

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

DİK MANYETİK ANİZOTROPİLİ ÇOK
KATMANLI ULTRAİNCE Co/Pd
FİLMLERİNİN ANORMAL HALL ETKİSİ

Vedat KESKİN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

DİK MANYETİK ANİZOTROPİLİ ÇOK
KATMANLI ULTRAİNCE Co/Pd
FİLMLERİNİN ANORMAL HALL ETKİSİ

Vedat KESKİN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bekir AKTAŞ

GEBZE

2013



DOKTORA TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/01/2013 tarih ve 2013/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/02/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Vedat KESKİN'in tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Bekir AKTAŞ

ÜYE

: Prof. Dr. Yıldırhan Öner

ÜYE

: Doç. Dr. Numan AKDOĞAN

ÜYE

: Doç. Dr. Bulat RAMEEV

ÜYE

: Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: DİK MANYETİK ANİZOTROPİLİ ÇOK KATMANLI ULTRAİNCE Co/Pd FİLMLERİNİN ANORMAL HALL ETKİSİ

TEZİN YAZARI: VEDAT KESKİN

Yeni nesil GMR / TMR (tünelleme manyetodirenç) sensörleri, hızlı anahtarlama, bilgi okuma ve depolama sistemleri (manyetik RAM) için çok katmanlı dik manyetik anizotropili (DMA) Co/Pd filmler önemli bir yapı taşı adaylarındandır. Bu nedenle son zamanlarda dik anizotropili ince Co-Pd alaşımları ve çok katmanlı Co/Pd filmleri üzerinde bir çok anormal Hall etkisi (AHE) araştırmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, çok katmanlı dik manyetik anizotropili Co/Pd filmleri ferromanyetik Co kalınlık ve sıcaklık etkisine bağlı AHE değerleri incelendi. Bu amaç doğrultusunda ince Co/Pd filmler, (Si/SiO₂/Ta/(Pd/Co)₉/MgO ($x = 0.2-0.55$ nm)), dc magnetron sıçratma tekniğiyle büyütüldü. Örnekler 200 °C de 60 dak süreyle 6500 Oe şiddetindeki dik manyetik alanda tavlandı. Böylelikle kalıcı dik manyetik anizotropi oluşturuldu ve aynı zamanda MgO katmanı ile oksitlenmesi engellendi. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin örgü parametreleri ve kristal yapısı hakkında bilgi edinmek için standart Cu $K\alpha$ radyasyonlu x-ışını difraksiyonu (XRD ve XRR) ölçümleri yapıldı. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin XRD ölçümleri sonucunda yüzeye dik (111) kristalografik yönde çok iyi bir kristalleşme olduğu görüldü.

Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin mıknatıslanma histerileri AGM ve PPMS sistemleriyle gerçekleştirildi. Sonra Hall bar (UV litografi ve e-ışını aşındırma ile) ve 4 noktadan Hall kontaklama oluşturuldu ve çok katmanlı Co/Pd filmlere 500 μ A sabit akım uygulanarak, ± 10000 Oe aralığında, 200 Oe basamakla değişik dik manyetik alanda ve düşük sıcaklıklarda $V_H(H)$ ve $V_x(H)$ ölçümleri gerçekleştirildi.

Deney sonuçlarında çok katmanlı Co/Pd filmlerinin AHEnin sıcaklığa ve Co katman kalınlığına bağlı polarite değişimi görüldü.

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin ara yüzey ile hacimsel (bulk) Co katmanının Hall gerilim işaretleri birbirine zıt olduğu görüldü. çok katmanlı Co/Pd filmlerin Hall geriliminin yönü artan sıcaklık veya kalınlık ile hacimsel Co yönünde pozitif olduğu görüldü. yapılan değerlendirmeler sonunda çok katmanlı Co/Pd filmlerinde baskın olan AHE saçılma mekanizması (işaret değişimine neden olan) dışsal ‘skew’ saçılma mekanizması olduğu gösterildi. Yani sonuçların boyuta bağımlı bir AHE etkisi olduğu bulundu.

Anahtar Kelimeler: Anormal Hall Etkisi, Spintronik, Çok Katmanlı Manyetik Malzemeler, Dik Manyetik Anizotropi, Arayüzey

SUMMARY

THESIS TITLE: THE ANOMALOUS HALL EFFECT ON MULTILAYERED ULTRATHIN CO/PD FILMS WITH PERPENDICULAR MAGNETIC ANISOTROPY

AUTHOR NAME: VEDAT KESKİN

The AHE of ultra-thin multilayered films with large perpendicular magnetic anisotropy has recently attracted considerable attention due to its potential applications for high-density magnetic recording technology. Since Co/Pd is one of the promising candidates for perpendicular magnetic recording technology, there are several Anomalous Hall effect (AHE) studies on thin Co-Pd alloys and Co/Pd multilayers.

To study the AHE of perpendicular magnetic anisotropic Co/Pd multilayers, the films were grown on thermally oxidized Si wafers by using dc magnetron sputtering. A 2.1 nm thick MgO layer to prevent oxidation covered the stacks. The samples were annealed at 200 °C for 60 min in a magnetic field of 6500 Oe perpendicular to the film plane to enhance the perpendicular magnetic anisotropy of the Co/Pd multilayers. Standard x-ray diffraction (XRD and XRR) using Cu $K\alpha$ radiation was used to determine the structure of the films. Magnetization measurements were done by AGM and PPMS.

The XRD data showed that the Co/Pd multilayers have an artificial superlattice structure, where Co and Pd grow textured in the (111) direction. UV lithography and Ar-ion beam etching was used to fabricate the Hall bars patterned the films. The Hall voltage (V_H) and the longitudinal voltage in x-direction (V_x) were driven by a bias current in the x-direction ($I_x = 500 \mu A$), the magnetic field H of up to 10kOe was applied perpendicular to the film plane in z-direction. The low- temperature AHE measurements were done in a closed-cycle helium cryostat (Oxford Cryodrive 1.5) with a temperature range of 15-330 K.

A change of the sign of the AHE was observed both in the dependence of ρ_{xy} on the Co thickness and on the temperature. The sign change can be concluded as the competition of the interface and the surface with opposite signs of the AHE. According to the traditional evaluation of the AHE of the Co/Pd multilayers the skew scattering mechanism causes the sign change of the AHE resistivity.

Key words: Anomalous Hall Effect, Spintronics, Multilayered Magnetic Materials, Perpendicular Magnetic Anisotropy, Interface

TEŞEKKÜR

Doktoraya başlamamdan bitimine kadar benim bilimsel düşünmemi tartışmalarla şekillendiren, beni moral ve motivasyonumu destekleyen tez danışmanım Prof. Dr. Bekir AKTAŞ hocama hürmetle ve minnetle teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle Doktora tez aşamamda beni çalışma grubuna (Bielefeld Üniversitesi) kabul ederen Prof. Dr. Günter Reiss'e teşekkürlerimi sunarım. Sonra Dr. Jan Schmalhorst'a çalışmalarımın yönlendirilmesinde ve verilerin değerlendirilmesinde bilimsel tartışmalarından dolayı teşekkür ederim. Deneylerde ihtiyaç olduğunda her zaman yardım eden Dr. Karsten Rott, Manuel Glas, Christian Sterwerf ve Daniel Meier' e teşekkür ederim. Benimle çalışma odasını paylaşan Markus Meinert, Christoph Klewe, Niclas Teichert, Alexander Böhnke, Marius Schirmer ve Niklas Biere'e teşekkür ederim.

Tezim ile ilgili yaptığımız ortak çalışmada bilimsel tartışmalarından ve ortak yayından dolayı Lanzhou Üniversitesinden Dr. Xinli Kou'ya da ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışma sonunda yayınlanan makalemizdeki teorik hesaplamalarından dolayı Jülich Araştırma merkezinden H. Zhang, J. Weischenberg ve Y. Mokrousov'a teşekkür ederim.

Bilimsel tecrübelerinin paylaşımlarından dolayı Dr. Ersoy Şaşıoğlu'na teşekkür ederim. Her türlü yardımlarından dolayı değerli Şaban Tırpancı, Ramazan Topkaya ve Abdullah N. Koçbay'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerinden dolayı dost ve arkadaşlarım Mehmet Alver ve Necmi Yıldırım kardeşlerime minnetle şükranlarımı bildirmek istiyorum.

Öğretmenlik yaptığım yıllarda lise projeleriyle başarılarımızla birlikte benim akademik çalışmalara katılmamda maddi ve manevi desteklerinden dolayı değerli idarecilerimden Levent EYÜPOĞLU ve Mehmet KICIROĞLU'na minnetle teşekkür ederim.

Bana lise hayatımdan beri rasyonalist tavsiye ve desteklerinden dolayı değerli Hüseyin ASLAN hocama ve hemşerim Ufuk Civelek hocama minnetle teşekkürlerimi sunarım.

Almanya daki tez dönemim boyunca bana maddi ve manevi desteklerinden dolayı öncelikle hemşerim Safi EKMEKÇİ hocama, IKBAY eV dan Hüseyin ALTIKULAÇ'a ve elbette ki Eringerfeld Gymnasium yöneticileri Muzaffer TOY ve Mehmet EMDİKLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak dayımın oğlu Yakup KESKİN'e, değerli anne-babama, bu çalışmalar esnasında bana moral kaynağı olan eşim Sevilay Keskin'e ve kızlarım Ayşe V., Rüveyda ve Melike Keskin'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET

SUMMARY

TEŞEKKÜR

İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ŞEKİLLER DİZİNİ

1. GİRİŞ

2. HALL ETKİLERİ

2.1 Klasik Hall Etkisi

2.2 Anormal Hall Etkisi (AHE)

2.2.1 Öz (Intrinsic) Katkı

2.2.2 Dışsal Katkılar: ‘Scew’ Saçılma ve Yana Sıçrama (Side-Jump)

2.3 AHE Mekanizmalarının Belirlenmesi

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1 Dc Magnetron Sıçratma

3.2 Örneklerin Tavlanması

3.3 X-Işını Difraksiyonu (XRD)

3.4 X-Işını Yansıması (XRR)

3.5 Hall Bar ve Kontaklarının Oluşturulması

3.6 Düşük Sıcaklık Hall Etkisi Ölçümleri

3.7 Mıknatıslanma Ölçümleri

3.7.1 Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Tekniği

3.7.2 Alternatif Gradyan Manyetometre (AGM) Tekniği

4. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

4.1 Co/Pd Filmlerin Ölçümler için Hazırlanması

4.2 XRD ve XRR Ölçümleri

4.3 Hall Etkisi Ölçüm Sonuçları ve Tartışmalar

4.3.1 Koersif Alan (H_C) Değişimi

4.3.2 Kobalt Kalınlığına Bağlı AHE Polarite Değişimi

4.3.3 Sıcaklığa Bağlı AHE Polarite Değişimi

4.4 Direnç, Öz direnç ve İletkenlik Değerleri

4.4.1 Enine (R_{xy}) ve Boyuna (R_{xx}) Direnç

4.4.2 Enine (ρ_{xy}) ve Boyuna (ρ_{xx}) Özdirenç

4.4.3 Enine (σ_{xy}) ve Boyuna (σ_{xx}) İletkenlik

4.5 AHE Mekanizmalarının Belirlenmesi

4.5.1 Enine-Boyuna Özdirençlerin İlişkilendirilmesi

4.5.2 Enine-Boyuna İletkenliklerin İlişkilendirilmesi

4.5.3 Tartışmalar

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Co	: Kobalt
Fe	: Demir
MgO	: Magnezyum Oksit
Ni	: Nikel
Pd	: Paladyum
Pt	: Platinum
Au	: Altın
Ar	: Argon
H	: Manyetik Alan
B	: Manyetik İndüksiyon
M	: Mıknatıslanma
μ	: Manyetik Moment
V	: Hacim
M_S	: Doyum Mıknatıslanması
M_r	: Kalıcı Mıknatıslanma Değeri
R_0	: Sıradan Hall Katsayısı
R_S	: Anormal Hall Katsayısı
H_C	: Sıfırlayıcı (Koersif) Alan
C	: Curie Sabiti
$^{\circ}C$	: Senti Drad Derece
K	: Kelvin
T_C	: Curie Sıcaklığı
$\hbar$	: Planck Sabiti
v	: Hız
a	: Örgü Parametresi
d	: Katman aralığı
μ_0	: Serbest Uzayın Geçirgenliği
ε	: Elektromotor Kuvveti
r	: Yarıçap
I	: Akım
dc	: Doğru Akım

e	: Elektronun Yüğü
eV	: Elektron Volt
m	: Kütle
a	: ‘skew’ saçılma katsayısı
b	: ‘side-jump’ and ‘intrinsic’ coefficient
R	: Direnç
ρ	: Özdirenç
ρ_H	: Hall Özdirenç Değeri
ρ_{OH}	: Sıradan Hall Özdirenç Değeri
ρ_{AHE}	: Anormal Hall Özdirenç Değeri
σ	: iletkenlik
σ_{xy}	: enine iletkenlik
σ_{xx}	: boyuna iletkenlik
V_H	: Hall Gerilimi
$V_{AHE} (V_y)$	: Anormal Hall Gerilimi
V_x	: Boyuna Gerilim
w	: İnce Filmin Genişliğı
l	: İnce Filmin Uzunluğı
t	: kalınlık
t_{top}	: toplam kalınlık
t_{Co}	: Kobalt Malzemenin Kalınlığı
t_{Pd}	: Paladyum Malzemenin Kalınlığı
t_{FM}	: Ferromanyetik Malzemenin Kalınlığı
t_{NM}	: Nonmanyetik Malzemenin Kalınlığı
fcc	: Yüzey Merkezli Kübik Yapı
$\text{\AA}$	: Angström
nm	: Nanometre
G	: Gauss
Oe	: Oersted
TM	: Geçiş Metal
FM	: Ferromanyetik
MR	: Manyeto direnç
AHE	: Anomalous Hall Effect

GMR	: Dev Manyeto direnç
TMR	: Tünelleme Manyeto direnç
RAM	: Random Access Memory
MRAM	: Manyetik RAM
DMA	: Dik Manyetik Anizotropi
AGM	: Alternating Gradient Magnetometry
VSM	: Titreşimli Örnek Manyetometresi
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
XRR	: X-Işını Yansıması
UHV	: Ultra High Vacuum

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Klasik Hall etkisinin şematik gösterimi	7
2.2 Hall Etkisinin ve AHE'nin şematik karşılaştırılması	8
2.3 Hall etkisi H ile artar. (b) AHE ise FM malzemenin M_S ile sınırlıdır	9
2.4 R_0 ve R_S katsayılarının grafiksel bulma yönteminin gösterimi	10
2.5 Üç temel AHE mekanizmalarının şematik gösterimi	13
3.1 DC saçtırma tekniğinin şematik gösterimi	20
3.2 Tipik bir XRD sisteminin fotosu ve şematik gösterimi	23
3.3 Şekil 3.3 XRR tekniğinin (a) fotosu, (b) gelen ve yansıyan x-ışınlarının açılarının ve (c) metal film kalınlığının ölçülmesinin şematik gösterimi	24
3.4 Hall bar geometrisinin ölçümler için son halinin gösterimi	26
3.5 Hall ölçümleri için IC-soket üzerine yerleştirilip bonding yapılmış son hali	28
3.6 Hall ölçümlerinin Hall kontaklarının (a) şematik ve (b) mikrofotograflama yöntemiyle gösterimleri	29
3.7 Üstteki foto da GYTE deki PPMMS sistemidir ve alttaki ise basitçe şematik gösterimi	31
3.8 AGM tekniğinin temel parçalarının şematik gösterimi	32
4.1 V_x ve V_y gerilimlerini ölçmek için kullanılan düzeneğin şematik gösterimi	35
4.2 $t_{Pd} = 1.5$ nm serisinin 0.2, 0.3 ve 0.55 nm Co filmlerinin XRD piklerinin gösterimi	38
4.3 Seçilen üç örnek için tipik bir XRR detektörü tarafından kaydedilen yansıyan X-ışın şiddetinin açıya bağlı değişiminin gösterimi	40
4.4 Hall öz direnç, klasik Hall ve AHE bileşenlerinin gösterimi Üstteki ince film $t_{Co} = 0.25$ nm, alttaki ise $t_{Co} = 0.55$ nm için	42
4.5 $t_{Pd} = 1.5$ nm için Co kalınlığına bağlı koersif alan değişiminin gösterimi	43
4.6 Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin $t_{Pd} = 1.8$ nm(üst) ve 1.5 nm(alt) serisinin 300 K sıcaklıkta Co kalınlığına bağlı AHE polarite değişiminin gösterimi	46

4.7	Co/Pd filmlerin AHE özdirencinin sıcaklığa bağlı (a) $t_{Co} = 0.35$ nm, (b) $t_{Co} = 0.40$ nm ve (c) Co(0.30 nm)/Pd(1.5 nm) nin polarite değişimi gösterimi	49
4.8	(a) $t_{Co} = 0.20$ nm, $t_{Pd} = 1.8$ nm ve (b) $t_{Co} = 0.20$ nm, $t_{Pd} = 1.5$ nm Co/Pd filmlerinin T_C değerlerinin gösterimi	52
4.9	Çok katmanlı Co/Pd filmlerin $t_{Pd}=1.5$ nm serisinin sıcaklığa bağlı enine ve boyuna direnç değerlerinin değişim eğrileri	54
4.10	Çok katmanlı Co/Pd filmlerin $t_{Pd}=1.5$ nm serisinin enine ve boyuna özdirenç değerlerinin sıcaklık değişim grafiği	57
4.11	Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin $t_{Pd} = 1.5$ nm serisinin sıcaklığa bağlı boyuna iletkenlik değişim eğrilerinin gösterimi	59
4.12	Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin $t_{Pd}= 1.5$ nm serisinin sıcaklığa bağlı enine iletkenlik değişimi eğrilerinin gösterimi	60
4.13	Co/Pd ($t_{Pd} = 1.5$ serisinin) filmlerinin AHE parametrelerinin belirlemesi için $\rho_{xy}/\rho_{xx} - \rho_{xx}$ eğrileridir. Kırmızı çizgiler ise fitleri	62
4.14	Co/Pd ($t_{Pd} = 1.5$ serisinin) filmlerinin AHE parametrelerinin belirlenmesi için $\sigma_{xy} - \sigma_{xx}$ eğrileridir. Kırmızı çizgiler ise fitleri	63
4.15	Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin enine ve boyuna iletkenlik ve özdirençler eğrilerinin fit sonuçları	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Bragg ana piklerine göre hesaplanan filmlerin kalınlıkları ve kalibrasyon karşılaştırması	39
4.2 En ince orta ve en kalın örneklerin, Bragg ana pikleri ile uydu (satellite) piklerinin 2θ açısı konumları	39
4.3 Co/Pd 0.20 nm ve 0.55 nm Co kalınlığındaki filmlerinin, kubik a ve katman aralığı (d) değişimi	40

1. GİRİŞ

Günümüz elektronik teknolojisinde işlevlik, yüklü parçacıkların kontrollü kullanılması ile sağlanmaktadır. Yeni nesil elektronik teknolojisinde ise iletken elektronların spininden faydalananarak cihazlar geliştirilmektedir. Bu alan spinelektronik veya kısaca spintronik diye adlandırılmaktadır. Son yıllarda üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır ve gelişen bir alandır [1].

Yeni nesil teknolojik uygulamalar (spintronik) için manyetik ince filmler üzerinde yoğun ve maliyetli araştırmalar yapılmaktadır [2]. Bilgi teknolojisinin gelişmelerine paralel olarak manyetik ve manyeto transport araştırmaları- özellikle Dev Manyetodirenç (GMR) etkisinin keşfinden sonra [3, 4] (bunun için Fert ve Grünberg Fizik 2007 Nobel Ödülünü paylaştılar)- ince filmlerin fiziğinin temel anlayışına da önemli katkılar sağladığı söylenebilir.

Yakın dönemde nano boyut fiziğinin daha iyi anlaşılması ile bilim insanları yeni nesil cihazların uygulamalarının fiziksel olayları üzerinde odaklanmıştır. Yeni nesil çalışmalar; spin-valf ve GMR (dev manyeto direnç) / TMR (tünelleme manyetodirenç) sensörleri ve cihazları [5, 6], hızlı anahtarlama (fast switching) [1, 7], bilgi okuma ve depolama sistemleri için manyetik RAM [8] örneklerdendir. Yarıiletkenlerde sinyal işleme cihazlarında (spintronics) ferromanyetik (FM)/yarıiletken ara yüzeylerinin (spin enjeksiyon ve algılama) spinleri polarize edilmiş elektronların taşınması [10-14] çalışmaları diğer örnekler arasında sayılabilir.

Dik anizotropili manyetik malzemeler yeni nesil spintronik uygulamalar için önemli bir yapı taşıdır [15]. Manyetik filmlerin kalınlıkları nano metrenin altına indikçe (boyut kaynaklı) dik manyetik anizotropi (DMA) özelliği kazanırlar. Yani ultra ince manyetik filmler yüzeylerine dik doğrultuda (vertical) mıknatıslanması kolaylaşır. Bu özelliğinden ötürü dik anizotropili ince filmler yüksek yoğunluklu manyetik kayıt gerektiren kayıt ortamı, MRAM ve manyetik sensörlerde kullanılmak üzere yoğun olarak araştırılmaktadırlar.

Çok katmanlı geçiş metal (TM: Co, Fe ve Ni) ve soy metalden (Pt, Pd ve Au) oluşan malzemeler belirli kalınlık ve katman tekrarlama sayısına göre DMA özellik gösterirler [15-18]. Bu malzemelerin spintronik uygulamalar için doyum mıknatıslanması ve anizotropi enerjisi gibi gerekli manyetik özellikleri katman sayıları ve kalınlıkları (TM ve Pt veya Pd) değiştirerek ayarlanır [18-28]. Çok katmanlı DMA sergileyen malzemeler üzerinde yoğun deneysel ve teorik çalışmalar yapılmasına rağmen, fiziği ve manyetik özellikleri hakkında henüz belirli bir ortak anlayış sağlanamamıştır [29]. Yine de genel anlayış, DMA'nın ince filmlerde ve çok katmanlı malzemelerin yüzeylerinde veya ara yüzeylerindeki simetrinin bozulmasından kaynaklandığı ve bu etkinin hacimsel (bulk) katkısına göre daha baskın olduğu öngörülmektedir [30].

Bu tez çalışmasında incelenen çok katmanlı Co/Pd filmlerinde FM Co katman kalınlığı 0.80nm den daha küçük olduğunda DMA özelliği gösterdiği bilinmektedir [15]. Buna sebep olarak çok katmanlı Co/Pd filmlerin ara yüzey anizotropisi ve FM Co katmanının yüzey gerilimi [15] gösterilmektedir. İlgili başka bir çalışmada [31], çok katmanlı Co/Pd filmlerin ara yüzeyinin Co-Pd (alloy-like phase) alaşım benzeri faz özelliği gözlemlenmiştir. İlginç olan çok katmanlı Co/Pd filmin katmanları incelidikçe ($t_{FM} < t_{NM}$ için) ara yüzey ve yüzey anizotropisinin hacimsel (bulk) anizotropisine göre daha baskın özellik göstermesi ve filmin kolay mıknatıslanma yönünün filmin düzlemine dik hale gelmesidir.

Diğer yandan, Anormal Hall Etkisi (AHE) [32] diye adlandırılan bir olay çok uzun zaman önce (1881 de) Edwin H. Hall tarafından gözlemlenmesine rağmen, teknolojik uygulamalarının ne denli önemli olacağı henüz çok yakın zamanlarda anlaşılmaya başlanmıştır ve bu olayın temel fiziksel mekanizması yoğun olarak tartışılmaktadır [33]. Yukarıda değinildiği gibi, DMA malzemelerin dik anizotropisinden ötürü dik yönde kalıcı mıknatıslanma oluşmaktadır. Böylece AHE etkisi yeterince güçlü olduğundan, dikey manyetik kayıt cihazların manyetik histerilerini $M(H)$ ölçmek için yararlı bir araç olarak kabul edilmiştir [34]. Çünkü Hall özdirenci mıknatıslanmanın dik bileşeni ile doğru orantılı olarak cihazın çıkış sinyalini verir [35]. Aynı zamanda AHE etkisi basit ve etkili bir araç olarak ince filmlerin ve nanoskopik manyetik nesnelerin araştırılması için de kullanılabilir.

Bunun yanında yeni nesil manyetik sensörler ve bellek cihazları geliştirilmesinde de kullanılabilirler [36, 37].

AHE'nin metallerde veya yarıiletkenlerde klasik Hall etkisinde olduğu gibi; üzerinden akım geçen iletkenin düzlemine dik olarak uygulanan manyetik alan etkisinde Lorentz kuvveti tarafından her ikisine (akım ve manyetik alana) dik bir gerilim (enine gerilim) oluşur. AHE etkisi ferromanyetik malzemelerde malzemenin iç mıknatıslanması ile ilgilidir. Yani belirli bir manyetik alan şiddetinden sonra FM malzemenin enine gerilim değeri dış manyetik alandan etkilenmemektedir. Dolayısıyla bu davranışın (etki) açıklanması için Lorentz kuvveti yetersizdir. Bilindiği gibi klasik Hall etkisinde olduğu gibi, AHE metallerin ve yarıiletkenlerin manyetik durumunun karakterize edilmesi için kullanılan önemli araçlardır. Ferromanyetik malzemelerde görülen AHE'nin şiddeti FM malzemenin iç mıknatıslanması ile sınırlıdır ve mıknatıslanmanın vektör yönünü belirlemek içinde kullanılabilir. Dolayısıyla aynı zamanda FM malzemenin AHE sıcaklık ölçümleri ile FM malzemenin Curie sıcaklık değeri de bulunabilir.

Öte yandan, pek çok teorik araştırmalar ile bu karmaşık AHE olgusunun tutarlı bir teorik gelişimi sağlanması için uğraşılmaktadır [38]. Anormal Hall etkisinin kökenini açıklamak için ilk teorik girişim Karplus ve Luttinger (KL) tarafından yapılmıştır [39] ve bu etki öz (intrinsic) olarak adlandırılmıştır. KL teorisine göre dış manyetik alanda mükemmel periyodik örgü potansiyelinde AHE akımı manyetik olarak polarize edilmiş iletken elektronları (ferromanyetizma için sorumlu olan) spin-yörünge saçılması ile enine hız bileşeni edinirler. Ancak FM malzemeler ile yapılan deneysel [40, 41] sonuçlar KL teorisinin sadece saf sistemlerde mevcut olduğu görülmüştür. Diğer FM malzemeler ile yapılan AHE deneylerinin farklı davranışlar göstermelerinden dolayı yeni açıklamalara ihtiyaç duyulmuştur. Buna göre Smit [42] ve Berger [43] dışsal etkiler kaynaklı (extrinsic) AHE teorileri geliştirmişlerdir. Bu ilk teorilerden kaynaklanan tartışmalar [44, 45] daha sonra yapılan teorik hesaplamalarla [46] ve karşılaştırmalarla [47] geliştirilmeye çalışılmıştır.

Metal tabanlı yeni nesil spintronik uygulamalarda önemli yapı taşlarından biri olması beklenen Co/Pd filmleri ile ilgili çalışmalar yayınlanma sırasına göre (AHE yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda polarite değişimini gözlemleyen) şöylece özetlenebilir: Kim et al. [48], çok katmanlı Co/Pd filmlerin Pd kalınlığına bağlı manyeto iletkenlik özelliklerini incelemişlerdir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin AHE histerilerinde, Pd'nin 4-5 mono katman arasında AHE'de polarite değişimi gözlemlemişlerdir. Jen et al. [49] ise Co ve Pd atomlarının bağıl oranını değiştirerek çoğaltılan Co/Pd alaşımlarının AHE katsayısını (R_s) incelemişlerdir. Co-Pd alaşımlarının değişik bağıl oranlarına göre R_s 'nin işaret değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Aoki et al. [50], çok katmanlı Co/Pd filmleri üzerinde AHE çalışmışlardır. Bu çalışmada çok katmanlı Co/Pd filmlerin 2 Å Co ve 20 Å Pd kalınlığı için R_s nin 4.2 K sıcaklıkta işaret değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Daha yakın bir çalışmada (2010 da) Rosenblatt et al. [51], ultra ince çok katmanlı Co/Pd filmler üzerinde yaptıkları AHE çalışmasında, AHE polarite değişiminin katman sayısına ve zamana bağlı gözlemlemişlerdir. Son bir çalışmada, Guo et al [52], yine çok katmanlı Co/Pd filmlerin AHE polarite değişimini katman sayısına ve sıcaklığa bağlı gözlemişlerdir.

Bu tez çalışmasında, metal tabanlı spintronik cihazlarda kullanılması öngörülen, ultra (aşırı) ince çok katmanlı Co/Pd filmler manyeto sıçratma tekniğiyle büyütülerek manyeto iletkenlik özellikleri (düşük sıcaklık Hall etkisi), yapısal (XRD ve XRR) ve manyetik (AGM/PPMS) karakterizasyonları yapılmıştır.

Geleneksel olarak ferromanyetik malzemelerin AHE araştırmaları sıcaklık değerlerini ve katkı miktarlarını değiştirerek yapılmaktadır. Biz bu çalışmada çok katmanlı Co/Pd filmlerin sadece Co katman kalınlığını sistematik biçimde (0.2 nm den 0.55 nm ye 0.05 nm basamaklı artırarak) değiştirerek malzemenin katkı değişkenliği ihmal edilmiştir. Bu şekilde çok katmanlı Co/Pd filmlerin FM Co katmanının AHE etkisi incelenmiştir. Bizim bu çok katmanlı Co/Pd filmlerdeki en ilginç gözlemimiz Co/Pd filmlerin AHE histerilerinin sıcaklığa ve Co katman kalınlığına bağlı AHE histerilerinin polarite değişimi göstermeleridir.

Tezin ikinci bölümünde, Hall etkileri bölüm başlığı altında, sırasıyla klasik Hall etkisi, AHE ve AHE mekanizmaları olan öz (intrinsic), dışsal kaynaklı yana sıçrama ve ‘skew’ saçılma gelişimleri ile anlatılmıştır. Daha sonra hangi AHE mekanizmalarının herhangi bir FM malzemede baskın olduğunun belirlenmesi kısaca anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ise çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmlerin büyütülme ve karakterizasyonu için kullanılan analiz teknikleri kısaca anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise gerçekleştirilen AHE deneylerinden elde edilen bulgular, yapılan hesaplamalar ve değerlendirmeler anlatılmıştır. Son olan beşinci bölümde ise çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmlerin deneysel bulguları özetlenecek ve ileride yapılabilecek çalışmalar ile ilgili öneriler tartışılacaktır.

2. HALL ETKİLERİ

İletken bir malzemede yük taşıyıcıları hareket yönüne dik uygulanan dış manyetik alan etkisinde sapma göstermeleri fizikçilerin uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur. Edwin Herbert Hall bu konuda 19. Yüzyılın sonlarına doğru çalışmalar yapmış ve yayınladığı sonuçlar halen yoğun elektrik ve manyetizma birleşimi tartışmalı çalışmalara neden olmuştur.

Klasik Hall etkisi (ilk bilinen haliyle Hall etkisi) 1879 yılında keşfedilmiş ve ardından (1-2 sene sonra) ‘Anomalous Hall Effect’ (Anormal Hall Etkisi, AHE) diye nitelenen ve ferromanyetik (FM) malzemelerde gözlenen bir etki keşfedilmiştir. Çok daha ilginç olan bir gerçek ise Hall etkisi elektronun keşfinden 19 sene önce gerçekleşmiş olmasıdır. Hall etkisinin keşfedilmesi, elektronik uygulamaların önemli yapıtaşlarından olan yarıiletken fiziği ve katı hal elektronuğun işlevselliğinde önemli rol oynamıştır [38]. Ayrıca AHE, temel ve uygulama açısından, mıknatısların iletkenlik özellikleri hakkında çalışmalar yapılması için iyi bir araçtır [53]. Genel olarak Hall etkisi elektrik ve manyetizma etkileşimi sonucunda gözlemlenen bir olgudur. Yani AHE FM malzemelerin manyeto elektrik transport özelliğinin bir neticesidir. Bu bölümde AHE’nin kolay anlaşılması için önce sıradan Hall etkisi daha sonra AHE’nin deneysel çalışmalar için yeterli teorik temel bilgiler verilecektir. Bu bölümde E. H. Hall’ın dik manyetik alan etkisinde üzerinden akım geçirilen iletken malzemenin davranışını gözlemlerken yaptığı deneyler anlatılacaktır. Bu şekilde konu daha kolay anlaşılacaktır.

2.1 Klasik Hall Etkisi

Hall 1879 da düzgün (uniform) ve dik manyetik alanda üzerinden akım geçirilen iletken etki eden kuvvetin doğasını incelemek istemiştir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, klasik Hall etkisi deney düzeneğini (isothermal şartlarda) ince bir katı iletken/yarıiletken dikdörtgen şeklinde varsayalım. İletkene boyuna akım (I , x-yönünde) ve aynı zamanda dik manyetik alan (H , z-yönünde) uygulandığında iletkenliği sağlayan elektronlara bir manyetik kuvvet (F_m) etki edecektir. Bu

deneylerde Hall'ın vardığı sonuçlardan ilki; düzlemine dik yönde manyetik alan uygulanan manyetik olmayan ince bir iletken den akım geçirildiğinde filmin karşılıklı kenarları arasında bir elektrik alan E (veya V_H) oluşur (bkz. Şekil 2.1). Oluşan bu elektrik alan E 'ın uygulanan dış manyetik alana (H) ve iletken den geçen akıma (I) dik yöndedir. Dik yönde oluşan E , iletken elektronların Lorentz kuvvetinin

$$F_L = q(v \times H) \quad (2.1)$$

v : elektronun hızı, q : elektronun yükü) etkisinde köşelere itilmesi ve karşılıklı köşelerde zıt kutuplar oluşmasındandır. Bu durum E (veya V_H) bir sabit değer kazanana kadar devam eder ve olay Hall etkisi olarak adlandırılır. Bu oluşan Hall etkisi ile E eşitliği;

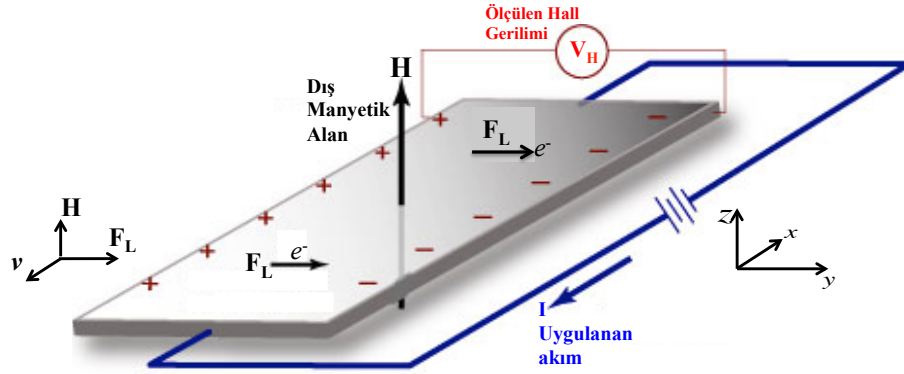
$$E_H = \frac{V_H}{d} = R_H J_x H = R_H \frac{I_x}{d \cdot t} H \quad (2.2)$$

(R_H veya R_0 : sıradan Hall katsayısını, d : filmin y-ekseni doğrultusundaki filmin genişliğini, t : z-ekseni doğrultusunda filmin kalınlığını ifade etmektedir) buradan sadeleştirme yapıldığında Hall gerilimi

$$V_H = R_H \frac{I_x}{t} H \quad (2.3)$$

ifadesi bulunur. Bu ifadeye göre ince filmler için Hall gerilimi, V_H , filmin kalınlığı ile ters orantılıdır. Yani metal film inceldikçe oluşan Hall gerilimi şiddeti artar. Hall öz direnç (ρ_H) ifadesi ise Hall alanının boyuna akım yoğunluğuna oranıdır;

$$\rho_H = R_H H \quad (2.4)$$

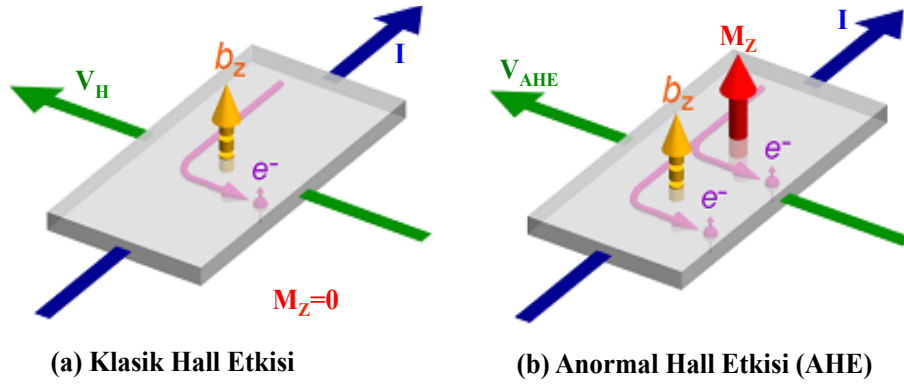


Şekil 2.1 Metal iletkende serbest elektronların manyetik alan (H) etkisinde sapmaya uğraması yani klasik Hall etkisinin şematik gösterimi

2.2 Anormal Hall Etkisi (AHE)

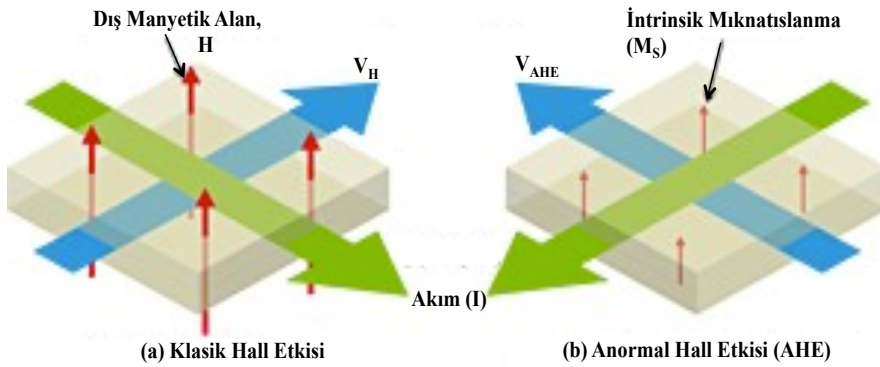
E. Hall bir sene sonra (1880 yılında) da, 0.03 mm kalınlıktaki ince bir Fe tabaka (1881 de Ni ve Co) ile yaptığı deneyde altın ve gümüş gibi manyetik olmayan malzemelerde gözlenenden yaklaşık olarak 10 kat daha büyük ve zıt işaretli Hall geriliminin oluştuğunu gözlemlemiştir. Bu tarihte henüz iletkenlerdeki yüklerin hareketi hakkında fazla bilgi yoktu. Ancak bu farklı şiddetteki etkinin (AHE) fiziksel nedeni üzerinde uzun yıllar çalışılmış olmasına rağmen kabul edilebilir bir kuramsal açıklama ancak 80 yıl sonra yapılabilmektedir.

Edwin Herbert Hall sıcaklığın AHE üzerinde etkisini araştırmak için yaptığı çalışmada, AHE'in belli bir sıcaklıkta aniden değiştiğini gözlemiştir. FM malzemeler üzerinde yaptığı çalışmada E.A. Hall AHE'nin elektriksel dirençle (ρ_{xx}) de ilişkisinin olduğunu gözlemlemiştir. E. A. Hall aynı yayınında FM malzemelerin en önemli 3. genel karakteristiği olarak, enine oluşan Hall gerilimin, klasik iletkenlerde gözlenenden farklı olarak, uygulanan manyetik alan H ile orantılı olarak artmadığını ve H nin belirli bir değerde doyuma ulaştığını ve bu değerde yaklaşık olarak malzemenin doyum mıknatıslanma M_s (saturation magnetisation) değerine denk geldiğini görmüştür (bkz. Şekil 2.2.). Şekil 2.2.de görüldüğü gibi okunan AHE gerilimi (V_{AHE}) sadece FM malzemenin doyum mıknatıslanmasının (M_z) z-bileşenine bağlıdır. Ölçülen Hall gerilimi (V_H) ise uygulanan dış manyetik alanın z-bileşenine bağlıdır.



Şekil 2.2. Hall Etkisinin ve AHE'nin şematik karşılaştırılmasının gösterimi

FM malzemenin M_S değerinden sonra manyetik alan, H , artmasına rağmen AHE geriliminin değişmemesi AHE nin şiddetinin belirleyici ana faktörünün M_S olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.3'de şematik olarak gösterildiği gibi (solda) katı iletken (manyetik olmayan) Lorentz kuvveti dik uygulanan H etkisinde Hall etkisi oluşur. Ancak sağdaki şekilde ise FM malzemenin kendi karakteristik özelliğinden doyum mıknatıslanma M_S ile AHE'nin değerinin sınırlandığı görülmektedir. FM malzemelerde AHE geriliminin yönü malzemelerin özelliklerine göre Hall gerilimine genelde zıttır (bkz. Şekil 2.3).

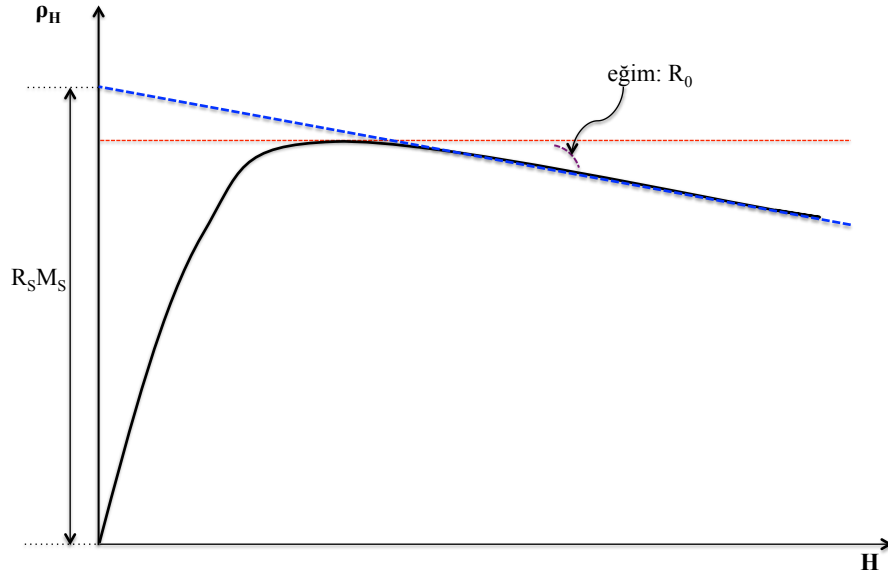


Şekil 2.3. Hall etkisi uygulanan manyetik alan ile artar. (b) AHE ise FM malzemenin M_S ile sınırlıdır.

FM malzemelerde AHE şiddeti manyetik alana (H) bağlı okunan enine gerilim monotonik artış yerine hızlı lineer artar ve belirli H şiddetinde doyuma (M_S) ulaşır. Yani bu değer FM malzemenin doyum mıknatıslanmasına (M_S) denktir. Bu

doyum değerinden sonra H artmasına rağmen lineer azalma görülür. V_H (veya ρ_H) - H grafiğinden lineer azalmanın eğimi FM malzemenin sıradan Hall etkisinin katsayısıdır (R_0) (bkz. Şekil 2.4.).

FM malzemelerde dış manyetik alan olamadan dahi akım uygulandığında spontan Hall direnci oluşur. FM malzemede oluşan enine elektrik alan (E) M_S 'in yönüne bağlıdır. Dış manyetik alan şiddetinin artması ile FM malzemede manyetik momentlerin daha fazla paralelleşme sonucunda makroskopik boyutta enine Hall gerilimi oluşur. Bu davranış Şekil 2.4'de ilk lineer artışa karşılık gelir. Ancak M_S değerinden sonra H değerinin artmasına rağmen AHE gerilim değeri artmamaktadır [43]. Bu durum FM malzemelerde uygulanan dış H 'nin AHE öz direnç değerinin temel nedeninin olmadığını göstermektedir.



Şekil 2.4. R_0 ve R_S katsayılarının grafiksel bulma yönteminin gösterimi

FM malzemelerde ölçülen Hall öz direnci (ρ_H), sıradan (ρ_{OH}) ve anormal Hall etkisi (ρ_{AHE}) toplamının ampirik eşitliği [55, 56]:

$$\rho_H = \rho_{OH} + \rho_{AHE} = R_0 \mu_0 H + R_S \mu_0 M \quad (2.5)$$

Burada $\rho_{OH} = R_0 H$ Lorentz kuvveti neticesinde oluşan normal Hall öz direncidir ve katsayısı R_0 dır. Yani

$$R_0 (\text{veya } R_H) = -\frac{1}{ne} \quad (2.6)$$

R_0 , iletken malzemenin yük taşıyıcı yoğunluğunun (n : yük taşıyıcı sayısı, e : elektronun yükü) göstergesidir. (2.5) eşitliğinin sağındaki $\rho_{AHE}(\text{veya } \rho_{xy}) = R_S \mu_0 M$ net mıknatıslanmadan kaynaklanır ve R_S katsayısı her bir FM malzemenin karakteristik özellikleri ve boyuna ρ_{xx} öz direnç değeri ile ilişkilidir [55]. FM malzemelerin AHE öz direnç (ρ_{AHE}) değeri deneylerde doğrudan ölçülemez. Dolayısıyla ρ_{AHE} hesaplanması için eşitliğin solundaki ölçülen değerden ρ_H 'den ρ_{OH} öz direncinin ($R_0 \mu_0 H$) çıkarılması ile elde edilir. Yani basitçe, ölçümlerde elde edilen $\rho_H(H)$ histerisinden (bkz. Şekil 2.5), doyum değeri sonrasında oluşan lineer çizginin eğiminden R_0 bulunur ve ölçülen öz direnç değerinden çıkarılır. Şekil 2.4' de gösterildiği gibi ikinci bir seçenek olarak $R_S M_S$ değeri ρ_H ekseninin kesişim noktasından da bulunur [54].

Klasik deneysel yöntemlerle bir FM malzemenin R_S değerini bulmak için sıcaklığa bağlı ve malzemenin katkı yoğunluğunu değiştirerek ölçümler yapılır. Genel olarak FM malzemelerin AHE deney sonuçlarına göre $R_S(\text{veya } \rho_{xy}) \propto \rho^n$, n değeri 1.2 ile 2 arasında değiştiği görülmüştür [42, 43].

FM metallerde ve yarıiletkenlerde görülen AHE'den yola çıkarak olayın mekanizmasını anlamak ve öz direnç ($\rho_{xy} \propto \rho^n$) değerlerini ilişkilendirmek için genel bir eşitlik geliştirmek üzere Karplus- Luttinger (KL) [39], Smit [42] ve Berger [43] tarafından AHE teorileri geliştirilmiştir. Bu ilk AHE teorilerden kaynaklanan tartışmalar [45, 57, 58] ileriki senelerde teorik hesaplamalar [46] ve karşılaştırmalar [47] yapılarak geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu üç AHE teorilerinin/mekanizmalarının birbirinden bağımsız olduğu bilinir. Ancak bir FM malzemenin AHE hesaplandığında etkilerin toplamı alınır. Yani bir FM malzemede hangi AHE mekanizmasının etkin olduğu değil hangisinin diğerlerine göre daha baskın olduğunun belirlenmesi gerekir. Nagaosa et al. [38] yaptıkları yayında metallerdeki

AHE nin doğal sınıflandırmasını (deney ve mikroskopik teorilere göre) Bloch durumlarının iletim yaşam sürelerine (Bloch state transport lifetime) göre yapmıştır. Bu tezde mevcut FM malzemeler için geliştirilen AHE teorilerinin ışığında sırasıyla AHE mekanizmaları kısaca tartışılacaktır.

2.2.1 Öz (Intrinsic) Katkı

1954'te KL ilk olarak FM malzemelerdeki AHE ni açıklamak için öz (intrinsic) diye adlandırılan mekanizmayı önermiştir. KL öz (intrinsic) teorisinde, FM katı iletken bir malzeme düzlemine dik manyetik alan ($\mathbf{H}$) etkisinde boyuna elektrik alan ($\mathbf{E}$) uygulandığında iletken elektronlar elektrik alana ($\mathbf{E}$) ve manyetik alana ($\mathbf{H}$) dik anormal bir hız edindiklerini ve bunların AHE iletkenliğine sebep olabileceğini iddia etmiştir. KL teorisinde, enine elektronların edindikleri enine (dik) anormal hız vektörlerinin tüm olası enerji bant seviyelerinin üzerinden toplamı sıfırdan farklı bir değerde olduğunu iddia etmiştir. Yine KL teorisinde, AHE'nin saçılmadan bağımsız olduğunu yani malzemenin karakteristik yapısından kaynaklandığını ve iletken elektronların enerji spektrumlarının spin yörünge etkileşimi ile ilişkili olabileceğini iddia etmiştir. Ancak KL teorik hesaplamalarında, FM malzemenin kristal yapısının kusursuz olduğunu varsayarak katkı kaynaklı saçılmaları ihmal etmiştir. KL teorisinde iletkenlik tensörünün σ_{xy} tersinir özelliğinden

$$\rho_{xy} \approx \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2} \quad (2.7)$$

ve ($\rho_{xx} = \frac{1}{\sigma_{xx}}$) enine (veya R_S) ve boyuna öz dirençler arasında

$$\rho_{AHE}(\text{veya } R_S) \sim \rho_{xx}^2 \quad (2.8)$$

ilişkinin olduğunu belirlemiştir.

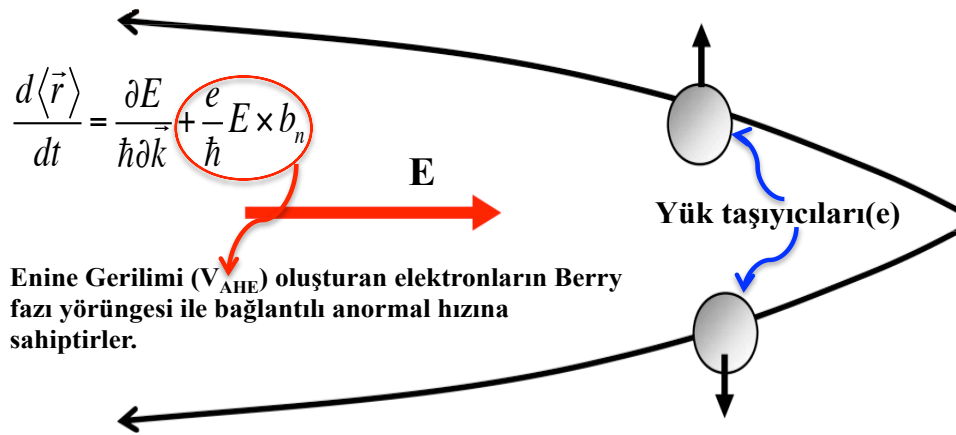
FM malzemelerde AHE iletkenliği öz (intrinsic) (σ_{xy}^{int}) katkısı sadece malzemenin mükemmel kristal bant yapısına bağlı olduğundan doğrudan ideal örgü

(lati) için Kubo formülü (semiclassical transport theory) ile hesaplandığı bilinir [59-61]. Dahası, σ_{xy}^{int} iletkenliğinin hesaplanması, gayet kompleks FM malzemelerde dahi birinci derece (first principles) elektronik yapısal teorik hesaplama teknikler ile mümkün olduğu iddia edilmektedir. Bu durumda güçlü spin yörünge eşleşmesi (SYE) olan bir çok FM malzemede öz (intrinsic) iletkenlik katkısı baskındır. Son zamanlarda, Berry fazı sayesinde, bu kendiliğinden anormal Hall akımının topolojik görüntüsüne, yarı klasik teorisi kapsamında, yeni bir açıklama sağlamıştır. Berry faz teorisi belli koşullarda bantlar arası (interband) anormal hız denkleminde ekstra bir terim ekler [62].

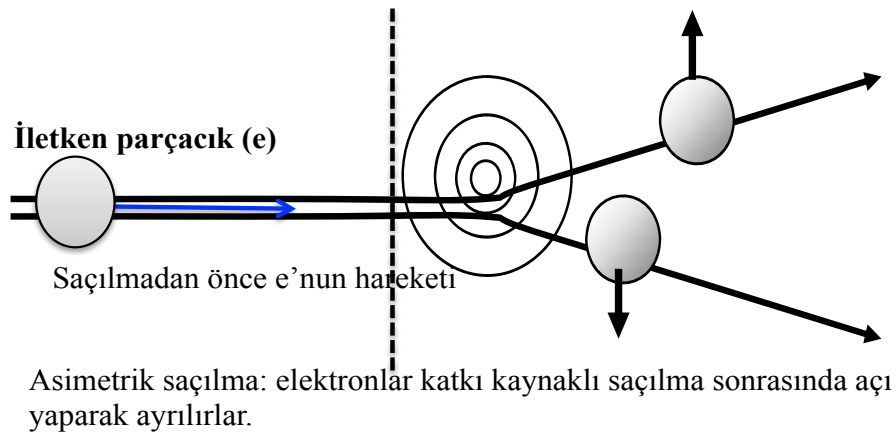
$$\mathbf{v}_n(\mathbf{k}) = \frac{1}{\hbar} \nabla \varepsilon_n(\mathbf{k}) - \frac{e}{\hbar} \mathbf{E} \times \boldsymbol{\Omega}_n(\mathbf{k}) \quad (2.9)$$

eşitlik 2.9 da ' $\boldsymbol{\Omega}_n(\mathbf{k})$ ' Berry eğriliğidir. KL'nin hesapladığı bant hızının alışılmış terimine ek olarak bir Hall akımı ile sonuçlanan ikinci bir görünümüdür.

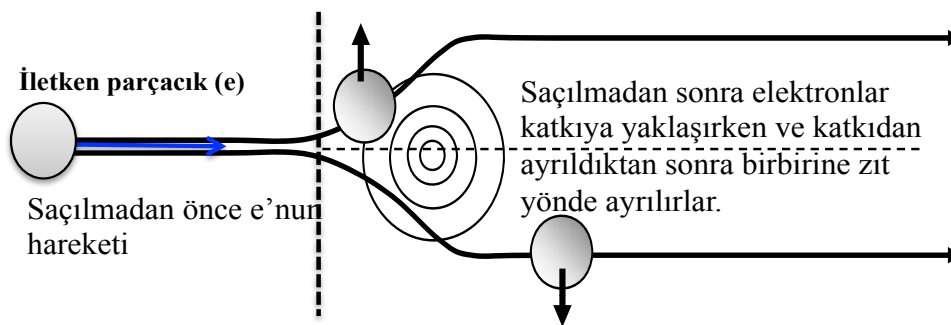
Bu teoride öz (intrinsic), kusursuz bir periyodik potansiyelde, iletken elektronların sabit Bloch durumlarında SYE neticesinde saçılmaya maruz kalmamasının mümkün olmayacağı gerekçesiyle Smit ve Berger tarafından eleştirilmiştir [38]. Bu gerçekten yola çıkarak, Smit teorisinde FM malzemede herhangi bir katkı veya fonon kaynaklı saçılma sonucunda kristalin periyodikliğinin bozulacağını ve KL'nin iddiasının geçerliliğini kaybedeceğini ifade etmiştir. Smit ve Berger geliştirdikleri, KL teorisinin eksikliklerini dikkate alarak, yarı klasik AHE teorilerinde, kristaldeki kusurlar ve düzensizliklerden kaynaklanan saçılmalar üzerinde odaklanmışlardır.



(a) 'intrinsic' mekanizması



(b) 'skew' saçılma mekanizması



(c) Yana sıçrama mekanizması

Şekil 2.5. Üç temel AHE mekanizmalarının şematik gösterimidir. Herhangi bir gerçek malzemede elektronlar bu üç mekanizmanın etkisinde hareket ederler.

2.2.2 Dışsal Katkılar: ‘Skew’ Saçılma ve Yana Sıçrama (Side-Jump)

‘Skew’ saçılma (SS) mekanizmasının AHE ye katkısı iletken elektronların (Bloch state transport lifetime) yaşam süreleri ile ters orantılı [38, 63] olduğundan mükemmelliğe yakın kristallerde baskın olması beklenir. İletken elektronların, yaşam süresi ile ters orantı, SYE nin neticesinde düzensizliğin kusursuz kristaldeki Bloch ulaşım teorisinden doğar [32, 64].

Smit, FM malzemelerde AHE etkisinin iletken elektronların spin yörünge etkileşimi (SYE) sonucunda, kristaldeki kusurlardan kaynaklandığını, asimetrik (skew saçılma) saçılmaya uğrayarak gerçekleştiğini iddia etmiştir. FM malzemelerde SYE neticesinde iletken elektronlar malzemenin mıknatıslanma yönüne göre sağ ve sol (bkz. Şekil 2.5.b) geçiş olasılığı farklı olacaktır, yani asimetriktir. Bu asimetrik Boltzman eşitliğinden çıkan sonuca göre akım (I_x) ile orantılıdır ve yönü I_x ve M_s ye diktir. Yani σ_{xy}^{ss} iletkenliği malzemedeki katkı ve çeşitlerinden etkilendiği düşünülmektedir. Smit teorisinde iletken elektronların SS saçılma neticesinde maruz kaldığı enine ve boyuna öz dirençler arasında lineer bir ilişkiyi öngörmektedir,

$$\rho_{xy}(\text{veya } R_s) - \rho_{xx} \quad (2.9)$$

FM malzemelerin AHE mekanizmalarının şematik gösterimi şekil 2.5 deki gibidir. Şekil 2.5’de görüldüğü gibi ‘skew’ saçılma öncesi x- eksenine doğrultusunda periyodik kristalde hareket eden elektronların saçılma sonrasında kütle merkezleri saçılma öncesine göre daha düşük hızla hareketine devam eder. Bilindiği üzere kuantum mekaniğine göre elektronların hareketi saçılma sonrasında yine doğrusal ve sabit hızda devam eder. Kristaldeki katkılar ile spin yörünge etkileşimi neticesinde saçılma sonrasında elektronlar hareket doğrultularındaki sağ ve sol simetrisinin bozulacağı öngörülmektedir.

Diğer yandan Berger’in yana sıçrama (side-jump) teorisi, Gaussian dalga paketinin R yarıçapındaki küresel potansiyel engelinden saçılmaya uğradığını ve saçılma sonrasında bir kısım elektronların yayılma merkezlerinin geliş doğrultusuna

dik yönde yana kayar ve yana sıçrama (side jump) olarak adlandırmıştır. Temel klasik yaklaşımda Berger'in teorisini KL'nin teorisi ile ayırt etmek zordur. Bundan dolayı yana sıçrama (side-jump) iletkenliğinin saçılma potansiyeline bağlı olduğu iddia edilir. Fakat saçılma oranına bağlı olmadığı anlaşılmıştır. Yani bu mekanizma geleneksel Boltzman iletim teorisinin dışındadır. Burada sadece Bloch durumlarının olasılığının görüldüğü ancak saçılma sürecinin mikroskobik ayrıntıları olmadığı, iletken elektronların yaşam sürelerinden bağımsız olmasından dolayı öz (intrinsic) mekanizması ile benzer olduğu iddia edilmektedir. Yani yana sıçrama (side-jump) ve öz (intrinsic) mekanizmalarının yaşam süreleri ile orantılı olarak birbirinden ayırmak mümkün görünmemektedir. Alternatif çözüm ise şu şekildedir:

$$\sigma_{xy}^{AHE} = \sigma_{xy}^{ss} + \sigma_{xy}^{int} + \sigma_{xy}^{sj} \quad (2.10)$$

eşitlik 2.10 dan yana sıçrama (side-jump) iletkenlik katkısı toplam iletkenlikten SS ve öz (intrinsic) iletkenliklerinin çıkarılması ile bulunur. Berger, KL teorisinde olduğu gibi enine ve boyuna özdirençler arasında karesel $\rho_{xy}(\text{veya } R_S) \propto \rho_{xx}^2$ ilişkisiyi belirlemiştir.

2.3 AHE Mekanizmalarının Belirlenmesi

İlk zamanlarda FM malzemelerin AHE incelemek için sadece bir örnek üzerinde sıcaklığa bağlı ($\rho_{xy}(T)$ ve $\rho_{xx}(T)$) deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilir [38, 64] ve bu ölçümlerin $\rho_{xy}(\text{veya } R_S) - \rho_{xx}$ grafiklerinden $\rho_{xy} \sim \rho_{xx}^n$ fit edilerek n için 1 veya 2 değerleri karşılaştırılırdı. Kooi (1954) [65] te o zamana kadar yapılan FM malzemelerle ilgili AHE çalışmaları toparlayarak yayınlamıştır. Fakat buna rağmen konu ile ilgili tartışmalar son bulmamıştır.

Metallerde sonlu sıcaklıkta (T), iletken elektronların etkili bir şekilde fononlar ve spin dalgaları tarafından saçılmaya uğradıkları bilinmektedir. Bu inelastik saçılmalar bugün dahi mikroskobik olarak anlaşılması zor fiziksel olaylardır [38]. Smit, SS saçılma teorisinde fonon saçılmasının n değerini 1 den 2 ye doğru yükselttiğini iddia etmiştir. Bu sonuç başkaları tarafından da bulunmuştur. Lyo

(1973) tarafından yapılan hesaplamalar neticesinde Debye sıcaklığının üstünde, $T \gg \Theta_D$ (Debye sıcaklığı), SS saçılmanın değerinin

$$\rho_{xy} \sim (\rho_{xx}^2 + a\rho_{xx}) \quad (2.11)$$

a sabit bir sayı, halini aldığını hesaplamıştır. Kondo (1962) teorisinde ise ‘skew’ saçılmanın spin uyarımlarından kaynaklandığını varsayarak yaptığı hesaplamalarda ρ_{xy} ’nin sonlu sıcaklıkta ρ_{xx}^2 ile değiştiğini göstermiştir.

Diğer taraftan yana sıçrama (side-jump) ve KL mekanizmalarının birbirinden ayrılması kolay değildir. Özellikle mikroskopik seviyede farkları net değildir. Bu konuda sistematik deneysel çalışmaların eksik olduğu bilinir. Bunun üzerine 1980 larda FM malzemelerdeki AHE probleminin üzerinde yoğun çalışılmıştır. Sonraki yirmi yıldaki deney sonuçlarından enine ve boyuna özdirençler arasında ($\rho_{xy} \sim \rho_{xx}$) lineer ilişki görülmüştür. Fakat bu sonuca göre diğer AHE mekanizmalarının teorik öngörülleri deneysel olarak doğrulanmadığı ve sadece SS mekanizmasının baskın olduğu anlamına gelir ve bilim insanlarının kafaları karıştırmıştır.

Sonraki yıllarda ise Berry fazına ve iletkenlik ile ilişkisine teorik ilgi artmıştır. Bilindiği gibi Berry fazı KL’nin AHE akımının topolojik olarak momentum uzayında hareketini izah etmek için kullanılmaktadır.

2003 yılından beri birçok sistematik çalışmalar (deneysel ve teorik) FM metallerde AHE’nin daha iyi anlaşılmasına ve gelecek çalışmalara yön vermiştir. FM malzemelerde enine ve boyuna özdirençler arasında $\rho_{xy} \propto \rho^n$ ilişkinin olduğu bilinmektedir. Özdirençler arasındaki ilişkinin $n = 1$ için yani $\rho_{xy} = a\rho_{xx}$ ise bu malzemede baskın olan SS AHE mekanizmasıdır. Özdirençler arasındaki ilişkinin $n = 2$ için yani $\rho_{xy} = b\rho_{xx}^2$ ise bu malzemede baskın olan SJ ve/veya öz (intrinsic) AHE mekanizmasıdır. FM malzemede hangi AHE mekanizmalarının baskın olduğunun belirlenmesi için geleneksel olarak

$$\rho_{AHE}(= \rho_{xy}) = a\rho_{xx} + b\rho_{xx}^2, \quad (2.12)$$

ifadesi [38, 55] kullanılır. Burada a lineer katsayısı SS ve b katsayısı ise SJ ile öz (intrinsic) AHE katkısını temsil etmektedir. FM malzemelerde eşitlik 2.12 genel olarak kullanılmak istense de farklı FM malzemeler için deneysel sonuçlar farklılık göstermesinden dolayı ortak bir ifade sağlanamamıştır [38, 66]. Hacimsel (bulk) FM malzemelerde teorik ve deneysel sonuçlar, nano boyutlara göre farklılık göstermektedir. Yani AHE etkisinin ρ_{xx} ile ilişkili olduğundan, ρ_{xx} 'in boyut etkisinden kaynaklanan farklı davranış gösterir [67]. Özellikle ultra inceliklerde, yüzey saçılması ve ara yüzey (interface) kaynaklı, ρ_{xx} ve ρ_{xy} bulk değerlerinden farklı değerler göstermektedir.

Berger ve Bergmann FM malzemelerde Hall etkisi üzerinde yaptıkları yayında [55] iletkenlik değerinin sıcaklığa bağlı değişiminin öz direnç değerine göre daha az olmasından dolayı öz dirençler yerine enine ve boyuna iletkenliklerin ilişkilendirmesini yapmıştır. $\sigma_{xx} = 1/\rho_{xx}$ için

$$-\sigma_{xy} = \rho_{xy} / \rho_{xx}^2 \quad (\rho_{xy} \ll \rho_{xx}) \quad (2.13)$$

$$-\sigma_{xy}^{FM} = a\sigma_{xx}^{FM} + b \quad (2.14)$$

yine eşitlik 2.12 de olduğu gibi a lineer katsayısı SS ve b katsayısı ise SJ ile öz (intrinsic) AHE katkısını temsil etmektedir. Bu ifade (eşitlik 2.14) yazılırken küçük değer olan sıradan (ordinary) veya klasik kısmı ihmal edilmiştir ve tüm hesaplamalar için malzemelerin doyum mıknatıslanmaya ulaşıldığı varsayımı yapılmıştır.

Ampirik olarak AHE mekanizmaları FM hacimsel (bulk) metaller ve yarıiletkenler için geçerlilik gösterirken ultra ince çok katmanlı malzemelerde farklılık gösterdiği bir çok çalışmalar neticesinde görülmüştür [64]. Bu tür malzemelerde AHE davranışları farklı değerlendirilmesi gerektiği iddia edilmesine karşın biz bu tez çalışmasında geleneksel yol izleyerek, iki genel denklem kullanarak, çok katmanlı ultra ince Pd/Co örneklerimizin öz direnç ve iletkenlik değerleri incelenerek daha önce yayınlanan çalışmalarla karşılaştırmalar yapılacaktır. Bu şekilde FM özellik gösteren çok katmanlı ultra ince Pd/Co örneklerimizde hangi

AHE mekanizmalarının baskın olduğu ve FM çok katmanlı malzemelerde AHE mekanizmaları biraz daha iyi anlaşılmasına katkısı olacaktır.

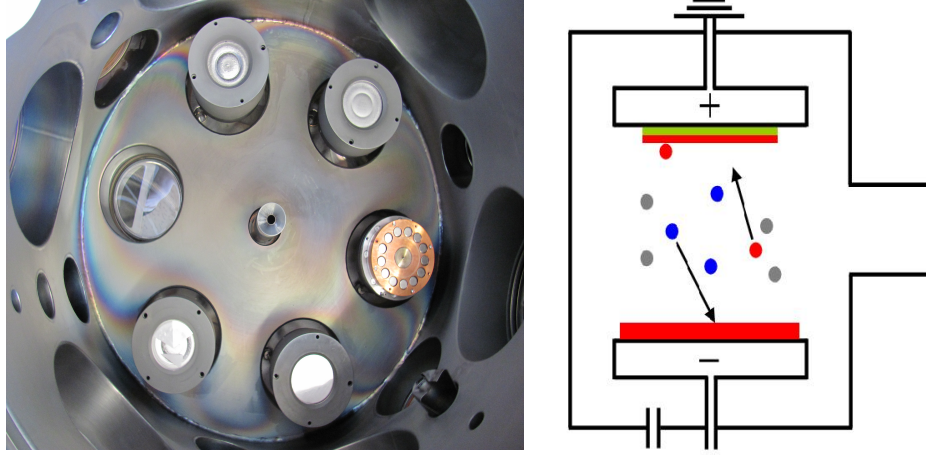
3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde dik manyetik anizotropili (DMA) ultra ince çok katmanlı Pd/Co filmlerin çoğaltılması ve manyeto-transport özelliklerinin incelenmesi için kullanılan teknikler kısaca anlatıldı. Daha ayrıntılı bilgiler için bölüm içinde verilen referanslara bakılabilir.

3.1 Dc Magnetron Sıçratma

Yüksek vakum ortamında (ultra high vacuum- UHV), incelemek istenilen ince filmlerin üretimi için hedef malzemenin atomlarının sökülerek alttaş (substrate) üzerine kaplama işlemi ‘sputtering’ diye adlandırılır.

Magnetron sıçratma yönteminin ilk defa 1852 de keşfedildiği ve yöntemin ince filmlerin çoğaltması için ise ilk defa Langmuir tarafından 1920’de kullanıldığı söylenebilir. Ancak uzun seneler sonra (son 20-30 senedir) yaygın olarak metal, metal alaşım ve farklı bileşiklerden oluşan ince filmlerinin çoğaltması için sıçratma ve yöntemleri yaygın olarak kullanılır. Magnetron sıçratma yönteminde daha geniş alanlı hedef malzeme kullanılır. Dolayısıyla da daha düzenli kalınlıkta malzeme çoğaltılır.



Şekil 3.1. DC sıçratma tekniğinin şematik gösterimi, sağda. Kırmızı nispeten kalın çizgiden koparılan kırmızı noktalar film üzerine çoğaltılmak istenen atomların temsildir. Dolayısıyla üstteki ince kırmızı çizgi çoğaltılan filmidir. Mavi noktalar ise Ar^+ iyonlarını ve gri noktalarda yüksüz Ar atomlarıdır. Üstteki yeşil çizgi alt taşı gösterimidir. Manyetik malzemeler için en üstteki çizgiler katot tur ve alttakiler (iki tane) ise non-magnetik malzemeler içindir. Sağdaki katot ise magnetron sıçratma için gerekli olan mıknatısın temsildir. Soldaki resim ise hedef (target) lerdir.

Magnetron sıçratma yönteminin kullanımında, ince filmler çoğaltılırken hedef (target) malzeme negatif (katot) dc veya rf güç kaynağına bağlıdır ve kaplanmak istenen yüzey (anot) ise topraklanmıştır. Şekil 3.1 de gösterildiği gibi bu iki elektrot (katot ve anot) düzlem halindedirler ve birbirine çok yakındır (sadece bir kaç cm).

Bazı magnetron sıçratma yöntemlerinde hazırlamak istenen filmlerin özelliklerine göre filmleri ısıtarak veya soğutarak [68, 69] malzemenin çoğaltması da mümkündür. Filmler büyütülmeden önce sıçratma çemberinde plazma ortamı oluşturmak ve devamlılığını sağlamak için $1 \cdot 10^{-1}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ mbar arasında düşük basınçta ortama Ar (Argon) veya Ar- karışımı (çok az miktarda hidrojen ile) gaz verilir. Argon gazı ve karışımlarının yüksek saflıktadırlar. Bunun yanında ekonomiktirler ve hedef malzemenin atomlarına momentum aktarımı sağlar. Ar^+ - iyonları 2-3 kV'lık negatif potansiyel altında yüksüz hedef atomlarının momentum transferi ile ayrıştırılır ve alttaş üzerinde toplanarak ince filmler oluşur.

Hedefin (target) arkasına yerleştirilen güçlü mıknatıslar ile katotun yüzeyine paralel $E \times B$ kapalı alan oluşturulur ve bu alan yakınındaki elektronları Ar

atomlarına çarpmadan spiral yörüngede tutar ve dolayısıyla iyonizasyon (Ar^+ -iyon) verimliliğini artırır. Böylece Ar^+ -iyonlarının hedef (target) malzemeye çarparak daha fazla atom koparması sağlanır. Ar^+ -iyonları hedef plakanın atomlarına çarpar ve momentumunu aktarır. Ar gazı düşük basınçta Ar^+ -iyonlaşır. Dolayısıyla orta ve yakın sabit gerilimde de yüksek verimli ve akımlıdır ve istenilen oranlarda kaplama yapılması sağlanır.

Ancak burada dikkat edilmesi gereken, alttaş, hedef malzemedan (target) ve plasma tarafından saçılan elektronlar/iyonlara maruz kalır ve yüksüz atomların bağımsız olarak toplanmasından ile oluşacak tabakanın kalitesini düşürür. Bu durumun önlenmesi için alttaşa negatif gerilim uygulanır. Aksi taktirde kaplamak istediğimiz filmin özelliklerinin etkilenmesi kaçınılmazdır.

Dc sıçratma yönteminin verimini belirleyen etkenler şunlardır; her bir iyonun mümkün olan en yüksek oranda hedeften atom sökmesi, bombardıman yapılan iyonunun enerjisine (ve buna bağlı olarak hedef malzemenin bağlama enerjisi), iyonun kütlesi ve bu şekilde kaplama hızının belirlenmesi ve ortamın basıncıdır. Target (hedef)'en koparılan atom parçacıklarının enerjileri sıçratma (sputter) gerilimin artırılması ile artar ve alt taş geriliminin azalması ile azalır ve ayrıca Argon basıncını artırarak atom parçacıklarının enerjilerini azaltmak mümkündür [70].

Bu tezde incelenen filmler, (1×10^{-7} mbar temel basınçta ve sıcaklıkta) okside edilmiş silikon (0 0 1) alttaş (500 nm kalınlıkta) üzerine magnetron sıçratma ile büyütülmüştür. Örneklerin büyütülmeden önce kalınlık kalibrasyonları yapıldı. Yani 100 saniyede Ta, Pd, Co ve MgO ayrı ayrı çoğaltıldı ve XRD ve XRR yöntemleriyle bir saniyedeki sıçratma oranı hesaplandı. Yapılan kalibrasyonlar sonrasında 3 seri 'Si wafer/ SiO_2 /Ta(5 nm)/(Pd(y)/Co(x))/MgO' özellikte çok katmanlı ultra ince filmler, dc Magnetron sıçratma tekniğiyle büyütüldü. Her bir seri de Pd kalınlığı sabit ($y = 1.2$ nm, 1.5 nm ve 1.8 nm) tutularak ve Co kalınlığı ($x = 0.2$ -0.55 nm) 0.05 nm basamaklarla değiştirildi. Yani Si wafer/ SiO_2 üzerine sırasıyla 5 nm Ta daha sonra 9 defa Pd'nin üzerine Co ve en son olarak 2.1 nm'lik MgO katmanı ile oksitlenmeyi önlemek için kaplandı. Filmlerin kalınlıkları en ince ($t_{\text{Pd}} = 1.2$ nm) serisi için 12.6 nm - 15.75 nm arasında değişen 8 adet film büyütülmüştür.

$t_{Pd}=1.5$ nm serisi için kalınlıkları 15.3 nm - 18.45 nm arasında değişen 8 adet film büyütülmüştür. $t_{Pd}=1.8$ nm serisi için kalınlıkları 18 nm - 21.15 nm arasında değişen 8 adet film büyütülmüştür.

3.2 Örneklerin Tavlanması

Büyütülen filmlerin belirli basınçta ve sıcaklıkta tavlamanın filmlerin bozukluklarını giderdiği bilinir [71, 73]. Dolayısıyla elektro manyeto transport etkisinin incelenmesi için UHV ortamında 200 °C sıcaklıkta ve filmlerin oksitlenmesini önlenmek için $1\cdot10^{-9}$ mbar UHV’da basınçta yapıldı. Ancak filmlerin tavlama sürelerinin ve sıcaklıklarının [72] sınırları vardır. Tavlama süresine ve sıcaklığa bağlı olarak filmlerde yapısal değişimlerin görülme ihtimalleri vardır.

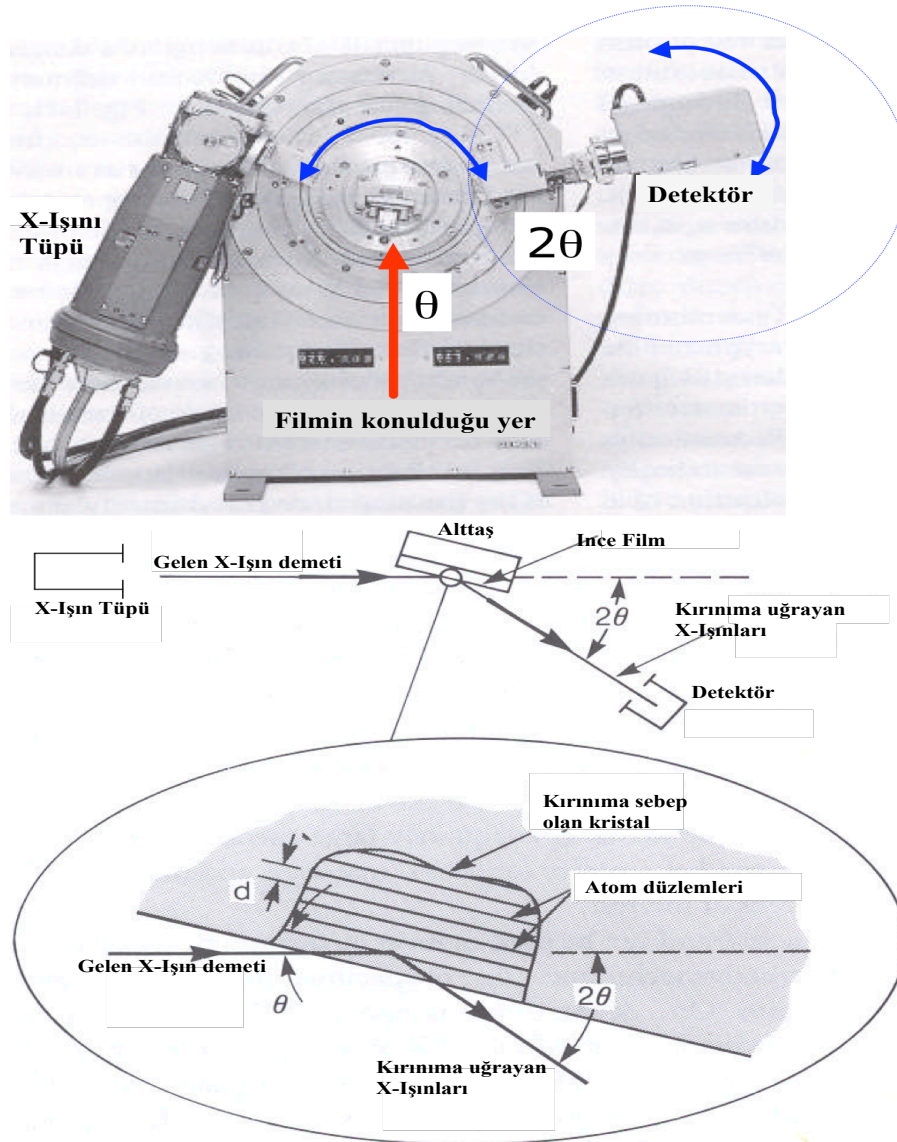
Yüksek sıcaklıklarda difüzyon yoluyla alttaş’a malzemenin atomlarının geçmesine neden olabilir. Ayrıca Pd/Co katman çiftinin interdifüzyon ile arabölge alaşım haline gelir ve daha kötü durumda Co kalınlığının nanometreden de az olduğundan Pd katmanının üzerinde belirgin bir şekilde Pd/Co alaşımı oluşabilir. Bütün bu etkenler dikkate alındı ve filmler 60 dak 6500 Oe’lik dik manyetik alanda tavlansak kalıcı dik manyetik anizotropi oluşturulması hedeflenmiştir.

3.3 X-Işını Difraksiyonu (XRD)

Bu tez çalışmasında DMA li ultra ince çok katmanlı Pd/Co filmlerin kristal yapısını, örgü parametrelerini belirlemek ve ‘dc sıçratma’ mekanizmasının kalibrasyonunu yapmak için XRD (x-ray diffraction) [74] yöntemi kullanıldı.

XRD ölçüm metodunun temel yapıtaşlarının X-ışın tüpü, numune tutucu ve X-ışını detektöründen oluşur. Bir katot ışınının tüpünde oluşturulan X-ışınlarının örnek üzerine demet halinde yönlendirilir. Örnek ve detektör döndürülerek yansıyan X-ışınının yoğunluğunu kaydeder. Şekil 3.2’de şematik olarak gösterildiği gibi örnek

bir θ açısıyla gelen X-ışınının demetinin yolu üzerinde dönecek şekildedir ve kırınım sonrasında yansıyan ışınlarını kaydetmek üzere X-ışını detektörünün ise 2θ açısı ile dönebilecek özelliktedir.



Şekil 3.2 üstteki foto tipik bir XRD sistemidir. Altteki ise ince filmin XRD verilerinin nasıl elde edildiğinin şematik gösterimi

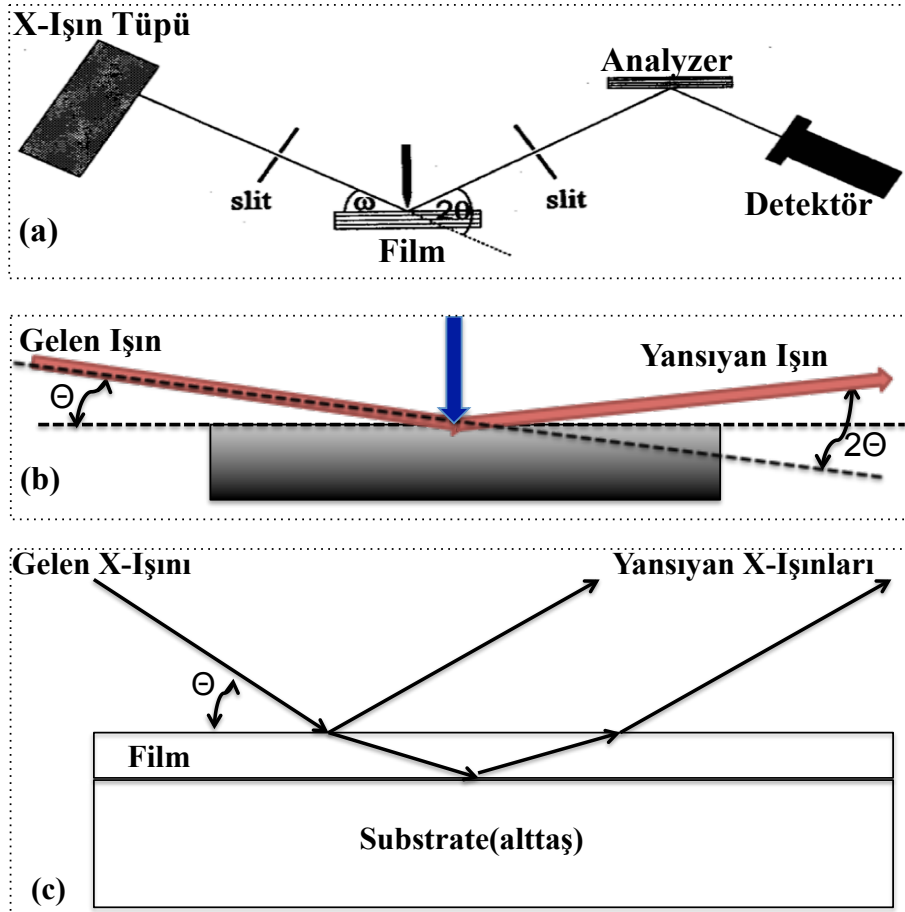
XRD yönteminde, gelen x-ışınları, $1.54029 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip Cu-K α radyasyonu ile Bragg yasasına [75, 76]:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.4)$$

göre yapıcı (constructive) girişim oluştuğunda detektörde kaydedilen değerlerin pikleri oluşur. Bu eşitlikte n , tam sayı, λ , gelen x-ışınının dalga boyu, d , örgü düzlemlerinin arasındaki mesafe ve θ , gelen x-ışını demeti ile film yüzeyi arasındaki açıdır (bkz. Şekil 3.2). Ölçülen ve hesaplanan θ ve d değerleri mevcut referanslar ile karşılaştırılarak örgü parametreleri ve yönelimleri belirlenir. Hesaplamalar ve bulunan değerler daha sonra 4. bölümde gösterildi.

3.4 X-Işını Yansıması (XRR)

X-ışınlarının yüzeylerden yansımasına kısaca “X-ışın yansıması” (X-ray Reflectivity, XRR) denir. XRR tekniği tek ve çok katmanlı ince filmlerin özkütle, kalınlık ve pürüzlülük gibi niceliklerinin belirlenmesinde kullanılır. XRR yöntemi ile ince filmlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini bozmadan ölçümler yapılır.



Şekil 3.3 XRR tekniğinin (a) fotosu, (b) gelen ve yansıyan x-ışınlarının açılarının ve (c) metal film kalınlığının ölçülmesinin şematik gösterimi

Tipik bir XRR düzeneği şekil 3.3 de şematik olarak gösterilmiştir. XRR yönteminde Fresnel yasası dikkate alınarak hesaplamalar yapılır. Yansıyan x-ışınları, detektör tarafından 2θ cinsinden kaydedilir. Yansıyan ile gelen x-ışınlarının açı değerinin eşit olması sağlanır. Bu yöntemde slit kullanılarak gelen x-ışınlarının her açı için aynı miktarda olması sağlanır. Bu yöntemin çalışması, şekil 3.3'de gösterildiği gibi metal filmin ve alltaşın farklı yoğunluklarından kaynaklanan yani üst yüzey ve filmin alt ara yüzeyinden yansıyan x-ışınının yapıcı ve yıkıcı girişimine dayanır. Bu *düşük* açılı $\theta - 2\theta$ taraması 5 saniyede 0.01° lik bir sayım zamanı ile $\theta = 1^\circ$ den başlayarak ($1 \leq 2\theta \leq 5$) ölçümler yapılır. Yoğunluk maximumunu elde etmek için, yansıyan dalgalar arasındaki yol farkı, dalga boyu λ ile gelen dalganın toplam katları $n + 1$ (veya m) olmalıdır ve aşağıdaki denklemi sağlamalıdır:

$$(n + 1)\lambda = 2t\sqrt{\sin^2 \theta_{n+1} - \sin^2 \theta_n} \quad (3.2)$$

burada θ_n , bir arayüzeyden x-ışınlarının tam yansıması için geliş kritik açısı θ_{n+1} , maksimum girişim açısını ve t filmin kalınlığıdır.

Denklem 3.2, bu çalışmada gerçekleştirilen XRR deneylerinin *küçük* geliş açıları için geçerli basit formudur. ($\sin\theta \approx \theta$)

$$\theta_{im}^2 - \theta_c^2 = m^2 \frac{\lambda^2}{(4t)^2} \quad (3.3)$$

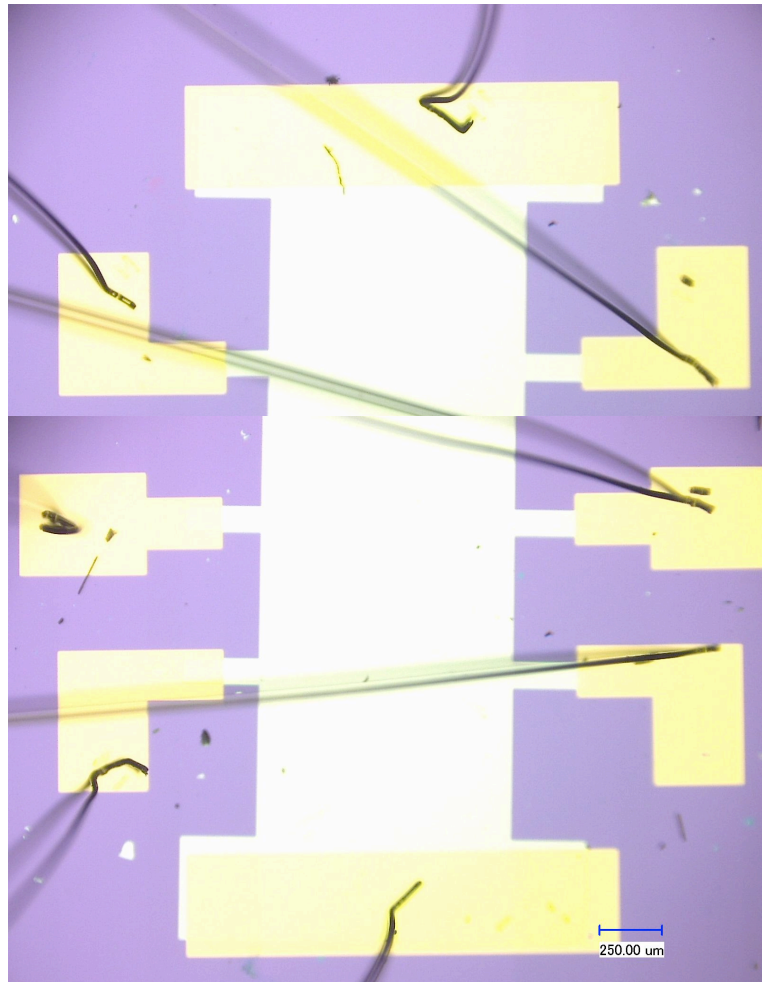
$$\frac{\theta_{im}^2 - \theta_c^2}{m^2} = \frac{\lambda^2}{(4t)^2} = eğim \quad (3.4)$$

Eğim grafikten bulunur ve denklem 3.4'te dalga boyu $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ olarak alınır ve filmin kalınlığı, t hesaplanır ('Kiessig uyum') [77, 78]. Ayrıca, bu çalışmada XRR tekniği magnetron sıçratma yöntemiyle çoğaltılan filmlerin metal kısmının kalınlığının belirlenmesi için de kullanılmıştır.

3.5 Hall Bar ve Kontaklarının Oluşturulması

DMA lı ultra ince çok katmanlı Pd/Co filmlerinin manyeto - transport ölçümlerinin gerçekleştirmesi için sırasıyla UV litografi, elektron demeti aşındırma (e-beam etching) ve kontaklama işlemleri yapıldı. Bu bölümde deneysel işlemler sırasıyla kısaca anlatıldı.

şekil 3.4’de mikroskobik fotoğraflama yöntemi ile çekilen resimde gösterildiğı gibi, çoğaltılan örneklerin boyutlarına uygun ölçülerde transport özelliklerinin ölçülebilmesi için belirlenen alan ile sınırlı UV optik litografi işlemi yapıldı [79].



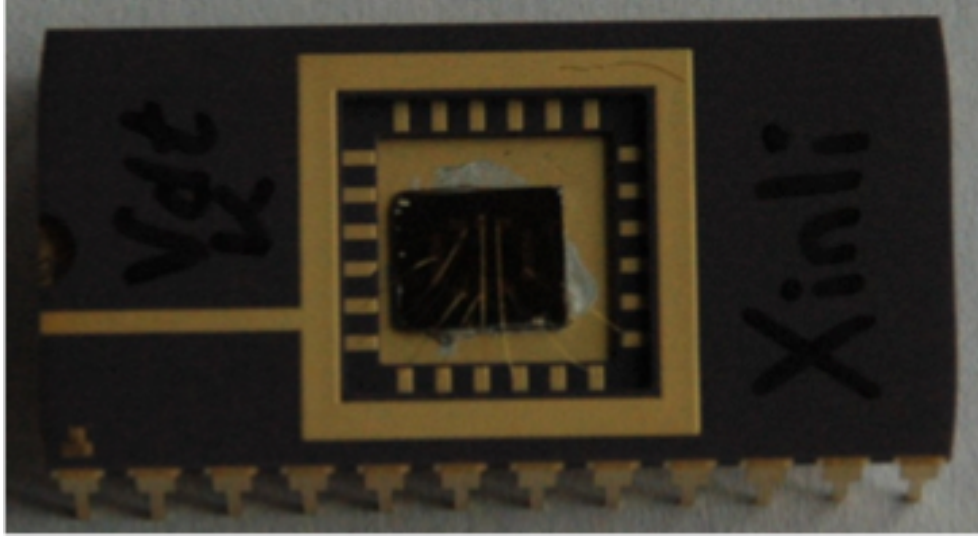
şekil 3.4 Hall bar geometrisinin ölçümler için son halinin gösterimi

Filmlerden geçen akımın ve okunan Hall geriliminin istenmeyen hatalarının (ofset) önlenmesi için, kritik olan Hall bar mask (bir titanyum örtüsü levha) önceden hazırlandı. Daha sonra foto direnç (AR-P 5350 from all resist), (bir akışkan sıvı), filmin üzerine pipet ile damlatıldı ve homojen ince bir tabakanın oluşması için 4000 dev/dk hızla 30 saniye süreyle döndürüldü (spincoating). Foto direnç kaplı filmin daha sonra 80 °C de üstü kapatılan bir ocak üzerinde 30 dk süreyle direncin daha iyi yapışmasının sağlanması için tavlandı. Tavlandıktan sonra Hall mask filmin üzerine yerleştirilir ve UV ışığına (Oxford Instruments) maruz bırakılır ve dolayısıyla UV ışığına maruz kalan bölgenin çözünürlüğü kolaylaşır. Foto maske (Hall bar mask) üzerine yönlendirilen ışığın (exposure) bir kısmının geçmesine izin verir. 'Exposure' işleminde tipik olarak bir foto mask (Hall Bar Mask) kullanılarak filmin üzerinde bir görüntü oluşturulur. Filmin yüzeyindeki foto direnç UV ışığına maruz bırakıldıktan sonra kimyasal bir değişime neden olur ve gereksiz kısım (fotorezist) bazı fotoğraf geliştiricisi benzeri geliştirici (developer) adı verilen özel bir solüsyon ile kaldırıldı.

Kütle spektrometresi kontrollü (mass spectrometry) elektron demeti yöntemiyle Ar iyonları filmin yüzeyine çarparak kimyasal foto direnç ile korunmayan bölgeleri (alttaşa kadar) aşındırılarak kaldırıldı. UV ışığına maruz kalmayan alanlar ise foto direnç tarafından Ar iyonlarına karşı korunur. Bu şekilde, filmlerin Hall ölçümleri için istenen katmanlarının aşındırma işlemi kontrol edilir. Aşındırma esnasında Argon basıncının değeri $5 \cdot 10^{-4}$ mbar 'dır. Örnek aşındırma esnasında yüzeydeki düzensizlik ve gölge etkilerinin önlenmesi için iyon demeti filmin yüzeyi ile 30° lik bir açı yapacak şekilde sabit düşük hız ile döner. Ar aşındırma işleminden sonra aseton ve etanol ile ultrasonik temizleme yapıldı.

Temiz oda da Hall bar için yapılan işlemler filmin yüzeyine Hall kontak maskesi oluşturmak için işlemler tekrarlandı. Film yüzeyi her temizleme sonrasında, yüksek saflıkta azot gazı akımı altında kurutuldu. Film yüzeyinin üzerindeki Hall deseninin ölçüleri, ölçümler için doğrudan temas için küçük olduklarından Hall kontak noktaları filmin üzerine UV ile desen oluşturulduktan sonra aşındırılmış alanları doldurmak için örnek üzerine önce 5 nm Ta ve sonra 50 nm Au püskürtüldü ve 'ultrasonic' temizleme yapıldı. Bunun için Hall Kontak maskesi, oluşturulurken filmin tüm yüzeyi kontak noktaları hariç foto direnç ile kapatılır.

Oluşturulan Hall kontak noktalarının düşük sıcaklık ve yüksek manyetik alandaki Hall ölçümlerini gerçekleştirmek için film IC-soket üzerine gümüş ile yapıştırıldıktan sonra bonding makinası ile (Hybond, model 572A) 25µm kalınlıkta altın tel kullanılarak kontaktlama yapıldı. Hall çubuklarının boyutları birkaç mikron ile yaklaşık 100 mikron arasında değişir. Tüm bu işlemler sonunda filmler IC-soket üstünde manyeto transport ölçümleri için bir parça halinde hazırdır (bkz. Şekil 3.5).

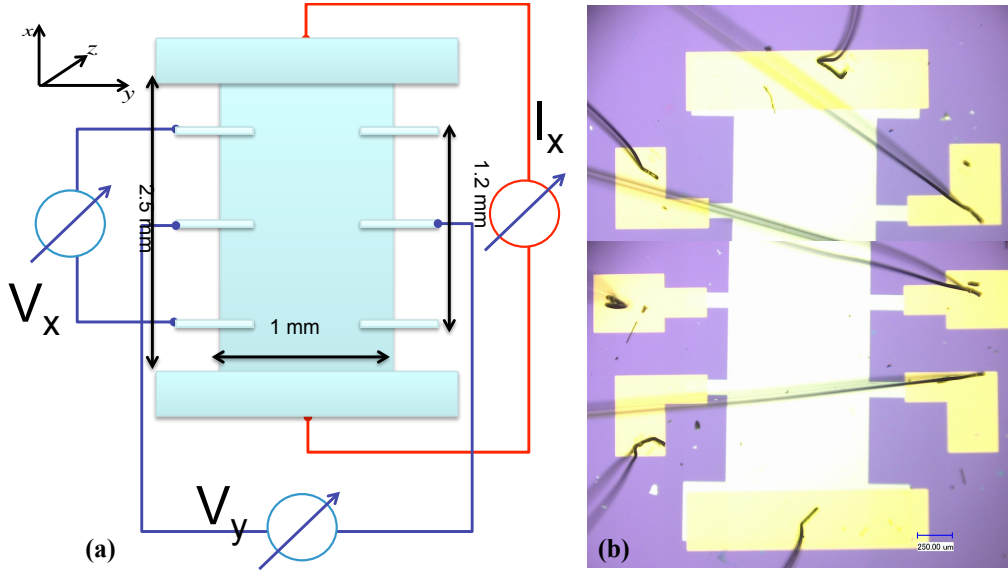


Şekil 3.5 Hall ölçümleri için IC-soket üzerine yerleştirilip bonding yapılmış son hali

3.6 Düşük Sıcaklık Hall Etkisi Ölçümleri

Bu tez çalışmasında, manyeto transport (Hall etkisi) düşük-sıcaklık ölçümleri kapalı bir döngü helyum kryostat (Oxford Instruments Cryodrive 1.5) 13-360 K sıcaklık aralığında çalışan bir sistem ile gerçekleştirildi. Filmler IC-soket üzerinde 25µm incelikte altın tel ile bağlanmış olarak kryostat sayacına yerleştirilir. Sistemin verimli çalışması için (UHV basınçta) ortam en düşük sıcaklık derecesine kadar soğutulur. Kryostat ölçüm sisteminin sıcaklık ayarlanması bir elektronik kontrollü elektrikli ısıtıcı ile gerçekleşir. ‘Oxford Instruments’ kryostat sistemi ± 1900 Oe’e kadar manyetik alan üreten bir sargı ile donatılmıştır. Ancak film kryostat içinde sabit yönelimde olduğundan dik manyetik alan ölçümlerinin gerçekleşmesi sistemde

var olan bobin ile mümkün değildir. Bundan dolayı iki su soğutmalı bobinli demir çekirdek (z-yönünde hareket ettirilebilen) ile yaklaşık 10 kOe manyetik alan üretebilen bir mıknatıs (Magnetic Solutions Ltd. Bruker B-M 4 ve Multimag) kullanılmıştır. Mıknatısta üretilen manyetik alan multimetre (Keithley K 2000) ile dijitalize edilen bir Gaussmetre (Bell 6010) ile ölçülür ve bilgisayara kaydedilir. Bilindiği gibi Hall ölçümleri z-yönünde uygulanan manyetik alan etkisinde oluşan enine direnç değerlerin ölçümüdür.



Şekil 3.6 Hall ölçümlerinin Hall kontaklarının (a) şematik ve (b) mikrofotografı yöntemiyle gösterimleri

Şekil 3.6 de görüldüğü gibi, Hall ölçümleri için klasik 4 noktadan kontak sistemi kullanıldı. Örneklere x-ekseni doğrultusunda sabit akım ($I_x = 500\mu A$) uygulanarak enine Hall gerilimini (V_{xy}) eş zamanlı bir yüksek giriş dirençli voltmetre kullanılarak ölçümler yapıldı. Filmin x - y düzleminin normali doğrultusunda, her iki yönde 200 Oe aralıklarla, maksimum 10 kOe tarayarak histeriler oluşturuldu. Düşük sıcaklık, $V_H(H)$ ve $V_x(H)$ ölçümleri 15-330K (20K aralıklarla) yapılmıştır.

Filmin yüzeyine dik (z-yönünde) manyetik alan uygulanır. Hall ölçümleri ± 10 kOe manyetik alan için gerçekleştirildi. Daha sonra sonuç ve tartışmalar bölümünde Hall ve AHE histerilerinin değerlendirmeleri yapıldı.

3.7 Mıknatıslanma Ölçümleri

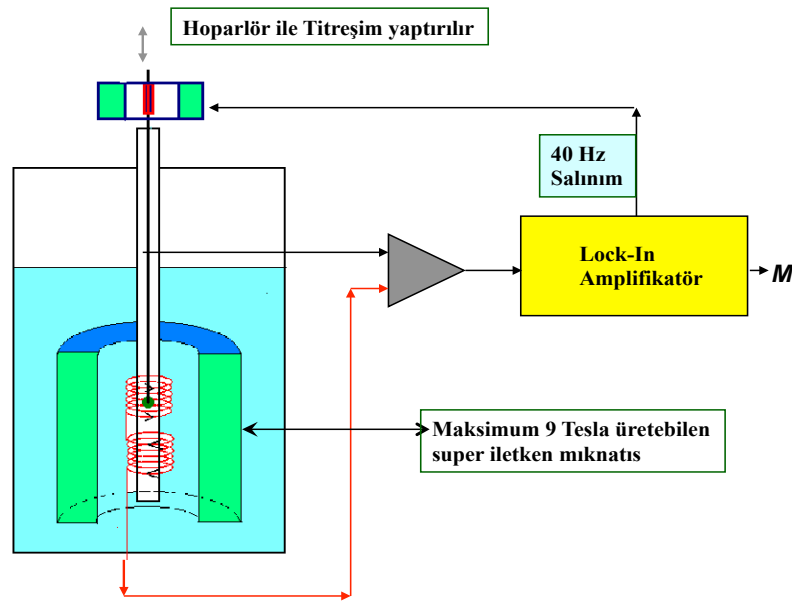
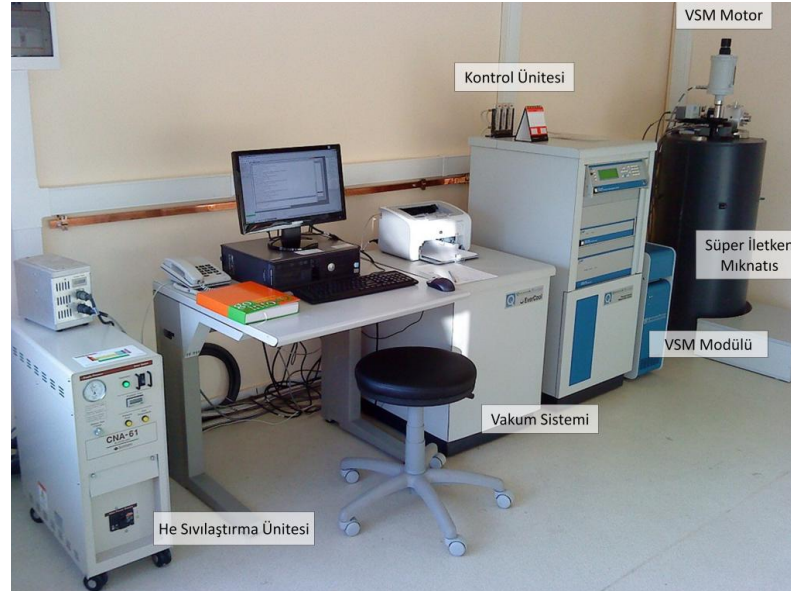
Bu bölümde çok katmanlı ultrince Pd/Co filmlerin mıknatıslanma histerilerinin ölçümü için kullanılan yöntemler olan VSM (Vibrating Sample Magnetometer) (GYTE de) ve AGM (Alternating Gradient Magnetometry) (Bielefeld'de) kısaca anlatılmıştır. Manyetik malzemelerin mıknatıslanması ile ilgili yöntemler hakkında ayrıntılı incelemeyi değişik kaynaklarda bulunabilir [80].

3.7.1 Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Tekniği

Bir titreşimli numune manyetometresi (VSM) ilk [81] olarak 1955 yılında Simon Foner tarafından Lincoln laboratuvarında (MIT) de icat edildi ve 1959 VSM ile ilgili çalışmalar yayınlandı. VSM yöntemiyle malzemenin mıknatıslanması ölçülür. Bu sistemde malzeme düzgün bir manyetik alan içine yerleştirilir ve örnek düşük genlikte bir piezoelektrik materyal kullanılarak sinüzoidal olarak titreştirilir. Bu hareket sonucunda oluşan periyodik manyetik alan değişimi temel almaktadır. VSM yönteminde alıcı bobin olarak indüklenen gerilim filmin manyetik momenti ile orantılıdır ve uygulanan manyetik alan kuvvetine bağlı değildir. Tipik bir VSM (bkz. Şekil 3.7) yönteminde, indüklenen gerilim, referans sinyali olarak piezoelektrik sinyalini kullanarak bir kilit amplifikatör aracılığıyla ölçülür. VSM yönteminde genellikle, film bir hoparlör mekanizması ile uyarılır, 40 Hz'lik sabit salınım frekansta ve 1- 2 mm genlikte dikey konumda düzgün bir manyetik alanda örneğe titreşim yaptırılır ve lock-in amplifikatör kullanılarak, aynı sabit frekansta (40Hz), ac sinyalleri [82, 83] ölçülür. VSM (Quantum Design PPMS9T) sisteminde diğer tekniklerle karşılaştırıldığında manyeto-optik Kerr etkisinde olduğu gibi mıknatıslanma histerilerini belirlemek için manyetik alan (H) 9 T'a kadar artırılabilir ve 4.2 K'a sıcaklığına kadar düşmektedir. VSM ölçümlerinde örnek düzlem dışı (out-of-plane) geometride manyetik olmayan bir çubuk üzerine monte edilmiştir ve iki indüksiyon bobininin merkezinde manyetik momentin konuma göre ölçümü z-doğrultuda yapılır. En şiddetli manyetik momenti veren z-doğrultuda, pozitif ve

negatif yönde taranarak örnekler için 5 kol histeri manyetik moment ölçümleri yapılır.

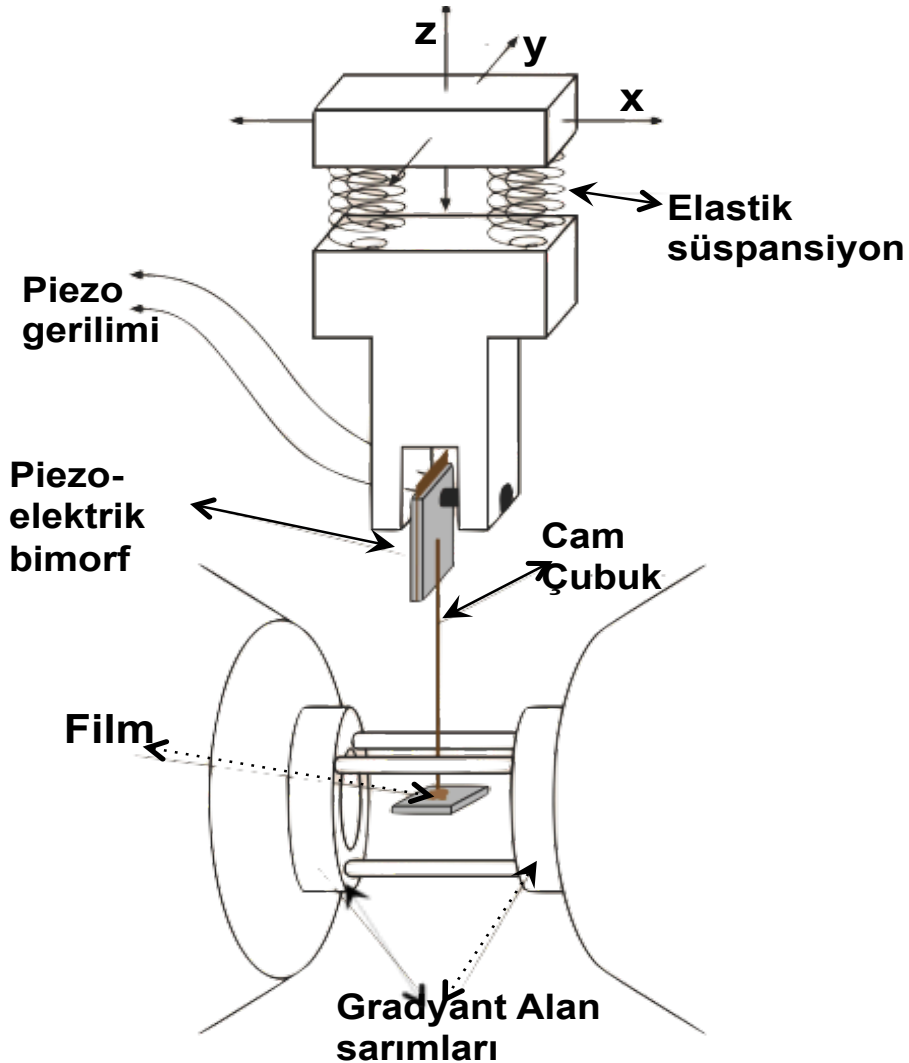
Düşük sıcaklık ölçümleri, en düşük 10 K den başlayarak en yüksek 330 K aralığında 20 K basamaklarla yapıldı. Ölçümler esnasında sıcaklık , kontrollü bir sıvı helyum banyo akış kontrollü kryostat kullanılarak sabit tutulması sağlandı. VSM sistemi 10^{-6} emu (erg/Oe) hassasiyetine kadar manyetik alan değişimlerini 1Hz'lik veri oranıyla çözümleyebilmektedir. Tüm Pd/Co ince filmler için mıknatıslanma histerileri ile AHE histerilerinin paralellik gösterdikleri görülmüştür.



Şekil 3.7 Üstteki foto da GYTE deki PPMMS sistemidir ve alttaki ise basitçe şematik gösterimi

3.7.2 Alternatif Gradyan Manyetometre (AGM) Tekniği

Bu çalışmada, malzemenin mıknatıslanma özelliklerinin karakterizasyonu bir alternatif gradyan manyetometresi (AGM) ile yapıldı (Micro Mag 2900, Princeton Measurements Cooperation). AGM yöntemi ile filmin mutlak manyetik momentinin bir konumsal (spatial) yöne göre ölçülmesi mümkündür. En basit haliyle AGM (bkz. şekil 3.8) iki çift su soğutmalı bobinler ve bir piezo-seramikten oluşur. Bobin çiftlerinden biri zamana göre değişebilen alternatif gradiyent manyetik alan üretirken diğeri çift maksimumda ± 14 kOe lik statik homojen manyetik alan üretir. Film piezo seramik üzerine takılı halde bobinler arasına yerleştirilir ve gradiyent alanı nedeniyle salınım yapmaya başlar. Filmin salınım hareketi, piezo seramik yoluyla bir lock-in yöntemi ile çalışır. Filmin manyetik özelliklerinden salınım hareketinin etkilenmesi sonucunda filmin manyetik momentinin ölçülmesi ile gerçekleşir. AGM yönteminde filmin manyetik momenti dış manyetik alana bağlı olarak histeriler oluşturularak belirlenir.



şekil 3.8 AGM tekniğinin temel parçalarının şematik gösterimi

4. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Bu bölümde ultra ince dik manyetik anizotropili (DMA) çok katmanlı Co/Pd filmlerinin Hall etkisi deneyleri ve sonuçları tartışıldı. Yani filmlerin manyeto-transport özellikleri nicel ve nitel tartışıldı. Sırasıyla, Co/Pd filmlerin hazırlanması, XRD ve XRR deneysel sonuçları tartışıldı. Daha sonra bu çalışmanın temel amacı olan manyeto-transport sonuçları mevcut yayınlarla karşılaştırıldı.

4.1 Co/Pd Filmlerin Ölçümler için Hazırlanması

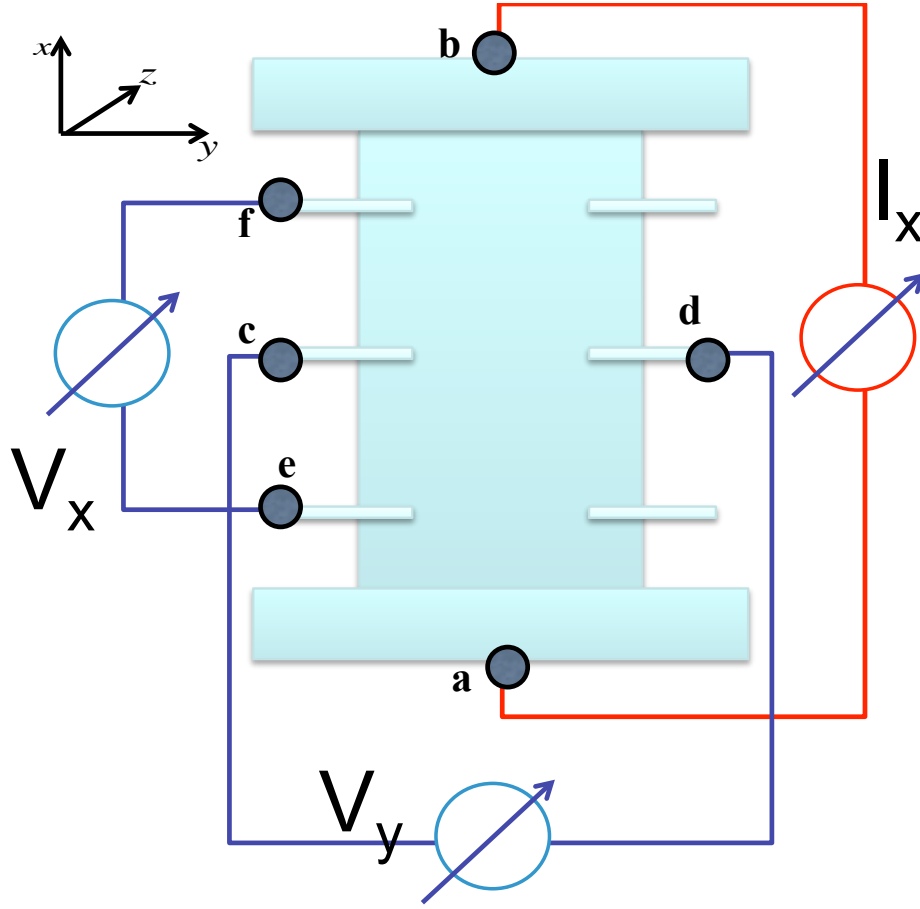
Çok katmanlı Co/Pd filmlerin düşük sıcaklık mıknatıslanma histerileri Quantum Design PPMS ve AGM ile alınmıştır ve polarite değişimi gözlemlenmemiştir. Yani mıknatıslanma ölçümlerinde polarite değişimi gözlemlenmemiştir.

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin Kobalt kalınlığına ve tavlanma sıcaklığına (değişik sıcaklıklarda çok katmanlı Co/Pd filmler tavlandı) bağlı doyum mıknatıslanma, kalıcı mıknatıslanma ve koersif alan değerleri dikkate alınarak yapılan değerlendirmeler sonunda, 200 °C de tavlanan örneklerin düşük H_C ve en iyi karesel histerilerine sahip olduklarından, AHE ölçümleri için kullanıldı.

Çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmler, Si wafer/SiO₂/Ta(5 nm)/(Pd(y)/Co(x))₉/MgO ($x = 0.2 - 0.55$ nm, $y = 1.2, 1.5$ ve 1.8 nm), dc magnetron sıçratma tekniğiyle büyütüldü. Filmler MgO katmanı ile oksitlenmesini engellenmek için kaplandı. Örnekler 200 °C de 60 dak süreyle filmin düzlemine dik 6500 Oe manyetik alanda kalıcı DMA oluşturmak için tavlandı.

Uygulanan akımı (I_x) yönlendirmek ve Hall geriliminin (V_y) istenmeyen hataları (ofset) önlemek için şekil 4.1. de gösterilen boyutlarda filmlerin üzerine Hall bar ve Hall kontakları (5 nm Ta ve 50 nm Ag) oluşturuldu.

Şekil 4.1. de görüldüğü gibi, AHE ölçümlerini gerçekleştirmek için klasik 4 noktadan kontak sistemi oluşturuldu. Şekil 4.1 de gösterildiği gibi Hall etkisi ölçümlerinde a-b noktaları arasında yaklaşık $500\mu\text{A}$ sabit akım uygulanarak filmin düzlemine dik (z-ekseninde) manyetik alanda, -10000 ile $+10000$ Oe, 200 Oe aralıklarla, $15-330\text{K}$ (20K aralıklarla) düşük sıcaklık, V_y (c-d noktalarında) ve V_x (e-f noktalarında) ölçümler gerçekleştirildi.



Şekil 4.1. V_x ve V_y gerilimlerini ölçmek için kullanılan düzeneğin şematik gösterimi

4.2 XRD ve XRR Ölçümleri

‘Magnetron’ sıçratma tekniği ile büyütülen filmin kalınlığı sıçratma süresi ile kontrol edilir. Filmin bir katmanının büyütülmesi istatistiksel bir süreçtir. Yani filmin bir katmanının kalınlığı sadece etkin bir değer olarak görülebilir. Yine de,

film kalınlıklarının oluşturulması daha fazla malzemenin büyütülmesi ile daha iyi sonuç alma olasılığını artıracaktır. Bu çalışmada ultraince olan filmlerin tabakalarının morfolojisi tam oluşmasa da XRD, XRR, Hall ve mıknatıslanma ölçümlerinin birbiriyle uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. Çok katmanlı ultra ince metallik Co/Pd filmlerin Hall özdirenci filmin kalınlığı (t) ile orantılıdır (bkz. Eşitlik 4.4). Dolayısıyla filmlerin örgü parametreleri ve kalınlıkları XRD ve XRR ölçümleri tekrarlandı ve doğrulukları belirlendi.

Bu tez çalışması için çok katmanlı ultra ince DMA lı Co/Pd filmler farklı kalınlıkta 3 seri (t_{Pd} : 1.2 nm, 1.5 nm ve 1.8nm için) dc magnetron sıçratma tekniği ile büyütüldü. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin katman kalınlıkları bilgisayar kontrollü ‘shutter’ ile her bir kaynağın sıçratma hızı ve süresi kontrol edildi. Her seri de Co kalınlığı 0.2 nm - 0.55 nm arasında 0.05 nm basamaklarla (8 adet) büyütüldü. XRD ölçümleri ile örneklerin örgü parametreleri ve kristal yapısı hakkında bilgi edinildi. Tüm Co/Pd filmler aynı malzemelerden oluştuklarından XRD ölçümleri için 3 örnek seçildi: en ince $t_{Co} = 0.2$ nm, sıcaklığa bağlı polarite değişimi gözlemlenen $t_{Co} = 0.30$ nm ve en kalın $t_{Co} = 0.55$ nm.

Daha önce belirtildiği gibi çok katmanlı Co/Pd filmlerin kalınlıkları Hall hesaplamalarında önemli olduğundan XRD ve XRR verilerinden örneklerin toplam kalınlıkları ($Ta/[Pd/Co]_9$) hesaplandı ve bu değerler sıçratma için kullanılan kalibre edilmiş değerlere, %1 den daha düşük hata, yakın bulundu.

Magnetron sıçratma sisteminin kalibrasyonu ve filmlerin toplam kalınlıkları için kullanılan Bragg yasası eşitliği:

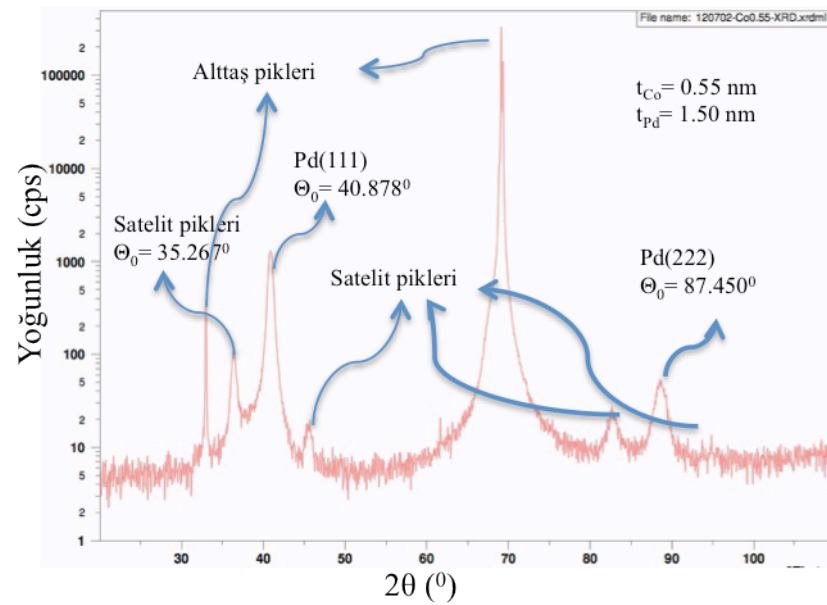
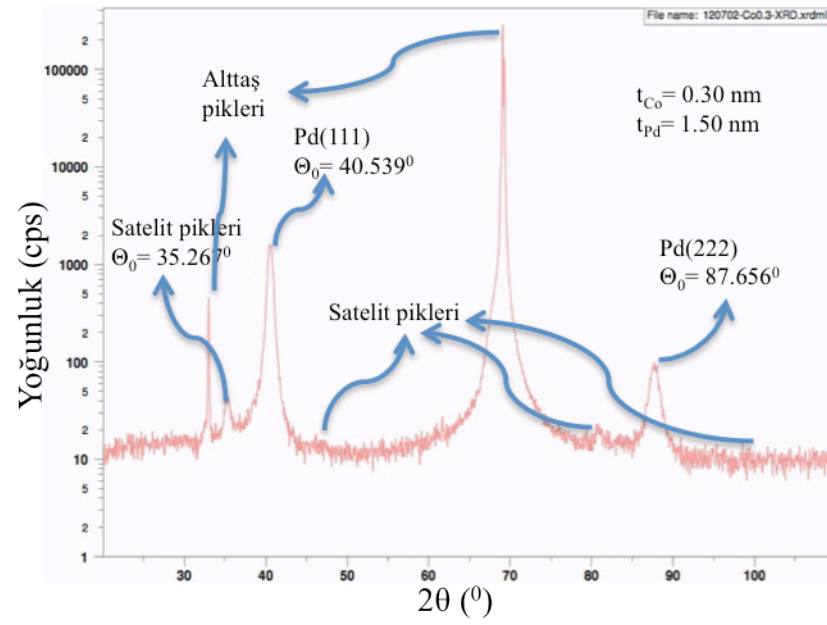
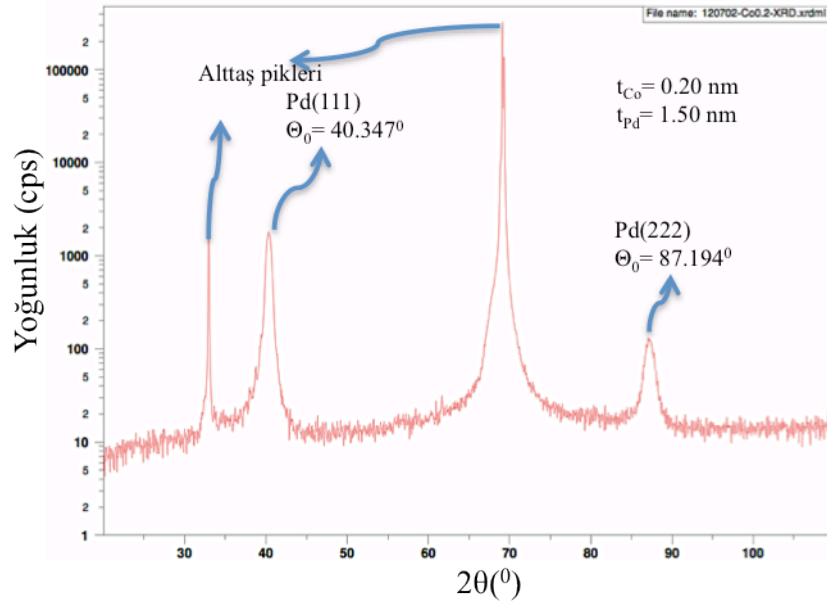
$$\frac{2\sin\theta_0}{\lambda} = \frac{1}{d} \quad (4.1)$$

($\bar{d}$: örgü düzlemlerinin ortalama atom aralığı, θ : gelen x-ışını demeti ile film yüzeyi arasındaki açıdır ve λ : x-ışınının dalga boyu) ve uydu (satellite) piklerinin Bragg yasasına uyarlanması [66]:

$$\frac{2\sin\theta_0}{\lambda} = \frac{1}{d} \pm \frac{n}{\Lambda} \quad (4.2)$$

(n: ana piklerin etrafındaki uydu pik sırasıdır, Λ : bir Co/Pd kalınlığıdır)

Çok katmanlı Co/Pd filmlerinden XRD ölçümleri için seçilen ($t_{Co} = 0.20$ nm (üstte), $t_{Co} = 0.30$ nm (ortada) ve $t_{Co} = 0.55$ nm (altta)) yapıcı girişim sonucunda yansıyan X-ışınının yoğunluğunun 2θ açısına bağlı değişimi şekil 4.2. de gösterilmiştir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin XRD ölçümleri sonucunda ortaya çıkan şekil 4.2. deki Bragg ana piklerinin Pd/Co (1 1 1) nin ortalama atom aralığıdır ve uydu piklerinin eşitlik 4.2'e göre modülasyon dalga boylarına (süperlatislerdeki modülasyonlara) karşılık geliyor.



Şekil 4.2 $t_{Pd} = 1.5 \text{ nm}$ serisinin 0.2, 0.3 ve 0.55 nm Co filmlerinin XRD piklerinin gösterimi

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin XRD ölçümlerinden eşitlik 4.1'ten ortalama $\bar{d}$ hesaplandı ve 4.2'den ise bir (Pd/Co) katmanın kalınlığı Λ' hesaplandı. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin toplam kalınlığı ise: $t = 5 + 9 (t_{Co} + t_{Pd})$, eşitliği ile hesaplandı. Eşitlikte Tantalum kalınlığı 5 nm dir, t_{Pd} : Palladium katmanının kalınlığı ve t_{Co} : Kobalt katmanının kalınlığıdır ve Co/Pd tekrarlaması sayısı 9 dur. Co/Pd filmlerin toplam kalınlığı ($t_{Pd}=1.5$ nm için) 5nm Ta kalınlığı dahil edildiğinde 19.9 nm - 23.89nm arasında değişen değerdedir (bkz Tablo 4.1.).

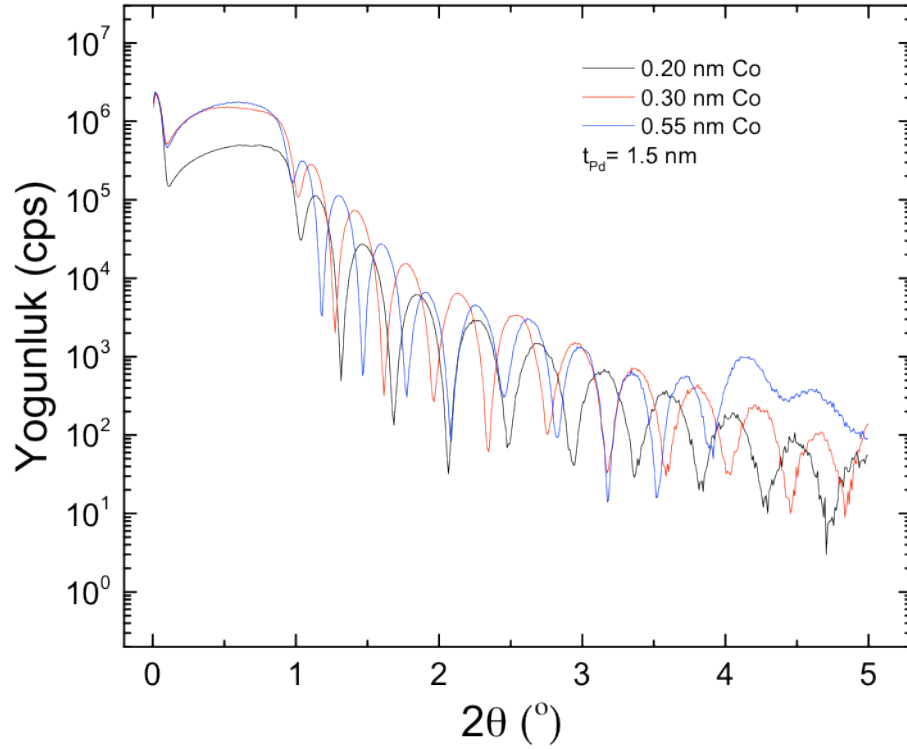
Tablo 4.1 Bragg ana piklerine göre hesaplanan filmlerin kalınlıkları ve kalibrasyon karşılaştırması

t_{Co} (nm)	t_{Pd} (nm)	t_{top} (nm) sonra	t_{top} (nm) kalibrasyon	Λ (nm)
0.20	1.50	19.9	20.3	1.66
0.30	1.50	21.04	21.2	1.77
0.55	1.50	23.89	23.45	2

Tablo 4.2 En ince orta ve en kalın örneklerin, Bragg ana pikleri ile uydu (satellite) piklerinin 2θ açı konumları

t_{Co} (nm)	t_{Pd} (nm)	Pikler (2θ)	Satelit pikleri
0.20	1.50	40.347 ⁰ 87.194 ⁰	----- görünmüyor
0.30	1.50	40.539 ⁰ 87.656 ⁰	35.267 ⁰ 46.2 ⁰
0.55	1.50	40.878 ⁰ 88.450 ⁰	36.386 ⁰ 45.713 ⁰ 82.619 ⁰

XRR ölçümlerinde gelen X-ışınları θ_c 'den büyük açılarda ($\theta > \theta_c$) filmin içine nüfuz eder. θ_c 'den büyük açılar için yansıma metal filmin üst ve alt yüzeylerinde gerçekleşir. Şekil 4.2.'de en kalın filmin (0.55 nm Co) X-ışın şiddetinin açığa bağlı değişimi gösterilmiştir. Bu ölçümlerin sonuçlarından fit programları ile malzemenin katman kalınlıkları, saflıkları ve pürüzlükleri belirlenir.



Şekil 4.3. Seçilen üç örnek için tipik bir XRR detektörü tarafından kaydedilen yansıyan X-ışın şiddetinin açığa bağlı değişiminin gösterimi

Çok katmanlı Co/Pd filmin düzlemine dik ve dışa (out of plane) doğru büyümenin örgü parametreleri ve yönelim sonuçları (bkz. Şekil 4.2) kübik fcc dir. Bragg ana pikleri de Pd/Co (1 1 1)'dir. Filmlerin etkin örgü aralığı (a) artan Co katman kalınlığı ile ters orantılı olarak azalmaktadır.

Tablo 4.3 Co/Pd 0.20 nm ve 0.55 nm Co kalınlıktaki Co/Pd filmlerinin, kübik a ve katman aralığı (d) değişimi

t_{Co} (nm)	t_{Pd} (nm)	a (Å)	d (Å)
0.20	1.50	3,8722	2,236
0.30	1.50	3,8552	2,226
0.55	1.50	3,8262	2,209

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin Tablo 4.3 deki verileri (111) ve (222) pikleri için 1,5418 Å dalga boyunda X-ışını için hesaplandı. Ultra ince Co katmanının daha

kalın olan Pd katmanı üzerinde adacıklar (grains) şeklindeki düzlem içi (in-plane) yönelimleri düzensiz olduğu görülmektedir. Mevcut XRD sistemi ile in-plane ölçümleri yapılamamıştır.

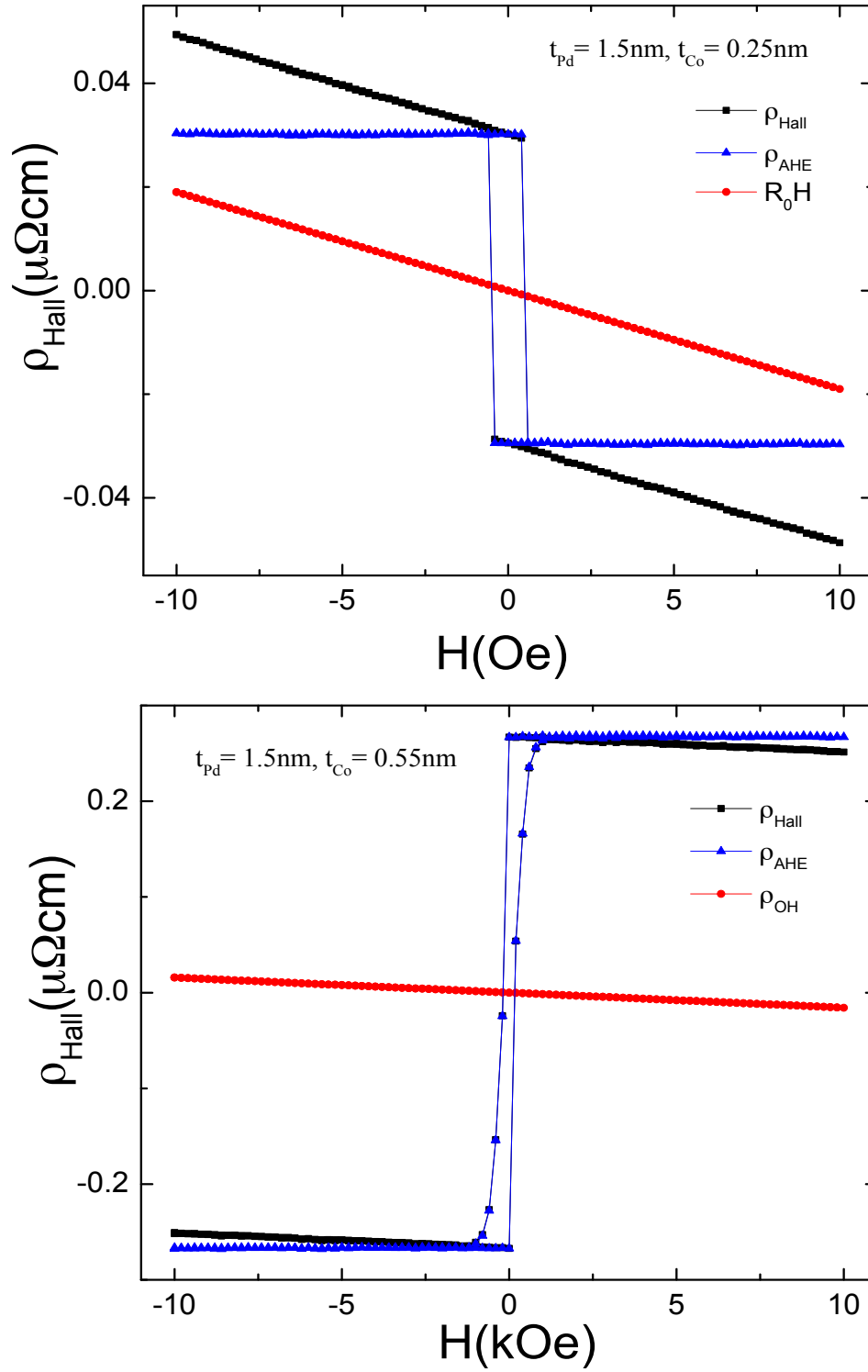
Çok katmanlı Co/Pd filmlerin XRD sonuçlarına göre örgü aralıkları (lattice spacings) büyüme yönünde mevcut yayınlardakilerle [84] çok iyi uyum göstermektedir: $t_{Pd} = 1.5$ nm için $t_{Co} = 0.2$ nm için 0,2236 nm, $t_{Co} = 0.3$ nm için 0, 2226 nm ve $t_{Co} = 0.55$ nm için 0,2209 nm.

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin XRD ölçümleri sonucunda; i) çok katmanlı Co/Pd filmin Co katman kalınlığının azalmasıyla, Bragg ana pikleri Pd/Co (1 1 1) nin ortalama atom aralığı d' 'nin etrafında modülasyon piklerinde oluşmaktadır. Bu uydu (satellite) pikleri en kalın örnekte ($t_{Co} = 0.55$ nm) (bkz. Şekil 4.2) belirgin olarak görülmektedir. Geçiş kalınlıktaki ($t_{Co} = 0.30$ nm) örnekte XRD sonuçlarında benzeri durum vardır. Yani film katmanının yüzeyine dik doğrultuda kristalleşmenin iyi olduğunu göstermektedir.

Çok katmanlı Co/Pd filmlerdeki FM Co katmanı inceldikçe uydu (satellite) pikleri kaybolmaktadır veya Bragg ana piklerinden uzaklaşmaktadır. Yani uydu (satellite) piklerini görmek zordur ve ince filmde kristal yapının düzenliliğinin kaybolduğunu düşünebiliriz. Başka bir deyişle Co atomları Pd katmanının üzerinde adacıklar şeklinde konumlandığını varsayabiliriz. Bunun sebebini Co/Pd katmanlarının alaşım özelliği kazanması ya da bileşenlerinin birinde bir yapısal değişim nedeniyle olabilir [85].

Başka bir ifadeyle Co/Pd filmin kalın olan örnekte (0.55 nm Co), x-ışını pik bağıl şiddeti daha yoğun olduğu görülmektedir. Geçiş örnekte (0.30 nm Co) de kalın örneğe benzer pikler görülmektedir ve yüzeye dik iyi bir kristalleşme göstergesidir. En ince örnekte ise ana pikten uzak geniş çizgi üzerinde olduğu düşünülmektedir, uydu (satellite) pikler iyi görüntü vermiyor.

4.3 Hall Etkisi Ölçüm Sonuçları ve Tartışmalar

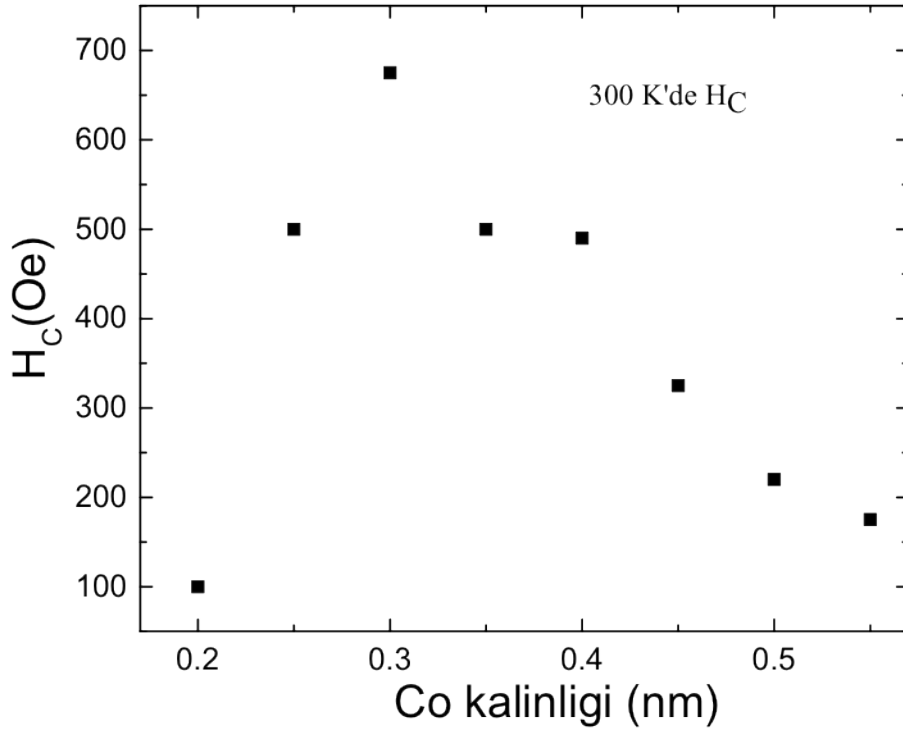


Şekil 4.4 Hall öz direnç, klasik Hall ve AHE bileşenlerinin gösterimi. Üstteki ince film $t_{\text{Co}} = 0.25\text{ nm}$, alttaki ise $t_{\text{Co}} = 0.55\text{ nm}$ içindir.

Hall etkisi ölçümleri $V_y(H)$ 'nin sıcaklığa bağlı değişimidir. Eşitlik 4.4 ile ρ_H hesaplandı. Şekil 4.4 de ölçülen Hall öz direnç (ρ_H) değerinden klasik Hall ($\rho_{OH}=R_0H$) etkisinin ve AHE ($\rho_{AHE}=\mu_0 R_S M$) (bkz. eşitlik 2.5) bileşenlerinin çıkarılmasının gösterimidir. İleriki bölümlerde incelenen direnç, öz direnç ve iletkenlik değerleri şekil 4.4 de gösterilen işlemler sonunda elde edilmiştir.

4.3.1 Koersif Alan (H_C) Değişimi

Ultra ince çok katmanlı Co/Pd filmin yüzeylerinde ve ara yüzeylerindeki etkileşimden dolayı tek eksenli (uniaxial) manyetik anizotropi değerinin ilgili hacimsel (bulk) malzemelere [3, 15, 87] göre çok daha güçlü olduğu çeşitli yayınlarda görülmüştür. Spintronik uygulamalar için özellikle yumuşak katmanın (softlayer) H_C değeri düşük olması gerekirken sert (hard layer) katmanın ise yüksek olması gerektiği bilinmektedir.



Şekil 4.5 $t_{Pd}=1.5$ nm için Co kalınlığına bağlı koersif alan değişiminin gösterimi

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin düşük sıcaklık (15 - 330K arasında ve 20K aralıklarla) Hall gerilimi (V_y) histeri eğrileri ölçüldü. Filmlerin koersif alan (H_C) değerleri sıcaklık ile ters orantılı olarak belirgin değiştiği görülmüştür. Ancak Co/Pd filmlerin sıcaklığa bağlı koersif alan değişimi bu tezin doğrudan konusu olmadığından burada gösterilmemiştir.

Yine de FM Co kalınlığına bağlı AHE histerilerinden koersif alan değerleri bu bölümde tartışıldı. Co/Pd filmlerin koersif alan değerleri şekil 4.4. de görüldüğü gibi $t_{Co} = 0.20 - 0.30$ nm Co aralığında 100 Oe den 680 Oe çıkmaktadır ve tekrar kalınlık arttıkça 180 Oe'e düşmektedir. H_C değerinin artmasının ve azalmasının, Pd/Co filmlerin ara yüzeyindeki (interface) yapısal bozuklukların Co katman kalınlığının Pd katman kalınlığına bağlı değişimine atfedilebilir [37]. Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin ferromanyetik Co kalınlığı 0.55 nm den 0.30 nm ye azalırken H_C değeri ise ters orantılı olarak artmaktadır ve bu değerler mevcut çalışmalarla [16] örtüşmektedir.

Kim et al. [48], çok katmanlı Co/Pd filmlerle ilgili çalışmalarında manyetik olmayan Pd katman sayısına bağlı (oda sıcaklığında) H_C değerinin inişli çıkışlı olduğunu; 4-5 Pd katman sayısı aralığında maksimum, ancak 4 Pd katman sayısı altında düştüğünü ve bunun sebebinin düzlem içi (in-plane) anizotropinin baskın olmasından kaynaklandığını ve yine 5 Pd katman sayısı üstünde ara yüzey etkisinin azalması nedeniyle tekrar H_C değerinin düştüğünü iddia etmiştir.

Lee et al. [37], Hall etkisi ölçümü ile elde ettiği sonuçlarda, çok katmanlı ultra ince $\{Co^{0.2nm}/Pd^{1.1nm}\}_n$ filmlerin tekrarlama $n = 10, 15, 20$ ve 25 sayılı (oda sıcaklığında) H_C değerinin düzgün artmadığını ve inişli çıkışlı (700-1900 Oe arasında) değiştiğini gözlemlemiştir.

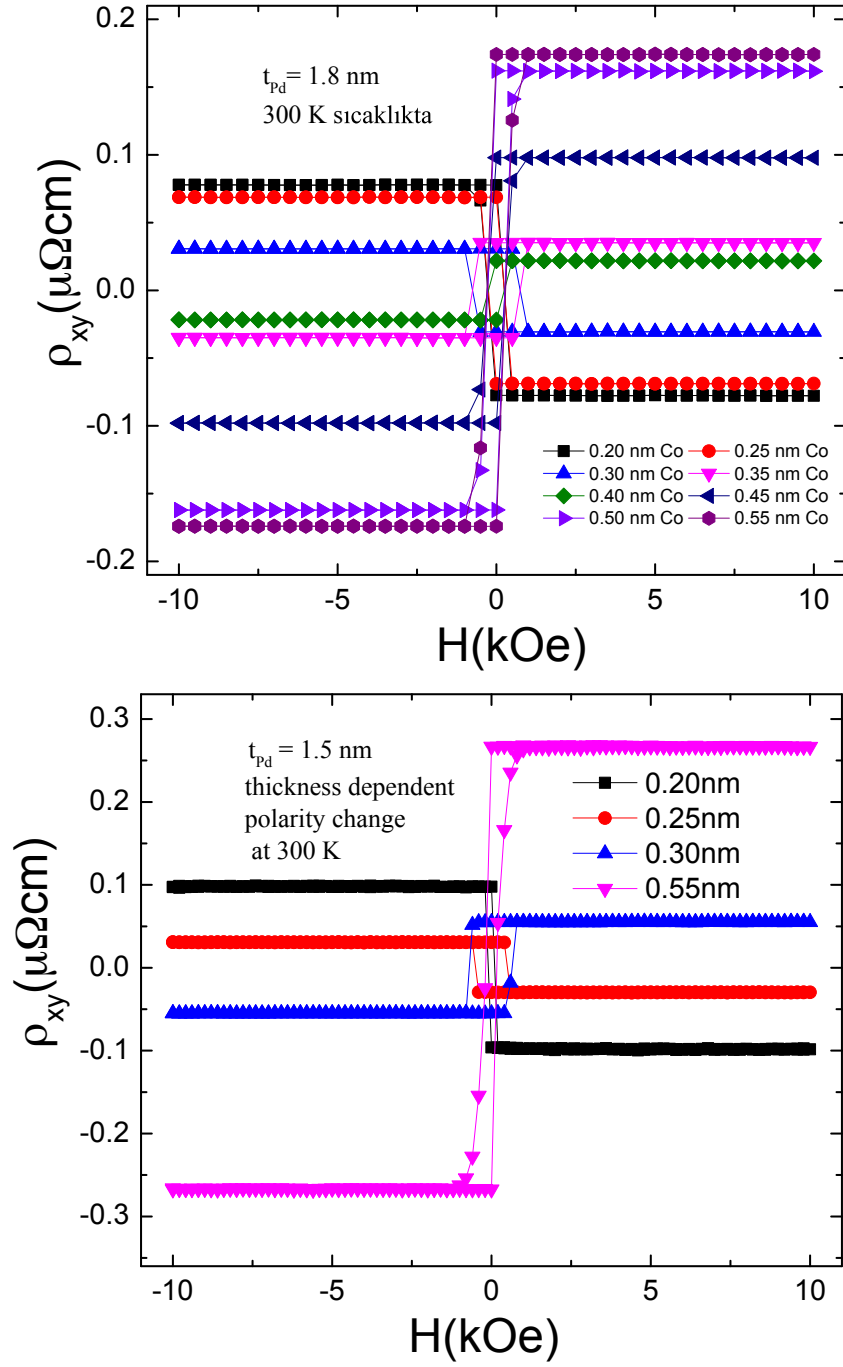
Başka bir çalışmada [87], ultra ince çok katmanlı $\{Co^{1.5-6.5nm}/Pd^{30nm}\}_n$ ($n = 2-30$) filmlerin büyütülme şartlarını da değiştirerek (Ar gaz basıncı, sıçratma akımı ve sıçratma gücü gibi) büyütülmüş ve H_C değerlerinin 50-300 Oe arasında yine inişli çıkışlı olduğu gözlemlemiştir.

Daha yakın bir çalışmada [51] ultra ince çok katmanlı Co/Pd filmlerin yine katman sayısına n (4-13 arasında tekrarlama sayısı) ve zamana bağlı olarak Hall etkisi ölçümlerinden elde ettikleri sonuçlara göre n tekrarlama sayısına bağlı H_C değerinin (oda sıcaklığında) lineer arttığını gözlemlemişlerdir. H_C 'nin bu davranışını tek eksenli (uniaxial) anizotropideki artışa veya Co-Pd ara yüzeyindeki domen duvarlarının bir yön (domain wall pinning) merkezlerinin oluşumuna bağlamışlardır.

Mevcut yayınlar incelendiğinde katman sayısını değiştirerek H_C değerinin tekrarlama sayısına bağlı bir kaç yüz Oe [88] arttığı görülmektedir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin Co kalınlığına bağlı çalışmalarda ise filmin incilmesi ile H_C [16] değerinin arttığı görülmüştür ve bizim sonuçlar ile örtüşmektedir.

4.3.2 Kobalt Kalınlığına Bağlı AHE Polarite Değişimi

Bu tez çalışmasında gözlemlenen en güzel fiziksel davranışlar; çok katmanlı Co/Pd filmlerin Co kalınlığına ve sıcaklığa bağlı AHE polarite değişimidir. Şekil 4.6'de 300 K'de Bir kaç çok katmanlı Co/Pd filmlerin Co kalınlığına bağlı polarite değişimi gösterilmiştir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin her üç seride ($t_{Pd} = 1.2, 1.5$ ve 1.8 nm) Co kalınlığına bağlı AHE polarite değişimi gözlemlenmiştir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin $t_{Pd} = 1.8$ nm serisinin $t_{Co} = 0.2 - 0.3$ nm (ince) filmlerin histerileri negatiftir ve diğer kalınlıkların ise (0.35-0.55 nm) ince filmlere göre zıt yani bilinen hacimsel (bulk) Kobalt yönündedir. Co/Pd filmlerin $t_{Pd} = 1.2$ nm için $t_{Co} = 0.2$ nm negatiftir ve diğer kalınlıklar pozitiftir ve $t_{Pd} = 1.5$ nm için $t_{Co} = 0.2-0.25$ nm negatiftir ve diğer kalınlıklar pozitiftir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin bu ilginç davranışı, Co kalınlığına ($t_{Pd} = s_{bt}$) bağlı, mevcut yayınlarda yoktur. Bizim örnekler dik manyetik anizotropili olduklarından histerileri kareseldir. Dahası bizim filmler tekrarlanabilir deney sonuçlarıdır. Çok katmanlı Co/Pd filmler büyütülürken FM Co kalınlığı sistematik yapılmıştır. Yani Co/Pd filmlerinin Co kalınlığı 0.20 - 0.55 nm aralığında ve 0.05 nm basamaklarla büyütülmüştür.



Şekil 4.6 Çok katmanlı Co/Pd filmlerin $t_{\text{Pd}}=1.8 \text{ nm}$ (üst) ve 1.5 nm (alt) serisinin 300 K sıcaklıkta Co kalınlığına bağlı AHE polarite değişiminin gösterimi

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin Hall histeri polarite değişimini gözlemleyen yayınlar incelendiğinde; Kim et al. [48], oda sıcaklığında büyütülen çok katmanlı Co/Pd filmlerin (1 mono katman Co için) Pd'ın 4-5 mono katman arasında polarite değişimi gözlemlemişlerdir. Ancak Kim et al. çalışmalarında 2 mono

katman Co için Pd katman sayısına bağlı polarite değişimi görülmemiştir. Kim et al. polarite değişimi sebebinin, Pd katman kalınlığına bağlı Fermi seviyesinde iletkenliği sağlayan ana taşıyıcıların değişimine bağlamışlardır.

Diğer bir çalışmada, Aoki et al. [50], çok katmanlı Co/Pd filmler ile sadece 3 örnek ($t_{Co} = 2, 3$ ve $16 \text{ \AA}$ ve $t_{Pd} = 20 \text{ \AA}$) ile yaptıkları deneylerde AHE katsayısının (R_S) 4.2 K ' de işaret değiştirdiğini ve sebebinin Co/Pd filmin ara yüzey alışı etkisine ve düzlem dışı (out of plane) anizotropinin düzlem içi (in plane) anizotropiye dönüşümüne bağlamışlardır. Ancak Co/Pd filmlerin Hall histerileri net karesel özellik göstermemektedir.

Daha yakın bir çalışmada Rosenblatt et al. [51], ultra ince çok katmanlı Co/Pd filmlerin AHE'nin katman sayısına ve zamana bağlı değişimini gözlemlemişlerdir. Ancak çok katmanlı Co/Pd filmlerin bir kaç gün sonra kalın örneklerin AHE polaritelerinin incelerle aynı yöne kendiliğinden dönmüştür. Rosenblatt et al., AHE polarite değişiminin yüzey saçılmadan kaynaklandığını ve zamana bağlı olarak 'aging' diye adlandırılan sebepten polarite değişimini açıklamışlardır.

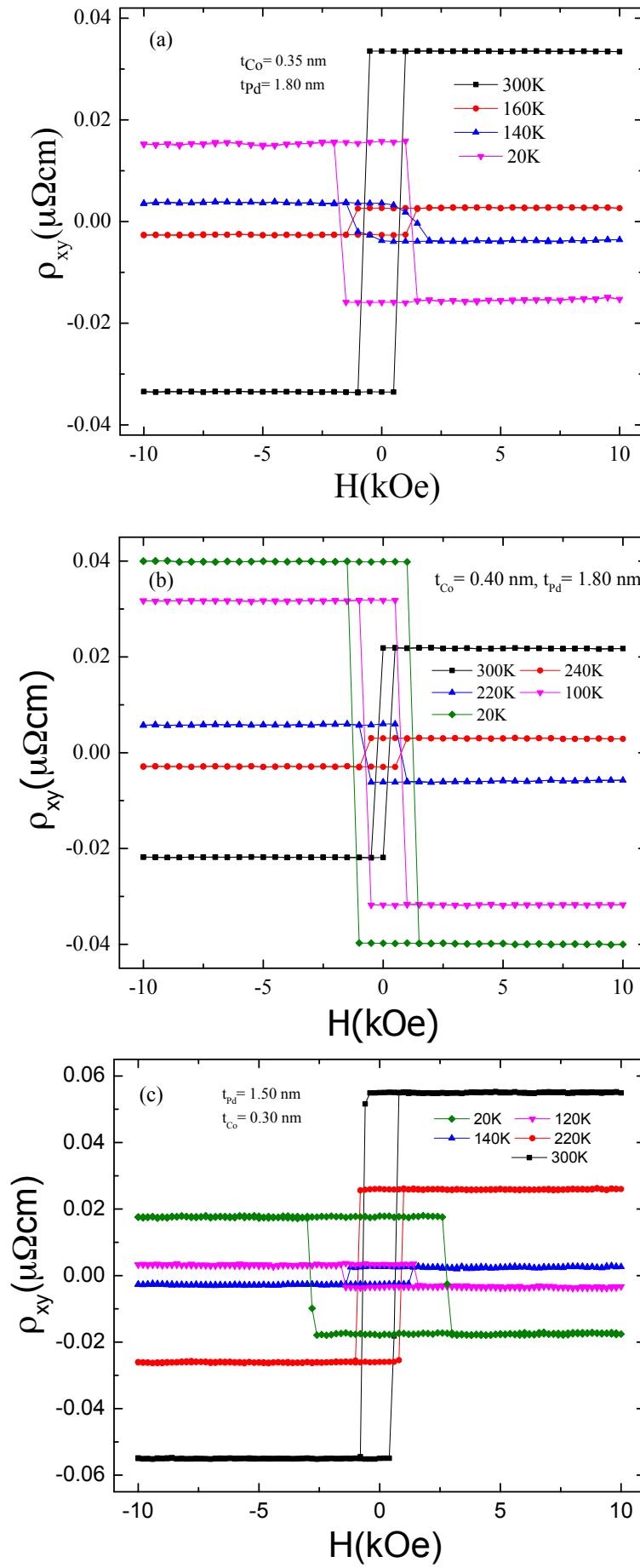
Guo et al. [52], çok katmanlı ultraince $\{Co^{0.3nm}/Pd^{0.5nm}\}_n$ filmlerin katman sayısını ($n = 6, 10, 20, 40, 60$ ve 80) değiştirerek AHE polarite değişimini gözlemlediklerini ifade etmişlerdir. Guo et al. polarite değişimi sebebinin (Rosenblatt et al. açıklaması ile benzer) Co/Pd filmlerin ara yüzeyinden ve yüzeyden kaynaklanan saçılmaların birbirine zıt işaretli olan AHE den kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Bizim çok katmanlı Co/Pd örneklerimizde ise (3 seri 8'er adet) Pd katman kalınlığını sabit tutarak ($t_{Pd}=1.2 \text{ nm}, 1.5 \text{ nm}$ ve 1.8 nm) ve FM Co katman kalınlığını değiştirerek gerçekleştirdiğimiz deneylerde üç seride de AHE polarite değişimi görülmüştür. Şimdiye kadar yapılan yayınlar dikkate alındığında bu davranışın spekülatif açıklamalardan biri Co/Pd filmlerin katmanları arasındaki ara yüzey (interface) deki saçılma etkisinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Bizim örneklerde polarite değişimi için geçiş kalınlığının 0.35 nm Co ($t_{Pd} = 1.8$ nm), 0.30 nm Co ($t_{Pd} = 1.5$ nm) ve 0.25 nm Co ($t_{Pd} = 1.2$ nm) olduğu dikkate alınırsa yaklaşık bir mono layer Co katman kalınlıktan sonra bulk Co karakteri baskın olduğu, bu da yaklaşık $t_{Co} \geq 0.35$ nm için filmlerin aynı davranış gösterdiği görülmektedir. Bizim örneklerimizde ise kalınlığa ve sıcaklığa bağlı polarite değişiminin kritik Co katman kalınlığının Pd katman kalınlığına oranının yaklaşık 0.2 ($\frac{t_{Co}}{t_{Pd}} = \frac{0.30}{1.5} \approx \frac{0.35}{1.8} \approx 0.2$) olduğu görülmektedir.

4.3.3 Sıcaklığa Bağlı AHE Polarite Değişimi

Bu çalışmada, çok katmanlı Co/Pd filmlerin düşük-sıcaklık (15 - 330 K aralığında 20K basamaklarla) manyeto transport (V_y) ölçümleri bir kapalı döngü helyum kryostat (Oxford Instruments) ile yaklaşık 500 μ A sabit akım uygulanarak filmin düzlemine ± 10 kOe dik manyetik alanda (bkz. şekil 4.7) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7 Co/Pd filmlerin AHE öz direncinin sıcaklığa bağlı (a) $t_{Co} = 0.35$ nm, (b) $t_{Co} = 0.40$ nm ve (c) Co(0.30 nm)/Pd(1.5 nm) nin polarite değişimi gösterimi

Şekil 4.7 da gösterildiği gibi (a) $t_{Pd}=1.8$ nm serisinin 0.35 nm Co (140 - 160 K), 0.40 nm Co (220-240 K) ve (c) $t_{Pd}=1.5$ nm serisinin 0.30 nm Co (120-140 K) kalınlıktaki Co/Pd filmlerin sıcaklığa bağlı AHE polaritesi değişmektedir. Bu örneklerin düşük sıcaklık H_C değerleri bilinenden farklı davranış göstermektedir. Yani düşük sıcaklıktan başlayarak ρ_{xy} değeri sıcaklık ile ters orantılı azalarak belirli bir sıcaklık arasında kayboluyor ve sonra yeniden zıt yönde histeri (artan ρ_{xy}) oluşuyor.

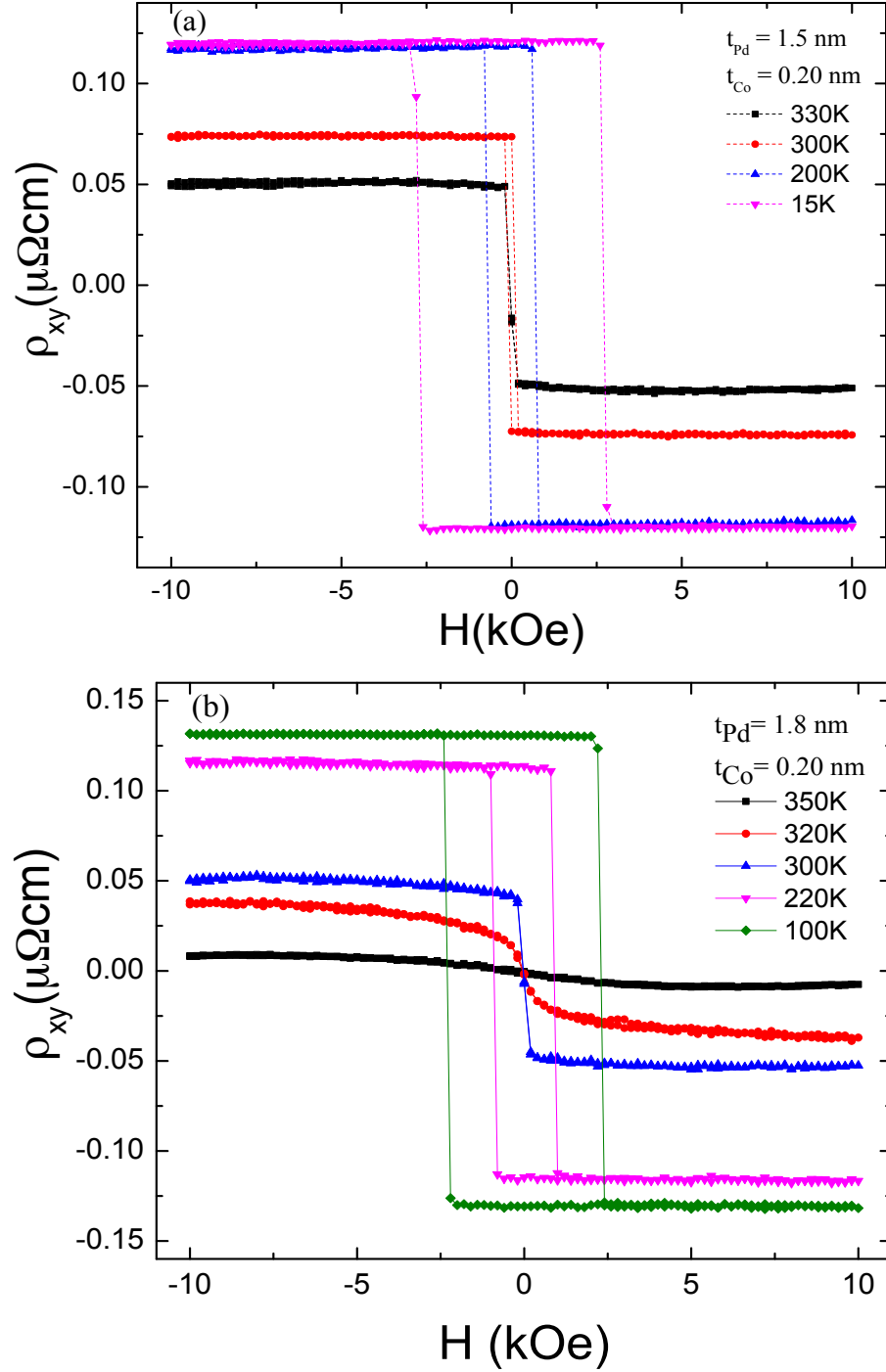
Çok katmanlı Co/Pd filmlerin sıcaklığa bağlı AHE polarite değişimi ile ilgili mevcut yayınlar incelendiğinde derinlemesine bilgilerin mevcut olmadığı görülmektedir. En yakın yayında Guo et al. [52] çok katmanlı CO/Pd filmlerin sıcaklığa bağlı polarite değişimini basitçe; sıcaklık artışıyla iletken yüklerin ortalama serbest yol anlamına gelen ‘mean free path’ın daraldığını ve buna bağlı olarak polarite değişiminin gerçekleştiğini iddia etmiştir. Yani Co/Pd filmlerin çok katman tekrarlama sayısı $n \leq 20$ için (ince filmler) yüzey saçılmanın AHE’nin işaretinin hacimsel (bulk) malzemedeki AHE ye göre zıt (yani negatif) olduğunu ve birbirine zıt etki gösterdikleri çıkarımını yapmışlardır.

Bizim çok katmanlı Co/Pd örneklerde Co katman kalınlığı sistematik azaltıldığından/artırıldığından yaklaşık 1 ile 3 tek katman Co sayısına karşılık gelen kalınlığın arayüzey/yüzey saçılmasının baskın olması beklenir. Ancak Guo et al. yaptıkları yorumlarda sıcaklığa bağlı olarak AHE değişimi iddialarının spekülatif olduğu görülmektedir.

Başka bir çalışmada farklı bir ferromanyetik malzeme üzerinde (metalik FM $SrRuO_3$, $T_C \approx 160$ K) [91, 92] yapılan ayrıntılı deneysel ve teorik karşılaştırmalar sonucunda Fermi enerji seviyesindeki bant geçişleri ve monoton olmayan sıcaklığa bağlı davranışın bu malzemenin AHE işaret değişikliğine sebep gösterilmiştir.

Bizim çok katmanlı Co/Pd filmlerin en ince olan 0.20 nm Co ($t_{Pd} = 1.8$ nm ve $t_{Pd} = 1.5$ nm) örnekte artan sıcaklıkla birlikte AHE histerisi kaybolmaktadır. Yani filmlerin artan sıcaklık ile H_C değeri azalarak sıfır oluyor. FM ultraince çok

katmanlı Co/Pd filmlerin FM özelliğinin kaybolduğu Curie (T_C) sıcaklığı 280-300K (ve 320-330K) arasında olduğu gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4.8). Bu T_C değerleri referans 22 dekilerle uyushmaktadır. Diğer filmlerin sıcaklığa bağı Hall ölçümlerinde T_C değerleri görölmemiştir. Bu T_C değerleri ile Referans 22 deki sonuçlar karşılaştırıldığında bizim filmlerin en ince Co/Pd'un ara yüzeyinin alaşım özelliği gösterdiği sonucu çıkarılabilir. Diğer filmlerin, hacimsel (bulk) Co'ın T_C değerinin 1300 K üzeri olduğundan, T_C değerlerinin daha yüksek olduğu düşünebilir. Düşük sıcaklık mıknatıslanma histerileri AGM ve Quantum Design PPMS ile alınmıştır ve polarite değışikleri görölmemiştir (burada gösterilmemiştir).



Şekil 4.8 (a) $t_{\text{Co}} = 0.20$ nm, $t_{\text{Pd}} = 1.8$ nm ve (b) $t_{\text{Co}} = 0.20$ nm, $t_{\text{Pd}} = 1.5$ nm Co/Pd filmlerinin T_C değerlerinin gösterimi

Bizim verilerimiz ve mevcut yayınlar incelendiğinde sıcaklığa bağlı Co/Pd filmlerin AHE öz direnç/iletkenlik polarite değişimi açıklanırken kullanılan ortak temel parametreler şunlardır: (i) düşük T_C [89], manyetik faz değişimi, sıcaklık artışı ile film ferromanyetik özelliğini kaybeder ve paramanyetik olur, (ii) Fermi enerji düzeyi değişimi; ana yük taşıyıcılarının ‘hole’ dan elektron olarak değişir veya tam

tersi ve (iii) baskın olan AHE mekanizmasının sıcaklık ile birlikte değişir örneğin öz (intrinsic)/yana sıçrama (side jump)' ten 'skew' saçılmaya değişir [90]. Bizim çok katmanlı Co/Pd örneklerimizde ise kalınlığa ve sıcaklığa bağlı polarite değişiminin kritik Co katman kalınlığının Pd kalınlığına oranının yaklaşık 0.2 ($\frac{t_{Co}}{t_{Pd}} = \frac{0.30}{1.5} \approx \frac{0.35}{1.8} \approx 0.2$) olduğu görülmektedir.

4.4 Direnç, Özdirenç ve İletkenlik Değerleri

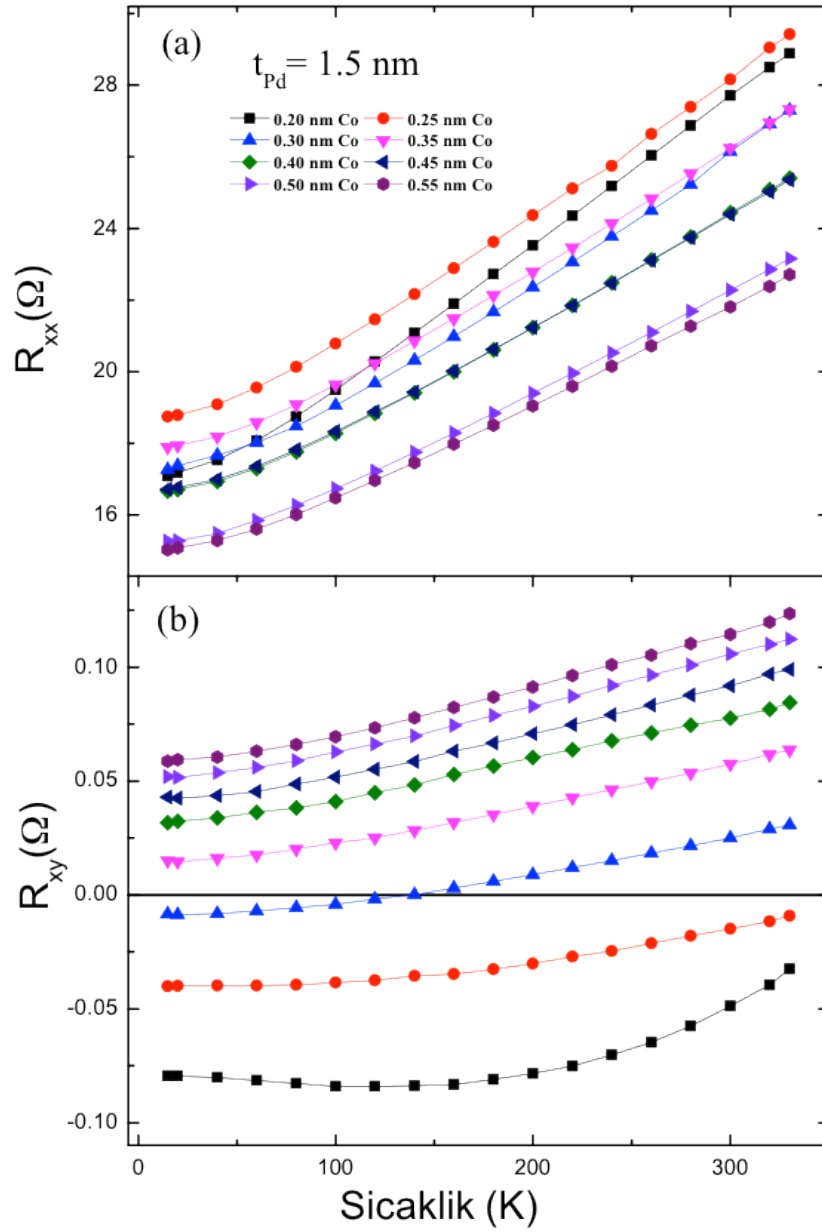
Bu bölümde DMA lı çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmlerin ham verileri (V_x ve V_y) kullanılarak direnç (R_{xx} ve R_{xy}), özdirenç (ρ_{xy} ve ρ_{xx}) ve iletkenlikler (σ_{xy} ve σ_{xx}) sırasıyla tartışılacaktır.

4.4.1 Enine (R_{xy}) ve Boyuna (R_{xx}) Direnç

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin Hall ölçüm verilerinin değerlendirilmesini kolaylaştırmak için filmlere sabit akım ($I_x \approx 500 \mu A$) uygulandı. Bu durumda Hall deneylerinin değişkenleri sadece filmin kalınlığı t ile okunan V_x ve V_y değerleridir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin enine ($R_{xy} = V_{xy}/I_x$) ve boyuna ($R_{xx} = V_x/I_x$) dirençleri ham verilerden hesaplandı.

Şekil 4.9 (a) ve (b)'de çok katmanlı Co/Pd filmlerin R_{xy} ve R_{xx} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir. Bilindiği gibi tek [67] ve çok katmanlı [86] ince metal filmlerin, R_{xx} değeri filmin incelmesi ve sıcaklık ile artar. Bu davranış AHE özdirenç (ρ_{xy}) değerlerinde de görülmektedir. Ancak çok katmanlı Co/Pd ince filmlerin ($t_{Co} = 0.20$ nm ve 0.25 nm) bilinenin dışında sıcaklık azalmasına rağmen R_{xy} nin mutlak değeri artmaktadır. Yine gözlemlenen ilginç davranışlardan biride geçiş kalınlıktaki çok katmanlı Co/Pd filmin (0.30 nm Co) R_{xy} 'nin mutlak değerinin aynı ince filmlerde olduğu (en düşük sıcaklıktan başlayarak) gibi sıcaklık artışı ile azalıyor ve $120-140K$ arasında bir şekilde polaritesi değişiyor ve artı yönde sıcaklık ile monoton artış gösteriyor. Kobalt katman kalınlığının $t_{Co} > 0.30$ nm üzerindeki çok

katmanlı Co/Pd filmler ise klasik davranış gösteriyor. Yani sıcaklık ile birlikte direnç değeri monoton artış gösteriyor.



Şekil 4.9 Çok katmanlı Co/Pd filmlerin $t_{Pd}=1.5$ nm serisinin sıcaklığa bağlı enine ve boyuna direnç değerlerinin değişim eğrileri

4.4.2 Enine (ρ_{xy}) ve Boyuna (ρ_{xx}) Özdirenç

İnce metal filmlerin boyuna veya uzunlamasına özdirenç ifadesi

$$\rho_{xx} = \frac{V_x w}{I_x l} t \quad (4.3)$$

(V_x : boyuna okunan gerilimi, I_x : x-ekseni doğrultusundaki filme uygulanan sabit akımını, l : filmin x-ekseni doğrultusundaki uzunluğunu, w : filmin y-ekseni doğrultusundaki genişliğini, t : z-ekseni doğrultusunda filmin toplam metal kalınlığını ifade etmektedir) ile hesaplanır. Hesaplamalarda filmin düzlemine dik uygulanan manyetik alandan ρ_{xx} değerinin etkilenmediği görülmüştür. Yani manyeto direnç ($R_{xx}=V_x/I_x$) veya uzunlamasına özdirenç ($\rho_{xx} = R_{xx} \frac{w}{l} t$) değişiminin 0.5% den daha küçük olduğu görülmüştür.

Enine veya Hall özdirenç ifadesi

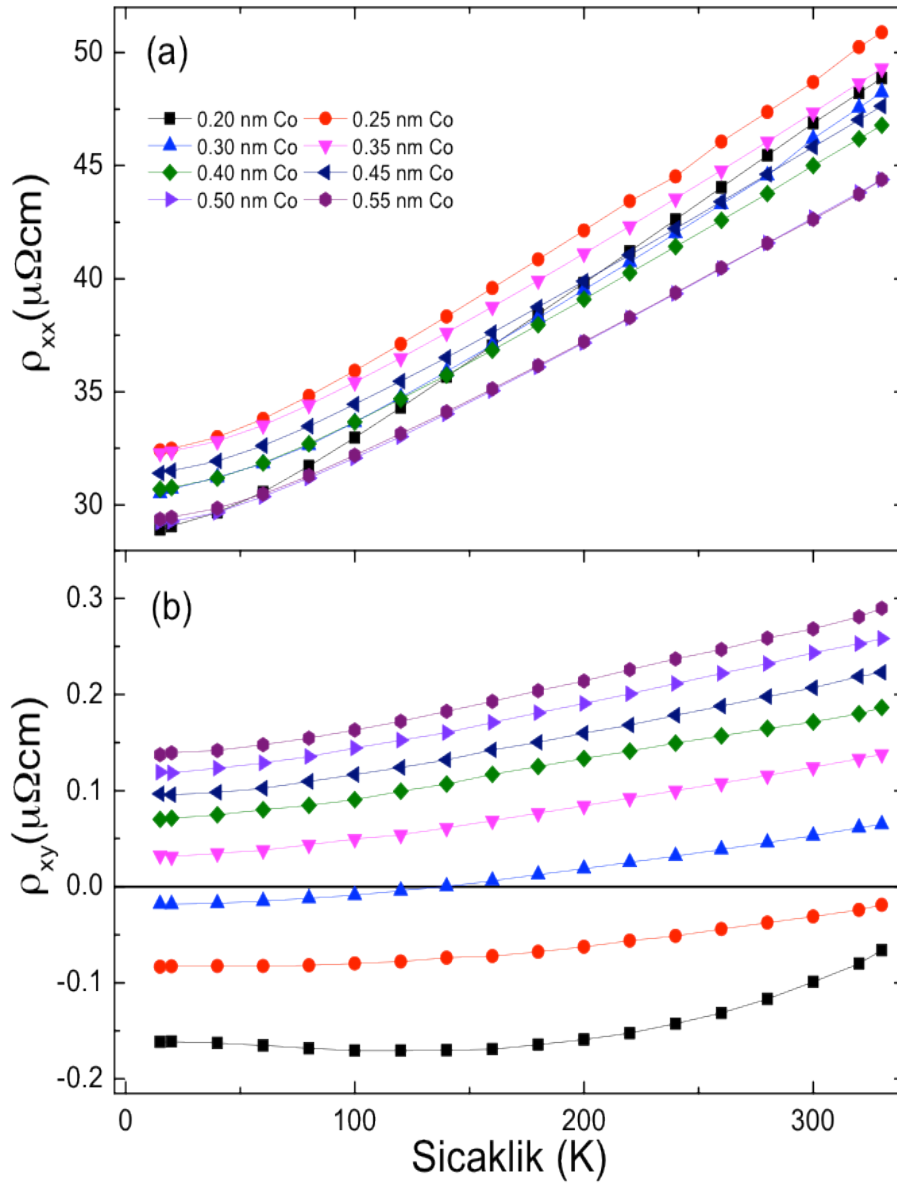
$$\rho_H = \frac{V_y}{I_x} t \quad (4.4)$$

(V_y : enine okunan Hall gerilimini, I_x : x-ekseni doğrultusundaki filme uygulanan sabit akımı, t : z-ekseni doğrultusunda filmin toplam metal kalınlığıdır) ile hesaplandı.

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin şekil 4.10 da ρ_{xy} ve ρ_{xx} 'nin sıcaklığa bağlı davranışı gösterilmiştir. Bilindiği gibi özdirenç değerleri, direnç değerleri benzeri davranış gösterir. Yani tek [67] ve çok katmanlı [86] ince metal filmlerin incelenmesi ve sıcaklık ile özdirenç değerleri artar. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin ρ_{xx} değerleri düşük sıcaklıkta atık (residual) özdirenç değerinden başlayarak 100 K'e kadar artışı yavaştır yani eğimi düşüktür. Sıcaklık değeri 100 - 330 K arasında çok katmanlı Co/Pd filmlerin özdirenç değerlerinin artışı bir önceki sıcaklık aralığına göre daha hızlıdır. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin boyuna özdirenç (ρ_{xx}) değerlerinin çok katmanlı [22] ve alaşımların [23, 24] yayınlanmış değerleri ile uyumlu olduğu

görülmektedir. Yani film incelidikçe [27] ve sıcaklığa bağlı boyuna öz direnç değeri artma eğilimindedir.

Benzer davranış çok katmanlı Co/Pd filmlerin enine öz direnç (ρ_{xy}) değerlerinin boyuna (ρ_{xx}) öz direnç değerleri gibi bilinen sıcaklık ve boyut etkisi göstermesi beklenir. Ancak çok katmanlı Co/Pd filmlerin en ince örnekte ($t_{Co} = 0.20$ nm), 15 K de negatif olan öz direnç mutlak değeri sıcaklık artışı ile 120-140K'e kadar çok az da olsa artış göstermektedir. Sonra sıcaklık artışı ile birlikte ters orantılı olarak mutlak değeri monoton azalmaktadır. Bir sonraki kalınlıktaki örnekte ise ($t_{Co} = 0.25$ nm), öz direnç değeri (15K'de) yine negatif değerden başlayarak sıcaklık artışı ile birlikte mutlak değeri lineer olarak azalmaktadır. Ara kalınlıktaki filmde ($t_{Co} = 0.30$ nm) ise öz direnç değeri (15K'de) yine negatif değerden başlayarak sıcaklık artışı ile birlikte mutlak değeri lineer olarak azalmaktadır ve sıfır değerden geçerek pozitif değerde lineer artışını sürdürmektedir. Tüm çok katmanlı Co/Pd filmlerin boyuna öz direnç değerleri enine öz direnç değerlerinden daha fazla etkilendiği görülmektedir.



Şekil 4.10 Çok katmanlı Co/Pd filmlerin $t_{Pd}=1.5$ nm serisinin enine ve boyuna öz direnç değerlerinin sıcaklık değişim grafiği

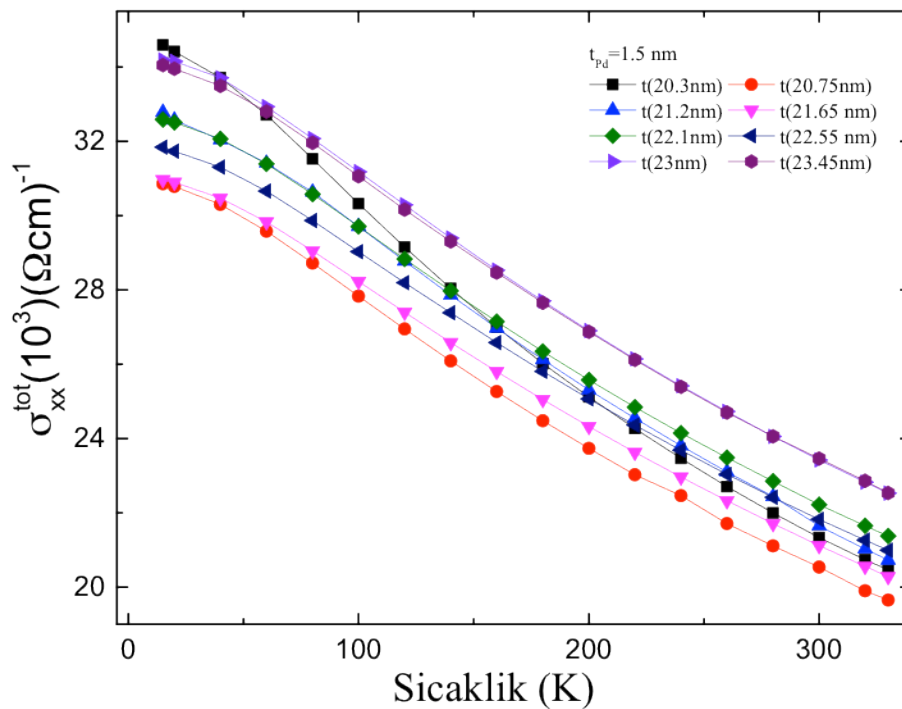
4.4.3 Enine (σ_{xy}) ve Boyuna (σ_{xx}) İletkenlik

Prof. Albert Perrier [26] larda FM Ni, Co ve Fe malzemelerinin sıcaklığa bağlı AHE incelemelerini yapmıştır. Perrier, FM malzemelerin öz direnç değerleri yerine sıcaklık değişiminden daha az etkilenen iletkenlik değerlerinin ilişkilendirmesini yapmıştır. Bunun için şu bağıntıları kullanmıştır: $\sigma_{xx} = 1/\rho_{xx}$ ve $\sigma_{xy} = \rho_{xy} / \rho_{xx}^2$ ($\rho_{xy} \ll \rho_{xx}$), burada ' σ_{xx} ' boyuna iletkenlik ve ' σ_{xy} ' enine iletkenlik değerleridir.

FM metallerin AHE özdirenç değerleri (fonon etkileşiminden dolayı) sıcaklıktan çok etkilendiği bilinir (özellikle yüksek sıcaklıklardan 100K'e kadar düşerken). Öte yandan AHE iletkenliği (σ_{xy}) ise sıcaklıktan daha az etkilenir ve neredeyse değişmediğini ve malzemenin mıknatıslanma doyum değerine yakın (sıcaklığa bağlı mıknatıslanma eğrisi ile karşılaştırıldığında) olduğu bilinir [55].

Bu tez çalışmasında çok katmanlı ultraince Co/Pd filmlerin FM katkının hacimsel (bulk) Co katmandan geldiği düşünebiliriz. Bu durumda hacimsel (bulk) Co ile ilgili mevcut yayınlar incelendiğinde [90] düşük sıcaklıklarda (60 K de) iletkenlik (σ_{xy}) değerinin azda olsa değiştiği ve pozitiften negatife ani bir düşüş ile işaret değiştirdiği görülür. Ancak diğer bir çalışmada [93] hacimsel (bulk) Co için düşük sıcaklık deneylerinde işaret değişimi görülmemiştir.

Şekil 4.11 ve 4.12 de, tüm çok katmanlı Co/Pd filmlerin enine σ_{xy} ve boyuna σ_{xx} iletkenliklerinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin σ_{xx} değerlerinin bilinen düşük sıcaklıkta maksimum değerinden başlayarak 100 K'e kadar azalıyor (ancak eğim düşüktür) ve 100K üstü sıcaklıklar için özdirenç değerlerine göre ters orantılı olarak azalması ise daha hızlıdır. Çok katmanlı Co/Pd tüm filmlerin iletkenlik değerlerinin düşük sıcaklıkta doyuma ulaştığı izlenimini vermektedir (bkz. Şekil 4.11).

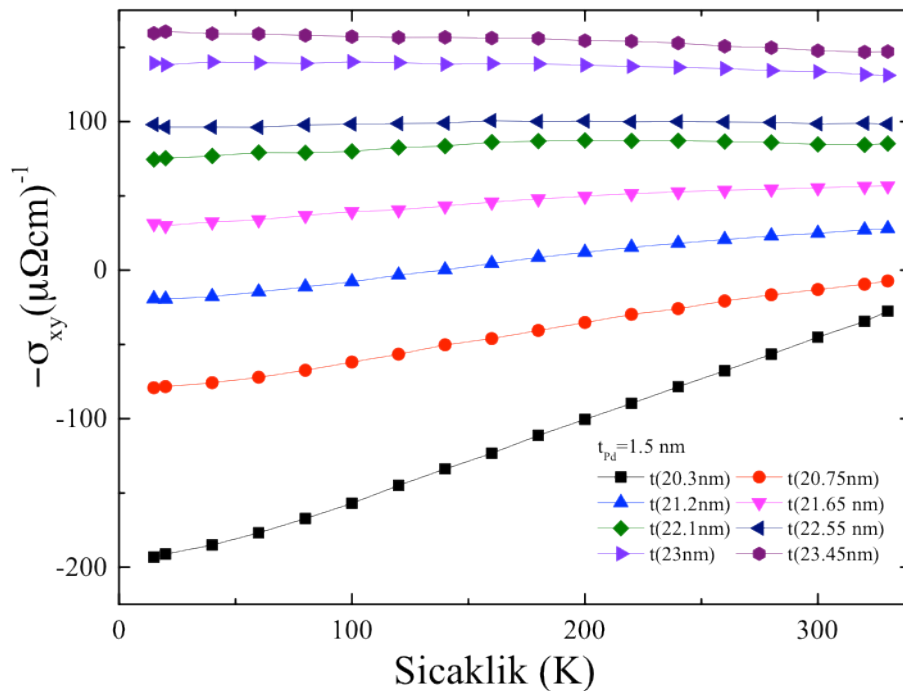


Şekil 4.11 Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin $t_{Pd} = 1.5$ nm serisinin sıcaklığa bağlı boyuna iletkenlik değişim eğrilerinin gösterimi

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin boyuna iletkenlik σ_{xx} değerleri düşük sıcaklıkta (15 K) 29500 – 33500 arasındadır ve ölçüm yapılan en yüksek sıcaklıkta (330 K) ise 19500 – 23500 arasındadır. Filmlerin iletkenlik değerlerinin en yüksek ve en düşük sıcaklık farkı 10000 dir.

Şekil 4.12 de görüldüğü gibi çok katmanlı ultra ince DMA lı Co/Pd filmlerin enine iletkenlik değerleri boyuna iletkenlik değerlerinden farklı davranış göstermektedir. $t_{Co} > 0.30$ nm Co/Pd filmlerin enine iletkenlik değerlerinin sıcaklıktan boyuna iletkenlik değerlerine göre daha az etkilendiği görülmektedir. $t_{Co} < 0.30$ nm Co/Pd filmlerinden, $t_{Co} = 0.20$ nm Co/Pd filmin iletkenlik mutlak değeri sıcaklık ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Benzer davranış bir sonraki kalınlıktaki Co/Pd filmin ($t_{Co} = 0.25$ nm), yine 15 K den başlayarak iletkenlik değerinin lineer olarak (eğimin biraz daha düşük) sıcaklık ile ters orantılı azalmaktadır.

Yine şekil 4.12’de görüldüğü gibi $t_{Co} = 0.30$ nm kalınlıktaki çok katmanlı Co/Pd filmin işareti sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Geçiş kalınlıktaki çok katmanlı Co/Pd filmin ($t_{Co} = 0.30$ nm) iletkenlik değerinin (15K’de) sıcaklıkla mutlak değeri lineer olarak azalmaktadır ve sıfırdan geçerek pozitif yönde lineer artışını sürdürmektedir. $t_{Co} = 0.35$ nm kalınlıktaki çok katmanlı Co/Pd filmin iletkenliği diğer bağıl kalın filmlere göre daha fazla etkilendiği görülmektedir.



Şekil 4.12 Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin $t_{Pd} = 1.5$ nm serisinin sıcaklığa bağlı enine iletkenlik değişimi eğrilerinin gösterimi

Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin enine iletkenlik σ_{xy} değerleri düşük sıcaklıkta (15 K) birbirinden çok farklıdır (mutlak değerleri alındığında) ise sadece 40 – 200 $(\Omega\text{cm})^{-1}$ arasındadır ve ölçüm yapılan en yüksek sıcaklıkta (330 K) ise 20 – 140 $(\Omega\text{cm})^{-1}$ arasındadır. En yüksek ve en düşük sıcaklık farkı çok düşüktür. Yani boyuna iletkenlik σ_{xx} değerleri ile karşılaştırıldığında çok daha az sıcaklıktan etkilendiği görülmektedir.

4.5 AHE Mekanizmalarının Belirlenmesi

Bu bölümde FM DMA li ultraince çok katmanlı Co/Pd filmlerin enine ve boyuna öz direnç/iletkenlik değerleri ilişkilendirilerek AHE mekanizmaları belirlenecektir. Elde edilen sonuçlar mevcut yayınlar ile karşılaştırılacaktır.

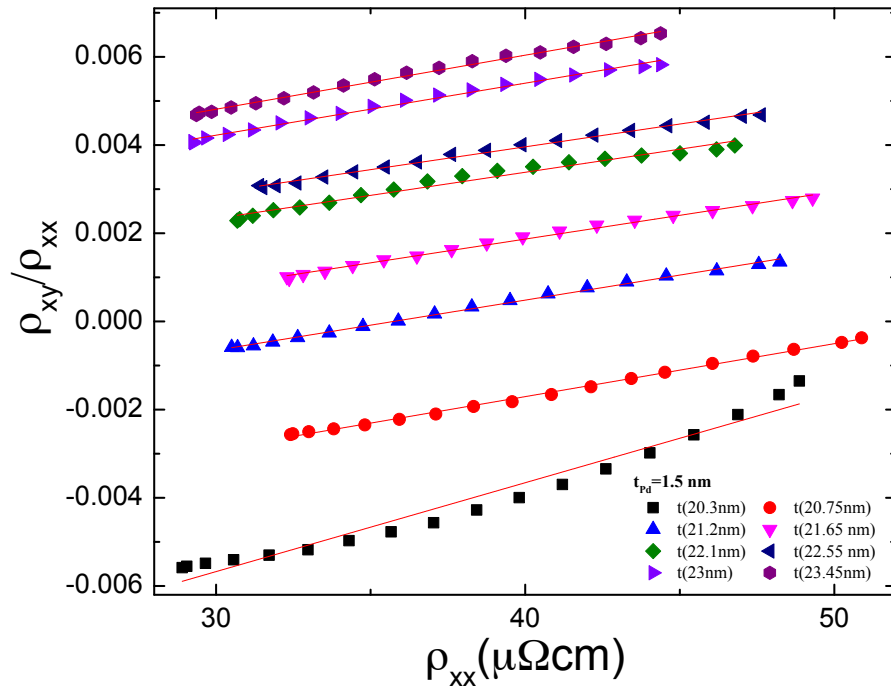
4.5.1 Enine-Boyuna Öz dirençlerin İlişkilendirilmesi

Geleneksel olarak enine ve boyuna öz dirençler ilişkilendirilerek malzemeler incelenir ve hangi AHE mekanizmasının ilgili malzemede baskın olduğu belirlenir [38, 64]. Deneysel sonuçlardan elde edilen verilerden, sıcaklığa bağlı ρ_{xy} ve ρ_{xx} grafiklerinden şekil 4.13 de gösterilen ' $\rho_{xy}/\rho_{xx} - \rho_{xx}$ ' eğrileri Origin 8.5 programı ile çizdirildi. Ferromanyetik malzemelerin AHE mekanizmalarının belirlenmesi için geleneksel ampirik eşitlik 2.12 ($\rho_{xy} = a\rho_{xx} + b\rho_{xx}^2$) her iki tarafı ρ_{xx} 'e bölünür ve

$$\frac{\rho_{xy}}{\rho_{xx}} = a + b\rho_{xx} \quad (4.5)$$

ifadesi elde edilir. FM filmlerin $\rho_{xy}/\rho_{xx} - \rho_{xx}$ grafiği oluşturulur ve karşılaştırmalar yapılır. Eşitlik 4.5 de a lineer katsayısı '*skew*' *saçılma* ve b katsayısı ise *yana sıçrama* (side jump) ile öz (intrinsic) AHE mekanizmalarına aittir. Bilindiği gibi farklı FM malzemelerin deneysel sonuçlarının farklılık göstermelerinden dolayı değerlendirmeler yapmak için bilim insanları ortak bir ifadede anlaşılamamışlardır [38]. Bu tez çalışmasında çok katmanlı ultra ince DMA'li FM Co/Pd'un AHE mekanizmalarının mevcut çalışmalar ile karşılaştırmak için şekil 4.13'de $\rho_{xy}/\rho_{xx} - \rho_{xx}$ eğrilerinin lineer (kırmızı çizgiler)

$[y(=\frac{\rho_{xy}}{\rho_{xx}}(T(K))) = a + bx(=\rho_{xx}(T(K)))]$ fit sonuçlarıdır. Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin $\rho_{xy}/\rho_{xx} - \rho_{xx}$ eğrileri çok güzel lineer oldukları görülmektedir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin bu fit sonuçları mevcut yayınlarla [48-52, 94, 95] karşılaştırıldığında birbirine yakın oldukları görülmektedir. Ancak $t_{Co} < 0.30$ nm kalınlıktaki çok katmanlı Co/Pd filmlerin davranışları mevcut yayınlardakilerden farklıdır (düşük sıcaklıktaki öz direnç değerleri yüksektir). Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin Şekil 4.13 de gösterilen sonuçları, bir sonraki bölümde iletkenlik fit sonuçları ile birlikte, hangi AHE mekanizmalarının baskın oldukları tartışılacaktır (bkz. Şekil 4.15).



Şekil 4.13 Co/Pd ($t_{Pd} = 1.5$ serisinin) filmlerinin AHE parametrelerinin belirlemesi için $\rho_{xy}/\rho_{xx} - \rho_{xx}$ eğrileridir. Kırmızı çizgiler ise fitleri

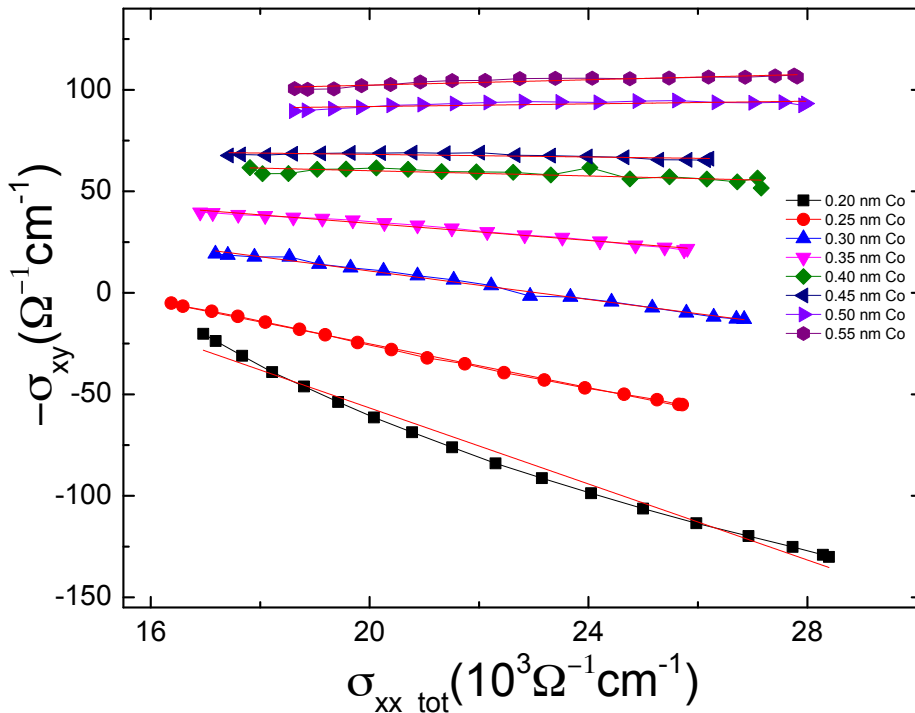
4.5.2 Enine-Boyuna İletkenliklerin İlişkilendirilmesi

Perrier [55], FM malzemelerin sıcaklıktan daha az etkilendiğinden enine (σ_{xy}) ve boyuna (σ_{xx}) iletkenliklerinin ilişkilendirmesini yapmıştır. Ampirik olarak kullanılan eşitlikten (eşitlik 2.12) [38, 55] ($\rho_{xy} = a\rho_{xx} + b\rho_{xx}^2$) enine öz direnç değerinin boyuna öz direnç değerinden çok küçük ($\rho_{xy} \ll \rho_{xx}$) olması durumunda

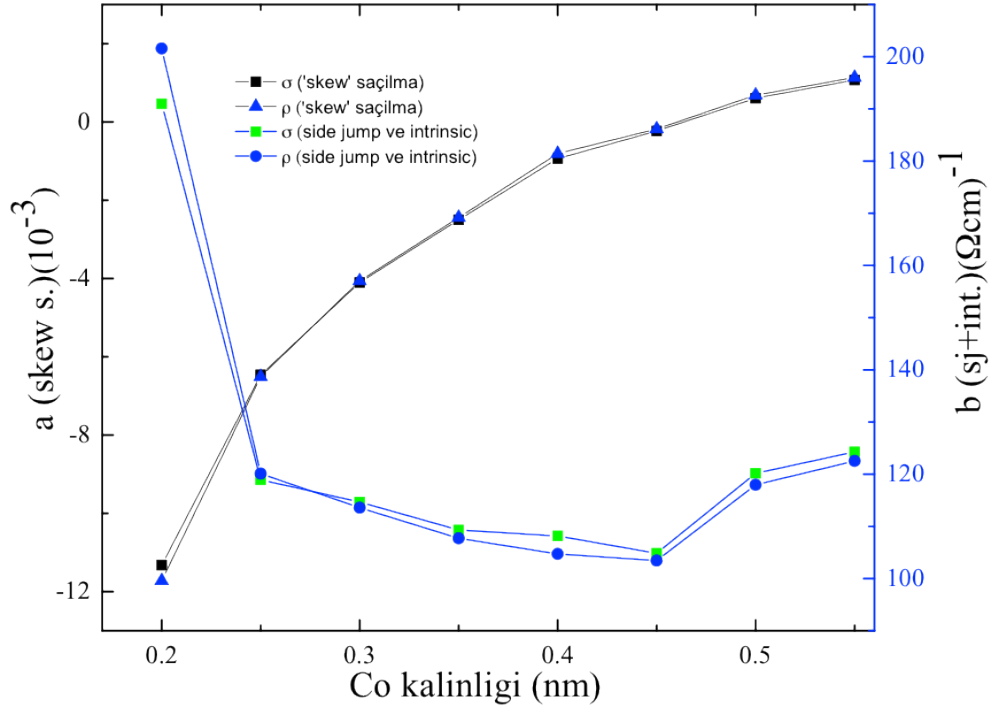
boyuna iletkenlik ve özdirenç arasındaki bağıntıdan ($\sigma_{xx} = 1/\rho_{xx}$) enine iletkenlik ile özdirençlerin ilişkilendirmesini eşitlik 2.13 ($-\sigma_{xy} = \rho_{xy} / \rho_{xx}^2$) ile yapmıştır. Tüm Co/Pd filmlerin enine ve boyuna iletkenliklerinin karşılaştırılması sonucunda ektin olan AHE mekanizmalarının belirlenmesi için [55]

$$-\sigma_{xy} = a\sigma_{xx} + b \quad (4.6)$$

ifadesi kullanıldı. Eşitlik 4.6 da a ve b sırasıyla ‘skew’ saçılma ve yana sıçratma (side-jump) ile öz (intrinsic) AHE mekanizmalarının katsayılarıdır. Şekil 4.14’de çok katmanlı Co/Pd filmlerinin noktaları birleştiren kırmızı lineer çizgi $y(= -\sigma_{xy}(T(K))) = ax(= \sigma_{xx}(T(K))) + b$ doğrusunun fit sonuçlarıdır. Şekil 4.14’deki veriler incelendiğinde, en ince filmin eğriliğinin eğiminin ($y = ax + b$) negatif olduğu ve Co/Pd filmlerinin kalınlığının artması ile eğiminin azaldığı ve artı değer aldığı açıkça görülmektedir. Co/Pd filmlerin eğrilerinin bu davranışı fit sonuçlarından da açıkça görülmektedir. Bizim çok katmanlı Co/Pd filmlerin deney ve grafik sonuçlarına göre sadece a katsayısı işaret değiştiriyor. Buna göre çok katmanlı Co/Pd filmlerde ‘skew’ saçılma mekanizması AHE’nin işaret değiştirmesinde belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.14 Co/Pd ($t_{Pd} = 1.5$ serisinin) filmlerinin AHE parametrelerinin belirlenmesi için $\sigma_{xy} - \sigma_{xx}$ eğrileridir. Kırmızı çizgiler ise fitleri



Şekil 4.15 Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin enine ve boyuna iletkenlik ve öz dirençler eğrilerinin fit sonuçları

Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin her iki (öz direnç ve iletkenlik) fit sonuçlarına göre a ve b değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Şeki 4.15'e göre b 120 ila 200 arasında değişiyor. Yani Co/Pd filmin kalınlığı ile ters orantılı olarak b değeri azalıyor ve iki kalın ($t_{\text{Co}} = 0.50$ ve 0.55 nm) Co/Pd filmin b değerinin tekrardan çok az arttığı görülmektedir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin (a değeri b ye bağlı olarak değişir), a katsayısı en ince çok katmanlı Co/Pd film için negatif değerden başlayarak (kalınlık ile orantılı) mutlak değeri azalmaktadır. Son iki kalınlıktaki çok katmanlı Co/Pd filmlerin a değeri işaret değiştirerek pozitif oluyor ve kalınlık ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu davranış AHE parametrelerinin (a ve b) kendi aralarında baskın rolünün değişmesidir, yani b değerinin kalınlık ile ters orantılı olarak azalması ve eş zamanlı olarak a 'nın artması. Başka ifadeyle öz (intrinsic) ile yana sıçrama (side jump) etkisinin azalması ve 'skew' saçılma mekanizmasının belirleyici olmasıdır [6, 12]. Çok katmanlı Co/Pd filmlerinin AHE parametreleri filmin kalınlığına bağlı değişimi incelendiğinde a ve b değerlerinin (bkz. Şekil 4.15) mevcut yayınlarla uyumlu olduğu görülmektedir; çok katmanlı Co/Pt [17], çok katmanlı Co/Pd [6].

4.5.3 Tartışmalar

Bu çalışmada ferromanyetik dik manyetik anizotropili ultra ince çok katmanlı Co/Pd filmlerin FM Co katman kalınlığına ve sıcaklığa bağlı AHE polarite değişimi gözlemlenmiştir. Bu ilginç fiziksel olayların spekülatif veya nitel açıklamalarını yaparken öncelikle çok katmanlı Co/Pd filmlerin (inceden kalına doğru) sadece 0.05 nm basamaklarla kalınlıkları birbirinden farklıdır.

Bu tez çalışmasında çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmlerin {Si/SiO₂/Ta(0.5 nm)/(Pd(y)/Co(x))₉/MgO (x = 0.2-0.55 nm, y = 1.2, 1.5 ve 1.8 nm)}, tekrarlama sayısı *dokuz*dur ve sadece FM Co katmanının kalınlığı değiştirildi. FM malzemelerde AHE'nin filmin kusurlarından [31, 32] kaynaklandığı öngörülmektedir. Çok katmanlı periyodik metallik NM/FM yapılardan oluşan ultra ince katmanlı filmlerin çoğu polikristaldir ve büyüme yönünde yüksek kristal (textured) özelliktedir. FM soy metal Co ve NM tabakaların kalınlıklarının oranına bağlı olarak birbirlerine en yakın düzlemlerde yapay süperlatis yapıda epitaksil şekilde büyürler. Yine FM/NM yapıdaki filmlerin kalınlıklarının oranına bağlı olarak keskin ara yüzey (interface) oluştuğu düşünülmektedir [13].

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin ara yüzeyinin FM etkisinin Co atomlarının manyetik momentinin güçlendirilmesi komşu Co atomları tarafından polarize edilmiş Pd atomlarının indüklenen momentlerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir [13, 17]. Yani Co/Pd filmlerin ara yüzeyindeki Pd atomları FM Co atomları tarafından indüklenmiş mıknatıslanmadan dolayı FM karakter gösterirler [13]. Başka bir çalışmada Kim et al. [16], çok katmanlı Co/Pd filmleri atomik ölçekte incelediklerini ve Co atomlarının alaşım veya alaşım benzeri karakterde olduğunu ve bir kimyasal izotropik ortam oluşturdıklarını iddia etmiştir. Yani Co/Pd filmlerinin Pd atomlarının ara yüzeylerdeki Co atomlarının filmin yüzeyine dik şekilde polarize etmesi beklenir. Co/Pd filmlerinde FM Co tabaka kalınlığı arttıkça iç kısımlardaki FM Co atomlarının etkisi daha önemli hale gelir ve hacimsel (bulk) Co katmanı ara yüzey üzerinde baskın olur [18].

Çok katmanlı Co/Pd ara yüzey alaşım [15, 16] olduğu varsayılarak, Co ($\text{Ni}_x\text{Co}_{100-x}$) tabanlı alaşımlar ile ilgili çalışmada % 78 Ni oranında R_S 'nin ve Hall iletkenliğinin ise yaklaşık % 80 Ni de işaret değiştirdiği bilinir [8]. Benzer bir şekilde Co-Pd alaşımının yaklaşık % 80 Pd oranında AHE öz direnç işaret değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Bundan esinlenerek çok katmanlı Co/Pd'un ara bölgesini ayrı bir FM tabaka olarak düşünebiliriz [7]. Dolayısıyla çok katmanlı ultra ince Co/Pd'a kusurların veya katkıların FM Co katmanının yüzeyinde ve Co/Pd ara yüzeyinde oluşması beklenir. Yani çok katmanlı Co/Pd'un katmanlarının ara yüzeyinden saçılma etkisinin tüm kalınlıklarda aynı olması beklenir. Ancak ultra ince metal filmlerde yüzey saçılma etkisinin FM Co kalınlığı ile ters orantılı olarak artması veya azalması beklenir [12]. Burada dikkate alınması gereken filmlerin ultra ince ve filmlerin kalınlıkları sadece 0.05nm aralıklarla büyütüldü. Bu durumda çok katmanlı Co/Pd filmlerinin her biri arasında kusursuz ve düzenli (uniform) bir katman oluşumundan söz etmek zordur [11].

Çok katmanlı Co/Pd filmlerde gözlemlenen AHE'in FM Co katmanı ve yine FM ara yüzeyi arasındaki rekabet neticesinde belirlenir. Dahası kalın Co/Pd filmlerde ($t_{\text{Co}} > 0.30 \text{ nm}$) hacimsel (bulk) Co katmanının AHE etkisi ara yüzeyin oluşturduğu AHE'den daha baskın olduğu durumdur. Kısacası en ince çok katmanlı Co/Pd filmlerde ($t_{\text{Co}} < 0.30 \text{ nm}$, $t_{\text{Pd}} = 1.5 \text{ nm}$) ara yüzey baskındır ve kalın filmlerde ($t_{\text{Co}} > 0.30 \text{ nm}$, $t_{\text{Pd}} = 1.5 \text{ nm}$) ise hacimsel (bulk) Co katmanının AHE si baskındır.

Başka bir açıdan çok katmanlı Co/Pd filmlerin sıcaklığa bağlı polarite değişimi filmlerin T_C değerlerinin farklı olmasındandır. FM hacimsel (bulk) Co katmanının Curie sıcaklığı ($T_C \approx 1380 \text{ K}$) yüksek olmasına rağmen en ince Co/Pd filmin ($t_{\text{Pd}} = 1.8 \text{ nm}$ ve $t_{\text{Co}} = 0.2 \text{ nm}$) ise $T_C \approx 280 \text{ K}$ olarak gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4.8). Mevcut bir yayında bu değer Co/Pd alaşımında (%95 Pd) yaklaşık $T_C \approx 260 \text{ K}$ olarak gözlemlenmiştir [21]. Bu yayındaki [21] T_C verilerine göre bizim ince Co/Pd filmin ($t_{\text{Pd}} = 1.8 \text{ nm}$ ve $t_{\text{Co}} = 0.2 \text{ nm}$) FM ara yüzey katmanının yapısını alaşım kabul edebiliriz. Çok katmanlı Co/Pd filmin FM Co katmanı inceldikçe manyetik geçiş

sıcaklığı (T_C) ve mıknatıslanma (M) değerleri düşer. FM malzemelerin karakteristik özelliklerinden düşük sıcaklıklarda (T_C 'nin altında) manyetik momentler güçlü bir şekilde yönelirler ve çok katmanlı Co/Pd filmlerinin ara yüzeyindeki FM Co atomları hacimsel (bulk) Co katmanının atomları tarafından yönlendirilir (polarize edilir). Başka bir ifadeyle FM ara yüzeyi ve güçlü FM hacimsel (bulk) Co tabakası arasındaki rekabet sonucunda iletken elektronların spinlerinin polarizasyonlarını belirler. Yani çok katmanlı ince Co/Pd filmlerde ferromanyetik ara yüzey baskındır ve kalın Co/Pd filmlerde ise hacimsel (bulk) Co katmanının AHE si baskındır.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Spintronikte kullanılmak üzere manyetik ince filmler üzerinde yoğun ve maliyetli araştırmalar yapılmaktadır. Bilgi teknolojisinin gelişmelerine paralel olarak ve nano boyut fiziğinin daha iyi anlaşılması ile bilim insanları yeni nesil cihazların uygulamalarının fiziksel olaylarının üzerinde odaklanmıştır.

Bu yeni nesil çalışmalar spin-valf ve GMR / TMR (tünelleme manyetodirenç) sensörleri ve cihazları, hızlı anahtarlama, bilgi okuma ve depolama sistemleri için manyetik RAM'ler için çok katmanlı dik manyetik anizotropili (DMA) malzemeler önemli bir yapı taşı adaylardandır. Çok katmanlı, geçiş metal (TM: Co, Fe ve Ni) ve soy metalden (Pt, Pd ve Au) oluşan, malzemeler belirli kalınlık ve katman tekrarlama sayısına göre DMA özelliklidir.

Bu çalışmada; çok katmanlı dik manyetik anizotropili Co/Pd filmler (Si/SiO₂/Ta(0.5 nm)/(Pd(1.8nm)/Co(x))₉/MgO dokuz katmanlı (x = 0.2-0.55 nm)), dc magnetron sıçratma tekniğiyle büyütüldü. Örnekler 200 °C de 60 dakika 6500 Oe dik manyetik alanda tavlandı. Böylelikle Co/Pd filmlerde kalıcı dik manyetik anizotropi oluşturuldu ve aynı zamanda filmler MgO katmanı ile oksitlenmesi engellendi. Tavlama yapılmayan çok katmanlı Co/Pd filmlerde ise AHE polarite değişimi daha nettir. Tavlama yapılmayan çok katmanlı Co/Pd filmlerde ise AHE polarite değişimi net gözlemlenmemiştir.

Çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmlere Hall bar (UV litografi ve e-ışını aşındırma ile) ve 4 noktadan Hall kontak sistemi oluşturuldu. Ölçümlerde filmlere yaklaşık 500µA sabit akım uygulanarak, ±10000 Oe, 200 Oe aralıklarla, dik manyetik alanda düşük sıcaklık, V_H(H) ve V_x(H) ölçümleri gerçekleştirildi.

DMA malzemelerin dik anizotropisinden ötürü dik yönde kalıcı mıknatıslanma oluşmaktadır. Böylece AHE etkisi dikey manyetik kayıt cihazların (cihazın çıkış sinyalini verir) manyetik histerilerini (mıknatıslanmanın dik bileşeni ile doğru orantılı olarak) ölçmek için yararlı bir araçtır. Çok katmanlı ultra ince

Co/Pd filmlerin AHE histerileri mıknatıslanma, $M(H)$, histerileri gibi karesel özellik göstermiştir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin düşük sıcaklık mıknatıslanma (Quantum Design PPMS ve AGM ile) histerilerini belirlemek için düzlem dışı (out-of-plane) geometride en şiddetli manyetik momenti veren z-doğrultuda pozitif ve negatif yönde taranarak 5 kol histeri manyetik moment ölçümleri manyetik alanda (9 T'a kadar artırılabilir) gerçekleştirildi. Mıknatıslanma ölçümleri sonunda filmlerin histerilerinde polarite değişimleri gözlemlenmedi.

Ferromanyetik malzemeler belirli bir manyetik alan değerinden sonra mıknatıslanma ve enine gerilim değeri dış manyetik alandan etkilenmez. Yani ferromanyetik malzemenin AHE şiddeti malzemenin iç mıknatıslanması ile sınırlıdır ve dolayısıyla mıknatıslanma vektör yönünü belirlemek içinde kullanılabilir. Aynı zamanda AHE ölçümleri ile ferromanyetik malzemenin Curie sıcaklığı bulunabilir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin AHE deneyler sonucuna göre çok katmanlı en ince Co/Pd filmin ($t_{Co} = 0.20$ nm) T_C değeri (≈ 300 K) hacimsel (bulk) Co tan çok daha düşük olduğu görüldü. dolayısıyla Co/Pd film sıcaklık artışı ile mıknatıslanması zayıflıyor ve FM etkisini kaybeder. Diğer yandan Co katman bağlı kalınlığı fazla olan çok katmanlı Co/Pd filmlerin AHE işareti hacimsel (bulk) Co yönünde pozitifdir. Basitçe, ince olan çok katmanlı Co/Pd filmlerde ara yüzey etkisi baskındır ve hacimsel (bulk) Co katman Hall gerilim işaretleri ile birbirine zıt olduklarından artan sıcaklık ve kalınlık ile hacimsel (bulk) Co gibi AHE işaretleri yönünde pozitif döner.

Metal tabanlı yeni nesil spintronik uygulamalarda önemli bir yapı taşlarından biri olması beklenen Co/Pd ile ilgili çalışmaları yayınlanma sırasına göre, AHE yöntemi ile yapılan çalışmalarda polarite değişimini gözlemleyen, çalışmalar özetlendi. Kim et al. [48], çok katmanlı Co/Pd'un Pd kalınlığına bağlı manyeto iletkenlik özelliklerini incelemişlerdir. AHE histerilerinde, Pd'in 4-5 mono katman arasında AHE'de polarite değişimini gözlemlemişlerdir. Bizim çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmlerin 3 seride ($t_{Pd} = 1.2, 1.5$ ve 1.8 nm) de ultra ince aralıkta Co katman kalınlığına bağlı polarite değişimi görüldü.

Aoki et al. [50], çok katmanlı Co/Pd üzerinde AHE çalışmışlardır. Bu çalışmada, 2 Å Co ve 20 Å Pd kalınlığı için R_S nin 4.2 K' de işaret değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada sadece 3 örnek incelenmiştir. 2010 da Rosenblatt et al. [51], ultra ince çok katmanlı Co/Pd filmlerin AHE polarite değişiminin katman sayısına bağlı olarak gözlemlemişlerdir. Fakat zamanla AHE histerileri bütün filmlerde aynı yöne dönmüştür. Bizim ise 3 seri 8'er adet çok katmanlı Co/Pd filmler incelenmiştir ve sıcaklığa bağlı 4 Co/Pd filmlerinde ([Co(0.35 ve 0.40 nm)/Pd(1.8 nm)] ile [Co(0.30 ve 0.35 nm)/Pd(1.5 nm)]) polarite değişimi gözlemlendi.

Çok katmanlı Co/Pd filmlerin kristal yapısı ve kalınlıklarını belirlemek için XRD ölçümleri (3 örnekte) yapıldı. Çok katmanlı Co/Pd filmin $t_{Co} = 0.55$ nm x-ışının pik bağlı şiddetinin daha yoğun olduğu görüldü. Geçiş kalınlıktaki Co/Pd film ($t_{Co} = 0.30$ nm) de kalın örneğe benzer pikler görüldü. Yani bu durum çok katmanlı Co/Pd filmlerde yüzeye dik iyi bir kristalleşme gerçekleştiğinin göstergesidir. Çok katmanlı Co/Pd filmin en incesinde ($t_{Co} = 0.20$ nm) ara yüzeyin alayım etkisinden dolayı uydu (satellite) pikleri diğer kalın örneklerle göre net görülmemiştir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin XRR verilerinden örneklerin toplam kalınlıkları ($Ta/[Pd/Co]_9$) hesaplandı ve bu değerler dc sıçratma için kullanılan kalibre edilmiş değerlere yakın (%1 den daha düşük hata ile) bulundu.

Sonuç olarak dik manyetik anizotropili çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmlerin AHE'nin sıcaklığa ve Co kalınlığına bağlı polarite değişimi gözlemlenmiştir. Çok katmanlı Co/Pd filmlerin AHE polarite değişikliği sıcaklığın düşürülmesi veya filmlerin kalınlığının değişmesi ile gerçekleştiği açıktır. Bu demektir ki, dc öz direnç ρ_{xx} 'e katkısı, yüksek sıcaklıklarda yoğun fononlardan, magnonlardan veya daha fazla ince filmlerdeki kusurlardan ρ_{xy} zıt şekilde (daha doğrusu AHE voltajı) kendilerini yansıttıkları anlamına gelir. Yani ince Pd/Co filmlerin AHE öz direnç işareti ara yüzeydeki (difüzyon ile oluşan) ile hacimsel (bulk) Co (kalın Co/Pd filmler) ile zıt işaretli olduğu görünüyor. Benzer kalitatif açıklama çok katmanlı Co/Pd filmlerin sıcaklığa bağlı polarite değişimi için de yapılabilir.

Çok katmanlı Co/Pd filmlerinde geleneksel değerlendirmelere göre baskın olan AHE saçılma mekanizması, işaret değişimine neden olan, dışsal ‘skew’ saçılma mekanizmasıdır. Yani filmlerin boyutlarına bağlı bir mekanizmadır. Yani çok katmanlı Co/Pd filmlerin Co katmanı inceldikçe dışsal mekanizmalar baskın hale gelir. Çok katmanlı ultra ince Co/Pd filmlerin katman sayısı sabittir ve Co katmanı sadece 0.05 nm basamaklarla artar/incelir. Yani Co/Pd filmlerde ara yüzey saçılması ultra ince bölgelerde düzensiz ve baskındır. Çok katmanlı Co/Pd ile ilgili mevcut yayınlar incelendiğinde ultra ince Co için teorik hesaplamalar yoktur. Öz (intrinsic) AHE mekanizması teoriktir ve bilindiği gibi ultra ince malzemelerde hesaplamaları tutarsızdır. Diğer AHE mekanizmaları, yana sıçrama (side-jump) ve öz (intrinsic), Co/Pd filmlerin enine ve boyuna iletkenlik/özdirenç değerlendirmelerinde (300 K de) katsayıları işaret değiştirmediği görüldü. Diğer yandan ‘skew’ saçılma AHE mekanizması katsayısının işaret değiştirdiği görüldü. AHE teorik hesaplamalarda (intrinsic) saçılma ihmal edilir. Ancak ultra ince kalınlıklardaki filmlerde mevcut yayınlarda da üzerinde ısrarla durulduğu gibi yüzey ve ara yüzey saçılması baskındır. Bu durumlarda teorik hesaplamalar yetersizdir.

Çok katmanlı geçiş metal (TM: Co, Fe ve Ni) ve soy metalden (Pt, Pd ve Au) oluşan Co/Pd, Co/Pt, Fe/Pt gibi belirli kalınlık ($t_{FM} < t_{NM}$) ve katman tekrarlama sayısına göre yüksek DMA özelliklidir. Bu malzemelerin spintronik uygulamaları, istenilen manyetik özelliklerini, doyum mıknatıslanma ve anizotropi enerjisi gibi, kalınlıklarını (TM ve Pt veya Pd) ve katman sayılarını değiştirerek ayarlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Bader et al., *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **1**, 71 (2010).
- [2] C. A. F. Vaz, J. A. C. Bland, and G. Lauhoff, *Rep. Prog. Phys.* **71**, 056501 (2008).
- [3] M.N. Baibich et al., *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472 (1988).
- [4] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, *Phys. Rev. B* **39**, 4828 (1989).
- [5] M. Bowen et al. *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1655 (2001).
- [6] S. S. P. Parkin et al., *Nat. Mater.* **3**, 862 (2004); S. Yuasa et al., *Nat. Mater.* **3**, 868 (2004).
- [7] Y. Tserkovnyak, A. Brataas, G. E. W. Bauer, and B.I. Halperin, *Rev. Mod. Phys.* **77**, 1375 (2005).
- [8] W.J. Gallagher, and S. S. P. Parkin, *IBM J. Res. Dev.* **50**, 5 (2006).
- [9] G. A. Prinz, *Phys. Today* **48** (4) 58 (1995); *Science* **282**, 1660 (1998).
- [10] S.A. Wolf et al., *Science* **294**, 1488 (2001).
- [11] I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, *Rev.Mod.Phys.* **76**, 323 (2004).
- [12] Y. B. Xu, and S. M. Thompson (ed)., *Spintronic Materials and Technology* (London: Taylor and Francis) (2006).
- [13] S. Maekawa (ed) *Concepts in Spin Electronics* (Oxford: Oxford University Press) (2006).
- [14] S. A. Wolf, A. Y. Chtchelkanova, and D. M. Treger, *IBM J. Res. Dev.* **50**, 101 (2006).
- [15] P. F. Carcia et al, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 178 (1985).
- [16] F. J. A. den Broeder et al., *J. Appl. Phys.* **61**, 4317 (1987).
- [17] B. N. Engel et al., *J. Appl. Phys.* **70**, 5873 (1991).
- [18] T. Sugimoto et al., *J. Magn. Magn.Mater.* **104-107**, 1845 (1992).
- [19] S. Mangin et al., *Science* **5**, 210 (2006). H. Meng and J. P. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 172506 (2006).
- [20] R. Sbiaa et al., *J. Appl. Phys.* **105**, 073904 (2009).
- [21] M. S. Lin et al., *J. Appl. Phys.* **99**, 08T106 (2006).
- [22] R. Law et al., *Appl. Phys.Lett.* **91**, 242504 (2007).
- [23] J. H. Park et al., *J. Appl. Phys.* **103**, 07A917 (2008).
- [24] C. Ducruet et al., *J. Appl. Phys.* **103**, 07A918 (2008).

- [25] R. Law et al., Appl. Phys. Lett. **94**, 062516 (2009).
- [26] P. Y. Yang et al., J. Appl. Phys. **107**, 083902 (2010).
- [27] J. Liao et al., J. Appl. Phys. **109**, 023907 (2011).
- [28] T. N. A. Nguyen et al., Appl. Phys. Lett. **98**, 172502 (2011).
- [29] N. Nakajima et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 5229 (1998).
- [30] P. Bruno et al., Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. **49**, 499 (1989)
- [31] S. K. Kim, V. A. Chernov, and Y. M. Koo, *J. Magn. Magn. Mater.*, **170 (1-2)**, L7-L12 (1997).
- [32] E. H. Hall, Philos. Mag. **10**, 301 (1880).
- [33] D. D. Awschalom and M. Flatte, Nature Phys. **3**, 153 (2007); S. Lowitzer, D. Ködderitzsch, and H. Ebert, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 266604 (2010).
- [34] J. Lindemuth and B. Dodrill, IEEE Trans. Magn. **40**, 2191 (2004).
- [35] S. K. Wong et al., IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 6 (2010).
- [36] S. K. Wong et al., J. Appl. Phys. **106**, 093904 (2009).
- [37] H. S. Lee et al., J. Magn. Magn. Mater. **239**, 343(2002).
- [38] N. Nagaosa et al., Rev. Mod. Phys. **82**, 1539 (2010).
- [39] R. Karplus and J.M. Luttinger, Phys. Rev. **95**, 1154(1954); J. M. Luttinger, *Phys. Rev.* **112**, 739 (1958).
- [40] P. Dheer, Phys. Rev. **156**, 637 (1967).
- [41] J. M. Lavine, Phys. Rev. **123**, 1273 (1961).
- [42] J. Smit, Physica (Amsterdam) **21** 877 (1955); **24**, 39 (1958).
- [43] L. Berger, Phys. Rev. B **2**, 4559 (1970); **5**, 1962 (1972) .
- [44] J. Smit, Phys. Rev. B **8**, 2349 (1973); L. Berger, *ibid.* **8**, 2351 (1973).
- [45] S. K. Lyo and T. Holstein, Phys. Rev. B **9**, 2412 (1974).
- [46] P. Nozieres and C. Lewiner, J. Phys. (France) **34**, 901 (1973); C. Lewiner, O. Betbeder-Matibet, and P. Nozieres, J. Phys. Chem. Solids **34**, 765 (1973).
- [47] S. K. Lyo and T. Holstein, Phys. Rev. Lett. **29**, 423 (1972).
- [48] S. Kim et al., J. Appl. Phys. **73**, 6344 (1993).
- [49] S. U. Jen et al., J. Appl. Phys. **76**, 5782 (1994).
- [50] Y. Aoki et al., J. Magn. Magn. Mater. **162**, 1 (1996).
- [51] D. Rosenblatt et al., Appl. Phys. Lett. **96**, 022512 (2010)
- [52] Z. B. Guo et al., Phys. Rev. B **86**, 104433 (2012).

- [53] V.K. Dugaev, M. Taillefumier, B. Canals, C. Lacroix, P. Bruno. Anomalous Hall effect. In: "Strongly Correlated Systems, Coherence and Entanglement", edited by J. Carmelo, J. Lopes dos Santos, V.R. Vieira, P.D. Sacramento (World Scientific, Singapore, 2007), pp. 145 – 161.
- [54] C. M. Hurd, The Hall Effect in Metals and Alloys (Plenum, New York, 1972), Chap. 5.
- [55] L. Berger and G. Bergmann, in: The Hall Effect and Its Applications, eds. C.L. Chien and C.R. Westgate (Plenum, New York, 1979) p. 60.
- [56] E. M. Pugh, Phys. Rev. **36**, 1503 (1930); E. M. Pugh, and T. W. Lippert, Phys. Rev. **42**, 709 (1932).
- [57] J. Smit, Phys. Rev. B **8**, 2349 (1973); L. Berger, *ibid.* **8**, 2351 (1973).
- [58] J. Smit, Phys. Rev. B **17**, 1450 (1978); L. Berger, *ibid.* **17**, 1453 (1978).
- [59] T. Jungwirth, Q. Niu, and A. H. MacDonald Phys. Rev. Lett., vol. 88, p. 207208, (2002).
- [60] S. Onoda and N. Nagaosa J. Phys. Soc. Jpn., vol. 71, p. 19, (2002).
- [61] M.-C. Chang and Q. Niu Phys. Rev. B, vol. 53, p. 7010, (1996).
- [62] D. Xiao, M. C. Chang, and N. Qian Reviews of Modern Physics, vol. 82, p. 1959, (2010).
- [63] J. N. Chazalviel Phys. Rev. B, vol. 11, p. 3918, 1975.
- [64] A. Gerber et al., Phys. Rev. B **69**, 224403 (2004); Y. Tian, L. Ye, X. Jin, Phys. Rev. Lett. **103**, 087206 (2009).
- [65] C. Kooi, Phys. Rev. **95**, 843 (1954).
- [66] C. L. Canedy et al., Phys. Rev. B **62**, 508 (2000).
- [67] K. Fuchs, Proc. Cambridge Philos. Soc. **34**, 100 (1938).
- [68] J. L. Vossen and W. Kern, editors. Thin film processes. Academic Press, Inc., 1978.
- [69] R. Behrisch, editor. Sputtering by particle bombardment. Springer, Berlin, 1981.
- [70] Peter et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B **27**, 1 (1987).
- [71] S. Kämmerer et al., Appl. Phys. Lett. **85**, 79 (2004); and Y. M. Lee et al., Appl. Phys. Lett. **89**, 042506 (2006)
- [72] R. C. Sousa et al., Appl. Phys. Lett. **73**, 3288 (1998)
- [73] S. Ikeda et al., Appl. Phys. Lett. **93**, 082508 (2008)
- [74] W. H. Bragg et al., Proc. R. Soc. A **88**, 428 (1913); W. L. Bragg, Proc. Cambridge Philos. Soc. **17**, 43 (1913)

- [75] C. Kittel. Solid State Physics. Wiley and Sons, New York, 2005.
- [76] B. E. Warren. X-ray Diffraction. Addison-Wesley, Reading, PA 1969, 1969.
- [77] Baumbach, T. and Mikulik, P., 2009, X-Ray Reflectivity by Rough Multilayers. In : X-ray and Neutron Reflectivity. Springer, 359 p.
- [78] V. Holy, U. Pietsch, and T. Baumbach. High resolution x-ray scattering from thin films and multilayers, volume 149 of Springer Tracts in Modern Physics. Springer, Heidelberg, Berlin, 1999.
- [79] M. A. McCord et al., Hand- book of Microlithography, Micromachining and Microfabrication (SPIE Optical Engineering Press, 1997)
- [80] { HYPERLINK "<http://www.springerlink.com/content/978-3-540-20785-6/>" }, Part C, 485-529 (2006).
- [81] Foner, S. "Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer". *Rev. Sci. Instrum* **30** (7): 548–557 (1955).
- [82] D. Jiles. Magnetism and magnetic materials. Chapman Hall, 1991.
- [83] S. Chikazumi and C. D. Graham Jr., Physics of ferromagnetism. Clarendon Press, Oxford, 1997.
- [84] N. Sato, J. Appl. Phys. **64**, 6424 (1988).
- [85] M. R. Khan et al., Phys. Rev. **27**, 7186 (1983).
- [86] G. Reiss et al., J. Phys.: Condens. Matter **1**, 1275 (1989).
- [87] A. S. Rozatian, *PhD Thesis*, Durham University (2004).
- [88] H. Yamane, Y. Maeno, and M. Kobayashi, Appl. Phys. Lett. **62**, 1562(1993).
- [89] W. J. Xu et al. EPL. **90**, 27004 (2010).
- [90] T. Miyasato et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 086602 (2007).
- [91] Z. Fang et al., Science 302, 92 (2003).
- [92] R. Mathieu et al., Phys. Rev. Lett. 93, 016602 (2004).
- [93] J. Kötzler and W. Gil, Phys. Rev. B **72**, 060412 (R) (2005).
- [94] S. L. Zhang et al., Appl. Phys. Lett. **97**, 222504 (2010).
- [95] F. Zhang et al., J. Appl. Phys. **110**, 033921 (2011)

ÖZGEÇMİŞ

12 Aralık 1968 senesinde İstanbul-Fatih'te doğdu. İlk okul 1. ve 2. Sınıfı Alaçam'ın bir köyünde tamamladıktan sonra babası işçi olarak birlikte gittiği Almanya'da 3-10 sınıflarını okudu. Daha sonra tekrar Türkiye'ye döndü ve lise 2. ve 3. sınıfı Samsun'da tamamladı. Marmara üniversitesi Fizik öğretmenliğini (İngilizce) 1987-1992 yılları arasında lisans eğitimini tamamladıktan sonra 1992'den beri değişik yerlerde Fizik öğretmeni olarak çalıştı. Ulusal ve uluslararası birçok Fizik-Mühendislik projelerinde öğrencileri ile birlikte başarılar kazandı ve başarıları ile birlikte üniversite çevresine dönmek istedi. 2005 yılında Marmara üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsünde Fizik öğretmenliğinde yüksek lisansını tamamladı ve akademik araştırmalar merakının peşinde 2009 yılında Gebze İleri Teknoloji Enstitüsünde doktora eğitimine başladı. Tez çalışmasını Almanya Bielefeld Üniversitesi'nde yaptı ve halen çalışmaları devam etmektedir.