

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLANAR HALL ETKİSİNE DAYALI
BİYOSENSÖRLERİN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİR
YÜZEYLERE BÜYÜTÜLMESİ

BURAK ÖZER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLANAR HALL ETKİSİNE DAYALI
BİYOSENSÖRLERİN
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİR YÜZEYLERE
BÜYÜTÜLMESİ

BURAK ÖZER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. NUMAN AKDOĞAN

GEBZE

2018

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

**PREPARATION OF PLANAR HALL
EFFECT BASED BIOSENSORS ON
SHAPEABLE SURFACES**

BURAK ÖZER
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. NUMAN AKDOĞAN

GEBZE
2018

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 24/10/2018 tarih ve 2018/...53... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 26/10/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Burak Özer'in tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

:Prof. Dr. Numan Akdoğan



ÜYE

:Prof. Dr. Kemal Özdoğan



ÜYE

:Dr. Öğr. Üyesi Sinan Kazan



ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
24/10/2018 tarih ve 2018/...53... sayılı kararı.

ÖZET

Şekillendirilebilir manyetoelektronik cihazlar, son yılların en önemli teknolojik araştırma alanlarından biri hâline gelmiştir. Son derece hassas, uygun maliyetli ve yeniden şekillendirilebilen manyetoelektronik cihazların gelecekte yapılacak öngörülebilir uygulamaları arasında manyetik parçacık saptanması, mikroakışkan kanallarla üretilen platformlar ve yonga üstü laboratuvar uygulamaları bulunmaktadır. Manyetodirenç tabanlı biyoçipler arasında, planar Hall etkisi (PHE) sensörleri, yüksek sinyal-gürültü oranı, düşük ofset voltajı ve düşük dış manyetik alanlarda doğrusal tepki avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bu sebeple, sensör yapısında kullanılan malzemeler ve sensör mimarisi değiştirilerek, sensör hassasiyetini artırmak için kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır.

Bu tezde, PHE sensörlerinin farklı bükme koşulları altındaki hassasiyetleri incelenmiştir. Bu amaçla, magnetron sıçratma tekniği kullanılarak, iki tabakalı NiFe (10 nm) / IrMn (8 nm) malzemelerinden oluşan PHE sensörleri üretilmiştir. Sensörlerin manyetik özellikleri manyeto-optik Kerr etkisi tekniği kullanılarak incelenmiştir. Sensörlerin PHE voltaj değerleri ve AMR oranları, GTÜ Fizik Bölümü'nde tasarlanmış ve yapılmış olan transport sistemi kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca farklı manyetik alanlar altında sensör kararlılığını araştırmak için, zamana bağlı PHE voltaj değişimini inceleyen timescan ölçümleri yapılmıştır. Ek olarak, üretilen sensörlerin şekillendirilebilir uygulamalar için uyumluluğunu kontrol etmek için, sensörler içbükey ve dışbükey olarak bükülerek PHE hassasiyetinin ve AMR oranının değişimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekillendirilebilir Manyetik Sensörler, Planar Hall Etkisi, Kaydırma Etkisi, Litografi, Anizotropik Manyeto-Direnç, Kapton, PDMS.

SUMMARY

Shapeable magnetoelectronics became one of the most important technological research fields of the last years. Foreseeable applications of highly sensitive, cost effective and re-shapeable magnetoelectronics also include magnetic particle detection in microfluidics and lab-on-a-chip platforms. Among the magnetoresistive-based biochips, planar Hall effect (PHE) sensors have the advantages of high signal-to-noise ratio, small offset voltage, and linear response at small field. Therefore, there has been extensive research to increase their sensitivity by optimizing sensor materials and sensor architectures.

In this thesis, the field sensitivity of PHE sensors under different bending conditions were investigated. For this purpose, the PHE sensors were fabricated by the lift-off of a bilayer exchange bias structure of NiFe(10 nm)/IrMn (8 nm) by using a magnetron sputtering system. The magnetic properties of the sensor materials were investigated by using magneto-optical Kerr effect technique. The PHE voltage profiles of the sensors and AMR ratios were measured using a home-made transport measurement system. We have also carried out timescan experiments to investigate the sensor stability under different magnetic fields. In addition, we have performed bending measurements under concave and convex configurations to check the compatibility of the produced sensors for shapeable applications.

Key Words: Shapeable Magnetic Sensors, Planar Hall Effect, Exchange Bias Effect, Lithography, AMR, Kapton, PDMS.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime başladığım günden bugüne, hiçbir zaman desteğini ve sabrını esirgemeyen, akademik olarak kendimi geliştirmem için bana fırsat tanıyan değerli danışmanım Prof. Dr. Numan Akdoğan’a,

İlk olarak gruba geldiğim ilk günden bugüne, laboratuvarlarla ilgili bildiğim neredeyse her şeyi öğrendiğim Dr. Erdem Demirci’ye, yine hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Dr. Mustafa Öztürk’e, çalışmanın temelini oluşturması ve her zaman her soruma karşı sabırla beraber bu işi yürüttüğüm Hasan Pişkin’e ve diğer grup üyeleri Bayram Kocaman ve Dr. Şafak Gök’e,

Örneklerin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Perihan Aksu’ya,

Okuldaki arkadaşlıklarının ne kadar kıymetli olduğunu kelimelerle anlatamayacağım Alp Kılıç, Çiğdem Çakırlar ve Onur Alev’e,

Liseden bu yana tanıdığım, her zaman varlığını bir şans olarak gördüğüm, hayatımızın yüksek lisans kısmını da beraber sürdürüp birbirimize hep destek olduğumuz canım dostum Nursemin Feratlar’a,

Arkadaşlar seçtiğimiz ailemizdir cümlesini yıllardır neden sarf ettiğimi bir gün dahi unutmamamı sağlayan Işılsu Yıldırım, Gülce Coşku Yılmaz ve İlkin Deniz Özer’e,

Çanakkale’den hayatıma kalan en güzel şey olarak hep yanımda olan ve bana dostluğun tanımını tekrar öğreten Dila Kavame’ye,

Hayatımda, sahip olduğum her şeyi emeğine ve sabrına borçlu olduğum, bulunduğum yere gelmemde her zaman benim kadar payının ve hakkının olduğunu hissettiğim, bundan sonra yapacağım her şeyi onun için yapacağım canım annem Kadriye Emir’e,

En içten teşekkürlerimle...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KAVRAMLAR	6
2.1. Litografi	6
2.2. Manyetizma	9
2.2.1. Ferromanyetizma	10
2.2.2. Antiferromanyetizma	12
2.2.3. Kaydırma Etkisi (Exchange Bias)	13
2.3. Manyeto-direnç ve Hall Etkisi	16
2.3.1. Anizotropik Manyeto-direnç	18
2.3.2. Planar Hall Etkisi	19
3. ŞEKİLLENDİRİLEBİLİR MALZEMELER	22
3.1. Kapton (Polyimide)	22
3.2. Polidimetilsiloxane (PDMS)	23
4. DENEYSEL TEKNİKLER	25
4.1. Temizoda İşlemleri	25
4.1.1. Fotolitografi	25
4.1.2. Maske Hizalayıcı	26
4.2. Magnetron Saçtırma Tekniği	28
4.3. MOKE	29
4.4. Transport	30
5. DENEYSEL SONUÇLAR	31
5.1. Örneklerin Hazırlanması	31

5.1.1. PDMS Kalıp Dökümü	31
5.1.2. Altaş Temizliği	31
5.1.3. Fotorezist Kaplama	31
5.1.4. Litografi İşlemleri	32
5.1.5. Magnetron Saçtırma İşlemleri	33
5.2. MOKE Ölçümleri	34
5.3. Transport Ölçümleri	35
5.3.1. AMR Ölçümleri	36
5.3.2. PHE Ölçümleri	38
5.4. Timescan Ölçümleri	39
5.5. Bükme Ölçümleri	40
6. SONUÇLAR	43
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	48

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
Ar	: Argon
Fe	: Demir
Ni	: Nikel
Co	: Kobalt
CoO	: Kobalt Oksit
$NiFe$	: Nikel Demir
$IrMn$	: İridyum Mangan
Pt	: Platin
M	: Mıknatıslanma
V	: Hacim
X	: Manyetik Duygunluk
μ	: Manyetik Moment
H	: Manyetik Alan
B	: Manyetik İndüksiyon
T	: Sıcaklık
T_N	: Nèel Sıcaklığı
T_C	: Curie Sıcaklığı
Oe	: Manyetik Alan Birimi
J_{ex}	: Değiş-Tokuş İntegrali
ρ_H	: Hall Özdirenci
V_H	: Hall Voltajı
V_{AHE}	: Anormal Hall Voltajı
V_{PHE}	: Planar Hall Voltajı
R_A	: Anormal Hall Katsayısı
H_K	: Anizotropi Alanı
H_{EB}	: Exchange Bias Alanı
AMR	: Anizotropik Manyeto Direnç
AFM	: Antiferromanyetizma

<i>CTC</i>	: Dolaşan Tümör Hücreleri
<i>DC</i>	: Doğru Akım
<i>EB</i>	: Exchange Bias
<i>FM</i>	: Ferromanyetizma
<i>H_C</i>	: Zorlayıcı alan
<i>H_{EB}</i>	: Exchange Bias Alanı
<i>KE</i>	: Kaydırma Etkisi
<i>MOKE</i>	: Manyeto-optik Kerr Etkisi
<i>PDMS</i>	: Polidimetilsiloksan
<i>RF</i>	: Radyo Frekansı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Manyetik alan sensörlerinin kullanılacak alana göre kategorize edilmesi.	2
1.2: Biyosensör olarak kullanılan kanarya kuşları. a) Sensör yapısı b) Sensörün uygulama şekli c) Kafes içerisinde madene indirilmeden evvel çekilmiş fotoğrafı.	3
1.3: Susan E. Legett ve ark.'larının tasarladığı manyetik biyosensör	4
1.4: Canan Dağdeviren ve arkadaşlarının tasarladığı midede çözünebilen biyosensör. a) Sensörün esnek yüzeye yapıştırılması b) Sensörün dizaynı c) Sensörde kullanılan metal yapısı d) Metal tutucu e) Mide dokusu f) Yoğunluk oranına göre değişecek skala gösterimi.	4
1.5: G. Bermudez ve arkadaşlarının tasarladığı biyosensör. a) Sensörün çalışma şeklinin gösterimi. b) Manyetik alana karşı aşağı ve yukarı hareketinin tasviri. c) Manyetik alana karşı sağa ve sola hareketinin tasviri.	5
2.1: 1826 yılında 8 saatlik pozlama sonucu çekilmiş tarihteki ilk fotoğraf.	6
2.2: Fotolitografi yöntemi ile desen oluşturma.	7
2.3: Pozitif fotorezist ve negatif fotorezist arasındaki fark.	8
2.4: Spinlerin ferromanyetik düzeni.	10
2.5: Ferromanyetik malzemelerin duygunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi.	12
2.6: Spinlerin antiferromanyetik düzeni.	12
2.7: Antiferromanyetizma için sıcaklığa bağlı manyetik duygunluk eğrisi.	13
2.8: Kesik çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi 1) 77 K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi 2) ise 77 K'e kadar 10 kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir.	14
2.9: Kaydırma etkisi mekanizmasının manyetik alana bağlı gösterimi.	15
2.10: Hall etkisinin şematik gösterimi.	18
2.11: NiFe alaşımlarının bir dış manyetik alan altındaki direnç değişimi.	19
2.12: PHE sensör grafiğinden hassasiyet hesabı	21

3.1:	Kapton(poliimid) malzemesi.	22
3.2:	Kapton'un kimyasal yapısı.	22
3.3:	Kapton'un hard disk içindeki uygulaması.	23
3.4:	PDMS'in kimyasal yapısı.	24
4.1:	GTÜ Nanoteknoloji Enstitüsü'nde bulunan Mikro/Nano Aygıt Üretim Cihazı Laboratuvarındaki maske yazıcı cihazı.	26
4.2:	GTÜ Nanoteknoloji Enstitüsü'nde bulunan Mikro/Nano Aygıt Üretim Cihazı Laboratuvarındaki maske yazıcı cihazı.	27
4.3:	Fotolitografinin temizlik ve maske yazıcı aşamaları.	28
4.4:	a), örnek düzlemine dik; b) örnek düzlemine paralel; c) örnek düzleminde y-ekseni boyunca uzanmış MOKE ölçüm geometrileri	30
5.1:	GTÜ Mikro/Nano Aygıt Üretim Cihazı Laboratuvarı'nda bulunan pişirme ve spin kaplama cihazları.	32
5.2:	Litografi işlemi ile üretilen sensör yapısının eklem bacakları.	32
5.3:	Litografi işlemi ile üretilen sensör yapısının kontak alınacak bölgeleri.	33
5.4:	Büyütülen sensör yapısı.	33
5.5:	Si/Kapton örnek sisteminin kolay eksen MOKE ölçüm grafiği.	34
5.6:	PDMS/Kapton örnek sisteminin kolay eksen MOKE ölçüm grafiği.	35
5.7:	PCB üzerinde alınan kontaklar.	35
5.8:	AMR ölçüm geometrisi.	36
5.9:	Si/Kapton örnek sisteminin kolay eksen AMR ölçüm grafiği.	37
5.10:	PDMS/Kapton örnek sisteminin kolay eksen AMR ölçüm grafiği.	37
5.11:	PHE ölçüm geometrisi.	38
5.12:	Si/Kapton örnek sisteminin kolay eksen PHE ölçüm grafiği.	38
5.13:	PDMS/Kapton örnek sisteminin kolay eksen PHE ölçüm grafiği.	39
5.14:	Zamana bağlı ölçüm (timescan) grafiği	40
5.15:	Bükme ölçümleri için tasarlanan platform.	41
5.16:	Belirli bükme yarıçapları için PHE hassasiyetinin değişimi. Sol tarafta içbükey, sağ tarafta ise dışbükey bükme işlemlerinde ölçülen sonuçlar verilmiştir.	42

- 5.17 Belirli bükme yarıçapları için AMR oranının değişimi. Sol tarafta içbükey, sağ tarafta ise dışbükey bükme işlemlerinde ölçülen sonuçlar verilmiştir. 42

TABLÖLAR DİZİNİ

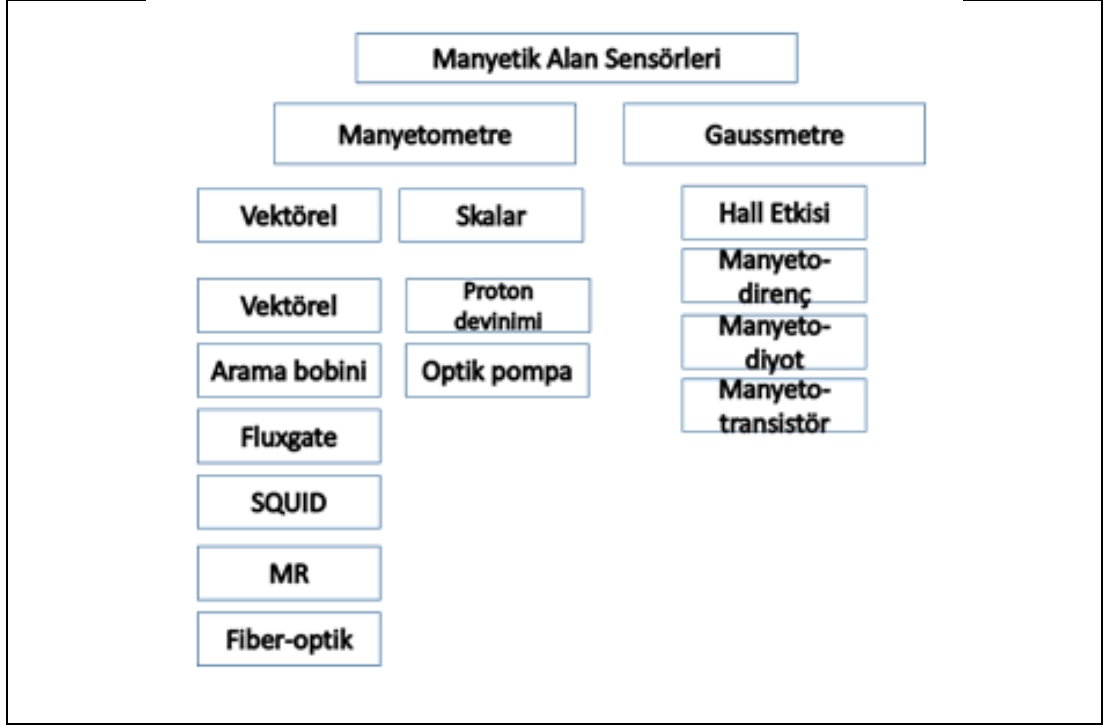
<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Bazı elementlerin Curie sıcaklık değeri.	10
5.1: Sensör yapısını oluşturan tabakaların büyütme şartları.	32
5.2: Alınan kontaklardan ölçülen direnç değeri.	35

1. GİRİŞ

İnsanoğlu, geçtiğimiz iki asırda endüstri ve enformasyon devrimi olmak üzere iki büyük sanayi devrimi geçirmiştir. 18. yüzyılda tekstil ile başlayan endüstri devrimi, sonrasında kendini otomotiv ve demiryolu endüstrisine bırakmıştır. 20. yüzyıla gelindiğinde ise artık bilgisayarın hayatımızın vazgeçilmez bir parçası hale gelmesiyle enformasyon devrimi baş göstermiştir. Günümüzde hâlâ hızını kesmeden ilerleyen nanoteknoloji biliminin gelişmesi ise, enformasyon devrimini bambaşka boyutlara taşıyor ve taşıyacaktır.[1, 2]

Nanoteknoloji, Yunanca cüce anlamına gelen nano kelimesinden türemiş ve matematiksel büyüklük olarak da metrenin milyonda biri anlamını taşımaktadır. Günümüzde, ileri savunma sanayiden sağlık sektöründeki tüm gelişmelere, akıllı tekstil ürünlerinden otomotivlerdeki sensörlere kadar birçok alanda nanoteknoloji, adından söz ettirir hale gelmiştir. Nanoteknoloji bilimi ile kullanım alanları hayli genişleyen sensörler, özellikle manyetizma alanındaki gelişmelerle yeni nesil cihaz üretimlerin imkân sağlamışlardır.

Manyetizma, dünyanın oluşumundan bu yana etkin bir rol oynadığı gibi, günlük hayatımızda kullandığımız neredeyse her cihazda manyetizmadan faydalanmaktayız. Ancak geçtiğimiz yaklaşık 10 senedir bu kadar görünür hale gelen manyetik cihazlar sayesinde, hayatımız her geçen gün daha da kolaylaşmaktadır. 1856 yılında William Thomson tarafından demir (Fe) ve nikel (Ni) parçacıkları ile ilk kez gözlemlenen manyeto-direnç etkisi (manyetik bir malzemenin akıma karşı gösterdiği tepki) 1988’de Albert Fert ve Peter Grünberg’in ortaya koyduğu dev manyeto-direnç etkisi ile, birbirinden bağımsız çalışan bu iki fizikçinin Nobel Fizik Ödülü’nü almalarını sağlamıştır.[3, 4] Bu buluşun ardından ortaya çıkan spintronik, spine dayalı elektronik, kavramı ile birlikte nanoteknoloji alanındaki çalışmalar bir üst boyuta taşınmıştır.[2, 5]



Şekil 1.1: Manyetik alan sensörlerinin kullanılacak alana göre kategorize edilmesi.

İlk olarak 1833 yılında Carl Friedrich Gauss tarafından keşfedilmiş olan manyetometreler ise, günümüzde biyomedikalden, otomotive, savunmadan enformatiğe kadar çok geniş kullanım alanına sahiptirler.

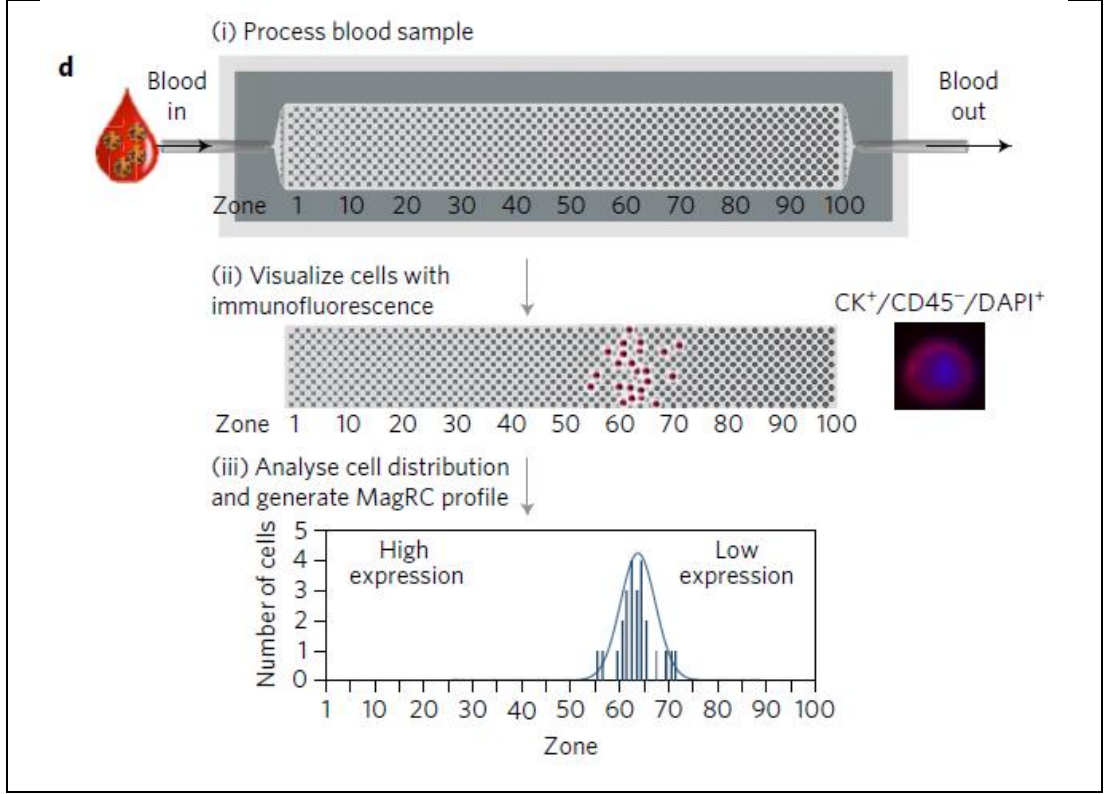
Biyosensörler, gelişen genetik bilimi ile birlikte çok yönlü uygulama alanına sahip olmuşlardır.[6] Biyosensörler, biyolojik sıvılar ve protein gibi biyolojik malzemelerin ölçümü ve tespiti için tasarlanmış cihazlardır. Bilinen en eski biyosensör uygulaması, İkinci dünya savaşı esnasında zehirli gazların tespiti için kullanılan kanarya kuşlarıdır. Kanarya kuşları aynı zamanda madenciler tarafından da kullanılmıştır. Zehirli gazlara duyarlı kanaryalar, madende oluşacak karbonmonoksit ve metan gazı gibi maddelerin çoğalma durumunda ötmeyi kesip, madencilere bir nevi haber vermektedir. Kuşların ötmeyi kesmeleri askerler için gaz saldırısı anlamına gelirken madenciler için ise madeni boşaltma talimatı olarak algılanıyordu.[7]



Şekil 1.2: Biyosensör olarak kullanılan kanarya kuşları. a) Sensör yapısı b) Sensörün uygulama şekli c) Kafes içerisinde madene indirilmeden evvel çekilmiş fotoğrafı.

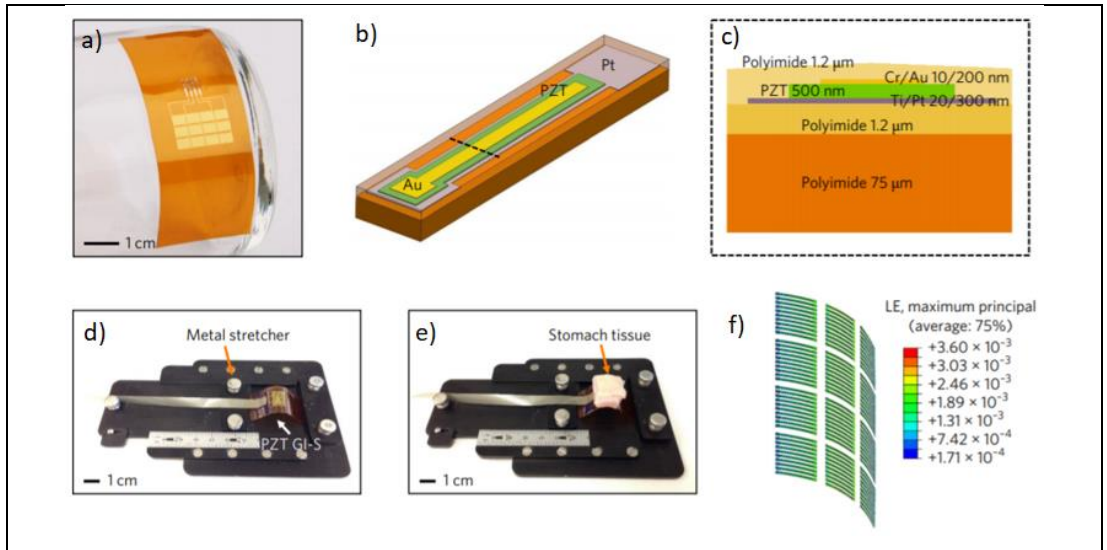
Geçtiğimiz yıllarda biyosensör teknolojisi fizik, kimya, genetik, malzeme bilimi ve elektronik gibi çok disiplinli olarak gelişimi ile birlikte göz ardı edilemez bir mesafe katetmiştir. Günümüzde artık biyosensörler, nano boyutta uygulamaları ile birçok farklı konuda üstün özellikler sergilemektedirler. Biyosensör sisteminde enzim ve antibadiler ile seçici tanıma mekanizmasına sahip bazı moleküllerin sinyal üretmesi sağlanmaktadır.

Biyosensörlerin gelişimi yalnızca kullanım alanları ile kalmayıp, aynı zamanda kullanıldıkları bölgeler de zaman içinde değişim gösterdi. Artık biyosensörler esnek, kıyafetlere ve hatta deriye uyumlu hale gelirken, hastalıkların teşhisi veya ölçümü daha da kolaylaştı. Susan E. Legett ve ark. (2017) yaptığı çalışmadaki manyetik biyosensör sayesinde, kanda dolaşan tümör hücreleri (CTC) olarak adlandırılan kanserli hücrelerin teşhisi, girişimsel olmayan bir yöntem ile yalnızca kan alınarak yapılabilir hale gelmiştir.[8, 9]



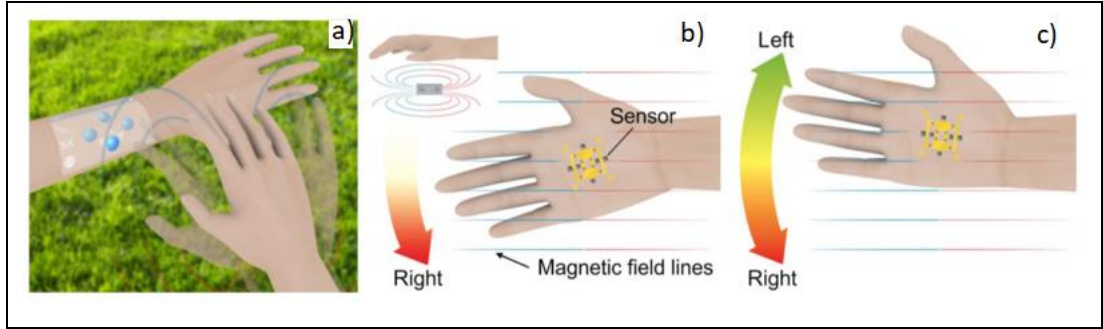
Şekil 1.3: Susan E. Legett ve arkadaşlarının tasarladığı manyetik biyosensör.

Canan Dağdeviren ve ark. (2017) yaptığı çalışmalar ile de midede çözülebilir sensör üretilmiş ve bu sayede hastalık izlemesi yapılabilmektedir.[10]



Şekil 1.4: Canan Dağdeviren ve arkadaşlarının tasarladığı midede çözünebilen biyosensör. a) Sensörün esnek yüzeye yapıştırılması b) Sensörün dizaynı c) Sensörde kullanılan metal yapısı d) Metal tutucu e) Mide dokusu f) Yoğunluk oranına göre değişecek skala gösterimi.

G. Bermudez ve arkadaşlarının (2017) yaptığı çalışmada ise esnek manyetik alan sensörleri kullanılarak artırılmış gerçeklik sensörü üretilmiş, ve robotik alanında çok önemli bir adım olarak kendine yer bulmuştur.[11]



Şekil 1.5. G. Bermudez ve arkadaşlarının tasarladığı biyosensör. a) Sensörün çalışma şeklinin gösterimi. b) Manyetik alana karşı aşağı ve yukarı hareketinin tasviri. c) Manyetik alana karşı sağa ve sola hareketinin tasviri.

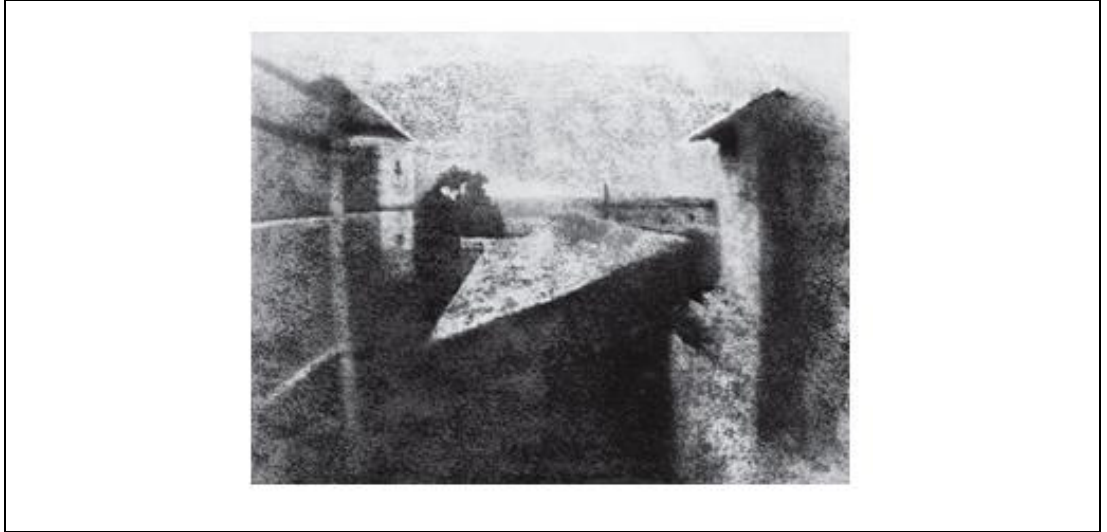
Manyetik alan biyosensörleri arasından, yüksek hassasiyetleri ve düşük manyetik alan algılayabilme özellikleri sayesinde öne çıkan planar Hall etkisine dayalı biyosensörler sayesinde ise, uygulanan çok düşük manyetik alanlarda bile yüksek bir sinyal alınmayı mümkün kılarak hem maliyeti düşük hem de performansı yüksek cihazlar tasarlanmıştır.[12-26]

2. GENEL KAVRAMLAR

2.1. Litografi

Litografi, kelime kökeni Eski Yunanca litho ve graphy'den türeyen ve Türkçe olarak taş ve yazma kelimelerinden oluşan taş yazma anlamını taşımaktadır.ve yazma, kelimelerinden türeyen taş yazma anlamını taşımaktadır. 1700'lü yılların sonlarına doğru geliştirilen bu baskı tekniği ile birçok eser yapılmıştır. Bu düz baskı tekniği, su ve yağın karışmaz özelliğinden faydalanılarak yapılır. Düz baskı levhası üzerine çizilmiş olan desen yağlandıktan sonra levha ıslatılır. Islak bölgelerin emiciliği olmadığından dolayı bu bölgeler boş kalır, geri kalan bölge ise desenle kaplanır. Son olarak da levha ıslatılır ve mürekkeple kaplanır.

1826 yılında ilk olarak Fransız fizikçi Nicephore Niepce tarafından asfalt taşının ışığa duyarlı olma özelliğini kullanarak, dünyada ilk kez bir yüzey üzerine görüntüyü sabitlemeyi başarılmasında fotolitografi yöntemi kullanılmıştır.

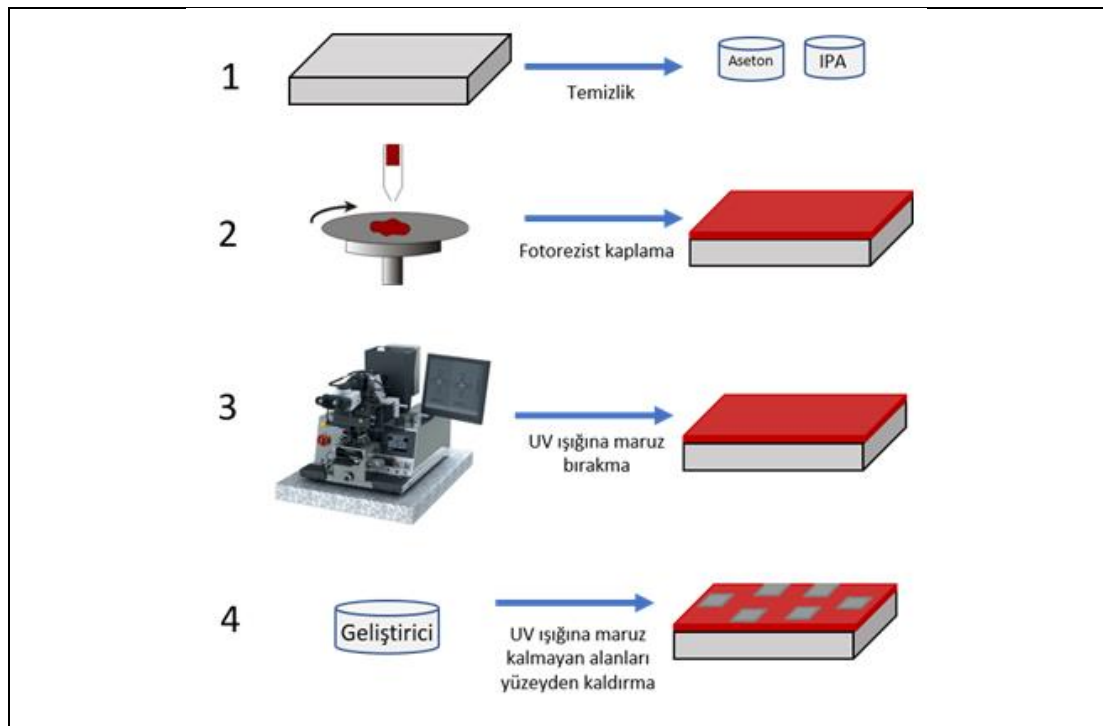


Şekil 2.1: 1826 yılında 8 saatlik pozlama sonucu çekilmiş litografi tekniği ile oluşturulmuş ilk fotoğraf.

Tarihsel olarak, yapılan ilk fotolitografi çalışmalarında UV ışık kaynağı, civa gaz lambası ile alınmaktadır. Bu lambalar, UV aralığı içinde birkaçı belirli dalgaboylarında yüksek güçlü ışınlam yapmakla birlikte geniş bir yelpazede ışık üretirler. Bu geniş spektrumdan istenilen dalgaboyu monokromatör ile seçilir. 1960'lı

yılların ortalarında 436 nm (g-line), 405 nm (h-line), 365 nm (i-line) lambalar kullanılmaktaydı.

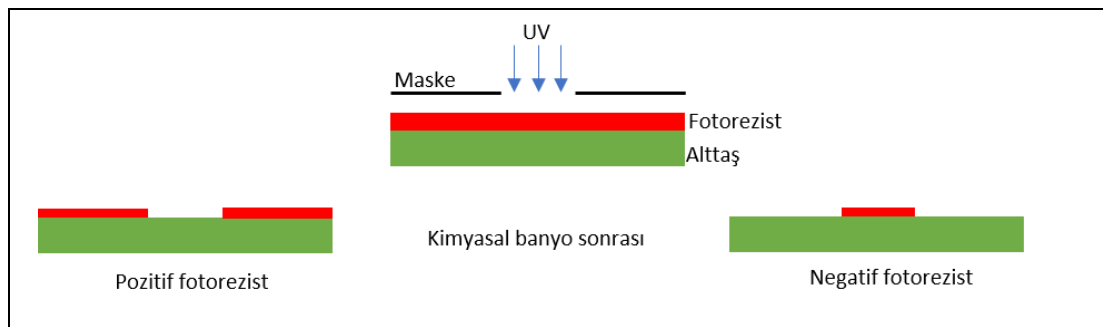
Günümüzde kullanılan modern fotolitografi yöntemi ile, desen oluşturulacak maskeler yardımıyla, mikro ve nano yapıda desenler elde edilmesi mümkün olup, bu sayede entegre tümleşik elektronik devreler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Maskeler ile oluşturulacak fotolitografi desenleri için birtakım kimyasal işlemler mevcuttur. İlk olarak kullanılacak alttaşın temizliği, alttaş üzerine kaplanacak ışığa duyarlı fotorezist polimerin düzgün kaplanması açısından büyük önem taşımaktadır. Alttaş üzerine kaplanan fotorezistin hem yüzeye tutunmasını artırmak hem de içindeki çözücüyü uçurmak amacıyla, kaplama işlemi sonrasında pişirme işlemi (bake) yapılması, polimerin alttaş üzerine daha sıkı tutunmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.2: Fotolitografi yöntemi ile desen oluşturma.

Fotorezist, ışığa duyarlı bir polimer olmakla beraber pozitif ve negatif olmak üzere ikiye ayrılır. Pozitif fotorezist, UV ışınına maruz kalan bölgelerdeki polimerin, çözünme işlemi sırasında o bölgeden ayrılıp deseni oluşturma esasına dayanır. Negatif fotorezist kullanımında ise, UV ışınına maruz kalan bölgeler sertleşerek yüzeye

tutunur. Işına maruz kalmayan bölgeler yüzeyden çözünür ve maske üzerindeki desenin tersi, alttaş üzerinde oluşmuş olur. Negatif fotorezistin yaklaşık %80'i ışığa duyarlı olmayan polimerlerden, %20'si ise ışığa duyarlı çapraz bağları oluşturan etken maddeden oluşur. Pozitif fotorezist reçine, ışığa duyarlı madde ve çözücünden oluşmaktadır. Reçine, yüzeye yapışmayı sağlayarak, UV ışığına maruz kalmayan bölgenin bir sonraki adımda maske görevi görmesini sağlarken, UV ışığına maruz kalan bölgedeki çözücü, reçine ile bağları koptuğundan, o bölgenin yüzeyden ayrılmasını sağlarken, ışığa duyarlı madde kimyasal işlemler esnasında çözünmeyi engeller.[27]



Şekil 2.3: Pozitif fotorezist ve negatif fotorezist arasındaki fark.

Negatif fotorezistin pozitif fotoreziste kıyasla en büyük dezavantajı alttaş üzerinde UV ışığına maruz kalan bölgenin sertleşerek hacminin artması ve bunun sonucu olarak şekillendirmede oluşan bozulmalardır. Bu durum, şekillendirmenin çözünürlüğünü etkileyeceği için yüksek hassasiyetli çalışmalar için negatif fotorezist elverişli değildir. Aynı zamanda sertleşen bölgeden negatif fotorezist bir daha çözünemeyeceği için alttaş, tekrarlı işlemlerde kullanılamayacaktır. Bu da maliyeti artıran bir etmen olarak göz önünde bulundurulabilir. Pozitif fotorezistin herhangi bir bölgesinde ise bir hacim artışı gözlemlenmeyeceği gibi, yüzeyden tamamı kolayca çözünebilir. Bu sebeplerden ötürü pozitif fotorezist ile daha yüksek çözünürlükte ve hassasiyette şekillendirmeler yapmak mümkündür.[27]

Fotorezist kaplama işlemi fotolitografinin kritik adımlarından biridir. Çünkü sonrasında uygulanacak adımlarda sıcaklık, mekanik ve kimyasal etkilere dayanıklı olması ve deseni en iyi ve doğru şekilde aktarmak, düzgün bir şekilde fotorezist kaplanması esasına dayalıdır.

2.2. Manyetizma

Manyetizmanın tarihi, bilinen ilk manyetik malzeme olan magnetite (Fe_3O_4) isimli bir mineralle başlamaktadır. Bilimsel olarak ise manyetizma ile ilgili ilk çalışmalar 1550’li yıllarda William Gilbert tarafından yapılmaya başlanmıştır. Hans C. Oersted’in 1820’de elektrik akımının manyetik alan üretmesini ilk gözlemiyle beraber, akabinde 1825’te ilk kez elektromıknatıs yapılmıştır. Manyetik malzemelerle ilgili araştırmaların geçmişinin elektromıknatısın bulunmasına dayandığı söylenebilir. Elektromanyetik kuvvet, yüklü parçacıklar arasında gözlemlenen doğadaki temel kuvvetlerden biri olup, manyetizma bilimi bu kuvvetin özelliklerini, yüklü parçacıkların manyetik alan altındaki hareketini ve kaynağını inceleyen bir fizik dalıdır.

Manyetizma, elektronların manyetik momentinden kaynaklanmaktadır. Manyetik momentin ise başlıca üç kaynağı vardır. Bunlardan birincisi, elektron spin moment, ikincisi çekirdek etrafındaki yörüngesel açısal moment ve sonuncusu ise manyetik alan uygulandığında yörünge momentinde oluşan değişikliktir.

Bir malzeme üzerine manyetik alan (H) uygulandığında, malzemenin buna verdiği cevap manyetik indüksiyondur (B). Aynı zamanda manyetik akı yoğunluğu olarak da adlandırılır. B ile H arasındaki ilişki malzemenin özelliğini belirtir. B ile H arasındaki ilişki

$$B = H + 4\pi M \quad (2.1.)$$

bağıntısı ile verilir. Burada M malzemenin mıknatıslanmasını vermektedir. Mıknatıslanma birim hacimdeki manyetik moment (μ) olarak tanımlanabilir.

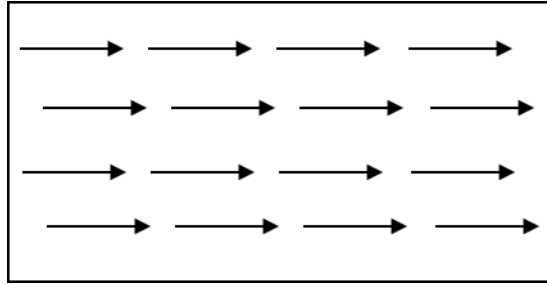
$$M = \frac{V}{\mu} \quad (2.2)$$

Manyetik duygunluk (χ) ise malzemenin dışarıdan uygulanan alana verdiği tepki olarak tanımlanır ve denklemi

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.3.)$$

ile verilir.

2.2.1. Ferromanyetizma



Şekil 2.4: Spinlerin ferromanyetik düzeni.

Ferromanyetizma, bir malzemenin, herhangi bir dış manyetik alan olmaksızın mıknatıslık özelliğine sahip olmasını ifade eder. Bunun fiziksel kaynağı, ferromanyetik malzemelerin son yörüngelerinde bulunan eşleşmemiş elektronlara sahip olmasıdır. Bu sayede net bir manyetik momentleri mevcuttur. Ferromanyetik malzemelere bir dış manyetik alan uygulanır ise, uygulanan alanın yeterli olması durumunda, elektronların spinleri uygulanan alanla aynı yönde yönelirler. Uygulanan alan kaldırılrsa bile bu spinler yönelimlerini korumaya devam ederler. Dışarıdan bir alan uygulanmadığı durumda bile bir mıknatıslanmaya sahiptir denebilir. Bu kalıcı mıknatıslanmanın sebebi, yani kalıcı manyetik momentin varlığı, ise elektron spinleri ve manyetik momentlerinin bir düzene sahip oldukları anlamına gelmektedir. Ferromanyetik malzemeler, her malzemenin kendine özgü olan kritik sıcaklık değerinin (Curie sıcaklığı, T_C) altında mıknatıslık özelliği gösterirler. Bu sıcaklığın üstünde, manyetik momentler paralellik özelliklerini kaybedip gelişigüzel davranış sergileyeceğinden, net manyetik moment sıfır olur. Bu da mıknatıslanma özelliğini ortadan kaldırır ve malzeme paramanyetik hale gelir. Periyodik tabloda oda

sıcaklığında ferromanyetik halde bulunan üç tane element vardır. Bunlar, demir (Fe), kobalt (Co), ve nikel (Ni), yapıları sebebiyle manyetik momentleri birbirine paralel durumdadır. Ferromanyetizmanın, teknolojik olarak yaygın kullanılma alanına sahip olmasındaki en temel faktör ise; ferromanyetik malzemelerin doyum mıknatıslanma değerine çok küçük manyetik alanlar altında ulaşmasıdır, doyum mıknatıslanma değeri; tüm manyetik momentlerin birbirine paralel olduğu değer olarak tanımlanabilir.

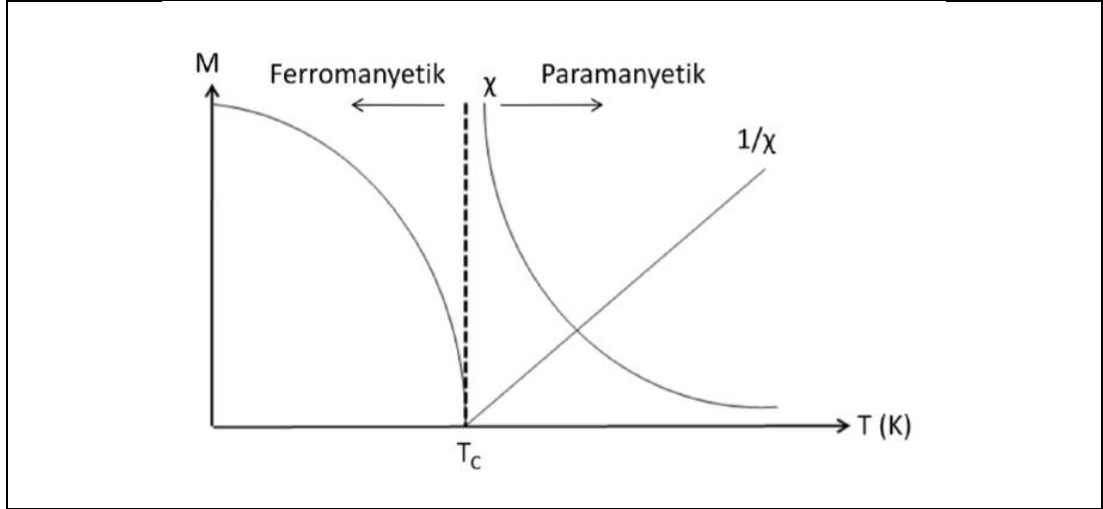
Tablo 2.1: Bazı elementlerin Curie sıcaklık değerleri.

Element	Curie Sıcaklığı (K)
Ni	628
Fe	1044
Co	1388

En yakın komşu atomların spinlerinin etkileşmesine değiş-tokuş etkileşmesi denir. Spinlerin paralel veya antiparalel yönelimlerinin temelinde Coulomb etkileşmesi vardır. N tane spinden oluşan bir sistem için değiş-tokuş enerjisi denklem 2.5'te verilmiştir.

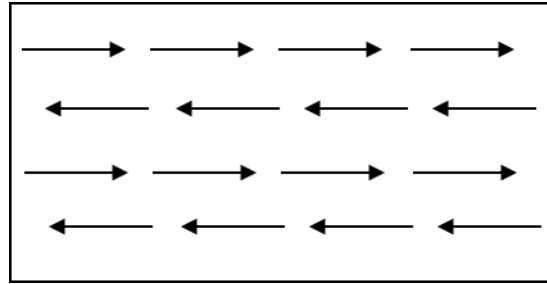
$$E_{ex} = -2J_{ex} \sum_{n=1}^N S_n \cdot S_{n+1} = -2J_{ex} S_n S_{n+1} \cos\theta \quad (2.4)$$

Denklem 2.5'teki J_{ex} değiş-tokuş integralini, S_n ve S_{n+1} en yakın komşu atomların spinlerini, θ gerçek durumda spinler arasındaki açıyı temsil etmektedir. Spinler arasındaki açı $\theta=0^\circ$ ise $\cos\theta=1$ olur. Enerji daima minimum olmak istediğinden J_{ex} integralinin değeri pozitif olur ve spinler paralel yönelmiş olurlar. Eğer $\theta=180^\circ$ ise $\cos\theta=-1$ olur. Enerji yine minimum olmak isteyeceğinden J_{ex} negatif değeri alır ve spinler antiparalel yönelmiş olurlar.



Şekil 2.5: Ferromanyetik malzemelerin duygunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi.

2.2.2. Antiferromanyetizma



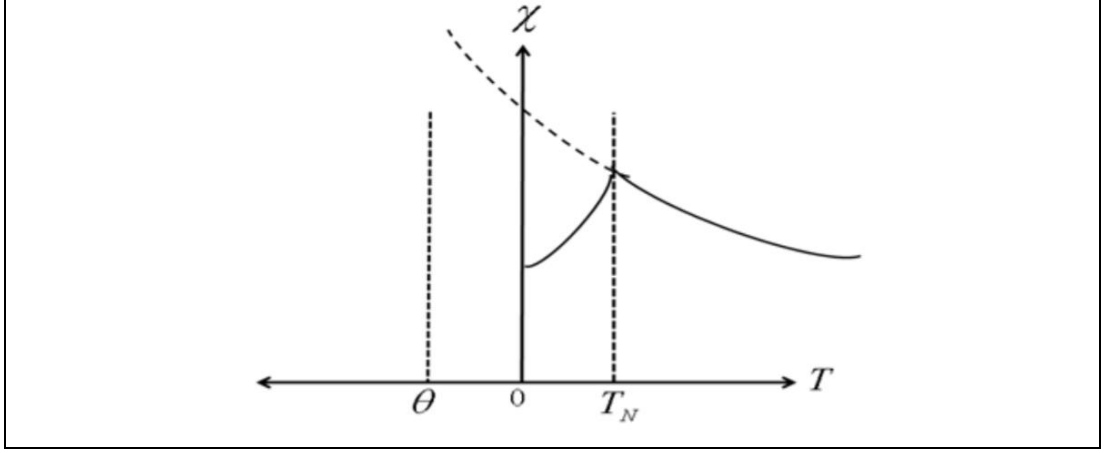
Şekil 2.6: Spinlerin antiferromanyetik düzeni.

Antiferromanyetizma, ferromanyetizmaya benzer bir şekilde manyetik momentlerin belirli bir düzen halinde olması olarak tanımlanır. Ancak manyetik momentler birbirine göre anti paralel dizilime sahiptirler ve dış manyetik alan olmadığı durumlarda net manyetik momentleri sıfırdır. Haliyle, kendiliğinden mıknatıslanmaya sahip değildir ve mıknatıslanma değeri oldukça zayıftır. Uygulanan dış manyetik alan altında, antiferromanyetik malzemelerin uygulanan alana paralel ve anti paralel spinleri, güçlü moleküler alanları sebebiyle hemen hemen hiç dönme eğilimi sergilemezler. Ancak belirli bir kritik sıcaklık değeri olan Néel (T_N) sıcaklığının altında antiparalel şekilde dizilirler. $T > T_N$ olduğunda antiferromanyetik duygunluk

sonsuz olmayıp, Şekil 2.7’de görüldüğü gibi küçük bir çıkıntı oluşturur. $T > T_N$ olan paramanyetik bölgede manyetik duymunluğu:

$$\chi = \frac{C}{T + \theta} \quad (2.5)$$

ile ifade edilebilir.



Şekil 2.7: Antiferromanyetizma için sıcaklığa bağılı manyetik duymunluk eğrisi.

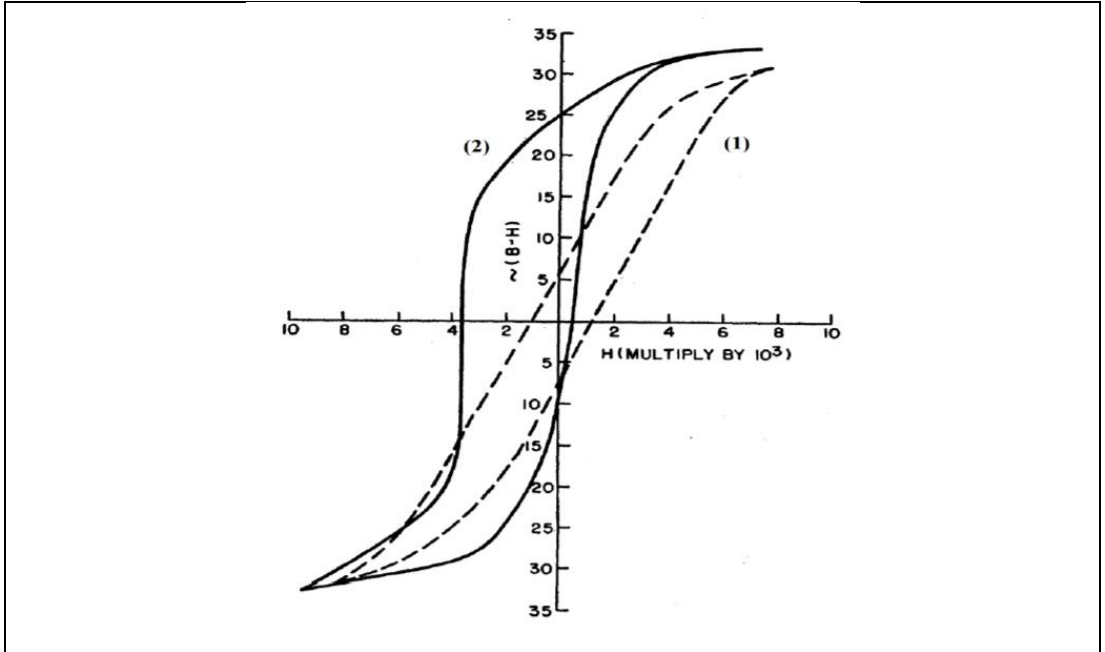
2.2.3. Kaydırma Etkisi (Exchange Bias)

Bir ferromanyetik malzeme ile antiferromanyetik malzemedan oluşan örnek sistemi; antiferromanyetik malzemenin Néel sıcaklığının üstünden başlamak suretiyle manyetik alan altında soğutulduğunda, ölçümlerde ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisinde manyetik alan ekseninde kayma meydana geldiği gözlemlenmektedir. Malzemelerin ara yüzeyinde oluşan manyetik çiftlenim ile değiş-tokuş etkileşiminin rol oynadığı bu kayma, kaydırma (exchange bias) etkisi olarak tanımlanmaktadır.[28] Aynı zamanda bu etkiye tek yönlü anizotropi denmesinin sebebi de, ferromanyetik malzemenin mıknatıslanmasını uygulanan soğutma alanı doğrultusunda, belirli bir yönde sabitliyor olmasından kaynaklıdır. Ferromanyetik ve antiferromanyetik yüzeylere sahip örnek sistemlerinde gözlemlenen bu kayma, genellikle soğutma esnasında uygulanan alana zıt yönde olmaktadır. [29-31]

İlk kez 1956 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından, yaptıkları düşük sıcaklık çalışmalarında üzerinde çalıştıkları kobalt (Co) parçacıkların bir kısmının doğal olarak oksitlenmesi ve kobalt oksit (CoO) oluşumu sonucunda Kaydırma Etkisi gözlemlenmiştir. İlk gözlenmesinin üzerinden geçen zamandan bu yana, Kaydırma Etkisi'nin mikroskopik temelleri günümüzde hâlâ tam olarak belirlenemediğinden daha iyi anlaşılabilmesine yönelik bilimsel çalışmalar devam etmektedir.[32-36]

Exchange bias etkisi, yüksek hafızalı depolama cihazları, okuyucu kafalar, spin vanaları, MRAM ve sensörler gibi teknolojik uygulamalarda kullanılabilir. Ancak teknolojik cihazlarda düşük enerji tüketimli, güçlü, kontrol edilebilir ve sonuçları tahmin edilebilir uygulamalar için bu etkinin bilimsel temellerinin çok daha iyi anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

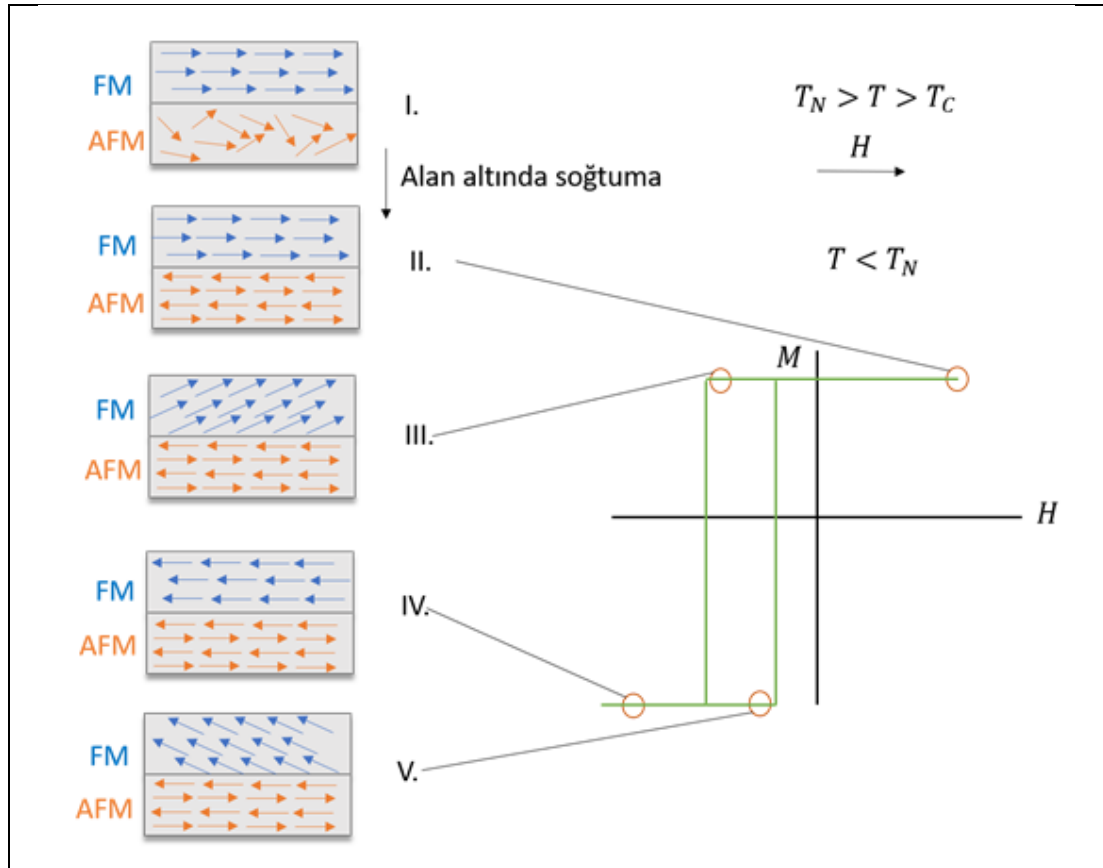
Bu etkinin ilk keşfini takip eden yıllarda etkinin oluşumuna dair birçok model öne sürüldü. Bu modellerde ara yüzeylerdeki eşleşmiş-eşleşmemiş spinler, ara yüzeye dik veya paralel domen duvarı oluşumları, ara yüzey pürüzlülüğü gibi etkiler öne sürüldü ve tartışıldı. Ancak anizotropiler, kristal yapısı, ara yüzey pürüzlülüğü, ara yüzey spin düzenleri ve manyetik domenler gibi parametrelerin çokluğu nedeniyle, henüz hiçbir model kaydırma etkisi etkisi alanının (H_{EB}) değişmesi ve sıfırlayıcı alanların (H_C) artması gibi sonuçları tam olarak açıklayabilmek için yeterli değildir.



Şekil 2.8: Kesik çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi 1) 77 K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi 2) ise 77 K'e kadar 10 kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir.

Şekil 2.8’de Meiklejohn ve Bean’in Co/CoO için elde ettikleri histeresis eğrileri verilmiştir. Kesik çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi Şekil 2.8 1) 77 K’e kadar manyetik alan uygulanmadan soğutma işlemi uygulanmış ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi Şekil 2.8 2) 77 K’e kadar 10 kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir. Manyetik alan altında soğutulan örneğin histeresis eğrisinde kayma görülürken, alansız soğutulan örneğin histeresis eğrisinde herhangi bir kayma gözlenmemiştir.[28, 33]

Kaydırma etkisi, ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemelerin manyetik momentlerinin ara yüzeydeki etkileşmeleri sonucu gözlemlenir. Antiferromanyetik malzeme tarafından ferromanyetik malzemenin spinleri tutulur (pinned) ve ferromanyetik malzemenin manyetik momentleri uygulanan manyetik alan yönünde dönemez. Bu durum Şekil 2.9 da gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Kaydırma etkisi mekanizmasının manyetik alana bağlı gösterimi.

İlk durumda sistem T_N sıcaklığının üstünde iken manyetik alan uygulanarak soğutulmaya başlanılır. Burada amaç FM malzemenin manyetik momentlerini bir düzene sokmaktır. AFM malzeme bu esnada paramanyetik fazdadır.

İkinci durumda sistem T_N sıcaklığının altına giderken AFM malzemenin manyetik momentleri alan altında düzenli duruma geçecektir.

Üçüncü durumda FM malzemenin manyetik momentleri uygulanan alan yönüne dönmek isteyecek ama değiş-tokuş etkileşmesinden dolayı zorlanacaktır. Ancak yeterli alan uygulandığında tüm manyetik momentler alan yönünde yönelebilecektir.

Dördüncü durum ise FM malzemenin manyetik doyuma ulaştığı durumdur. Soğutma alanı yönünde manyetik alan uygulandığında

Beşinci ve son durumda da AFM malzemenin manyetik momentleri ile değiş-tokuş etkileşimi sayesinde daha az bir enerji ile FM malzemenin manyetik momentleri alan yönünde yönelecektir.

2.3. Manyeto-direnç ve Hall Etkisi

Bir malzemenin içerisinde akım geçişi esnasında bir dış manyetik alan uygulanıp direnç ölçümleri yapıldığında; bu malzemenin türüne, uygulanan manyetik alanın yönüne ve ölçülen direncin geometrisine göre farklı sonuçlar elde edilmektedir. Uygulaması bu şekilde olan manyetik alana bağlı yapılan direnç ölçümleri, en temel hatları ile manyeto-direnç (MR) veya Hall etkileri olarak tanımlanabilmektedir. İki fiziksel terim arasındaki ana farklılık, MR yapılarında gerilimin akımla aynı doğrultuda; Hall etkilerinde ise akıma dik ölçülüyor olmasıdır. MR veya Hall etkisi gösteren malzemeler kullanılarak, günümüzde ticari olarak manyetik sensörler, bilgisayarlarda manyetik okuyucu kafalar ve manyetik hafıza elemanları üretilmektedir. Bu sebeple, MR ve Hall etkileri ile ilgili çalışmalar günümüzde de yoğun bir şekilde devam etmektedir. Spintronik tabanlı uygulamalardaki önemi nedeniyle, MR çeşitlerinden biri olan dev manyeto-direnç çalışmaları 2007 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür.

William Thomson'dan 23 yıl sonra, 1879 yılında Edwin Hall, iletken bir malzemedeki elektronların, hareketleri yönüne dik uygulanan manyetik alan etkisinde sapmaya uğradıklarını gözlemlemiştir.[37] Yani, uygulanan manyetik alanın akım

yönüne dik olması durumunda; akıma ve manyetik alana dik bir elektriksel alan meydana geldiğini keşfetmiştir. Bu olay Hall etkisi olarak bilinmektedir.[38-40] Anizotropik manyeto-direnç ile arasındaki temel farklılık, manyeto-direnç yapılarında gerilimin akımla aynı doğrultuda; Hall etkilerinde ise akıma dik ölçülüyor olmasıdır. Bu etkinin keşfi ile yarıiletken malzemeler için bir dönüm noktası olarak görülebilir Çünkü Hall etkisi sayesinde yarıiletkenlerde taşıyıcının tipi (n-tipi veya p-tipi) öğrenilebilmekte ve taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı hareketliliği gibi parametreler hesaplanabilmektedir.

1879 yılında Hall, düzgün ve dik manyetik alanda üzerinden akım geçirilen iletkenine etki eden kuvvetin doğasını incelemek istemiştir. Dikdörtgen levha şeklinde bir iletkenine boyuna akım (I , x-yönünde) ve akıma dik bir dış manyetik alan (H , z-yönünde) uygulandığında iletkenliği sağlayan elektronlara bir manyetik kuvvet (F_m) etki edecektir. Bu deneylerde Hall'un vardığı sonuçlardan birincisi; düzlemine dik yönde manyetik alan uygulanan manyetik olmayan bir iletkenin akım geçirildiğinde filmin karşılıklı kenarları arasında bir elektrik alan (E) oluşur. Oluşan bu elektrik alan E 'nin uygulanan dış manyetik alana (H) ve iletkenin geçen akıma (i) dik yöndedir. Dik yönde oluşan E , iletken elektronların Lorentz kuvvetinin

$$\vec{F}_L = q (\vec{v} \times \vec{H}) \quad (2.6)$$

etkisinde köşelere doğru itilmesi ve karşılıklı köşelerde zıt kutuplar halinde oluşmasıdır. Bu durum E sabit bir değer alıncaya dek devam eder ve bu olay Hall etkisi olarak tanımlanır. Oluşan Hall etkisi ile E eşitliği

$$E_H = \frac{V_H}{d} = R_H J_x H = R_H \frac{i_x}{d} H \quad (2.7)$$

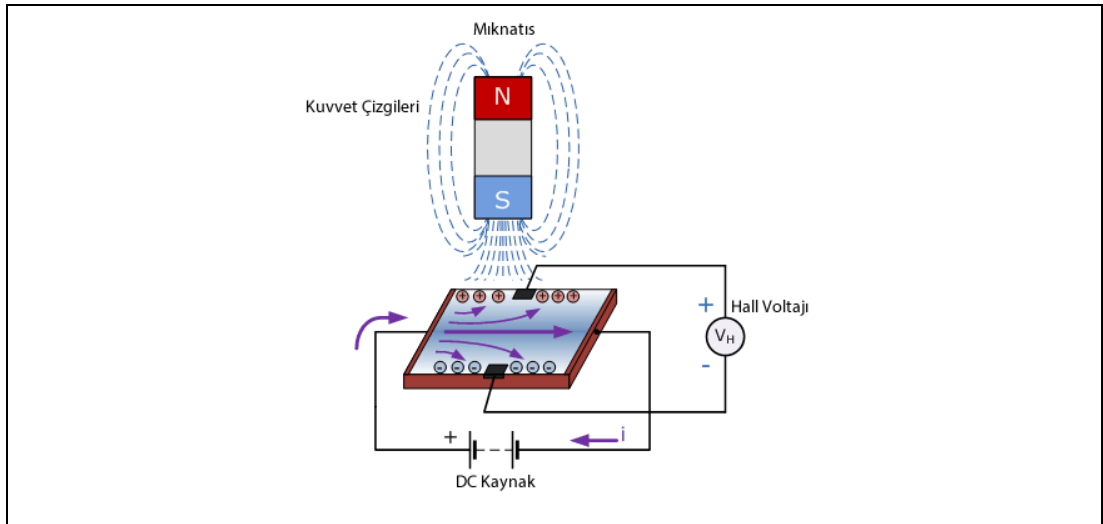
denkleminde sadeleştirmeler yapıldığında Hall voltajı

$$V_H = R_H \frac{i_x}{t} H \quad (2.8)$$

olarak bulunur. Bu ifadeye göre ince filmler için Hall gerilimi, filmin kalınlığı ile ters orantılıdır. Bu, metal inceldikçe oluşan Hall geriliminin artacağı anlamına gelmektedir. Hall öz direnç (ρ_H) ifadesi ise

$$\rho_H = R_H H \quad (2.9)$$

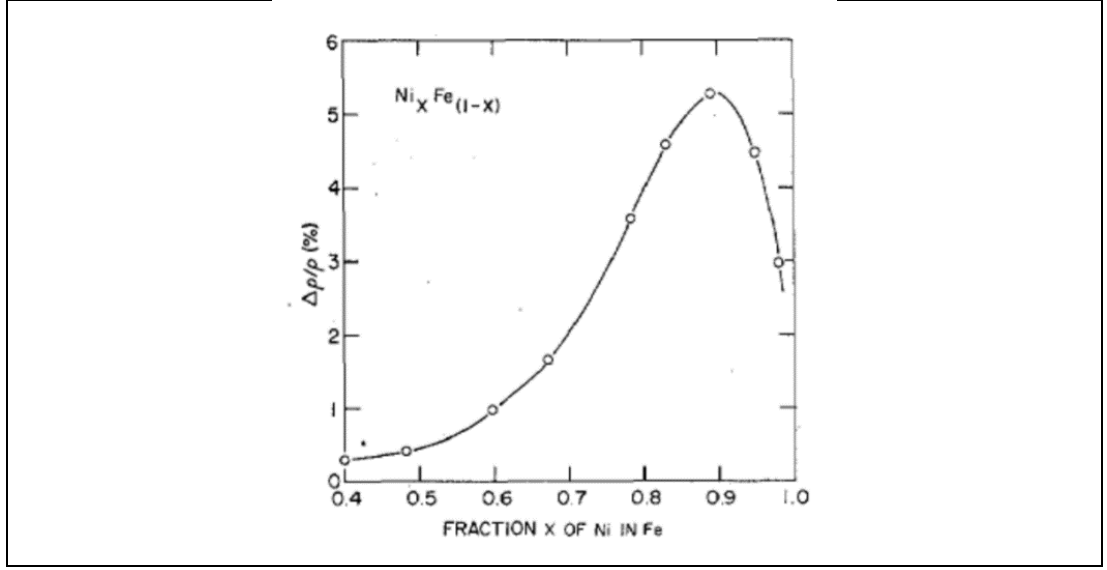
olarak verilmektedir.[41-43]



Şekil 2.10: Hall etkisinin şematik gösterimi.

2.3.1. Anizotropik Manyeto-direnç

1856 yılında William Thomson tarafından nikel (Ni) ve demir (Fe) parçaları ile yaptığı çalışmada akım ile aynı doğrultuda uygulanan manyetik alanın direnci artırırken, akıma dik yönde uygulanan manyetik alanın direnci azalttığını gözlemlemesiyle ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan elektriksel direnç %1 mertebesindedir. Manyetik alan ile akım yoğunluğu arasında spin-yörünge etkileşmesinden kaynaklanan bu etki, anizotropik-manyeto direnç olarak adlandırılmaktadır.[44] 1970’li yıllarda bu etki çalışılmaya devam edilmiş ve demir (Fe), nikel (Ni) ve kobalt (Co) bazlı malzemelerde direncin %6’ya kadar değiştiğini gözlemlemişlerdir.[45, 46]



Şekil 2. 11: NiFe alaşımlarının bir dış manyetik alan altındaki direnç değişimi.

Bu etki ilk kez 1856 yılında William Thomson gözlemlemiş olmasına karşın, anizotropik manyeto-direnç etkisinin spin-yörünge etkileşiminden kaynaklandığını 1962 yılında Kondo açıklamıştır. Anizotropik manyeto-direnç etkisi, manyetik alan değişimine gösterdiği tepkiden dolayı bilgisayar teknolojisinde ilk kez 1990'lı yılların başında IBM firmasının üretimi ile sabit disklerin okuyucu kafalarında kullanılmaya başlanmıştır. AMR oranı aşağıdaki ifade ile bulunmaktadır

$$AMR = \frac{\rho_{||} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}} \times 100 \quad (2.10)$$

2.3.2. Planar Hall Etkisi

Planar Hall etkisini normal Hall etkilerinden ayıran temel fark, uygulanan dış manyetik alanın örnek düzlemine paralel olmasıdır. Buna karşılık ferromanyetik malzemelerde uygulanan akıma karşılık gelen Hall voltajı ölçümleri yapılırken, denklem (2.9) ve (2.10)'da görülebileceği üzere normal ve anormal Hall etkisi ile beraber üç etki de gözlemlenmektedir.[47, 48]

PHE sensörleri, çok düşük seviyede (nanotesla mertebesi) hassasiyete sahip olduklarından oldukça zayıf manyetik alanların ölçümü için kullanılmaktadırlar.[26, 49-51] Bu zayıf manyetik alanlarda yüksek hassasiyet özellikleriyle manyetik parçacıkla işaretlenmiş tek bir biyomolekülü bile algılayabilirler. Örnek düzlemine paralel manyetik alan uygulanarak ölçüm yapıldığında elde edilen PHE voltaj değeri

$$V_{PHE} = V_y = \frac{i(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t} \sin\theta \cos\theta \quad (2.11)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir. Burada, denklem (2.10)'daki PHE teriminden farklı olarak anizotropi ve mıknatıslanma ifadeleri yerine akıma paralel ve dik yönde uygulanan alanlara göre, öz dirençler $\rho_{\parallel}$ ve $\rho_{\perp}$ yer almaktadır. Bu bağıntıyla beraber uygulanan dış manyetik alana göre PHE voltaj değeri

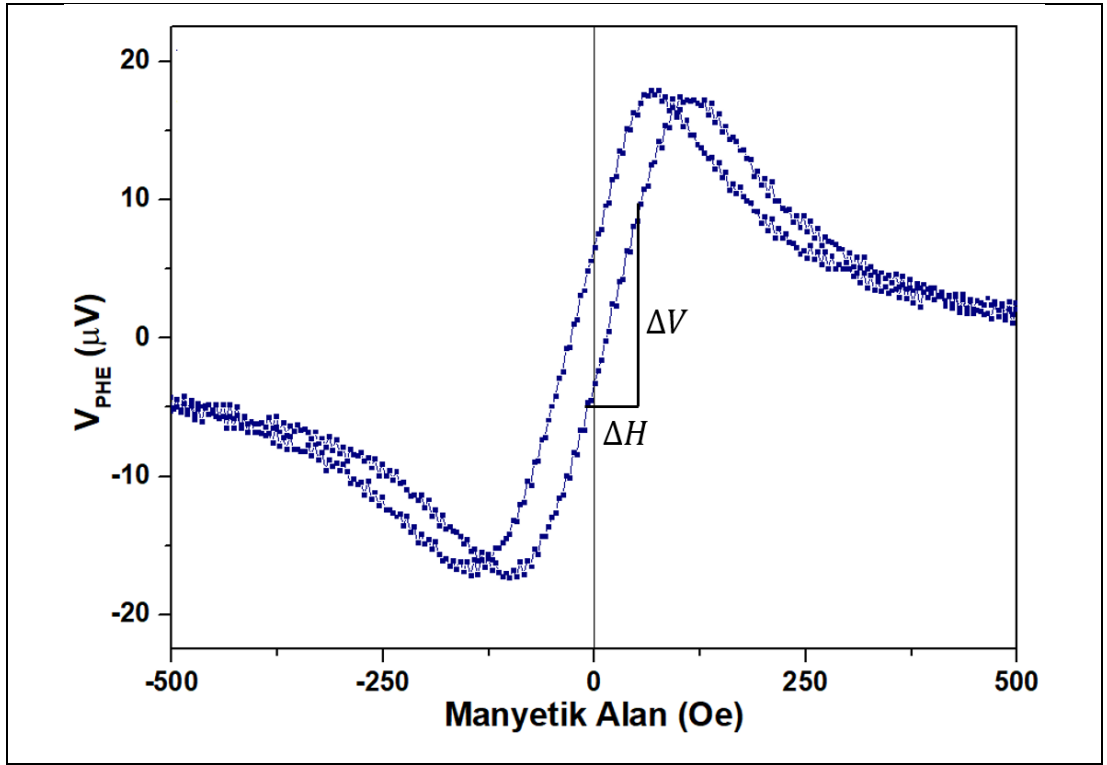
$$V_y \approx i_x \Delta R \frac{H_y}{H_K + H_{EB}} \quad (2.12)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada $\Delta R = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})/d$, H_y sensörü etkileyen dış manyetik alan; H_K anizotropi alanı ve H_{EB} de exchange bias alanıdır.

PHE sensörlerinin kullanım avantajlarının başında kolay üretime sahip olması gelmektedir. Aynı zamanda çalışma aralığında, manyetik alana karşı tepkisi hızlı ve lineerdir. Bununla birlikte bipolar davranışa sahip olması, yani pozitif ve negatif bölgede sinyal verebilmesi ve nano-piko T mertebesindeki hassasiyeti ile birlikte çok küçük manyetik alan değerlerinde yüksek hassasiyetli ölçüm alabilmek için, özellikle manyetik nanoparçacıkla çalışılacak uygulamalarda tercih edilebilir bir sensör yapısıdır.

PHE sensörlerinin hassasiyetleri ise, Şekil 2.12'de verilen PHE grafiğinde, lineer bölgedeki voltaj değişiminden Denklem 2.16 ile bulunabilir. Eğrinin eğimi arttıkça, sensör hassasiyetinde artış meydana gelmektedir. Bu eğrinin eğimini artırmak için önemli olan faktörler sensör yapısı ve sensör geometrisidir.

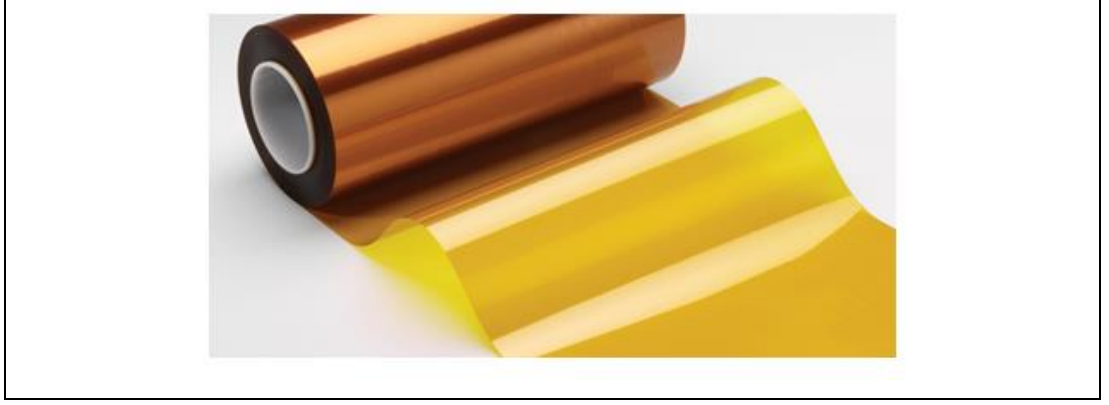
$$S = \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad (2.13)$$



Şekil 2.12: PHE sensör grafiğinden hassasiyet hesabı.

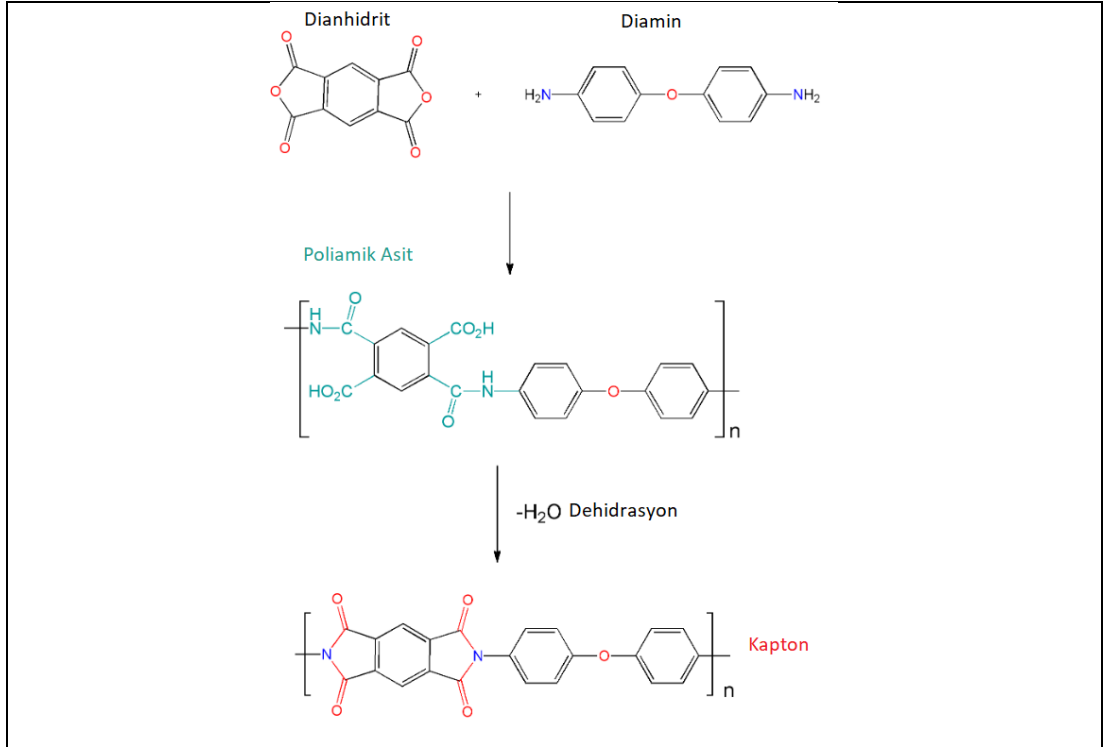
3. ŞEKİLLENDİRİLEBİLİR MALZEMELER

3.1. Kapton (Polyimide)



Şekil 3.1: Kapton(poliimid) malzemesi.

Kapton, adını üreten firma Dupont'tan almış bir aromatik inorganik bileşik olan poliimid ailesine aittir. Kapton, bir aromatik dianhidrit ve bir aromatik diaminin polimerleştirilmesiyle sentezlenir.



Şekil 3.2: Kapton'un kimyasal yapısı.

Kapton poliimid film, birçok farklı sektördeki çeşitli uygulamalar için ideal olmasını sağlayan benzersiz bir özellik kombinasyonuna sahiptir. Kapton'un geniş bir sıcaklık aralığında mükemmel fiziksel, elektriksel ve mekanik özelliklerini koruması, plastik filmlere yeni tasarım ve uygulama alanları açmıştır. Mükemmel kimyasal dirence sahiptir. Kapton, en yüksek UL-94 yanıcılık derecesine sahip olduğundan dolayı kendiliğinden söner. Kapton poliimid film, çeşitli elektrik ve elektronik yalıtım uygulamalarında kullanılabilir. Bunlar tel ve kablo bantları, bobin izolasyonu, esnek baskılı devreler için yüzeyler, motor yuvaları, tel yalıtımı, trafo ve kondansatör yalıtımı, manyetik ve basınca duyarlı bantlardır. Bu uygulamaların birçoğu, geniş bir sıcaklık aralığında Kapton'un elektrik, termal, mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin dengesine dayanmaktadır. Kapton'u eşsiz bir endüstriyel malzeme haline getiren aşırı sıcaklıklarda bu yararlı özelliklerin birleşimidir.

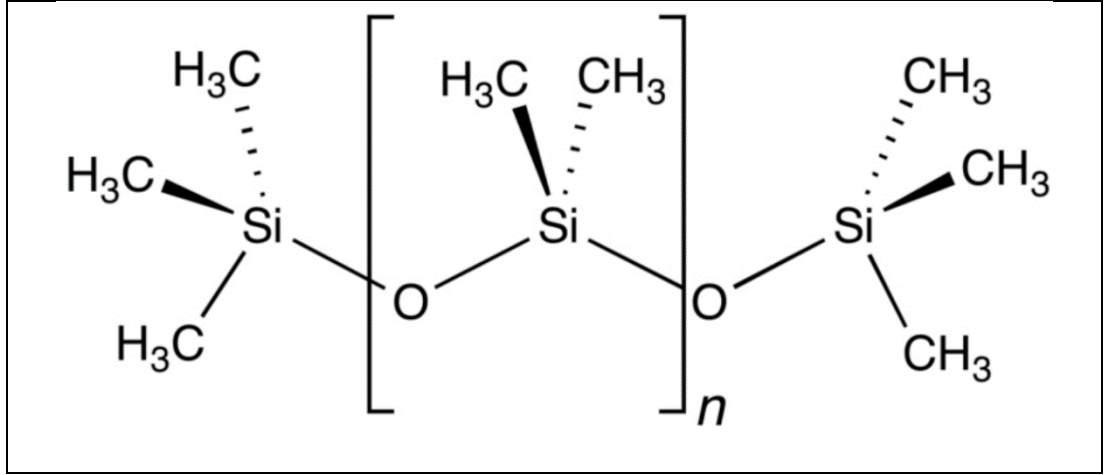


Şekil 3.3: Kapton'un hard disk içindeki uygulaması.

3.2. Polidimetilsiloxane (PDMS)

Polidimetilsiloksan (PDMS), polisiloksan grubunun en yaygın kullanılan üyesidir. Kimyasal yapı olarak karbon zinciri yerine silisyum-oksijen ana zincirine sahiptir. Esnekliğinin yüksek olması, görünür ve UV ışığına karşı saydamlığını koruması, ozona karşı çok dirençli olması, hidrofobik (su iten/sevmeyen) yapısı, kolayca şekillendirebilme yeteneği, çeşitli gazlara karşı yüksek geçirgenliği, kimyasal

ve fiziksel etkilere karşı (yüksek ve düşük sıcaklık) dayanıklı olması, düşük donma noktası (-50 °C) PDMS'nin önemli fiziksel özelliklerindendir. Aynı zamanda zehirli olmaması, biyouyumlu olması, kauçuk yapıdaki esnekliği, PDMS'i biyomedikal uygulamalar başta olmak üzere çoğu teknolojik uygulama alanları için kullanılabilir kılan özelliklerdendir.



Şekil 3.4: PDMS'in kimyasal yapısı.

4. DENEYSEL TEKNİKLER

Yapılan bu tez çalışması kapsamında, sensör tasarımı ve üretimi, üretilen sensörün manyetik ve elektriksel ölçümleri, için aşağıda verilen yöntemlerden yararlanılmıştır.

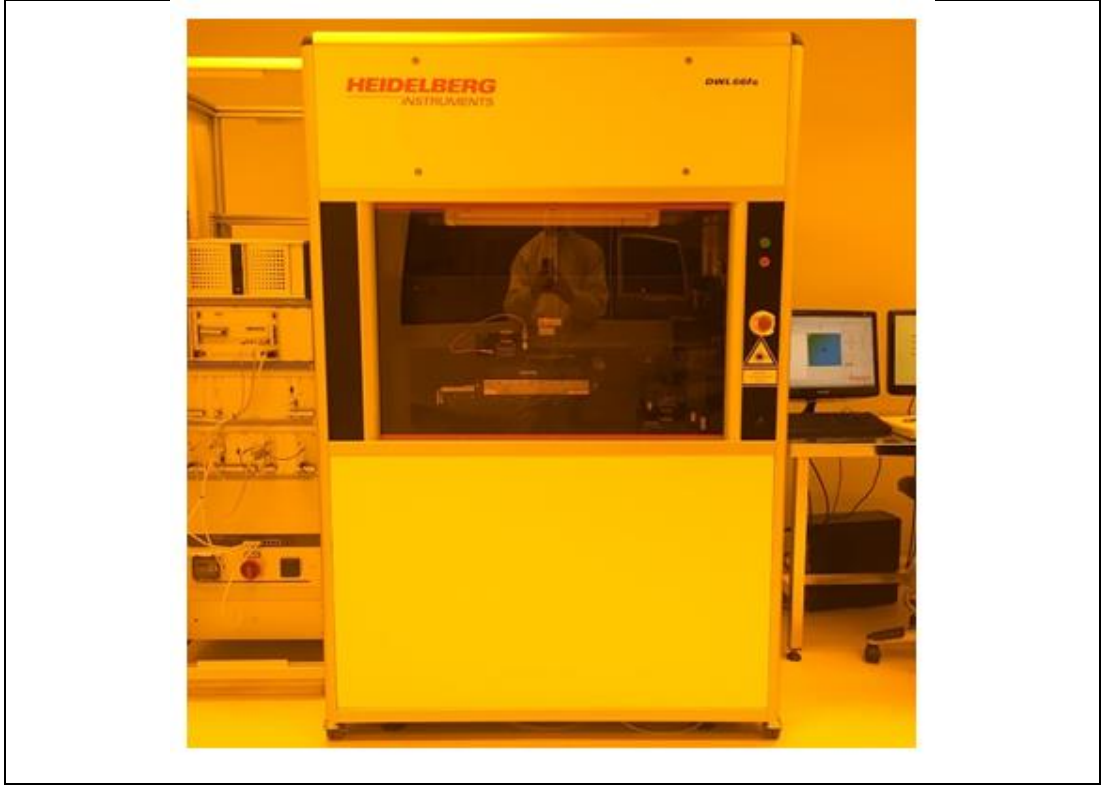
4.1. Temizoda İşlemleri

Temizoda, havasındaki parçacık konsantrasyonunun, sıcaklık, nem ve basınç gibi diğer ilgili parametreler ile gerektiği gibi kontrol edilebildiği alandır. İlaç ve sağlık sektöründeki tesislerde mikroorganizmaları; elektronik ve otomobil sektöründe ise hassas cihaz tasarımlarında toz taneciklerinden kaynaklanacak zararları önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Tasarımları, çalışılmak istenilen hassasiyete göre değişiklik gösterir ve bu doğrultuda birçok farklı temizoda kurulumu yapılabilir. Bu tez çalışmasında üretilen biyosensör, GTÜ Fizik Bölümü Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvar'ında bulunan ISO Class 8 tipi temizodada üretilmiştir.

4.1.1. Fotolitografi

Fotolitografi yöntemi ile desen oluşturmak için yapılması gereken ilk adım, bir maske tasarımıdır. Bu tez çalışmasında üretilen biyosensör için kullanılan desen, CleWIN programında çizildikten sonra, GTÜ Fizik Bölümü Mikro/Nano Aygıt Üretim Laboratuvarı'nda bulunan maske yazıcı (Heidelberg DWL 66fs) kullanılarak krom kaplı 5 inç boyutundaki maske üzerine oluşturulmuştur.

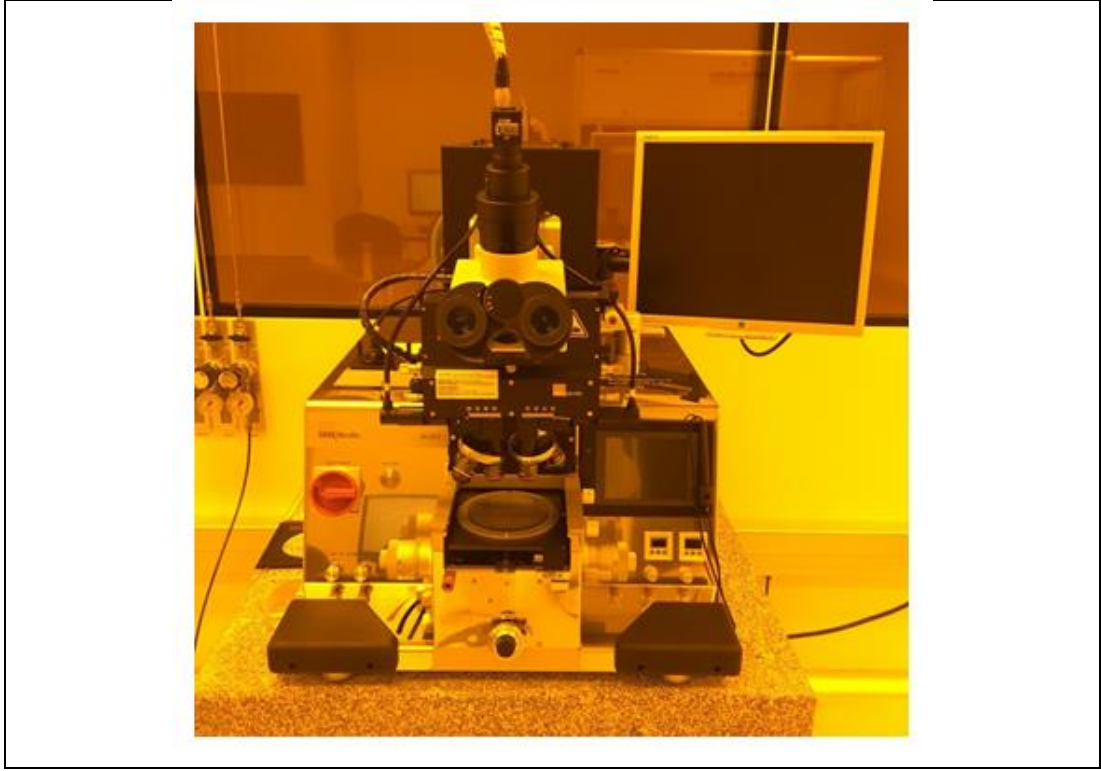
Üretilecek desen CleWIN programında çizilmiş, ardından maske yazıcısının bulunduğu bilgisayarda, çizim yapılacak formata aktararak işlem tamamlanmıştır.



Şekil 4.1: GTÜ Nanoteknoloji Enstitüsü'nde bulunan Mikro/Nano Aygıt Üretim Cihazı Laboratuvarındaki maske yazıcı cihazı.

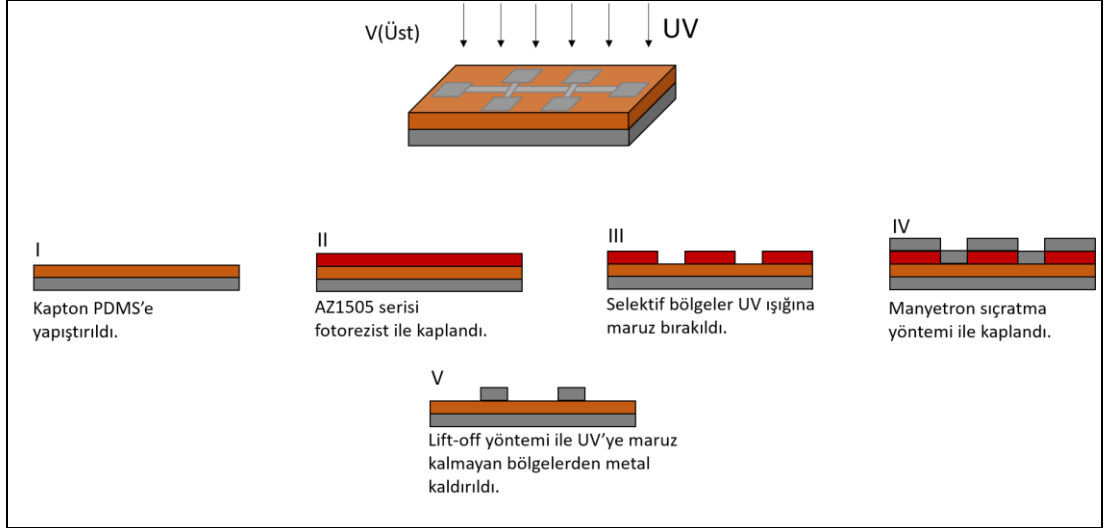
4.1.2. Maske Hizalayıcı

Maske yazıcı ile hazırlanan maske kullanılarak üretilcek biyosensör için GTÜ Fizik Bölümü Mikro/Nano Aygıt Cihaz Üretim Laboratuvarı'nda bulunan maske hizalayıcı (Karl-SUSS MJB4) kullanılmıştır.



Şekil 4.2: GTÜ Nanoteknoloji Enstitüsü'nde bulunan Mikro/Nano Aygıt Üretim Cihazı Laboratuvarındaki maske hizalayıcı cihazı.

İlk olarak şekillendirilebilir bir malzeme olan PDMS, sırasıyla 3'er dakika aseton ve isopropil alkol ile ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Ardından azot gazı ile kurutulup, 110'de 1 dakika pişirme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemden sonra Kapton bant yapıştırılıp, tekrar aynı temizlik işlemi uygulanmış fakat Kapton'un yapışkan özelliğini kaybedip, yüzeyde kabarcıklar oluşmasına sebebiyet vermemek için sıcak tablada pişirme işlemi yerine tamamen kuruması için yaklaşık 2 saat beklenmiştir. Yüzeyin tam olarak kurumasının ardından, ışığa duyarlı bir polimer olan AZ1505 serisi pozitif fotorezist, döner kaplama cihazı ile kaplanmıştır. Fotorezist kaplama işleminin ardından maske hizalayıcıya yerleştirilmiş olan maskenin altına, şekillendirilebilir alttaş yerleştirilip, 0.5s'lik bir UV uygulamasıyla desen oluşturulmuştur. UV'ye maruz kalmayan fotorezist kaplı bölgenin temizlenip, desenin tam olarak ortaya çıkması için alttaş, AZ726 serisi geliştiricinin içinde 55s bekletilip, yıkama ve kurutma işleminden sonra yalnızca UV'ye maruz kalan bölgelerin alttaşın üstünde kalması sağlanmıştır. Bu işlemden sonra alttaş, kaplanacak metaller için hazır hale gelmiştir.



Şekil 4.3: Fotolitografinin temizlik ve maske hizalayıcı aşamaları.

4.2. Manyetron Saçtırma Tekniği

Manyetron saçtırma tekniği, yüksek enerjili parçacıklar yardımıyla, hedefteki herhangi bir hedef malzemenin yüzeyinin sisteme gönderilen Ar gazı ile iyonlaştırarak, elde edilen parçacıklarla bu malzemenin buhar fazına geçirilmesi ile buhar fazındaki malzemenin alt taşın yüzeyine biriktirilmesi şeklinde gerçekleşen bir kaplama yöntemidir. Temelde bombardıman eden gaz enerjik atomlarından, hedef malzemesinin yüzeyinde bulunan atomlara bir momentum aktarımı söz konusudur. Plazma ortamında iyon bombardımanı ile hedef malzemesinin yüzeyinden yayınlanan ikincil elektronlar plazma ortamının devamlılığını sağlamak açısından büyük önem taşırlar. Diğer yöntemler gibi manyetron saçtırma yöntemi de yüksek vakum ortamında gerçekleşir. Yüksek vakum ortamında gerçekleşmesi, ortamdaki parçacıkların çarpışmaları arasındaki ortalama serbest yol miktarını yükselteceği için çok daha rahat hareket etmelerini sağlar. Temelde doğru akım (DC) ve radyo frekansı (RF) olmak üzere iki adet manyetron saçtırma tekniği vardır. Bu iki yöntem de ince film kaplama teknikleri arasından en çok kullanılan yöntemlerdendir. Doğru akım manyetron saçtırma tekniğinde; kaplanmak istenen hedef malzeme katot, alttaşın yerleştirildiği örnek tutucu anot ve kaplama esnasında kullanılacak DC güç kaynağı olmak üzere üç temel bileşeni vardır. Anot ile katot arasında uygulanan potansiyel fark ve ortamdaki gaz basıncı ile Ar gazı yardımıyla plazma ortamı oluşturulur. Elektrik

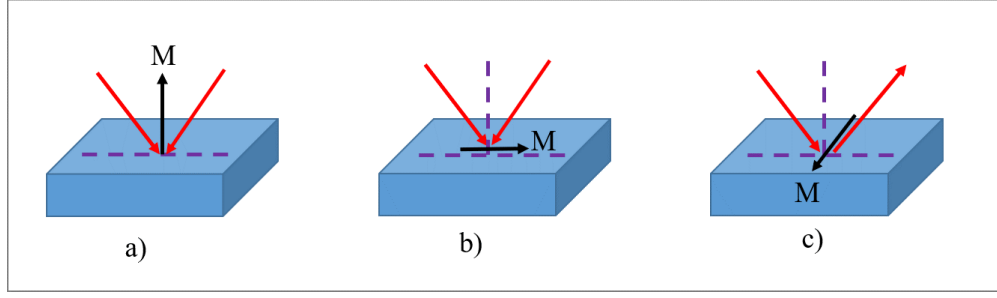
alan ile ivmelenen yüksek enerjili elektronlar ile Ar gazı molekülleri ile çarpışmalar sonucunda oluşan pozitif iyonlar, hedef malzemenin yüzeyine aktarılır. Hedef malzemenin yüzeyinden koparılan parçacıkların alttaşa yönlendirilmesi ile kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. DC magnetron saçtırma tekniği ile çoğunlukla elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerin kaplanması mümkündür. RF magnetron saçtırma tekniğinde ise çoğunlukla elektriksel yalıtkan malzemeler kaplanmaktadır. Bu sebepten oksit malzemelerin kaplanması bu teknikle mümkündür.

Bu çalışmada PDMS/Kapton şekillendirilebilir alttaşın üstüne sırasıyla DC magnetron saçtırma tekniği ile sırasıyla; 20 Watt güç ile NiFe, 10 Watt güç ile IrMn ve 10 Watt güç ile Pt malzemeleri kaplanmıştır. Kalınlıklar sırasıyla, 10nm, 8nm ve 3nm'dir.

4.3. MOKE

1845 yılında Michael Faraday'ın ışık ile manyetizma arasındaki ilişkiyi deneysel olarak keşfetmesinin ardından; 1876 yılında Reverend John Kerr, yaptığı deneyler sonucunda ferromanyetik bir yüzeyden yansıyan ışığın polarizasyonundaki değişimin, malzemenin mıknatıslanmasıyla doğru orantılı olduğunu keşfetti. Manyeto-optik Kerr Etkisi olarak adlandırılan bu etki, ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrilerini elde etmek için kullanılan hassas yöntemlerden biridir.

Lazer ışınının geliş yönü ve örneğin mıknatıslanma yönüne göre konumlandırılmasına bağlı olarak üç temel ölçüm geometrilerine sahiptir. Şekil 4.4'te gösterildiği üzere; mıknatıslanmanın örnek düzlemine dik Şekil 4.4.a), örnek düzlemine paralel Şekil 4.4.b) ve örnek düzleminde y-ekseni Şekil 4.4.c) boyunca uzanmış bir geometriye sahip ise sırasıyla paralel (P-MOKE), dik (L-MOKE) ve örnek düzleminde (T-MOKE) olarak tanımlanır.



Şekil 4.4: a), örnek düzlemine dik; b) örnek düzlemine paralel; c) örnek düzleminde y-ekseni boyunca uzanmış MOKE ölçüm geometrileri.

Bu çalışmada, Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Manyeto-optik Kerr Etkisi Laboratuvarı'nda bulunan MOKE sistemi (Nanosan Instruments-Smart MOKE Magnetometry System) kullanılmıştır. Şekil'de görülen sistemde, 632nm dalga boylu lazer ışını kullanılmakta olup, metal yüzeyin 15-20nm derinliğinden oda sıcaklığında ve çok düşük sıcaklıklarda ve farklı geometrilerde ölçümler alınabilmektedir.

4.4. Transport

Manyetik alan altında, bir malzemenin doğrultusu boyunca akım uygulanıp direnç ölçümleri alındığında; kullanılan malzemenin türüne, yapılan ölçümün geometrisine ve uygulanmakta olan manyetik alanın yönüne bağlı olarak birbirinden bağımsız sonuçlar elde edilmektedir. Uygulanan manyetik alana bağlı yapılan bu elektriksel ölçümler, genel ifadeleriyle manyeto-direnç ve/veya Hall Etkisi olarak isimlendirilir. Bu iki ifade arasındaki temel farklılık, manyeto-direnç ölçümlerinde uygulanan akım ile ölçülen potansiyel farkın aynı doğrultuda olup; Hall Etkisi'nde ise ölçülen potansiyel farkın uygulanan akıma dik geometride olmasıdır. Manyeto-direnç veya Hall Etkisi ile yapısal özellikleri hakkında bilgi edinebileceğimiz malzemeler ile, başlıca spintronik alanında kullanılan manyetik sensörler, manyetik hafıza elemanları ve manyetik okuyucu kafalar üretilebilmektedir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Örneklerin Hazırlanması

5.1.1. PDMS Kalıp Dökümü

İlk olarak şekillendirilebilir alttaşlardan PDMS'in hazırlığı ile başlandı. 10:1 oranında PDMS elastomeri ile karıştırıcı ajan (15g, 1.5g) 10 dakika boyunca bir kapta sürekli olarak karıştırıldıktan sonra karışımındaki baloncukların tamamen ortadan kalkıp pürüzsüz bir hale gelmesi için desikatörde yaklaşık 30 dakika kadar beklendi. Ardından 2 inç cam yüzey üzerine dökülen PDMS elastomeri, 80°C'de 6 saat bekledikten sonra cam yüzeyden soyuldu.

5.1.2. Alttaş Temizliği

1cmx1cm boyutunda kesilen PDMS, sırasıyla 3'er dakika aseton ve isopropil alkol ile ultrasonik banyoda temizlendi. Azot ile kurutma işlemi sonrası yüzeye Kapton yapıştırıldı ve aynı temizlik prosesi tekrarlandı.

5.1.3. Fotorezist Kaplama

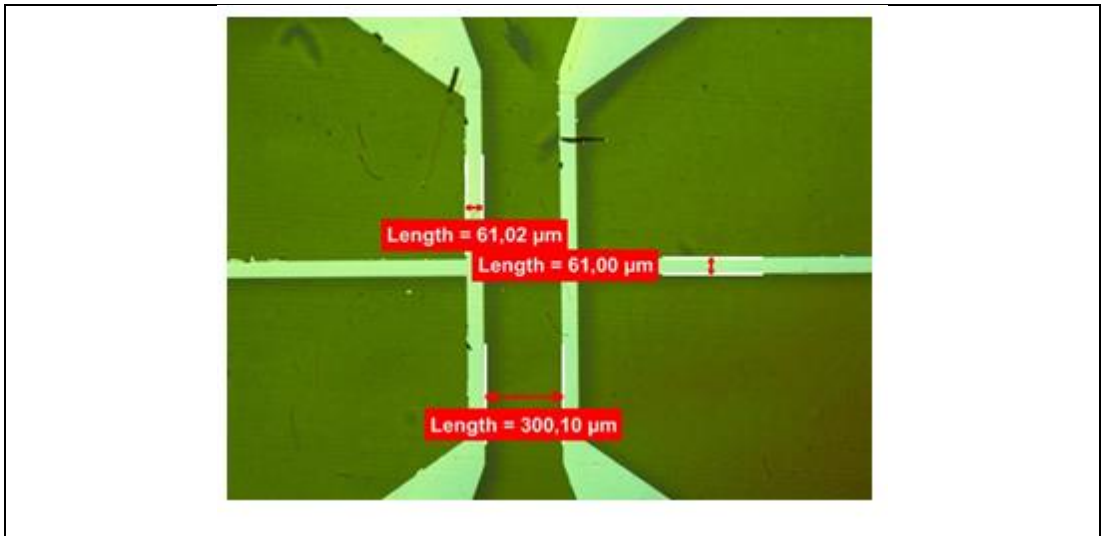
Fotolitografi adımlarının, bir sonraki basamaklarda desenin yüzey üzerinde düzgün oluşturulması için en önemlilerinden biri, fotorezist kaplama işlemidir. Bu çalışmada, spin kaplama cihazı ile ilk 5 saniye 500 rpm'lik adımlarla, toplamda 4000 rpm'de 1 dakika sürede kaplanan AZ1505 serisi pozitif fotorezist, ardından 1 dakika boyunca sıcak tablada 110°C'de pişirme işlemine tabi tutulduktan sonra maske hizalayıcı cihazında desen oluşturulmaya hazır hale gelmiştir.



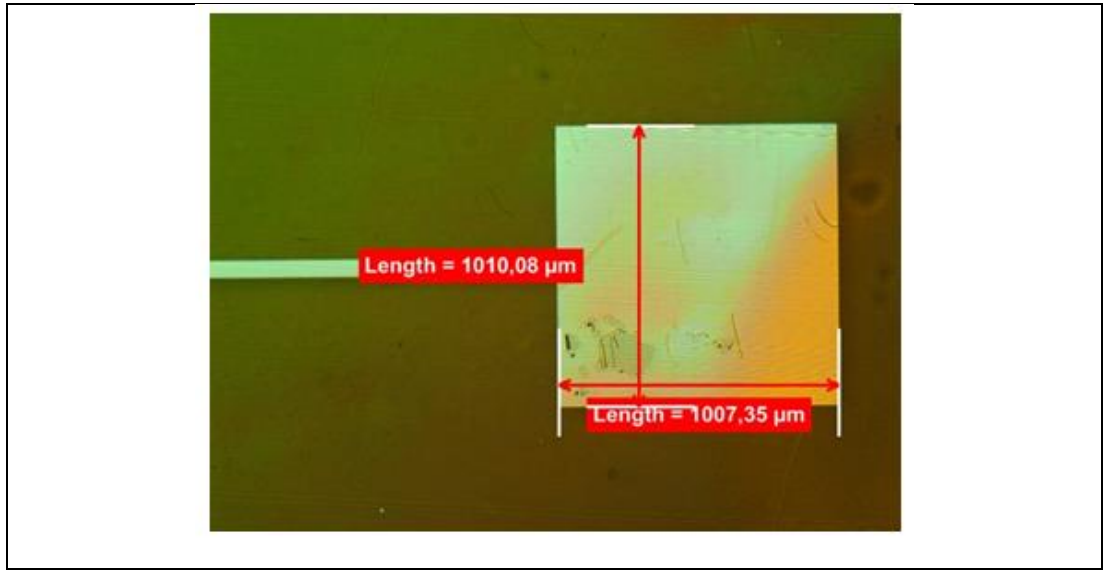
Şekil 5.1: GTÜ Mikro/Nano Aygıt Üretim Cihazı Laboratuvarı'nda bulunan pişirme ve spin kaplama cihazları.

5.1.4. Litografi İşlemleri

Şekillendirilebilir yüzey temizlenip fotorezist kaplandıktan sonra, daha önce hazırlanmış 5 inç'lik krom maske kullanılarak maske yazıcı cihazında 0.5 s UV ışığına maruz bırakılmış, ardından aşındırma (lift-off) işlemi ve kurutma işlemi ile metal kaplama için hazır hale gelmiştir.



Şekil 5.2: Litografi işlemi ile üretilen sensör yapısının eklem bacakları.



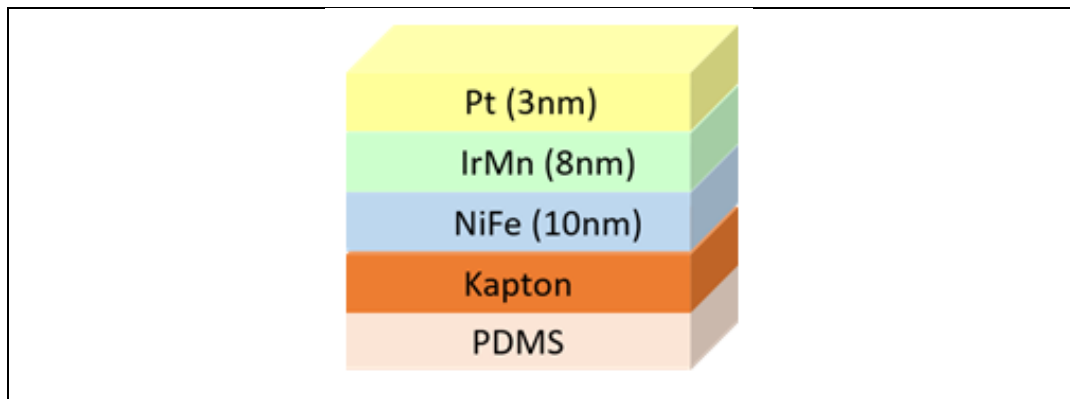
Şekil 5.3: Litografi işlemi ile üretilen sensör yapısının kontak alınacak bölgeleri.

5.1.5. Magnetron Saçtırma İşlemleri

GTÜ Fizik Bölümü'nde bulunan Nanomanyetizma ve Spintronik Araştırma Merkezi bünyesindeki magnetron saçtırma cihazı kullanarak, şekillendirilebilir planar Hall etkisine dayalı biyosensörün metal kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.1: Sensör yapısını oluşturan tabakaların büyütme şartları.

NiFe	DC	10 Watt	35dk	10nm
IrMn	DC	20 Watt	10dk	8nm
Pt	DC	10 Watt	3dk	3nm

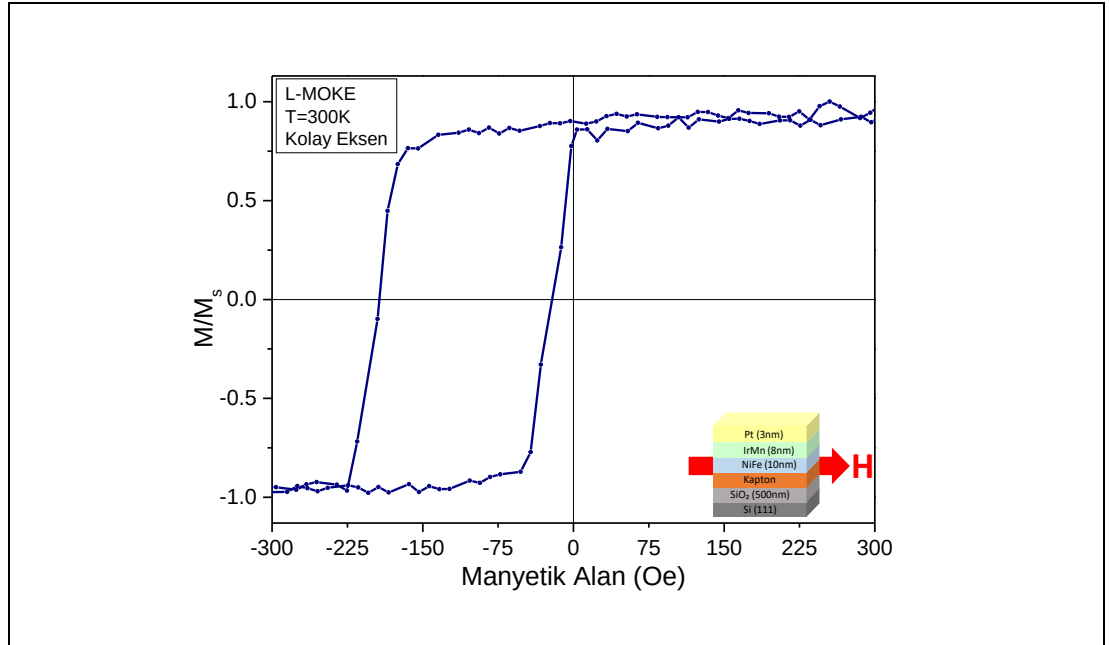


Şekil 5.4: Büyütülen sensör yapısı.

5.2. MOKE Ölçümleri

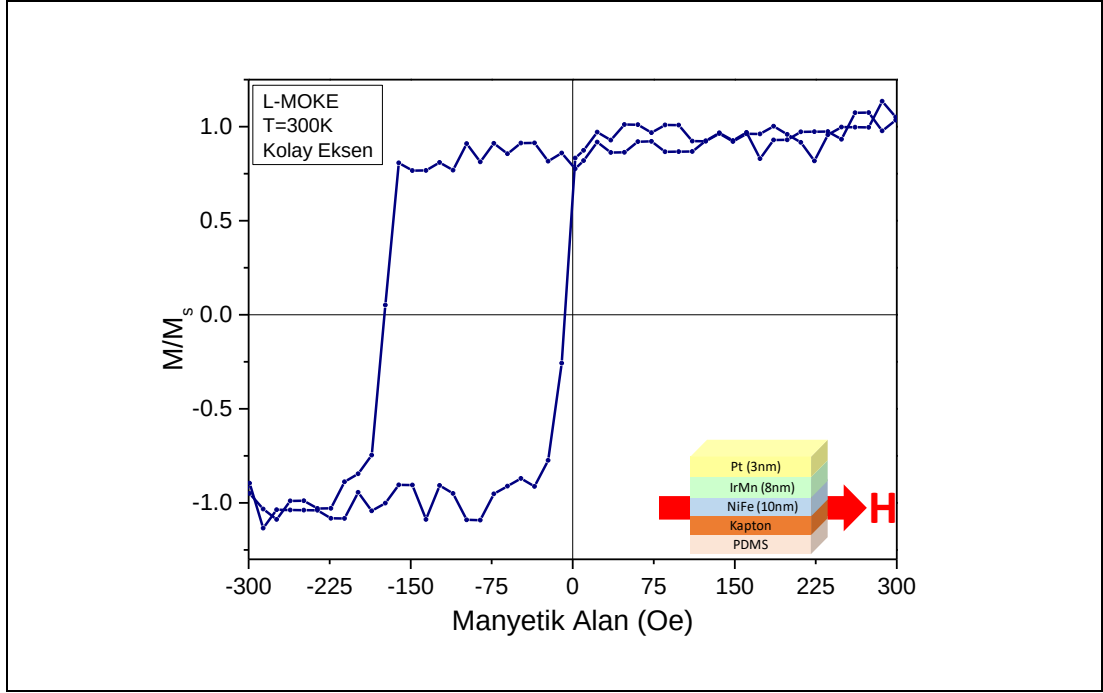
Bu çalışmada, alttaş şekillendirilebilir hale geldiğinde nasıl bir değişim olacağını gözlemlemek amacıyla ilk olarak Si alttaş üzerine yapıştırılan Kapton; ikinci olarak PDMS üzerine yapıştırılan Kapton olmak üzere biri esnemeyen biri şekillendirilebilir iki örnek serisi hazırlanmıştır. Aşağıda, sırasıyla esnemeyen ve şekillendirilebilir örnek serilerine ait ölçüm sonuçları verilmiştir.

Esnemeyen olan örnek sistemi için kolay eksen MOKE ölçümünde H_{EB} 107 Oe, H_C ise 85 Oe olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.5: Si/Kapton örnek sisteminin kolay eksen MOKE ölçüm grafiği.

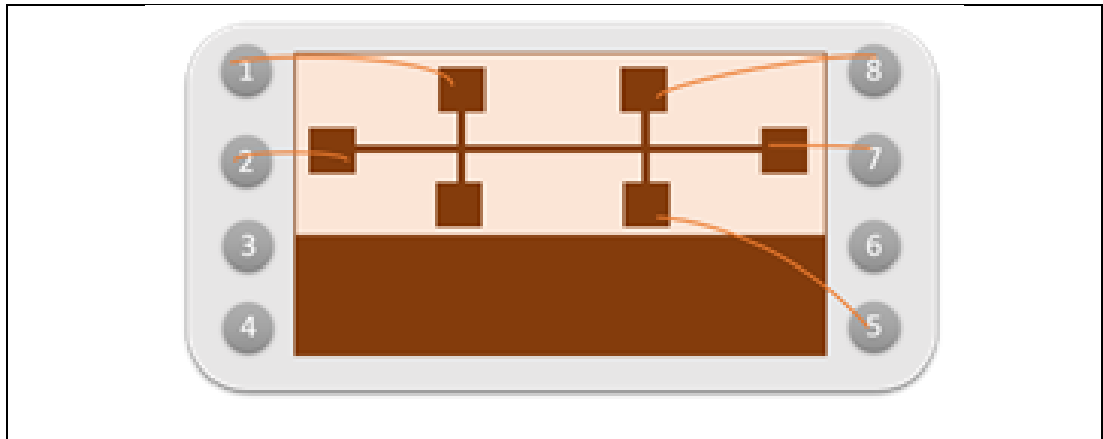
Şekillendirilebilir sistem olan PDMS/Kapton örnek sisteminin kolay eksen MOKE ölçüm sonucunda ise H_{EB} 91 Oe, H_C 83 Oe olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. 6: PDMS/Kapton örnek sisteminin kolay eksen MOKE ölçüm grafiği.

5.3. Transport Ölçümleri

Transport ölçümleri için Şekil 5.6’da verilen PCB’de kontaklar bir iletken tel yardımıyla gümüş pasta kullanılarak alınmış ve ölçüm geometrilerine göre transport ölçümleri tamamlanmıştır.



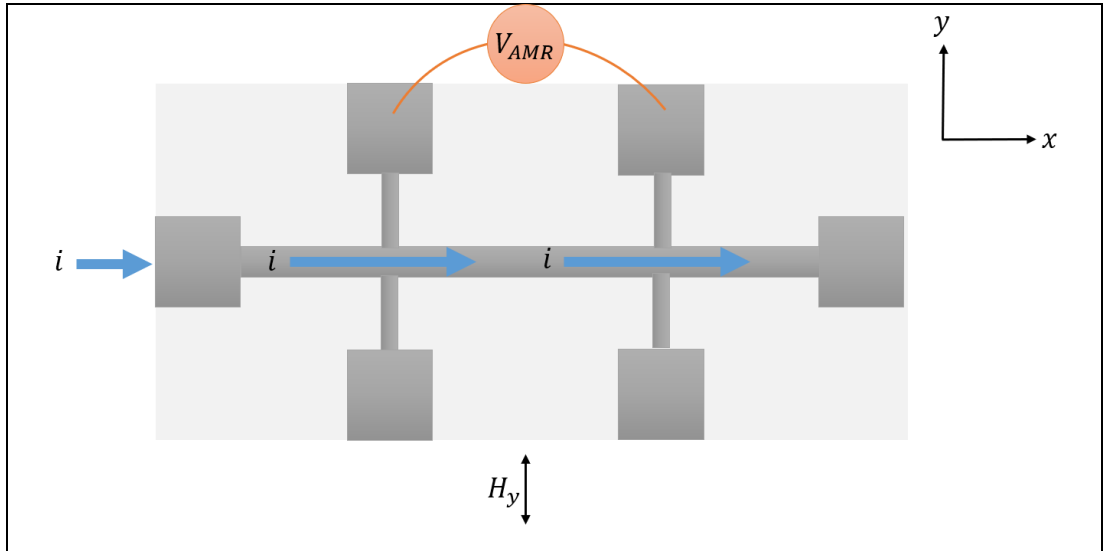
Şekil 5.7: PCB üzerinde alınan kontaklar.

Tablo 5.2: Alınan kontaklardan ölçülen direnç değerleri.

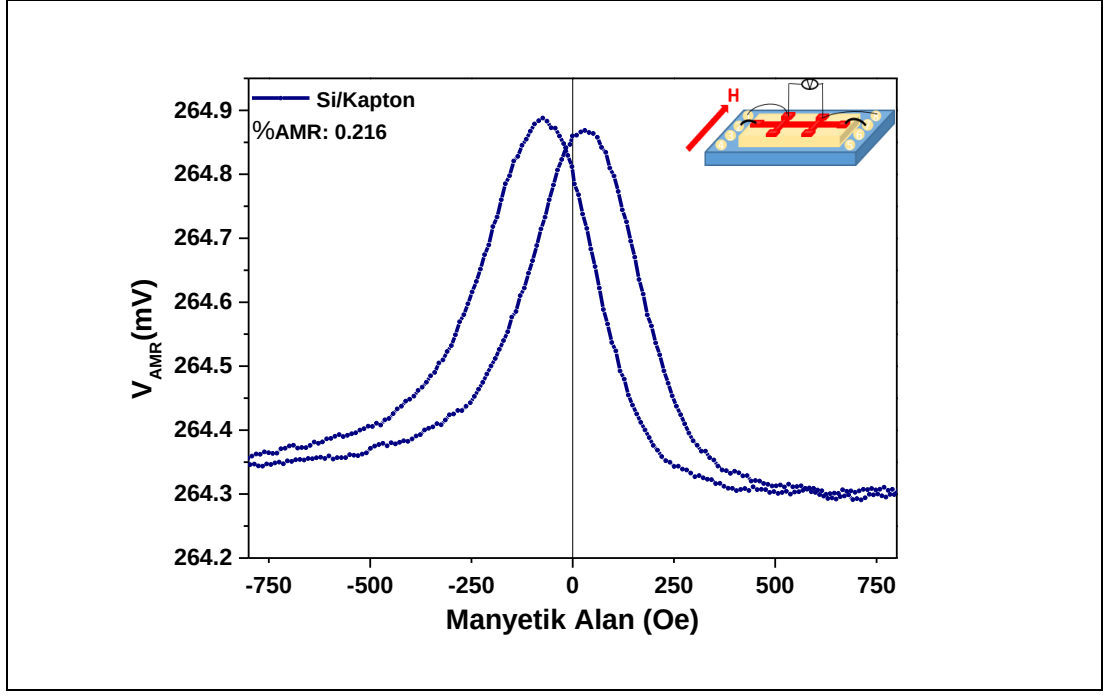
Kontaklar	Kontak Direnç Değerleri
2-7	5,58 k Ω
1-5	1,95 k Ω
5-8	2,67 k Ω

5.3.1. AMR Ölçümleri

AMR ölçümleri için manyetik alana dik yönde uygulanan akıma (2-7 numaralı kontaklar) karşı potansiyel fark (1-5 numaralı kontaklar) ölçümleri alınmıştır. İlk olarak Si/Kapton örnek sistemi için alınan AMR ölçümünde uygulanan akım 1mA değerindedir.

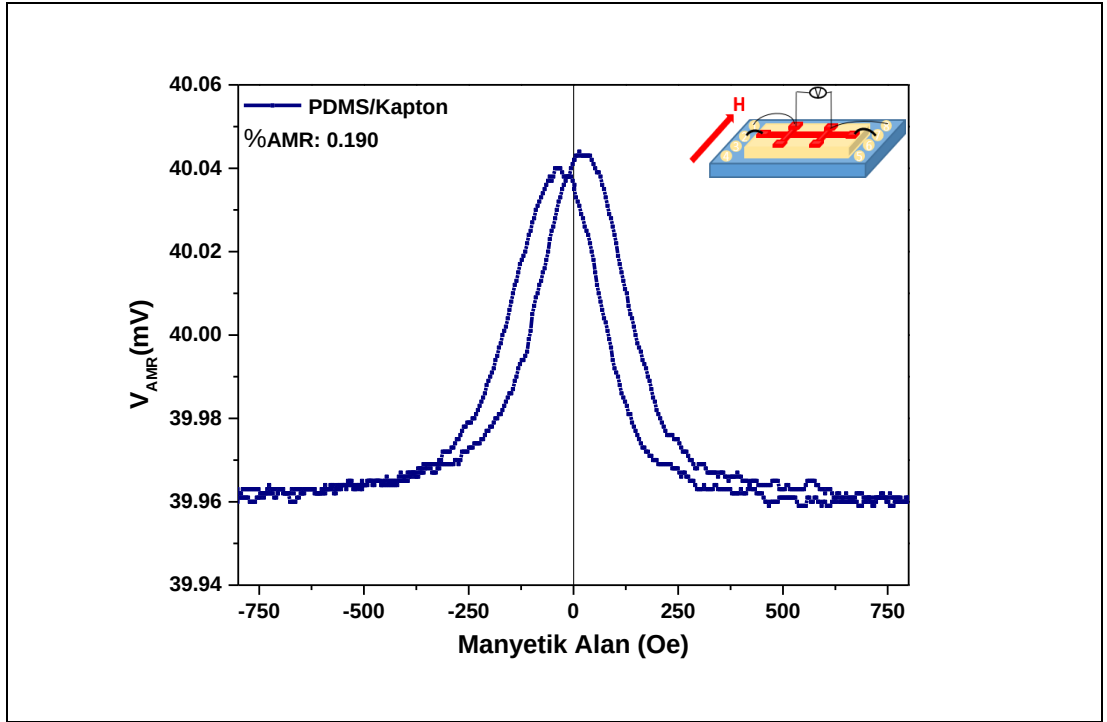


Şekil 5.8: AMR ölçüm geometrisi.



Şekil 5.9: Si/Kapton örnek sisteminin kolay eksen AMR ölçüm grafiği.

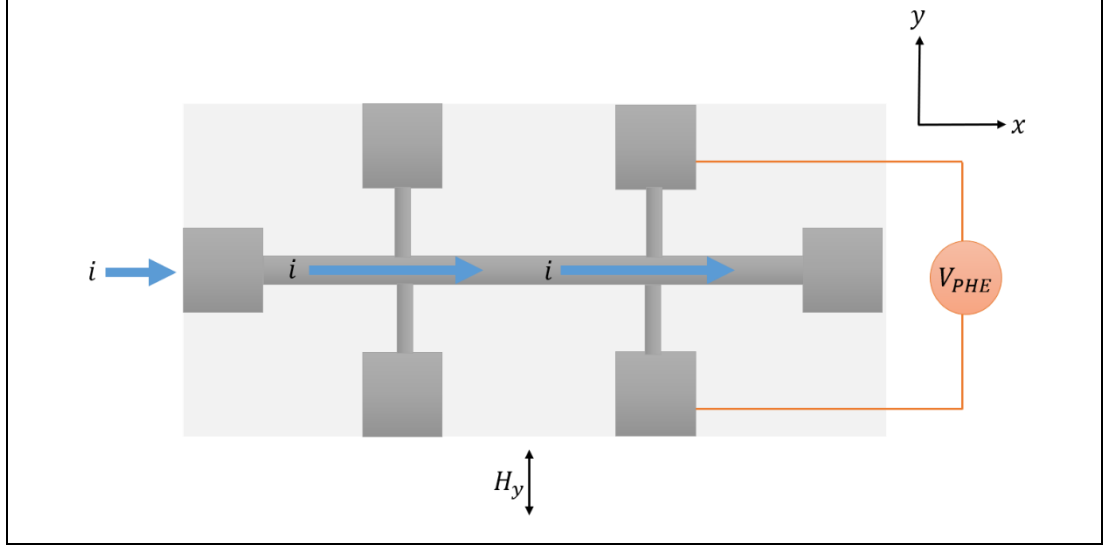
İkinci olarak yapılan PDMS/Kapton örnek sistemi için alınan AMR ölçümünde uygulanan akım 0.3mA değerindedir



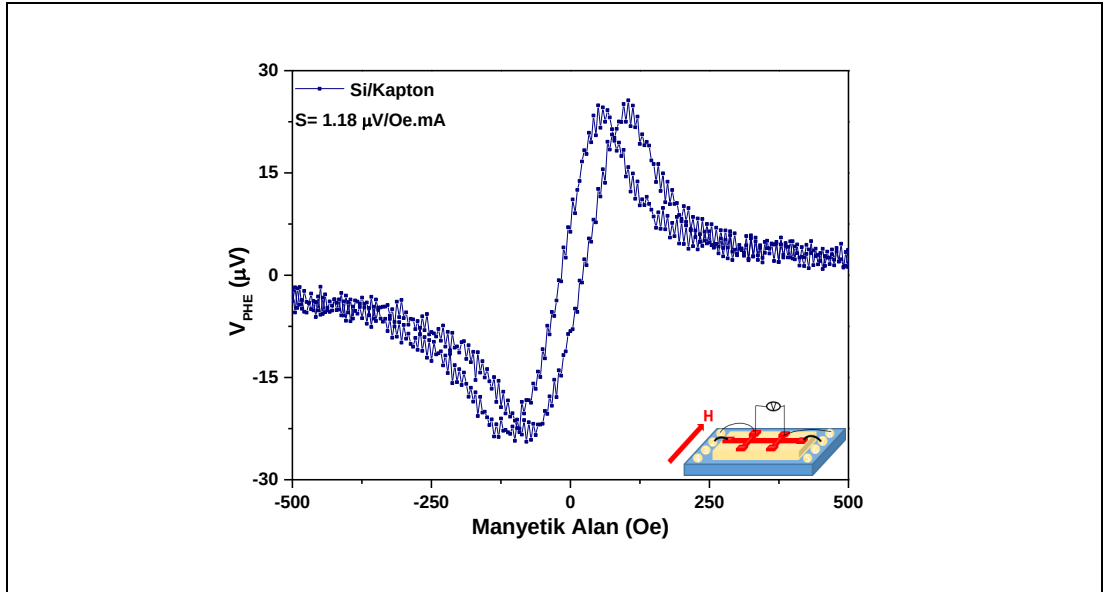
Şekil 5.10: PDMS/Kapton örnek sisteminin kolay eksen AMR ölçüm grafiği.

5.3.2. PHE Ölçümleri

PHE ölçümleri için manyetik alana dik yönde uygulanan akıma (2-7 numaralı kontaklar) karşı potansiyel fark (5-8 numaralı kontaklar) ölçümleri alınmıştır. İlk olarak Si/Kapton örnek sistemi için alınan AMR ölçümünde uygulanan akım 1mA değerindedir.

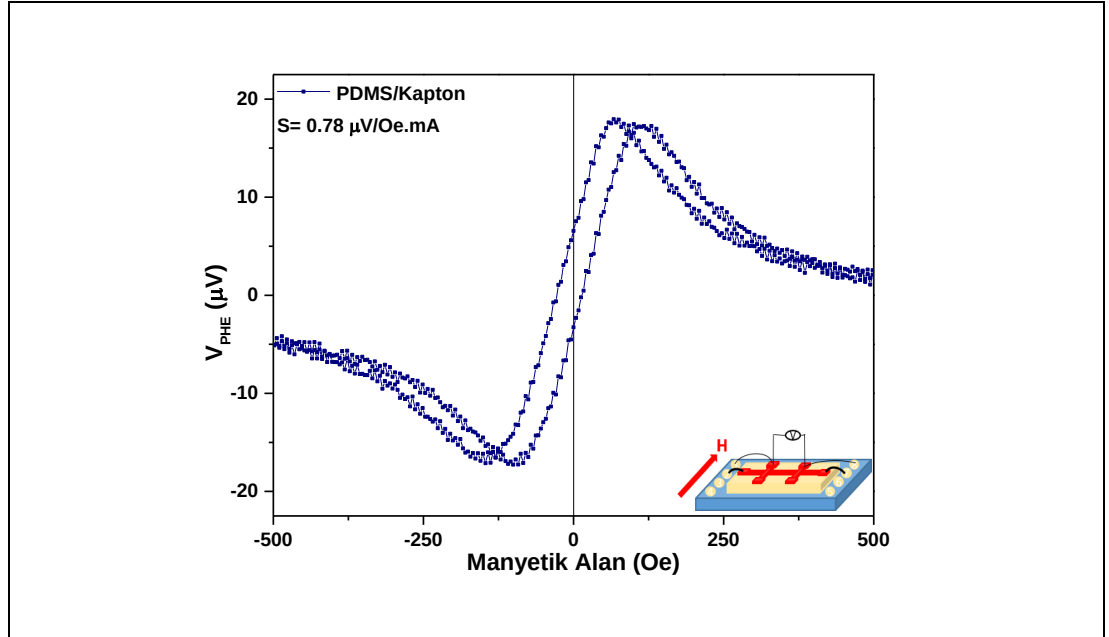


Şekil 5.11: PHE ölçüm geometrisi.



Şekil 5. 12: Si/Kapton örnek sisteminin kolay eksen PHE ölçüm grafiği.

İkinci olarak yapılan PDMS/Kapton örnek sistemi için alınan PHE ölçümünde uygulanan akım 0.3mA değerindedir.

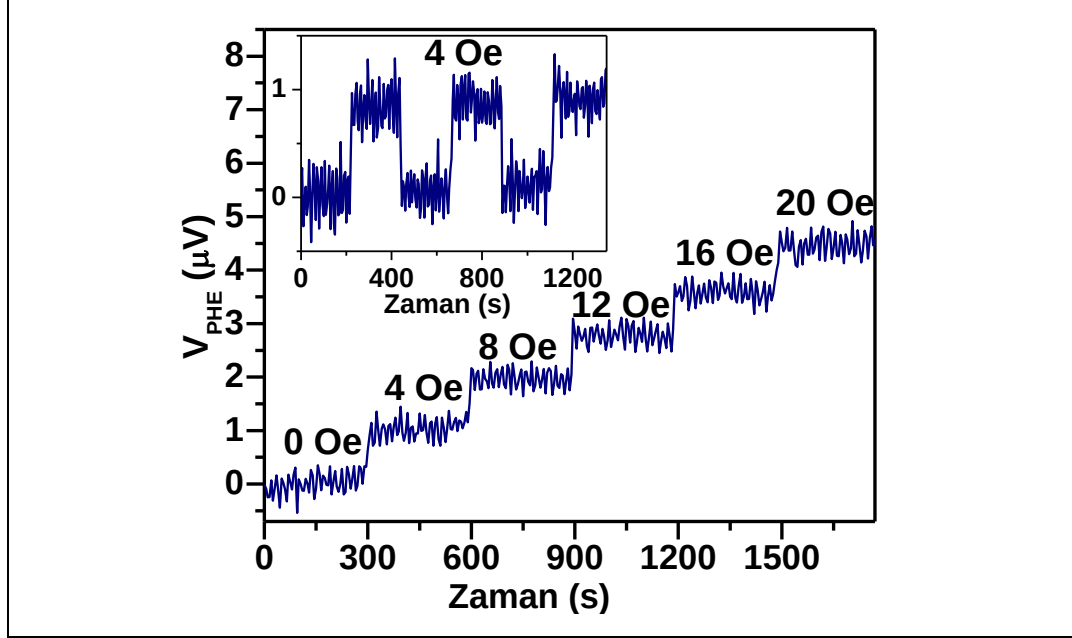


Şekil 5.13: PDMS/Kapton örnek sisteminin kolay eksen PHE ölçüm grafiği.

5.4. Timescan Ölçümleri

Üretilen sensörün kararlılığını, uygulanan bir dış manyetik alan altında PHE voltajının değişimini göstermek için zamana bağlı ölçümler (timescan) yapıldı. Şekil 5.17’de x eksen zamanı, y eksen ise PHE voltajını temsil etmektedir. İlk durum, 0 Oe basamağı herhangi bir dış manyetik alan olmadığı durumdur. Ardından 4 Oe’lik manyetik alan 300 s boyunca uygulandığında PHE voltajındaki sabit kaldığı açıkça görülmektedir. Bu adımdan sonra sırasıyla 8 Oe, 12 Oe, 16 Oe ve 20 Oe değerlerinde uygulanan dış manyetik alan altında da sensörün PHE voltajı doğrusal bir şekilde değişmektedir. Şekil 5.17’de iç taraftaki grafik ise, sensörün ilk duruma kararlı bir şekilde dönüp dönmediğini göstermektedir. Birkaç kere 4 Oe’lik dış manyetik alan uygulayıp, manyetik alan değerini sıfırladıktan sonra PHE voltajının ilk duruma döndüğü açıkça görülmektedir. Bu ölçüm, PHE sensörünün üstüne gelen manyetik nanoparçacıklara karşı gösterdiği voltaj değişimi olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak şekillendirilebilir PHE sensörü ile yapılmış zamana

bağlı ölçümler açıkça gösteriyor ki, dış manyetik alan varlığında sensör sinyali doğrusal, manyetik alan uygulanmadığında ise ilk duruma dönebilecek kararlılığa sahiptir.



Şekil 5.14: Zamana bağlı ölçüm (timescan) grafiği.

5.5. Bükme Ölçümleri

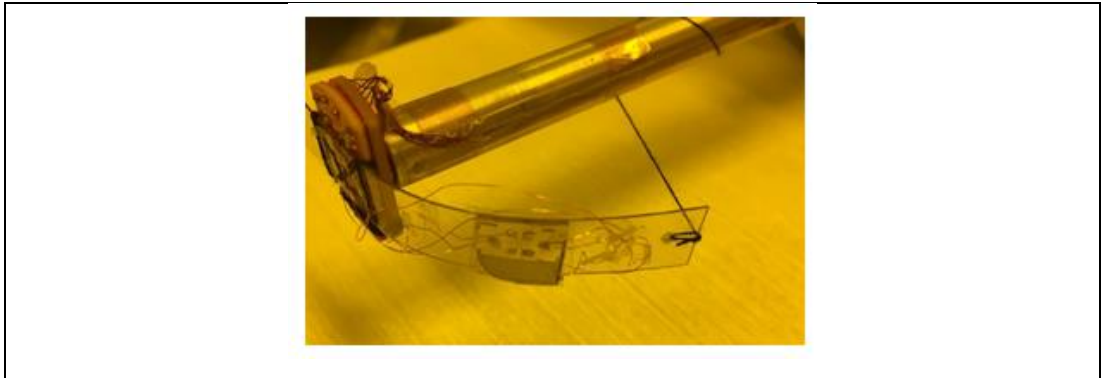
Şekillendirilebilir PHE sensörünün son ölçümü ise, gelecek çalışmalara yön vermesi açısından oldukça önem taşıyan bükme ölçümleridir. Bükme ölçümleri, GTÜ Fizik Bölümü'nde tasarlanan bir platform ile, Şekil 5.15'te görüleceği gibi bükülebilir PVC'nin üst kenarlarına açılan deliklerden geçirilen ipleri, örnek tutucu üzerinden geçirdikten sonra üstüne sensörü yapıştırıp, kontrollü bir şekilde içbükey ve dışbükey yönlerde ipteki gerilmeyi artırarak yapılmıştır.

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de gösterilen düz (flat) durumu sensörün hiç bükülmemiş hâlini, serbest (released) durumu ise sensörün son bükme değerinden düz hâle getirildiği durumu temsil etmektedir. Bu işlem içbükey ve dışbükey bükme için tekrarlanmıştır.

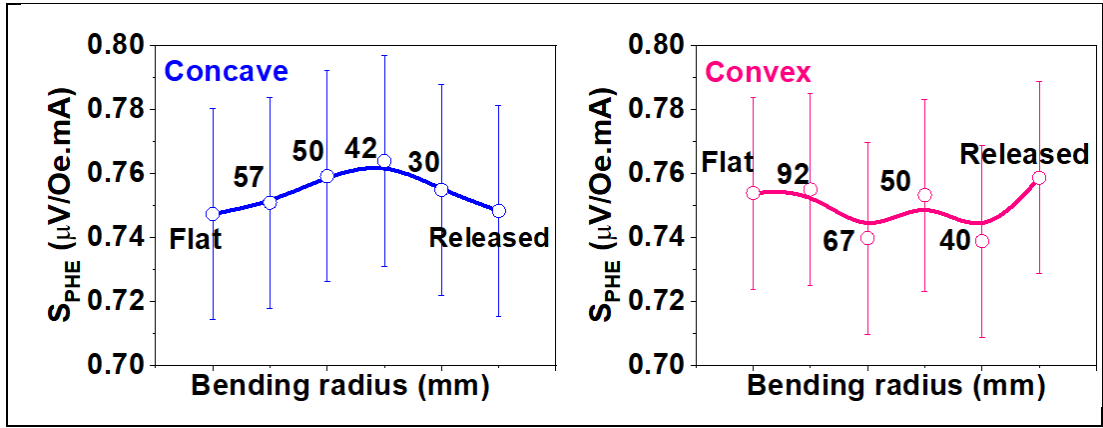
Şekil 5.16'da x eksen bükme yarıçapını gösterirken, y eksen ise PHE hassasiyetini temsil etmektedir. İçbükey bükme işleminde, sensörde bir baskı (stress)

oluşturulmaktadır. Uygulanan bu baskı ile, sensörü oluşturan metal yapısındaki atomlar birbirine yaklaşmakta, bu da iletkenliği artırmaktadır. Birbirine yaklaşan atomlarla birlikte artan iletkenlik neticesinde dirençte bir azalma meydana gelmektedir. Öte yandan, dışbükey bükme altında, sensörde meydana gelen gerilme (strain) sensörü oluşturan metal yapısındaki atomları birbirinden uzaklaştırmakta ve sensörün toplam direnci artmaktadır. Ancak, Denklem 2.11'deki PHE voltaj denkleminde $\rho_{\parallel}$ ve $\rho_{\perp}$ bileşenleri birlikte değiştiği için, sonuç olarak toplam değişim ihmal edilebileceği için, PHE hassasiyetinde bir değişim gözlemlemeyi beklemeyiz. PHE hassasiyet grafiğinde de bu denklemden beklenen sonuç, hata payları içinde bulunan bir miktar değişim haricinde desteklenmiş, PHE hassasiyetinin içbükey ve dışbükey bükmeler altında sabit kaldığı gözlenmiştir.

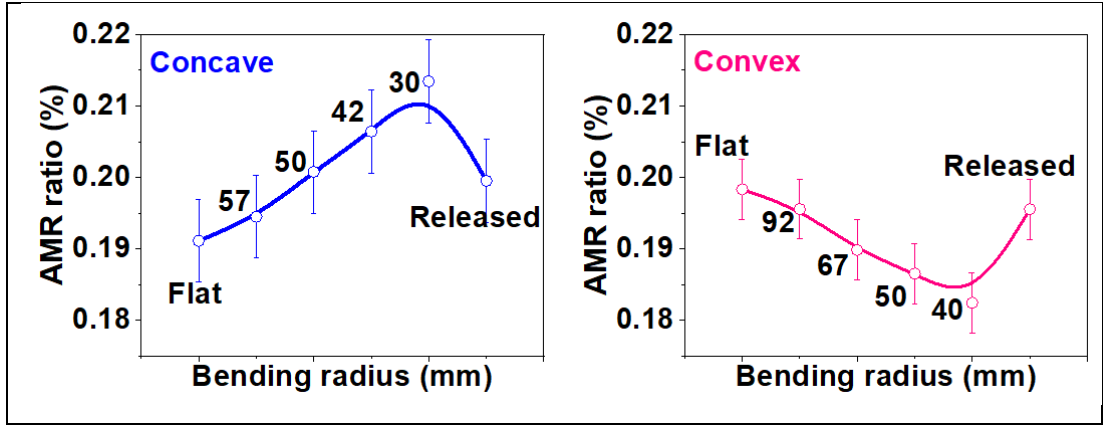
Şekil 5.17'da ise içbükey ve dışbükey bükmeler altında AMR yüzde değişim grafikleri verilmiştir. Yukarıda belirtilen içbükey ve dışbükey bükmeler altındaki direnç azalması ve direnç artması AMR yüzde değişimleri için de geçerlidir. Denklem 2.10'da verilen AMR yüzde bağıntısında paydada bulunan $\rho_{\perp}$ içbükey ve dışbükey ölçüm sonuçlarındaki değişimi açıklamak için yeterlidir. İçbükey bükme esnasında direncin azalacağı göz önünde bulundurulduğunda, paydadaki $\rho_{\perp}$ değeri azalacağı için AMR yüzdesi artar. İçbükey bükme grafiğinde de her bükme sonrasında alınan ölçümlerde AMR yüzdesinin arttığı çok açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Dışbükey bükme durumunda ise, direnci artan malzemenin $\rho_{\perp}$ değeri artmakta ve bu da yine denklemlerle desteklenecek şekilde AMR yüzdesini her bükme sonunda azaltmaktadır. Son olarak gelinen serbest bırakma (released) durumunda ise AMR yüzdesi neredeyse ilk duruma dönecek kararlılığı sergilemiştir.



Şekil 5.15: Bükme ölçümleri için tasarlanan platform.



Şekil 5.16: Belirli bükme yarıçapları için PHE hassasiyetinin değişimi. Sol tarafta içbükey, sağ tarafta ise dışbükey bükme işlemlerinde ölçülen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 5.17: Belirli bükme yarıçapları için AMR oranı değişimi. Sol tarafta içbükey, sağ tarafta ise dışbükey bükme işlemlerinde ölçülen sonuçlar verilmiştir.

6. SONUÇLAR

Bu tezde, günümüz teknolojisi için büyük önem taşıyan ve son yıllarda göz ardı edilemeyecek bir gelişme gösteren şekillendirilebilir biyosensör tasarımı yapılmış ve bu biyosensörün deriye veya kıyafete uygunluğu incelenip, bir sonraki aşamalardaki işlemler için nasıl kullanılabileceği ile alakalı ölçümler ve gözlemler yapılmıştır.

Üretilen şekillendirilebilir biyosensör, planar Hall etkisine dayalı olup, bu etkinin tercih edilmiş olmasının sebebi, planar Hall sinyalinin, çok düşük manyetik alanlarda dahi, nanoparçacıkları algılama seviyesinin bir hayli yüksek olmasıdır.

Planar Hall etkisine dayalı şekillendirilebilir biyosensör için polidimetilsiloksan (PDMS) ve Kapton malzemeleri kullanılmıştır. Hem PDMS hem de Kapton'un esneklikleri derinin esnekliğine yakın olduğu için, şekillendirilebilir alttaş olarak tercih edilmişlerdir.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan Kapton'un kendiliğinden yapışkan özelliğe sahip olmasından dolayı PDMS, Kapton için bir alttaş görevi görmüş, aynı zamanda tümleşik PHE sensörünün dayanıklılığını artırmıştır.

Magnetron saçtırma ile büyütme işlemleri ve sonrasındaki aşındırma işlemlerinden sonra Kapton'un Si alttaşlara nazaran yüksek yüzey pürüzlüğüne karşın herhangi bir çatlama veya aşınma gözlemlenmemiş olup, yüzey üzerine düzgün bir şekilde metaller kaplanmıştır.

Elde edilen planar Hall etkisine dayalı şekillendirilebilir PHE sensörünün hassasiyeti $0.78\mu\text{V}/\text{Oe.mA}$ olarak hesaplandı. Yapılan zamana bağlı ölçümler (timescan) sonucunda, sensörün gösterdiği kararlılık, yapılabilecek manyetik nano parçacık algılama işlemleri için uyumlu olduğunu göstermiştir.

Yapılan bükme ölçümleri esnasında, içbükey ve dışbükey durumda sensör yapısında herhangi bir bozulma gözlemlenmediği gibi, PHE hassasiyetinde de bir değişim meydana gelmemiştir

KAYNAKLAR

- [1] Fert A., (2008), “Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics”, *Reviews of Modern Physics*, 80 (4), 1517-1530.
- [2] Prinz G. A., (1998), “Magnetoelectronics”, *Science*, 282 (5394), 1660.
- [3] Baibich M. N., Broto J. M., Fert A., Van Dau F. N., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J., (1988), “Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices”, *Physical Review Letters*, 61 (21), 2472-2475.
- [4] Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W., (1989), “Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange”, *Physical Review B*, 39 (7), 4828-4830.
- [5] Wolf S. A., Awschalom D. D., Buhrman R. A., Daughton J. M., von Molnár S., Roukes M. L., Chtchelkanova A. Y., Treger D. M., (2001), “Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future”, *Science*, 294 (5546), 1488.
- [6] Daniels J. S., Pourmand N., (2007), “Label-Free Impedance Biosensors: Opportunities and Challenges”, *Electroanalysis*, 19 (12), 1239-1257.
- [7] Therriault D., (2007), “Filling the gap”, *Nature Nanotechnology*, 2, 393.
- [8] Leggett S. E., Wong I. Y., (2016), “Catching tumour cells in the zone”, *Nature Nanotechnology*, 12, 191.
- [9] Poudineh M., Aldridge P. M., Ahmed S., Green B. J., Kermanshah L., Nguyen V., Tu C., Mohamadi R. M., Nam R. K., Hansen A., Sridhar S. S., Finelli A., Fleshner N. E., Joshua A. M., Sargent E. H., Kelley S. O., (2016), “Tracking the dynamics of circulating tumour cell phenotypes using nanoparticle-mediated magnetic ranking”, *Nature Nanotechnology*, 12, 274.
- [10] Dagdeviren C., Javid F., Joe P., von Erlach T., Bense T., Wei Z., Saxton S., Cleveland C., Booth L., McDonnell S., Collins J., Hayward A., Langer R., Traverso G., (2017), “Flexible piezoelectric devices for gastrointestinal motility sensing”, *Nature Biomedical Engineering*, 1 (10), 807-817.
- [11] Cañón Bermúdez G. S., Karnaushenko D. D., Karnaushenko D., Lebanov A., Bischoff L., Kaltenbrunner M., Fassbender J., Schmidt O. G., Makarov D., (2018), “Magnetosensitive e-skins with directional perception for augmented reality”, *Science Advances*, 4 (1).
- [12] Oh S., Jadhav M., Lim J., Reddy V., Kim C., (2013), “An organic substrate based magnetoresistive sensor for rapid bacteria detection”, *Biosensors and Bioelectronics*, 41, 758-763.
- [13] Oh S., Yu J., Lim J., Jadhav M., Lee T., Kim D., Kim C., (2013), “Highly Flexible Magnetoelectronic Device Integrated With Embedded Ag Nanoparticle Electrode”, *IEEE Sensors Journal*, 13 (10), 3957-3961.

- [14] Chui K. M., Adeyeye A. O., Li M.-H., (2007), "Detection of a single magnetic dot using a Planar Hall sensor", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 310 (2, Part 3), e992-e993.
- [15] Hansen M. F., Rizzi G., (2017), "Exchange-Biased AMR Bridges for Magnetic Field Sensing and Biosensing", *IEEE Transactions on Magnetics*, 53 (4), 1-11.
- [16] Elzwawy A., Talantsev A., Kim C., (2018), "Free and forced Barkhausen noises in magnetic thin film based cross-junctions", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 458, 292-300.
- [17] Oh S., Patil P. B., Hung T. Q., Lim B., Takahashi M., Kim D. Y., Kim C., (2011), "Hybrid AMR/PHR ring sensor", *Solid State Communications*, 151 (18), 1248-1251.
- [18] Østerberg F. W., Rizzi G., Zardán Gómez de la Torre T., Strömberg M., Strømme M., Svedlindh P., Hansen M. F., (2013), "Measurements of Brownian relaxation of magnetic nanobeads using planar Hall effect bridge sensors", *Biosensors and Bioelectronics*, 40 (1), 147-152.
- [19] Hung T. Q., Terki F., Kamara S., Kim K., Charar S., Kim C., (2015), "Planar Hall ring sensor for ultra-low magnetic moment sensing", *Journal of Applied Physics*, 117 (15), 154505.
- [20] Oh S., Baek N. S., Jung S.-D., Chung M.-A., Hung T. Q., Anandakumar S., Sudha Rani V., Jeong J.-R., Kim C., (2011), "Selective Binding and Detection of Magnetic Labels Using PHR Sensor via Photoresist Micro-Wells", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11 (5), 4452-4456.
- [21] Volmer M., Avram M., (2013), "Signal dependence on magnetic nanoparticles position over a planar Hall effect biosensor", *Microelectronic Engineering*, 108, 116-120.
- [22] Sinha B., Hung T. Q., Ramulu T. S., Oh S., Kim K., Kim D.-Y., Terki F., Kim C., (2013), "Planar Hall resistance ring sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure", *Journal of Applied Physics*, 113 (6), 063903.
- [23] Hung T. Q., Oh S., Sinha B., Jeong J.-R., Kim D.-Y., Kim C., (2010), "High field-sensitivity planar Hall sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure", *Journal of Applied Physics*, 107 (9), 09E715.
- [24] 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 (9), 093910.
- [25] 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 (1), 013507.
- [26] Ejlsing 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 (23), 4729-4731.
- [27] Doering R., Nishi Y., (2007), "Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology", Edition.

- [28] Nogués J., Schuller I. K., (1999), “Exchange bias”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 192 (2), 203-232.
- [29] Stöhr J., (1999), “Exploring the microscopic origin of magnetic anisotropies with X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) spectroscopy”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200 (1), 470-497.
- [30] den Broeder F. J. A., Hoving W., Bloemen P. J. H., (1991), “Magnetic anisotropy of multilayers”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 93, 562-570.
- [31] Binek C., Borisov P., Chen X., Hochstrat A., Sahoo S., Kleemann W., (2005), “Perpendicular exchange bias and its control by magnetic, stress and electric fields”, *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, 45 (2), 197-201.
- [32] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1956), “New Magnetic Anisotropy”, *Physical Review*, 102 (5), 1413-1414.
- [33] Meiklejohn W. H., Bean C. P., (1957), “New Magnetic Anisotropy”, *Physical Review*, 105 (3), 904-913.
- [34] Garcia F., Sort J., Rodmacq B., Auffret S., Dieny B., (2003), “Large anomalous enhancement of perpendicular exchange bias by introduction of a nonmagnetic spacer between the ferromagnetic and antiferromagnetic layers”, *Applied Physics Letters*, 83 (17), 3537-3539.
- [35] Johnson M. T., Bloemen P. J. H., Broeder F. J. A. d., Vries J. J. d., (1996), “Magnetic anisotropy in metallic multilayers”, *Reports on Progress in Physics*, 59 (11), 1409.
- [36] Akdoğan N., Yağmur A., Öztürk M., Demirci E., Öztürk O., Erkovan M., (2015), “Interface induced manipulation of perpendicular exchange bias in Pt/Co/(Pt,Cr)/CoO thin films”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 373, 120-123.
- [37] Hall E. H., (1879), “On a New Action of the Magnet on Electric Currents”, *American Journal of Mathematics*, 2 (3), 287-292.
- [38] Lindemuth J., Dodrill B., (2004), “Measurement of the magnetic properties of double-layered PMRM using an AHE magnetometer”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 40 (4), 2191-2193.
- [39] Wong S.-K., Chia B. H., Srinivasan K., Law R., Tan E.-L., Tan H. K., Sbiaa R., Piramanayagam S. N., (2009), “Anomalous Hall effect measurement of novel magnetic multilayers”, *Journal of Applied Physics*, 106 (9), 093904.
- [40] Keskin V., Aktaş B., Schmalhorst J., Reiss G., Zhang H., Weischenberg J., Mokrousov Y., (2013), “Temperature and Co thickness dependent sign change of the anomalous Hall effect in Co/Pd multilayers: An experimental and theoretical study”, *Applied Physics Letters*, 102 (2), 022416.
- [41] Nagaosa N., Sinova J., Onoda S., MacDonald A. H., Ong N. P., (2010), “Anomalous Hall effect”, *Reviews of Modern Physics*, 82 (2), 1539-1592.

- [42] Karplus R., Luttinger J. M., (1954), "Hall Effect in Ferromagnetics", *Physical Review*, 95 (5), 1154-1160.
- [43] Wong S., Sbiaa R., Piramanayagam S. N., Tahmasebi T., (2015), "Magnetic Properties and Magnetization Reversal of Thin Films and Nanodots Consisting of Exchange-Coupled Composite Co/Pd Multi-Layer and Co Layer With Orthogonal Anisotropies", *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (9), 1-9.
- [44] Thomson W., (1857), "XIX. On the electro-dynamic qualities of metals:— Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron", *Proceedings of the Royal Society of London*, 8, 546-550.
- [45] Velez J., Sabirianov R. F., Jaswal S. S., Tsymbal E. Y., (2005), "Ballistic Anisotropic Magnetoresistance", *Physical Review Letters*, 94 (12), 127203.
- [46] McGuire T., Potter R., (1975), "Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys", *IEEE Transactions on Magnetics*, 11 (4), 1018-1038.
- [47] Montaigne 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 (1), 324-327.
- [48] Gooneratne C. P., Kodzius R., Li F., Foulds I. G., Kosel J., (2016), "On-Chip Magnetic Bead Manipulation and Detection Using a Magnetoresistive Sensor-Based Micro-Chip: Design Considerations and Experimental Characterization", *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16 (9), 1369.
- [49] Hung T., Dong-Young K., Parvatheeswara Rao B., Cheolgi K., (2013), "Novel Planar Hall Sensor for Biomedical Diagnosing Lab-on-a-chip", *Edition*.
- [50] Schuhl A., Dau F. N. V., Childress J. R., (1995), "Low-field magnetic sensors based on the planar Hall effect", *Applied Physics Letters*, 66 (20), 2751-2753.
- [51] Ejsing 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 (1), 677-684.

ÖZGEÇMİŞ

Burak ÖZER 20.06.1991 yılında İzmit/Kocaeli’de doğdu. İlk ve orta eğitimini Kocaeli’de tamamladıktan sonra, 2016 yılında Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fizik Bölümü’nden lisans derecesini aldı. 2016-2018 tarihleri arasında yüksek lisans eğitimini Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü’nde tamamladı. Gebze Teknik Üniversitesi’nde, 10/2018 ile 10/2019 tarihleri arasında TÜBİAK ‘Exchange bias tabanlı planar Hall etkisi (PHE) sensörlerinin üretilmesi ve karakterizasyonu’’ 116F083 projesinde çalışmıştır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

B. Özer, H. Pişkin, N. Akdoğan, Shapeable planar Hall sensor for magnetoelectronic device applications, in preparation (2018).

Hasan Pişkin, Bayram Kocaman, Züriye Çapku, Burak Özer ve Numan Akdoğan, Biyosensörler, CleanroomNews-Temizoda Teknolojileri Gazetesi, 28 Eylül 2017.

Ek B: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Bildiriler

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

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

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