Kim D. Y. Kim C. G., (2009), "Optimization of the multilayer structures for a high field-sensitivity biochip

sensor based on the planar Hall effect”, IEEE Transactions On Magnetism, 45 (10), 4518-4521.

- [87] Hung T. Q., Kim D. Y., Parvatheeswara R. B., Kim C. G., (2013), “Novel Planar Hall Sensor for Biomedical Diagnosing Lab-on-a-Chip, in: State of the Art in Biosensors”, Intech Open Science.
- [88] Lu Z. Q., Pan G., Lai W. Y., (2001), “Planar Hall effect in NiFe/NiMn bilayers”, Journal of Applied Physics, 90 (3), 1414-1418.
- [89] Talantsev A., Elzwawy A., Kim C. G., (2018), “Effect of NiFeCr seed and capping layers on exchange bias and planar Hall voltage response of NiFe/Au/IrMn trilayer structures”, Journal of Applied Physics, 123, 173902.
- [90] Elzwawy A., Kim S., Talantsev A., Kim C. G., (2019), “Equisensitive adjustment of planar Hall effect sensor’s operating field range by material and thickness variation of active layers”, Journal of Physics D: Applied Physics, 52, 285001.
- [91] Sinha B., Hung T. Q., Ramulu S. T., Oh S., Kim K., Kim D. Y., Terki F., Kim C. G., (2013), “Planar Hall resistance ring sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure”, Journal of Applied Physics, 113, 063903.
- [92] Henriksen A. D., Dalslet B. T., Skieller D. H., Lee K. H., Okkels F., Hansen M. F., (2010), “Planar Hall effect bridge magnetic field sensors”, Applied Physics Letters, 97, 013507.
- [93] Wheatstone C., (1843), “An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 133, 303-327.
- [94] Hoffmann K., (2001), “Applying the Wheatstone bridge circuit”, HBM Press.
- [95] Østerberg F. W., Henriksen A. D., Rizzi G., Hansen M. F., (2013), “Comment on “Planar Hall resistance ring sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure” [J. Appl. Phys. 113, 063903 (2013)]”, Journal of Applied Physics, 114, 106101.
- [96] Sierra J. F., Pryadun V. V., Russek S. E., García-Hernández M., Mompean F., Rozada R., Chubykalo-Fesenko O., Snoeck E., Miao G. X., Moodera J. S., Aliev F. G., (2011), “Interface and temperature dependent magnetic properties in Permalloy thin films and tunnel junction structures”, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 11, 1-12.
- [97] Damsgaard C. D., Dalslet B. T., Freitas S. C., Freitas P. P., Hansen M. F., (2009), “Temperature effects in exchange-biased planar hall sensors for bioapplications”, Sensors and Actuators, A: Physical, 156, 103-108.

- [98] Uchiyama T., Mohri K., Honkura Y., Panina L. V., (2012), “Recent advances of pico-Tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS IC MI sensor”, *IEEE Transactions On Magnetism*, 48 (11), 3833-3839.
- [99] Parkin S. S. P., (1996), “Flexible giant magnetoresistance sensors”, *Applied Physics Letters*, 69, 3092-3094.
- [100] Yan F., Xue G., Wan F., (2002), “A flexible giant magnetoresistance sensor prepared completely by electrochemical synthesis”, *Journal of Materials Chemistry*, 12, 2606-2608.
- [101] Uhrmann T., Bär L., Dimopoulos T., Wiese N., Rühlig M., Lechner A., (2006), “Magnetostrictive GMR sensor on flexible polyimide substrates”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 307, 209-211.
- [102] Barraud C., Deranlot C., Seneor P., Mattana R., Dlubak B., Fusil S., Bouzehouane K., Deneuve D., Petroff F., Fert A., (2010), “Magnetoresistance in magnetic tunnel junctions grown on flexible organic substrates”, *Applied Physics Letters*, 96, 072502.
- [103] Bedoya-Pinto A., Donolato M., Gobbi M., Hueso L. E., Vavassori P., (2014), “Flexible spintronic devices on Kapton”, *Applied Physics Letters*, 104, 062412.
- [104] Wang Z., Wang X., Li M., Gao Y., Hu Z., Nan T., Liang X., Chen H., Yang J., Cash S., Sun N. X., (2016), “Highly sensitive flexible magnetic sensor based on anisotropic magnetoresistance effect”, *Advanced Materials*, 28, 9370-9377.
- [105] Loong L. M., Lee W., Qiu X., Yang P., Kawai H., Saeys M. Ahn J. H., Yang H., (2016), “Flexible MgO Barrier Magnetic Tunnel Junctions”, *Advanced Materials*, 28, 4983-4990.
- [106] Gaspar J., Fonseca H., Paz E., Martins M., Valadeiro J., Cardoso S., Ferreira R., Freitas P. P., (2017), “Flexible Magnetoresistive Sensors Designed for Conformal Integration”, *IEEE Transactions on Magnetism*, 53, 1-4.
- [107] Hawsawi M., Amara S., Mashraei Y., Almansouri A., Mohammad H., Sevilla G. T., Jakob G., Jaiswal S., Kläui M., Haneef A., Saoudi A., Hussain M., Kosel J., (2018), “Flexible Magnetoresistive Sensors for Guiding Cardiac Catheters”, 2018 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA).
- [108] Zheng C., Zhu K., Freitas S. C., Chang J. Y., Davies J. E., Eames P., Freitas P. P., Kazakova O., Kim C. G., Leung C. W., Liou S. H., Ognev A., Piramanayagam S. N., Ripka P., Samardak A., Shin, K. H., Tong S. Y., Tung M. J., Wang S. X., Xue S., Yin X., Pong P. W. T., (2019), “Magnetoresistive Sensor Development Roadmap (Non-Recording Applications)”, *IEEE Transactions on Magnetism*, 55 (4), 1-30.

- [109] Oppeneer P. M., (1999), "Theory of the Magneto-Optical Kerr Effect in Ferromagnetic Compounds", Ph.D Thesis, Technische Universität Dresden.
- [110] Demirci E., Akdoğan N., (2019), "Multifunctional Sample Holder and High Resolution Detection System for Magneto-optical Kerr Effect Measurements", TR Patent, 2015 09249 B.
- [111] Cullity B. D., (1956), "Elements of X-Ray Diffraction", Addison-Wesley Publishing Company.
- [112] Daillant J., Gibaud A., (2009), "X-ray and Neutron Reflectivity: Principles and Applications", Springer.
- [113] Parrat L. G., (1954), "Surface studies of solids by total reflection of x-rays", Physical Review, 95 (2), 359-369.
- [114] Mack C., (2011), "Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication", John Wiley & Sons Ltd.
- [115] Rai-Choudhury P., (1997), "Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication. Volume 1: Microlithography", Spie Press Book.
- [116] Franssila S., (2010), "Introduction to Microfabrication", Humana Press Inc.
- [117] Madou M. J., (2011), "Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnology", 1th Edition, CRC Press.
- [118] Chou S. Y., Krauss P. R., Renstrom P. J., (1996), "Imprint lithography with 25-nanometer resolution", Science, 272 (5258), 85-87.
- [119] Chou S. Y., (2012), "Nanofabrication Handbook: Nanoimprint lithography", Intech.
- [120] Chang, S. J., Shen C. F., Chen W. S., Kuo C. T., Ko T. K., Shei S. C., Sheu J. K., (2007), "Nitride-based light emitting diodes with indium tin oxide electrode patterned by imprint lithography", Applied Physics Letters, 91, 013504.
- [121] Sun Y., Forrest S. R., (2006), "Organic light emitting devices with enhanced outcoupling via microlenses fabricated by imprint lithography", Journal of Applied Physics, 100, 073106.
- [122] Yanagawa H., Inoue A., Sugimoto H., Shiobi M., Fujii M., (2017), "Photoluminescence enhancement of silicon quantum dot monolayer by plasmonic substrate fabricated by nano-imprint lithography", Journal of Applied Physics, 122, 223101.
- [123] Chang S. C., Kempisty J. M., (2002), "Lift-off Methods for MEMS Devices", Materials Research Society Symposium Proceedings, 729, 1-10.

- [124] Lee B. S., Lin S. C., Wu W. J., Wang X. Y., Chang P. Z. Lee C. K., (2009), "Piezoelectric MEMS generators fabricated with an aerosol deposition PZT thin film", *Journal Of Micromechanics And Microengineering*, 19, 065014.
- [125] Sorribas H., Padeste C., Tiefenauer L., (2002), "Photolithographic generation of protein micropatterns for neuron culture applications", *Biomaterials*, 23, 893-900.
- [126] Chien, F. S. S., Wu C. L., Chou Y. C., Chen T. T., Gwo S., Hsieh W. F., (1999), "Nanomachining of (110)-oriented silicon by scanning probe lithography and anisotropic wet etching", *Applied Physics Letters*, 75, 2429-2431.
- [127] Guo H. C., Nau D., Radke A., Zhang X. P., Stodolka J., Yang X. L., Tikhodeev, S. G., Gippius N. A., Giessen H., (2005), "Large-area metallic photonic crystal fabrication with interference lithography and dry etching", *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 81, 271-275.
- [128] Waits C. M., Morgan B., Kastantin M., Ghodssi R., (2005), "Microfabrication of 3D silicon MEMS structures using gray-scale lithography and deep reactive ion etching", *Sensors and Actuators A: Physical*, 119, 245-253.
- [129] Whitney A. V., Myers B. D., Van Duyne R. P., (2004), "Sub-100 nm triangular nanopores fabricated with the reactive ion etching variant of nanosphere lithography and angle-resolved nanosphere lithography", *Nano Letters*, 4, 1507-1511.
- [130] Erickson D., Li D., (2004), "Integrated microfluidic devices", *Analytica Chimica Acta*, 507, 11-26.
- [131] Sia S. K., Whitesides G. M., (2003), "Microfluidic devices fabricated in poly(dimethylsiloxane) for biological studies", *Electrophoresis*, 24, 3563-3576.
- [132] Anderson H., Van den Berg A., (2003), "Microfluidic devices for cellomics: A review" *Sensors and Actuators B: Chemical*, 92, 315-325.
- [133] Amin R., Knowlton S., Hart A., Yenilmez B., Ghaderinezhad F., Katebifar S., Messina M., Khademhosseini A., Taşoğlu S., (2016), "3D-printed microfluidic devices", *Biofabrication*, 8, 022001.
- [134] Wu F., Dekker C., (2016), "Nanofabricated structures and microfluidic devices for bacteria: From techniques to biology", *Chemical Society Reviews*, 45, 268-280.
- [135] Qin D., Xia Y., Whitesides G. M., "Soft lithography for micro- and nanoscale patterning", *Nature Protocols*, 5, 491-502.
- [136] Swann S., (1988), "Magnetron sputtering", *Physics in Technology*, 19, 67-75.

- [137] Simon H. A., (2012), "Sputter Processing, in: K. Seshan (Ed.), Handbook of Thin Film Deposition", 3rd Edition, Elsevier Inc.
- [138] Bertelli T. P., Bueno T. E. P., Krohling A. C., Silva B. C., Rodríguez-Suárez R. L., Nascimento, V. P., Paniago R., Krambrock K., Larica C., Passamani E. C., (2017), "Magnetic anisotropy of Co thin films: Playing with the shadowing effect, magnetic field and substrate spinning", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 426, 636-640.
- [139] Akdoğan N., Öztürk M., Demirci E., (2018), "Liquid nitrogen and liquid helium flow measurement chamber with optical window", TR Patent 2015 09249 B.
- [140] Demirci E., Akdoğan N., (2019), "Multifunctional Sample Holder and High Resolution Detection System for Magneto-optical Kerr Effect Measurements", TR Patent 2015, 09249 B.
- [141] Sinha B., Hung T. Q., Ramulu S. T., Oh S., Kim K., Kim D. Y., Terki F., Kim C. G., (2013), "Planar Hall resistance ring sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure", Journal of Applied Physics, 113, 063903.
- [142] Liu, Y. F., Cai J. W., Sun L., (2010), "Large enhancement of anisotropic magnetoresistance and thermal stability in Ta/NiFe/Ta trilayers with interfacial Pt addition", Applied Physics Letters, 96, 092509.
- [143] Wang S., Gao T., Wang C. He J., (2013), "Studies of anisotropic magnetoresistance and magnetic property of Ni₈₁Fe₁₉ ultra-thin films with the lower base vacuum", Journal of Alloys and Compounds, 554, 405-407.
- [144] Villamor E., Isasa M., Hueso L. E., Casanova F., (2013), "Contribution of defects to the spin relaxation in copper nanowires", Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 87 (9), 094417.
- [145] Qu D., Huang S. Y., Chien C. L., (2015), "Inverse spin Hall effect in Cr: Independence of antiferromagnetic ordering", Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 92, 020418(R).
- [146] Roy K., (2017), "Estimating the spin diffusion length and the spin Hall angle from spin pumping induced inverse spin Hall voltages", Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 96, 174432.
- [148] Akdoğan N., (2004), "İnce filmlerde manyeto-optik ölçümler", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [149] Mannan A., (1999), "Growth and study of magnetostrictive FeSiBC thin films, for device applications", Doctoral Thesis, The University of Sheffield.
- [150] Mendez S., Fenton E. M., Gallegos G. R., Petsev N. D., Sibbet S. S., Stone H. A., Zhang Y., Lopez G. P., (2010), "Imbibition in porous membranes of

complex shape: Quasi-stationary flow in thin rectangular segments,”
Langmuir, 26 (2), 1380-1385.

- [151] Adkins J. A., (2016), “The development of paper-based microfluidic devices for environmental and food quality analysis”, PhD. Thesis, Colorado State University.
- [152] Scherr S. M., Freedman D. S., Agans K. N., Rosca A., Carter E., Kuroda M., Fawcett H. E., Mire C. E., Geisbert T. W., Ünlü M. S., Connor J. H., (2017), “Disposable cartridge platform for rapid detection of viral hemorrhagic fever viruses”, Lab on a Chip, 17, 917-925.
- [153] HEIDELBERG Instruments, (2009), “DWL 66fs user guide part 1: System operation.”

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Pişkin 1988 yılında Antalya'nın Alanya ilçesinde doğdu. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fizik bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 2015 yılında ise Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Gebze Teknik Üniversitesi'nde, Mart 2017 - Mart 2020 tarihleri arasında, 116F083 numaralı ve "Exchange Bias Tabanlı Planar Hall Etkisi (PHE) Sensörlerinin Üretilmesi ve Karakterizasyonu" isimli TÜBİTAK projesinde çalıştı.

Yüksek lisans ve doktora eğitimleri süresince fotolitografi, temizoda teknolojileri, biyosensörler, manyetik alan sensörleri, spin elektronigi, nano yapılı ince film üretimi, mikroakışkan kanal üretimi ve moleküler tek kristallerin yapısal analizi konularında tecrübe sahibi oldu.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Pişkin H., Akdoğan N., (2019), “Interface-induced enhancement of sensitivity in NiFe/Pt/IrMn-based planar Hall sensors with nanoTesla resolution”, *Sensors and Actuators A: Physical* 292, 24-29.

Özer B., Pişkin H. and Akdoğan N., (2019) “Shapeable planar Hall sensor with a stable sensitivity under concave and convex bending”, *IEEE Sensors Journal*, 19, 5493.

Pişkin H., Demirci E., Öztürk M., Akdoğan N., (2020), “Experimentally determining the tilt angle of magnetic anisotropy by measuring the Hall voltage”, in preparation.

Pişkin H., Akdoğan N., (2020) “Tuning the magnetic field sensitivity of planar Hall sensor by changing Cr spacer layer thickness in NiFe/Cr/IrMn trilayer structure”, in preparation.

Ek B: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Bildiriler

Özer B., Pişkin H., Akdoğan N., (2020), “Shapeable Planar Hall Sensor for Tactile Sensing Applications in Humanoid Robotics”, 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2020), Milas-Bodrum, Turkey (Invited Talk).

Pişkin H., Özer B., Akdoğan N., (2018), “Shapeable magnetoelectronics and magnetoresistive biosensors”, SERES'18-IV. International Ceramic, Glass, Porcelain Enamel, Glaze and Pigment Congress, Eskişehir, Turkey, 10-12 October (Invited Talk).

Özer B., Pişkin H., Akdoğan N., (2018), “Planar Hall effect based biosensors on shapeable surfaces”, 14th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-14), Çeşme, İzmir, Turkey, 22-25 September (Poster).

Pişkin H., Akdoğan N., (2018), “Enhancement of sensitivity in planar Hall sensors”, 14th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-14), Çeşme, İzmir, Turkey, 22-25 September (Talk).

Özer B., Pişkin H., Akdoğan N., (2018), “Shapeable planar Hall effect-based biosensors”, The 3rd International Organic Electronic Material Technology Conference (OEMT2018), İğneada, Kırklareli, Turkey, 20-22 September (Invited Talk).

Pişkin H., Akdoğan N., (2017), “Fabrication and Characterization of PHE-Based Biosensors”, Bio-Medical Applications of Magnetic Nano-Particles (M-BIO 2017), Gebze, Turkey, 11-12 September (Poster).

Pişkin H., Akdoğan N., (2017), “Biyo Uygulamalar İçin Planar Hall Etkisi Sensörleri”, GTÜ FBE Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Gebze, Kocaeli, 17-18 Mayıs (Poster).

Gök Ş., Pişkin H., Akdoğan N., (2017), “Biyolojik Uygulamalar İçin Manyetodirenç Etkili Planar Hall Sensörünün Geliştirilmesi”, Yoğun Madde Fiziği – İzmir Toplantısı, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 21 Nisan (Poster).

Pişkin H., Akdoğan N., (2017), “Biyosensör Uygulamaları için Manyetik İnce Film Üretimi ve Karakterizasyonu”, Yoğun Madde Fiziği – İzmir Toplantısı, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 21 Nisan (Poster).