TÜBİTAK

Nano-ölçekli Manyetik Aygıtlarda Spintronik ve Spinorbitronik Etkileşimleri

Program Kodu: 2504

Proje No: 113F378

Proje Yürütücüsü:

Doç. Dr. Özhan ÖZATAY

Araştırmacı(lar):

Yard. Doç. Dr. Arif ÖZBAY

Danışman(lar):

Doç. Dr. Hamdi TORUN

Bursiyer(ler):

Vedat KARAKAŞ, Ali Taha HABİBOĞLU, Ahmet COŞKUNER, Kaan ÖZBOZDUMAN

Ekim 2016

İSTANBUL

TÜBİTAK

ÖNSÖZ

Günümüz teknolojileri çip-üstü işlevselliği yüksek elektronik aygıt tasarımlarıyla daha küçük, daha az güç tüketen ve verimli cihazlar üretme yönünde ilerlemektedir. Bu yönde en önemli buluşlardan biri 80'lerin sonunda keşfedilen dev manyetik direnç ile spin elektroniği manasına gelen spintronik alanının doğması olmuştur. Elektronların yük özelliğinin yanısıra spin özelliğinin de kullanılması ile daha işlevsel mikro ve nano aygıtlar tasarlanabilmiş ve bu aygıtlar manyetik hafıza teknolojileri, spin bazlı tranzistörler, manyetik detektörler, biyo-sensörler, mantık üniteleri ve nano-osilatörler gibi pek çok uygulama alanı bulmuştur. Spintronik alanında spin filtreleme, spin akımı, spin Hall etkisi, spin-tork etkisi gibi fiziksel kavramlar üzerine çalışmalar yapılmıştır ve halen yapılmaktadır. Bu projede spin polarize olmuş yani spinleri belirli bir yöne bakan elektronların manyetik malzemelerde bölgesel manyetik yönelimlerle etkileşimleri incelenmiştir. Desenlenmiş manyetik filmler olan nano-mıknatıslar vorteks, anti-vorteks, manyetik skyrmionlar gibi pek çok sıradışı mikro-manyetik yönelim sergilemektedirler. Bu yönelimler spin polarize olmuş bir akımla hareket ettirilebilmekte ve yüksek frekanslarda mıknatıslanma salınımları oluşturabilmektedirler. Literatürde deneysel olarak az rastlanan anti-vorteks manyetik yapıları ve manyetik birer soliton olan radyal vorteks skyrmionları başarı ile oluşturulmuş ve görüntülenmiştir. Anizotropik manyetik direnç ve dev manyetik direnç mekanizmaları kullanılarak bu manyetik yapıların spin polarize akımla tetiklenen dinamikleri incelenmiş ve aygıt tasarımları için uygunluğu test edilmiştir. Ayrıca spin Hall etkisi ile oluşturulan saf spin akımları tespit edilmiştir. TÜBİTAK "113F378" başlıklı ikili ilişkiler projesinde İtalya'da uzman ekiplerle beraber çalışmış ve bu ekipler tarafından yapılan mikro-manyetik modellemelerle deneysel çalışmalar hız kazanmıştır. Nano-aygıt tasarımı ve üretimi kapsamında da İtalyan ekiplerden destek alınmış ve İtalyan ekiplerine manyetik ve elektriksel karakterizasyon yönünde destek verilmiştir. Proje için gerekli saçtırma hedefleri ve güç kaynağının yanı sıra muhtelif kimyasal sarf malzemeleri ve temiz oda işlemleri için hizmet alımları Tübitak tarafından desteklenmiştir. Bu şekilde karşılıklı iş birliği ile yürüyen projede bir doktora öğrencisi (Vedat Karakaş) ve üç lisans öğrencisi desteklenmiştir (Ali Taha Habiboğlu, Ahmet Coşkuner ve Kaan Özbozduman). Bu öğrencilerden Vedat Karakaş İtalya seyahat desteği ile İtalya'yı ziyaret ederek nano-aygıt tasarımında eğitim almış, konferans seyahat desteği ile uluslararası bir konferansta bildiri sunmuştur. Lisans öğrencileri de yine uluslararası konferanslarda sözlü ve poster olarak bildiriler sunmuşlardır. Bu yolla yüksek nitelikli genç bilim adamlarının yetiştirilmesine katkıda bulunulmuştur.

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ 15

1.1. Kapsam ve Amaç 15

2. LİTERATÜR ÖZETİ 17

2.1. Manyetik Ince Filmlerde Mikro-Manyetik Yapı: Vorteksler ve Skyrmionlar 17

2.2. Vorteks ve Skyrmion Dinamikleri 20

3. GEREÇ VE YÖNTEM 26

3.1. Mikromanyetik Modellemeler 26

3.1.1. Antivorteks Oluşumuna Elverişli Nano-Aygıt Tasarımı Modellenmesi 26

3.1.2. Yüksek Spin-Yörünge Etkileşimli Skyrmion Aygıtlarının Tasarımı 30

Nano Kontaklı Nano Sütunlarda Skyrmionlar 30

Yüksek DMI'a Sahip Nano-Sütunlar 32

3.2. Nano-Aygıt Üretimi ve Karakterizasyonu 33

3.2.1. İnce Film Üretimi ve Karakterizasyonu 34

3.2.1.1. Manyetron Saçtırma ile Film Büyütme 34

3.2.1.2. Termal Buharlaştırma ile Film Büyütme 36

3.2.1.3. Profilometre ile Kalınlık Kalibrasyonu 37

3.2.1.4. XPS ve EDX 41

3.2.1.5. VSM 50

3.2.1.6. BLS 58

3.2.2. Nano Aygıt Üretimi ve Görüntüleme Yöntemleri 60

3.2.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 60

3.2.2.2. Atomik ve Manyetik Kuvvet Mikroskobu 61

3.2.2.3. Elektron Demet Litografisi ile Aygıt Desenleme 67
Lift-off Yöntemi 68
İyon Aşındırma Yöntemi 70
Nano-Kontaklı yapılar 73
3.2.2.4. Fotolitografi ile Kontak Yüzeylerinin oluşturulması 75
3.2.2.5. Spin-Valf Nano Sütunlarının Üretim Basamakları 83
3.2.3. Elektriksel Ölçüm Düzeneğinin Kurulması 86
3.2.3.1. Ölçüm Platformu 86
3.2.3.2. Elektriksel Bağlantılar 89
3.2.3.3. AC Direnç Ölçümleri 91
3.2.3.4. Yüksek Frekans Sinyal Ölçüm Düzeneği 94
3.2.3.5. Sıcaklığa Bağlı Ölçüm Düzeneği 99
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 104
4.1. Astroid Nano-mıknatıslarının Statik ve Dinamik Özellikleri 104
4.1.1. Manyetik Karakterizasyon 108
4.1.2. Elektriksel Ölçümler 113
4.1.3. SHE Ölçümleri 120
4.2. Skyrmion Bazlı Aygıtların Manyetik ve Elektriksel Karakterizasyonu 124
4.3.1. Manyetik Karakterizasyon 126
4.3.2. Elektriksel Ölçümler 133
4.3. Sonuçlar ve Tartışma 137
5. KAYNAKÇA 140

Şekil Listesi

Şekil 1 Manyetik ince filmlerdeki mikro-manyetik yapılanma. Oklar bölgesel mıknatıslanmanın yönünü göstermektedir. (a) Tekli ve Çoklu domenler (b) Birkaç mikron ve mikron-altı ebatlarda vorteks ve benzeri kararlı yapılar düzlem-içi ve düzleme dik manyetik anizotropili malzemeler için gösterilmiştir. Figürlerin altındaki resimler Manyetik Kuvvet Mikroskobunda çekilmiş görüntülerdir [2][6][10][15] her bir kare 1μm boyutundadır. (c) Manyetik skyrmionlar ve deneysel olarak Lorentz Geçirimli Elektron Mikroskobu ile çekilmiş görüntüsü. 18

Şekil 2 Arayüzde görülen skyrmionların oluşumuna yön veren DMI etkisi. S ile gösterilen vektörler atomik spin vektörleridir. 19

Şekil 3 Vorteksin dış bir manyetik alan yok iken (a) ve düzlem-içi yukarı doğru bir manyetik alan varken (H) ki hali (b). 21

Şekil 4 a) Manyetik bir diskin merkezinden alınmış bir kesit içerisinde vorteksin merkezinin manyetik alan etkisiyle kenara doğru kayması gösterilmektedir. Alttaki şekilde merkezin jiroskobik hareketi çizilmiştir. Bu hareketin oluşturduğu örnek bir elektriksel sinyal grafikte sergilenmiştir, sinyalin GHz mertebesinde olduğu görülmektedir b) Çoklu katmanlı yapıda $Ni_{81}Fe_{19}$ alaşımı (Py) ve Cu normal metal tabakalarının dizilisi gösterilmiştir. Bu tarz bir yapıdan sabit akım geçmesiyle ve bu sayede STT ile tetiklenen salınımların oluşturduğu elektriksel sinyalin büyüklüğünün ve frekansının akımla değişimi. 21

Şekil 5 a) Anizotropik ve Dev Manyetik Direnç mekanizmaları ve b) spin polarize akım ile spin transfer torku şematik olarak çizilmiştir. FM ve NM filmlerindeki beyaz oklar ve M ile ifade edilen vektörler mıknatıslanma yönünü göstermektedir. 22

Şekil 6 a) Bir skyrmion üzerinden geçen elektronun spinin dönmesi ve bu sebeple yörüngesinin sapması çizilmiştir ([13]). b) Spin pompalama ile SHE. Manyetik ince filmin (Py) mıknatıslanması belirli bir (H alanı ile belirlenen) yön etrafında (AC manyetik alanı etkisiyle) titreştirilirken, yine H yönüyle belirlenen spin akımını Pt metaline pompalar. Burada SHE etkisiyle elektronlar sağa doğru sapar ve kenarlarda bir yük birikmesi görülür. Bu da Hall Voltajı olarak tespit edilir [37]. 24

Şekil 7 : (a) Astroid geometrisi ve anti-vorteks oluşumuna olanak sağlayacak boyutları. (b) Anti-vorteks yöneliminin şematik çizimi; üstten ve yandan bakış açılarıyla (c) Astroid içinde oluşacak anti-vorteks yöneliminin şematik çizimi. (d) Simülasyonlar sonucunda (a)'da gösterilen boyutlarda üretilen 20 nm kalınlığındaki bir Py ($Ni_{81}Fe_{19}$) ince filminde oluşan

mikro-manyetik yapılanma. Anti-vorteks oluşumu kesik çizgi ile halka içine alınmıştır. Siyah halkalar da vorteks oluşumlarını göstermektedir. 27
Şekil 8 Astroid nano mıknatısta oluşabilecek manyetik yapılanma: (a) AC manyetik alanda mıknatıslığı giderilmiş halde (b) AC manyetik alan sonrası düzleme dik bir manyetik alan uygulandıktan sonra. Vorteksler siyah halkalar, antivorteksler ise sarı halkalarla gösterilmiştir. 28
Şekil 9 Modellemede tespit edilen ve 300 mT, 10 psn'lik bir düzleme dik manyetik alan darbesi ile tetiklenen dinamiklerin oluşturduğu sinyaller tek asteroid (a) ve birbiri ile etkileşimli üç asteroid (b) için çizilmiştir. (c) Model çizimde manyetik alan darbesinden 20 psn sonra oluşan manyetik konfigürasyon 29
Şekil 10 (a) Skyrmion oluşumuna elverişli aygıt tasarımının kesit çizimi (b) Tasarımın kontaklar olmadan görünüşü ve Co katmanında oluşması beklenen balon tipi skyrmion (c) Nano-kontak altındaki Skyrmion oluşumu: Farklı topolojik skyrmion spin yönelimleri enerji seviyelerine göre sıralanmıştır. 31
Şekil 11 Aygıttan geçirilen DC akımla tetiklenen skyrmion "nefes alma" hareketinin akım yoğunluğuna bağlı salınım frekansı 31
Şekil 12 (a) Vorteks ve Radyal Vorteks yapıları ve CoFeB/Pt ara yüzünde DMI gücüne göre oluşabilecek manyetik konfigürasyonlar (b) Radyal vorteks oluşumunun gözlenebileceği ve D parametresinin ayarlanabileceği çoklu katmanlı yapı (c) Radyal vorteks dinamiklerinin çalışılabileceği aygıt tasarımı 33
Şekil 13 Saçtırma sisteminin basit bir çizimi 34
Şekil 14 AJA Manyetron Saçtırma Sistemi 35
Şekil 15 Torr International marka buharlaştırma makinesi ve içindeki elektron demet buharlaştırma ve akım ile buharlaştırma bölmeleri 37
Şekil 16 Kalınlık kalibrasyonu için kullanılan alttaşların şematik çizimi ve optik mikroskop görüntüsü 38
Şekil 17 KLA Tencor marka yüzey profilometresi ve çalışma prensibi 39
Şekil 18 Profilometre ile alınmış kalibrasyon ağı ölçümü 39
Şekil 19 X-ışını radyasyonu altında fotoelektrik etkinin gösterimi 42
Şekil 20 XPS çalışma prensibi 42
Şekil 21 SiO_2 filminin CasaXPS yazılımındaki tarama görüntüsü 44
Şekil 22 XPS verileri üzerinde piklerin ve pik parametrelerinin belirlenmesi 45

Şekil 23 EDX şematik çizimi 47
Şekil 24 Üretilen ince filminde yapılan EDX ölçümleri ve ölçüm sonucunda hesaplanan elementlerin ağırlık ve atomik yüzdeleri (a) Py ($Ni_{81}Fe_{19}$) (b) CoPt (c) CoNi..... 49
Şekil 25 Quantum Design Dynacool Fiziksel Ölçüm Cihazı (PPMS) sistemine entegre edilmiş Titreşen örnek manyetometresi (VSM) ve şematik çizimi..... 51
Şekil 26 Torna cihazında üretimi (a) ve bitmiş hali (b) gösterilen VSM cihazı çubukları Delrin denen yumuşak malzemeden yapılmıştır 51
Şekil 27 Histerezis döngüsü ferromanyetik bir malzeme için verilmiştir. Örnek bir manyetik malzeme üzerinde farklı manyetik alanlarda domen yapısının değişimi gösterilmiştir. Düzleme dik bir manyetik alanda aynı örneğin VSM ölçümü histerezis göstermemektedir. 52
Şekil 28 AFM/FM çoklu katmanlarında değiş-tokuş eğilimi etkisiyle oluşan M-H grafiği ve mikro-manyetik konfigürasyonun şematik çizimi..... 53
Şekil 29 Oda sıcaklığında düzlem içi bir manyetik alanda alınan VSM ölümleri Py, $Ni_{81}Fe_{19}$, CoNi, $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$, CoPt filmleri ve 60 tekrarlı [Pt(5nm)/$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ (1nm) /Ti(1nm] çoklu katmanlı yapısı için verilmiştir. 54
Şekil 30 Py filmin sıcaklığa bağlı doygunluk mıknatıslanması düşük sıcaklıklarda ve VSM-fırın modülü ile alınan veriler 55
Şekil 31 $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ malzemesinin VSM'de yapılmış sıcaklığa bağlı manyetik karakterizasyonu. Ölçümler düzleme paralel 2k Oe manyetik alan altında yapılmıştır. 56
Şekil 32 IrMn/Py katmanlı yapısının manyetik alana bağlı mıknatıslanma grafikleri (a) üretildikten sonra soğutulan ZFC ve (b) 10 T manyetik alanda soğutulan FC örnekleri için çizilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen değiş tokuş alanı (c) ve sıfırlayıcı alanın (d) sıcaklığa bağlı değişimi..... 57
Şekil 33 IrMn/Py yapısının 2 kOe manyetik alanda alınmış mıknatıslanmasının sıcaklıkla değişimi..... 57
Şekil 34 BLS ölçümü şematik çizimi 58
Şekil 35 [Pt(5 nm)/CoFeB(1)/Ti(1)]x15 filminde BLS ölçümü..... 59
Şekil 36 SEM şematik çizimi ve örnek bir SEM görüntüsü 60
Şekil 37 AKM çalışma prensibi ve örnek bir yüzey profili 61
Şekil 38 AKM ile alınmış SiO_2 filminin yüzey topografisi 63
Şekil 39 MKM çalışma prensibi ve örnek topografi görüntüsü ve benzer yapıdaki MKM görüntüsü 64

Şekil 40 Bruker AKM'de manyetik alan altında MKM görüntülemeleri için tasarlanmış manyetik alan uygulayan platformları (b) düzleme dik ve (c) düzleme paralel manyetik alan uygulayabilmektedir.....65
Şekil 41 (a) İletken-AKM çalışma prensibi (b) Bruker Dimension Edge model AKM ve daire içinde iletken AKM modülü (c) İletken AKM için özel prob tutucu bir kablo bağlantısı içerir (d) bu modülün yükselteci.....66
Şekil 42 SUNUM'da bulunan EBL cihazı ve örnek bir astroid çizimi.....67
Şekil 43 Astroid aygıtları için yapılan doz testi.....68
Şekil 44 Lift-Off yöntemiyle astroid şekilli nano-mıknatıs üretim aşamaları.....69
Şekil 45 Lift off sonrası astroid aygıtları.....70
Şekil 46 Nano-diskler için çeşitli çaplarda hazırlanmış disk dizinleri ve üretim sonrası alttaş üzerine çizilen desenin optik mikroskop görüntüsü.....71
Şekil 47 İyon aşındırması ile nano-disklerin üretim basamakları.....72
Şekil 48 Nano-disklerin üretim sonrası AKM görüntüleri (a) 100 nm ve (b) 400 nm çaplı disk dizinleri.....73
Şekil 49 (a) KOH aşındırması için hazırlanan alttaşların şematik çizimi. Maske üzerine açılan kare pencereler gösterilmiştir. (b) KOH aşındırma işlemi (c) Aşındırma işlemi sonrası çekilmiş SEM görüntüsü.....74
Şekil 50 SUNUM'daki Midas maske hizalayıcı.....75
Şekil 51 Mikro-tel üretimi için kullanılan papyon şekilli fotomaske ve kontak maskesi hizalama işaretleri ile gösterilmiştir.....76
Şekil 52 Birinci maskenin üretiminden sonra bir papyon deseni ve hizalama sonrası kontak yerleştirilmiş hali.....77
Şekil 53 Astroid aygıtları için tasarlanan maske ve hizalama işaretleri.....78
Şekil 54 Spin-valf yapıları için tasarlanan üst kontak maskesi.....79
Şekil 55 Astroid aygıtına fotolitografi ile kontak konulması işlemi sonrası optik mikroskop görüntüsü.....80
Şekil 56 Astroid aygıtının fotolitografi sonrası çekilmiş SEM görüntüsü.....81
Şekil 57 Astroid aygıtına fotolitografi ile kontak konulması işlemi sonrası optik mikroskop görüntüsü.....82
Şekil 58 Üretilmiş spin-valf aygıtlarının fotolitografi ile desenlenmiş üst elektrotlarının optik mikroskop görüntüsü.....82
Şekil 59 Spin valf nano-sütunu ve kontaklar ile birlikte tasarımı.....83

Şekil 60 Spin valf aygıtlarının üretim prosedürü 84
Şekil 61 Üretilmiş spin-valf aygıtlarının optik mikroskop görüntüsü 85
Şekil 62 (a) Örnek platformunun ve (b) mikroskop tutucunun Solidworks çizimleri 86
Şekil 63 Üretilen örnek platformu ve mikroskop tutucu, elektromıknatıs ve mikroskop ile birlikte 87
Şekil 64 Yonga tutucu için üretilen ek platform ve bunun örnek platformuna yerleştirilmiş hali ... 88
Şekil 65 (a) Cascade marka RF prob kafası (b) Prob astroid aygıtının kontaklarına elektriksel bağlantı yaparken çekilmiş mikroskop görüntüsü 90
Şekil 66 (a) KnS marka 4700 model Wire-Bonder ultrasonik kablo yapıştırıcı (b) Wedge adı verilen çelik iğne (c) wire-bonding yönteminin şematik bir çizimi 90
Şekil 67 (a) 44-pinli yonga tutucu üzerinde wire bonding (b) 8-pinli bir yonga tutucu üzerinde wire-bonding (e) 8-pinli yonga tutucuya kablo bağlamak için üretilen Al yonga destek platformu 91
Şekil 68: AC direnç ölçümü için tasarlanan devre. R_x ile belirtilen 0.1 m Ω çözünürlüğe sahip bir değişken direnç ve $R_x+\delta$ ile ifade edilen astroid direncidir. 92
Şekil 69 AC direnç ölçüm düzeneği 93
Şekil 70 Labview yazılımı ile yazılmış AMR ölçüm programı 94
Şekil 71 Yüksek frekans sinyal tespiti için hazırlanmış düzenek. Osiloskopta 10 MHz bir test sinyali ve yükseltilmiş hali görülmektedir. 95
Şekil 72 Frekans uzayında sinyal analizi yapan ve kaydeden Labview programı 96
Şekil 73 10 MHz test sinyali ve tüm frekans uzayındaki voltaj salınımları 97
Şekil 74 Yüksek frekans ölçüm bağlantılarının şematik çizimi 98
Şekil 75: Radyo Frekansındaki sinyalleri tespit ettiğimiz ölçüm düzeneğinde alınan 30 MHz lik bir test sinyalinin spektrumu lacivert karelerle gösterilmektedir. Bu ölçümde kaydedilen elektronik gürültü ilk raporda bildirilen gri dairelerle çizilmiş gürültüye kıyasla daha küçüktür. 99
Şekil 76 PPMS'e entegre edilmiş elektriksel ölçüm düzeneği PPMS kontrol bilgisyar ünitesi, örnek çemberi ve cihaz sisteminden oluşur 100
Şekil 77 Lemo kablosunun bağlı olduğu anahtar kutusu ve PPMS'e ve cihaz sistemine bağlı görüntüsü 101
Şekil 78 PPMS örnek tutucusu (a), bunu düzlem içi manyetik alan sağlayacak biçime dönüştürecek tutucu ayak tasarımı ve tutucu ayağın (b)için hazırlanan yonga tutucu düzenek 102

Şekil 79 (a) Py ince filminden üretilmiş papyon desenli aygıt ve Au elektrotlar üzerine wire-bond tekniğiyle yapılmış bağlantılar (b) sıcaklığa bağlı öz direnç ölçümü 103
Şekil 80 Üretilen H-tipi astroid aygıtları 105
Şekil 81 Üretilen M tipte Astroid aygıtları 106
Şekil 82 SH1 örnekleri 107
Şekil 83 Astroidlerin MKM görüntüleri (a, c) ve aynı manyetik alan koşullandırılmasındaki modellemesi (b, d). MKM'de beklenen kontrast değişiklikleri modelde kırmızı-mavi tonlarla belirtilmiştir. (a) ve (b) astroidler AC manyetik alanda mıknatıslanmaları giderildikten sonra oluşan mıknatıslanma konfigürasyonunu göstermektedir. Astroid merkezinin etrafında bir anti-vorteks (kesik çizgiyle daire içine alınmış bölgeler) ve birkaç vorteks görülmektedir (siyah daireler). (c) ve (d) astroid AC manyetik alan sonrasında düzleme dik bir alanla mıknatıslandıktan sonra manyetik alanın kapatılması sonucunda ortaya çıkan konfigürasyonu resmetmektedir. Beyaz halkalar ve siyah halkalarla gösterildiği üzere manyetik alan koşullaması sonucunda merkezin çevresinde karşılıklı iki anti-vorteks oluşmuştur. 109
Şekil 84 Farklı örneklerin MKM taramaları 110
Şekil 85 SHE aygıtının MKM görüntüsü 111
Şekil 86: Bir astroide kutularda belirtilen manyetik alanların a'dan d'ye doğru sırayla uygulanması sonucu oluşan manyetik konfigürasyonun MKM görüntüleri. 112
Şekil 87 GMW kutupları arasına yerleştirilmiş astorid aygıtı üzerindeki bağlantı noktaları: 1-2 manyetik alana paralel, 3-4 manyetik alana dik akım geçirirler 113
Şekil 88 HI-3 örneklerinden birinde AMR ölçümü 114
Şekil 89 Mikromanyetik modelleme sonucu oluşan AMR eğrisi ve ve çeşitli alanlardaki manyetik konfigürasyon 115
Şekil 90 MT3 örneğinde manyetik alana paralel (a) ve dik (b) gönderilen akımlarda alınmış AMR 116
Şekil 91 Patlamış MT3 örnekleri 116
Şekil 92 8 mA DC akımla tetiklenen anti-vorteks dinamiklerinin frekans uzayında oluşturduğu sinyal 210 MHz merkezli bir pik olarak kaydedilmiştir. 117
Şekil 93 Mikromanyetik modellemede 300 mT ve 10 psn'lik düzleme dik bir manyetik alan darbesi sonrasında (20 psn sonra) oluşan sinyal 118
Şekil 94 HT1 örneği üzerinde yapılan yüksek frekans ölçümlerinde frekansın akıma bağlı değişimi 119

Şekil 95 SH1 aygıtlarında SHE'nin şematik çizimi 120
Şekil 96 İletken-AKM ile SHE ölçümleri şematiği 121
Şekil 97 Au üst kontak üzerinde yapılan iletken AKM görüntüleri 121
Şekil 98 SHE aygıtlarında Şekil 96'daki kuruluma göre alınan ölçümde iletken AKM'nin tespit ettiği akımın Ta elektrotlardan geçen akıma göre değişimi 122
Şekil 99 Radyal Vorteks Skyrmionlarına elverişli aygıt tasarımları 124
Şekil 100 NS1 ve NS2 örneklerinin AKM görüntüleri 125
Şekil 101 NS1 örneklerinin MKM görüntüleri AC mıknatıslığı giderilmiş örneklerin üzerine düzleme dik uygulanmış manyetik alan sonrası (a) 300 nm ve (b) 1200 nm çaplı disklere 800 mT uygulandıktan sonra (c) 400 nm ve (d) 1200 nm disklere 9T uygulandıktan sonra 126
Şekil 102 DMI gücüne bağlı olarak CoFeB/Pt katmanlarında oluşabilecek manyetik yapılanmalar 127
Şekil 103 NS2 örneklerinin MKM görüntüleri disk çapları resimlerin üzerinde belirtilmiştir 128
Şekil 104 Modelleme sonuçlarına göre radyal vorteks oluşumu ve hareketi sırasında oluşabilecek radyal vorteks (RV) ve kutbu ters bakan anti-radyal vorteks (ARV) kombinasyonları 129
Şekil 105 300 nm çaplı disklerde radyal vorteks yapılanması 130
Şekil 106 Radyal vorteks (a) ve normal vortekslerin (b) düzleme paralel ve sağa doğru uygulanan manyetik alan altında histerezis eğrileri ve alan büyüklüğüne bağlı hareketleri 131
Şekil 107 300 nm çaplı disklerde yapılan MKM görüntülemeleri sırasıyla: (a) manyetik alanda (yani AC manyetik alan koşullandırması sonrasında), (b) düzleme paralel ve şekilde gösterildiği yönde 13 mT bir manyetik alan altındayken, (c) düzleme paralel ve şekilde gösterildiği yönde 25 mT bir manyetik alan altındayken ve (d) son olarak manyetik alan kaldırıldıktan sonra 0 manyetik alan altında 132
Şekil 108 SV2 örneğinin yüksek frekans dinamiklerinin tespiti 134
Şekil 109 SV2 ve SV7 örneklerinde yüksek frekans dinamiklerinin akımla değişimi 135

Tablo Listesi

Tablo 1 Manyetron Saçtırma Koşulları ve Büyüme Hızları……..……..40
Tablo 2 İyon aşındırma hızları……41
Tablo 3 XPS analizi sonuçları……46
Tablo 4 Üretilen Örneklerin……...104
Tablo 5 Örneklerin direç aralıkları……...113
Tablo 6 SV örneklerinin direnç değerleri……133

Özet

Yığın (bulk) halinde, makroskopik düzeyde, basitçe kuzey ve güney kutuplarından oluşan bir mıknatıs nano boyutlara indirgendiğinde tek yönelimli (single domain) mıknatıslanmadan, vorteks, anti-vorteks ve baloncuklara (bubble) kadar çok farklı mikromanyetik konfigürasyonlar gösterebilir. Bu oluşumlardan hangisinin kararlı olacağını belirleyen birbirleriyle yarışan magnetostatik, değiş-tokuş (exchange) ve magneto-kristal ve/veya şekil anizotropisi enerjileridir. Bununla beraber güçlü spin-yörünge yönelimli ağır metallerle (Pt gibi) arayüze sahip manyetik nano-aygıtlarda spin yönelimleri döngüsel yapı gösteren ve Skyrmion adı verilen vorteks benzeri farklı topolojik yapılara rastlanmıştır. Bu döngüsel yönelimlere manyetik kristaldaki akis (inversion) simetrisinin bozulması ve buna bağlı Dzyaloshinskii–Moriya etkileşimlerinin (DMI) yol açtığı düşünülmektedir. Bu projenin ana bilimsel hedefi bu tür karmaşık spin yönelimlerinin oluşum koşullarının mikromanyetik simülasyonlarla belirlenmesi; söz konusu oluşumların gözlemlenebileceği farklı geometrili nano-yapıların fabrikasyonu; üretilen aygıtların spin kutuplanmış elektrik akımı, dış manyetik alan ve sıcaklığa bağlı dinamik davranışlarının güçlü ve zayıf spin-yörünge etkileşimi durumlarında incelenmesinden ibarettir. İtalya tarafında Prof. Finocchio ve Prof. Carpentieri grupları tarafından nümerik modelleme ile belirlenen aygıt tasarımları İtalya'da Prof. Albertini ve Prof. Tiberto grupları ve eş zamanlı olarak Türk tarafında üretilmiştir. Oluşan karmaşık spin yönelimleri manyetik kuvvet mikroskobunda görüntülenmesi Prof. Torun'un da danışmanlığında Türk tarafında gerçekleştirilmiştir. Üretilen astroid şekilli $Ni_{81}Fe_{19}$ nanomıknatıslarda kararlı anti-vorteks yapıları başarıyla oluşturulmuştur. Bu aygıtların elektriksel özelliklerinin manyetik alanla değişimi incelenmiş, 200 mΩ'luk direnç değişimi (manyetik-direnç, MR) kaydedilmiştir. MR mekanizması bir okuma yöntemi olarak kullanılarak aygıtların direk akım altında spin-aktarımı yoluyla tetiklenen radyo frekansındaki magneto-dinamik özellikleri araştırılmış, manyetik alan, spin-kutuplanmış akım ve sıcaklığa bağlı tüm elektriksel karakterizasyonu Türk tarafında gerçekleştirilmiştir. Yoğun spin-yörünge etkileşimli Pt metalinin üzerine büyütülen manyetik ince filmlerin kullanıldığı çoklu katmanlı manyetik nano-disklerde DMI etkileşimi incelenmiş, bu etkinin belirli değerlerinde özgün radyal-vorteks skyrmion yapılarının oluştuğu gözlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları çok yoğun veri depolama üniteleri, manyetik mantık devreleri, yonga (çip) üzerinde mikrodalga üreteçleri, modülatör ve dedektör, skyrmion bazlı spin-tork belleği ve spin mantık aygıtları gibi spintronik aygıtlarda potansiyel uygulama alanı bulabilecek aygıt tasarımları için yol göstericidir.

Abstract

A magnet in bulk form, consisting of simply a north and south pole on the macroscopic scale may display different micromagnetic configurations from single domain to vortex, anti-vortex and bubble when reduced to nanoscale dimensions. The stable spin structure is determined by a complex trade-off balance among the magnetostatic, exchange, magneto-crystalline and shape anisotropy energy terms. In addition, in nano-devices that have an interface between a strong spin-orbit coupling heavy metal such as Pt, Ta or W and a magnetic metal, vortex like topological structures with a chiral character called Skyrmions have recently been observed. The underlying mechanism for such chiral orientations is thought to be the lack or breaking of inversion symmetry in magnetic crystals and the Dzyaloshinskii–Moriya interaction (DMI) resulting from it. The main goal of the proposed project is the investigation of the formation conditions of such spin orientations through micromagnetic simulations; the nanofabrication of different geometries that lead to such formations; the understanding of the spin-polarized current, external magnetic field and temperature dependence of the dynamic behavior in the presence of strong or weak spin-orbit coupling and the study of the Spin-Hall effects in this extraordinary spin structure. Device structures were determined by numerical modelling performed by Prof. Finocchio and Prof. Carpentieri groups on the Italian side. The devices were fabricated by Dr. Albertini and Dr. Tiberto groups and the Turkish team. The direct imaging of the obtained extraordinary spin configurations was performed via magnetic force microscopy by the Turkish team under supervision from Prof. Torun. Stable anti-vortex structures were successfully nucleated and imaged in astroid-shaped nanomagnets made of $Ni_{81}Fe_{19}$. Electrical characterization of these nanodevices under varying magnetic field showed a 200 mΩ resistance change, hence the anisotropic-magnetoresistance (MR) effect. With MR as the read-out mechanism, radio frequency dynamics of the magnetic micro-configurations triggered by spin-transfer torque from a spin polarized current were analyzed as a function of current, magnetic field and temperature. DMI interaction was investigated in magnetic nano-pillars with magnetic films deposited on high spin-orbit coupling material Pt. Nucleation conditions for unique skyrmion structures called radial-vortices were studied in these nano-pillars both theoretically and experimentally. Radial vortices were successfully observed in magnetic force microscope. The results of this project gives way to a variety of appliactions of these unique magnetic micro-configurations in data nanoscale memories, oscillators, and radio frequency modulators and detectors storage and processing with Skyrmion based spin-torque memories and spin logic devices.

1. GİRİŞ

1.1. Kapsam ve Amaç

İleri nano-fabrikasyon tekniklerinin geliştirilmesiyle birlikte nano boyutlara indirgenmiş manyetik malzemelerin gerek geometrik şekil gerekse boyutlarına bağlı olarak kazandığı yeni işlevleri tanımlamak mümkün olmuştur. Bu işlevlerin başında yüksek yoğunluklu veri depolama teknolojileri, manyetik mantık devreleri, rf nano-osilatör, modülatör ve detektör teknolojileri, biyo-manyetik algılayıcı teknolojileri gibi bir kısmı şimdiden ticarileşmiş bir kısmı ise araştırma laboratuvarlarında halen geliştirilmekte olan uygulamalar yer almaktadır. Bu tür spintronik aygıtların geliştirilebilmesi için nano-mıknatıslardaki mikro-manyetik konfigürasyonların hem oluşum koşullarının iyi anlaşılması, hem de elektrik akımı ve manyetik alan ile kontrol edilebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla öncelikle manyetik enerjiler arasındaki hassas dengelerin doğru bir şekilde modellenmesi hem de üretim koşullarına bağlı deneysel gerçekliklerle ilişkilendirilmesi zorunludur.

Önerilen projede anti-vorteks gibi vorteks benzeri mikro-manyetik konfigürasyonların ve özellikle güçlü spin-yörünge etkileşimli ince film ara yüzleriyle etkileşim sonucu çekirdeklenen döngüsel yapılar olan skyrmionların radyo frekansı dinamiğinin manyetik alana ve uygulanan elektrik akımına bağlı olarak karakterizasyonu hedeflenmektedir.

2007 Nobel Fizik ödüllü Albert Fert ve çalışma arkadaşları Mart 2013'te Nature Nanotechnology dergisinde yayınladıkları makalede vorteks benzeri skyrmionların kolay hareket edebilirlik ve yüksek kararlılık özellikleriyle hem geleceğin ultra-yoğun veri depolama teknolojilerinde hem de manyetik mantık aygıtlarında önemli bir rol edineceklerini öngörmüşlerdir.

Bu projenin temel hedefi $Ni_{81}Fe_{19}$ (permalloy) ve CoFeB alaşımları ile düzlem içi anizotropiye sahip ince filmlerde ve onlardan üretilen nano-mıknatıslarda vorteks benzeri ve skyrmion döngüsel spin yapılarının oluşumu, manyetik alan ve spin kutuplanmış akım ile etkileşimlerinden tetiklenen mıknatıslanma dinamiğinin anizotropik manyeto-rezistans yöntemiyle ölçümü ve söz konusu dinamik davranışın güçlü spin-yörünge etkileşimleri eşliğinde (Pt veya Ta ince filmlerle ara yüz) modifikasyonu ve mikro-manyetik simülasyonlar ve ölçüm sonuçları ışığında optimum nano-aygıt parametrelerinin belirlenmesi ve başarıya ulaşılması durumunda patentlenmesinden oluşmaktadır. Her ne kadar spin transferle tetiklenen vorteks hareketi kavramı açıkça gösterilmiş olsa da, bu konudaki araştırmalar henüz vorteks benzeri skyrmion

yapılarını kapsamamaktadır. Bu düzlem içi anizotropiye sahip malzemeler genellikle anizotropinin aygıt geometrisiyle belirlendiği yumuşak manyetik malzemelerdir.

Skyrmionlar mobiliteleri ve kararlı yapıları ile uygulamalar açısından oldukça yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu uluslararası iş birliğiyle bu potansiyelin değerlendirilmesi ve bu konuda yayınların hazırlanması hedeflenmiştir.

Özetle projenin temel hedefleri aşağıda maddeler halinde listelenmiştir:

1. Düzlem içi anizotropili çok katmanlı manyetik ince filmlerin DC manyetron saçtırma metoduyla (DC Magnetron Sputtering) üretimi

2. İnce film üretim koşulları (sıcaklık, Argon kısmi basıncı, uygulanan güç gibi) optimize edilerek elde edilen düzlem içi anizotropili manyetik filmlerden nano/mikro yapılandırma için gerekli nano-fabrikasyon prosedürlerinin geliştirilmesi

3. Üretilen ince filmlerin x ışını kırınımı (XRD) ile kristal yapı ve x-ışını foto-elektron spektrometresi (XPS) ve enerji dağılımlı x ışını spektrometresi (EDX) ile stokiometrisinin karakterizasyonu

4. Manyetik anizotropi, mıknatıslanma gibi manyetik özelliklerin titreşen örnek manyetometresi ile sıcaklığa bağlı olarak ölçülmesi.

5. Üretilecek aygıt geometrilerinin elde edilen malzeme parametreleri dikkate alınarak belirlenebilmesi için mikro-manyetik simülasyonların yapılması

6. Nümerik çalışmadan elde edilen veriler ışığında vorteks ve benzeri yapıların ve skyrmionların oluşumu beklenen nano-mıknatıs geometrilerinde nano-aygıt fabrikasyonu

7. Manyetik kuvvet mikroskobunda doğrudan görüntüleme yöntemiyle oluşan spin yönelimlerinin teşhisi.

8 . Spin polarize akım aşılamasıyla çekirdeklenen skyrmionların manyetik alana ve elektrik akımına bağlı radyo frekans hareket dinamiğinin anizotropik manyeto-rezistans sinyalindeki değişimden faydalanarak ölçülmesi

9. Mikrodalga üreteci, manyetik mantık devreleri ve veri kayıt cihazı gibi spintronik aygıt uygulamaları için potansiyelinin değerlendirilmesi ve optimum performans koşullarının belirlenmesi

10. Ta ve Pt tabanına sahip yüksek spin-yörünge etkilesimli yeni aygıtlar üretilmesi ve yukardaki ölçümlerin tekrarlanması

11. Bu geometride Spin Hall etkilerinin incelenmesi.

12. Uluslararası geniş katılımlı bir ekiple hızlı sonuçlar elde edilmesi ve Skyrmion davranışları konusunda yüksek yaygın etkili öncü makalelerin yayınlanması.

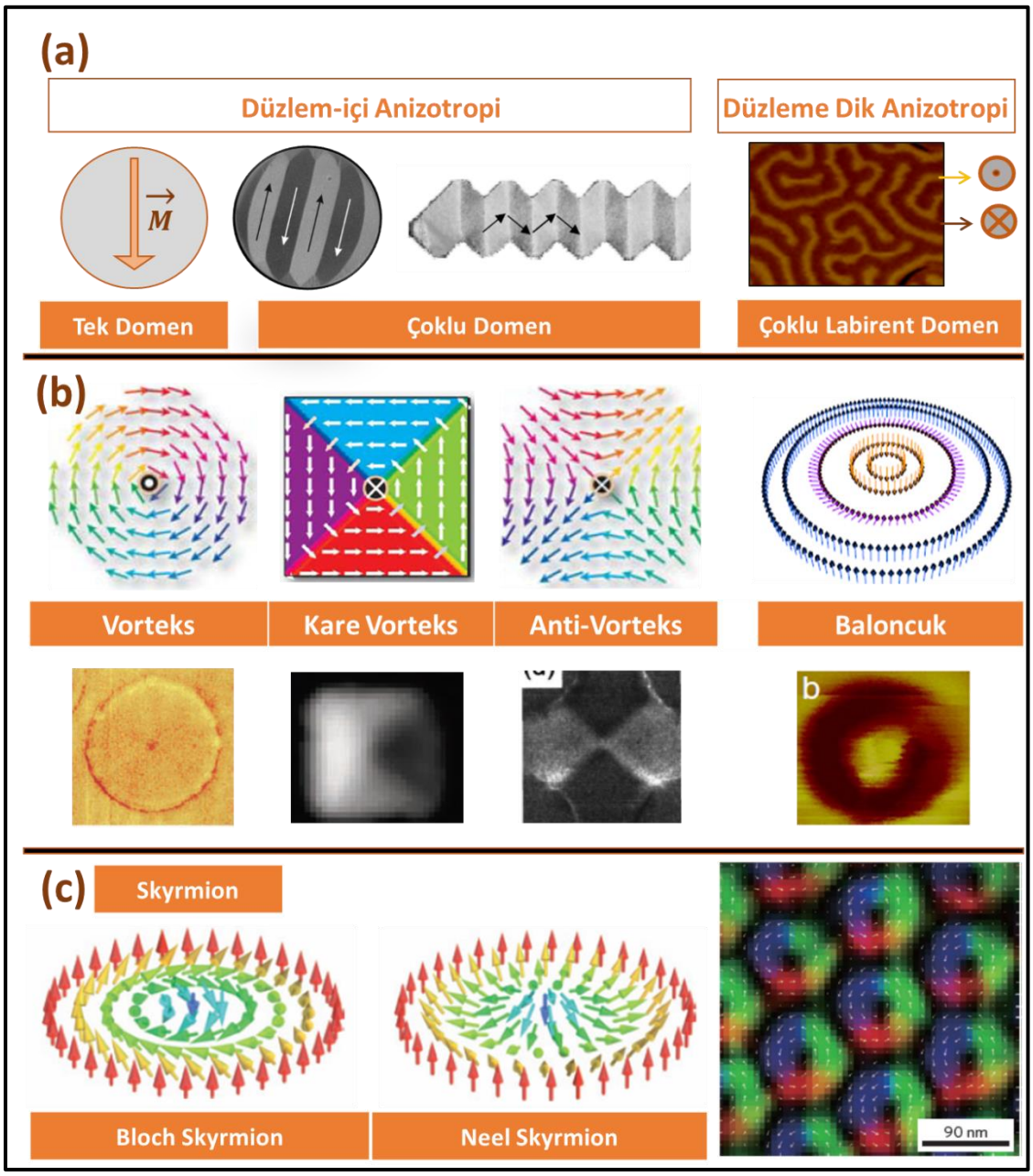
2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Manyetik Ince Filmlerde Mikro-Manyetik Yapı: Vorteksler ve Skyrmionlar

Manyetik nano yapılardaki manyetik konfigürasyon birbiriyle yarışan manyeto statik enerji, atomik manyetik momentlerin değiş-tokuş enerjisi (exchange) ve manyeto-kristal anizotropi enerjileri tarafından belirlenir [1]. Yumuşak manyetik malzemeler düşük manyetik anizotropiye sahiptir ve küçük ebatlara inildikçe (birkaç mikrometre veya daha küçük) çok çeşitli mıknatıslanma şekillerine olanak sunarlar. Bu tip nano-mıknatıslardaki mıknatıslanma dinamikleri kalınlık, boyut, geometri ve malzeme cinsine göre değişir. Manyetik enerjiler arasındaki hassas dengeler ve nano-mıknatısların üretim koşullarının bu mıknatıslanma üzerindeki etkileri anlaşıldıkça manyetik mikro-konfigürasyon kontrol edilebilir hale gelmektedir. Bu da teknolojik açıdan nano-mıknatısların manyetik alan sensörleri, manyetik hafıza üniteleri ve mikro-dalga osilatörleri ve detektörleri olarak kullanılmalarını mümkün kılmaktadır.

Manyetik bir ince filmin kalınlığı değiş-tokuş uzunluğundan (exchange length) az olduğunda tek bir mıknatıslanma katmanı oluşur, yani mıknatıslanma derinlikle değişmez. Bu tarz bir ince filmde şekil anizotropisi mıknatıslanmanın yönünü belirler [2]. Çeşitli mıknatıslanma yönelimleri Sekil1'de gösterilmiştir. Birkaç mikrondan daha büyük mıknatıslarda enerji olarak en elverişli yapılanma, çoklu manyetik domen yapılanmasıdır. Örneğin Sekil1a'daki düzlemiçi mıknatıslanmış zikzak şekilli nano-mıknatısın mıknatıslanma yönü filmin kenarlarını takip etmektedir [3]. Sekil1a'da gösterilen düzleme dik anizotropiye sahip malzemelerde düzlemden dışarı ve içeri doğru mıknatıslanmış labirent-tipi domenler görülür [4].

Çok küçük boyutlarda nano-mıknatıslar tek manyetik domene sahiptir. Tekli ve çoklu domen yapıları arasındaki geçişte manyetik-vorteks adı verilen kararlı yapılanmalar görülür (bkz. Sekil1b) [1]. Düzlem içi mıknatıslanmaya sahip nano-mıknatıslardaki vorteksler ve anti-vorteks Sekil1b'de gösterilmiştir. Manyetik momentler belirli bir merkez etrafında daire çizerken (kiralite, c) merkezde değiş-tokuş enerjisini minimize etmek adına yüzeye dik hizalanırlar (kutuplaşma, p). Yukarı veya aşağı kutuplaşma (p=±1) ve saat yönü veya ters yönü kiraliteye (c=±1) sahip dört kararlı vorteks yapılanması vardır [5]. Güçlü spin-yörünge etkileşimine sahip bir metalin üzerine büyütülmüş manyetik nano-disklerde yapılan bir çalışmada bu kararlı hallerden bazılarının tercih edildiği görülmüştür. Bunun sebebinin ara yüzeydeki spin-yörünge etkileşimleri (Dzyaloshinskii-Moriya Etkisi –DMI) olduğu anlaşılmıştır [5].

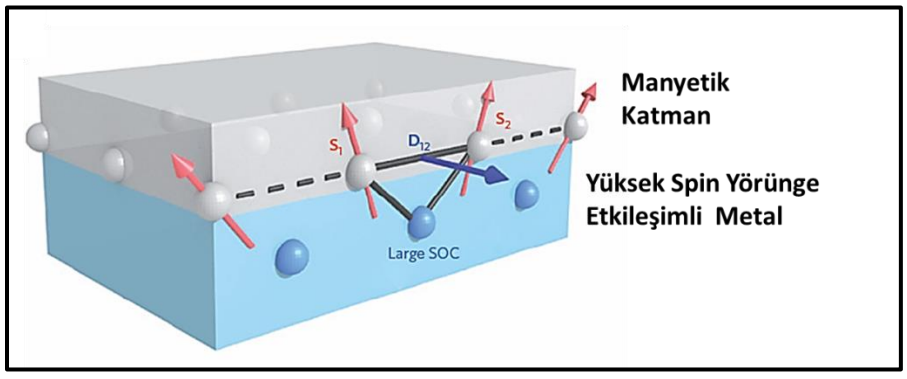


Şekil 1 Manyetik ince filmlerdeki mikro-manyetik yapılanma. Oklar bölgesel mıknatıslanmanın yönünü göstermektedir. (a) Tekli ve Çoklu domenler (b) Birkaç mikron ve mikron-altı ebatlarda vorteks ve benzeri kararlı yapılar düzlem-içi ve düzleme dik manyetik anizotropili malzemeler için gösterilmiştir. Figürlerin altındaki resimler Manyetik Kuvvet Mikroskobunda çekilmiş görüntülerdir [2][6][10][15] her bir kare 1μm boyutundadır. (c) Manyetik skyrmionlar ve deneysel olarak Lorentz Geçirimli Elektron Mikroskobu ile çekilmiş görüntüsü.

Sekil1b'de figürlerin altında deneysel olarak çekilmiş Manyetik Kuvvet Mikroskobu (MKM) görüntüleri verilmiştir. Tek başına kararlı halde 1-2 mikron ve altı manyetik disklerde gözlenirken daha büyük nano-mıknatıslarda vorteks çiftleri veya vorteks-anti-vorteks çiftleri gözlemlenebilir [1]. Manyetik anti-vortekslerin -1 değerinde bir sarılma sayısı vardır (n). Vorteksler için bu sayı +1'dir. Vorteks ve anti-vorteksler ±½ değerinde "skyrmion" numarasına (q=nc/2) sahiptir. Geçiş bölgesindeki manyetik momentlerin hizalanmasına göre baloncuğun skyrmion numarası 0 veya 1 olabilir[10]. Manyetik anti-vorteks yapıları, vorteks yapılanmasının aksine kararlı değildir ve fiyonk (cross-tie) yapılarında vortekslerle beraber belirirler [1][6][7]. Tek başlarına kararlı halde bulunmamalarının bir sebebi buradaki manyetik yapının kapanmaya elverişli olması için vortekslerin varlığının gerektiğidir [6]–[9]. Teorik olarak şekil anizotropisinden faydalanılarak manyetik kapanmaya elverecek şekilde desenlenmiş nano-mıknatıslarda gözlenebileceği öne sürülmüştür [6][7]. Sekil1b'deki anti-vorteks MKM görüntüsü çift-8 (astroid) şekilli bir nano-mıknatısın merkezinden alınmıştır [6][8].

Düzleme dik mıknatıslanan malzemelerde görülen vorteks benzeri yapılanmaya manyetik baloncuk denir. Sekil1b'de de gösterildiği gibi mıknatıslanma merkezde yukarı doğru iken kenarlarda aşağı doğrudur ve düzleme dik anizotropisi olan mikro ve nano-disklerde gözlenir [10].

Son yıllarda oldukça ilgi çeken ve yoğun araştırma konusu olan manyetik skyrmion çeşitleri Şekil 1c'de gösterilmiştir. Vorteks benzeri bu manyetik düğüm şekilli yapılar için skyrmion numarası ±1'dir [11]. Belirli bir simetri merkezi olmayan kiral kristallerde veya manyetik ince filmlerin ara yüzlerinde görülen skyrmionlar tek başlarına elde edildiklerinde manyetik solitonlar olarak davranırlar ve çok küçük boyuttadırlar (birkaç yüz nm) [12][13]. Şekil 2'de



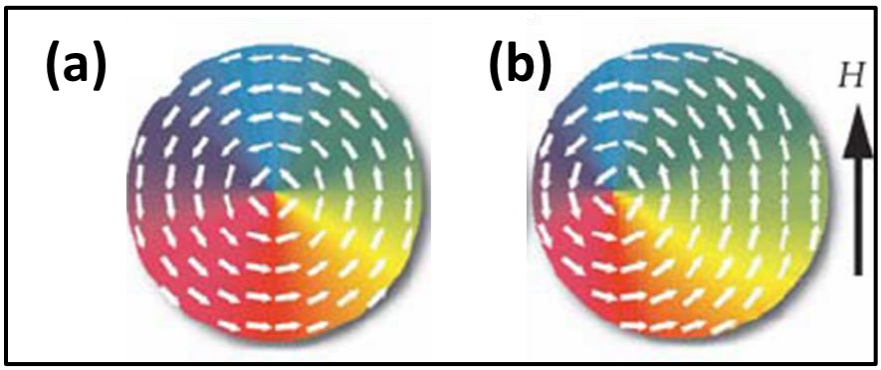
Şekil 2 Arayüzde görülen skyrmionların oluşumuna yön veren DMI etkisi. S ile gösterilen vektörler atomik spin vektörleridir.

yüksek spin yörünge etkileşimli metal-manyetik metal ara yüzünde atomik spinlerin komşu yüksek spin-yörünge etkileşimli atom ile oluşturduğu DMI etkisi ve bunun sonucu olan DMI vektörü gösterilmiştir. Bu etki, S_1 vektörünü S_2'ye kıyasla D vektörü etrafında dönmesine neden olur. Bu da D'nin yönüne göre lokal spinlerin Şekil 1c'deki gibi momentler çap boyunca veya radyal olarak dönmelerine sebep olur [11]. Sarım tipinden bağımsız olarak merkezde mıknatıslanma yukarı doğru iken skyrmionun kenarlarında aşağıya doğrudur. Skyrmionlar deneysel olarak ilk helik mıknatıslarda düşük sıcaklıklarda gözlenmiştir. Şekil1c'de $Fe_{0.5}Co_{0.5}Si$ filminde deneysel olarak Lorentz Geçirimli Elektron Mikroskobu ile çekilmiş skyrmion kafesi görüntüsü gösterilmektedir [12]. 2011 yılında yapılan bu çalışmadan bugüne oda sıcaklığında skyrmionlar oluşturmak ve görüntülemek için olan yarış sürmektedir. Bunun ilk örneği Fe/Ir ara yüzünde manyetik alana gerek olmadan taramalı tunelleme mikroskobunda gözlemlenmiştir [14]. Bu gelişmeler teknolojik açıdan umut vericidir çünkü skyrmion bazlı yüksek yoğunlukta hafıza üniteleri, küçük RF osilatörleri ve detektörleri gibi cihazların geliştirilmesini mümkün kılar.

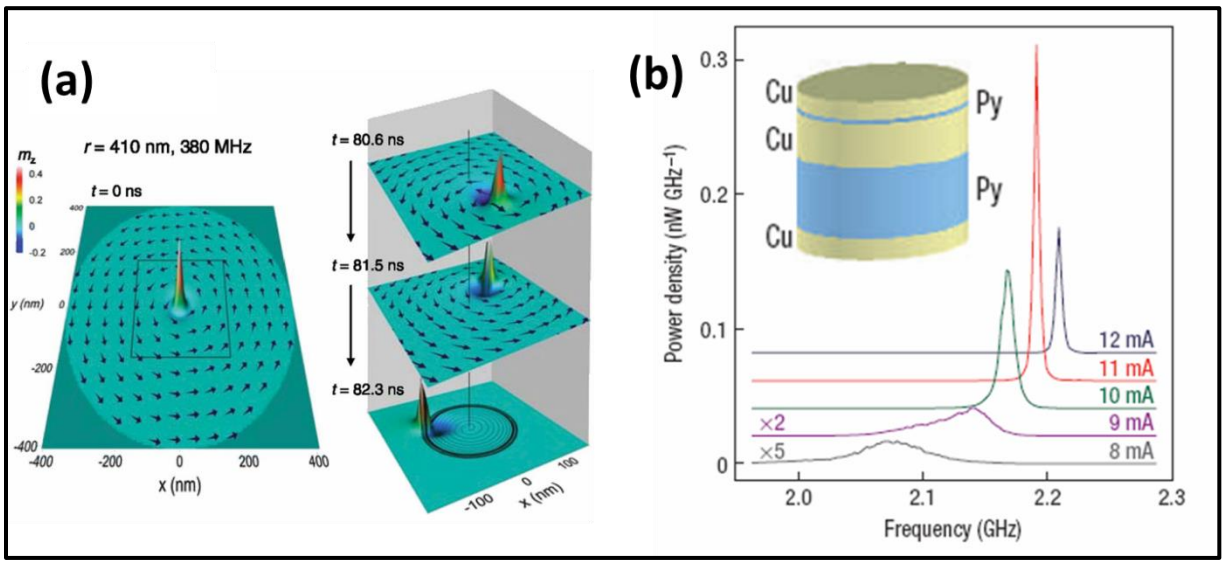
2.2. Vorteks ve Skyrmion Dinamikleri

Çoklu domenli nano-mıknatıslar dış bir manyetik alana maruz kaldıklarında manyetik alan yönündeki domenler büyür ve manyetik arttıkça tek domen haline geçiş gösterir. Vorteksler ve skyrmionlar ise manyetik alan altında parçacık gibi hareket ederler. Örneğin Şekil 3'de gösterildiği gibi vorteks görülen nano-mıknatısa yüzeye paralel bir manyetik alan uygulandığında vorteks merkezi uygulanan manyetik alanın yönüne dik olarak ince filmin kenarlarına doğru kayar [2][16]. Bu alan yeteri kadar büyürse, sistem vorteks halinden tek bölgeli hale dönüşür. Manyetik baloncuklar ve bazı skyrmionlar ise düzleme dik uygulanan manyetik alanla büyüme-küçülme (nefes alma) hareketi yaparlar [10].

Bu manyetik mikro-yapılar manyetik alan darbeleri ve spin polarize olmuş akım altında dinamik özellikler gösterirler. Buna iki örnek Şekil 4'de verilmiştir. Şekil4a'da bir manyetik diskin orta kesitinden alınan görüntüde salınan AC manyetik alan altında vorteks merkezi film merkezi etrafında periyodu nano-saniye mertebesinde olan bir dönme hareketi yaptığı görülmektedir [2]. Buna vorteks merkezinin jiroskobik hareketi denir ve yönü vorteksin skyrmion numarasına bağlı olarak değişir [2]. Bu tarz bir nano-diskin çoklu katmanlı bir yapıda tekrarlanarak kullanılması sonucu elde edilen "spin-valfi" yapısı Şekil4b'de sergilenmiştir. Burada nano-diskin düzlemine dik olarak geçirilen akım manyetik katmanlarda vortekslerin jiroskobik hareketini tetiklemiştir.



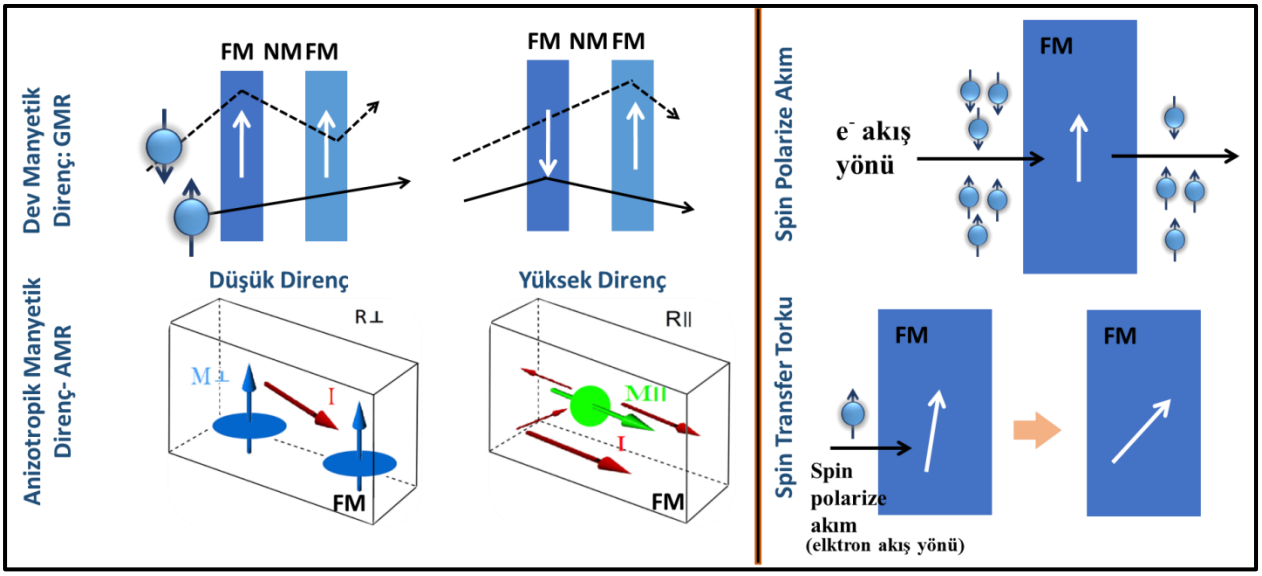
Şekil 3 Vorteksin dış bir manyetik alan yok iken (a) ve düzlem-içi yukarı doğru bir manyetik alan varken (H) ki hali (b).



Şekil 4 a) Manyetik bir diskin merkezinden alınmış bir kesit içerisinde vorteksin merkezinin manyetik alan etkisiyle kenara doğru kayması gösterilmektedir. Alttaki şekilde merkezin jiroskobik hareketi çizilmiştir. Bu hareketin oluşturduğu örnek bir elektriksel sinyal grafikte sergilenmiştir, sinyalin GHz mertebesinde olduğu görülmektedir b) Çoklu katmanlı yapıda $Ni_{81}Fe_{19}$ alaşımı (Py) ve Cu normal metal tabakalarının dizilisi gösterilmiştir. Bu tarz bir yapıdan sabit akım geçmesiyle ve bu sayede STT ile tetiklenen salınımların oluşturduğu elektriksel sinyalin büyüklüğünün ve frekansının akımla değişimi.

Manyetik yapıda bu şekilde tetiklenen mıknatıslanma dinamikleri malzemenin direnç veya voltaj gibi ölçülebilir parametrelerinde salınımlara yol açar. GHz mertebesindeki bu salınımlar bu sayede elektriksel olarak tespit edilebilir. Şekil 4b'deki örnekte AC akım ile tetiklenen dinamikler spin valflerde görülen Dev Manyetik Direnç (GMR) sayesinde tespit edilir. GMR mekanizması Şekil 5'te şematik olarak gösterilmiştir. İki ferromanyetik (FM) malzemenin bir normal metal (NM) ile ayırıldığı sistemde (Şekil 4'te bu katmanlar sırasıyla Py ve Cu'dır) aynı yöne mıknatıslanmış FM katmanları yüksek dirence, ters mıknatıslanmış katmanlar düşük dirence yol açmaktadır. Bunun sebebi akımda bulunan yukarı ve aşağı spinli elektronların farklı saçtırılma oranlarıdır. Paralel durumda yukarı sadece aşağı spinli elektronlar yukarı mıknatıslanmış elektrotlardan saçtırılırken ters durumda hem yukarı spinli elektronlar aşağı mıknatıslanmış FM'den, hem de aşağı spinli elektronlar yukarı mıknatıslanmış FM'den saçtırılır.

Paralel durumda ayrıca spin polarize olmuş (veya spin kutuplaşmış) bir akım söz konusudur. Yani, yine Şekil 5'te gösterildiği gibi, mıknatıslanma yönünde spine sahip elektronlar FM'den rahatça geçerken ters yönlü spinler filtrelenir ve akım çoğunlukla mıknatıslanma yönündeki elektronlardan oluşur. Şekil 4b'de alt FM katmandan geçen akım spin polarize olduğu



Şekil 5 a) Anizotropik ve Dev Manyetik Direnç mekanizmaları ve b) spin polarize akım ile spin transfer torku şematik olarak çizilmiştir. FM ve NM filmlerindeki beyaz oklar ve M ile ifade edilen vektörler mıknatıslanma yönünü göstermektedir.

haliyle üst FM katmandaki yerel manyetik moment-lere bir tork uygular (bkz. Şekil 5). Spin Transfer Torku (STT) denilen bu kavram üst FM filmin genelinde vorteksin jiroskobik hareketine sebep olur [19][20][21]. Bu şekilde akımın büyüklüğünün bu dinamiğin gücünü ve frekansını etkilediğini görüyoruz [17][18].

Tek FM filmlerde malzemenin direnci filmden geçen akım ve mıknatıslanma arasındaki açıya bağlı olarak değişim gösterir: $R = R_0 + \Delta Rc \cos^2\theta$. Şekil 4'teki resimde akımın mıknatıslanmaya paralel olduğu durumda orbital kesite dik geldiğini ve bu şekilde elektronların daha çok saçtırıldığını ve yüksek dirence yol açtığını görüyoruz. Anizotropik Manyetik Direnç (AMR) denilen bu mekanizma kullanılan malzemeye bağlı olarak değişim gösterir ve %1-10 mertebesindedir [3]. Vorteks merkezinin jiroskobik hareketi AMR yoluyla da tespit edilebilir. GHz salınımlarında sinyalin büyüklüğünün arttırılması, frekansının kontrol edilebilirliği ve kalite faktörü ($\Delta f / f_c$) uygulama alanları düşünüldüğünde önemlidir ve bunların dış koşullar değiştirilerek kontrol edilebilmesi istenilen bir sonuçtur.

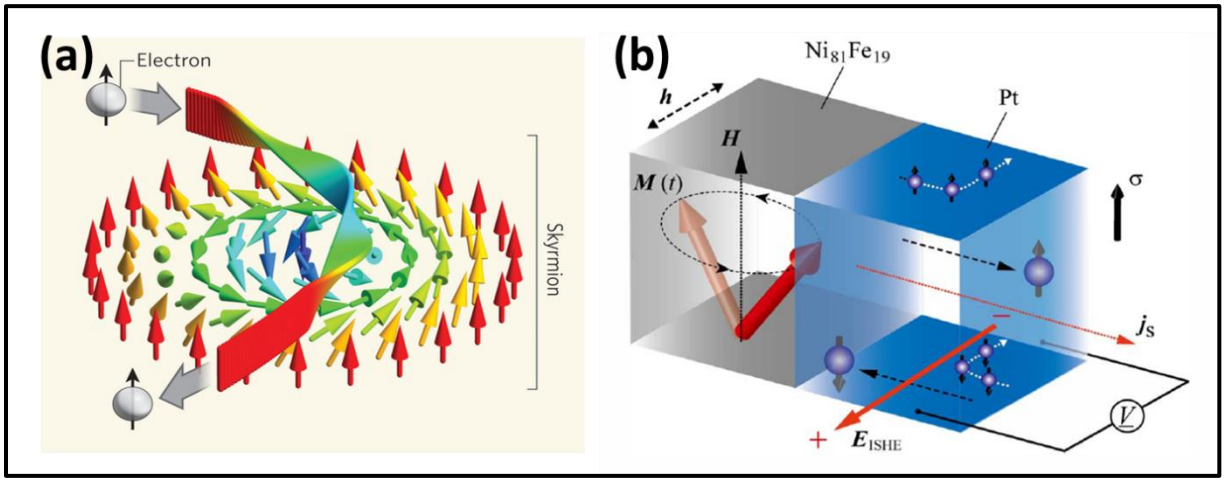
Literatürde anti-vorteks dinamiklerini inceleyen çalışmalar azdır. Bunun sebeplerinden biri anti-vortekslerin tek basına gözlemlenmesinin zor olmasıdır. Teorik çalışmalar anti-vorteks merkezinin de dairesel [22] veya eliptik[23] bir yörüngede jiroskobik bir hareket yaptığını göstermiştir. Başka bir çalışmada büyük kare bir filmde nano-kontak (point-contact) akım iletimi ile vorteks-anti vorteks çiftleri oluşturulmuştur. Yine nano-kontak iletimi ile bu çiftlenimlerinin birlikte (aynı-fazda) hareket ettikleri ve sonuç olarak GHz sinyalin çok daha büyük olduğu gözlenmiştir [24].

Yakın zamanda yapılan deneyler benzer dinamiklerin skyrmionlarda da oluşabileceğini göstermiştir. Spin-polarize akımla skyrmionların hareket edebildiği veya vortekse benzer jiroskobik hareket yaptıkları kaydedilmiştir [12][25][26]. Bu deneylerdeki umut verici sonuç, dinamiklerin vortekslere kıyasla çok daha küçük akımlarla tetiklenebilmesidir [11]. Bu alanda yapılan çalışmalar oldukça azdır ancak öncül bulgular heyecan vericidir. Bu projenin amacı antivorteks oluşumu için uygun geometride manyetik ince filmler üretmek ve bu filmlerde vorteks-antivorteks hareketlerini incelemektir. W, Pt veya Ta gibi güçlü spin-yörünge etkileşimli metallerin üzerine büyütülen manyetik ince filmlerde skyrmion dinamiklerini çalışmaktır. Bu çalışmalar sonucunda bu ilginç manyetik yapıların manyetik nano-osilatörleri olarak kullanılabilmesi için optimum koşulların belirlenmesi (yüksek kalite faktörü, yüksek sinyal ve kontrol edilebilir frekans) hedeflenmektedir.

Manyetik skyrmionların hareket eden elektronlarla etkileşimi de ilginç sonuçlar doğurmuştur. Şekil6a'da skyrmionun üzerinden geçen bir elektron ve spini gösterilmektedir.

Elektronun spini bölgesel momentlerle manyetik bir düğüm gibi yön değiştirir (Berry fazı) ve hareketine dik bir Lorentz-benzeri bir kuvvetin etkisinde yörüngesi sapar [27]. Bu bir çesit Hall Etkisidir (HE) ve topolojik HE (THE) olarak adlandırılır. THE MnSi ve [28][29] ve MnGe [30]'de gözlenmiştir. HE maddenin ölçülebilir parametrelerinde değişikliğe yol açar, örneğin yük veya spin birikmesi.

Spin HE normal bir akımdan dik bir spin akımının oluşmasıdır (bir spin akımından dik bir yük iletimi de ters SHE veya iSHE). SHE ve iSHE manyetik dinamiklerin ölçülmesinde veya spin-akımlarının oluşturulmasında etkin bir rol oynayabilir. SHE manyetik olmayan metallerde ve yarı-iletkenlerde gözlenmiştir [31][32] ve sebebinin içsel (rölativisttik bant yapısı) [33] veya dışsal-spin-yörünge etkileşimi sebebiyle yukarı ve aşağı spin elektronlarının farklı saçılmaları [34] olduğu düşünülmektedir. Bir yarı-iletkenden veya bir metalden spin-polarize akım geçirildiğinde örneğin kenarlarına doğru spin akımıyla beraber bir yük birikimi gözlenir [35][36]. SHE'nin verimliliğini belirten bir parametre SH açısıdır ve spin akımının yük akımına oranıyla belirlenir.



Şekil 6 a) Bir skyrmion üzerinden geçen elektronun spinin dönmesi ve bu sebeple yörüngesinin sapması çizilmiştir ([13]). b) Spin pompalama ile SHE. Manyetik ince filmin (Py) mıknatıslanması belirli bir (H alanı ile belirlenen) yön etrafında (AC manyetik alanı etkisiyle) titreştirilirken, yine H yönüyle belirlenen spin akımını Pt metaline pompalar. Burada SHE etkisiyle elektronlar sağa doğru sapar ve kenarlarda bir yük birikmesi görülür. Bu da Hall Voltajı olarak tespit edilir [37].

Şekil6b Pt metalinde SHE etkisini göstermektedir. Burada spin-polarize akım spin-pompalama yöntemiyle metale aktarılmıştır [37]. Bu yöntemde manyetik ince filmin mıknatıslanması belirli bir yön etrafında ferromanyetik rezonans frekansında titreştirilirken bitişik metale bu yön doğrultusunda polarize olmuş bir akım gönderir. Şekilde yukarı spinli elektronların SHE etkisiyle örneğin sağına doğru yöneldiği ve burada bir yük birikmesi yani örneğin uçları arasında bir Hall Voltajı oluşturduğu görülmektedir [37]–[40]. Bu projede SH etkisinden bir spin aşılama katmanı olarak istifade edilmesi, skyrmionların yüksek frekanstaki titreşiminin bu akımdan gelen STT ile tetiklenmesi planlanmıştır.

Bu projede manyetik mikro yapılanmalardan pek nadir rastlanan anti-vorteks oluşumları ve oda sıcaklığında gözlenebilir skyrmion yapılarına odaklanılmıştır. Bu sıra dışı yapıların oluşumuna elverişli malzemeleri ve aygıt tasarımları araştırılmıştır. Geliştirilen aygıtlar üzerinde bu yapıların statik ve dinamik özellikleri görüntülenerek elektriksel ölçümlerle tespit edilmiştir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu projede iki farklı mikro-manyetik yönelim üzerine yoğunlaşılmıştır. Birinci etapta literatürde daha nadir rastlanan anti-vorteks yapılarının oluşumuna elverişli yapılar araştırılmış, ikinci etapta da skyrmion bazlı aygıtlar üzerine çalışılmıştır. Her iki aşamada da bu yapılanmalara elverişli aygıtlar teorik modellemelerle araştırılmış, uygun olduğu düşünülen malzemeler önce ince film olarak üretilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır, daha sonra da aygıt üretimi film büyütme ve desenleme olarak yapılmıştır. Desenlenmiş nano-mıknatıslarda veya nano sütunlarda mikro-manyetik yapıların varlığı manyetik kuvvet mikroskobunda tespit edilmiştir. Bu yapıların statik özellikleri farklı manyetik alan koşullandırmaları sonrasında veya manyetik alan altında incelenmiştir.

Daha sonra bu yapıların dinamik özelliklerinin incelenmesi için aygıt tasarımına gidilmiştir. Elektriksel bağlantıları yine film üretme ve desenleme basamaklarıyla yapılmış ve daha sonra elektriksel bağlantısı olan aygıtlar olarak tekrar üretilmiştir. Aygıtlar üzerinde son olarak manyetik dinamiklerin yüksek frekansta tetiklenmesi ölçümleri yapılmıştır.

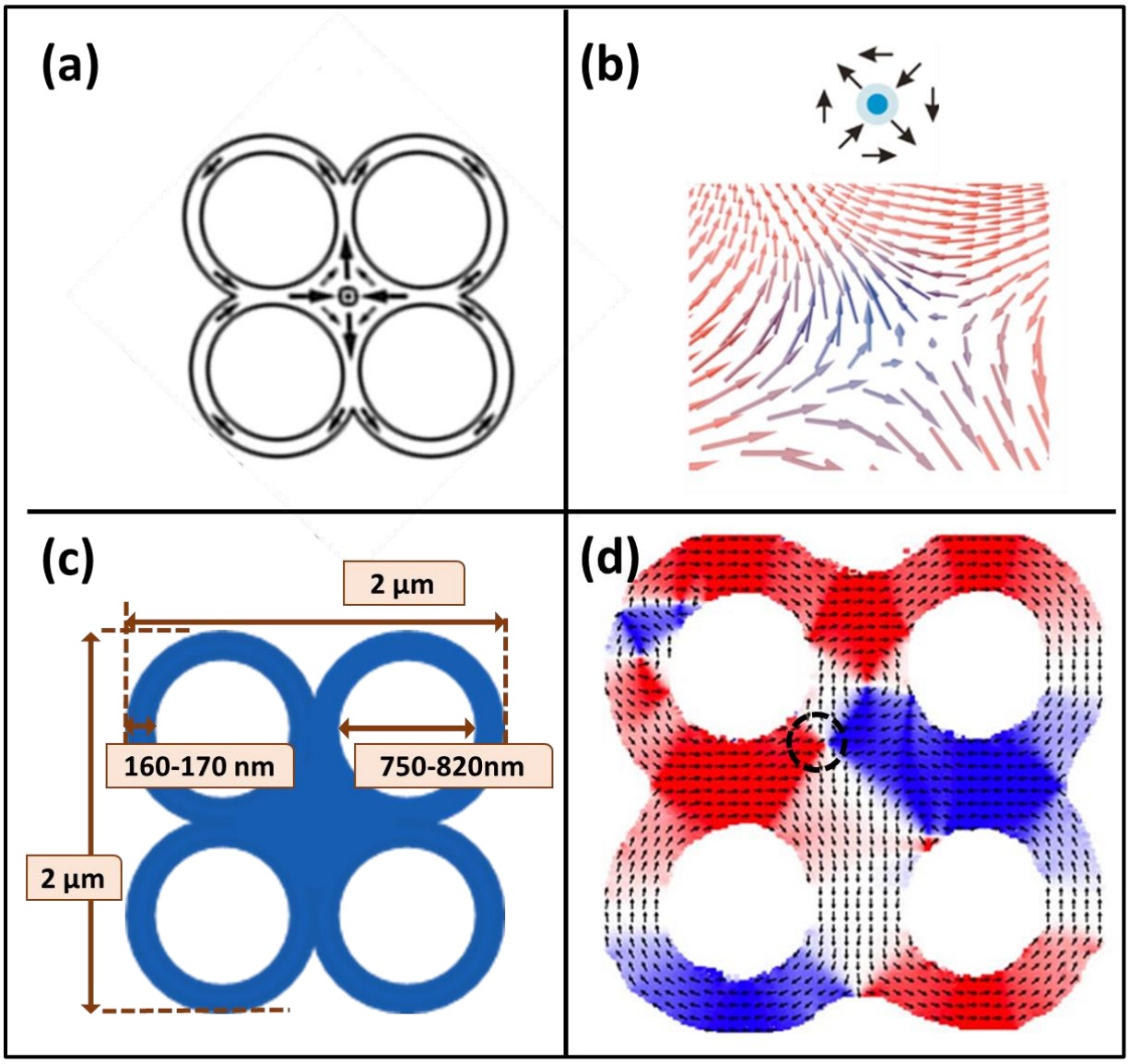
1,2,3,4, 5 ve 9. iş paketleri anti-vorteks bazlı aygıtların modellenmesi, üretilmesi ve ölçülmesini kapsarken 6, 7, 8 ve 10. iş paketleri skyrmion bazlı aygıtların modellenmesi, üretilmesi ve ölçülmesi üzerine kurulmuştur. İki etapta da kullanılan gereç ve yöntemler benzer olduğundan **bu bölümde genel olarak yöntemler anlatılacaktır**. **Bölümler aygıtların modellenmesi (1 ve 6. iş paketleri), modeller ışığında film büyütülmesi ve karakterizasyonu (3. iş paketi), filmlerin desenlenmesi ve aygıt üretiminde kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin optimize edilmesi (2 ve 7. iş paketleri) ve elektriksel ölçüm düzeneklerinin kurulmasını (4 ve 9. iş paketleri) anlatmaktadır.**

3.1. Mikromanyetik Modellemeler

1 ve 6. iş paketlerinde belirtilen sırasıyla anti-vorteks ve skyrmion bazlı aygıt tasarımları mikro-manyetik modellemelerle araştırılmış ve bu yapıları oluşumuna en elverişli yapılar belirlenmiştir.

3.1.1. Antivorteks Oluşumuna Elverişli Nano-Aygıt Tasarımı Modellenmesi

1. iş paketinde yer alan vorteks ve benzeri yapıların oluşumuna elverişli nano-mıknatısların Mikromanyetik modellemelerle belirlenmesi İtalya tarafında yapılmıştır. Dr. Finocchio ve Dr. Carpentieri ve grupları tarafından gerçekleştirilen model ile mikro-manyetik

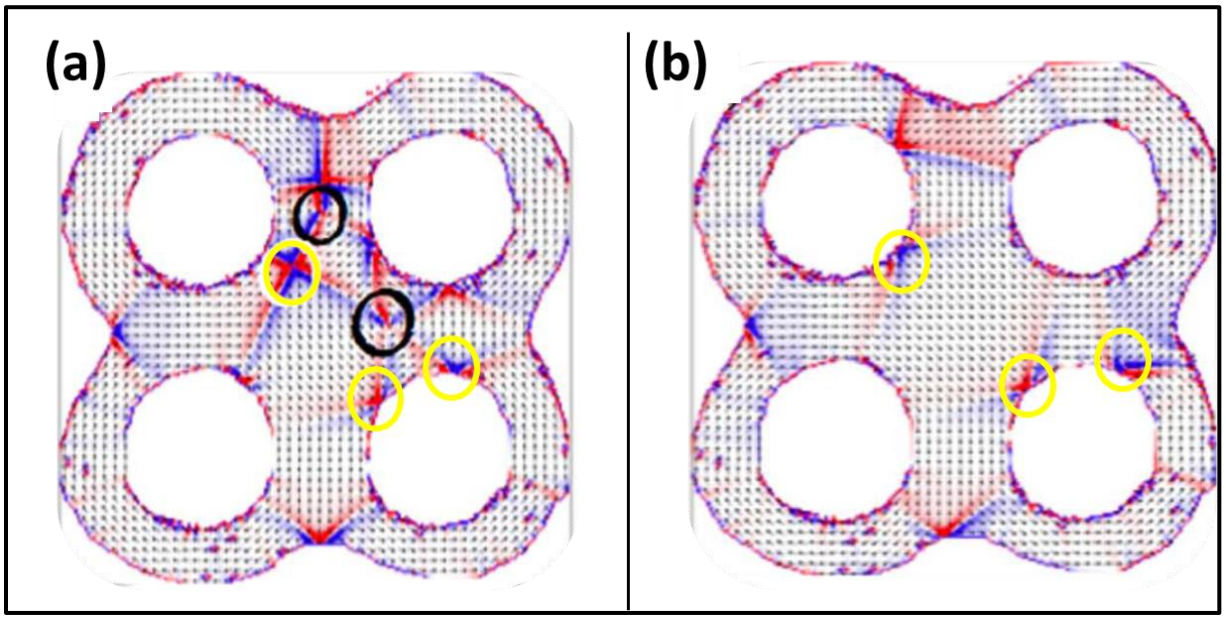


Şekil 7 : (a) Astroid geometrisi ve anti-vorteks oluşumuna olanak sağlayacak boyutları. (b) Anti-vorteks yöneliminin şematik çizimi; üstten ve yandan bakış açılarıyla (c) Astroid içinde oluşacak anti-vorteks yöneliminin şematik çizimi. (d) Simülasyonlar sonucunda (a)'da gösterilen boyutlarda üretilen 20 nm kalınlığındaki bir Py ($Ni_{81}Fe_{19}$) ince filminde oluşan mikro-manyetik yapılanma. Anti-vorteks oluşumu kesik çizgi ile halka içine alınmıştır. Siyah halkalar da vorteks oluşumlarını göstermektedir.

yapıların düzlem-içi manyetik anizotropili nano-mıknatıslarında oluşumu incelenmiştir. Daha çok nadir görülen anti-vorteks oluşumuna elverişli geometriler, boyutlar ve kalınlıklar araştırılmıştır. Kullanılan sonlu eleman modelinde 5 nm boyutunda her bir hücre için Landau-Lifshitz-Gilbert denklemi iteratif olarak çözülmüş, nano-mıknatısın içinde oluşacak en düşük enerjili manyetik konfigürasyon hesaplanmış ve resmedilmiştir. Anti-vorteks yapılarının kararlı olarak elde edilmesine yardım edecek manyetik kapanmaya elverişli Şekil 7a'da gösterilen astroid geometrisi uygun bulunmuştur. Burada şematik olarak orta bölgede bir anti-vorteks ve astroidin halkalarında kapanma yönelimi gösterilmektedir. Antivorteksin detaylı çizimi Şekil 7b'de verilmiştir.

Bu amaca yönelik en uygun malzemenin yumuşak bir manyetik malzeme olan ve şekil ile mıknatıslanmanın daha kolay yönlendirilebildiği $Ni_{81}Fe_{19}$ (Py) olduğu belirlenmiştir. Bulunan en uygun astroidin boyutları Şekil 7c'de gösterilmiştir. 2 μm x 2 μm büyüklüğündeki bu nano-mıknatısın film kalınlığının 10 ila 60 nm arasında olabileceği öngörülmüştür.

Bu boyutlardaki astroid nano-mıknatısta oluşabilecek mikro-manyetik yapılanma Şekil 7d'de verilmiştir. Py astroid nano-mıknatıslarda astroidin orta kısmında bir anti-vorteks oluşumu tahmin edilmiştir. Bu şekilde anti-vorteks siyah bir halkayla belirtilmiştir. Astroid içindeki manyetik

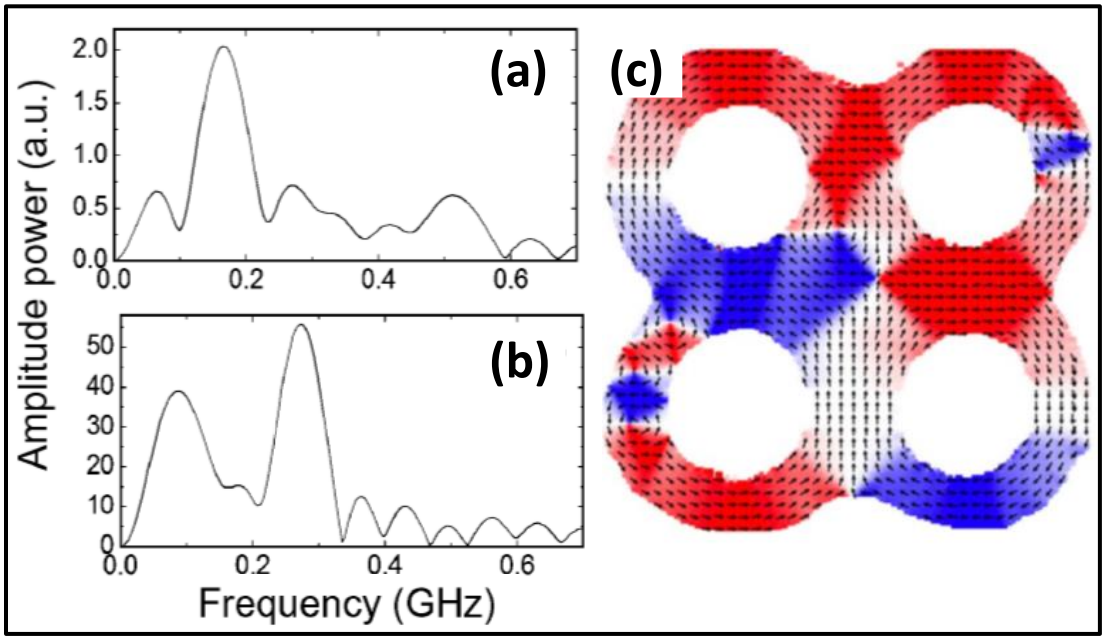


Şekil 8 Astroid nano mıknatısta oluşabilecek manyetik yapılanma: (a) AC manyetik alanda mıknatıslığı giderilmiş halde (b) AC manyetik alan sonrası düzleme dik bir manyetik alan uygulandıktan sonra. Vorteksler siyah halkalar, antivorteksler ise sarı halkalarla gösterilmiştir.

yönelimler küçük oklarla ifade edilmiş, mıknatıslanmada fark edilen değişiklikler ve manyetik kuvvet mikroskobunda seçilecek kontrast değişimleri de kırmızı ve mavi renklerle ifade edilmiştir. Modelleme ile bu anti-vorteksin çevresinde oluşan bir vorteks de görülmektedir.

Manyetik yapılanmanın farklı manyetik alan koşullandırmaları altındaki görüntüleri Şekil 8'de çizilmiştir. AC alanla mıknatıslığı giderilmiş resimde (Şekil 8a) düzlem-içi bir uygulanan maksimum büyüklüğü 400 mT 'dan basamaklı olarak azalan bir manyetik alan uygulanmış ve bu da orta bölgede ve civarında vorteks (siyah halkalar) ve antivorteks (sarı halkalar) yapılarının bir arada bulunduğu bir durum ortaya çıkmıştır. Astroid bu halde iken düzleme dik, doyurucu bir manyetik alan uygulandığında Şekil 8b'deki duruma geçilmiştir. Bu resim, orta bölgede kenarlara çapraz şekilde yerleşmiş karşılıklı iki anti-vorteks oluşumunu göstermektedir. Manyetik alan kapatıldığında da var olan bu yönelim, bu yapının kararlı halidir.

Modellemelerde antivorteks çiftinin dinamik hareketleri manyetik alan darbeleri altında incelenmiştir. Şekil 9c'de 300 mT büyüklüğünde düzleme dik olarak uygulanan 10 psn'lik bir akım darbesi sonrasındaki 20. psn'de oluşan konfigürasyon modellenmiştir. Burada bir vorteks-antivorteks çiftinin oluştuğu görülmektedir ve bunların birbirleri etrafında hareket ettiği tespit



Şekil 9 Modellemede tespit edilen ve 300 mT, 10 psn'lik bir düzleme dik manyetik alan darbesi ile tetiklenen dinamiklerin oluşturduğu sinyaller tek asteroid (a) ve birbiri ile etkileşimli üç asteroid (b) için çizilmiştir. (c) Model çizimde manyetik alan darbesinden 20 psn sonra oluşan manyetik konfigürasyon

edilmiştir. Model sonucunda tek bir astroidde oluşan bu dinamik hareketin 200 MHz civarında bir sinyal oluşturduğu gözlenmektedir, Şekil 9a. Bu sinyalin gücü yan yana konulan üç astroid aygıtı aynı anda salınım hareketi yaptığında çok artmış ve frekansı 300 MHz mertebesine kaymıştır, Şekil 9b. Şekil 9b'de aynı zamanda 100 MHz civarında ikinci bir pik de görülmüştür.

Bu sonuçlar Py astroid aygıtlarının antivorteks yapılarının kararlı oluşumuna elverişli olduğunu ispatlamış ve deneysel olarak üretimine yön vermiştir. Bu çalışma bu aygıtların anti-vortekslerin mıknatıslanma dinamiğinin tespiti için de uygun olduğunu göstermiştir. Bu sayede nano-aygıtların üretimi için desen ve boyutlar belirlenmiş, antivorteks oluşumu için manyetik alan koşullanmaları tespit edilmiş ve elektriksel ölçümler için beklenen frekans aralığı da öngörülmüştür.

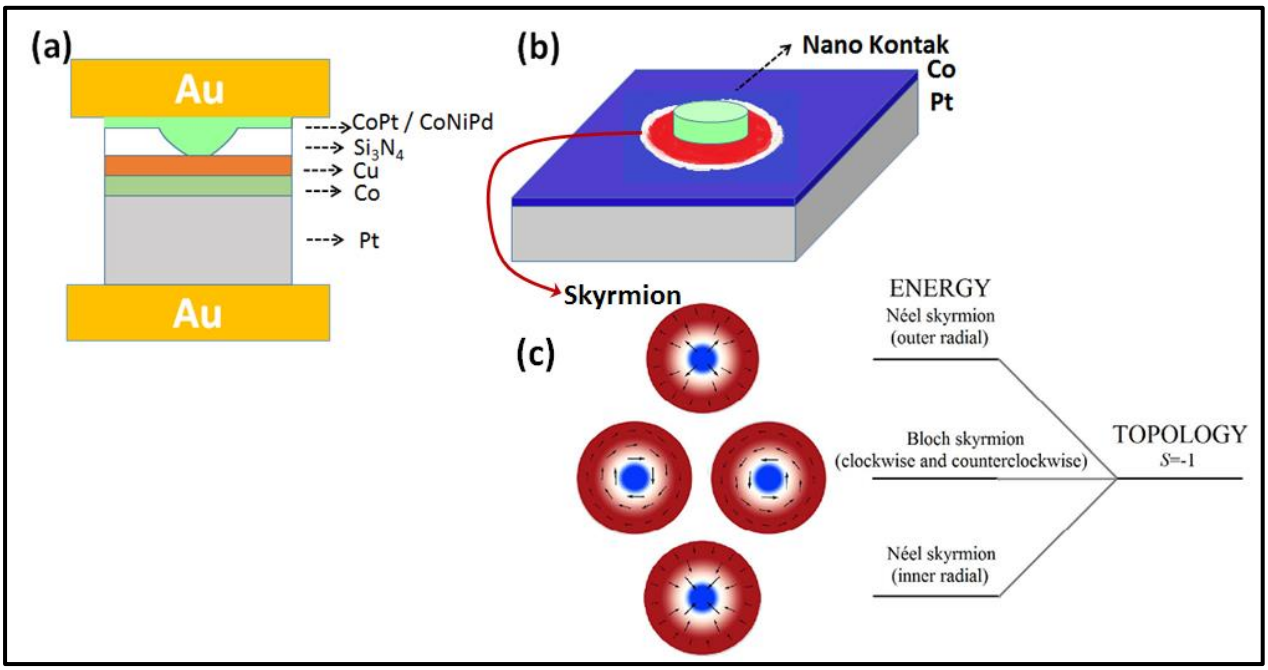
3.1.2. Yüksek Spin-Yörünge Etkileşimli Skyrmion Aygıtlarının Tasarımı

Nano Kontaklı Nano Sütunlarda Skyrmionlar

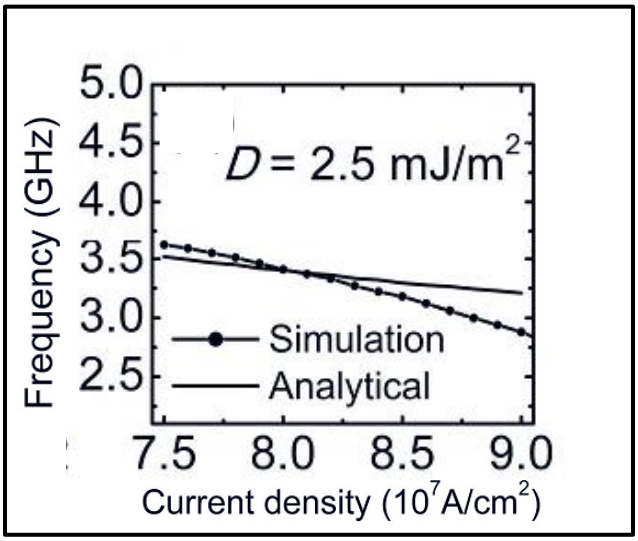
İtalya tarafında 6. iş paketi dahilinde yapılan modellemelerle skyrmion oluşumuna elverişli yapılar araştırılmıştır. Bunun için yüksek spin yörünge etkileşimli metallerle manyetik katmanların ara yüzünde oluşan DMI etkisinden faydalanılması planlanmıştır. Geliştirilen sonlu eleman modelinde Landau-Lifshitz-Gilbert denklemine efektif manyetik alana DMI etkisinden doğan efektif DMI alanı eklenmiş ve çoklu katmanlı nano-sütunlarda manyetik skyrmion oluşumları incelenmiştir.

Bulgular ışığında yüksek spin-yörünge etkileşimli Pt malzemesi ile Co manyetik ince filmi ara yüzünün skyrmion oluşumuna elverişli olduğu tespit edilmiştir. Bu ara yüzde skyrmion oluşumu çok küçük bir alandan Pt/Co ara yüzüne spin polarize olmuş bir akım enjekte edilmesi ile mümkün olmaktadır. Bunun için bir nano-kontak kullanılması ve bu kontağın düzleme dik anizotropili bir manyetik malzeme olması gerekmektedir.

Öngörülen aygıt tasarımı Şekil 10'da gösterilmiştir. Üstten ve alttan Au elektrotlarla bağlantı yapılacak çok katmanlı aygıtta Pt üzerine saçtırılacak ince bir Co katmanı (0,6 nm) vardır. Metal (Cu) bir ara-katmandan sonra düzleme dik anizotropisi olan manyetik bir malzeme alt katmanlara 20-50 nm genişliğinde bir nano-kontak aracılığıyla bağlantı kuracaktır. Şekilde nano-kontağı izole eden Si_3N_4 malzemesi gösterilmiştir. Bu nano-kontaktan akım geçirilmesi suretiyle Co tabakasında bir skyrmion çekirdeklenecektir. Nano deliğin iki katı genişliğe kadar



Şekil 10 (a) Skyrmion oluşumuna elverişli aygıt tasarımının kesit çizimi (b) Tasarımın kontaklar olmadan görünüşü ve Co katmanında oluşması beklenen balon tipi skyrmion (c) Nano-kontak altındaki Skyrmion oluşumu: Farklı topolojik skyrmion spin yönelimleri enerji seviyelerine göre sıralanmıştır.



Şekil 11 Aygıttan geçirilen DC akımla tetiklenen skyrmion "nefes alma" hareketinin akım yoğunluğuna bağlı salınım frekansı

çapı olacağı hesaplanan skyrmion Şekil 10b'deki çizimde gösterilmiştir. Baloncuk tipi bu skyrmionun Co tabakasındaki spin yönelimlerini gösteren şekilde kırmızı bölgeler momentlerin yukarı baktığı, mavi bölgeler ise aşağı baktığı bölgelerdir.

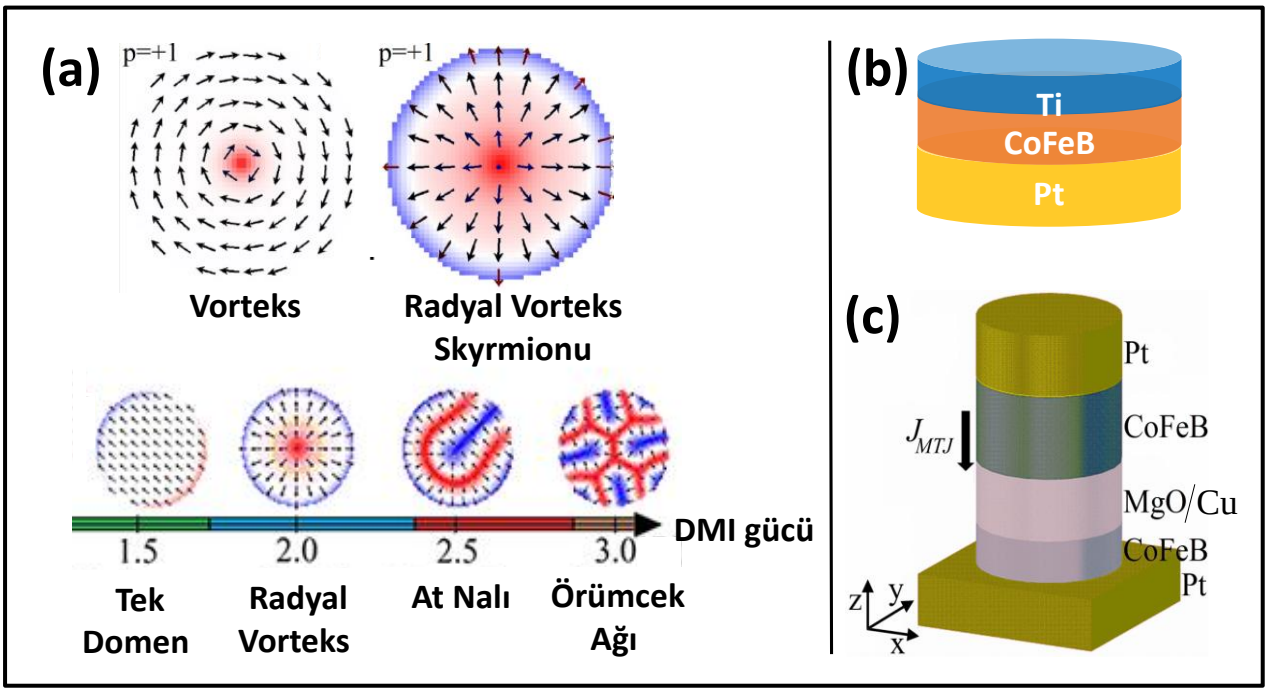
Kırmızı ve mavi bölgelerin sınırlarında momentlerin yönelimi skyrmion tipine göre değişmektedir. Şekil 10c'de enerji durumlarına göre sıralanmış skyrmion tipleri gösterilmektedir. Nano-kontaktan geçen bir akım darbesi ile oluşanın Bloch-tipi skyrmion olacağı modelleme ile tespit edilmiştir. Ancak nano-kontaktan sabit olarak geçirilecek DC akımın bu skyrmionun tipini Bloch ile Neel arasında değiştireceği ve bu beyaz bölgedeki momentler düzlem içinden düzleme dik hale geçerek skyrmionun bir "nefes alma" hareketi yapacağı öngörülmüştür. Bu şekilde skyrmionun akımla tetiklenecek "nefes alma" dinamiği GHz mertebesinde elektrik sinyaller üretmesi beklenmektedir. Modellemede belirlenen dinamiğin analitik hesaplarla da uyuştuğu ve belirli DC akım seviyelerinde oluşan salınımın frekansı Şekil 11'de gösterilmiştir. Nano-kontaktan geçirilen akım yoğunluğunun en az 75 MA/cm^2 olması gerekmektedir.

Yüksek DMI'a Sahip Nano-Sütunlar

Nano-kontak üretiminin zorlu basamakları olması ve bunun da üretim bedelini arttırması da öngörülerek alternatif skyrmion bazlı aygıtlar araştırılmıştır. Modellemelerde yüksek spin-yörünge etkileşimli Pt malzemesi ile CoFeB ferromanyetik malzemesinin ara yüzü incelenmiştir. Bu malzemelerden yapılan çoklu katmanlı nano disklerde ara yüzde ortaya çıkan Dzyaloshinskii-Moriya etkileşiminin (DMI) bir manyetik soliton oluşumu için uygun koşullara yol verdiği tespit edilmiştir. DMI etkileşimi belirli bir değere sahip olan nano disklerde radyal vorteks yapılarına rastlanmıştır. Şekil 12'de gösterilen radyal vorteks yapısı, vorteksin aksine 1 skyrmion numarasına sahiptir. Modellemelerde CoFeB/Pt ara yüzündeki DMI etkileşiminin büyüklüğüne göre (D) oluşacak manyetik yapılanma sistematik olarak çalışılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları yine Şekil 12a'da gösterilmiştir. Çok küçük D değeri olan örneklerde tek domenli yapı görülürken D biraz arttığında radyal vorteks oluşumu gözlenmektedir. D'nin çok büyük olduğu değerlerde ise at nalı veya örümcek şeklinde yapılanmalar görülmektedir.

Radyal vorteks solitonlarına deneysel olarak tespiti için çoklu katmanlı nano-disk yapısı Şekil 12b'de gösterilmiştir. Burada Pt/CoFeB/Ti yapısı tekrar edilerek büyütülecek ve Ti kalınlığına göre D parametresi ayarlanabilecektir. Radyal skyrmionların dinamiklerinin incelenebileceği bir aygıt tasarımı da Şekil 12c'de sunulmuştur. Burada bir spin-valf yapısında

radyal vorteksin hareketi spin polarize bir akımla tetiklenebilecek ve GMR mekanizması kullanılarak yüksek frekanstaki salınımlar ölçülebilecektir.



Şekil 12 (a) Vorteks ve Radyal Vorteks yapıları ve CoFeB/Pt ara yüzünde DMI gücüne göre oluşabilecek manyetik konfigürasyonlar (b) Radyal vorteks oluşumunun gözlenebileceği ve D parametresinin ayarlanabileceği çoklu katmanlı yapı (c) Radyal vorteks dinamiklerinin çalışılabileceği aygıt tasarımı

3.2. Nano-Aygıt Üretimi ve Karakterizasyonu

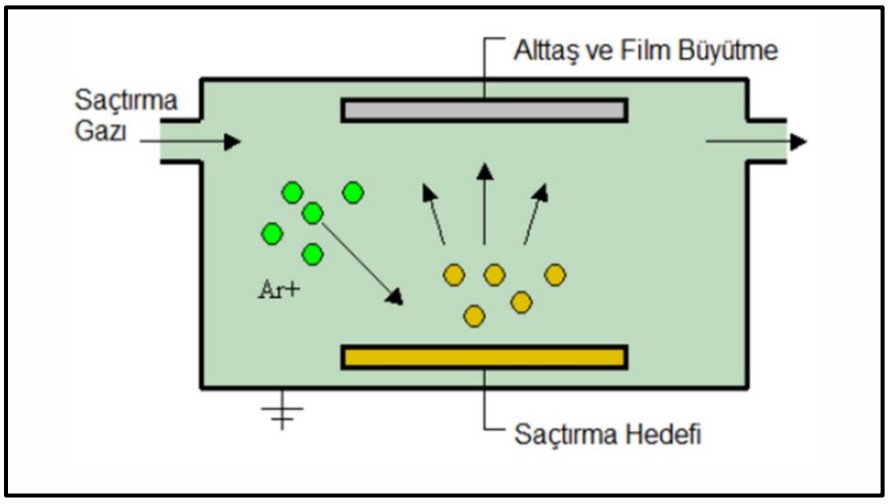
Modellemelerle belirlenen aygıtların üretimi için 2. ve 7. iş paketlerinde belirtilen nano-mıknatısların üretimi ince film üretimi ve optimizasyonu, filmlerin desenlenmesi ile nano-mıknatıs üretimi ve elektriksel bağlantıların fotolitografi ile konulması basamaklarından oluşmaktadır. İnce film üretimi kısmı 3. iş paketinde belirtilen film optimizasyonu ve gerekli karakterizasyon yöntemlerini de içermektedir. Aygıtların görüntüleme yöntemleri de yine nano-aygıt üretimi kısmında yer almaktadır. Bu kısımda 7. iş paketi dahilindeki spin-valf üretimi ayrı bir bölümde anlatılmıştır. Aygıtların elektriksel ölçümleri için kullanılan yöntemler ve ölçüm platformlarının kurulması (4. ve 9. iş paketleri) da ayrı bir bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

3.2.1. İnce Film Üretimi ve Karakterizasyonu

2. iş paketi kapsamında nano-mıknatısların üretimi ve 7. İş paketindeki yüksek spin yörünge etkileşimli aygıtlar için 3. iş paketi kapsamında ince-filmler üretilmiş ve çeşitli karakterizasyon yöntemleriyle incelenmiştir.

3.2.1.1. Manyetron Saçtırma ile Film Büyütme

Saçtırma tekniğinde, atomları bir hedeften (kaynak) (target) koparmak ve onları bir alttaş (substrate) üzerinde biriktirmek (deposition) için enerji yüklü iyonlar kullanılır. Hedef ve alttaş vakum ortamına konur. Vakum hazneleri için farklı tasarımlar bulunsa da, temel parçalar ve işleyiş tüm sistemler için aynıdır. Hedef katot, alttaş ise anot işlevi görür. Haznedeki hava boşaltıldıktan sonra içerisi, birkaç ile yüzlerce mili-torr arasında değişen basınç seviyesinde bir atıl gazla, genelde Argon, doldurulur. Elektrotlara DC gerilim uygulandığında oluşan ışıltılı deşarj (glow discharge), Argon atomlarını iyonize etmelerine yetecek kadar enerjiye sahip olacak şekilde serbest elektronları ivmelendirir. Bunun sonucunda vakum haznesinde Argon plazması görülebilir, bkz Şekil 13. Plazmayı başlatmak için Argon gazı yoğunluğu ve uygulanan voltaj işleme uygun bir şekilde ayarlanmalıdır. Bu işlemde Argon atomlarının sadece küçük bir kısmının iyonize olduğunu da belirtmek gerekir. Ortaya çıkan Ar+ iyonlar Şekil 13'de gösterildiği gibi hedefe çarparak, nötr atomları momentum transferi sayesinde kaynaktan koparır. Kopan atomlar balistik olarak düz bir hatta ilerler ve alttaş üzerine düşer. İşlem devam ettikçe, alttaş



Şekil 13 Saçtırma sisteminin basit bir çizimi

üzerinde amorf halde ince film oluşur. Manyetron saçtırmada, iyonize olmuş gazı hedef yüzeyinde tutmak için hedef etrafına güçlü mıknatıslar yerleştirilir. Bu durum, daha yüksek saçtırma oranı elde edilmesine ve düşük gaz basınçlarında biriktirme yapılmasını sağlar.
Saçtırılan atomlar nötr olduğu için manyetik alandan etkilenmezler. Ayrıca, yalıtkan maddelerin ve bazı metallerin ince filmlerini kaplamak için hedef materyale DC güç yerine, 15 Mhz civarında frekansa sahip alternatif elektrik alanı uygulanır. Bu metoda da RF saçtırma denir ve çoğunlukla yarı-iletken ve yalıtkan malzemelerin üretiminde kullanılır.

Materyallerin kaplaması sırasında, hedeften saçtırılan atomlar sadece alttaş üzerine değil, vakum haznesinin tüm iç yüzeyine yapışır. Birkaç kaplama işleminden sonra, haznenin içindeki yüzeyler ve parçalar hedef olarak kullanılan materyalle kaplanmış olur. Hazne içindeki bu kalıntı materyaller, vakum ortamının elde edilmesini zorlaştırmasının yanı sıra kaplamanın saflığını da etkiler. Bu yüzden, vakum haznesindeki her parça sık sık temizlenmelidir.

Laboratuvarımızda saçtırma işlemleri için Şekil 14'de gösterilen AJA marka manyetron saçtırma sistemi kullanılmaktadır. Turbo pompalarla 10^{-9} Torr basınca inebilen haznesinde açısı ayarlanabilir 6 saçtırma tabancası bulunmaktadır ve bir adet iyon aşındırma ünitesi ile normale 26^0 açıyla gelen iyonlarla aşındırma işlemi yapabilmektedir. Ünitede aynı zamanda yüksek basıncın kırılmasını engelleyecek ayrı bir örnek yükleme haznesi bulunmaktadır.



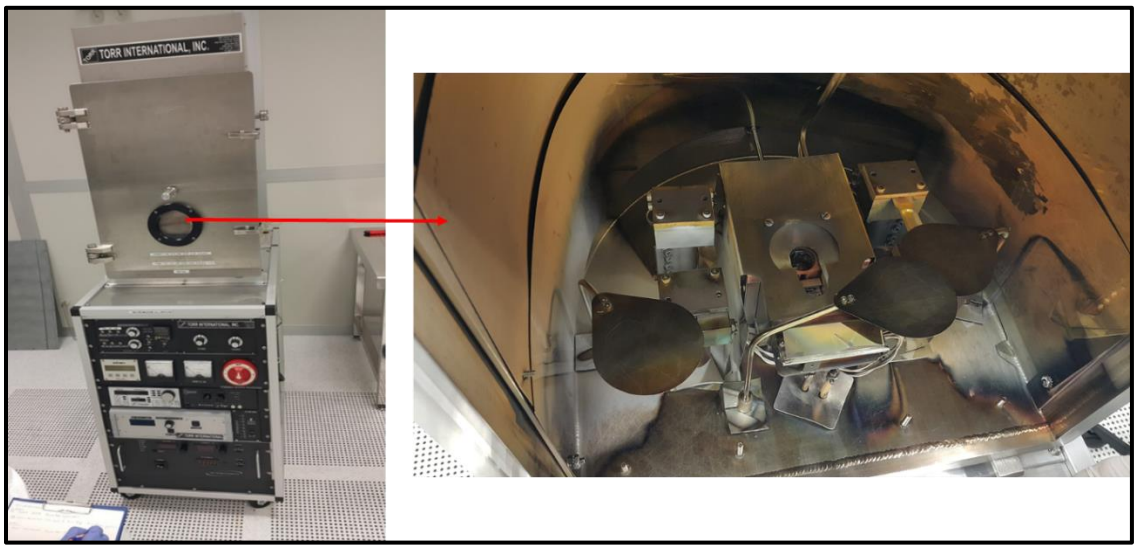
Şekil 14 AJA Manyetron Saçtırma Sistemi

İnce filmlerin kalitesinin optimizasyonu film üretimi ve sonrasında saçtırma hızının belirlenmesi, karakterize edilmesi, prosedürlerin geliştirilerek tekrar üretim ve karakterizasyonunu içerir. Bu şekilde projede Py, Co, CoFeB, CoNi manyetik filmleri DC manyetron saçtırma ile üretilmiştir. Titreşen örnek manyetometresi (VSM) ile karakterizasyonu yapılan filmler istenilen manyetik özellikler elde edilene kadar tekrar üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Örneğin Py ince filmlerinin üretimi sonrasında yapılan VSM ölçümlerinde histerezis eğrisinin sıfır manyetik alan etrafında simetrik olmadığı görülmüş ve yüzeydeki manyetik oksitten kaynaklı bir davranış olduğu anlaşılmıştır. Sonrasında Py ve diğer manyetik filmler ince bir katman Ti veya Ta metali ile kapaklanmıştır ve manyetik özellikleri beklenilen şekilde çıkmıştır.

Üretim koşulları optimize edilen bir başka malzeme SiO_2'dur. Tek hedeften oksijen-Ar ortamında saçtırılan bu malzeme XPS analizleri ile karakterize edilmiş, stokiyometrisi en uygun olacak şekilde fabrikasyon prosedürü belirlenmiştir.

3.2.1.2. Termal Buharlaştırma ile Film Büyütme

Film büyütmede kullanılan başka bir yöntem buharlaştırma yöntemidir. Burada vakum ortamında buharlaştırılan malzeme daha soğuk bir alttaş üzerine yoğunlaşarak katılaşır. Malzemeyi buharlaştırmak için iki yöntem kullanılır. Birincisi üzerinden yüksek akım geçirilen Wi bir bot ısıtılarak içine konulan malzemeyi buharlaştırır. İkinci yöntemde bir teknenin içine konulan (Şekil 15'te ortadaki bölme) malzeme sıcak bir filamentten yayılan elektron demeti ile buharlaştırılır. Projede termal ve elektron demet buharlaştırma işlemlerini bir arada gerçekleştiren Torr International marka bir buharlaştırma makinesi kullanılmıştır. Sabancı Üniversitesi Nano-teknoloji Merkezi, SUNUM'da yer alan bu sistemde C ve Cr malzemeleri büyütülmüştür.

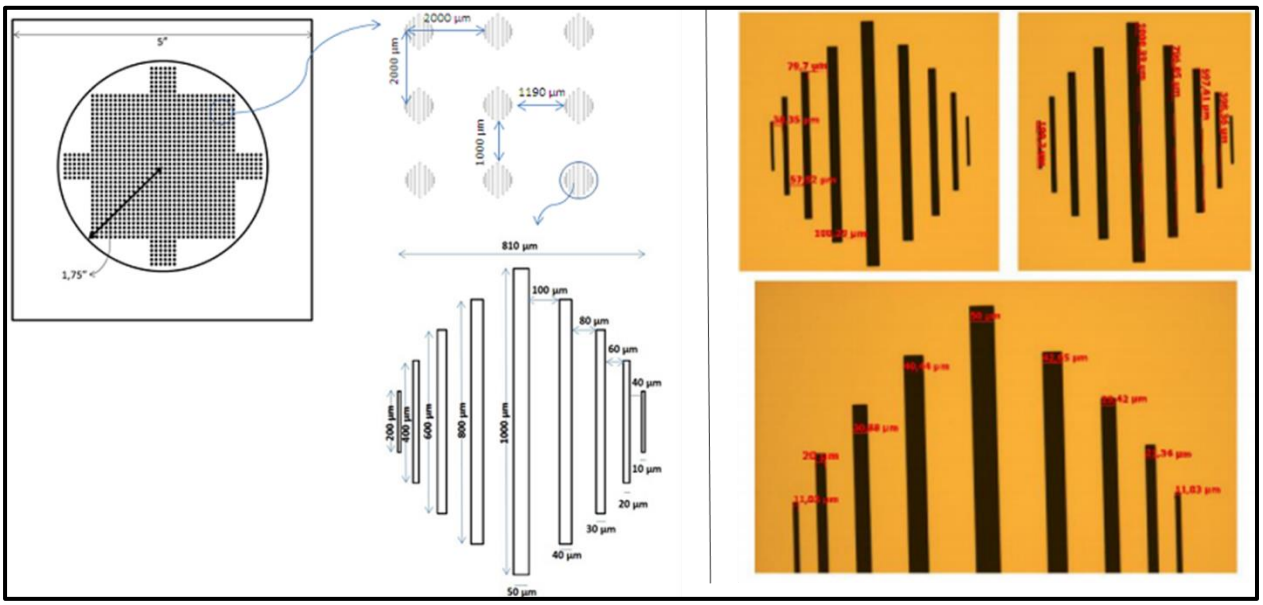


Şekil 15 Torr International marka buharlaştırma makinesi ve içindeki elektron demet buharlaştırma ve akım ile buharlaştırma bölmeleri.

3.2.1.3. Profilometre ile Kalınlık Kalibrasyonu

Projede kullanılan ince filmler tek hedefin veya iki ayrı hedefin eş zamanlı saçtırılması ile oluşturulmuştur. Her örnekte büyütme koşullarına bağlı olarak kalınlık kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi, alttaş üzerinden biriken, saçtırma süresi (sputtering duration), alttaş ısıtması (substrate heating), uygulanan güç (applied power), Argon gas akış oranı (Argon gas flow rate), baz vakum basıncı (base vacuum pressure) ve saçtırma basıncı (sputtering pressure) gibi parametrelere göre değişen hedef madde kalınlığı hakkında bilgi verir.

Bu amaçla, fotolitografi ile daha önceden şekillendirilmiş kalibrasyon ağlı alttaşlar (calibration grating wafer) kullanılmıştır. Şekil 16'da gösterilen bu kalibrasyon ağlı alttaşlarda yüzey foto-rezist ile kaplıdır ve rezist üzerinde dikdörtgen şekilli açıklıklar bulunmaktadır. Bu şekillendirilmiş alttaşlar saçtırma işlemine tabi tutulduklarında film ile dolan dikdörtgen şekiller oluşur. Saçtırma işleminden sonra, alttaşın tüm yüzeyi hedef materyal ile kaplanır. Daha sonra bu alttaş kaldırma işlemine (lift-off) sokulur. Kaldırma işleminden sonra fotorezist, üzerindeki atomlarla beraber alttaş yüzeyinden ayrılır ve üzerinde basamakların olduğu bir alttaş elde edilir., üzerine biriktirilen materyalin kalınlığı ölçülür.

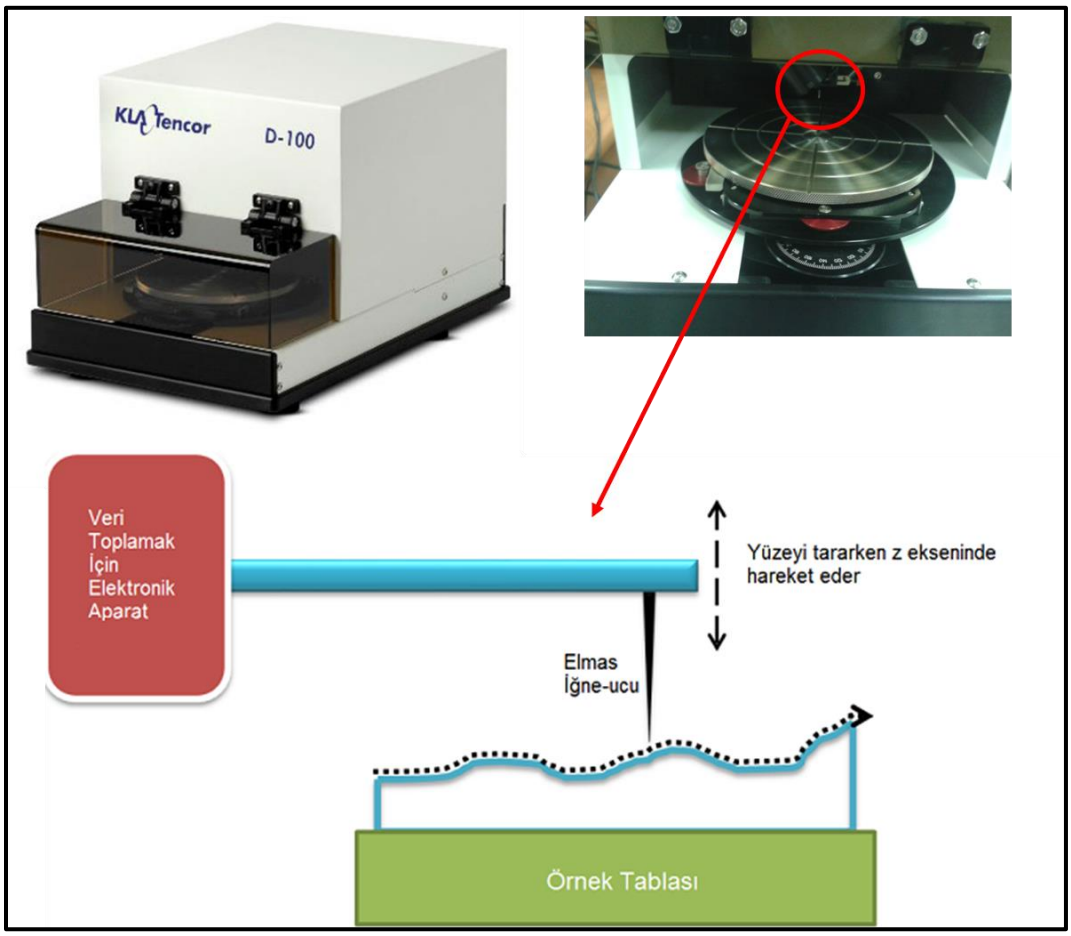


Şekil 16 Kalınlık kalibrasyonu için kullanılan alttaşların şematik çizimi ve optik mikroskop görüntüsü

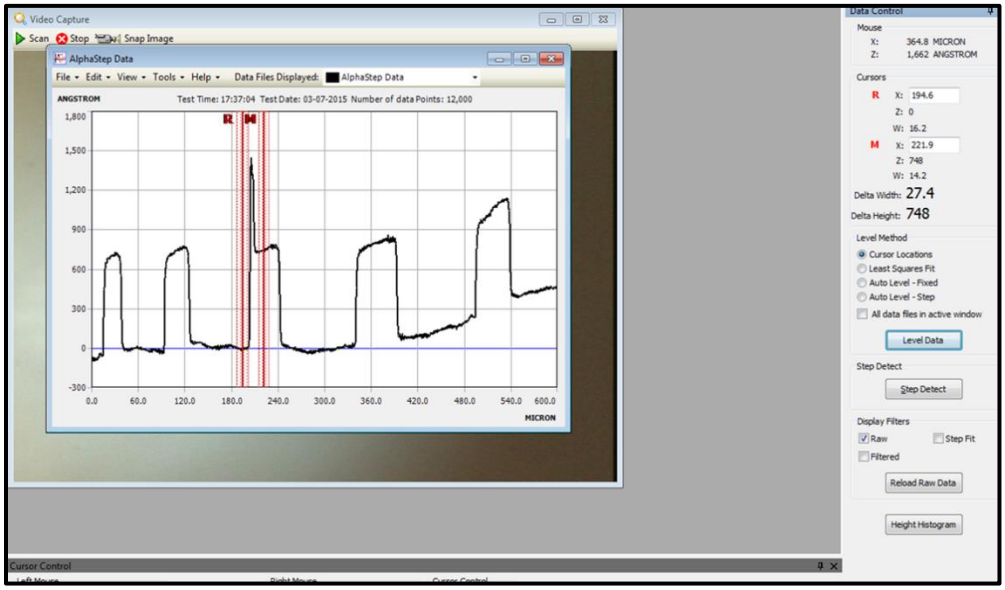
Kalınlık ölçümleri için Şekil 17'de gösterilen KLA Tencor Alpha-Step D100 yüzey profilometresi kullanılmıştır. Profilometre 3 ana bölümden oluşur; tarama esnasında yüzeyle fiziksel temas kurarak dikey yükseklik verisini oluşturan iğne, iğneden aldığı yükseklik bilgisini elektrik sinyallerine dönüştüren bir elektronik sistem ve bu elektrik sinyallerinden 2 boyutlu grafik oluşturan bilgisayar. İnce film üzerinde hareket eden elmas iğne ucu düz bir hattı tarayıp, basamak yükseltilerini ve çukurları ölçer. Bu cihazlar, 2 boyutlu grafiklerde nanometre altında kesinlik elde edilebilecek kadar hassaslardır.

Profilometre ile ölçülmüş kalibrasyon ağının bir görüntüsü Şekil 18'de gösterilmektedir. Cihazı kontrol eden yazılım sayesinde ölçüm yüzeydeki eğime göre düzeltilebilmektedir. Yine aynı yazılım ile referans katmanı ve ölçülecek katman manuel olarak belirlenir ve aradaki fark ölçülür.

Projede kullanılan materyaller manyetron saçtırma ve buharlaştırma yöntemleriyle üretilmiş ve en uygun üretim koşulları ve büyüme hızları tespit edilmiştir. Bu malzemelerden manyetron saçtırma ile üretilmiş olanların büyüme hızları Tablo 1'de verilmiştir. Burada Au ve Pt elektriksel bağlantı kollarını ve yüzeylerini üretmek için, Pt ve Ta yüksek spin yörünge etkileşimli katman olarak aygıt tasarımlarında, Ti alttaş üzerine aygıtların ve filmlerin tutunmasına yardımcı alt katman olarak, Ti ve Ta aygıtların oksitlenmesini engelleyici kapak katman olarak



Şekil 17 KLA Tencor marka yüzey profilometresi ve çalışma prensibi



Şekil 18 Profilometre ile alınmış kalibrasyon ağı ölçümü

kullanılmıştır. Manyetik malzemelerden $Ni_{81}Fe_{19}$ (Py) astroid nano-mıknatıslarında, Co, Co ve Pt hedeflerinden eş zamanlı saçtırma ile üretilen CoPt ve CoFeB malzemeleri skyrmion oluşumuna elverişli çoklu katmanlı yapılarda kullanılmıştır.

Aygıt üretiminde bu malzemelerin aşındırılması gerektiğinden iyon aşındırması için de bir kalınlık kalibrasyonu yapılmıştır. İyon aşındırması işleminde standart olarak 60 V'luk bir hızlandırıcı potansiyelinde 12 mA'lik bir demet akımı kullanılmıştır. Her hedef için aşındırma hızları Tablo 2'de gösterilmiştir. C tabakası için aynı zamanda SUNUM 'da bulunan oksijen plazma aşındırma sistemi kullanılmış bu katman 5 ºA/sn hızla aşındırılmıştır. Bu sistemin avantajı oksijen plazma ortamında yapılan aşındırma işleminde yüzeydeki karbon, ortamdaki oksijen ile birleşip CO_2 oluşturması ve yüzeyden kolayca kalkmasıdır.

Örneklerin desenlenmesi aşamasında maske görevi gören C ve Cr malzemeleri elektron demeti ile buharlaştırma yöntemiyle üretilmiştir. C büyütme için 3 mm kalınlığında ve 0,5 cm uzunluğunda C çubuklar kullanılmıştır. C çok düşük büyüme hızında ancak düzgün bir yapı oluşturacağından 0,2 ºA/sn hızda büyütülmüştür. Cr için ise 0,3 ºA/sn büyüme hızı ayarlanmıştır.

Tablo 1 Manyetron Saçtırma Koşulları ve Büyüme Hızları

Hedef	Saçtırma Tipi	Ar Basıncı (mTorr)	Güç (Watt)	Büyüme Hızı (ºA/sn)
Ti	DC	2	100	0,41
Ta	DC	2	100	0,7
Pt	DC	2	50	0,68
$Ni_{81}Fe_{19}$	DC	2	100	0,7
CoNi	DC	2	200	1
Co	DC	2	100	0,66
IrMn	DC	2	100	1
CoFeB	DC	2	100	0,43
Au	DC	2	80	2,35
SiO_2*	RF	2*	200	0,14

* SiO2 büyütme işlemi 1:4 O_2:Ar karışımında alttaşa 20V DC gerilim uygulanarak yapılmıştır

Tablo 2 İyon aşındırma hızları

Hedef	Aşındırma Hızı (°A/sn)
Ti	0,358
Ta	0,323
NiFe	0,375
Si	0,44
C	0,097
CoFeB	0,315
CoNi	0,337
Cr	0,161
Au	0,5
Pt	0,5
SiO_2	1,2

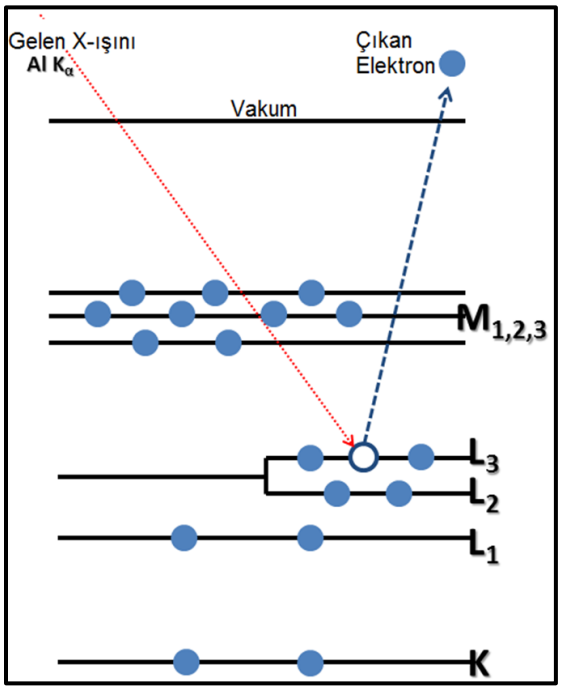
3.2.1.4. XPS ve EDX

X-ışını Fotoelektron Spektroskopi (XPS) iyi bilinen örneğin yüzeyindeki elementel ve kimyasal durum bilgilerini belirleyebilen yüzey analiz tekniğidir. Bu yöntem malzemenin üzerine belli enerjili bir foton düştüğündeki elektron yayılımı olan fotoelektrik etkiden faydalanır. En yaygın olarak, monokromatik, 1486.7 eV'ta Kα'nın düşük enerjili X-ışını radyasyonu ya da 1253.6 eV'ta Mg Kα çok yüksek vakumda bulunan malzemenin yüzeyinden çekirdek seviyesi elektronlarını kopartmak için kullanılır. Dışarı verilmiş elektronun kinetik enerjisi ve aşağıdaki formül kullanılarak elektronun çekirdek seviyesindeki bağlayıcı enerjisi bulunur:

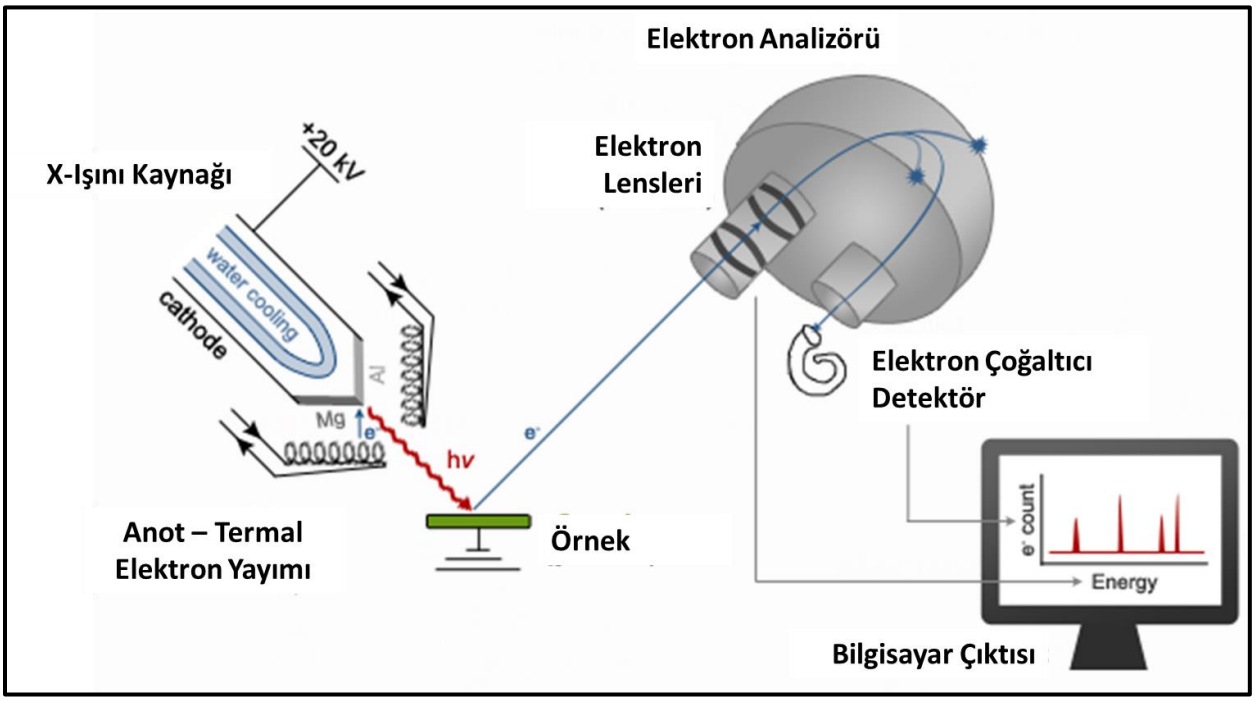
$$E_b = E_X - E_K - \varphi$$

Bu formülde φ iş fonksiyonu, E_b elektronun bağlayıcı enerjisi, E_X X-ışını radyasyonunun enerjisi ve E_K elektronun kinetik enerjisidir.

Foton yayınlanmış elektronun enerjisi atıldığı elemente özgüdür ve ayrıca elektron o atomun kimyasal ortamına duyarlı olduğundan örneğin kimyasal durum bilgisi elde edilebilir. Çekirdek seviyesindeki elektron atıldıktan sonra ekipmanlar yardımıyla ortaya çıkan Auger elektronunun yayılımı sonucu atomun dış yörüngelerinden bir elektron bu boşluğu doldurur. Bu foto-elektronlar diğerlerine göre daha az kinetik enerjiye sahip olduğundan yalnızca yüzeye daha yakın olanlar örnekten kaçabilir ve detektöre çarpabilir. Bu yüzden XPS sadece yüzeyin kimya-



Şekil 19 X-ışını radyasyonu altında fotoelektrik etkinin gösterimi



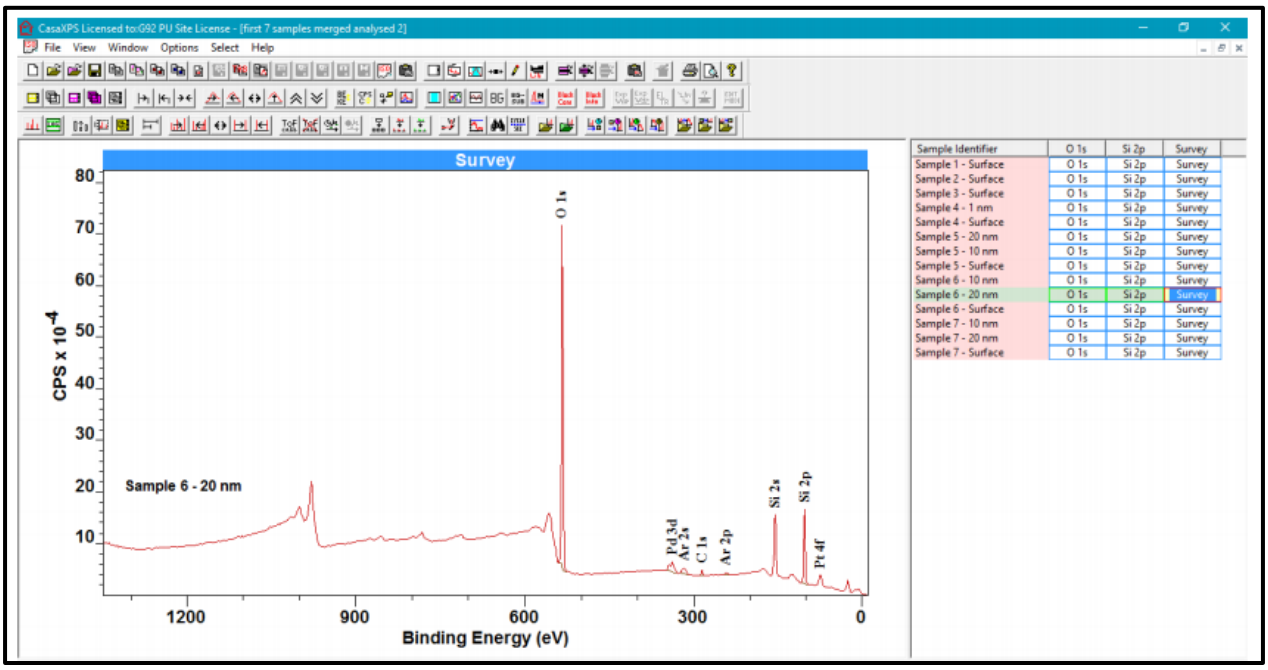
Şekil 20 XPS çalışma prensibi

sal durumuna duyarlıdır ancak örneğin yüzeyi uygun tekniklerle aşındırılarak daha derin bölgelerin kimyasal bilgisi edinilebilir. Çoğu durumda XPS makinaları iyonları inceltme için iyon tabancalarıyla donatılmıştır. Örneğin yüzeyini taradıktan sonra aynı nokta iyonlarla aşındırılabilir ve tarama daha derin bir bölgede aynı nokta için tekrar edilebilir. İyon inceltme balistik etkileşimler nedeniyle örneğin yüzeyini aşındırmak için kuvvetli iyonların ışınlarının yollanmasıdır. Aşındırmanın hangi derinlikte yapıldığı örneğe, iyon demeti ve enerjiye bağlı olan aşındırma oranından hesaplanabilir. Birbirini takip eden aşındırma ve tarama örneğin üç boyutlu sitokiyometrisini gözlemlemek için aynı bölgede çok kez yapılabilir.

X-ray radyasyonu ve Auger elektronları tarafından atılan elektronlar elektron enerji analizörü ile belirlenir. Elektronların kinetik enerjisi ile ilgili olan elektronları sayarak uygun bilgisayar yazılımı enerjinin bir fonksiyonu olarak yoğunluk spektrumu oluşturur. Bu spektrum incelenirse örnekteki elementler bulunur, bu elementlerin kimyasal bileşenleri ve eğrilerin altındaki alanı hesaplanarak her elementin miktarı elde edilebilir.

Yoğunluğa karşı enerji grafiği elde edilir edilmez çok ayrıntılı bir analiz yapılmalıdır. Başarılı bir deneyden sonra iki farklı veri kümesi bulunur. Bunlardan biri tam enerji ölçeği üzerindeki X-ray ışınları ile örneğin taranması olan inceleme taramasıdır. Bu inceleme örnekte hangi elementlerin olduğunu anlamaya yardımcı olur. İkinci veri kümesi ise daha dar enerji ölçeği üzerinde ve zirve pozisyonları arasında örneği tarama olan yüksek çözünürlüklü taramadır. Her elementin farklı kimyasal bileşenleri için zirveler 0.1 eV'a yakın olarak farklılaştığından dolayı ikinci tarama 0.1 eV düzeyinde yüksek çözünürlüklü yapılmalıdır. İnceleme taraması yalnızca örnekteki elementleri tanımlamak olduğu için inceleme taraması düşük çözünürlükte de yapılabilir.

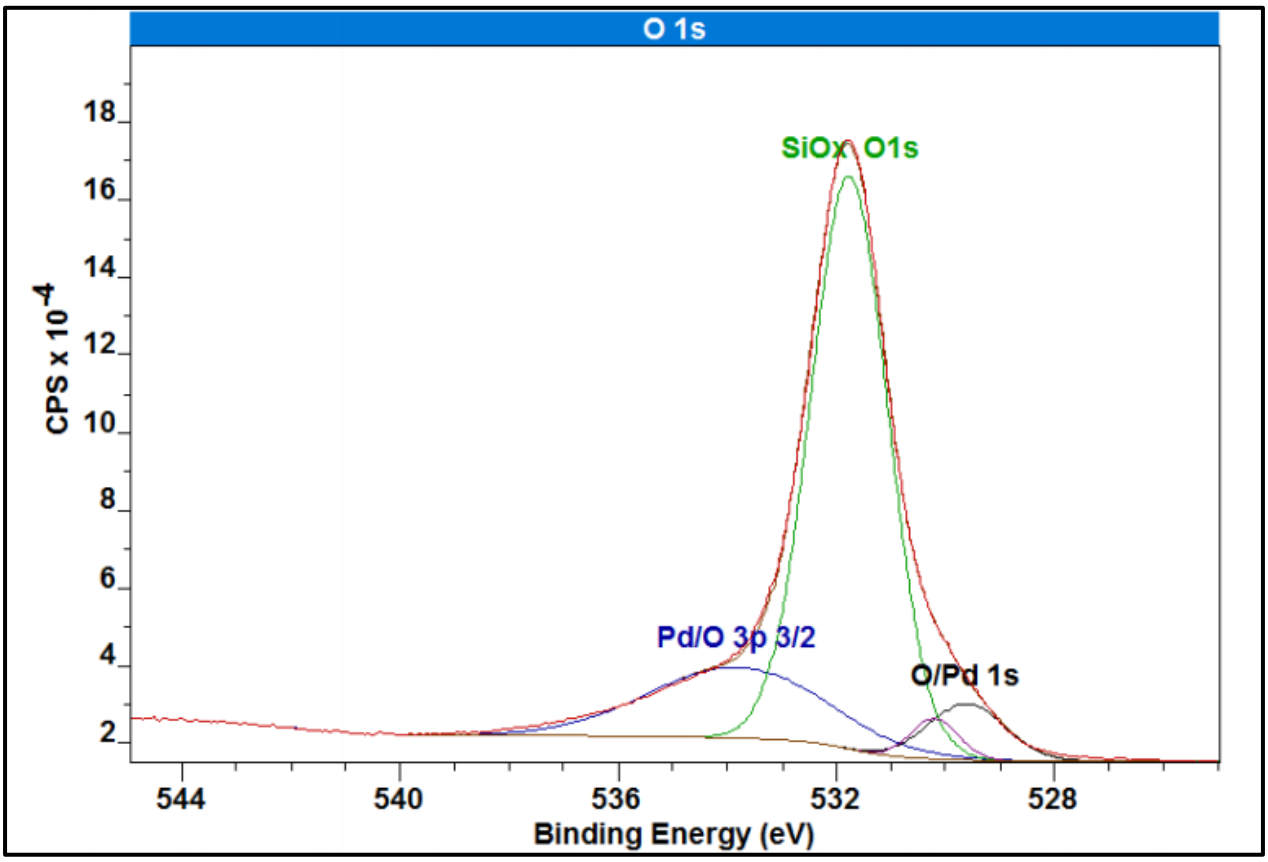
Nitel analizin ilk adımı tam spektrum incelemesinin karbon doğrulamasıdır. Karbon 1s fotoelektron enerjisi 285.1 eV'a karşılık gelir ve karbon zirvesinin pozisyonu referans olarak alınır. Eğer C1s zirvesi 285.1 eV'ta değilse bütün spektrum zirve 285.1 eV'a gelene kadar kaydırılır. Ulusal Standart ve Tenkoloji Enstitüsü (NIST) XPS veri tabanı yardımıyla elementler tanımlanır. Bu veri-tabanından her elementin farklı kimyasal bileşenlerinin değerlerini içinde bulunduran fotoelektron enerji değerleri listelenir. İkinci olarak uygun olan arka plan çıkarımı her grafiğe uygulanmalıdır. Literatürde lineer, yatay, Shirley'nin ve Tougaard'ın olmak üzere üç farklı arka plan çıkarımı metodu vardır. En çok tercih edilen metot olarak sayısal analizlerimizde Shirley arka plan çıkarımını uygulamayı seçeriz. Analizin üçüncü adımında yüksek çözünürlükte her zirvenin çevre taramalarına bakılır. Asıl amaç Gauss ve Lorentz (GL) eğrilerini her zirvenin altına yerleştirmektir. Her elementin zirvesi aslında o elementin değişik kimyasal bileşenlerine



Şekil 21 SiO_2 filminin CasaXPS yazılımındaki tarama görüntüsü

uyan farklı GL eğrilerinin toplamıdır. Bunun arkasındaki sebep elementlerin aynı olmasına rağmen bu elementlerin eletkronik enerji seviyeleri kurdukları bağlara göre farklılaşır. Fotoelektron spektrumunun bu özelliği elementlerin bolluğu ve her elementin farklı kimyasal bileşenleriyle ilgili bilgi verir. Bu ayrıntılı veri analizi bilgisayar yazılımlarıyla kolayca yapılabilir. Bu yazılımların örnekleri en yaygın ve en çok kabul edilen olarka XPSpeak, CasaXPS ve farklı markaların özelleştirilmiş yazılımlarıdır.

Laboratuvarımızda spin valf ve benzeri aygıtlarda izolasyon olarak kullanılmak üzere SiO_2 üretilmiştir. Bu malzemenin optimize edilmesi aşamasında farklı üretim koşullarında büyütülen filmler İler Ar-Ge Merkezinde XPS ile incelenmiştir. Veri analizi CasaXPS kullanılarak yapılmış ve SiO_2 malzemesinin stokiyometrisi belirlenmiştir. Şekil 21 CasaXPS yazılımına aktarılmış bir XPS yüzey taraması verisini göstermektedir. Bütün elementlerin gösterildiği bu figürdekipikler NIST veritabanına göre incelenmiş ve pik parametreleri belirlenmiştir. Bu pikleri gösteren Şekil 22'de SiOx yanında O ve Pd pikleri görülmektedir. Ölçümde görülen Pd malzemesi saçtırma sisteminde önceki işlemlerden kalan kalıntıların saçtırılıp örnek yüzeyine yapışması yoluyla oluşmuştur. Sistem temizliği yapılması ve hedefin kapağı kapalı iken uzun süre koşullandırma saçtırması bu pikleri büyük ölçüde azaltmıştır.



Şekil 22 XPS verileri üzerinde piklerin ve pik parametrelerinin belirlenmesi

XPS ile yüzey taraması yapılmakla beraber yüzeyi iyon aşındırması ile aşındırıp derinlik analizi de yapılmıştır. Her veri analiz edilerek pik parametreleri bulunmuş ve O:Si oranları araştırılmıştır. Karşılaştırma için hedef de XPS analizine tabii tutulmuş ve O:Si oranı 1,3 bulunmuştur. Tablo 3 XPS analizinden elde edilen bu oranı farklı üretim koşulları için göstermektedir. Film büyütme işlemi saf Ar ve Ar-O_2 karışık ortamda (4/1 oranında) yapılmıştır. Çeşitli RF güçlerinde yapılan saçtırma işleminde en uygun O:Si oranı 200 Watt güçte 1,54 bulunmuştur. Bu güçte farklı alttaş sıcaklıkları ve gerilimleri denenmiştir. Verimliliği en yüksek üretim koşulu (stokiyometri 1,57) alttaş oda sıcaklığındayken ve 20 V gerilim uygulandığında gerçekleşmiştir.

İnce filmlerin kimyasal analizi odaklanmış elektron ışını bombardımanı altındaki örnekten yayılmış X-ışını spektrumunun incelenmesiyle elde edilmektedir. Şematik çizimi Şekil 23'de gösterilen EDX ile atom numaraları 4 ve 92 arasında değişen atomların özgül hacmiyle tanımlanabilir ve elementlerin miktar ve ağırlıklarının oranına ulaşılabilir. X- ışınlarının

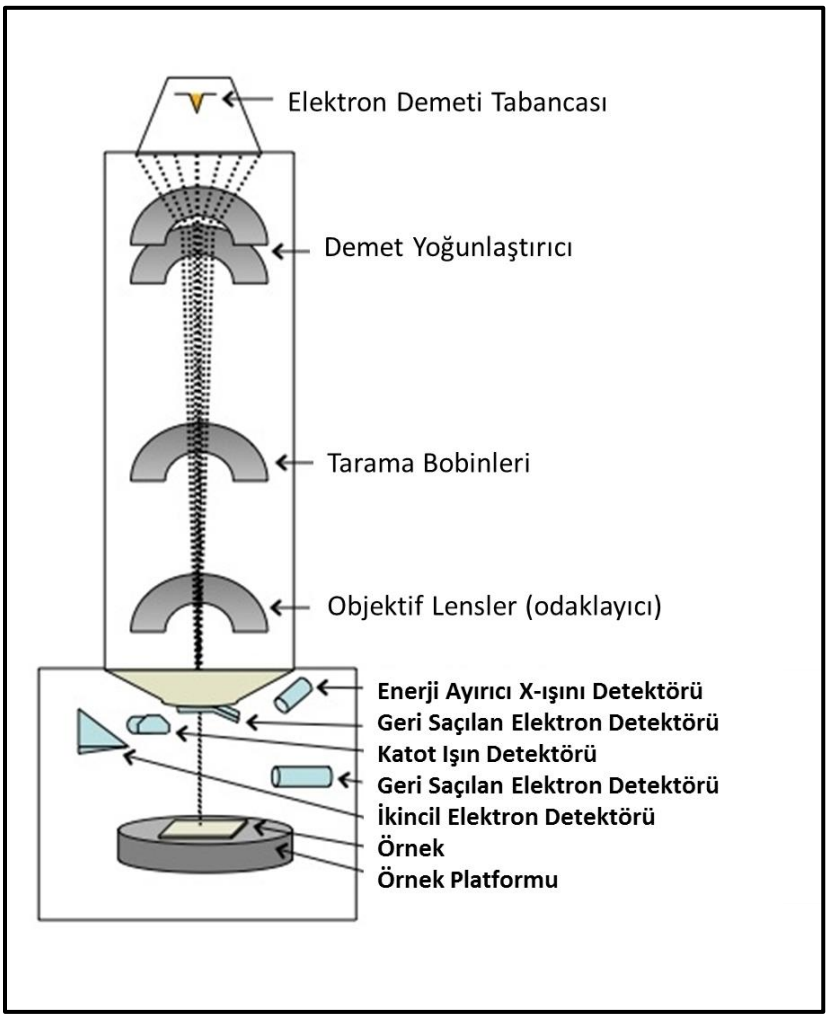
Tablo 3 XPS analizi sonuçları

T (°C)	O_2/Ar	*Alttaş gerilimi*	*Güç* (W)	*Büyüme Hızı (A/sn)*	SiO_x
25	Pure Ar	0	100	0.155	1.42
25	0.25	0	150	0.11	1.53
25	0.25	20 W RF	200	0.10	1.50
100	0.25	0	200	0.23	1.45
25	0.25	0	200	0.14	1.54 *(yüzey)* 1.49 (20 nm)
25	0.25	+20 V DC	200	0.14	1.57 *(yüzey)* 1.50 (20 nm)
25	0.25	-10 V DC	200	0.12	1.36 *(yüzey)* 1.31 (20 nm)

yayılımının yalnızca yüzeyden değil aynı zamanda örneğin daha derin bölgelerinden de (birkaç mikron) olduğundan dolayı EDX bir yüzey analiz tekniği değildir. X-ışını spektrumlarındaki zirve çizgilerinin basit niteliksel analizi elementlerin tanımlanmasına yardımcı olurken zirvelerin yoğunluğunun uygun niteliksel analizi elementlerin konsantrasyonlarının belirlenmesine yardımcı olur. Bu tekniğin basitliği atomların enerji seviyeleri arasındaki elektron geçişi sırasında X-ışını spektrumunda karakteristik bir dalga boyu olması ve bu elementlerden yayılan radyasyon enerjilerine bakarak kolayca tanımlanabilmesi altında yatar.

X-ışını ışınlarının yayılımından önce örnek üzerine yeterli miktarda elektron bombardımanı gereklidir. Bu yüzden EDX aletleri çoğunlukla elektron görüntüleme mikroskobu sistemlerine takılırlar çünkü nano ölçekte örnek görüntüleri elde etmek için odaklanmış elektron ışınları meydana getirirler. Eğer X-ışını detektörü ve ilgili analizörler de onun içine takılırlarsa aynı alet kimyasal analiz için de kullanılabilir.

Elektron bombardımanı altında katı örnek iki tip X-ışını oluşturur. Bunlardan biri elektron bombardımanı ile iç kabuk elektronu fırlatımından kaynaklı X- ışını karakteristiği ve çekirdeğin Coulomb alanında elektronların yavaşlamasından dolayı oluşan X- ışını sürecidir.



Şekil 23 EDX şematik çizimi

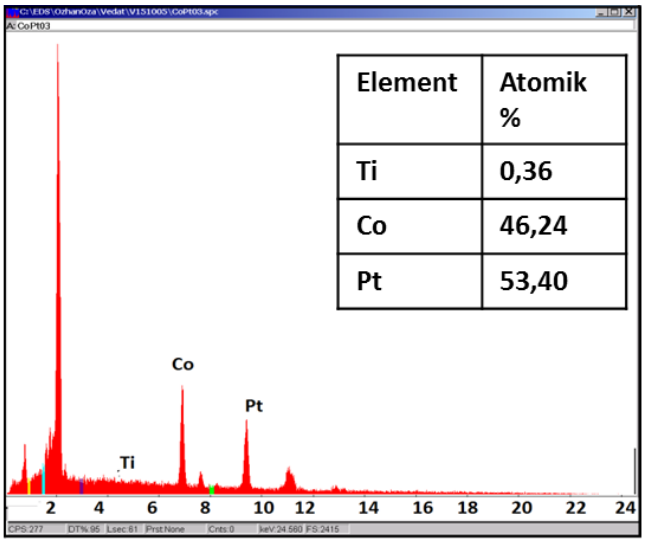
Elektronlarla gelen ışın yeterli enerjiyle atoma çarptığında atomun iç kabuğundan bir elektron fırlatılır ve arkasında bir delik bırakır. İç kabuktaki bu boşluk hemen aynı atomun dış katmanlarındaki bir elektronla doldurulur. Yüksek enerji düzeyinden düşük enerji düzeyine geçiş tam elektromanyetik spektrumda dalga boyu X-ışınlarının dalga boyuna eşit olan radyasyon yayılımını ortaya çıkarmıştır. X-ışınlarının enerjisi direk olarak elektron yayılmış atomun atom numarasıyla ilgilidir. Bir atomu iyonize etmek için olan bombardıman elektronları için en düşük enerjiye kritik iyonlaşma enerjisi denir. Bu enerjinin büyüklüğü atom numarasına (Z) direk bağlıdır ve atom numarasının artmasıyla bu değer de artar. Uygulamada atomik konsantrasyon sondalamaları için etkili uyarımlara sahip olmak yerine gelen elektronun enerjisi kritik iyonlaşma enerjisinin en az iki katı olmalıdır.

Örnek ve gelen elektron ışını arasındaki etkileşimin en önemli ikinci sonucu Bremsstrahlung denilen sürekli X-ışını radyasyonudur. Gelen elektronlar çekirdeğin coulomb alanından dolayı esnek olmayan şekilde saçılabilirler, yavaşlarlar ve ilk enerjilerinin bir kısmını X-ışını radyasyonu olarak kaybederler. Elektronun rastgele kaybettiği enerji miktarından dolayı radyasyonun son enerji dağılımı süreklidir. Bremsstrahlung ile ilgili hesaplamalar tüm enerji değerleri üzerindeki temel radyasyon olarak gözlenebilir. Fakat sinyal zirve değerlerine kıyasla deney sonucunu dikkate değer şekilde etkilemeyecek kadar küçüktür.

X-ray spektrumu gözlenir gözlenmez işlem görmemiş veri dikkatli bir analizle incelenmelidir. EDS analizinin son gözlemleri hesaplama sayılarına karşı enerjiyle gösterilen grafik tarafından temsil edilir. Bu grafik temel radyasyondan ve zirve değerlerinden oluşur. İlk adımda, grafik bilinmeyen örneğin içerisindeki elementleri anlamak yerine bu zirve değerlerinin pozisyonunu tanımlamalıdır. Bu prosedür enerji tablosu yardımıyla oldukça kolaydır. Anlam belirsizliklerinin oldukça nadir olduğundan ve zirve değerlerinin önemli ölçüde ve çoğu zaman birbirlerinden ayrıldıklarından dolayı yanlış tanımlamayla pek karşılaşılmaz. Elementleri tanımladıktan sonra özenli bir sayısal analiz örnekteki elementlerin konsantrasyonunu hesaplamak için gereklidir. Her zirve değeri bir Gauss dağılım işlevi şekline sahip olduğundan arka plan çıkarımından sonra her zirve değeri altındaki alan hesaplanmalıdır. Ölçüm parametreleri ve ölçülen cihazın teknik özellikleri nedeniyle en son sonuçlar işlem görmemiş veriler için uygun düzeltmeler yapıldıktan sonra elde edilebilir. Teknolojinin durumu sayesinde bütün bu analizler ölçümler sırasında cihazı çalıştıran bilgisayar yazılımı ile işlenebilir.

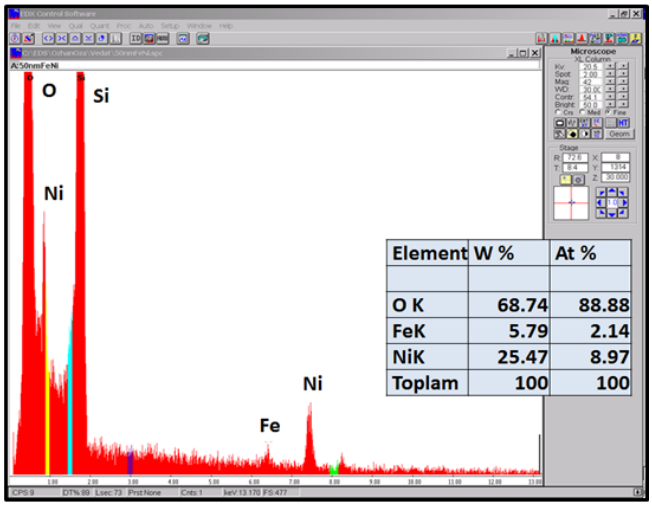
Laboratuvarımızda üretilen ince filmler Boğaziçi Üniversitesi İleri Arge Merkezi ve Sabancı Üniversitesi SUNUM'da bulunan EDX ve XPS cihazlarında incelenmiştir. EDX birden fazla element içeren filmlerdeki malzemelerin kimyasını belirlemekte özellikle kullanılmıştır. NiFe ve CoNi malzemeleri tek hedeften manyetron saçtırma ile üretilmiş, CoPt manyetik malzemesi ise iki hedeften eş zamanlı saçtırma ile üretilmiştir. Filmler üzerinde yapılan EDX ölçümleri Şekil 24'de gösterilmiştir. CoPt malzemesinde Co %46,24 iken Pt %53,4 çıkmıştır. Co:Pt oranı 0,87'dir. 1:1 oranına oldukça yakındır. CoNi ince filmlerinde tespit edilen Co:Ni oranı 0,94'tür, yani 1'e çok yakındır. Hesaplardaki hata payı göz önünde bulundurulduğunda bu oranlar kabul edilir seviyededir. Py malzemesindeki Ni:Fe oranı 25,5:5,8 yani 4,4'tür. Bu da beklenen 81:19, yani 4,3 değerine çok yakındır. Bu şekilde bir önceki bölümde belirtilen üretim koşullarında büyütülen filmler istenilen kalitede olmuştur.

(a)



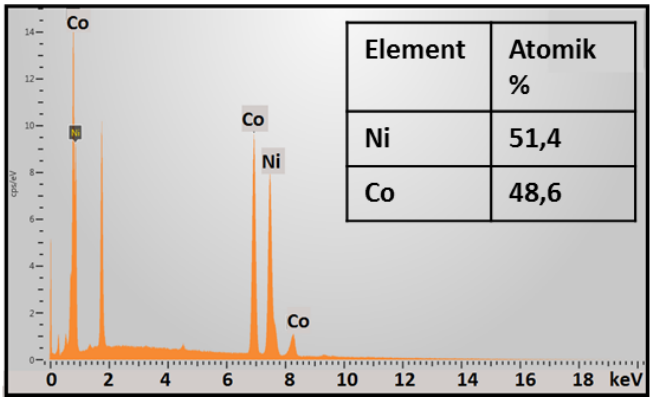
Element	Atomik %
Ti	0,36
Co	46,24
Pt	53,40

(b)



Element	W %	At %
O K	68.74	88.88
FeK	5.79	2.14
NiK	25.47	8.97
Toplam	100	100

(c)



Element	Atomik %
Ni	51,4
Co	48,6

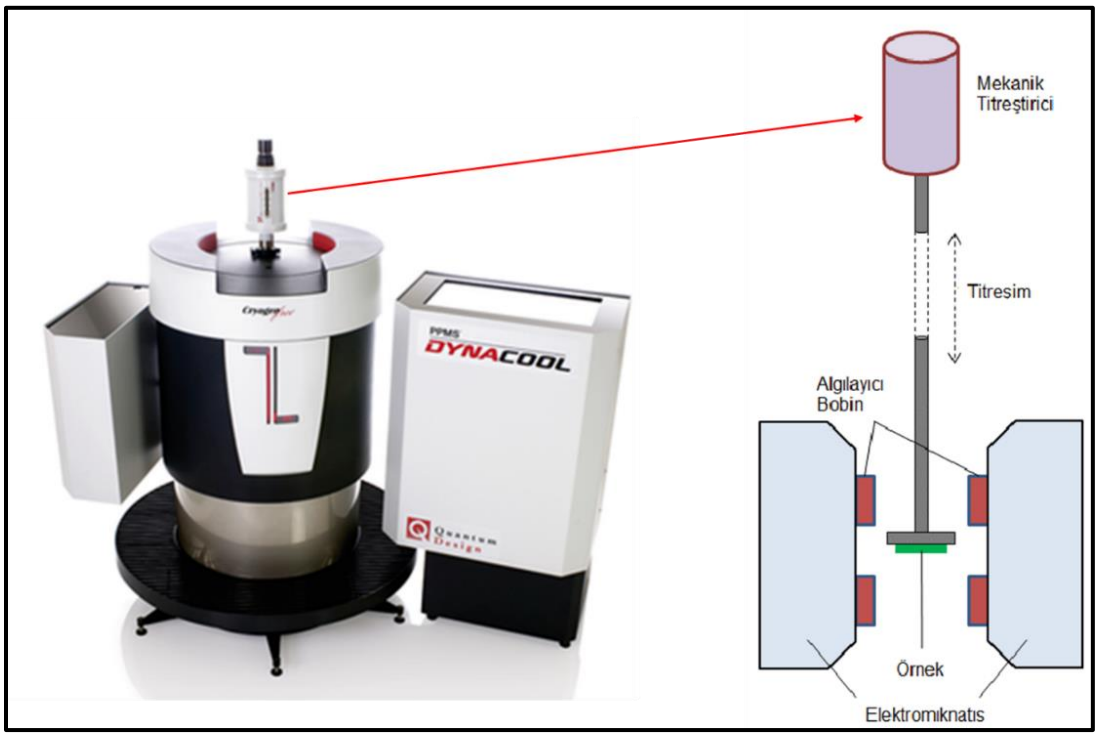
Şekil 24 Üretilen ince filminde yapılan EDX ölçümleri ve ölçüm sonucunda hesaplanan elementlerin ağırlık ve atomik yüzdeleri (a) Py ($Ni_{81}Fe_{19}$) (b) CoPt (c) CoNi

3.2.1.5. VSM

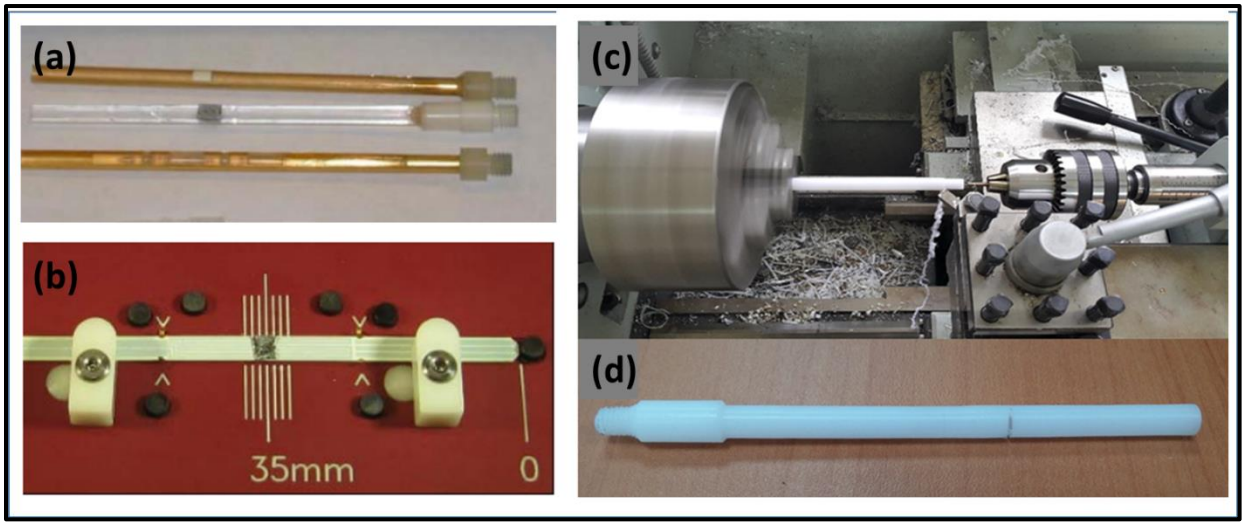
Üretilen manyetik filmlerin manyetik özellikleri titreşen örnek manyetometresinde (VSM) ölçülmüştür. Bunun için Quantum Design marka DynaCool fiziksel ölçüm sistemi (PPMS) kullanılmıştır. Bu sistem sıvı He soğutmalı ve kapalı He döngüsünü bir kompresör ile sağlayan bir "kyostat"tır. Sisteme çeşitli elektriksel ve manyetik ölçüm opsiyonları entegre edilebilmektedir. Laboratuvarımızdaki ünite 2K sıcaklığa inebilmekte ve 9 T manyetik alan uygulayabilmektedir. Şematik çizimi elektriksel ölçümler kısmında verilen PPMS sistemimize manyetik ölçümler için VSM opsiyonu ve VSM-fırın opsiyonu eklenmiştir. VSM fırın opsiyonu ile örnek üzerindeki sıcaklık 1000 K'e kadar çıkarılabilmektedir.

Şekil 25'deki basit içimde gösterildiği üzere, küçük manyetik örnek, manyetik olmayan bir çubuğun ucuna yerleştirilir ve bir tür mekanik titreştirici sayesinde titreştirilir. Örnek titreştirildiği zaman ortaya çıkan manyetik akıdaki değişim titreşen örneğin yakınına yerleştirilen toplayıcı bobinlerde elektrik akımı oluşturur. Bobinlerde indüklenen emf'in büyüklüğü, örneğin mıknatıslanması ile orantılıdır. Emf sinyali kenetlemeli yükseltici (lock-in amplifier) ile arttırılır, cihazı idare eden elektronik sisteme yollanır ve veriler bilgisayar yazılımı tarafından alınır. PPMS VSM modülü küçük bir eğimölçer, nispeten büyük bir salınım genliği (1-3mm en yüksek) ve 49 Hertz frekans kullanır. Bu koşullar altında cihaz 1 Hz'lık veri alma hızıyla 10^{-6} emu çözünürlüğe sahiptir. Farklı örneklerin histerezis döngüsü (hysteresis loop) elde etmek için ölçümler sırasında harici bir manyetik alan uygulanabilir.

VSM modülünde örnek yerleştirilen cam veya bakır çubuklar motora bağlı çubuğa monte edilir. Si alttaşlar üzerine büyütülmüş filmler Ti veya Ta ile kapaklanmış olarak hazırlanır ve alttaşlar 2-3 mm genişliğinde kareler halinde kesilir. Şekil 26a'da gösterilen cam çubuklara "zircar cement" adı verilen suda kolayca çözünen bir yapıştırıcı ile yapıştırılır ve kapton bant ile sarılır. VSM-fırın modülünde çubuklar motor kısmının üst tarafında sisteme kablolarla bağlanır. Bu kablo ile Şekil 26b'de gösterilen özel çubuk üzerindeki dirençli tellere ve sıcaklık sensörüne bağlantı kurulur. Çubuktan akım geçirilince çubuk yüzeyi ısınır ve bu sıcaklık sensör tarafından tespit edilir. Örnekler bu çubuklarla sisteme yerleştirildiklerinde manyetik alan çubuk boyunca yani düzleme paralel olur. Düzleme dik manyetik alanlar elde edebilmek için yeni örnek



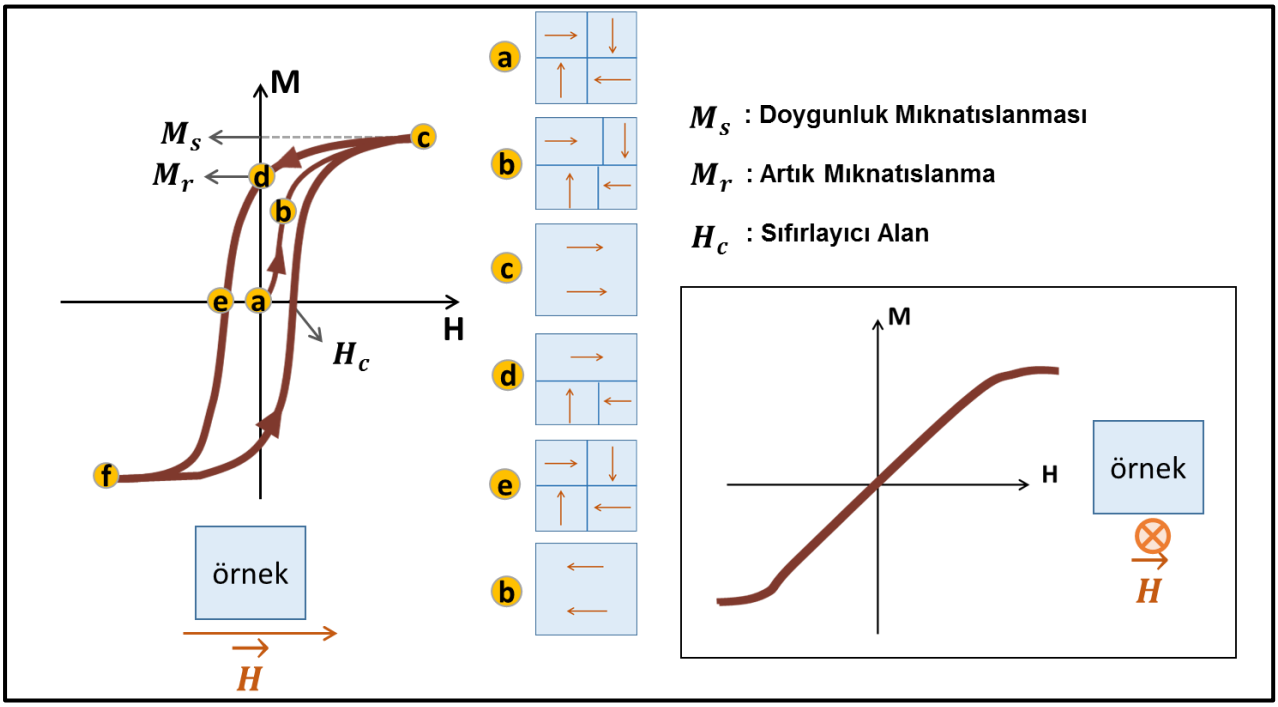
Şekil 25 Quantum Design Dynacool Fiziksel Ölçüm Cihazı (PPMS) sistemine entegre edilmiş Titreşen örnek manyetometresi (VSM) ve şematik çizimi



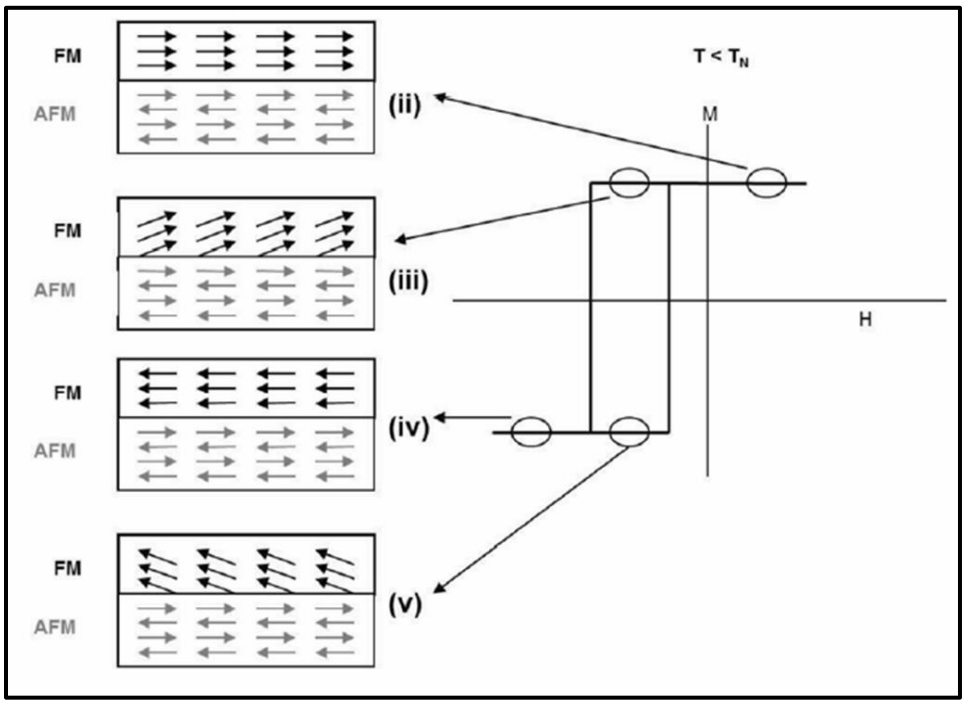
Şekil 26 Torna cihazında üretimi (a) ve bitmiş hali (b) gösterilen VSM cihazı çubukları Delrin denen yumuşak malzemeden yapılmıştır

çubukları atölyemizde üretilmiştir. Şekil 26c'de gösterilen torna işleminde düşük sıcaklıklara dayanıklı ve manyetik karakteristiği olmayan Derlin malzemesi kullanılmıştır. Şekil 26d'deki resimde çubuğun ortasındaki kesitten içeri itilen alttaş parçası kapton ile de sarılarak sabitlenir. Bu şekilde örnek kaymadan düzleme dik manyetik alanda da titreştirilebilir.

Düzlem-içi anizotropiye sahip ferromanyetik malzemelerde görülen örnek bir histerezis döngüsü Şekil 27'de gösterilmiştir. Kolay eksene (easy axis) (bu durumda düzleme) paralel uygulanan bir manyetik alanda mıknatıslanmanın değişimini gösteren bu grafikte çoklu domen yapısına sahip ancak mıknatıslığı olmayan bir örnek yüksek manyetik alanda doygunluğa erişmiştir. Doygunluk mıknatıslanması, M_S, denen bu değerden küçülen bir manyetik alanda mıknatıslanma küçülür ancak manyetik alan sıfırlandığında sıfırlanmaz (M_r, atık mıknatıslanma). Manyetik alan ters yönde belirli bir değere ulaştığında - ki buna sıfırlayıcı alan, H_c, denir-



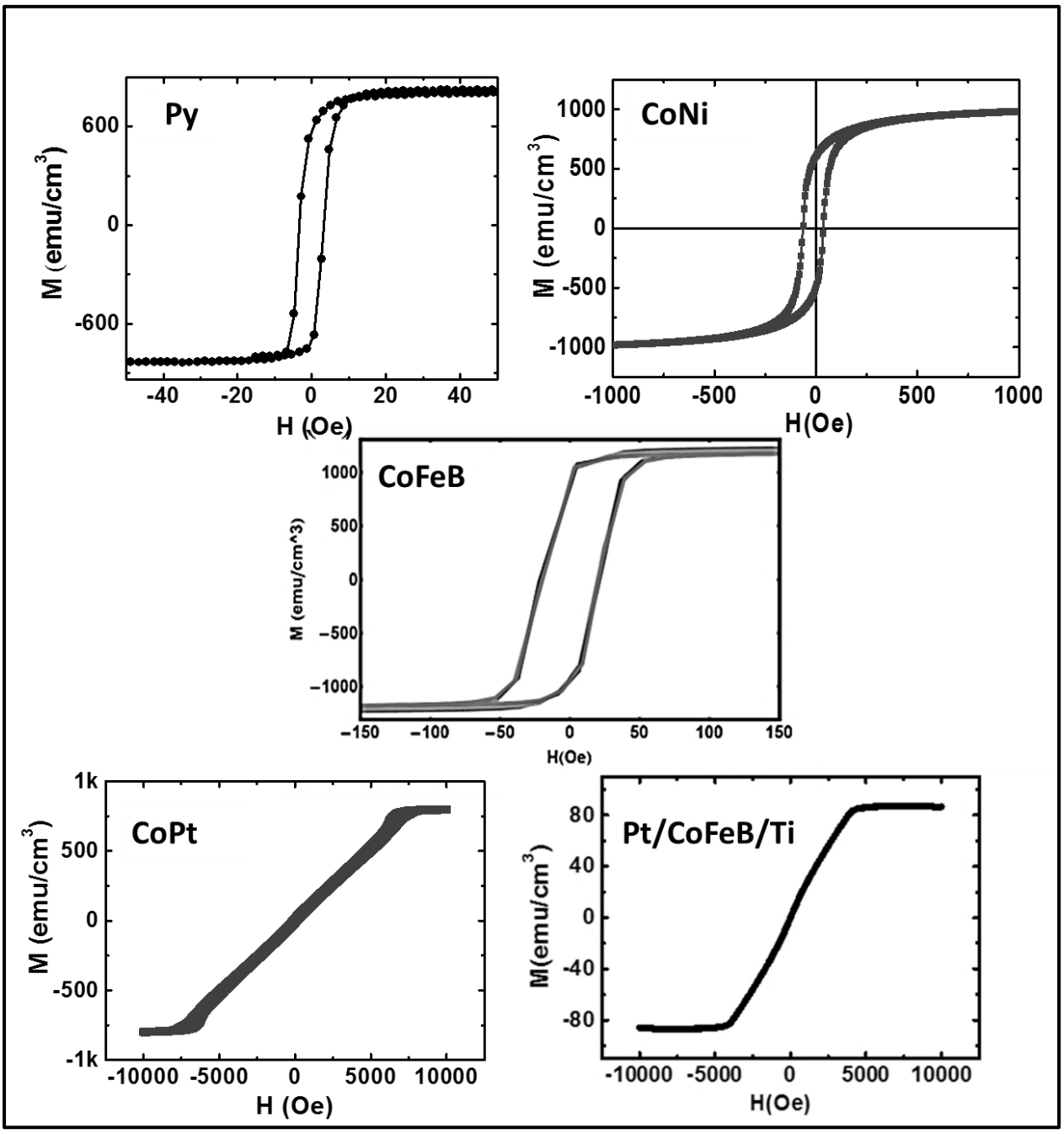
Şekil 27 Histerezis döngüsü ferromanyetik bir malzeme için verilmiştir. Örnek bir manyetik malzeme üzerinde farklı manyetik alanlarda domen yapısının değişimi gösterilmiştir. Düzleme dik bir manyetik alanda aynı örneğin VSM ölçümü histerezis göstermemektedir.



Şekil 28 AFM/FM çoklu katmanlarında değiş-tokuş eğilimi etkisiyle oluşan M-H grafiği ve mikro-manyetik konfigürasyonun şematik çizimi

malzemenin mıknatıslığı giderilir. Ters yönde büyük bir manyetik alan örneği bu sefer ters yönde mıknatıslar. Histerezis döngüsü sıfır manyetik alanda simetriktir. Düzlem-içi mıknatıslanmaya sahip bir örnek düzleme dik bir manyetik alana maruz kaldığında, şekilde gösterilen tarzda bir M-H grafiği gözlenir ve histerezis bulunmaz.

Histerezis döngüsünün simetrisinin olmadığı durum, bir ferromanyetik (FM) ve anti-ferromanyetik (AFM) malzemenin üst üste üretildiği durumdur, bkz. Şekil 28. AFM malzemeler net bir mıknatıslanmaya sahip değildir. Ancak FM'lerle bir arada kullanıldıklarında yüzeydeki domenlerin mıknatıslanma yönüne ters olarak FM mıknatıslanmasını sabitlerler. Değiş-Tokuş eğilimi denilen bu durumda mıknatıslanmayı bir yöne çevirmek kolay iken, ters yöne çevirmek daha fazla manyetik alan gerektirir. Histerezis eğrisi de değiş-tokuş alanı yönünde kayar. Spin-valf yapılarında manyetik katmanlardan birinin mıknatıslanmasını sabitlemek için değiş-tokuş eğiliminden faydalanılır. Sabit katman denilen bu katman GMR ölçümlerinde referans katman olur ve serbest katman denilen ikinci katmanın mıknatıslanmasının yönü değiştirilerek aygıt paralel durumdan anti-paralel duruma kolayca geçirilir.

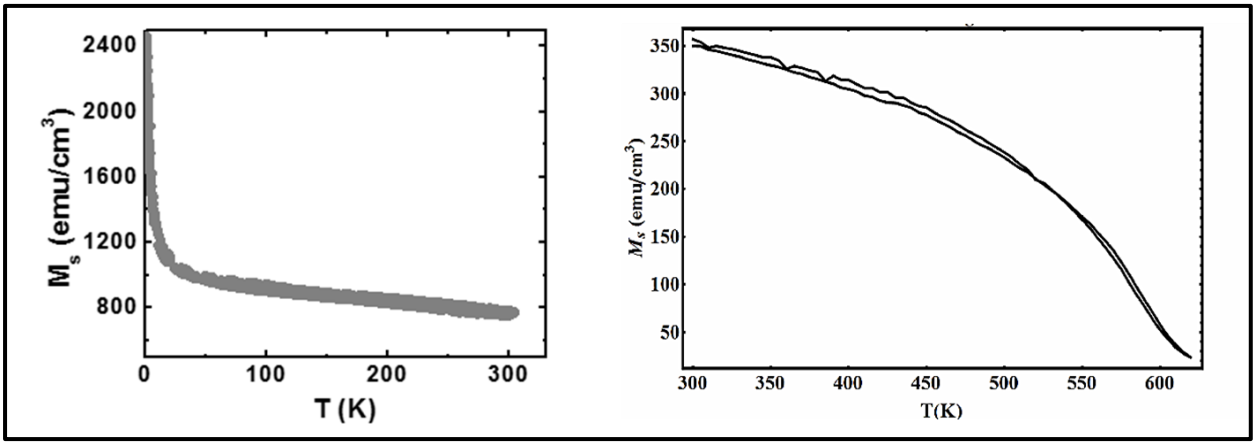


Şekil 29 Oda sıcaklığında düzlem içi bir manyetik alanda alınan VSM ölümleri Py, $Ni_{81}Fe_{19}$, CoNi, $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$, CoPt filmleri ve 60 tekrarlı [Pt(5nm)/$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ (1nm) /Ti(1nm] çoklu katmanlı yapısı için verilmiştir.

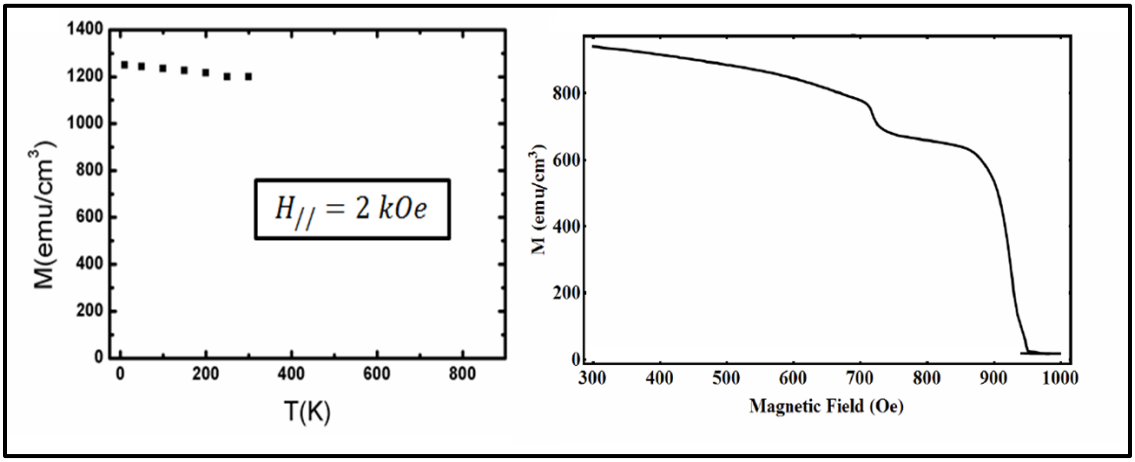
VSM verileri kullanılan çubukların ve Si alttaşların hatta alt ve kapak katmanların sebep olduğu manyetik arkafon sinyaline göre düzeltilmiştir. Kullanılan her düzenek için oda sıcaklığında ve sıcaklığa bağlı olarak VSM ölçümleri alınmış, Matematika programında bu arkafon sinyali deneysel veriden çıkarılmıştır. Mıknatıslanma değeri ölçülen manyetik moment değerinden örneğin hacmi kullanılarak hesaplanmış ve emu/cm^3 biriminde kaydedilmiştir.

Şekil 29 kullanılan manyetik filmlerin oda sıcaklığında alınmış VSM verilerini analiz edildikten sonra göstermektedir. Bu grafikler yüzeye paralel bir alanda alınmıştır. Py, CoNi ve $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ filmler düzlem-içi anizotropiye sahiptir. Sıfırlayıcı alanı 3.5 Oe olan Py filmi doygunluk manyetizasyonu 800 emu/cm^3 olarak tespit edilmiştir. Bu değer literatürde görülen 880 emu/cm^3 değerine oldukça yakındır. CoNi filmi için ise sıfırlayıcı alan 50 Oe, doygunluk mıknatıslanması 950 emu/cm^3'dır. $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ filmi için sıfırlayıcı alan 23 Oe ve 2 kOe altında doygunluk mıknatıslanması 1,2 kemu/cm^3 olarak belirlenmiştir. CoPt filmler ve Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı yapısının 60 tekrarından oluşan film düzleme dik anizotropi göstermektedirler. Bu malzemelerin anizotropi alanları sırasıyla 7500 Oe ve 4000 Oe'tir.

Py filmi farklı sıcaklıklarda incelenmiştir. Şekil 30'de gösterilen sıcaklığa bağlı ölçümler VSM ve VSM-fırın modülünde yapılmış ve farklı zamanlarda üretilmiş farklı örneklere aittir. Fırın modülüne ait veride oda sıcaklığı doygunluk mıknatıslanmasının olduğu 880 emu/cm^3 görülmektedir. Bu farklılıklar saçtırma hedefinin zaman içinde değişmesinden, vakum sisteminde oluşan kontaminasyondan ve hacim hesabındaki hata payından kaynaklanabilmektedir. Py mıknatıslanması sıcaklık düştükçe artmaktadır. Oda sıcaklığında 880 emu/cm^3 olan M_s 2 K'de 2400 emu/cm^3 'e kadar çıkmaktadır. Yüksek sıcaklık verilerinden Py malzemesinin Curie



Şekil 30 Py filmin sıcaklığa bağlı doygunluk mıknatıslanması düşük sıcaklıklarda ve VSM-fırın modülü ile alınan veriler

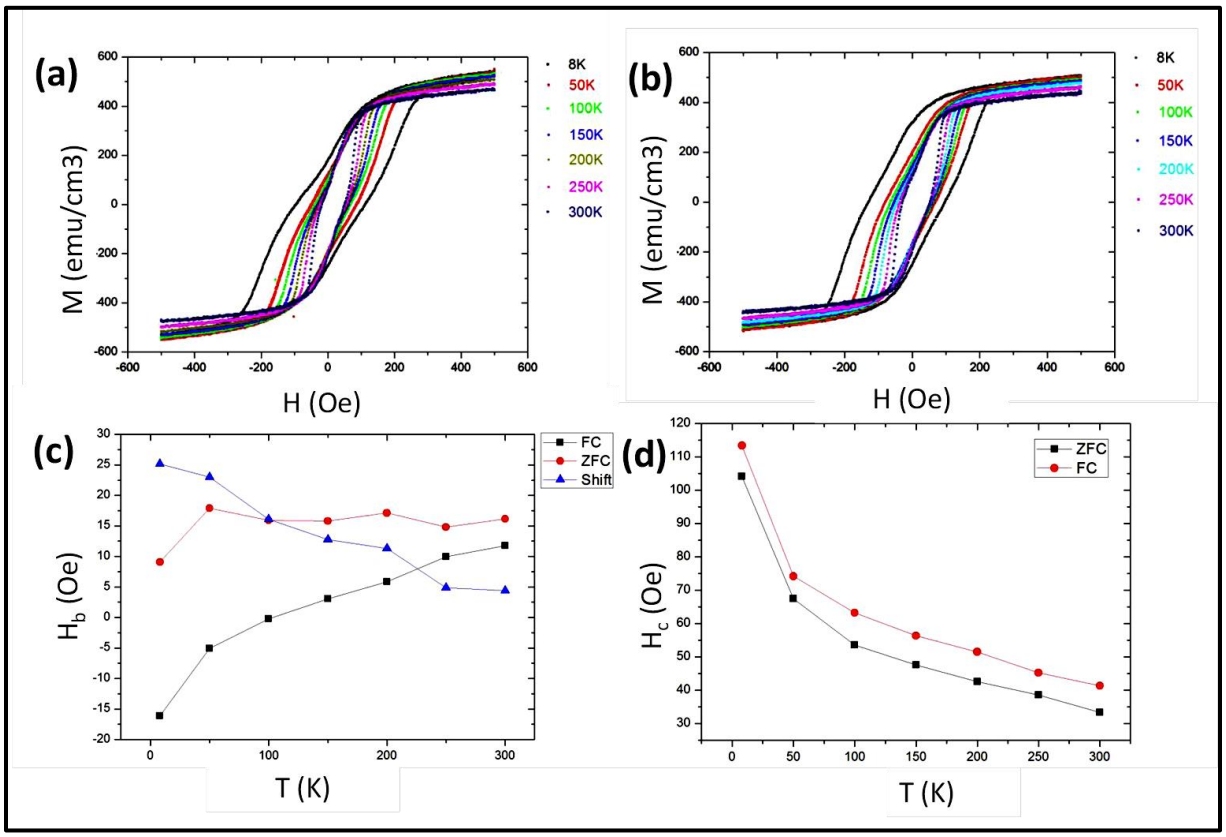


Şekil 31 $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ malzemesinin VSM'de yapılmış sıcaklığa bağlı manyetik karakterizasyonu. Ölçümler düzleme paralel 2k Oe manyetik alan altında yapılmıştır.

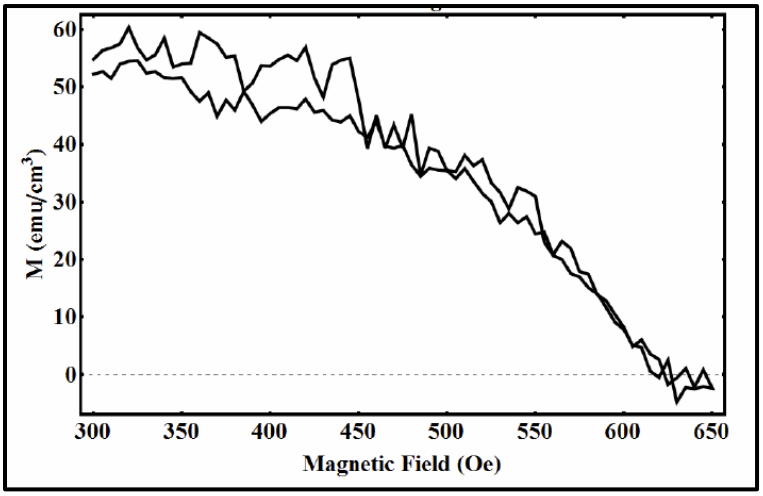
sıcaklığı 620 K olarak tespit edilmiştir. CoFeB filminin doygunluk mıknatıslanması düşük sıcaklıklarda pek değişmemiştir. Yüksek sıcaklıklarda alınan verilerde Curie sıcaklığının 950 K olduğu görülmektedir.

Spin valf aygıtlarının tasarımında referans bir manyetik katman değiş-tokuş etkisi ile mıknatıslığı sabitlenir. Bu etkinin en iyi görüldüğü malzemelerden biri IrMn/Py ara yüzüdür. Bu sebeple 50 nm IrMn üzerine 10 nm Py büyütülmüş ve manyetik karakteristiği incelenmiştir.

Şekil 32 bu örneklerdeki VSM ölçümlerini göstermektedir. Oda sıcaklığından başlanıp düşük sıcaklıklara doğru gidilerek elde edilen M(H) grafikleri bu resimde gösterilmektedir. Oda sıcaklığında değiş tokuş alanı, H_b, 17 Oe olarak gözlenmiştir. Bu değer sıcaklıkla pek az değişmektedir. Bunun yanında sıfırlayıcı alan, H_c, düşük sıcaklıklarda artış göstermektedir. Şekil 32c ve Şekil 32d sırasıyla H_b ve H_c 'nin sıcaklığa bağlı değişimini ZFC kısaltmasıyla göstermektedir. Aynı şekilde üretildikten sonra PPMS sisteminde 10 T manyetik alanda 4K'e kadar soğutulmuş FC kısaltmalı örneklerin değerleri de sunulmuştur. Şekil 32b'de M(H) grafikleri gösterilen bu örnekler oda sıcaklığında benzer bir etki gösterirken (H_b =12 Oe) 100 ^{0}C'de H_b sıfırlanmış ve daha düşük sıcaklıklarda ters yönde bir değiş tokuş alanı görülmüştür. Şekil 32c'deki üçgen semboller manyetik alanda soğutulan örneklerin soğutulmayanlara göre değişimini göstermektedir. İki uygulama arasındaki fark düşük sıcaklıklarda oldukça fazlaysa da oda sıcaklığında bu değişim 5 Oe kadardır. 120 ^{0}C'de 40 dk tavlanan örneklerde bu fark 20 Oe kadar artmıştır. VSM-fırın modunda alınmış ölçümler Şekil 33'de gösterilmiştir. Buna göre 630K'de IrMn değiş-tokuş etkisini kaybetmektedir.



Şekil 32 IrMn/Py katmanlı yapısının manyetik alana bağlı mıknatıslanma grafikleri (a) üretildikten sonra soğutulan ZFC ve (b) 10 T manyetik alanda soğutulan FC örnekleri için çizilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen değiş tokuş alanı (c) ve sıfırlayıcı alanın (d) sıcaklığa bağlı değişimi

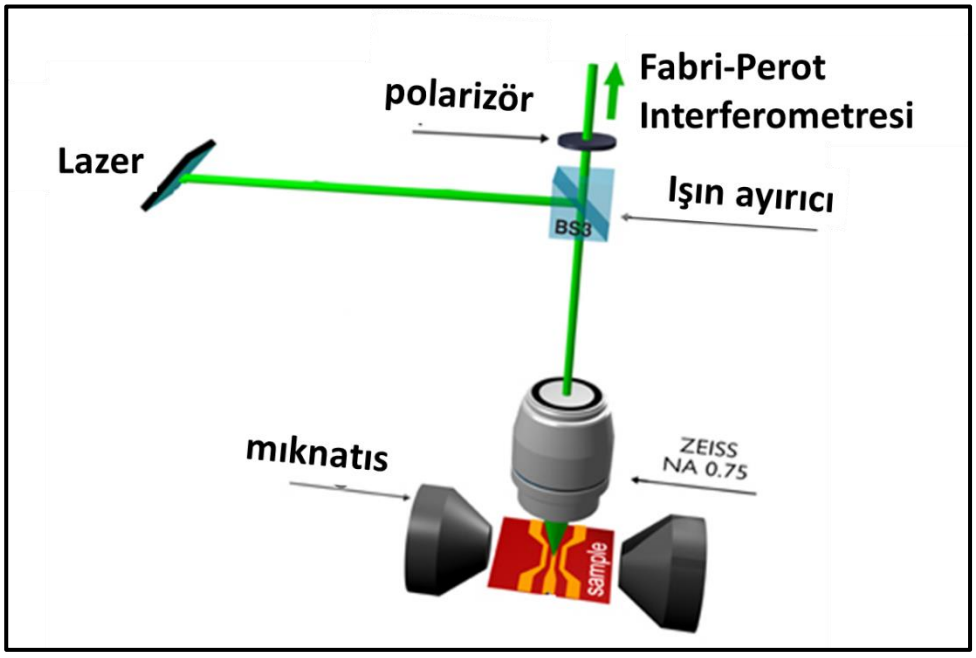


Şekil 33 IrMn/Py yapısının 2 kOe manyetik alanda alınmış mıknatıslanmasının sıcaklıkla değişimi

3.2.1.6. BLS

Brillouin ışın saçılması (Brillouin Light Scattering, BLS) ışığın bir malzemedeki fononlarla ya da magnonlarla (spin dalgaları) etkileşimini kullanarak bu kuazi-parçacıkların özelliklerini tespit eder. Manyetizma çalışmalarında spin dalga modları ve frekansları bu yöntemle tespit edilebilir. Şekil 34'te görüldüğü üzere, bir lazer ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bir ışın demeti bölücüsünden geçen lazer materyalin üzerine odaklanır. Manyetik materyal içinde ışığın etkileşime geçeceği spin dalga modlarını aktifleştirmek için bir elektromıknatıs yardımıyla manyetik alan uygulanır. Yüzeydeki magnonlarla etkileştikten sonra geri yansıyan ışın demeti bir Fabry-Perot İnterferometre detektörü aracılılığıyla tespit edilir.

Manyetik materyal içinde oluşan spin dalgaları, malzemenin üst ve alt yüzeylerinde yayılır. Bu spin dalgalarının yayılma vektörü, k, mıknatıslanma yönüne dik olur. Aktifleştirilen bu dalga moduna Damon-Eshback modu ya da yüzey modu denir. Işığın bu modlarla etkileşimi momentum transferi şeklinde gerçekleşir ve iki şekilde olabilir: fotonun kinetik enerjisini kaybederek bir spin dalgası oluşturması ki buna Stokes prosesi denir ve fotonun bir spin dalgasını emerek enerji kazanması, buna da anti-Stokes prosesi adı verilir. DMI görülmeyen malzemelerde bu Stokes ve anti-Stokes frekanslarındaki pikler aynı yerde veya birbirlerine çok



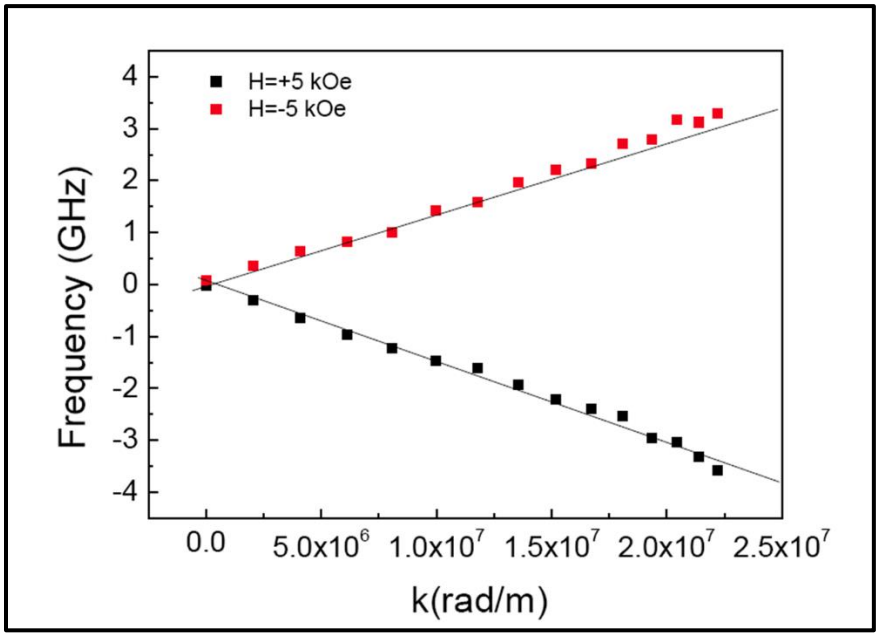
Şekil 34 BLS ölçümü şematik çizimi

yakın olur. DMI görülen örneklerdeyse bu pikler arasında bir frekans kayması gözlemlenir. Bu frekans değişimiyle, Δf, DMI sabiti, D elde edilir.

$$\Delta f = |f_{\mathrm{DE}}(+k_x\hat{\mathbf{x}}) - f_{\mathrm{DE}}(-k_x\hat{\mathbf{x}})| = \frac{2\gamma D}{\pi M_s}k_x$$

Bu denklemde M_S CoFeB malzemesinin doygunluk mıknatıslanması, γ jiromanyetik oran, f_{DE} Damon-Eshback moduna ait Stokes ve anti-Stokes frekanslarıdır.

Proje kapsamında yüksek spin yörünge etkileşimli malzemelerin manyetik malzemelerle ara yüzlerinde skyrmion oluşumlarına imkan verecek yapılar araştırılmış ve Pt/CoFeB ara yüzünde radyal vorteks yapılarının görülebileceği modellemelerle tespit edilmiştir. Üretilen Pt/CoFeB çoklu katmanlı filmler İtalya tarafında yapılan BLS ölçümleri ile incelenmiştir. Şekil 35'de [Pt(5 nm)/CoFeB(1)/Ti(1)]x15 çoklu katmanlı yapısında yapılan ölçüm sonucu elde edilen veriler incelenmiştir. Işın demetinin geliş açısına bağlı olarak frekans farkının değişimi verilen bu grafikte düzlem-içi uygulanan manyetik alanın yönüne göre iki farklı eğri elde edilmiştir. Bu ölçümlerdeki doğrusal uyuşturmadan D parametresi tespit edilmiştir. M_S değeri VSM ölçümlerinden 1185 kA/m alınarak ve γ literatür değeri olan 190 GHz/T alınarak D=1.8 mJ/m^2 olarak hesaplanmıştır.



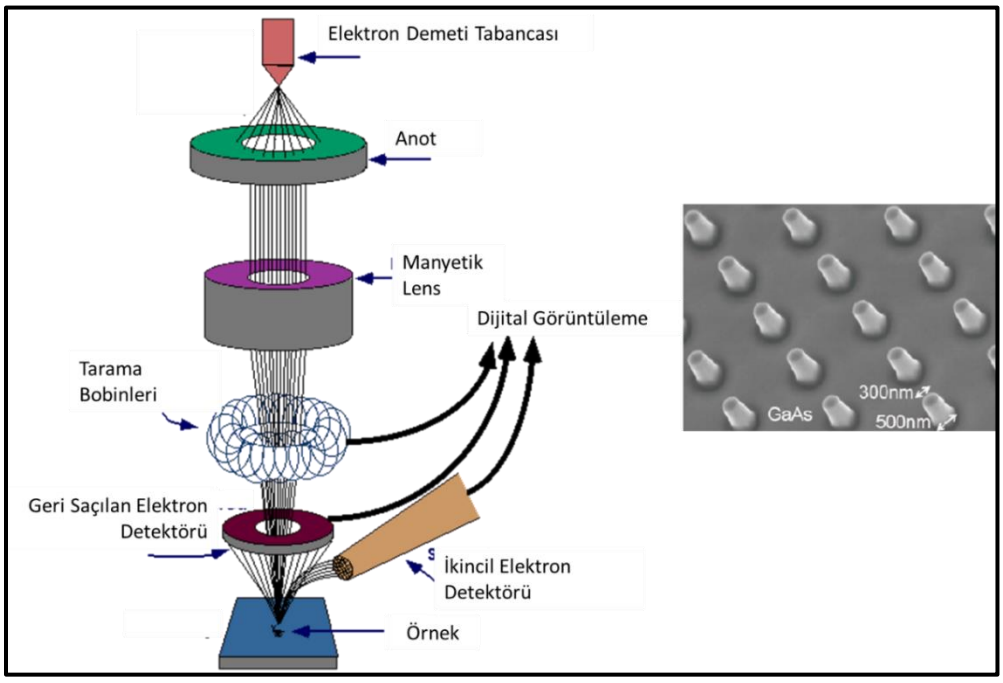
Şekil 35 [Pt(5 nm)/CoFeB(1)/Ti(1)]x15 filminde BLS ölçümü

3.2.2. Nano Aygıt Üretimi ve Görüntüleme Yöntemleri

2. iş paketinde olan anti-vorteks yapılarına elverişli nano-mıknatısları ve 7. iş paketinde yer alan yüksek spin yörünge etkileşimli aygıt üretimleri ve üretilen aygıtların görüntüleme yöntemleri bu bölümde anlatılmıştır.

3.2.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

EDX mekanizması ile çok benzer olan taramalı elektron mikroskobu yani SEM, bir örneğin yüzey topografisini belirlemek için odaklanmış elektron demeti kullanır. Şekil 36'de özetlenen şematik çizimde elektron demeti yüzeyle etkileşir ve yüzeyden yayılan ikincil elektronlar detektörler tarafından tespit edilir. Detektördeki elektron sayısı yüzeyin gelen elektron demeti ile yaptığı açıya bağlıdır, yani yüzey topografisine. Tarama bobinleri sayesinde yüzeyde gezdirilen demet, ikincil elektron detektörü ve saçılan elektron detektörlerinden alınan bilgiler bir program tarafından işlenir ve dijital bir resime dönüştürülür. Şekil 36'de nano sütunlar olan bir yüzeyin SEM görüntüsü örnek olarak gösterilmiştir.



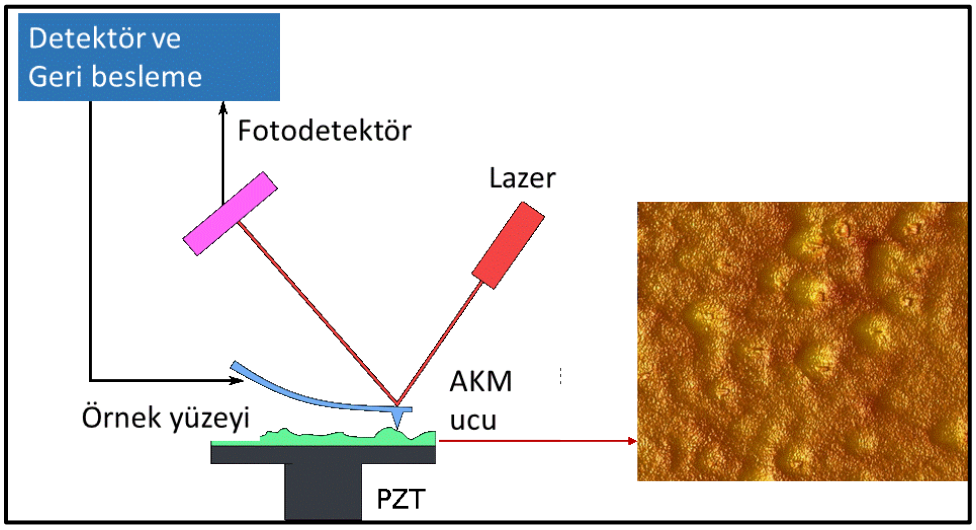
Şekil 36 SEM şematik çizimi ve örnek bir SEM görüntüsü

3.2.2.2. Atomik ve Manyetik Kuvvet Mikroskobu

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) yaygın olarak nano ölçekte yüzey topografisi oluşturmak içim kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte keskin bir uçla örneğin yüzeyi taranır. Çapı 10nm'den küçük ve birkaç mikron uzunluğunda olan bu uç, 100-200 mikron uzunluğunda olan konsolun sonuna konumlandırılmıştır ve konsol örnek üzerinde hareket eden bir düzeneğe takılıdır. Uç çok yakın bir uzaklıktan örneği tararken atom etkileşimleri konsolun aşınmasına neden olur. Bir detektör optik ortalamayla bu aşınımları ölçer ve bilgisayara aldığı verileri gönderir. Veriler bilgisayar tarafından işlendikten sonra yüzey haritası oluşturulabilir.

Yüzey ve uç arasındaki atomik etkileşim çoğunlukla Van der Waals Kuvveti olarak bilinen atomlar arası kuvvetlerdir. Van der Waals kuvveti uç ve örnek arasındaki uzaklığa bağlıdır. Eğer bu uzaklık 10-100 Angström aralığındaysa bu kuvvet çekicidir ve bu bölge temassız yüzey olarak adlandırılır. Uç örneğe yalnızca birkaç angström uzaklığında tutulduğunda kuvvet iticidir ve bölge temas yüzeyi olarak adlandırılır.

AKM'nin çalıştığı yüzeye bağlı olarak üç farklı çalışma modu vardır. İlk mod temas modu olarak adlandırılır. Bu operasyon modunda örnek ve uç arasında yumuşak bir fiziksel temas vardır. Uç örneğin yüzeyine iyice yaklaştığından ilk olarak birbirleriyle etkileşirler. Aralık azaldıkça uç ve örnek arasındaki itici güç artar çünkü atomların elektron bulutları birbirlerini gitgide itmeye başlar. Temas modunda van der Waals eğrisi yüksek derecede dik olduğundan



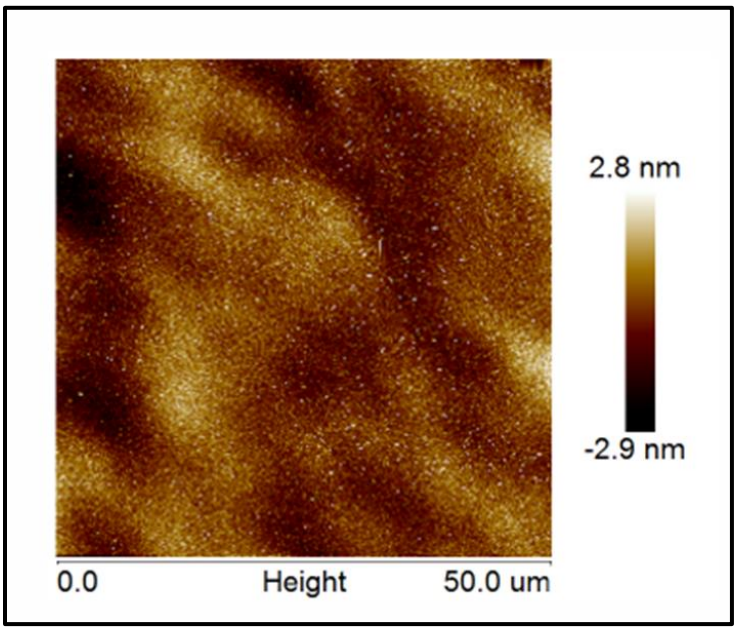
Şekil 37 AKM çalışma prensibi ve örnek bir yüzey profili

örnek ve uç arasındaki etkileşim kuvveti birbirini dengeler ve yok eder. Bu yüzden konsol örnek üzerine itildiğinde konsol örneğe daha da yaklaşmak yerine bükülür. Eğer aşırı ölçüde itilirse örnek ve uç kolaylıkla deforme olur.

Temas yüzeyinde AKM'yi çalıştırmanın iki yolu vardır. Bunlardan biri tarayıcı yüksekliği sabit olduğundan topografik bilgiyi elde etmek için konsolun aşındığı sabit yükseklik modudur. Diğeri ise sabit kuvvet modu olarak adlandırılır. Bu modda geri besleme devresi kullanılarak örnek ve uç arasındaki kuvvet sabit tutulur. Bu yolla konsol bükülmesi de sabit tutulur ve konsol örneği tararken dikey yönde aşağı ve yukarı doğru hareket eder, Şekil 37. Topografik veri z doğrultusu boyunca tarayıcının hareketinden okunur. İkinci operasyon modu temassız mod olarak isimlendirilir. Bu modda 10-100 angstrom büyüklüğü ile konsol kendisinin salınım yapan frekansına (genellikle 100-400 kHz) yakın olarak titreştirilir. Salınım frekansındaki değişimler topografik bilgiyi sağlar.

Konsolun yay sabiti salınım frekansıyla ve ayrıca konsol tarafından hissedilen kuvvet eğimi ile orantılıdır. Uç-örnek ayrışması (kuvvet-uzaklık eğrisinin türevi) ile kuvvet eğimi değiştiğinden salınım frekansındaki değişimler sırasıyla uç ve örnek arasındaki uzaklık hakkında bilgi verir. Konsol salınım frekansında titreştirildiğinde yüksekliği 100-200nm aralığındaysa AKM'in vurma modunda çalıştığı söylenir. Bu modda salınım büyüklüğü yüksek olduğundan uç örneğe yaklaştıkça büyüklük azalır. Salınım yüksekliğindeki değişimleri görüntülemek için elektronik geribesleme sistemi tekrar kullanılır ve salınım yüksekliğini ayarlamak için tarayıcıyı dikey yönde hareket ettirir. Bunlar örnek yüzeyini tarayan mil, detektörden elektriksel verileri toplayan elektronik sistem ve grafikler ve görüntüler olarak elektriksel sinyalleri görselleştiren bilgisayardır.

Şekil 37'de örnek bir topografi görüntüsü verilmiştir. Yüzey profilini gösteren bu resimdeki bilgiler görüntü analiz programlarında incelenebilir ve yüzey pürüzlülüğü, çeşitli öğelerin yükseklik ve genişlik bilgileri tespit edilebilir. Şekildeki örnekte 5μmx5μm'lik bir Py ince film yüzeyinin profili gösterilmiştir ve bu yüzeyin pürüzlülüğü 4 nm olarak hesaplanmıştır. Spin valf yapılarında kullanılan aygıt izolasyonu için kullanılan SiO_2 malzemesinin yüzey pürüzlülüğüne ait topografi görüntüsü de Şekil 38'da gösterilmiştir. Bu ölçüm üzerinden yapılan hesaplamada yüzey pürüzlülüğü 0,7 nm çıkmıştır. Bu şekilde düz bir yüzey spin valf aygıtlarının üst kontaklarının yerleştirilmesinde gereklidir.

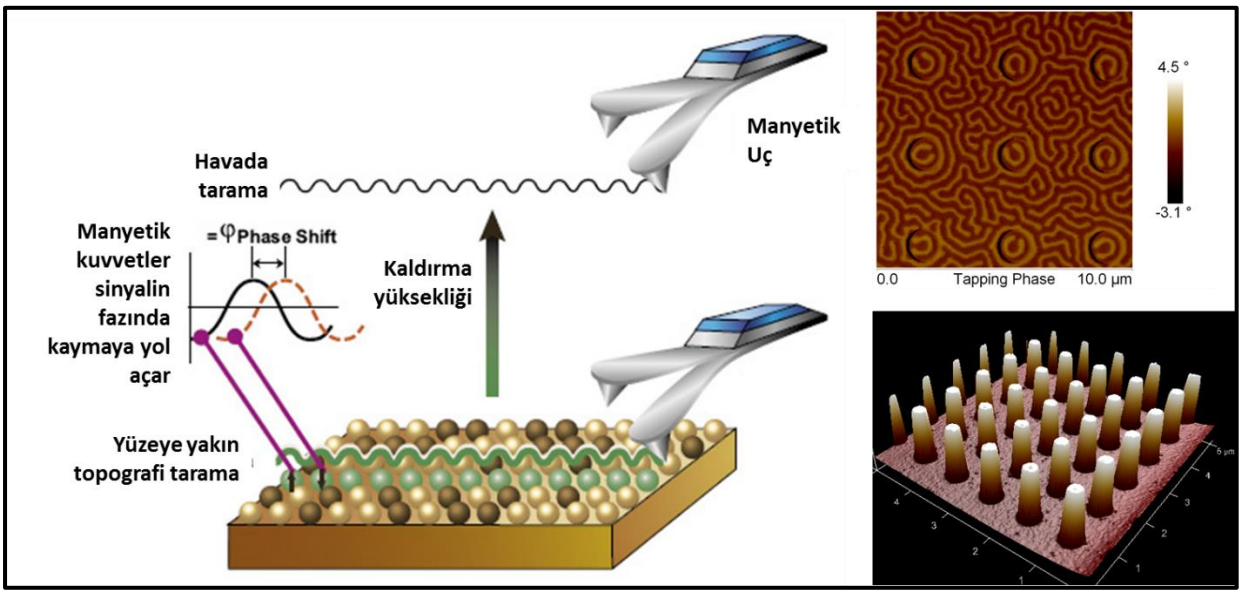


Şekil 38 AKM ile alınmış SiO_2 filminin yüzey topografisi

Topografi bilgisinin yanı sıra salınım yüksekliği, frekans ve kuvvetteki değişimleri de program tarafından kaydedilir. Bunların arasında en önemli olan faz görüntüsüdür. Faz görüntüsü uç örnek yüzeyini tararken kuvvet türevi nedeniyle konsol aşınmasındaki faz değişimlerini kaydetmeyi ifade eder.

Faz görüntüleme özelliğinin en önemli sonucu Manyetik Kuvvet Mikroskopisi (MKM) olarak adlandırılan, örneğin manyetik kuvvetindeki değişimlerinin oryantasyonlarında bölgesel değişimleri ölçebilme yeteneğidir. Manyetik mil çok yakından yüzeyi tararken uç ve örnek arasındaki manyetik etkileşimler konsolun aşınmasına sebep olur. Manyetik kuvvetler artan uzaklıkla hızla azaldığından kuvvet türevi ölçümleri örneğin manyetik görüntülerini almak için kullanılabilir. Manyetik kuvvet konsolun rezonans frekansındaki değişimlere sebep olur. Bu yüzden, faz görüntüsü örneğin yüzeyi üzerine manyetik kuvvetlerin varyasyonlarını yansıtır.

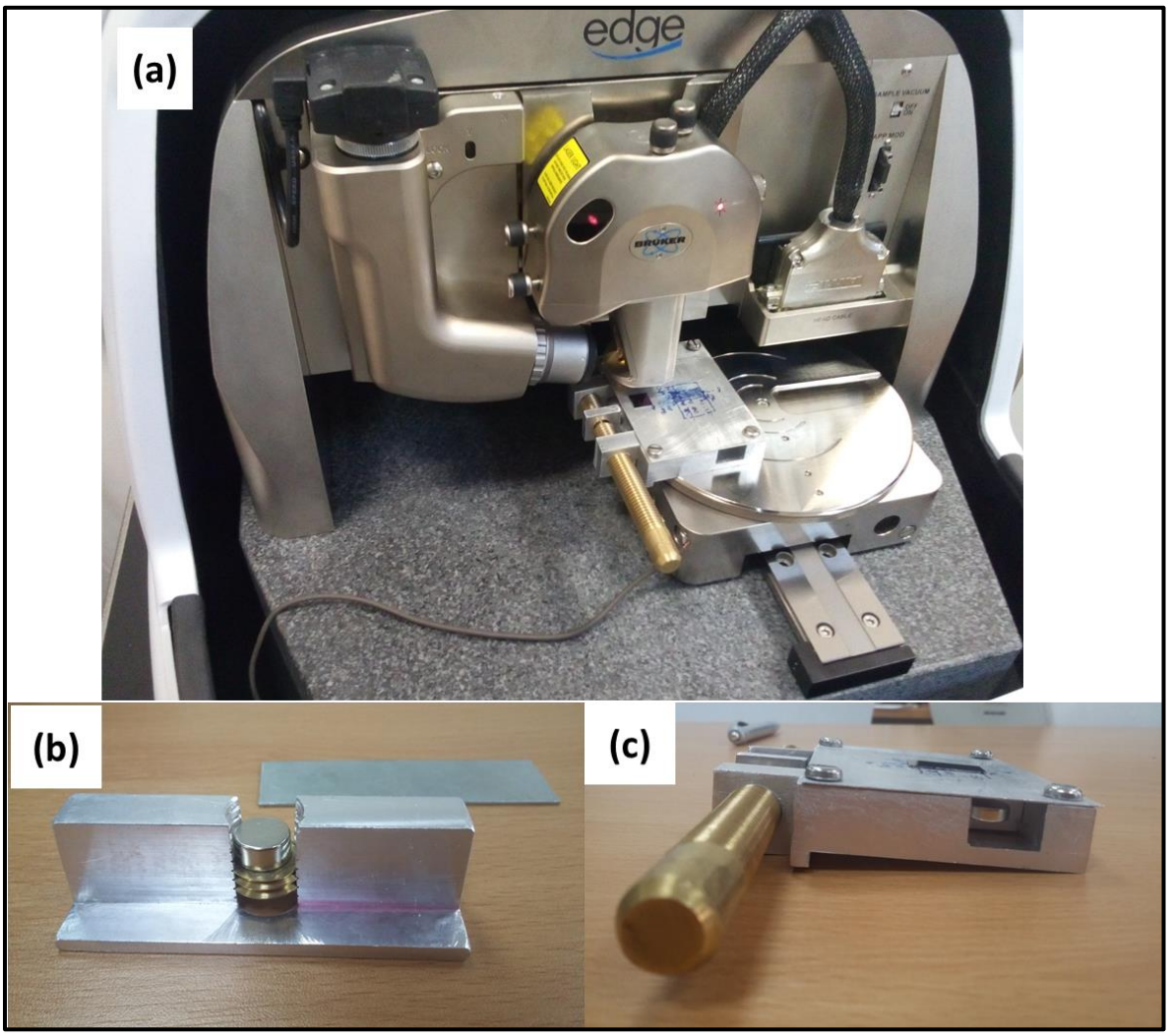
Manyetik görüntüyü elde etmek için AKM vurma modunda çalıştırılmalıdır. Manyetik örneğin normal vurma modu taraması için manyetik ve elektrostatik kuvvetler salınım frekansındaki sapmalara yardım eder. Bu yüzden, MKM yükselme modunda çalışır. Uç yüzeyi tararken örnek boyunca düz çizgiler halinde tarar ve her çizgi öne ve arkaya olmak üzere iki defa taranır, bkz. Şekil 39. Yükselme modunda uç çizgiyi normal vurma modunda tarar ve aynı çizgiyi arkaya doğru tararken uç elektrostatik kuvvetlerden kaynaklı katkıdan kaçınmak ve ucun yalnızca manyetik kuvvetlerden dolayı bükülmesine izin vermek için 40 nanometre civarında



Şekil 39 MKM çalışma prensibi ve örnek topografi görüntüsü ve benzer yapıdaki MKM görüntüsü

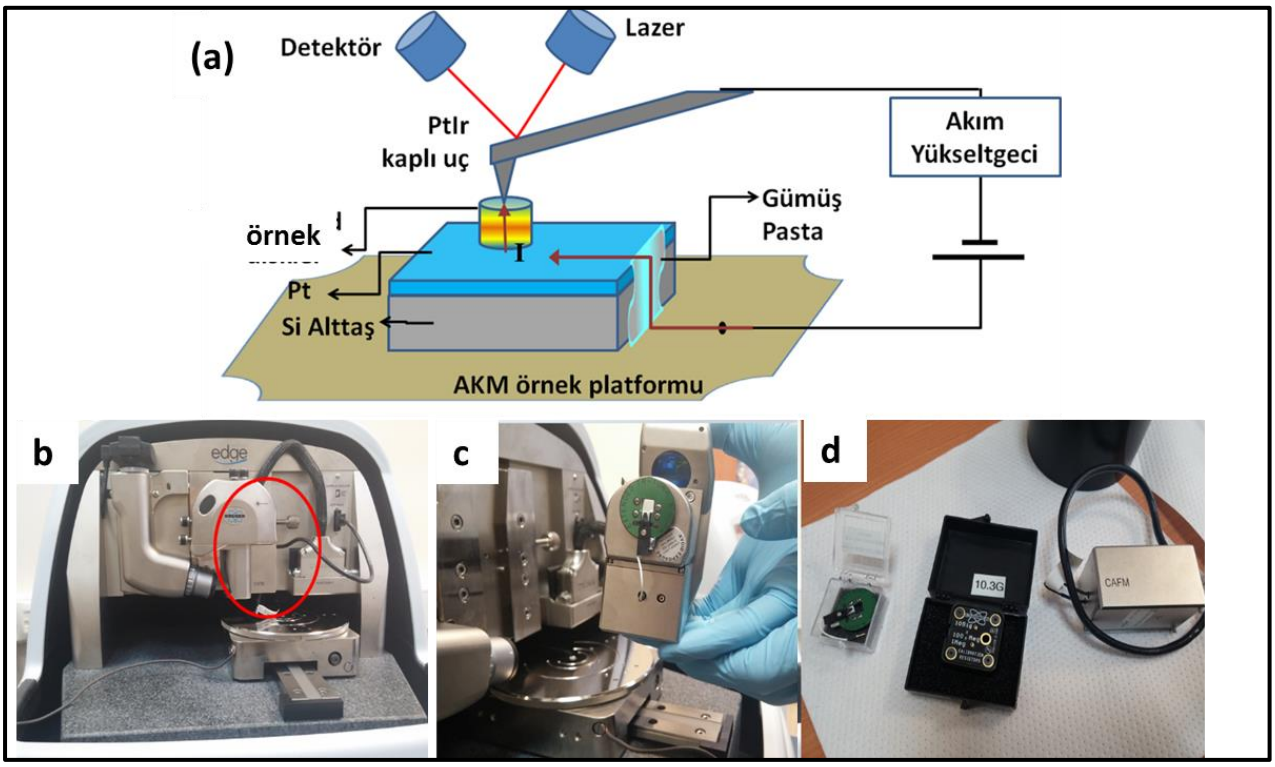
yükselir. En sonunda son geri faz görüntüsü örneğin manyetik dağılımını ortaya çıkarır. Şekil 39'de gösterilen örnek görüntüde açık ve koyu tonlardaki bölgeler farklı manyetik yönelimdeki domenleri göstermektedir. Topografi sinyalinde de görülen manyetik sütunlar bu faz resminde de görülmektedir.

MKM görüntülemesi manyetik alan altında da yapılabilir. Bunun için laboratuvarımızda üretilen manyetik alan platformları kullanılmıştır. Manyetik olmayan malzemelerden (Al ve pirinç) torna ve frezede iki ayrı platform yapılmıştır. Bruker AKM ile entegre edilebilen bu manyetik alan platformları Şekil 40'de gösterilmiştir. Biri yüzeye dik (Şekil 40b), biri yüzeye paralel (Şekil 40c) manyetik alan uygulayan platformlarda şekilde de görülen NdFeB mıknatıslar kullanılmıştır. Düzleme dik manyetik alan uygulayan platform 10-130 mT uygulayabilmekte iken yüzeye paralel uygulanan alan 5-100 mT arasında değişebilmektedir. Rulmanlı sistemleri sayesinde manyetik alan örnek oynatılmadan değiştirilebilmektedir.



Şekil 40 Bruker AKM'de manyetik alan altında MKM görüntülemeleri için tasarlanmış manyetik alan uygulayan platformları (b) düzleme dik ve (c) düzleme paralel manyetik alan uygulayabilmektedir.

AKM kontak modunda elektriksel ölçümler için de kullanılabilir. İletken-AKM denilen bu özel modül ek olarak bir yükseltgece kablo ile bağlı olan prob tutucu kullanır (Şekil 41c). Yüzeye verilen yüksek gerilim ile örneğin alt kontak katmanına gelen akım örneğin üzerinden geçerek uca ulaşır. nA-pA mertebesinde olan bu akım bir yükseltgeç ile arttırılarak cihaza gönderilir. Bu şekilde kontak modunda tarama yapılarak yüzeyin hem topografi hem de iletkenlik bilgisi kaydedilir. İletken-AKM modülü örnek üzerinde tek bir noktada Akım-Voltaj (IV) karakteristiği elde etmek için de kullanılır.



Şekil 41 (a) İletken-AKM çalışma prensibi (b) Bruker Dimension Edge model AKM ve daire içinde iletken AKM modülü (c) İletken AKM için özel prob tutucu bir kablo bağlantısı içerir (d) bu modülün yükselteci

Laboratuvarımızda Şekil 41'da gösterilen Bruker marka Dimension Edge model bir AKM kullanmaktayız. Hassas topografi ölçümleri için vurma modunda Bruker marka SNL-10 ve TESPA Si probları kullanılmıştır. SNL-10 problarda uç çapı 8-10 nm arasında değişmekte, TESPA uçlar için ise 12 nm'dir. MKM ölçümleri için MESP uçlar kullanılmıştır. MESP problar Si üzerine manyetik malzeme kaplıdır. MESP-LM düşük momentli CoCr malzemesi ile kaplı 60 nm çaplı uca sahiptir. Astroid gibi yumuşak manyetik malzemeden üretilmiş nano-mıknatıslar bu uçla görüntülenmiştir. Yüksek momentli nano-mıknatıslar için daha kalın CoCr kaplı 80 nm çaplı MESP-HM uçlar kullanılmıştır. İletken-AKM için PtIr kaplı Si uçlar kullanılır. Bu probların üst ve alt yüzeyleri iletken ve yansıtıcı metal ile kaplıdır. Diğer problara kıyasla daha dayanıklı malzemeden yapılmış olsalar da kontak modunda çalıştıklarından çok çabuk yıpranabilirler. İlk kullanıldıklarında 10 nm çapında bir kontak yüzeyi oluştururlar.

3.2.2.3. Elektron Demet Litografisi ile Aygıt Desenleme

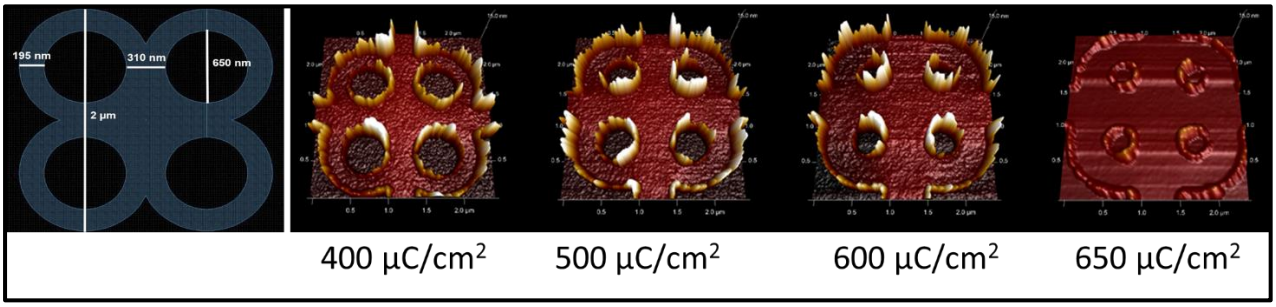
Aygıt üretimi için gerekli ince filmlerinin optimize edilmesi sonrasında filmlerinin şekillendirilmesi üzerine çalışılmıştır. Nano-mıknatısların mikron ve mikron-altı boyutlarda olması nedeniyle desenlemede 5 nm'ye kadar hassasiyeti olan elektron demet litografisinden faydalanılmıştır. İtalya tarafında Prof. Tiberto gurubu tarafından hazırlanan örnekler INRIM'de temiz odada yer alan QUANTA 3D Dual Beam SEM/FEG model ve Türkiye'de tarafımızdan hazırlanan örnekler SUNUM'daki temiz odada bulunan Vistec EBPG 5000+ model elektron demet litografisi (EBL) cihazlarında desenlenmiştir (Şekil 42).

EBL cihazı yüzeyi özel bir rezist ile kaplı örneklerin üzerine dijital olarak girilen desenleri elektron demeti ile tarayarak çizer. Belirli bir formatta katman katman hazırlanan çizim dosyaları EBL cihazının bağlı olduğu bilgisayara ve onu kontrol eden programa yüklenir. SEM aygıtında olduğu gibi bir elektron demet üreticisi, odaklayıcı optik üniteleri olan cihazın demet akımı ve demet yoğunluğu kontrol edilebilir ve çizilen desenin hassasiyetini belirler. Aynı zamanda çizilen yüzeyin süresi de bu parametrelerle kontrol edilir. Desenlenen rezist kaplı örnek, MIBK denen bir çözeltide çözdürülür ve elektron demeti ile taranan kısımlar kaldırılır.

Nano-aygıtlarda desen büyüklüğü, desenlerin birbirine yakınlığına göre en hassas şekli verecek dozlar belirlenir. Doz testi denilen bu testte farklı dozlarda çizilen desenler kaydedilir ve çeşitli görüntüleme yöntemleriyle incelendikten sonra en uygun doza karar verilir.



Şekil 42 SUNUM'da bulunan EBL cihazı ve örnek bir astroid çizimi

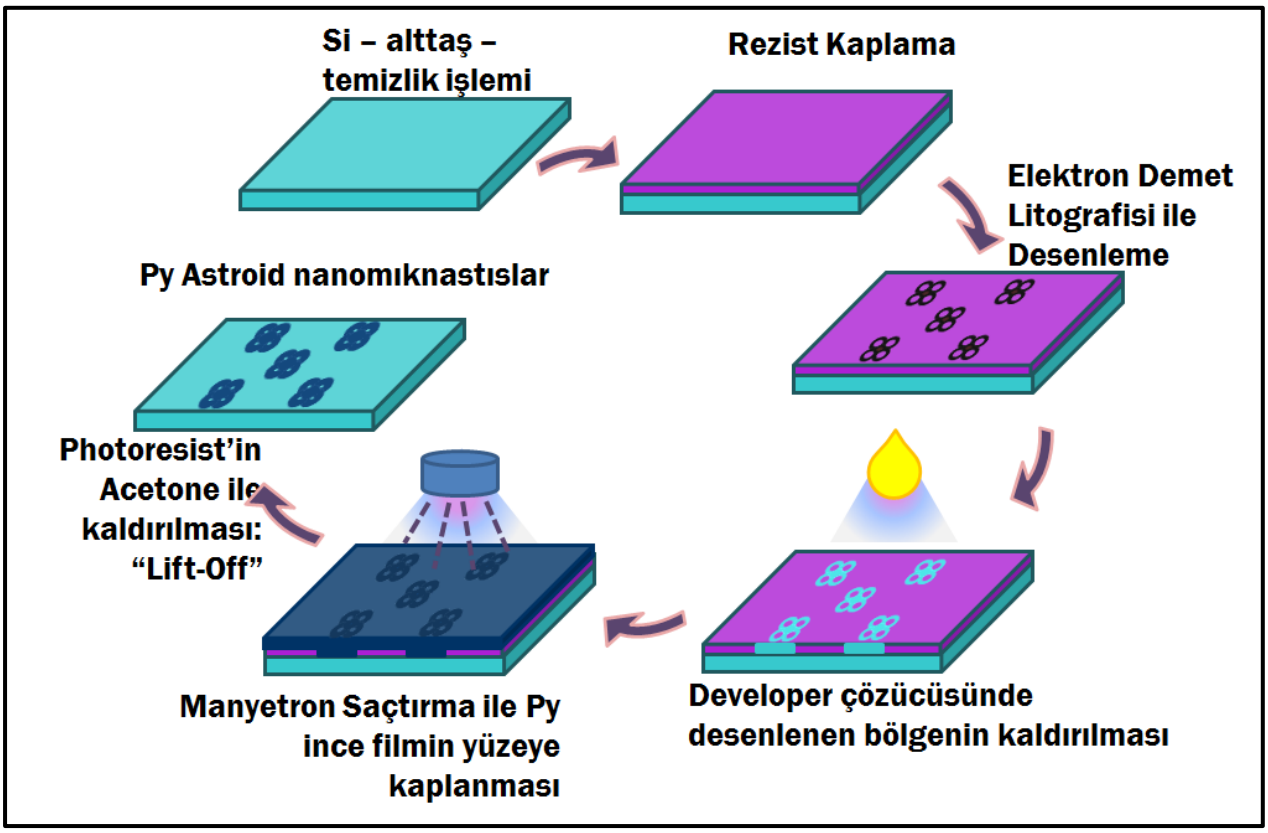


Şekil 43 Astroid aygıtları için yapılan doz testi

Astroid aygıtları için yapılan doz testi Şekil 43'de gösterilmiştir. Şekilde sunulan astroid deseni aynı alttaş üzerine farklı dozlarda çizdirilmiş ve lift-off yöntemi ile üretilen astroid aygıtlar ile incelenmiştir. Desenler 30 pA demet akımı ile 2 nm çözünürlükte çizdirilmiştir. Şekil 43'da görüldüğü üzere yüksek dozlarda astroid deseninde yer alan halkalar büyümekte ve neredeyse yok olmaktadır. Bu durumda astroid desenini en iyi şekilde elde etmek için 400 µC/cm^2 kullanılmasına karar verilmiştir.

Lift-off Yöntemi

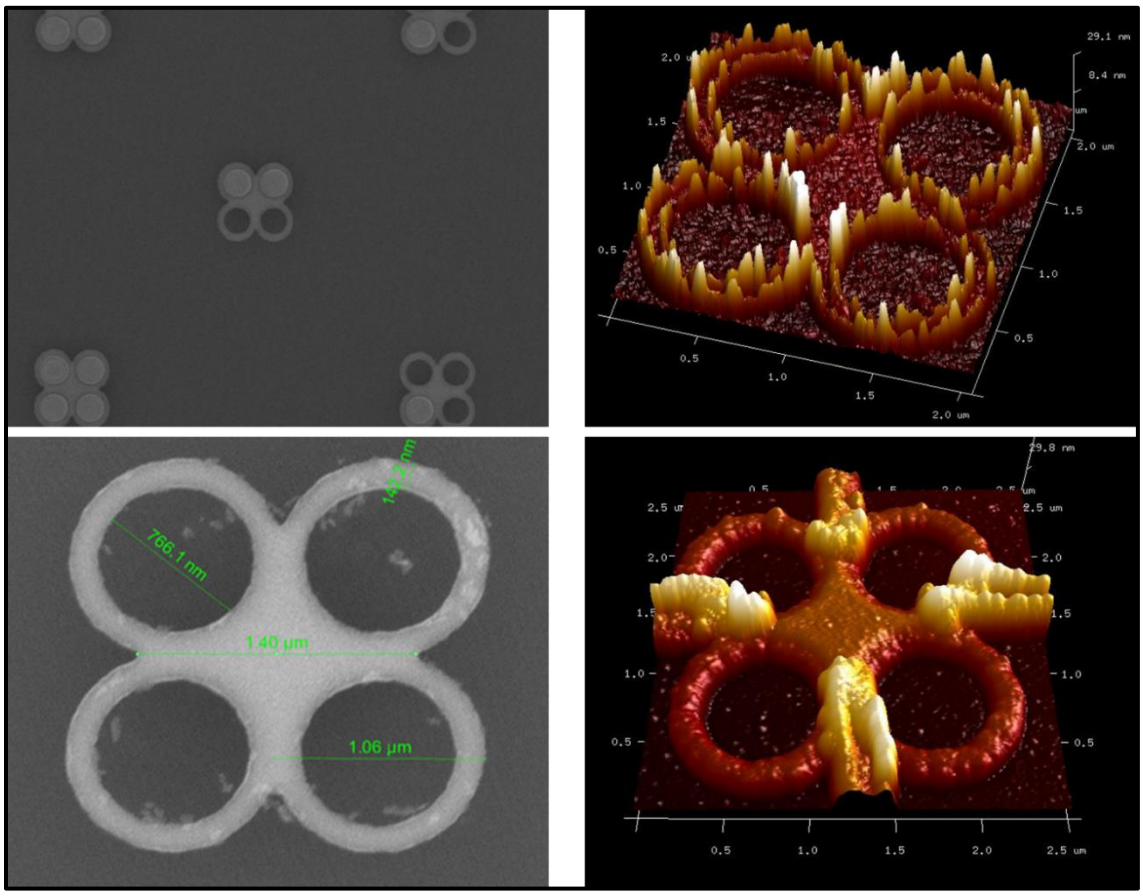
Desenlenen boşluklar bulunduran rezist kaplı alttaşların üzerine film büyütülmesi ve boşuklar hariç rezist olan yüzeylerin asetonda kaldırılması ile desenli yapıların elde edilmesi yöntemine lift-off yöntemi denir. Bu şekilde üretilen nano-mıknatısların üretim aşamaları Şekil 44'da sunulmuştur. Öncelikle Si alttaşlar Aseton ortamında organik kirlerden arındırılır. Si alttaşlar spin coater cihazıyla döndürülürken üzerine damlatma yoluyla rezist malzeme kaplanır ve 80-90ºC'de bir süre ısıtılır. Rezist kaplı alttaşlar EBL cihazına yerleştirilir ve gerekli hizalama işlemi yapılır. Bilgisayar programına desen, tarama dozu ve demet akımı tanıtılır. Vakum ortamında yapılan desen tarama işlemi sonrasında MIBK denen developer çözeltisinde temizlenir. Şekildeki örnekte astroid şekilli çukurlar olan rezist kaplı Si alttaşlar görülmektedir. Bu örnekler ultra-yüksek-vakum (UHV) ortamında ilgili malzeme ile kaplanır. Astroid örneklerde saçtırılan Py hem çukur bölgelere, hem de rezist üzerine kaplanır. Son aşamada rezist kaplı alttaş aseton ortamında temizlenerek desen harici bölgeler rezist üzerindeki filmle birlikte kaldırılır ve "lift off" denilen bu proseste yalnızca desenlenen astroid pencerelere kaplanmış Py ince filmi kalır.



Şekil 44 Lift-Off yöntemiyle astroid şekilli nano-mıknatıs üretim aşamaları

Lift-off basamağı aygıtların temiz ve düzgün olması açısından önemli bir basamaktır. Şekil 45'de lift off sonrası astroid aygıtlarını göstermektedir. Üstteki SEM ve AKM görüntülerinde astroidlerin halkalarında ve/veya şeklin kenarlarında fotorezist ve film kalıntılarının olduğu görülmektedir. Lift-off prosedürünün ultrasonda yüksek güçte uzun süre yapıldığı durumlarda aygıtlar da rezist ile birlikte kalkmıştır. Alt resimlerde daha başarılı lift-off prosedürleri görülmektedir. Bunu elde edebilmek için fotorezist kalınlığı, ısıtma süresi ve sıcaklığı, "lift off" yıkama süresi gibi üretim basamaklarındaki parametreler optimize edilmiştir. Bu proseste PMMA rezisti 130 nm kaplandıktan sonra 100 nm ikincil bir rezist, C2-950, kaplanmıştır. Her iki kaplama sonrasında örnek 170 derecede 5 dk ısıtılmıştır. Film büyütme sonrası örnekler asetonda 1-2 dk titreştirilip gece boyu temiz asetonda bırakılmış ve ertesi sabah izopropanol çözeltisinde temizlenmiş ve nitrojen ile kurutulmuştur.

Bazı astroid aygıtı tasarımlarında (örneğin Şekil 45'deki altın kontaklı astroidler) astroid üzerine dört kenardan Au elektrotlar hizalanmış demet-litografisi tekniği ile üretilmiştir. Bunun için astroid çiziminden önce hizalanmış litografi için gerekli hizalama işaretleri her aygıtın yakınına desenlenmiştir. Lift-off yöntemi ile hizalama işareti üretilmesi sonrasında astroidler



Şekil 45 Lift off sonrası astroid aygıtları

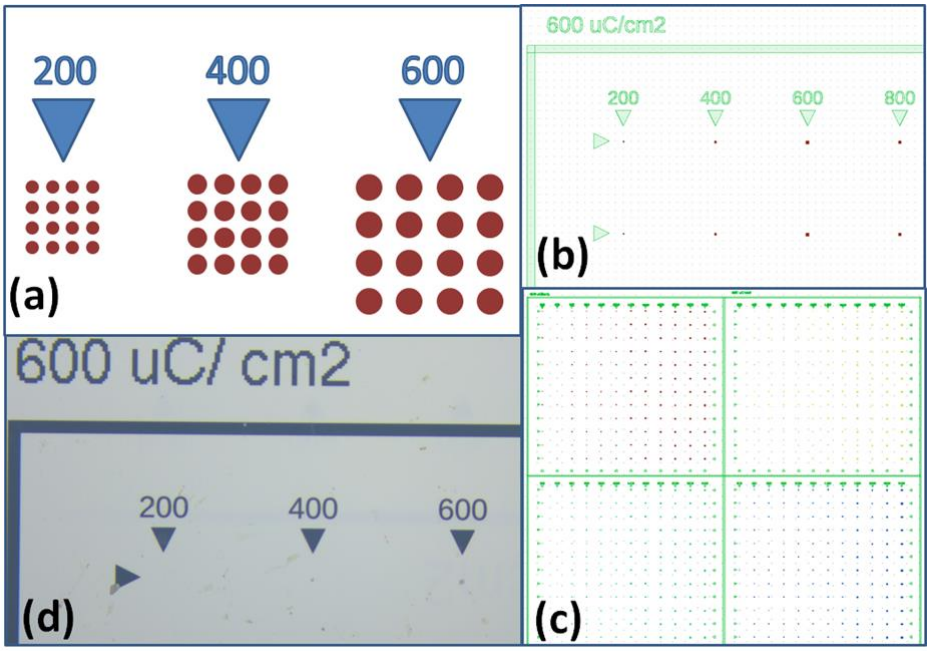
desenlenmiş ve büyütülmüştür. Lift-off sonrasında tekrar rezist kaplanan örnekler elektron demet litografisi cihazına tanıtılan hizalama işaretleri astoridlerin üzerine gelecek şekilde dört elektrot kolunu desenlemiştir. MIBK çözeltisinde çözdürülen desenler üzerine Au elektrotlar büyütülmeden önce açılan boşluklar oksitlerden iyon aşındırması yöntemi ile arındırılmıştır. Bu şekilde temiz yüzeye metal film büyütüldükten sonra örnekler son fotolitografi basamağı için hazır hale getirilmiştir.

İyon Aşındırma Yöntemi

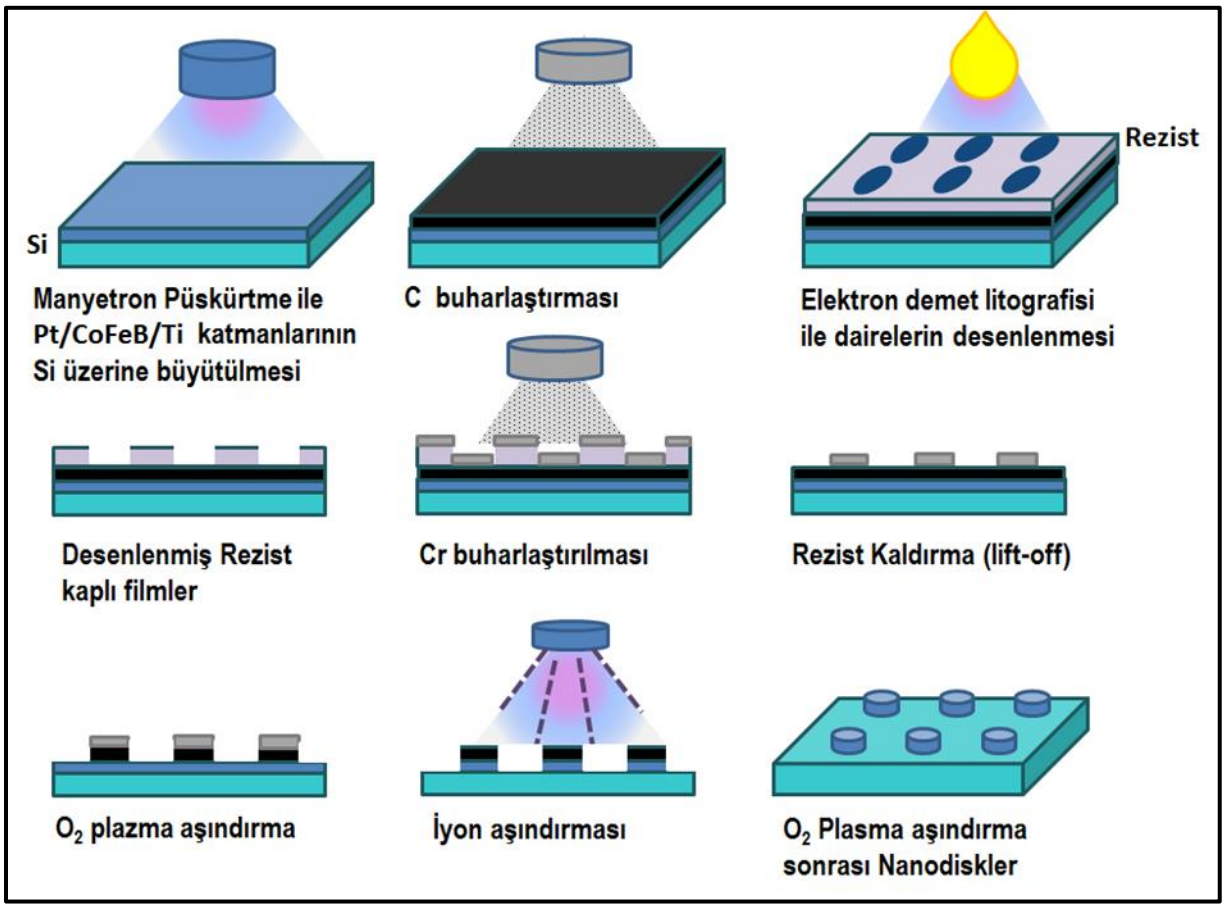
Çoklu katmanlı nanodisklerin üretiminde en uygun yöntem yukarıdan-aşağı yani katmanların büyütülüp, gerekli desenleme yapıldıktan sonra maskelenen desen harici bölgelerin iyon aşındırması yoluyla kaldırılmasıdır. Co/CoPt nano-kontaklı nano sütunların, Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı nano sütunların ve spin-valf nano sütunların üretimi bu şekilde yapılması planlanmıştır.

Nano-diskler için şablon bir desen hazırlanmıştır. Şekil 46'de gösterilen çizimde 100 ila 1200 nm arasında çaplara sahip disklerin dizin halinde bulunduğu dizin grupları disk çapına göre işaretlenmiştir. Üretim öncesi lift-off yöntemi ile desene elverişli demet dozu belirlenmiştir. Astorid aygıtları için kullanılan 400 μA/cm^2 dozu diskler için yeterli olmamış ve düşük dozlarda üretilen örneklerde 400 nm ve daha küçük çaptaki diskler yüzeyden kalkmıştır. Dozun en az 600 μA/cm^2 olması gerektiği tespit edilmiş, 720 μA/cm^2 ideal doz olarak belirlenmiştir.

Fabrikasyon basamaklarını canlandıran bir şema Şekil 47'de sunulmuştur. Si altaş üstüne çoklu katmanlı film DC manyetron saçtırma yöntemi ile kaplanmıştır. Büyütülen çok katmanlı yapı üzerine elektron-demet buharlaştırma sistemi kullanılarak 50 nm C düşük bir büyüme hızında kaplanmıştır. Burada karbon ince film kullanılmasının sebebi karbon iyon aşındırma hızı 0.097A^°/sn iken diğer ince filmlerin iyon aşındırma hızlarının 0.3 A^°/sn civarında olmasıdır. Bu nedenle karbon iyon aşındırmada çok iyi bir maske görevi üstlenmektedir. C üzerine yayılan rezist üstüne elektron demet litografisi cihazı ile çapları 100nm den 1200 nm ye kadar değişen dairesel desenler dizinler halinde çizdirilmiştir.



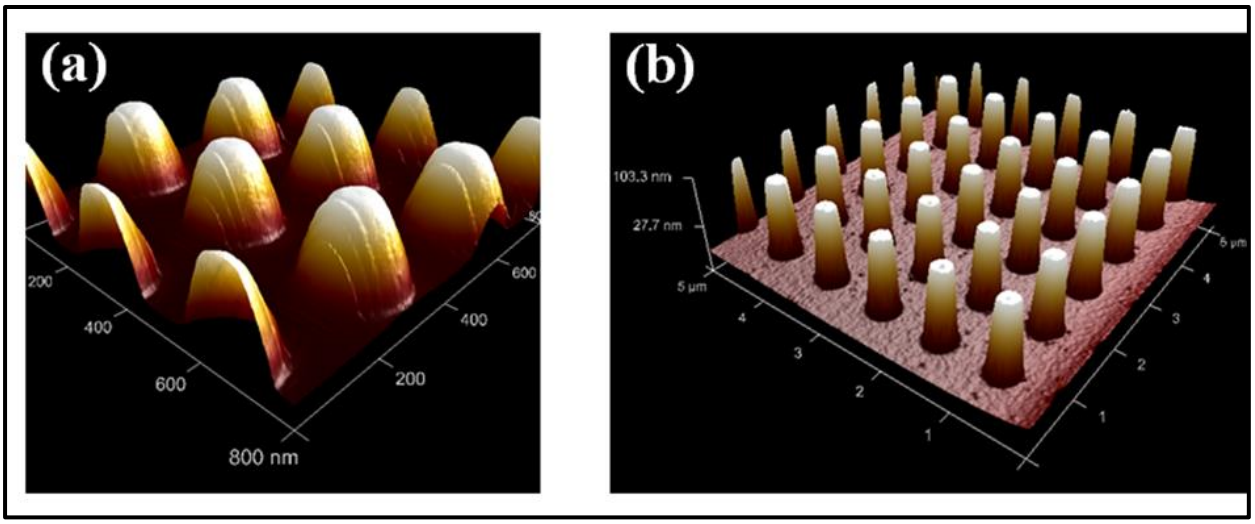
Şekil 46 Nano-diskler için çeşitli çaplarda hazırlanmış disk dizinleri ve üretim sonrası alttaş üzerine çizilen desenin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 47 İyon aşındırması ile nano-disklerin üretim basamakları

Şekil 47'de yan açıdan gösterilen katmanlarda rezist içine açılmış dairesel boşluklar görünmektedir. Bu boşluklara buharlaştırma yolu ile 6 nm Cr kaplanmıştır. Lift-off yöntemi ile rezist kaldırıldığında C filmin üzerinde belirlenen dizinde Cr diskler oluşturulmuştur. Nano-disklerin desenini belirleyici bu Cr dizinlerinin haricindeki bölgelerde kalan C O_2 plazma aşındırma sisteminde 90 saniyede aşındırılmıştır. Bu aşamada malzemelerin aşındırılma oranları kullanılarak çoklu katmanlı filmin aşındırılması için gereken zaman yüzeydeki koruyucu disklerdeki C malzemesini tamamen aşındırılmayıp 25 nm kalacak şekilde ayarlanmıştır. Aşındırma işlemi sonrasında geride kalan 25 nm'lik C'un kaldırılması için O_2 plazma aşındırma yapılmıştır.

Bu yöntemle başarı ile üretilen Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı yapısına ait 100 nm yükseklikte nano diskler Şekil 48a ve b'de sunulmuştur. Sırasıyla 100 ve 400 nm çapındaki disklere ait AKM görüntülerinde disklerin kenarlarında kalıntı olmadan başarı ile üretildiği görülmektedir.



Şekil 48 Nano-disklerin üretim sonrası AKM görüntüleri (a) 100 nm ve (b) 400 nm çaplı disk dizinleri

Nano-Kontaklı yapılar

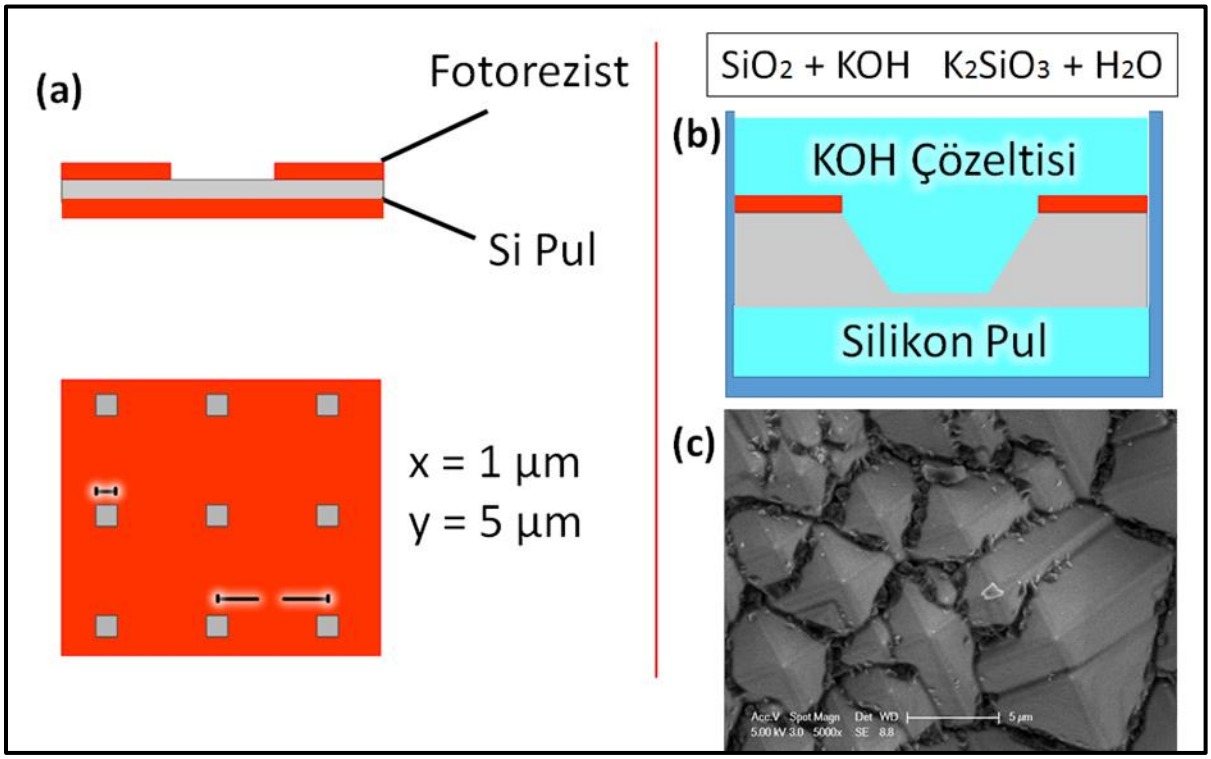
Nano-kontaklı yapıların düzgün bir şekilde oluşturması oldukça zorludur. Literatür taraması ve proje ekibinin geçmiş deneyimlerinin gözden geçirilmesi sonucunda bir prosedür hazırlanmıştır. Uğraştırıcı bir üretim süreci olan nano-kontaklı yapıların bir Si pulun üzerine kare boşluklar açılması, zar haline (50-100 nm kalınlığına) gelene kadar aşındırılan bu bölgelerin ortasına elektron demet litografisi yöntemiyle 5-20 nm delikler açılması yoluyla elde edilmesi planlanmıştır. Bu bölgede pulun iki tarafına manyetron saçtırma ile katmanların büyütülmesi ile üst ve alt kontağa sahip nano-kontaklı nano sütunlar elde edilmesi düşünülmüştür. Bu plan dahilinde Si pullar üzerinde zar oluşturma çalışmaları yapılmıştır. Sıcak bir KOH çözeltisi içine batırılan Si malzemesinde (100) düzlemleri aşındırılır. Si pullar üzerine litografi yöntemiyle açılan kare desenler KOH çözeltisinde ters piramit şeklinde boşluklar oluşturur (Şekil 49). Zar oluşumu için şöyle bir prosedür uygulanmıştır:

- Si pulların temizlenmesi
- Si pullar üzerine iki tarafa da PMMA rezist malzemesi kaplanması (Şekil 49a)
- Tek yüzde elektron demet litografisi ile kare boşluklar açılması (Şekil 49a)

- Yüksek ısıda (75^0 C) 1,5 lt, 1 Molar KOH solüsyonuna batırılan Si pulun belirli bir süre bekletilmesi (Şekil 49b)
- Pulun önce soğuk suya batırılması ve ardından aceton ve izopropanol'de temizlenmesi.

İlk etapta Şekil 49a'daki 1 μm boyutunda kareler demet litografisi ile desenlenmiştir. Bu proses sonrası çekilen SEM resmi Şekil 49c'de gösterilmiştir. Ne yazık ki PMMA kaplı Si KOH içine batırıldığında bir süre sonra PMMA yüzeyden kalkmış ve rastgele olarak Si yüzeyi aşınmıştır. SEM resminde oluşan piramit yapıları görünmektedir. Piramitlerin arasında ise KOH kalıntıları kalmıştır. Si pulun yüzeyi beyazımsı bir leke olmuştur.

Bu tecrübe sonrasında bu işlem için en uygun rezist araştırılmış ve piyasada oldukça pahalı olan Shipley rezistlerinin kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. En az dört elektron demet litografisi ve iki fotolitografi basamağı gerektiren bu proses rezist malzemesinin de pahalı



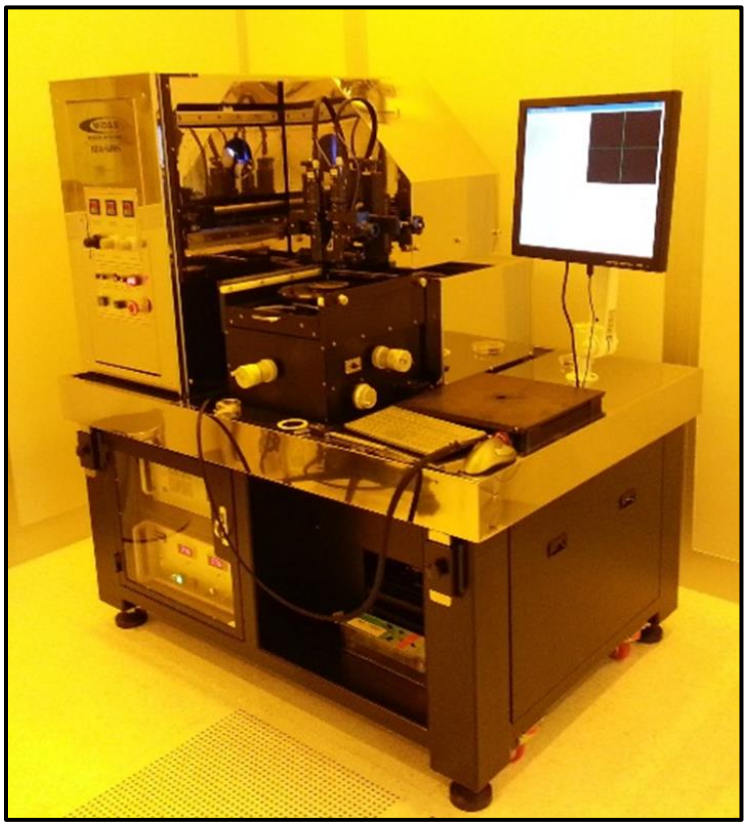
Şekil 49 (a) KOH aşındırması için hazırlanan alttaşların şematik çizimi. Maske üzerine açılan kare pencereler gösterilmiştir. (b) KOH aşındırma işlemi (c) Aşındırma işlemi sonrası çekilmiş SEM görüntüsü

olmasıyla birlikte oldukça maliyetli bir proses olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle nano-kontak yapılarına alternatif olarak modellenen CoFeB/Pt çoklu katmanlı nano-sütunları üretilmesine karar verilmiş ve proses durdurulmuştur.

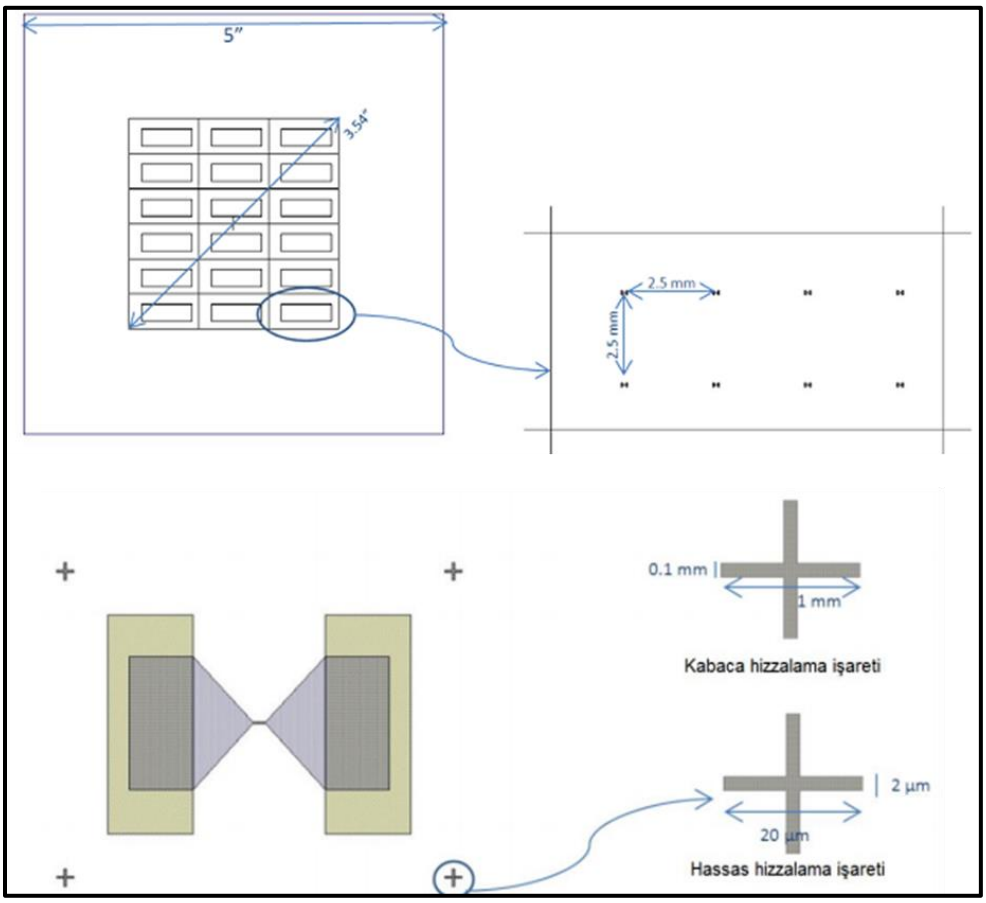
3.2.2.4. Fotolitografi ile Kontak Yüzeylerinin oluşturulması

Elektriksel bağlantı için gerekli elektrotlar fotolitografi ile desenlenmiş ve lift-off yöntemiyle üretilmiştir. Fotolitografi tekniği mikron üstü ebatlarda geometrik desenler üretmek için kullanılır bir mikro-fabrikasyon işlemidir. Bu işlemde, fotorezist denen bir kimyasalla kaplı olan alttaş üzerine desenleri aktarmak için foto-maske kullanılır.

Öncelikle, üzerine desenlerin yapılacağı alttaş döndürülerek yaklaşık 1 mikron kalınlığında foto-rezist ile kaplanır. Fotorezist radyasyona duyarlı bir polimerdir. Bu kimyasalın ışığa maruz kalması polimer zincirlerinde değişime yol açarak, bozulmalarına ya da çapraz bağlı olmalarına neden olur. Alttaş hazır olduğunda foto-maske vasıtasıyla ışığa (genellikle UV ışık)



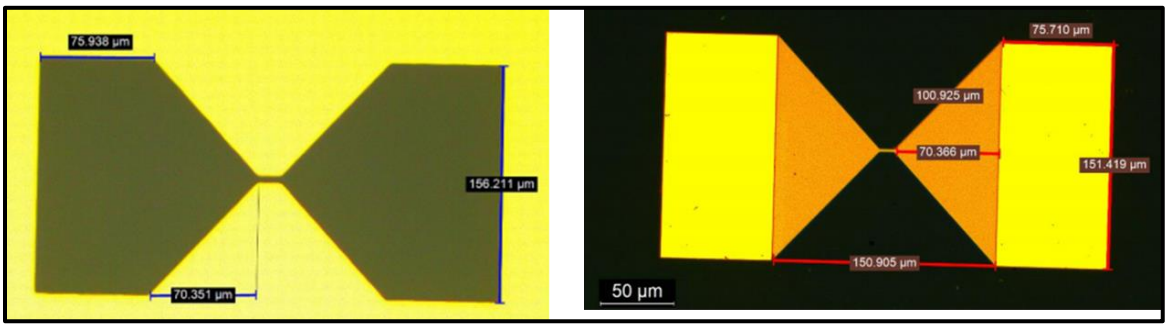
Şekil 50 SUNUM'daki Midas maske hizalayıcı



Şekil 51 Mikro-tel üretimi için kullanılan papyon şekilli fotomaske ve kontak maskesi hizalama işaretleri ile gösterilmiştir.

tutulur. Maskenin üzerindeki desenler sayesinde alttaşın sadece bazı bölümleri ışığa maruz kalır. Sonra da alttaş, developer denen çözücü bir sıvıya batırılır. Bu kimyasal, kullanılan reziste bağlı olarak, rezistin ışığa maruz kalmış veya kalmamış bölümlerini çözer. Sonuç olarak da alttaş üzerinde maskenin görüntüsü elde edilir. Bu aşamada, imalat iyon aşındırma veya lift-off ile yapılabilir.

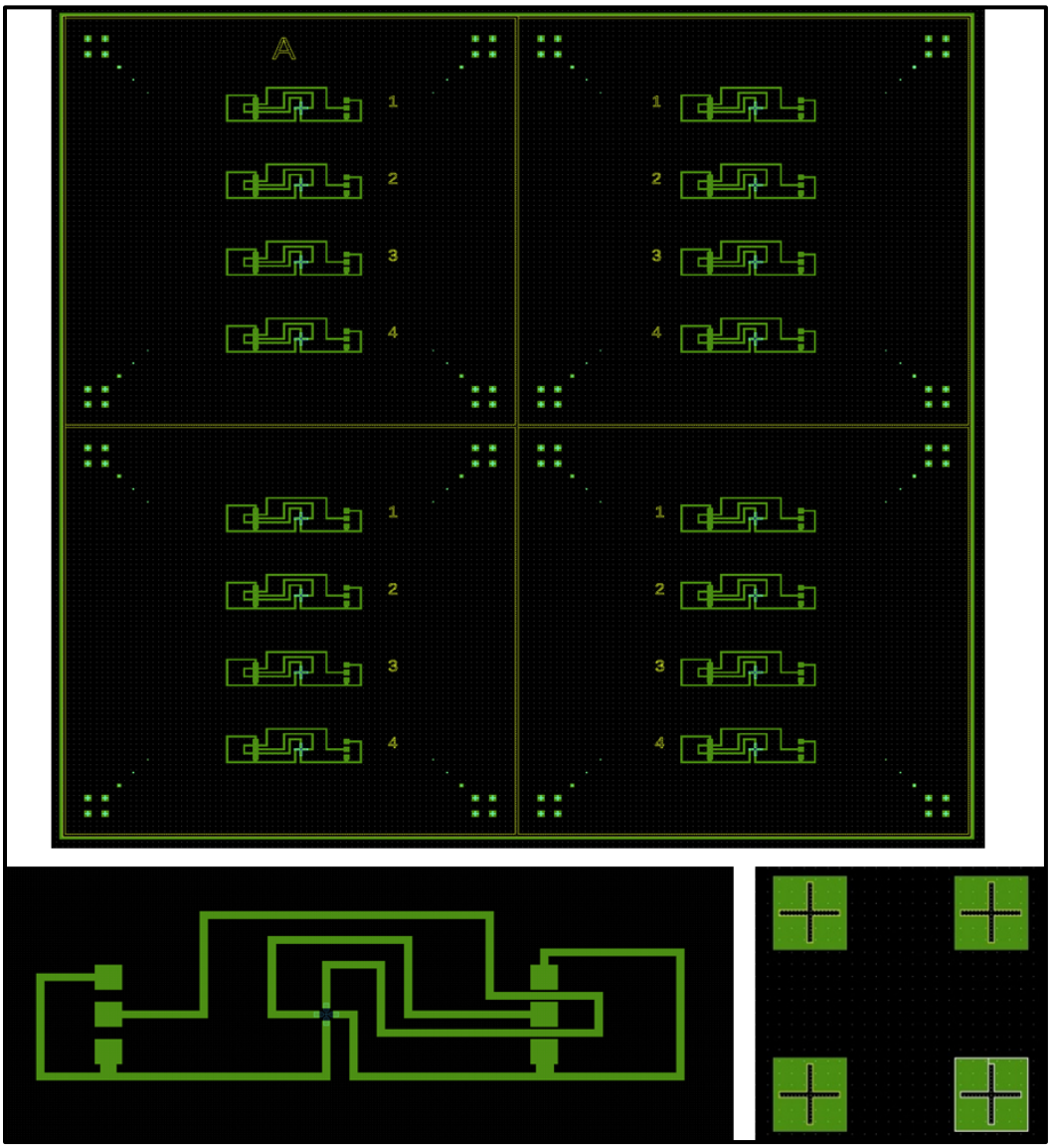
Projede birkaç faklı foto-maske üretilmiştir. Bunlardan bazıları SUNUM'da üretilmiş, bazıları da Bilkent Üniversitesi UNAM'da yapılmıştır: Malzemelerin elektriksel özelliklerini belirlemek için üretilmiş mikro teller içeren maske (UNAM), Astroid aygıtlarında 2 ve 4-prob bağlantılı ölçümler için uyumlu kontak maskesi (SUNUM) ve spin valf aygıtlarında kullanılan üst kontak maskesi (UNAM).



Şekil 52 Birinci maskenin üretiminden sonra bir papyon deseni ve hizalama sonrası kontak yerleştirilmiş hali

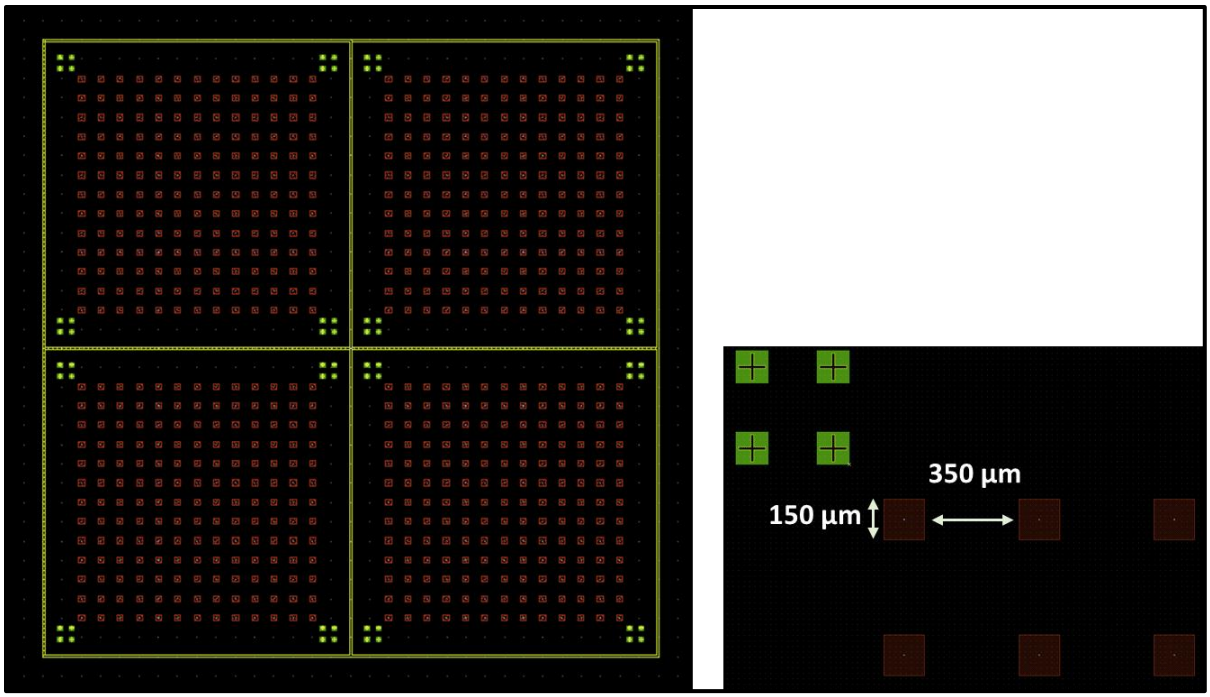
Üretilen filmlerin elektriksel karakterlerini belirleyebilmek adına papyon şeklinde mikro-teller üretilmiştir. Bunu için maske kullanılmıştır. Birinci maske ile mikro-teller üretilmiş (Şekil 51) bunun üzerine hizalama işaretleri kullanılarak kontak dörtgen şekilleri fotolitografi ile desenlenmiştir. Birinci maskede her dikdörtgen biçimindeki bölgelere ilişkin mikro-teller 2x10, 2x8, 2x6, 2x4, 2x20, 2x15, 2x16, 4x20, 5x15, 5x10, 3x30, 4x30, 5x25, 5x20, 7x21, 10x20 ve 4x40 boyutlarındadır (hepsi mikron mertebesinde). İkinci maske altın bağlantılar için 100x250 mikron, diğeri de 75x150 mikron boyutunda dörtgenler içermektedir. Şekil 52'de birinci ve ikinci maskelerin üretiminden sonraki optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Bu tasarımla Au filmlerin elektriksel bağlantıları kontrol edilmiş ve üretim basamakları optimize edilmiştir. Py filmlerinin de öz direncinin hesaplanması ve Au kontaklar ile bağlantı kalitesi kontrol edilmiştir.

Astroid aygıtlarında Cascade marka prob ile uyumlu, 2 ve 4-prob elektriksel ölümler yapabilmek ve aynı zamanda Spin-Hall etkisi ölçümlerinde de kullanabilmek üzere tasarlanan maske Şekil 53'de gösterilmektedir. Kontak noktaları büyüklükleri ve açıklıkları mevcut Cascade RF problara uygun olmakla beraber wire bond için de yeterli büyüklüğe sahiptirler. Çift tarafta bağlantı kolları bulunan tasarımda Sağ taraftaki bağlantı kolları ile manyetik alana paralel akım geçirebilirken, sol taraftaki bağlantılardan örneğin oryantasyonunu değiştirmeden manyetik alana dik bir akım geçirilebilir. Spin-Hall etkisi ile tetiklenen ölçümlerde tek bir taraf astroid altındaki Pt veya Ta yüksek spin-yörünge etkileşimli malzemesinden akım geçirmek için kullanılmıştır.



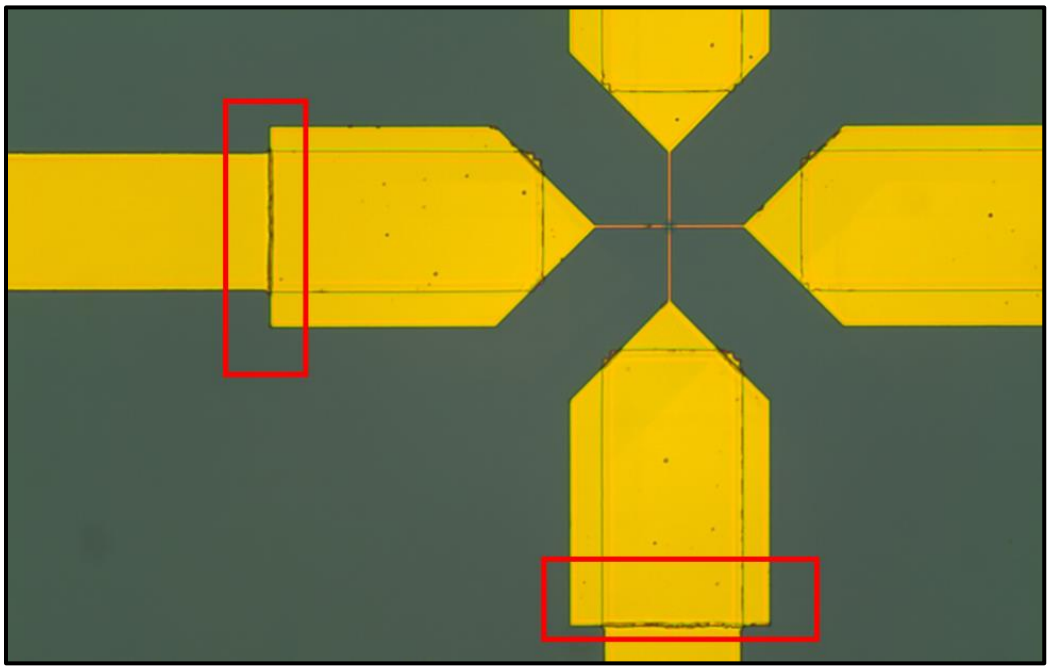
Şekil 53 Astroid aygıtları için tasarlanan maske ve hizalama işaretleri

Spin valf aygıtları için üst kontak görevi görecek şekilde tasarlanan maske Şekil 54'da gösterilmiştir. 150x150 μm^2 boyutundaki kontak alanı wire bonding işlemi için uygun büyüklüktedir. Kontaklar arası 350 μm mesafe bırakılmıştır. Bu da tasarımda aygıtları birbirinden uzaklaştırırken arada kontaksız nano-sütunların inşası için yer bırakmaktadır. Bu sayede örnekler hem elektriksel ölçümlerde hem de MKM'de görüntülenmesinde kullanılabilecektir.



Şekil 54 Spin-valf yapıları için tasarlanan üst kontak maskesi

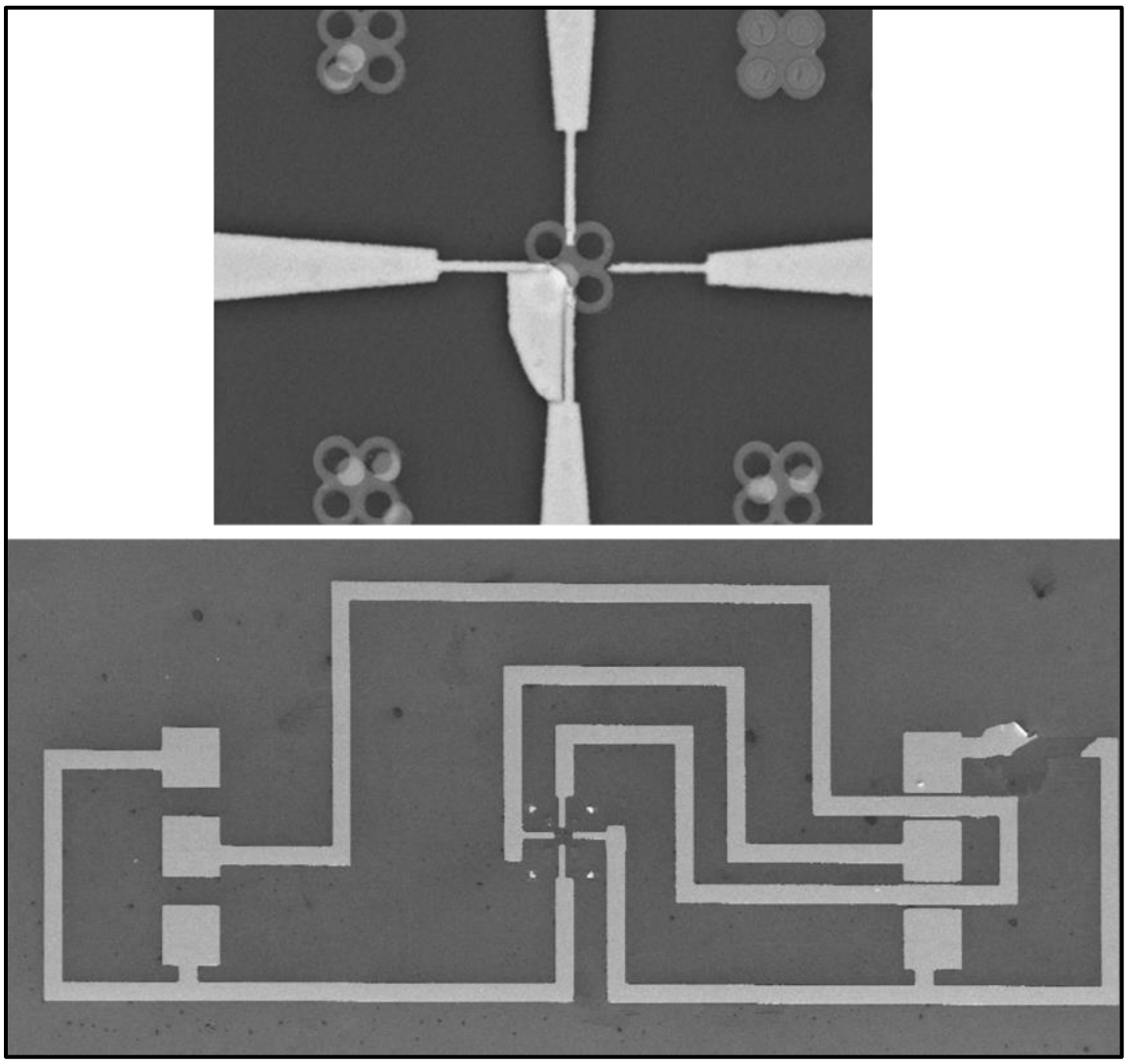
Litografi işlemi için SUNUM'da bulunan Midas marka maske hizalayıcı kullanılmıştır. Az-5214 fotorezist ile kaplanan alttaşlar 100 ºC'de 1 dk ısıtılır. Maske maske-tutucusuna yüklenirken örnek vakum tutucu üzerine yerleştirilir. Mikroskop yardımıyla maske üzerindeki hizalama işaretleri örnek üzerindekilerle hizalanır. Hizalama işlemi tamam olduktan sonra kontak litografi modu ile maske ve alttaş birbirine değdirilir. UV ışığı altında 4,5 sn bırakılan alttaşlar desenlendikten sonra AZ 726 MIF çözücüsünde UV'ye maruz kalan yerler çıkartılır. Bu sayede alltaşlar son kontak malzemesinin büyütülmesi için hazırdır. Saçtırma ve lift-off sonrası kontak elektrotlar ölçüm için hazırdır. Bu son üretim basamağında büyütme öncesinde açılan boşluklar bir süre iyon aşındırması ile temizlenir. Bunun bağlantı kalitesini çok büyük ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Ancak iyon aşındırması esnasında alttaşların fazla ısındığı ve rezist malzemesinin bu ısınma sonrası yüzeye yapıştığı ve lift-off ile kaldırılamadığı gözlenmiştir. Bu durumda alttaşların altına termal pasta sürülmüş ve ısının alttaş-tutucuya yayılması sağlanmıştır. İyon aşındırma basamaklı bir şekilde (30 sn açık 30 sn kapalı) yapılmış ve örneğin ısınması engellenmiştir.



Şekil 55 Astroid aygıtına fotolitografi ile kontak konulması işlemi sonrası optik mikroskop görüntüsü

Elektrotların ve üzerine geldikleri metal kolların kalınlıkları çok önemlidir ve optimize edilmelidir. Metal kollar çok kalın ve Au elektrotlar da buna yakın bir kalınlıkta olursa Şekil 55'de siyah karaltılarla görüldüğü gibi bir bağlantı kopması olabilmekte ve kontak direnci oldukça yüksek çıkabilmektedir (yüzlerce Ohm). Sonuç elektrot ve astroidden uzayan kolların kalınlığı da optimize edilmiştir.

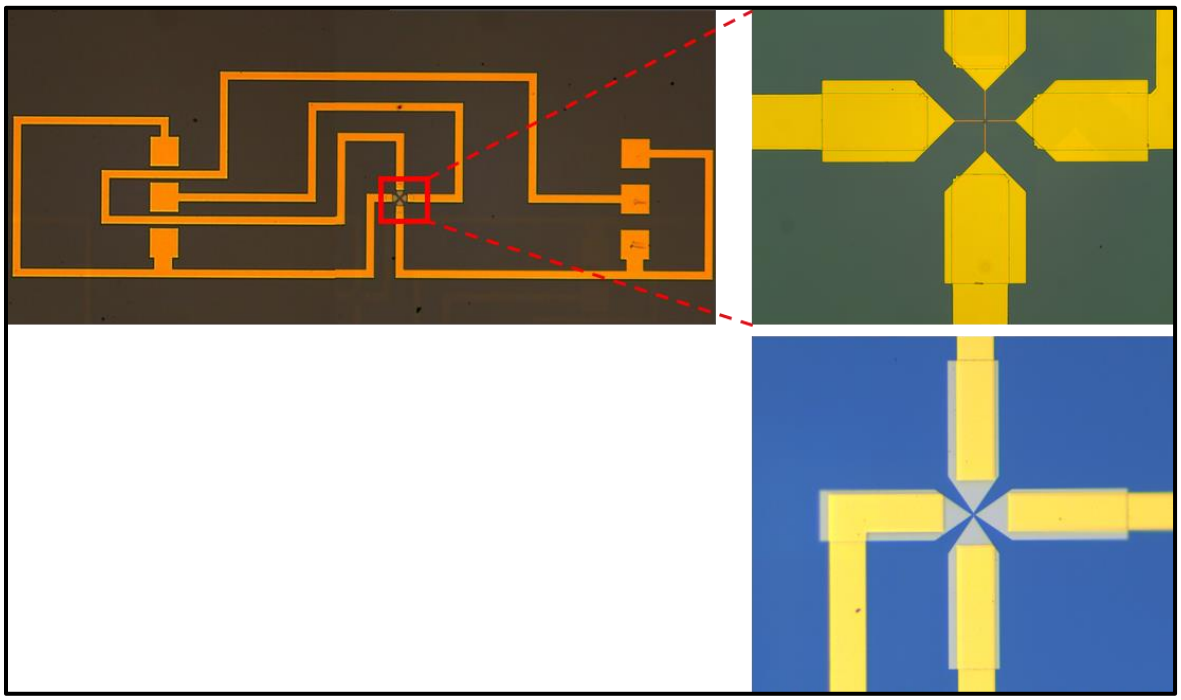
Fotolitografi ve metal büyütülmesi sonrasında yapılan lift-off aşamasının da optimize edilmesi gerekmiştir. Bu, aygıtların ölçümlerinde kısa-devrelerin veya açık devrelerin olmaması açısından önemlidir. Şekil 56'de örneklerin üzerinde kalan metal kalıntılar ve kalkmış bağlantılar görünmektedir. Asetonda 10 dk. %60 ultrasonik güçte titreştirildikten sonra gece boyu temiz asetonda bekletilmesi ve sabahında tekrar titreştirilerek izopropanol ile çalkalanması uygun bulunmuştur.



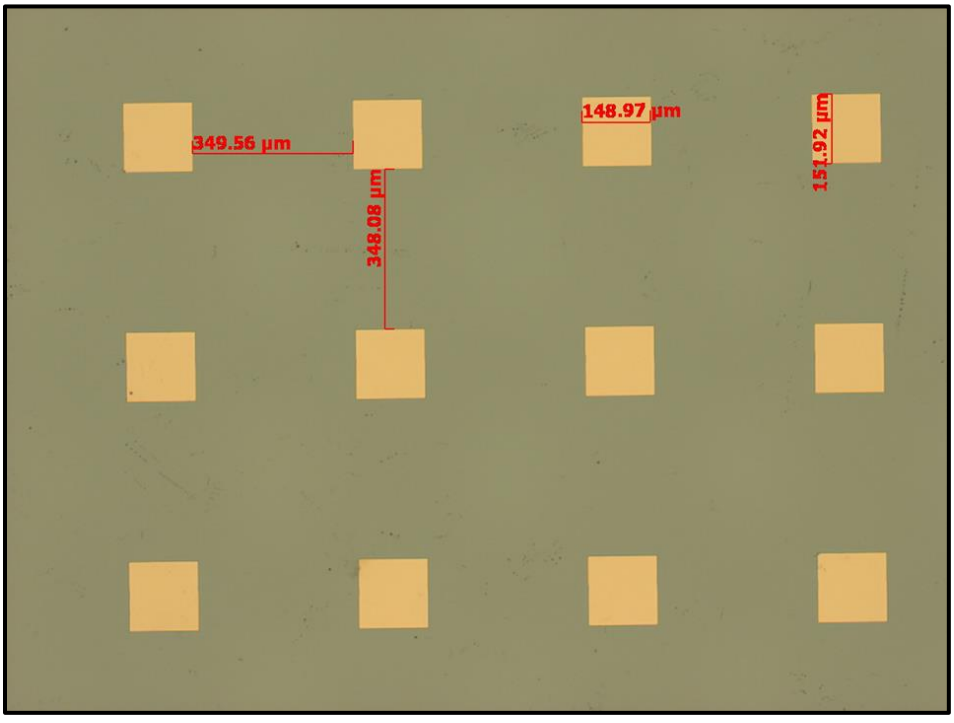
Şekil 56 Astroid aygıtının fotolitografi sonrası çekilmiş SEM görüntüsü

Bu işlemler sonrası elde edilen bir astroid aygıtı ve elektriksel bağlantıları Şekil 57'de gösterilmiştir. 80 nm metal kolların üzerine desenleme yapılmış, fotolitografi ile açılan boşluklara 3 nm iyon aşındırması ile temizlenmiş ve sonrasında 150 nm kalınlığında Au elektrotlar büyütülmüştür. Şekil 57'de görüldüğü üzere yüzeyde metal kalıntılar ya da metal kalkması olmadan, bağlantı kolları üst üste düzgün bir şekilde üretilmiştir.

Spin-valf aygıtlarının üretim basamaklarının en son aşaması olan fotolitografi ile elektrot üretimi sonucu örneklerin optik mikroskop görüntüsü Şekil 58'de gösterilmiştir. Burada kapak 150 nm kalınlığındaki üst elektrotlar başarı ile yerleştirilmiştir.



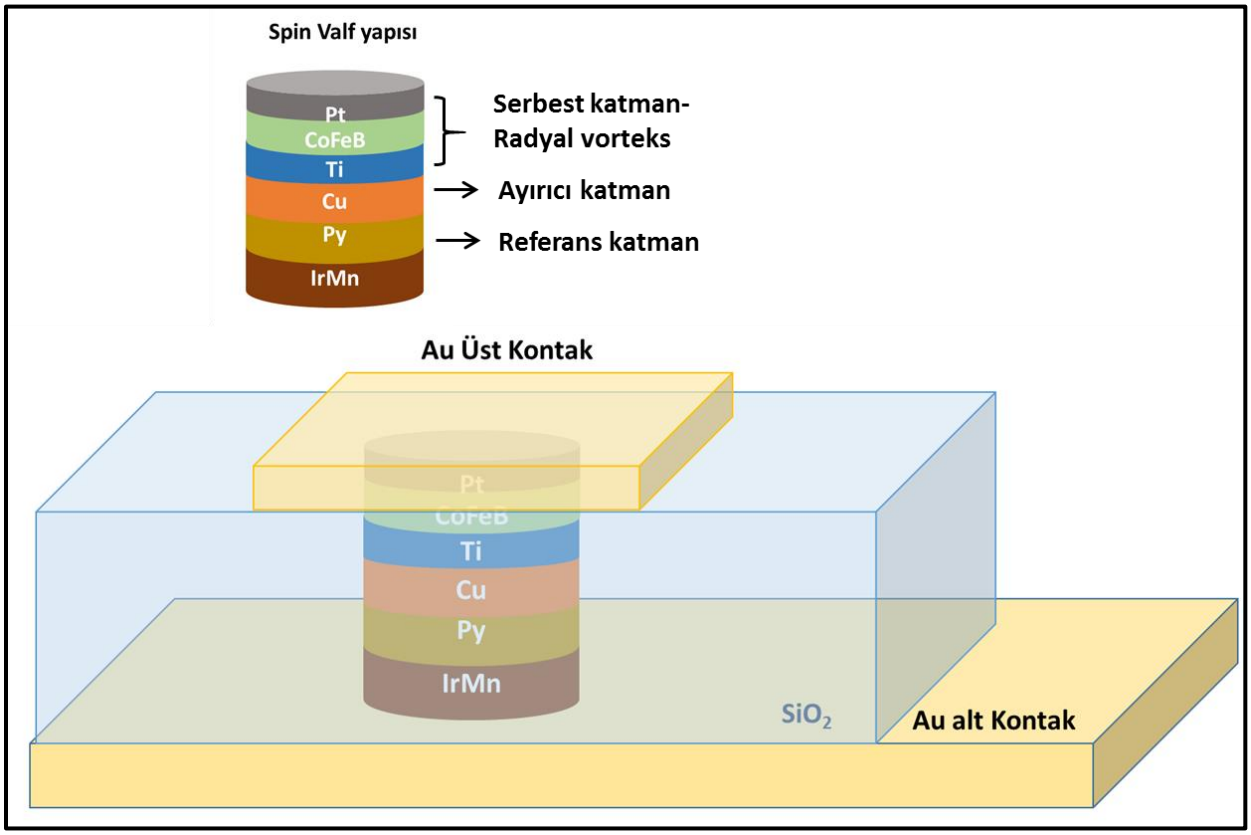
Şekil 57 Astroid aygıtına fotolitografi ile kontak konulması işlemi sonrası optik mikroskop görüntüsü



Şekil 58 Üretilmiş spin-valf aygıtlarının fotolitografi ile desenlenmiş üst elektrotlarının optik mikroskop görüntüsü

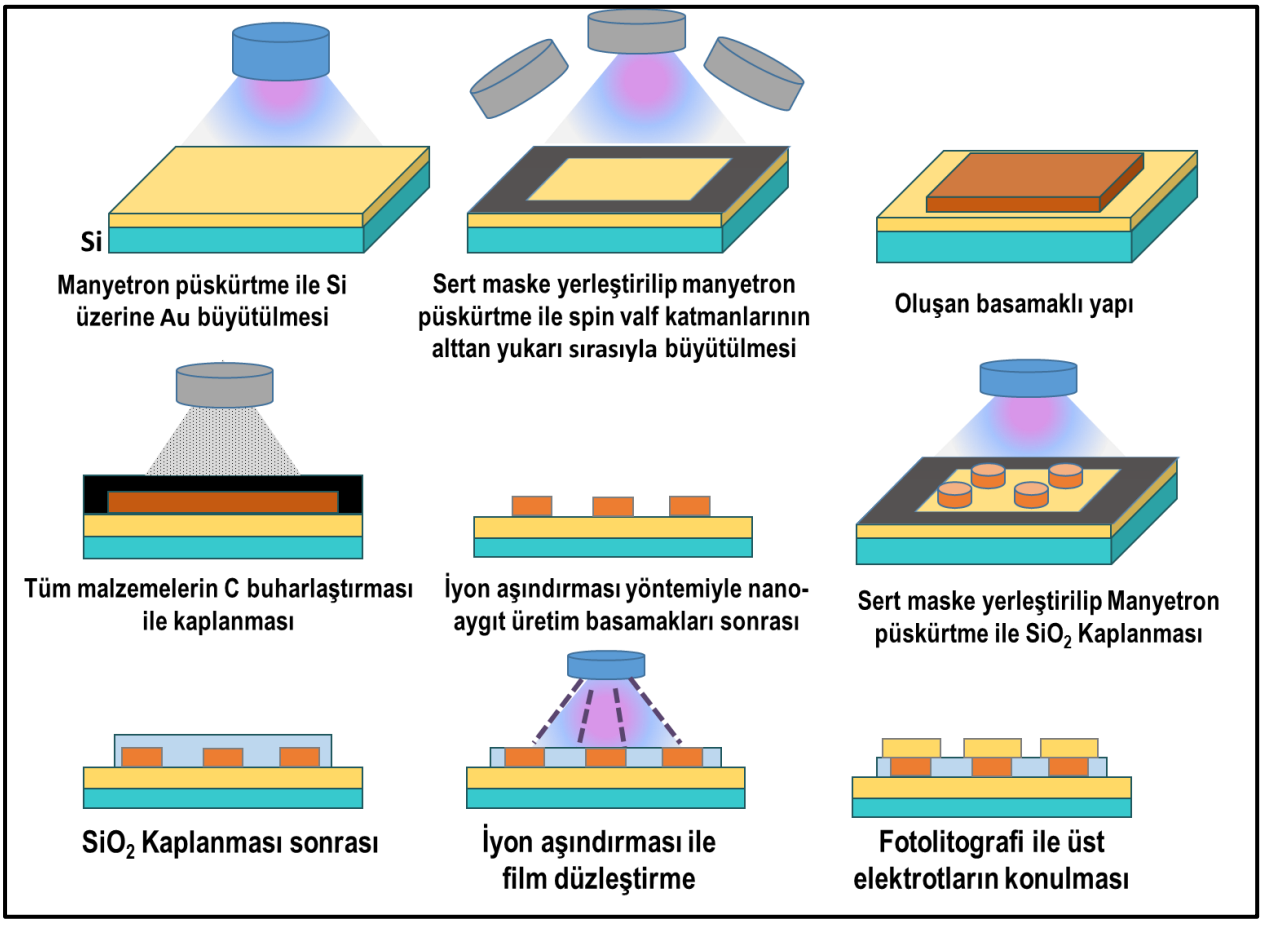
3.2.2.5. Spin-Valf Nano Sütunlarının Üretim Basamakları

7. iş paketi kapsamında yüksek spin yörünge etkileşimli aygıtlarda skyrmion benzeri yapıların dinamiklerinin incelenmesi için elektriksel ölçümlere elverişli spin-valf yapıları üretilmiştir. Spin-valf yapıları sırasıyla bir alt elektrot, bir referans manyetik katman, ayırıcı bir metal katman ve serbest mıknatıslanmaya sahip ikinci manyetik katman ve üst elektrottan oluşur. Spin-valf yapıları yüksek spin-yörünge etkileşimli skyrmion bazlı aygıtlarda mıknatıslanma dinamiklerini tetiklemek ve ölçmek amacıyla tasarlanmıştır. Bunun için modelleme kısmında öngörülen radyal vorteks oluşumuna elverişli Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı yapısı değerlendirilmiştir. Pt/CoFeB/Ti katmanları serbest katman olarak kullanılmış, ayırıcı katman olarak Cu ve değiş-tokuş mekanizmasıyla sabitlenmiş Py katmanı da spin-polarize akım aşılayıcı katman olarak üretilmiştir. Şekil 59'de gösterilen tasarımda iyon-aşındırması yöntemiyle bir alt elektrot üzerine üretilmiş spin-valf nano-sütunları birbirlerinden ve üst elektrot alt elektrottan SiO_2 ile izole edilmiştir.

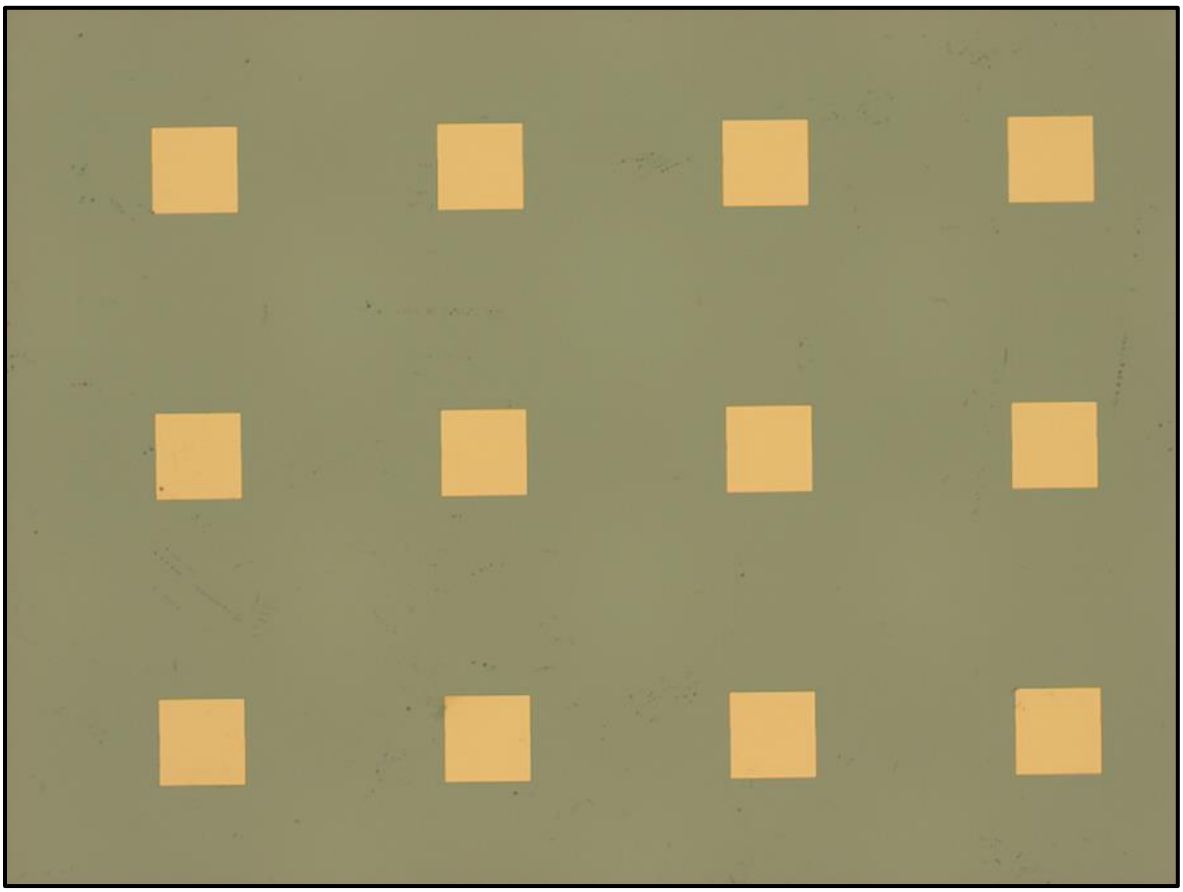


Şekil 59 Spin valf nano-sütunu ve kontaklar ile birlikte tasarımı

Spin-valf aygıtlarının üretim basamakları Şekil 60'da gösterilmiştir. 2cm x 2cm ebatlarında kesilmiş Si alttaşlar üzerine önce alt elektrot olarak 150 nm Au büyütülmüştür. Bu Au malzemenin üzerine ortasında 1,7cm x 1,7cm kare bir boşluk olan metal bir maske yerleştirilmiştir. Bu şekilde yüksek vakumda Şekil 59'de gösterilen spin valf yapısının malzemeleri alttan üste doğru büyütülmüştür. Bunun için AJA sisteminde bir sekans programı yazılmış, bunun sayesinde üretilecek katmanların plazma oluşturma ve kapaklarının açılıp kapanma süreleri programlanmış, arada kontaminasyon olmadan bütün katmanlar üretilebilmiştir. Sonuçta elde edilen basamaklı yapı Şekil 60'da gösterilmiştir. Bu yapının üzeri buharlaştırma ile C kaplanmıştır. İyon aşındırması yöntemi ile nano-sütun büyütme basamakları tek tek uygulanmış ve Şekil 60'daki gibi geniş Au alt elektrot üstünde silindirik nano-sütunlar



Şekil 60 Spin valf aygıtlarının üretim prosedürü



Şekil 61 Üretilmiş spin-valf aygıtlarının optik mikroskop görüntüsü

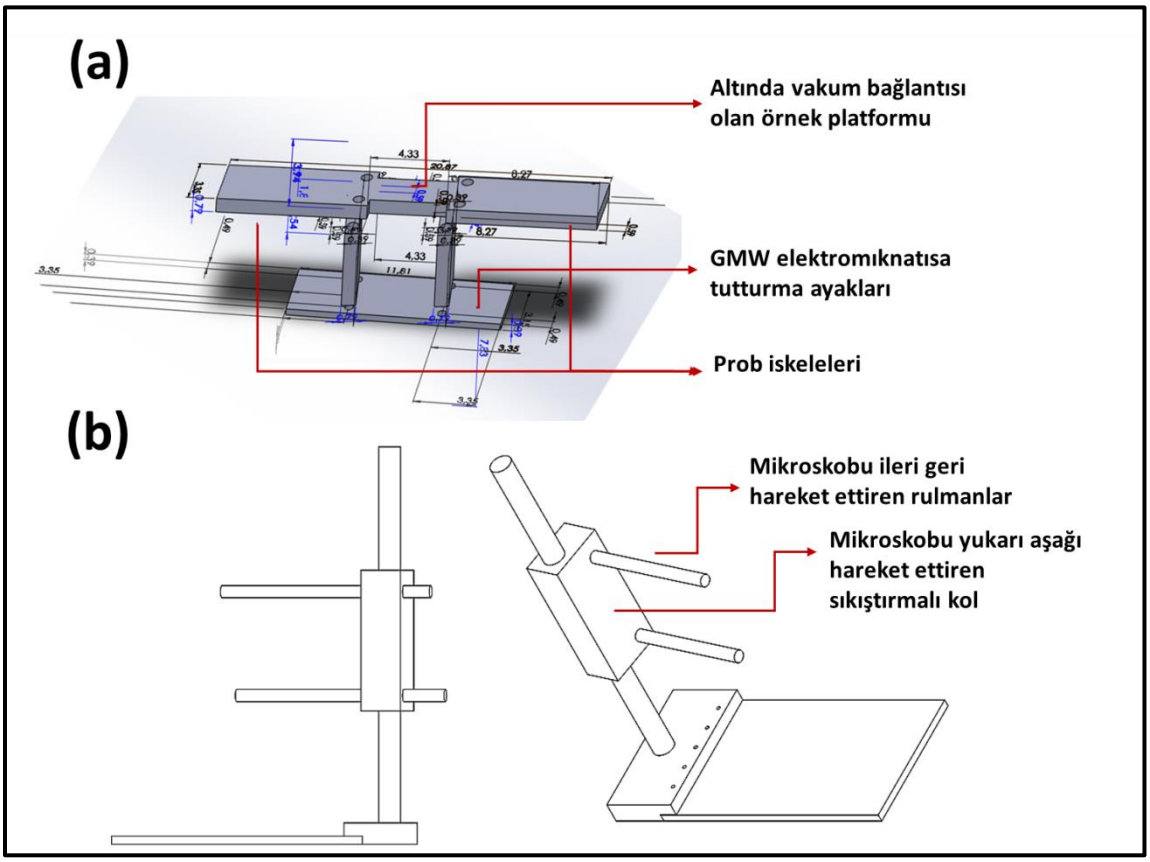
üretilmiştir. Örneğin üzerine tekrar metal maske yerleştirilip SiO_2 büyütülmüştür. Nano-sütunları kaplayacak şekilde üretilen bu izolasyon malzemesi düze yakın bir açıda iyon aşındırması yöntemiyle sütun üst katmanına kadar aşındırılmış ve yüzeyi düzlenmiştir. Bu yapı üzerine nano-sütunlarla birlikte üretilen hizalama işaretleri kullanılarak fotolitografi ile 100 nm Au üst kontak büyütülmüştür. Sonuçta elde edilen spin valf yapısının şematik çizimi Şekil 59'de gösterilmiştir. Katmanları sırasıyla şu şekildedir: Au(150 nm)/IrMn(50)/Py(10)/Cu(10)/Ti(1)/CoFeB(1)/ Pt(5)/Au(100). Örneklerin bitmiş hali Şekil 61'de gösterilmiştir.

3.2.3. Elektriksel Ölçüm Düzeneğinin Kurulması

4. iş paketi kapsamında elektriksel ölçüm düzeneklerinin kurulması ve test edilmesi aynı zamanda 9. iş paketi kapsamında sıcaklığa bağlı ölçüm düzeneğinin kurulması bu bölümde anlatılmıştır.

3.2.3.1. Ölçüm Platformu

Üretilen aygıtların elektriksel özelliklerini ve bu özelliklerin manyetik alanla değişimini inceleyebilmek adına bir ölçüm platformu kurulmuştur. Bir GMW elektro-mıknatısının kutupları arasında oda sıcaklığında yapılacak ölçümler için buraya manyetik olmayan bir örnek platformu, prob ile yapılacak ölçümler için prob iskelesi ve wire-bonding ile yapılacak ölçümler için bir yonga tutucu tasarlanmıştır. Ayrıca prob bağlantısını görüntülemek için istenilen magnifikasyonda bir mikroskop temin edilmiş ve bu mikroskobu tutacak manyetik olmayan bir ayak da tasarlanmıştır. Tasarlanan malzemeler fizik bölümü atölyesinde torna ve freze kullanılarak yapılmıştır.

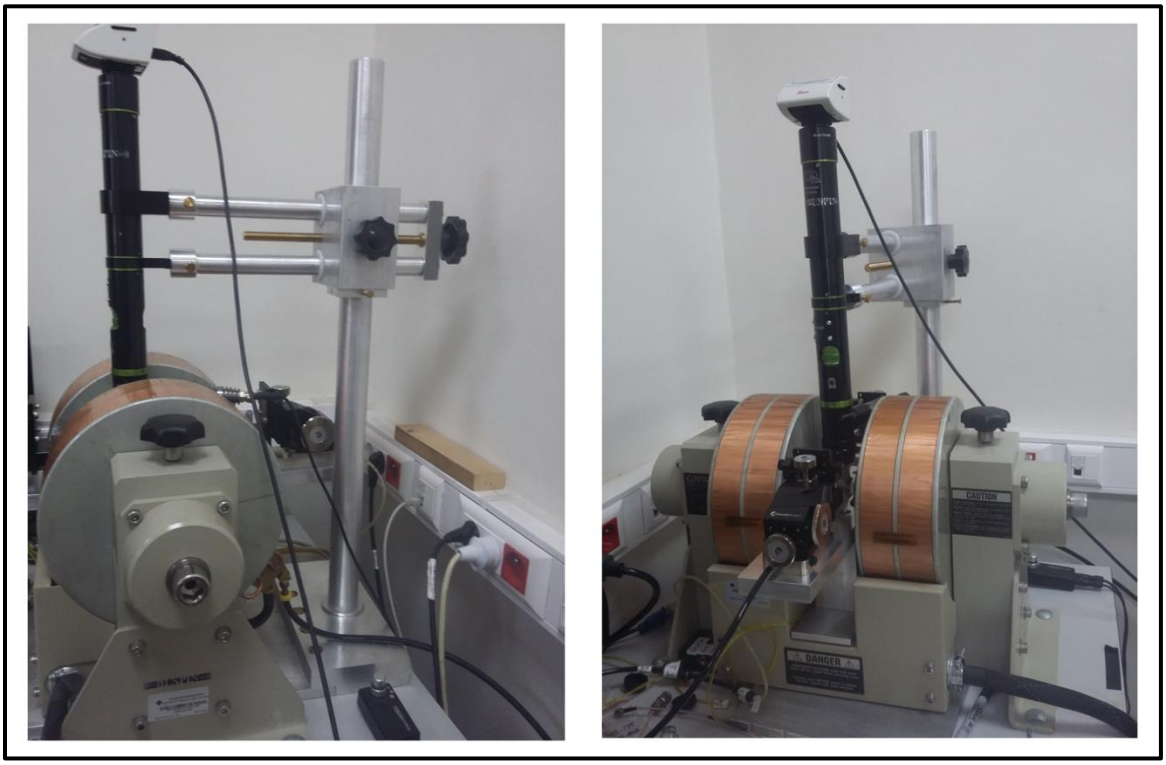


Şekil 62 (a) Örnek platformunun ve (b) mikroskop tutucunun Solidworks çizimleri

Şekil 62'de örnek ve prob konulan platformun tasarımı görülmektedir. Örnek platformunun üstünde 2 mm'lik bir vakum deliği bulunmaktadır. Bunun altında bir O-ring tıkaçlı vakum bağlantı noktası üretilmiştir ve plastik bir vakum borusu ile bağlantı yapılmıştır.

Örnek platformu ve mikroskop ayağı Al malzemesinden üretilmiştir. Yüzeyler Alın frezelemesi ile yağ kullanarak ve yüksek hızda tarama yapılarak vakum tutacak ayarda pürüzsüz hale getirilmiştir. Şekil 62b'de gösterilen mikroskop tutucu tasarımında mikroskobun ileri geri hareketini sağlayacak rulman kol tornada pirinç malzemesinden üretilmiştir. Mikroskop aynı zamanda radyal ve yukarı aşağı yönde de hareket edebilmektedir. Bu sayede bir yonga üzerinde farklı örneklere prob bağlantısı kurmak istendiğinde mikroskobun gördüğü alan değiştirilebilmektedir. Şekildeki tasarımın bir avantajı iki noktadan destek sağladığı mikroskobun büyütme oranı yani magnifikasyonu ve odağı üzerindeki dönen mekanizmadan değiştirildiğinde hiç titrememesidir.

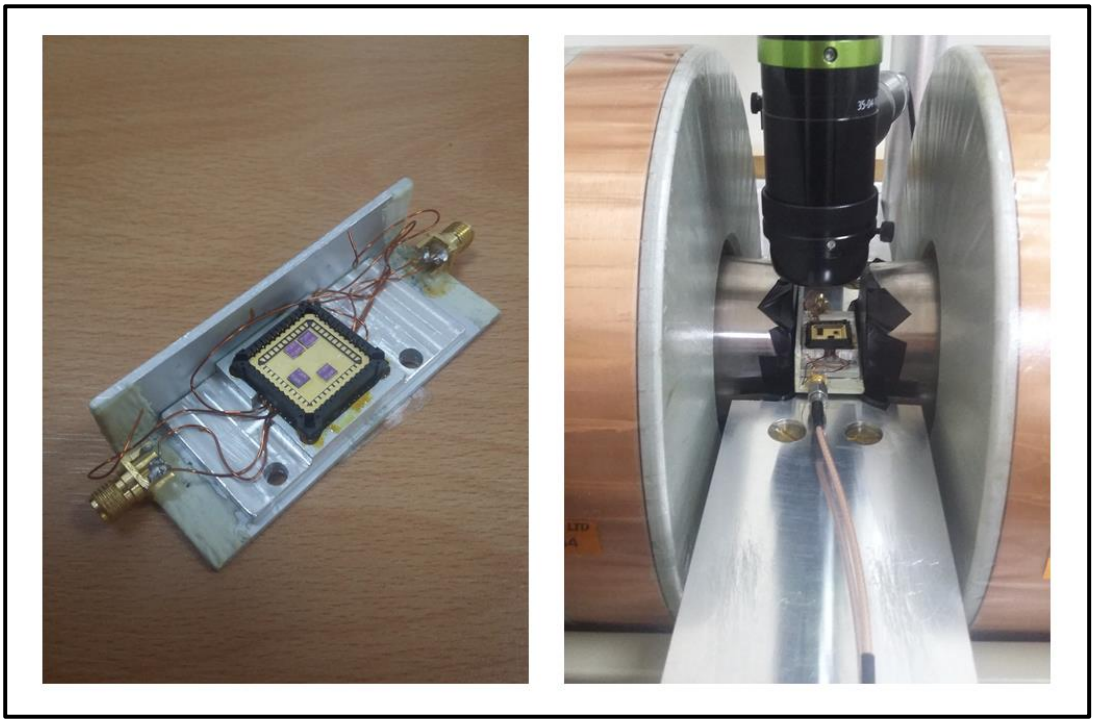
Üretilen parçalar Şekil 63'da gösterilmiştir. GMW marka elektromıknatısın kutupları arasına üretilen örnek platformu yerleştirilmiştir. Burada uzun mikroskop ve tutucusu, mikroskobun tepesindeki kamera ekipmanı görülmektedir. QI-optics marka mikroskop yüksek



Şekil 63 Üretilen örnek platformu ve mikroskop tutucu, elektromıknatıs ve mikroskop ile birlikte

menzillidir ve 50 kat büyütme kapasitesi vardır. 5 cm yükseklikten prob kafasına zarar vermeden güvenli bir şekilde bağlantıları görüntüleyebilmektedir. Mikroskobun tepesinde Leica marka bir kamera bulunmaktadır. Bu sayede görüntü bir bilgisayar ekranına yansıtılmakta ve bağlantı kurarken rahatlıkla görüntülenebilmektedir. Bu şekilde alınmış bir görüntü Şekil 65'de gösterilmiştir. Wire-bonding tekniği ile bağlanan örneklerdeki ölçümler için Şekil 64'da gösterilen düzenek üretilmiştir. Düzlem içi ve düzleme dik manyetik alan uygulanabilen bu düzenek örnek platformuna yerleştirilmektedir. Her iki tarafında 4-prob ölçümlere olanak sağlayacak SMA bağlantılar bulunmaktadır. Yonga yani çip tutucunun üzerine GE Varnish yapıştırıcı ile yapıştırılan çipler wire-bonding ile ilgili pinlere bağlanır. Bu pinler kablolarla SMA konektörlere lehimlenmiştir.

GMW elektromıknatısı Kepco marka bir güç kaynağı ile beslenmektedir. 40A'e kadar DC akım uygulayan yüksek akımlarda cihazın hasar görmemesi için GMW soğuk su ile soğutulmaktadır. GMW kutuplarının açıklığına göre 1,7 T'ya kadar manyetik alan uygulayabilmektedir. Manyetik alan örnek platformu yerleştirildiğindeki açıklıkta maksimum 800 mT'dır. Ölçümler sırasında bir teslametre kullanılamadığından GMW ölçüm öncesinde kalibre



Şekil 64 Yonga tutucu için üretilen ek platform ve bunun örnek platformuna yerleştirilmiş hali

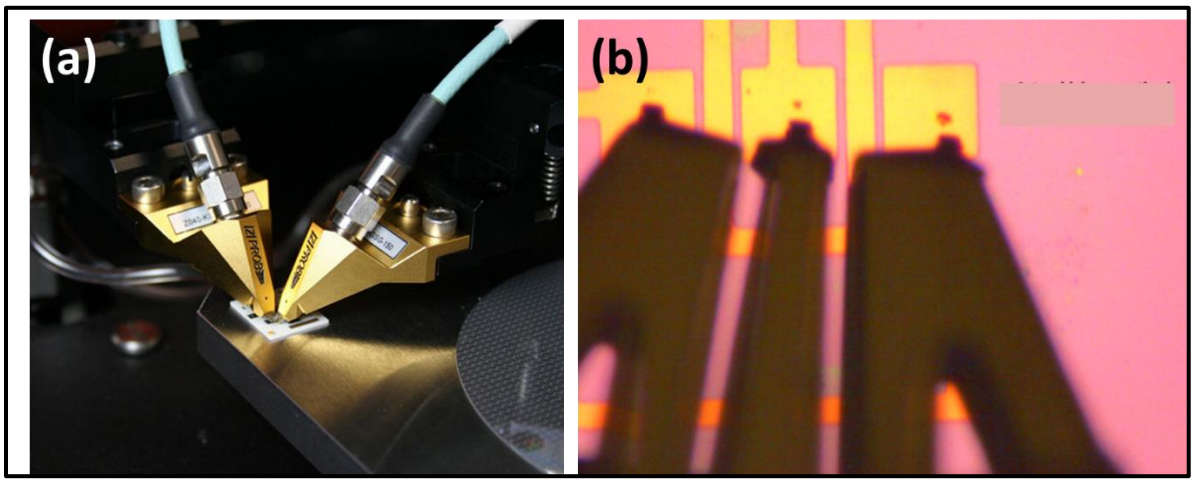
edilir. Belirli açıklıkta uyguladığı akıma karşılık gelen manyetik alanın kaydedilmesi ve bu şekilde kalibrasyon değerleri kullanılarak istenilen manyetik alana tekabül eden akımın gönderilmesi ile istenilen manyetik alan elde edilir. Bu sayede GMW hem ölçümler, hem de manyetik alan koşullandırmaları için kullanılmıştır.

3.2.3.2. Elektriksel Bağlantılar

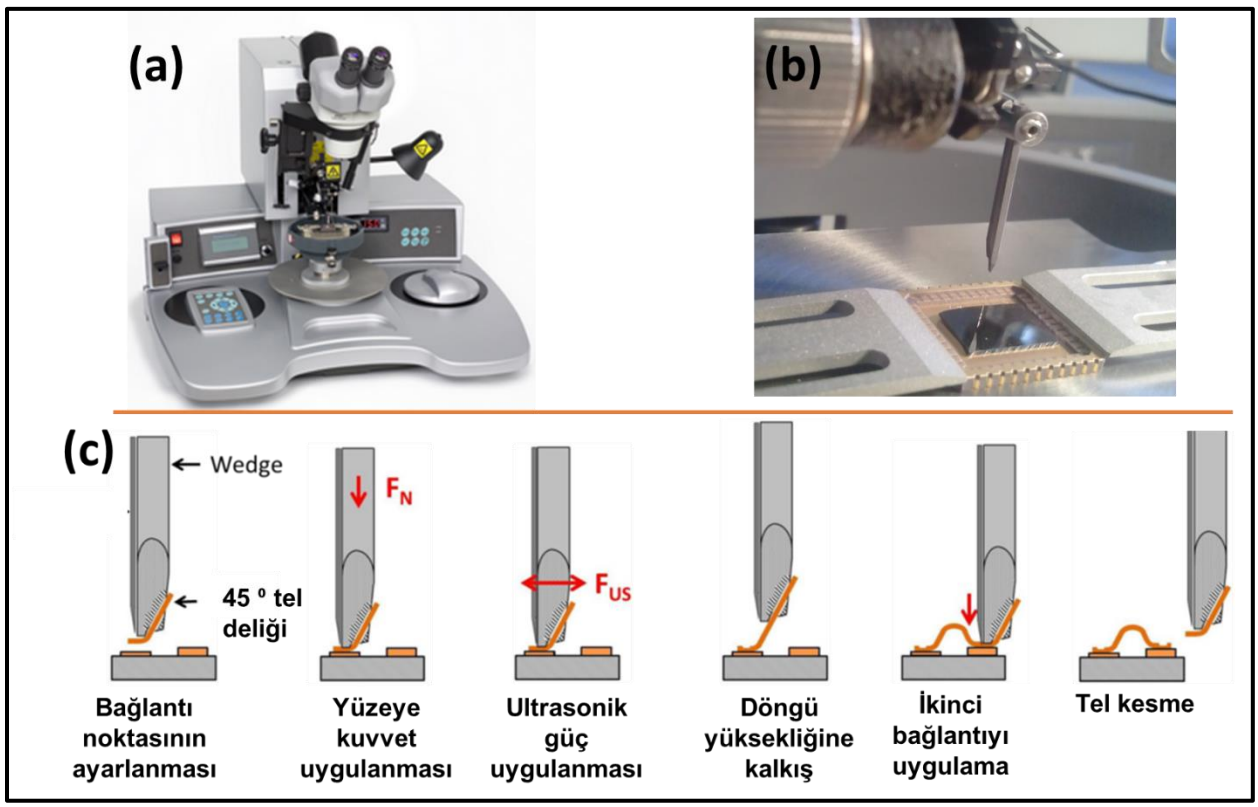
Astoridin dört tarafına konulan kontak kolları ile aygıt üzerinde 2 veya 4-prob ölçüm yapılabilmektedir. Astorid aygıtlarının bağlantı bölgeleri Cascade marka prob ucuna uygun şekilde ayarlanmıştır. Bu RF prob kafaları Şekil 65'de gösterilmiştir. Ölçüm platformunun her iki ucuna da prob yerleştirilebilmekte ve iki probla aynı astroid aygıta bağlantı yapılabilmekte ve 4-prob ölçüm alınabilmektedir. RF problar yumuşak uçlara sahiptirler. Astroid aygıtın kontak bölgelerine yaptıkları bir bağlantı Şekil 65b'de gösterilmiştir.

Örneklere elektriksel bağlantılar wire-bonding tekniği ile de yapılmıştır. Şekil 66a'da gösterilen KnS marka 4700 model wire-bonder cihazı laboratuvarımızda kullanılmıştır. Bu cihaz "wedge" adı verilen çelik bir iğne yardımıyla (Şekil 66b) ince Al teli yüzeye bağlar. Yuvarlak ve ısıtılabilen örnek platformu bir mouse yardımı ile kullanıcı tarafından hareket ettirilir. Yüksek menzilli bir mikroskop yardımı ile yüzeye odaklı lazer bağlantı yapılacak noktaya getirilir. İligli parametreler dijital ekrandan ayarlanır. Artık örnek wire-bond için hazırdır. Çalışma mekanizması Şekil 66c'de gösterilen cihaz mouse tuşuna basılması ile ilk kontak bölgesine wedge indirilir. Bu alçaklıkta son hassas ayar yapıldıktan sonra mouse bırakılması ile wedge yüzeye belirlenen parametrede bir kuvvet uygulayarak Al teli yüzeye bastırır. Aynı anda ultrasonik bir güçle ve belirli bir süre (yine belirlenen parametreler) wedge titreştirilir ve telin yüzeye yapışması sağlanır. Belirlenen döngü yüksekliğine kaldırılan wedge ikinci kontak noktasına getirilir ve işlem tekrarlanır. İkinci bağlantı sonrası tel koparılır. Uygulamalarımızda 20 μm kalınlığında Al tel kullanılmıştır.

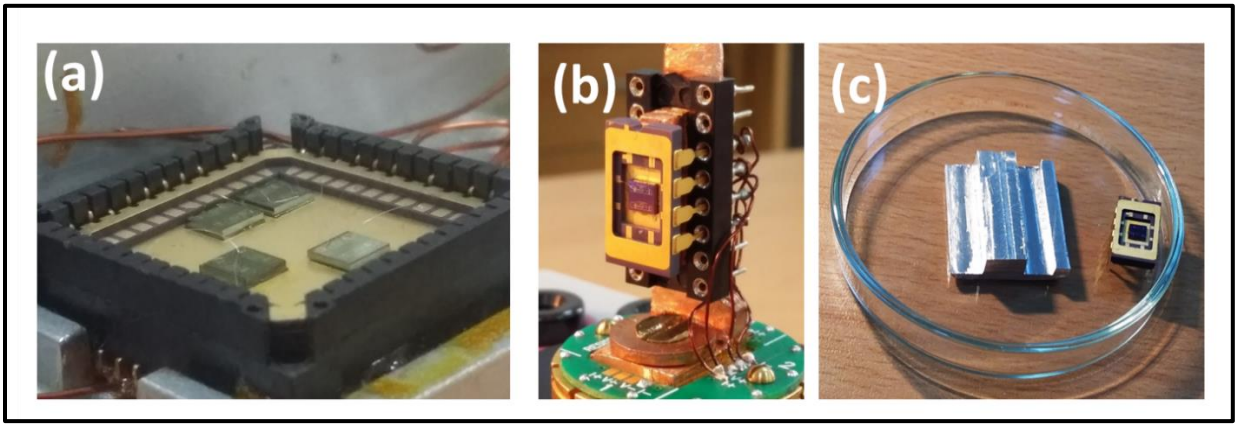
Wire-bonding parametreleri dijital ekrandan ayarlanabilmektedir. Her yüzey için değişen ve hatta aynı yüzey için ortamın nemine ve yüzeyin temizliğine göre değişen bu parametreler, özellikle kuvvet, ultrasonik güç ve zaman, bağlantı kalitesi açısından çok önemlidir. Her wire-bonding işleminde önce o spesifik örnek kontak yüzeyi için parametreler tayin edilmiş, kısa devre



Şekil 65 (a) Cascade marka RF prob kafası (b) Prob astroid aygıtının kontaklarına elektriksel bağlantı yaparken çekilmiş mikroskop görüntüsü



Şekil 66 (a) KnS marka 4700 model Wire-Bonder ultrasonik kablo yapıştırıcı (b) Wedge adı verilen çelik iğne (c) wire-bonding yönteminin şematik bir çizimi



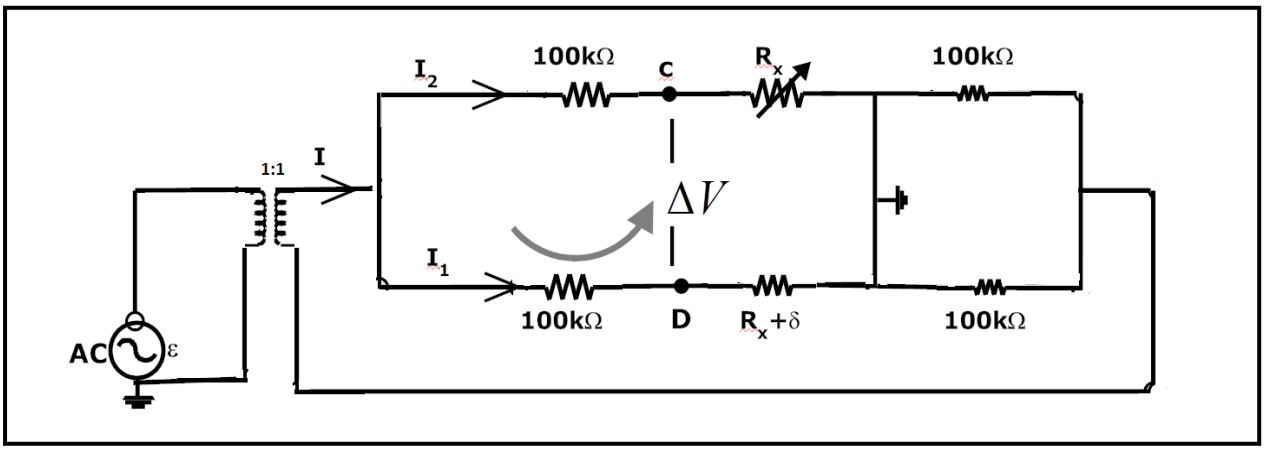
Şekil 67 (a) 44-pinli yonga tutucu üzerinde wire bonding (b) 8-pinli bir yonga tutucu üzerinde wire-bonding (e) 8-pinli yonga tutucuya kablo bağlamak için üretilen Al yonga destek platformu

yaptırılarak kontak direnci tespit edilmiştir. Genelde 0,5 ile 0,7 Ohm arasında değişmektedir. Au kontak elektrotlar için genelde kullanılan uygun değerler 23 g kuvvetle, 0.4 W ultrasonic gücün, 20 msn uygulanması olmuştur.

Örneklerin kontak bölgeleri üzerine yapıştırıldıkları yonga tutucuların ilgili pinlerine bağlanmıştır. Şekil 67'de gösterilen örnekler 44-pinli ve 8-pinli yonga tutucular üzerindedir. 44-pinli yonga tutucu düz pinlere sahip olduğundan wire-bonder platformuna kolayca oturtulabilmektedir. Ancak 8-pinli yonga tutucu PPMS düzeneğinde kullanılacağından ve bir IC soketin içine monte edileceğinden çıkıntılı ayaklara sahiptir. Bu nedenle wire-bonder üzerine monte edilememiştir. Bunun için Al bir ek platform yapılmıştır. Şekil 67'de gösterilen platforma oturtulan yonga tutucuya kolayca wire-bond yapılabilmektedir.

3.2.3.3. AC Direnç Ölçümleri

Aygıtlar üzerine yapılacak elektriksel ölçümler için bir devre kutusu tasarlanmıştır. Py ince filmlerinde manyetik alanla değişen direnç yani AMR en fazla %5 olduğundan DC direnç ölçümlerinin başarılı olamayacağı öngörülmüş ve AC direnç ölçüm yöntemine başvurulmuştur. Şekil 68 kurulan devrenin şematik bir çizimini sunmaktadır. Bir Wheatstone köprüsü içeren bu devrede 1:1 bir transformatörle toprağı izole edilen 100 mV'luk bir AC voltaj ve 100 kΩ'luk dirençler kullanılmıştır. $R_x+\delta$ ile ifade edilen aygıt direnci, C ve D noktaları arasındaki voltaj farkını gözlemleyerek R_x ile belirtilen sahip değişken direnci değiştirerek bulunur. Wheatstone



Şekil 68: AC direnç ölçümü için tasarlanan devre. R_x ile belirtilen 0.1 m Ω çözünürlüğe sahip bir değişken direnç ve $R_x+\delta$ ile ifade edilen astroid direncidir.

köprüsü dengelendiğinde yani R_x ile $R_x+\delta$ eşleştiğinde bu voltaj farkı, ΔV, sıfırlanır ve değişken direncin değeri okunarak aygıt direnci tespit edilir. Wheatstone devresi, ilgili konektörler ve aygıtı kısa devre ile koruyucu ek bir anahtarlı devre içeren devre kutusu Şekil 69'da gösterilmiştir. Tüm elektriksel düzeneğin de gösterildiği bu resimde devrede sinyal üretici olarak kullanılan Signal Recovery marka bir kilitlemeli yükseltgeç ve direnç tespiti için 0.1 m Ω çözünürlüğe sahip direnç kutusu görülmektedir. AC sinyal olarak 500 mV'luk 10 kHz frekansta bir sinyal kullanılmıştır. ΔV tespiti de yine yükseltgeç ile μV hassasiyette yapılabilmektedir.

Manyetik alanın taranması ile örneğin üzerinde oluşacak direnç değişimlerini tespit etmek adına Labview programlama dilinde bir yazılım hazırlanmıştır. Şekil 70'de gösterilen bu yazılım ile kilitlemeli yükseltgeç ve Kepco güç kaynağı GPIB bağlantısı yoluyla kontrol edilebilmektedir. Örneğin direnci sıfır manyetik alanda belirlendikten sonra bu yazılımda "base resistance" yani temel direnç kutucuğuna yazılır. Köprü dengelendikten sonra manyetik alanın değişmesi ile aygıtın direncinde oluşan değişiklik, δ , C ve D noktaları arasındaki voltaj farkını, ΔV , kaydederek şu formüle göre belirlenir:

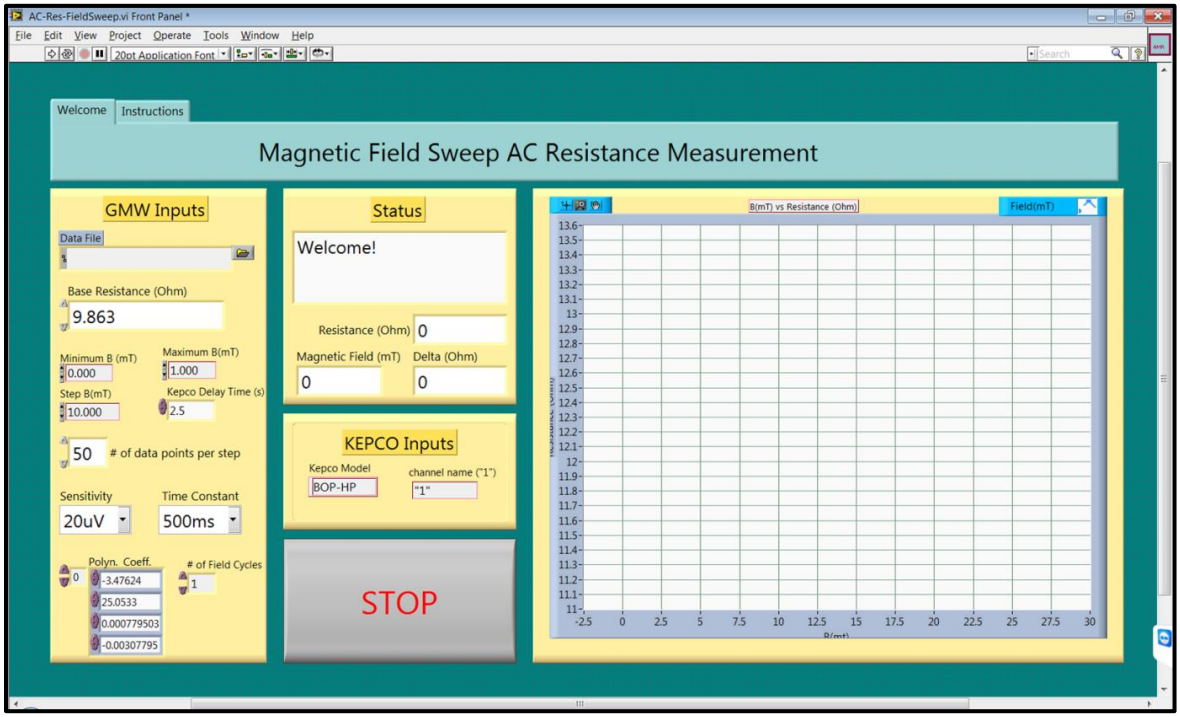
$$\delta = \frac{2\Delta V(100k\Omega + R_x)}{(\varepsilon - \Delta V)} \qquad (1)$$

Bu şekilde tespit edilen direnç, $R_x+\delta$, kaydedilir.



Şekil 69 AC direnç ölçüm düzeneği

Manyetik alan kalibrasyonu, sıcaklığa bağlı ölçümler ve yüksek frekans sinyalinin kontrolü için de aynı şekilde Labview ile yazılan programlar kullanılmıştır. Şekil 69'daki düzenekte gösterilen cihazlar ve PPMS'teki sıcaklık ve manyetik alan kontrolü GPIB bağlantısı ile yapılabilmektedir.

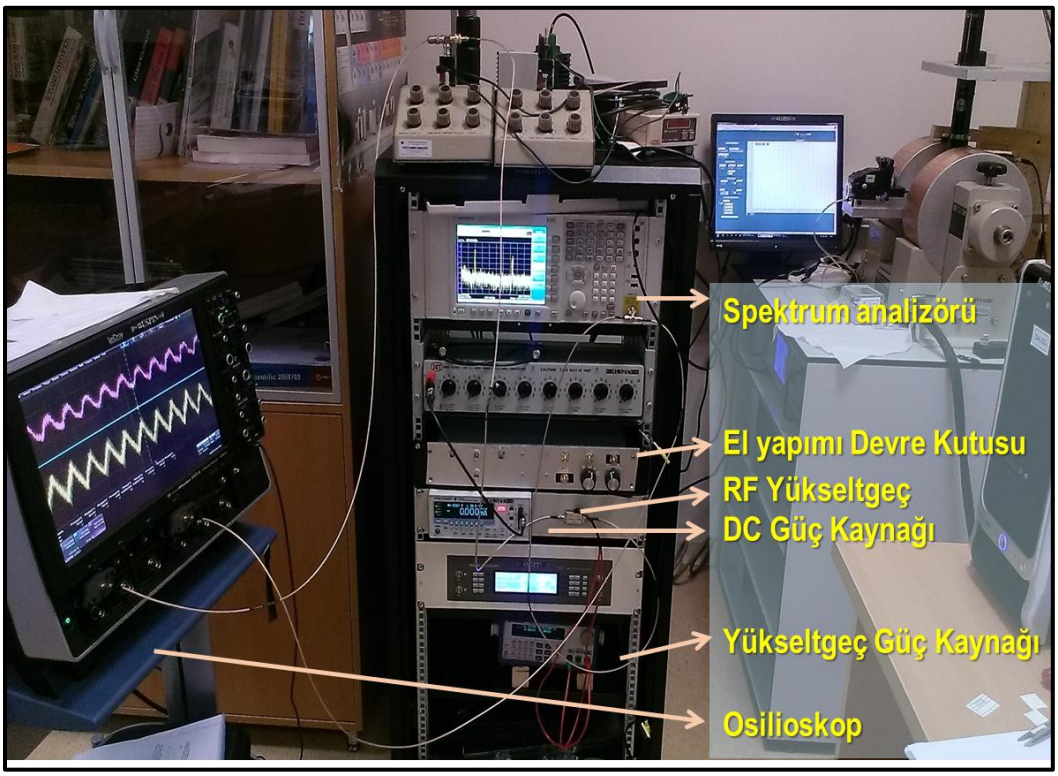


Şekil 70 Labview yazılımı ile yazılmış AMR ölçüm programı

3.2.3.4. Yüksek Frekans Sinyal Ölçüm Düzeneği

Nano-mıknatıslarda ve çoklu katmanlı nano-sütunlardaki sıradışı mikro-manyetik yapılanmalar olan antivorteks ve radyal-vorteks skyrmionları manyetik alan darbeleri ve spin polarize olmuş akım ile yüksek frekanslarda (radyo frekansı) mıknatıslanmada salınımlar oluştururlar. Bu mikro-manyetik dinamikler aygıtın ölçülebilen parametrelerinde salınıma yol açar. Bu projede astroid aygıtlarında AMR mekanizması ve spin-Hall etkisi, radyal vorteks aygıtlarında GMR mekanizması ile yüksek frekansta oluşan dinamiklerin tespit edilmesi ve aygıt uygulamaları için değerlendirilmesi planlanmıştır.

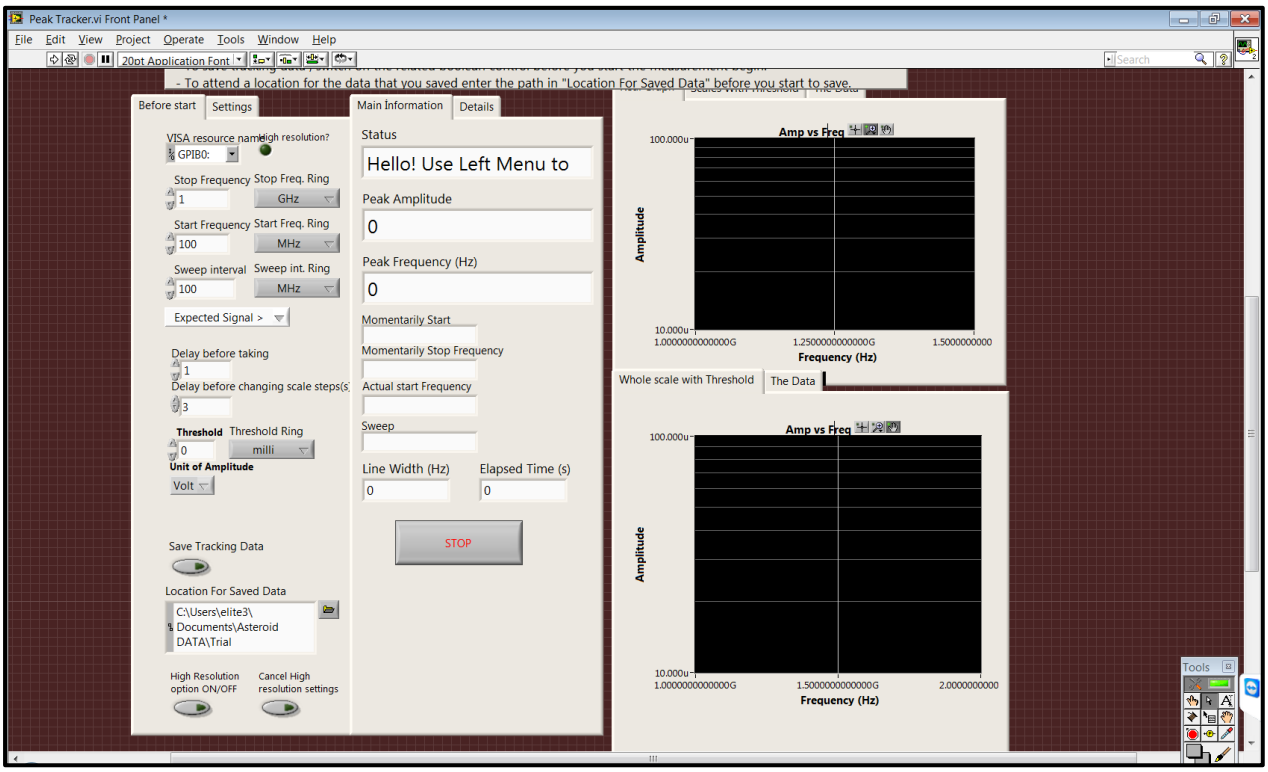
Şekil 71'te gösterilen ölçüm sistemi gerek GMW elektromıknatısın kutupları arasına gerekse sıcaklığa bağlı ölçümler için PPMS sistemine monte edilen örnekler üzerinde yüksek frekansta oluşacak salınımların tespiti için kurulmuştur. Mikro-manyetik dinamiklerin DC akımla tetiklenebilmesi için sistemde bir Yokogawa DC güç kaynağı bulunmaktadır. dinamiklerin bir spektrum analizörü ile tespit edilmesi hedeflenmiştir. Burada manyetik malzemeden geçen



Şekil 71 Yüksek frekans sinyal tespiti için hazırlanmış düzenek. Osiloskopta 10 MHz bir test sinyali ve yükseltilmiş hali görülmektedir.

elektronların spin-polarize olarak lokal momentler üzerine bir spin-tork uygulaması sebebiyle manyetik mikro-konfigürasyonda oluşacak değişimler direnç üzerinde salınımlara sebep olacaktır. Bu direnç salınımları örneğin sabit akım altında voltajının salınmasına neden olacaktır. Örneğin voltaj salınımları Şekil 71'de gösterilen EXA Agilent Technologies marka bir spektrum analizörü tarafından algılanmaktadır. 26 GHz 'e kadar sinyalleri tespit edebilen yüksek hassasiyetteki bu cihaz içerisinde bir analog dijital çeviricisi ve Windows işletim sistemi üzerinde çalışan bir sinyal analizi programı bulunmaktadır. Zaman uzayındaki sinyali frekans uzayına çevirerek belirli bant aralığındaki sinyali dijital olarak kaydedebilmektedir. Sinyalin gücünü istenilen birimde (dB, dBm, mV) görüntüleyebilmektedir.

Voltaj salınımlarının çok küçük olması durumunda sinyali yükseltici bir RF yükselteç de ölçüm sistemine eklenmiştir. İtalya tarafında yapılan simülasyonlarda 100 mT'lık 25 psn manyetik alan darbeleriyle tetiklenen anti-vorteks dinamiklerinin 100- 400 MHz arasında bir salınıma yol açtığı kaydedilmiştir. Bu bilgiler ışığında ölçülecek sinyalin spektrum analizörün

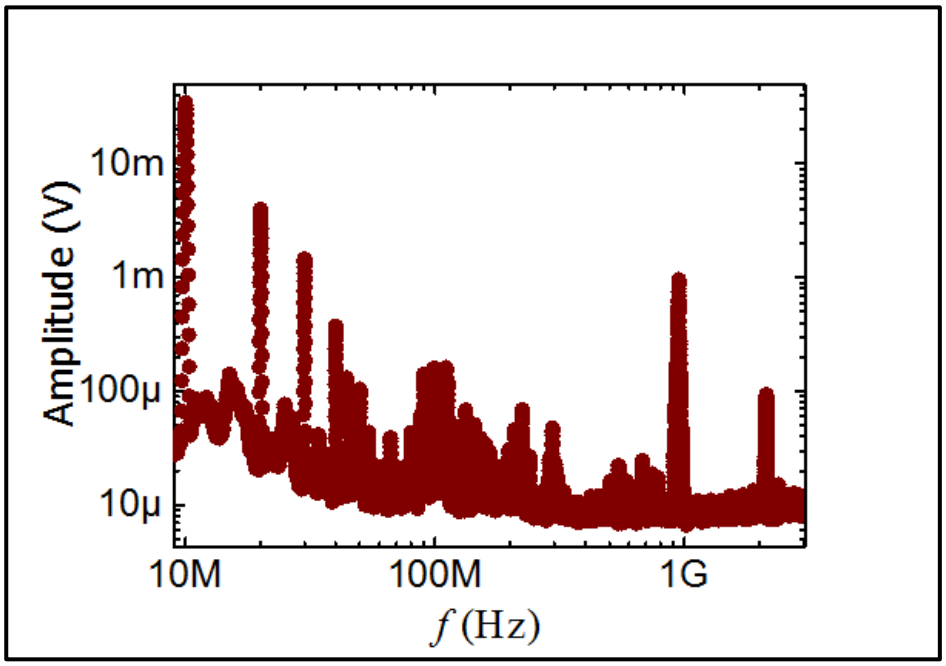


Şekil 72 Frekans uzayında sinyal analizi yapan ve kaydeden Labview programı

gürültü seviyesinin üstünde olabilmesi için 9 MHz-3 GHz arası sinyalleri 50 kat arttıran bir yükselteç temin edilmiştir. Yüksek frekans ölçümlerini tespit edebilmek adına spektrum analizörünü GPIB ile kontrol eden bir frekans uzayı tarayan ve pik sinyalleri tespit eden arkafonla beraber bu bilgileri kaydeden bir Labview programı yazılmıştır. Bu programla taranan frekans aralığının çözünürlüğü ve sinyal bant genişliği kolayca ayarlanabilmektedir. Bu şekilde veriler gerçek zamanda kaydedilmektedir.

Test deneyleri için 10 mV büyüklüğünde 10 MHz bir test sinyali örnek yerine bağlanan 50 Ω bir test direncinden geçirilerek sistemin kalitesi test edilmiştir. Şekil 71'de osiloskop ekranında test sinyali ve bu sinyalin yükseltilmiş hali görülmektedir. Aynı sinyal spektrum analizöründe frekans uzayında incelenmektedir. Spektrum analizörü bu sinyali 50 mV mertebesinde 10 MHz'de bulmuş ve çizgi eni 1 Hz kadar küçük çıkmıştır.

Örnekten gelen sinyali gürültü sinyalinden ayırt etmek adına bu kez 50 Ω bir test direncinden DC akım geçirilmek suretiyle buna ek olarak DC güç kaynağı bağlı iken kısa devre edilmiş prob bağlantısı üzerinden arkafon sinyali kaydedilmiştir. Şekil 73 yapılan bir test ölçümünü göstermektedir. 10 mV'luk sinyal burada net bir şekilde görülmektedir. 9 MHz ile 3



Şekil 73 10 MHz test sinyali ve tüm frekans uzayındaki voltaj salınımları

GHz arasındaki sinyalleri gösteren bu grafikte dikkat çeken şey, 10 µV mertebesinde beyaz bir gürültü fonunun üstünde mV seviyesine çıkan çok çeşitli piklerin bulunmasıdır. Radyo dalgaları,kablosuz ağ sinyalleri ve cep telefonu sinyalleri örnekten gelmesini beklediğimiz bu frekans aralığını doldurmakta ve gürültü fonunu oluşturmaktadır. İlk ölçümlerde örnekten gelen sinyaller bu arka fon gürültüsünde kaybolmuştur.

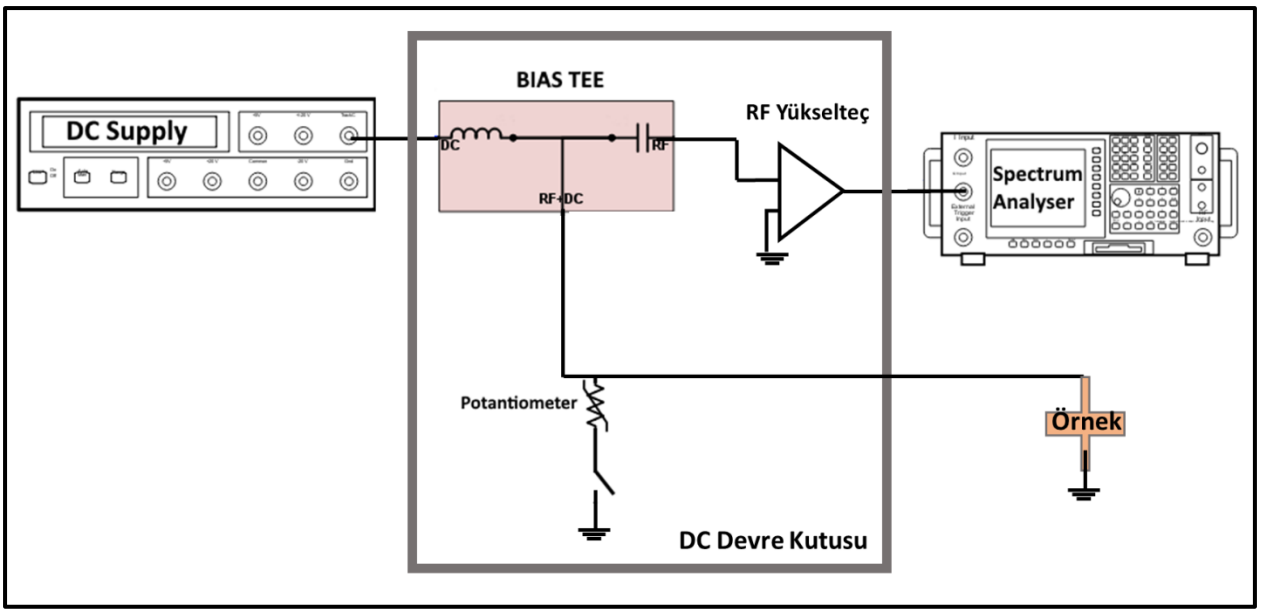
Arka plan gürültüsünün iyileştirilmesi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmaları bazı başlıklarda toplayabiliriz:

- Topraklamalar gözden geçirilip toprak akım döngüleri engellenmesi bu çalışmalardan biri olmuştur. Kullanılan cihazların aynı toprağa bağlı olması ve bu toprakların arasında uzun kablolamaların olmamasına dikkat edilmiştir. Devre kutusunun dışı alet rafının toprağından ayırılmıştır. DC güç kaynağı havada toprak bağlantısı moduna alınmıştır.
- DC ölçüm devresi AC ölçüm devresi kutusundan ayırılmıştır ve SMA konektörleri toprağı tek noktadan almaları üzere izole SMA bağlantılarına çevrilmiştir.
- Devre kutularında kullanılan lehimler kurşunsuz lehim ile değiştirilmiştir ve kablo olarak eski SMA kabloların iç malzemesi kullanılmıştır.
- Yükselteç devre kutusunun içine yerleştirilmiştir.

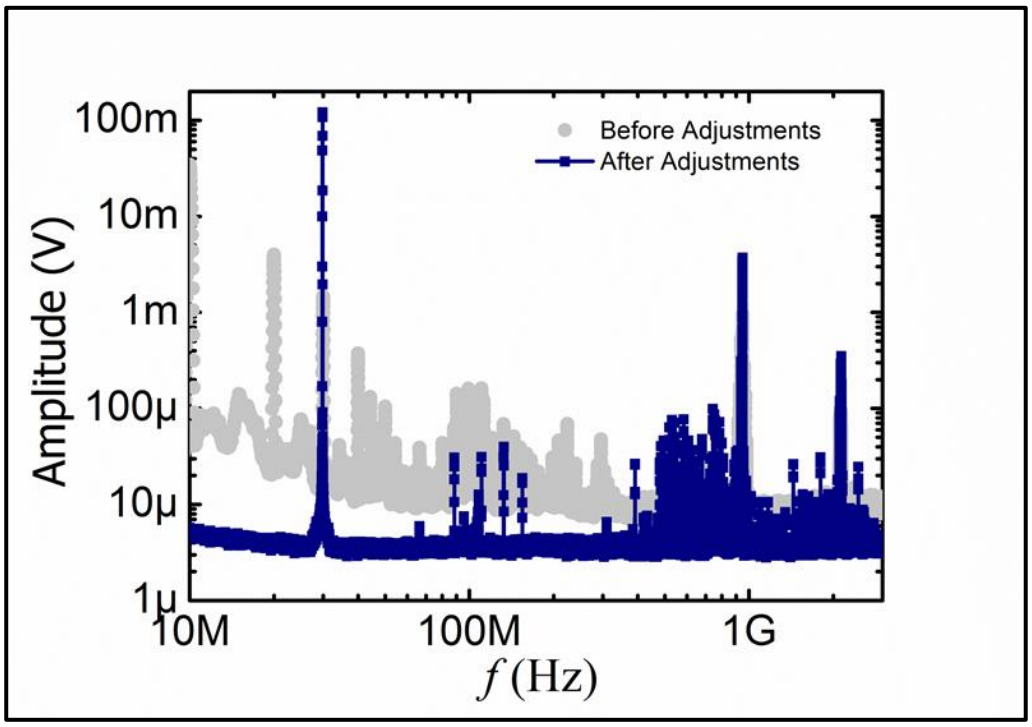
- Lehim sayısı azaltılıp daha çok SMA adaptör bağlantılar kullanılmıştır. Bunlar elektrik bantları ile devre kutusunun iç yüzeyine sabitlenmiştir. SMA bağlantılarının içleri altın tozlarından rutin olarak arındırılmış ve izopropanol ile temizlenmiştir.
- En önemlisi de DC güç kaynağından gelen gürültü sinyalinin bir bias Tee kullanılarak filtrelenmesi tedbiri olmuştur. Bias tee devre kutusunun içinde ancak lehimsiz bağlantılarla kullanılmıştır.

Şekil 74'de bu tedbirler sonrasında yapılan bağlantı şeması gösterilmektedir. Devre kutusunun içine yerleştirilmiş "bias tee" ile DC kaynak bir indüktöre bağlanmıştır. AC salınımları engelleyen bu indüktör sadece DC akımın geçmesine izin verir. RF ucunda da bir kapasitöre bağlı yükselteç ve spektrum analizörü (kapasitör sabit akımı geçirmeyeceğinden) yüksek DC sinyallerden korunmaktadır.

Bu iyileştirmeler sonrasında Şekil 74'de gösterilen ölçüm düzeneği ile alınan arka fon gürültüsü Şekil 75'de gösterilmektedir. Yine 50 Ω'luk bir test direncinden 2 mA DC akım altında 30 MHz bir test sinyali geçirilmiştir. Şekil 75'de gri noktalarla önceki arkafon gürültüsü lacivert karelerle belirtilen düzenlemeler sonrası arkafon gürültüsü ile kıyaslanmıştır. Yüzlerce μV mertebesinde ve pek çok pik barındıran gürültü fonu 3.5 μV seviyesine inmiş ve MHz mertebesindeki pek çok pik kaybolmuştur.



Şekil 74 Yüksek frekans ölçüm bağlantılarının şematik çizimi



Şekil 75: Radyo Frekansındaki sinyalleri tespit ettiğimiz ölçüm düzeneğinde alınan 30 MHz lik bir test sinyalinin spektrumu lacivert karelerle gösterilmektedir. Bu ölçümde kaydedilen elektronik gürültü ilk raporda bildirilen gri dairelerle çizilmiş gürültüye kıyasla daha küçüktür.

3.2.3.5. Sıcaklığa Bağlı Ölçüm Düzeneği

Düşük sıcaklıklarda elektriksel ölçümler gerçekleştirmek adına önceki bölümlerde tanıtılan AC direnç ve yüksek frekans ölçüm düzeneği PPMS sistemine entegre edilmiştir. PPMS'in Labview programı ile kontrol edilebilmesinden faydalanılarak yazılan programlar PPMS için tekrar düzenlenmiş ve manyetik alanın yanı sıra sıcaklık değişimleri yazılıma eklenmiştir. Sistemin genel görüntüsü Şekil 73'de sunulmuştur. PPMS örnek çemberinin içinde örnek haznesine pak yani "puck" denilen örnek tutucular özel bir çubuk yardımı ile yerleştirilir. Burada puck soketinden çıkan kablolar çemberin üst tarafında bulunan 14-pinli bir "Lemo" bağlantısına gelir.



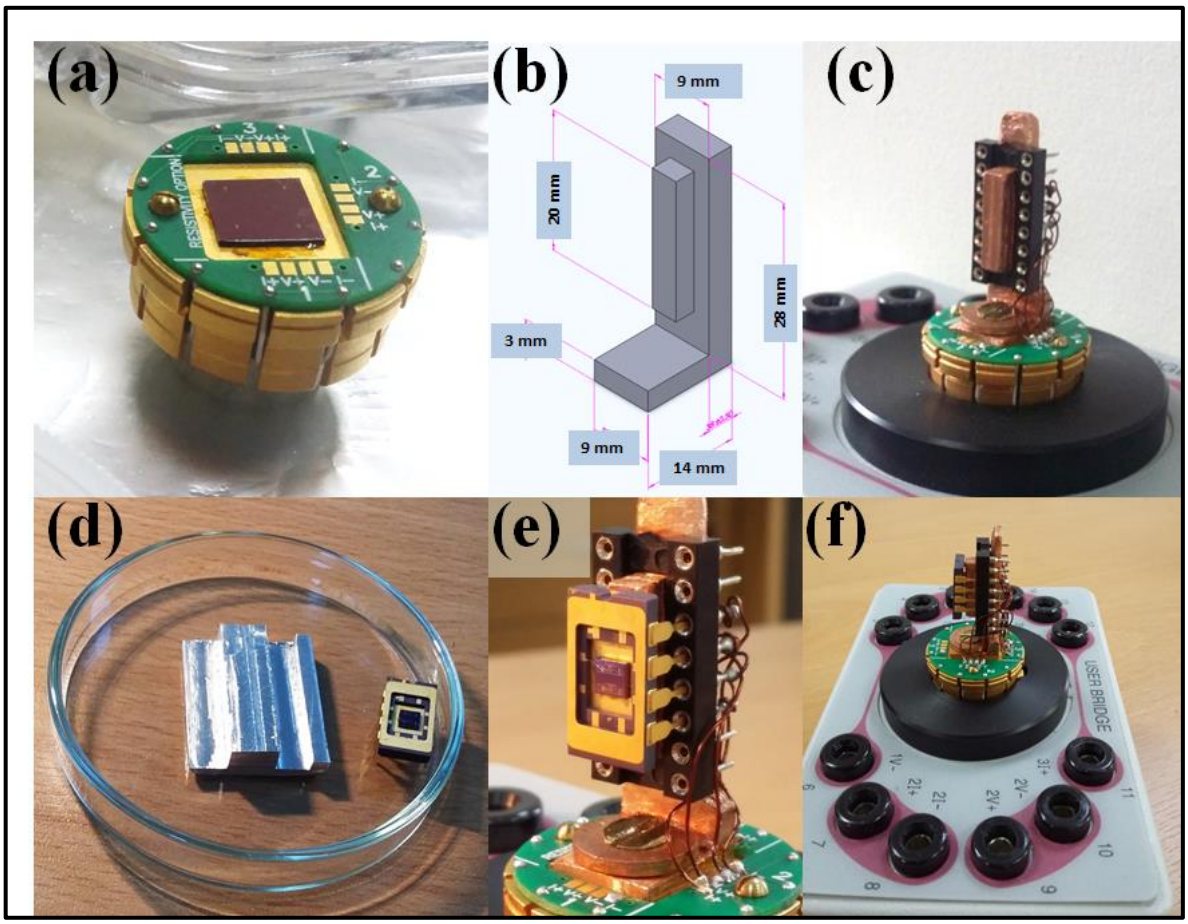
Şekil 76 PPMS'e entegre edilmiş elektriksel ölçüm düzeneği PPMS kontrol bilgisyar ünitesi, örnek çemberi ve cihaz sisteminden oluşur



Şekil 77 Lemo kablosunun bağlı olduğu anahtar kutusu ve PPMS'e ve cihaz sistemine bağlı görüntüsü

14 pinli Lemo bağlantısı ile kendi tasarladığımız ölçüm düzeneği PPMS için de kullanılabilmiştir. Temin edilen lemo kablosu yine kurşunsuz lehim ile SMA konektörler içeren bir anahtar devre kutusuna monte edilmiştir. Şekil 77'de gösterilen anahtar kutusu 4 farklı kanalı SMA konektörlerine dönüştürmekte ve bu sayede örneklerde iki-problu veya dört-problu ölçümler yapılmasına imkan sağlamaktadır.

Pak örnek tutucularına bir örnek Şekil 78'da gösterilmiştir. Çipler düşük sıcaklıklarla uyumlu GE Varnish ile pak ortasındaki altın kaplı alan üzerine yapıştırılmıştır. Wire-bonding yöntemi ile kenardaki pinlere bağlanan kontak noktaları lemo konektörü üzerinde ilgili pinlere oradan da anahtar kutusundaki SMA konektörüne bağlanır. Anahtar kutusu üzerinde iki ayrı örnek üzerinde manyetik alana dik veya paralel akım uygulanabilecek şekilde düzenlenmiş

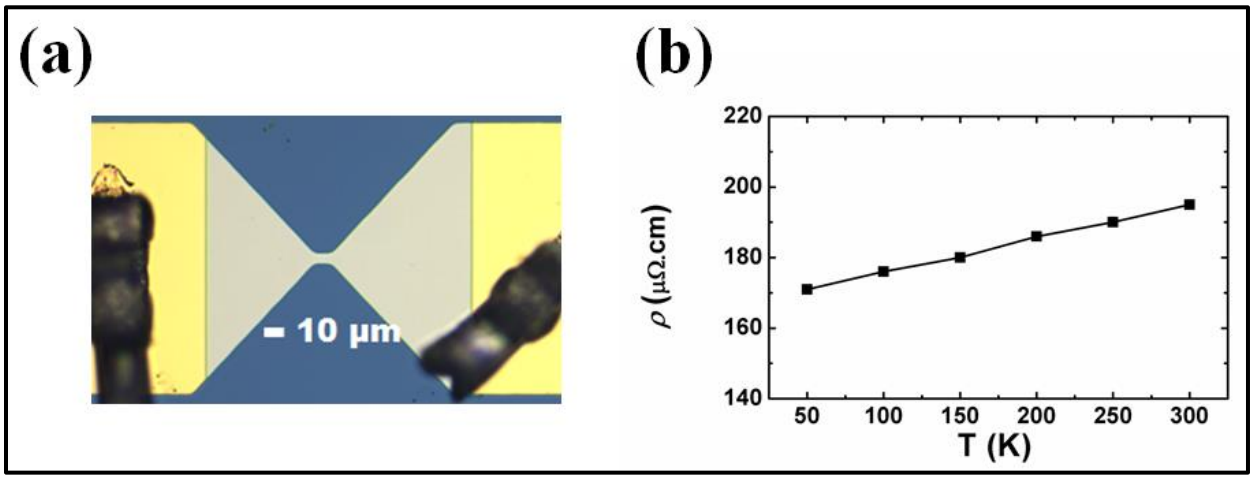


Şekil 78 PPMS örnek tutucusu (a), bunu düzlem içi manyetik alan sağlayacak biçime dönüştürecek tutucu ayak tasarımı ve tutucu ayağın (b)için hazırlanan yonga tutucu düzenek

işaretler görünmektedir. Ancak bunun için manyetik alanın yüzeye paralel olması gerekmektedir. PPMS içindeki alan çember boyunca yüzeye dik bir şekilde hizalıdır. Skyrmion bazlı aygıtlarda bu yeterli olsa da astroid aygıtlarında yapılan ölçümlerde yüzeye paralel uygulanacak manyetik alanlara da ihtiyaç duyulacağından yeni bir pak tasarlanması gerekmiştir. Bunu için çizimleri Şekil 78b'de gösterilen bir dik tutucu ayak tasarlanmış ve kriyojenik sıcaklıklarda ısıl çekmesi çok az olan bakırdan atölyemizde imal edilmiştir. Tutucu ayak Şekil 78c'deki gibi bakır bir vida ile PPMS pakı üzerine montelenmiş ve üzerine bir IC konektör GE Varnish ile yapıştırılmıştır. Bu tasarımın avantajı, IC konektörün orta kısmından uzanan bakır parçasının IC-tipi seramik çip taşıyıcısının tabanına değmesi ve termal iletim sağlamasıdır. Bu durumda pak zeminindeki sıcaklık sensörünün okuduğu değer ile örneğin gerçek sıcaklığı arasındaki fark en aza inmiş

olacaktır. Şekil 78'de örnekleri IC konektöre monte edebileceğimiz 8-pinli seramik çip taşıyıcısı görülmektedir. Aynı resimdeki (Şekil 78d) Alüminyum parça, çip taşıyıcılarını wire-bonding sistemine entegre etmeye yardımcı olacak bir zemin olarak yine atölyede üretilmiştir. Şekil 78e wire-bonding ile elektriksel bağlantı yapılmış çip taşıyıcısının paka monte edilmiş halini göstermektedir. Bu pak gösterildiği şekilde PPMS içine takılmaktadır. PPMS bağlantılarını taklit eden PPMS test düzeneği Şekil 78'de gösterilmiştir. Bu düzeneğe takılan pak, elektriksel bağlantıları için test edilmiştir ve testler başarılı olmuştur. Paklar üzerindeki pinlere wire-bonding ile kısa devre yapılarak elde edilen kontak direnci 0,75 Ω bulunmuştur. Problemin UPS sistemine bağlı bulunan PPMS şasesinin düzgün topraklı olmadığından kaynaklandığı tespit edilmiş ve şase ayrı bir toprak hattıyla topraklanmıştır.

Sıcaklığa bağlı ölçümlerin test edilmesi hem de Py malzemesinin öz direncinin tespit edilmesi için papyon şeklinde fotolitografi ile desenlenmiş Py mikro-telleri kullanılmıştır. Şekil 79a'da optik mikroskopla çekilmiş altın kontaklar üzerine wire-bond edilmiş papyon desenleri görülmektedir. Buradaki mikrotelin uzunluğu 10 μm ve genişliği 6 μm'dir. Bu papyonlar üzerinde yapılan AC direnç ölçümleriyle öz direnç 197 μΩ.cm olarak hesaplanmıştır. Sıcaklığa bağlı direnç ölçümleri Şekil 78b'de gösterilmiştir. Sıcaklıkla azalan bir direnç görülmektedir burada. Bu ölçüm ile pak düzeneklerinde kullanılan malzemelerin ve bağlantıların düşük sıcaklığa dayanıklı olduğu ve düzgün çalıştığı da doğrulanmıştır. Ayrıca yapılan yüksek frekans sinyal tespiti test ölçümlerinde yeni kablo sistemiyle oluşan arkafon gürültüsünün yine 3.5 μV seviyesinde yani düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 79 (a) Py ince filminden üretilmiş papyon desenli aygıt ve Au elektrotlar üzerine wire-bond tekniğiyle yapılmış bağlantılar (b) sıcaklığa bağlı öz direnç ölçümü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Projenin hedefleri doğrultusunda antivorteks yapılarına elverişli astroid şekilli nano-mıknatısların, bu nano mıknatıslarda SHE ölçümlerine elverişli aygıtların ve skyrmion yapılarına elverişli yüksek spin yörünge etkileşimli nano-sütunların ve dimaiklerinin tespit edilebileceği nano-ayıgtların Mikromanyetik modellemeleri tamamlanmış, aygıtların üretimi için ince film büyütme ve karakterizasyonu yapılmış, nano-aygıt üretim prosedürleri optimize edilmiştir. Aygıtların ölçümü için gerekli elektriksel ölçüm düzenekleri kurulmuştur. Bu durumda 1., 2., 3., 4., 6., 7. İş paketleri ve 9. İş paketinin birazı tamamlanmıştır.

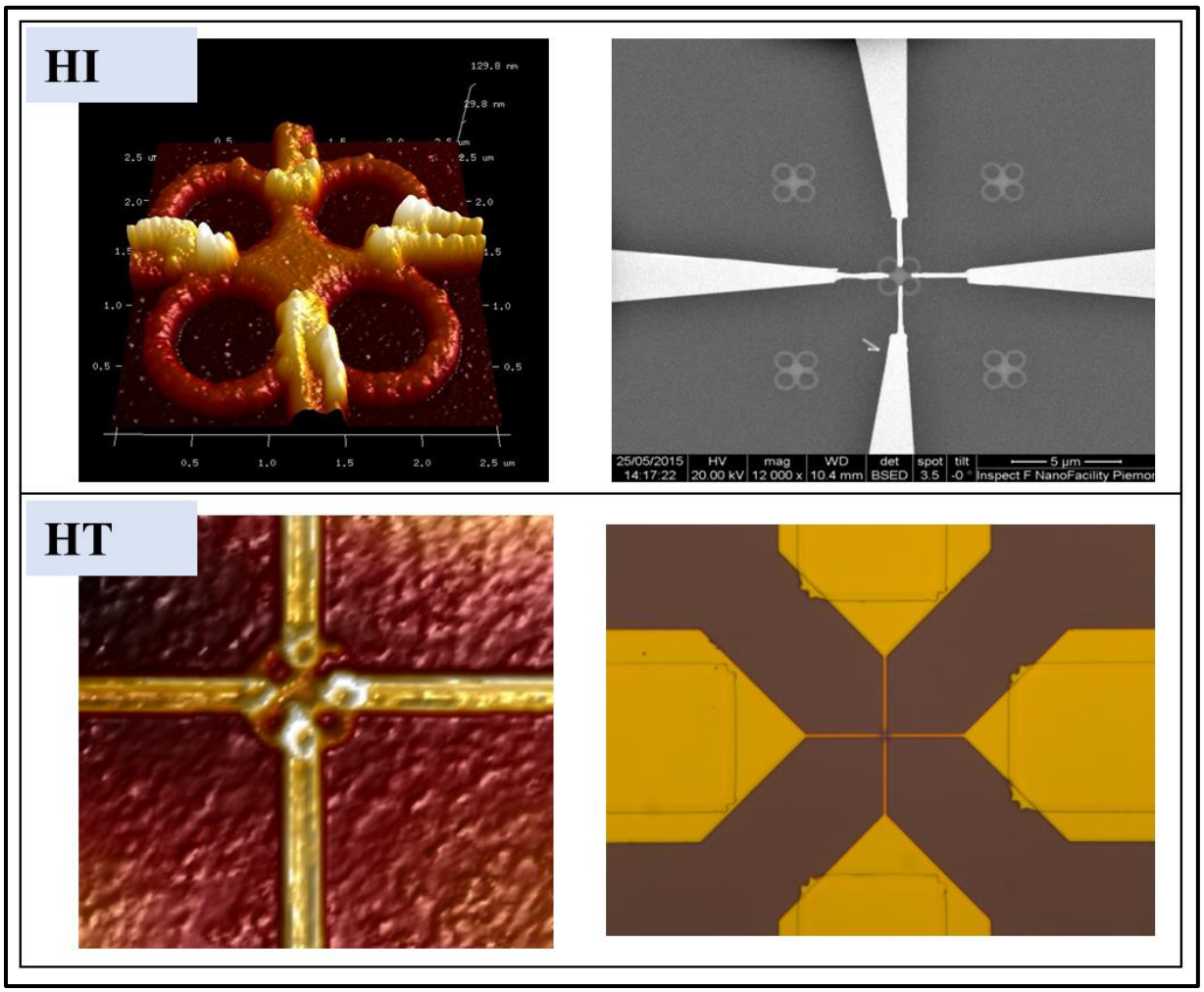
Bu bölümde astroid aygıtlarında elektriksel ölçümleri kapsayan 5. İş paketi, 9. Ve 10. İş paketleri ayrıca skymion bazlı aygıtlarda manyetik karakterizasyonu içeren 8. İş paketi ve elektriksel ölçümleri kapsayan 10. İş paketi anlatılmaktadır.

4.1. Astroid Nano-mıknatıslarının Statik ve Dinamik Özellikleri

1. iş paketindeki vorteks benzeri mikromanyetik yapıların modellenmesi sonrasında 2. ve 3. iş paketi kapsamında astroid şekilli nano-mıknatıslar ve elektriksel ölçümler için aygıtlar üretilmiştir. Bu astroid aygıtları aynı zamanda 10. iş paketinde hedeflenen Spin Hall Etkisi ölçümleri kapsamında 7. iş paketinde belirtilen yüksek spin yörünge etkileşimli Ta malzemesi üzerine üretilmiştir. Astroid şekilli nano-mıknatıslar lift-off yöntemi ile Py malzemesinden üretilmiştir. Elektriksel bağlantıların konulması aşamasında iki tip örnek hazırlanmıştır: M-tipi'nde astroitten uzayan Py kollar üzerine metal elektrot büyütülmüştür ve H-tipi'nde hizalamalı elektron demet litografisi ile ara bir metal elektrot basamağı kullanılmıştır. H tipi örnekler İtalya tarafında Tiberto gurubu tarafından (HI); H ve M tipi örnekler Türkiye tarafında (HT ve MT) üretilmiştir. Son olarak Spin-Hall tipi örnekler üretilmiştir, SHE.

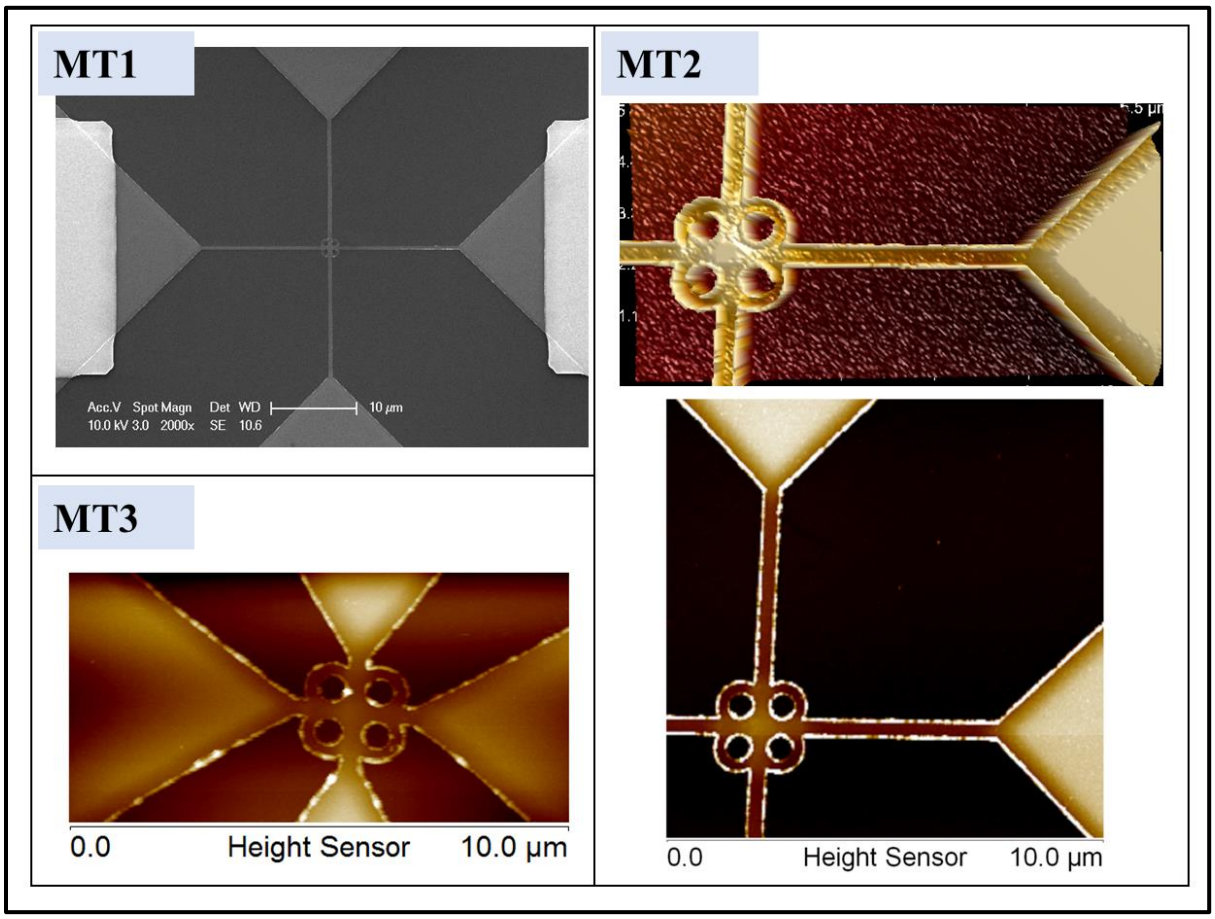
Tablo 4 Üretilen Örneklerin

Örnek	Py kalınlığı	Örnek	Py kalınlığı
HI1	60 nm	**MT1**	30 nm
HI2	15 nm	**MT2**	30 nm
HI3	30 nm	**MT3**	64 nm
HT	30 nm	**SH1**	5 nm



Şekil 80 Üretilen H-tipi astroid aygıtları

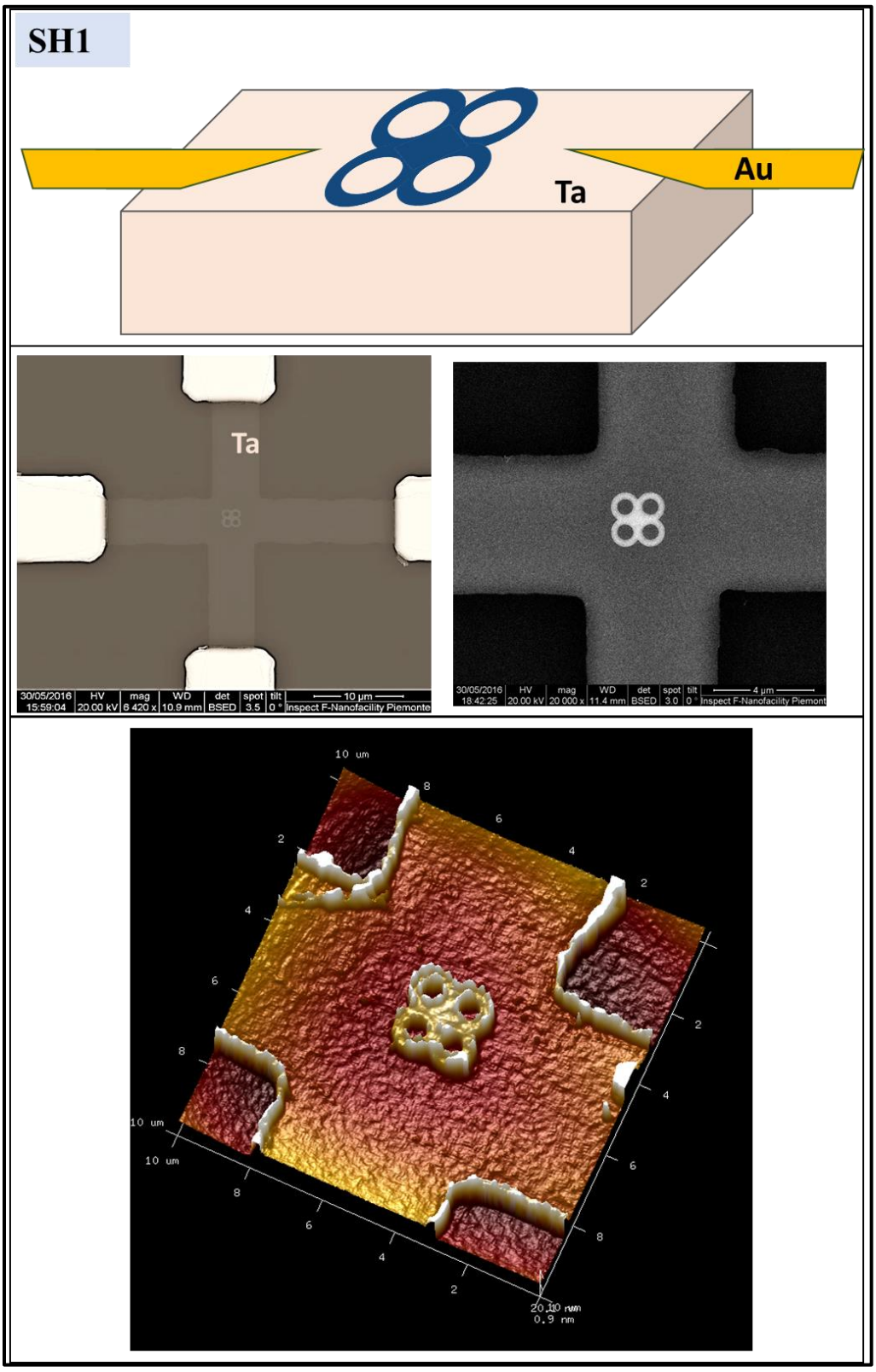
Üretilen H tipi örnekler Şekil 80'de gösterilmiştir. AKM ve SEM görüntüleri gösterilen örnekler çeşitli Py kalınlıklarına sahiptir, Tablo 4. İlk yapılan HI-1 örnekleri Cu elektrotlarla üretilmiştir. Cu oksitlendiğinden elektriksel bağlantılar mümkün olmamıştır. HI-2 örneklerinde Au elektrotlara geçilmiştir. Ancak bu örneklerin üretiminde fotolitografi basamağı öne alınmış, kalınlıklar düzgün ayarlanamamış ve kontak noktalarında kopukluklar olmuştur. Bu deneyimler ışığında üretilen üçüncü set örneklerde, HI-3, 80 nm Au iç elektrotlar ve 150 nm Au dış elektrotlar kullanılmıştır. İyon aşındırması ile temizlenen yüzeylere elektrot büyütülmüştür. HT örnekler de benzer bir şekilde üretilmiştir. Bu durumda başarılı elektriksel ölçümler HI-3 ve HT örneklerinde yapılmıştır.



Şekil 81 Üretilen M tipte Astroid aygıtları

AMR sinyalini arttırmak ve direnci düşürmek adına farklı tasarımlar da denenmiştir. Au iç elektrotlar yerine astroitten uzayan kollar denenmiştir. M-tipi olarak adlandırılan bu örnekler Şekil 81'da AKM ve SEM görüntüleri ile sunulmuştur. Çeşitli direnç aralıklarında olan bu örneklerde hem MKM görüntülemesi hem de elektriksel ölçümler yapılmıştır.

Son olarak Spin-Hall Etkisi (SHE) ölçümleri için SH1 aygıtları üretilmiştir. Şekil 82'de şematik çizimi ve üretim sonrası SEM ve AKM görüntüleri gösterilen bu aygıtlarda yüksek spin yörünge etkileşimli Ta elektrotlar üzerine Py astroidler üretilmiştir. 10 nm Ta kollar lif-off yöntemi ile üretilmiş, üzerine hizalamalı elektron demet litografisi ile astoritler desenlenip 5 nm Ta, 5 nm Py ve 5 nm Au kapak katmanı büyütülmüştür. Fotolitografi yöntemi ile yapılan elektrotlar Şekil 82'de gösterildiği gibi Ta kollara bağlantı yapmaktadır. Bu kollardan geçirilen akımın SHE ile Ta'da yüzeye dik bir akım oluşturur. Bu akım SH1 örneklerinde mıknatıslanma dinamiklerini tetikleyici bir etki yaratmak üzere değerlendirilmiştir.



Şekil 82 SH1 örnekleri

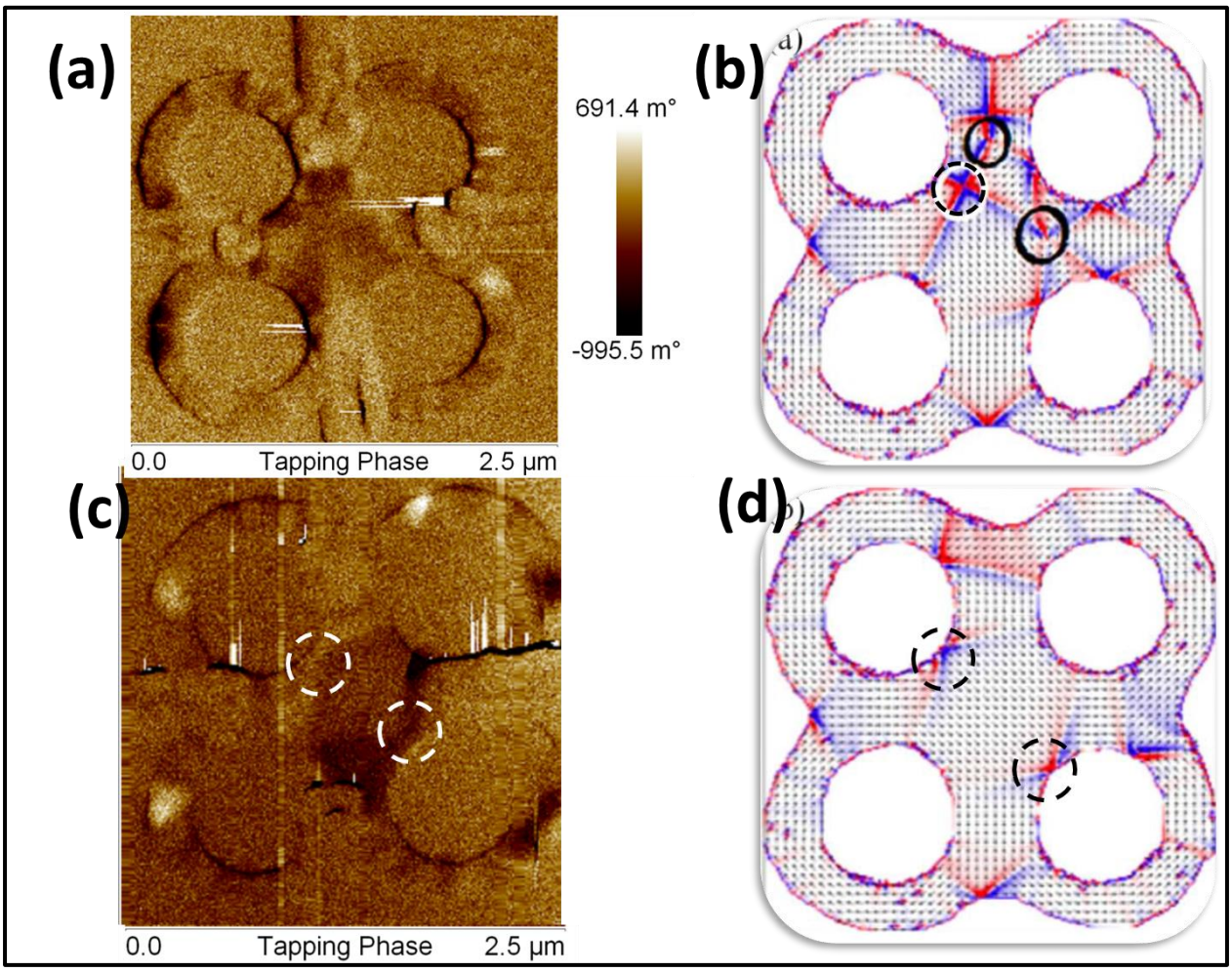
4.1.1. Manyetik Karakterizasyon

Üretilen örnekler manyetik anti-vorteks yapılanmaları gözleyebilmek adına MKM ile incelenmiştir. Düşük momentli MESP-LM manyetik ucu yüzeyden 40 nm yukarıda vurma modunda tarama yapılarak algılanan faz değişimi görüntüleri incelenmiş ve manyetik yapılanma modellemede elde edilen görüntülerle kıyaslanmıştır. Görüntüleme öncesinde örnekler manyetik alan koşullandırmasına tabi tutulmuştur.

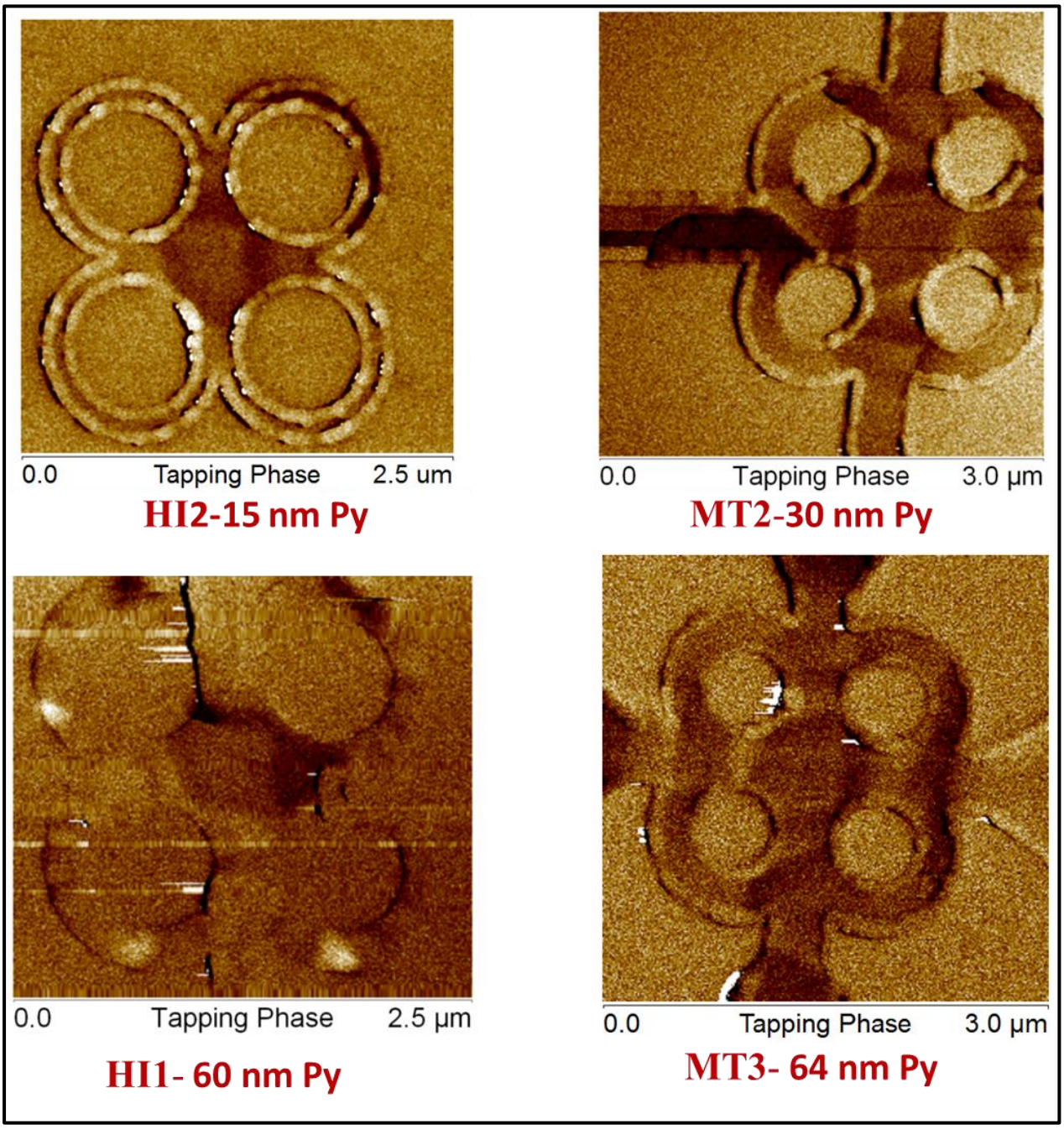
Şekil 83'de astroid aygıtlarının MKM görüntüleri aynı manyetik alan koşullandırmasında yapılan modelleme ile yan yana konulmuştur. Şekil 83a ve b'de astroidler 800 mT büyüklüğünde ve 50 mT basamaklarla azalan AC manyetik alanda mıknatıslanmaları giderildikten sonra oluşan mıknatıslanma konfigürasyonu gösterilmektedir. MKM görüntülerindeki kontrast değişimi modellemede kırmızı-mavi tonlarla belirtilen bölgeleri işaret etmektedir. Astroid merkezinin etrafında bir anti-vorteks (kesik çizgiyle daire içine alınmış bölgeler) ve birkaç vorteks görülmektedir (siyah daireler).

Şekil 83c ve d bu astoridlere düzleme dik 800 mT'lık bir manyetik alan uygulanması sonrası çekilen MKM görüntüsünü ve buna karşılık gelen modellemeyi göstermektedir. İlk resimde olan vorteksler manyetik alan uygulaması sonucu kaybolmakta ve manyetik alanın kapatılmasıyla merkezin çevresinde iki karşılıklı anti-vorteks oluşumu belirmektedir. Anti-vortekslerin merkez bölgeleri görüntülerde siyah ve beyaz kesikli çizgilerle daire içine alınmıştır. Astroidin orta bölgesinde çapraz şekilde yer alan anti-vorteksler orta bölgede köşegene doğru bir mıknatıslanma yönelimi oluşturmaktadır. Bu yönelim MKM görüntülerinde orta bölgede karşılıklı iki "V" şekli oluşturmaktadır.

Aynı alttaş üzerinde farklı astroidlerde de aynı yönelim kaydedilmiştir. Bu anti-vorteks çiftinin tutarlı ve stabil olup olmadığını test etmek için örnekler birkaç kez AC manyetik alan uygulaması sonrası düzleme dik bir manyetik alana maruz tutulmuş ve her seferinde orta bölgede Şekil 83c'de beyaz halkalarla belirtilen anti-vorteks çifti gözlenmiştir. Anti-vorteks çiftinin örneğin geometrisindeki hafif oynamalara ve kalınlık değişimlerine bağlı olup olmadığı farklı örneklerin MKM taramaları ile test edilmiştir. Şekil 84'de diğer örneklerin AC manyetik alanda mıknatıslıkları giderildikten sonra 800 mT yüzeye dik manyetik alan uygulandıktan sonraki MKM görüntüleri gösterilmiştir. 15, 30, 60 ve 64 nm kalınlıklarında Py malzemesinden yapılan bu astroidlerin halka boyutları da birbirlerinden biraz farklıdır. Her bir astroid çift-V şeklinde anti-vorteks çiftini göstermektedir. Bu da antivorteks yapılarının astroid şekilli nanomıknatıslarda kararlı bir şekilde üretilebildiklerini göstermektedir. Bu yapılarda farklı olan halkalardaki manyetik



Şekil 83 Astroidlerin MKM görüntüleri (a, c) ve aynı manyetik alan koşullandırılmasındaki modellemesi (b, d). MKM'de beklenen kontrast değişiklikleri modelde kırmızı-mavi tonlarla belirtilmiştir. (a) ve (b) astroidler AC manyetik alanda mıknatıslanmaları giderildikten sonra oluşan mıknatıslanma konfigürasyonunu göstermektedir. Astroid merkezinin etrafında bir anti-vorteks (kesik çizgiyle daire içine alınmış bölgeler) ve birkaç vorteks görülmektedir (siyah daireler). (c) ve (d) astroid AC manyetik alan sonrasında düzleme dik bir alanla mıknatıslandıktan sonra manyetik alanın kapatılması sonucunda ortaya çıkan konfigürasyonu resmetmektedir. Beyaz halkalar ve siyah halkalarla gösterildiği üzere manyetik alan koşullaması sonucunda merkezin çevresinde karşılıklı iki anti-vorteks oluşmuştur.

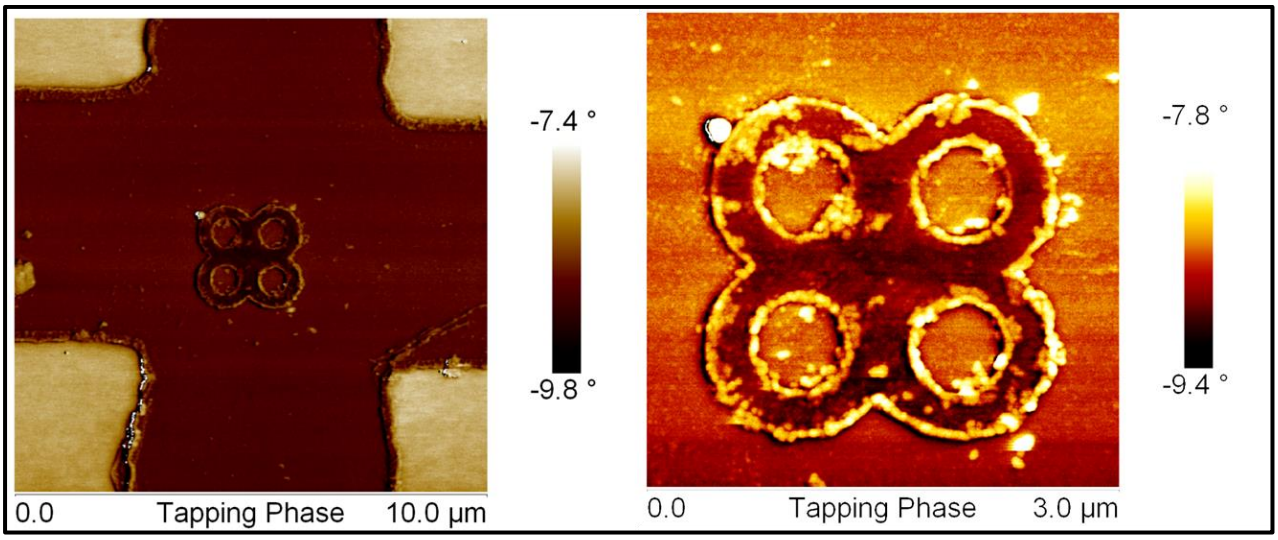


Şekil 84 Farklı örneklerin MKM taramaları

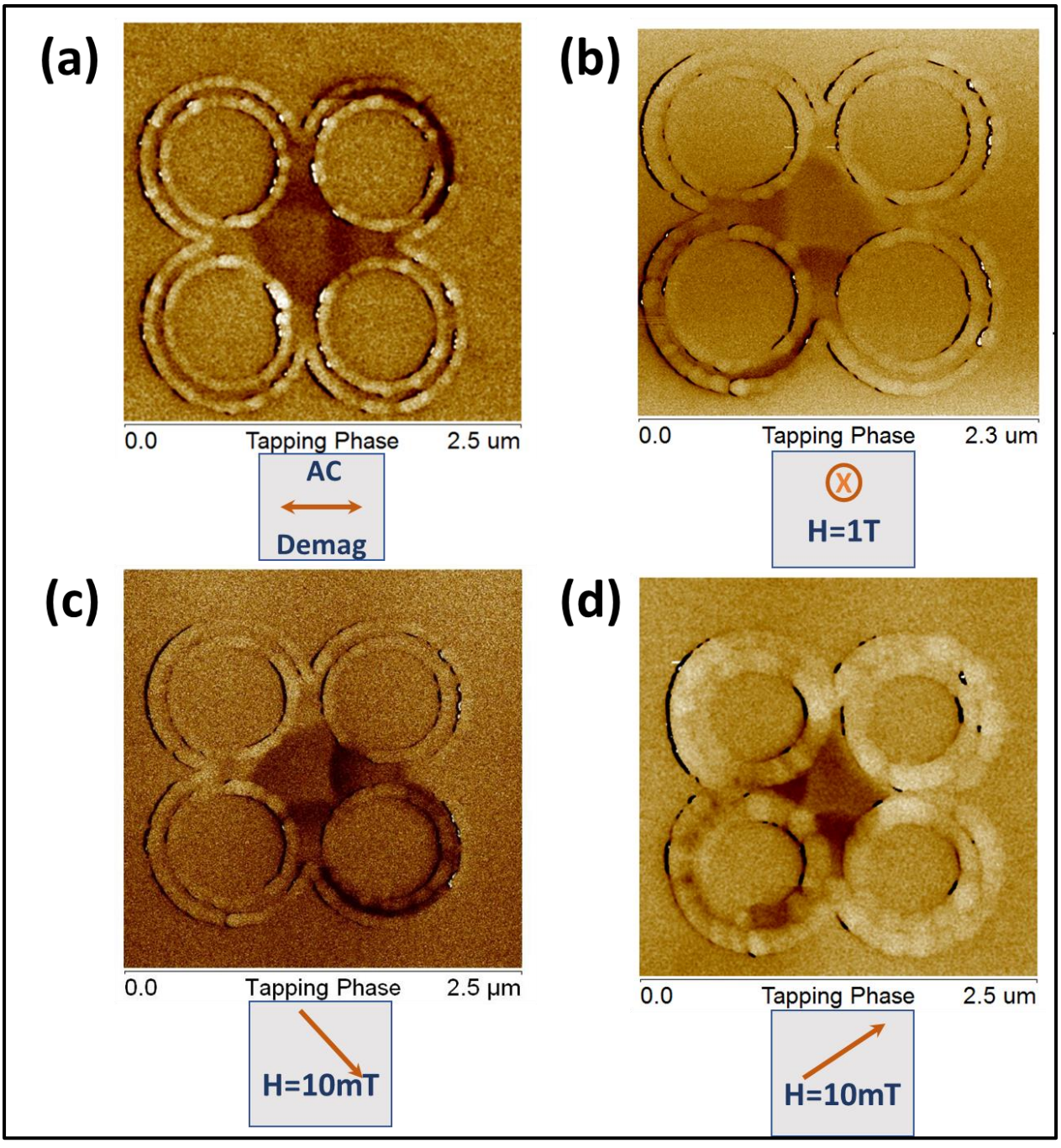
yapılanmalardır. Her ölçümde farklı bir mikromanyetik konfigürasyona sahip olsalar da ortadaki antivorteks çiftlenimine olanak sağlamaktadırlar.

SH1 aygıtlarında yapılan MKM görüntülemeleri Şekil 85'de gösterilmiştir. Bu görüntülerde 5 nm Py'dan gelen manyetik sinyal oldukça az kalmıştır. 10 nm yükseklikte yapılan bu taramada görüntü kontrastı çok açılınca orta bölgede bir karaltı görünmektedir. Bu karaltı "X" şeklindedir. Modelleme görüntüleri ile kıyaslandığında antivorteksin tek başına olduğu bölgede X şeklinde bir kontrast yarattığı görülmektedir (Şekil 83a). Bu da SH1 aygıtlarında orta bölgede tek bir antivorteksin olduğuna işaret etmektedir.

Anti-vortekslerin dinamiklerini incelemeden önce statik davranışları araştırılmıştır. Bu nedenle manyetik alan koşullandırmalarına verdikleri tepkiler MKM ile ölçülmüştür. Şekil 86'de bir astroid'in uygulanan manyetik alan basamakları sonrasında çekilen MKM resimleri sunulmaktadır. Şekil 86a'da AC manyetik alan sonrası mıknatıslığı giderilmiş bir astroid gösterilmiştir. Bu astroidde daha hemen bir anti-vorteks çifti gözlemlenmiştir. Şekil 86a'daki astroid'e düzleme dik 1T bir manyetik alan uygulanıp kapatılması sonucu antivorteks çiftinin yer değiştirdiği kaydedilmiştir (Şekil 86b). Bu aygıta yatayla 45ºC açı yapacak şekilde uygulanan manyetik alanlar sayesinde anti-vorteks çiftinin merkezin etrafında saat yönünde veya tersi yönde döndüğü tespit edilmiştir (Şekil 86 c ve d). Bu kuasi-statik hareketler anti-vorteks çiftinin spin-tork etkisiyle de merkez etrafında döndürülebileceğine işaret etmekte ve elektriksel ölçümlerde bir mikro-dalga salınım hareketinin tespiti için öncül olmaktadır.



Şekil 85 SHE aygıtının MKM görüntüsü



Şekil 86: Bir astroide kutularda belirtilen manyetik alanların a'dan d'ye doğru sırayla uygulanması sonucu oluşan manyetik konfigürasyonun MKM görüntüleri.

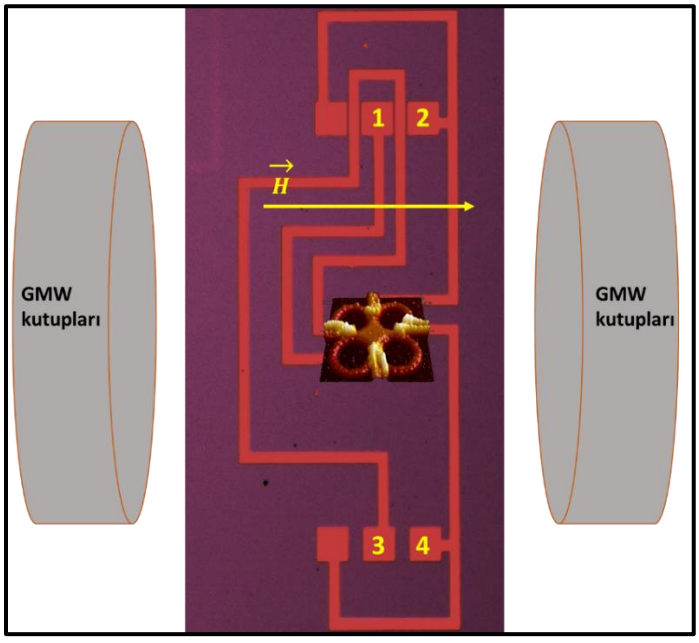
4.1.2. Elektriksel Ölçümler

4. ve 5. iş paketlerinde yer alan astroid aygıtlarında AMR ve yüksek frekans dinamikleri ölçümleri, 9. iş paketinde belirtilen bunların sıcaklığa bağlı karakterizasyonu bu bölümde anlatılmaktadır.

Astroid aygıtlarının üretim basamaklarındaki önceki bölümlerde de belirtildiği üzere aygıtların elektriksel kalitesini de belirlemektedir. Bu nedenle üretilen örneklerden her biri elektriksel ölçümler için uygun olmamıştır. Örneklerin direnç aralıkları Tablo 5'te özetlenmiştir. Elektriksel olarak uygunluğu tespit edilen örnekler GMW ve PPMS sistemlerinde wire-bonding tekniği ile veya prob bağlantıları ile kontak kurularak ölçülmüştür.

Tablo 5 Örneklerin direç aralıkları

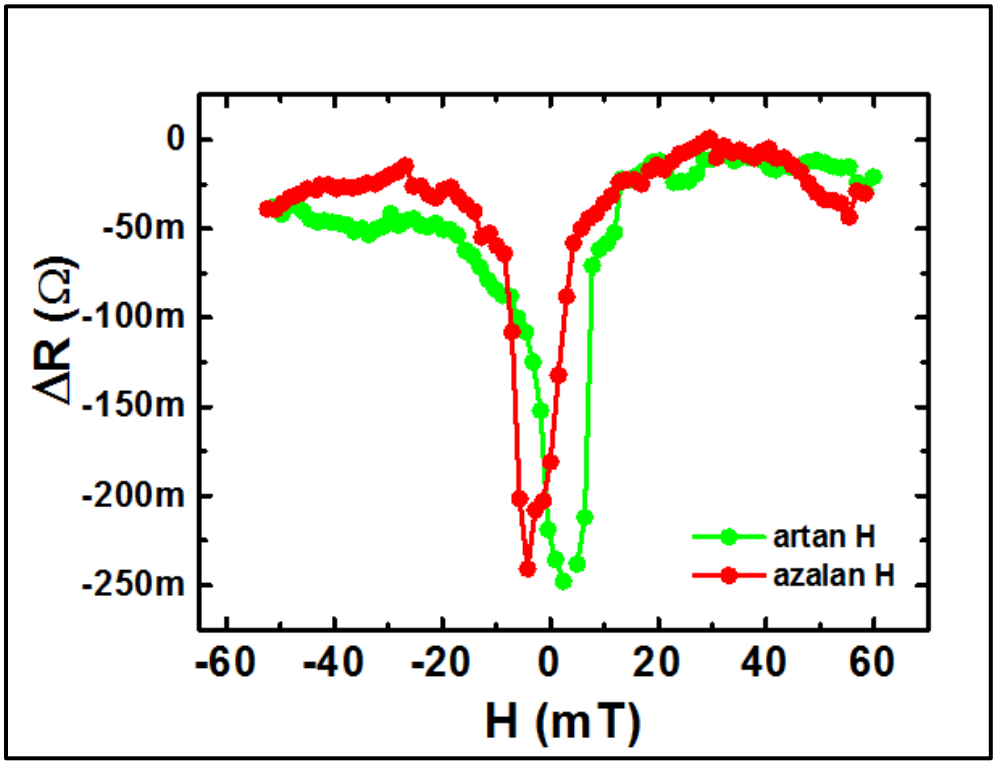
Örnek	Direnci	Örnek	Direnci
HI1	MΩ	**MT1**	700 Ω
HI2	900 Ω	**MT2**	250 Ω
HI3	90-100 Ω	**MT3**	90-100 Ω
HT	85-95 Ω		



Şekil 87 GMW kutupları arasına yerleştirilmiş astorid aygıtı üzerindeki bağlantı noktaları: 1-2 manyetik alana paralel, 3-4 manyetik alana dik akım geçirirler

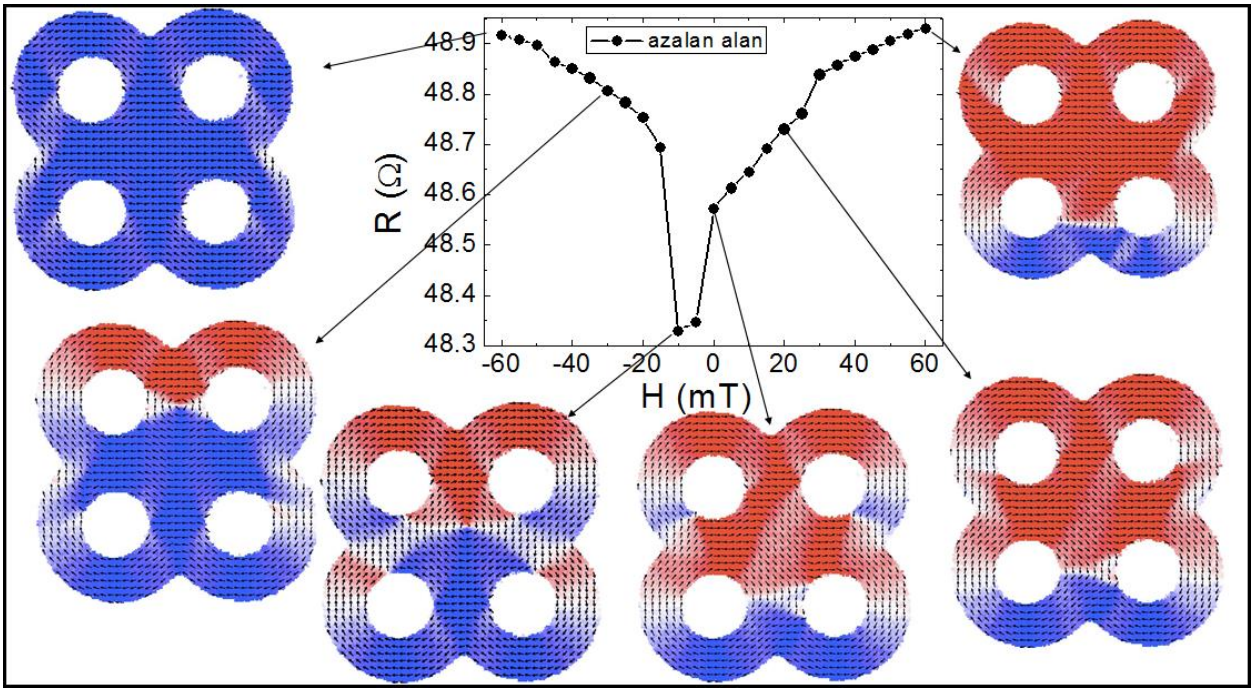
HI-3 örnekleri direnci uygun düzeyde olduğundan elektriksel karakterizasyon için baz alınmıştır. Yapılan ilk ölçümlerde bu aygıtın üzerindeki manyetik alana bağlı direnç değişimi, yani AMR kaydedilmiştir. Örnek GMW elektromıknatısı arasındaki düzeneğe Şekil 87'de gösterildiği gibi yerleştirilmiş ve problar yardımıyla 1-2 nolu yüzeylere bağlantı kurulmuştur. AMR ölçümü öncesinde örnekte antivortekslerin varlığından emin olmak adına astroidlerin AC manyetik alanda mıknatıslığı giderildikten sonra düzleme dik bir manyetik alan uygulanarak antivorteks çifti oluşturumuş, bu yönelimler MKM görüntüleriyle de doğrulanmıştır.

Örnek çift anti-vorteks orta bölgede çapraz konumlanmış iken yani sıfır manyetik alanda direnci 92.75 Ω olarak belirlenmiştir. Akımla aynı yönde 2.5 mT adımlarla arttırılan manyetik alanla doygunlaştırılan astroidin direnci yüksek manyetik alanda 93.03 olarak değişmiştir. AMR ölçümü Şekil 88'de dirençteki değişim olarak çizilmiştir. Toplamda 250 mΩ'luk bir direnç değişimi görülen astroid örnekte manyetik alan eksi değerlerden arttırıldıktan sonra sıfır manyetik alanla ilk değerine ve anti-vorteks çiftinin bulunduğu ilk haline geri dönmüştür. Bu, AMR ölçümü sonrasında alınan bir MKM görüntüsü ile de doğrulanmıştır.



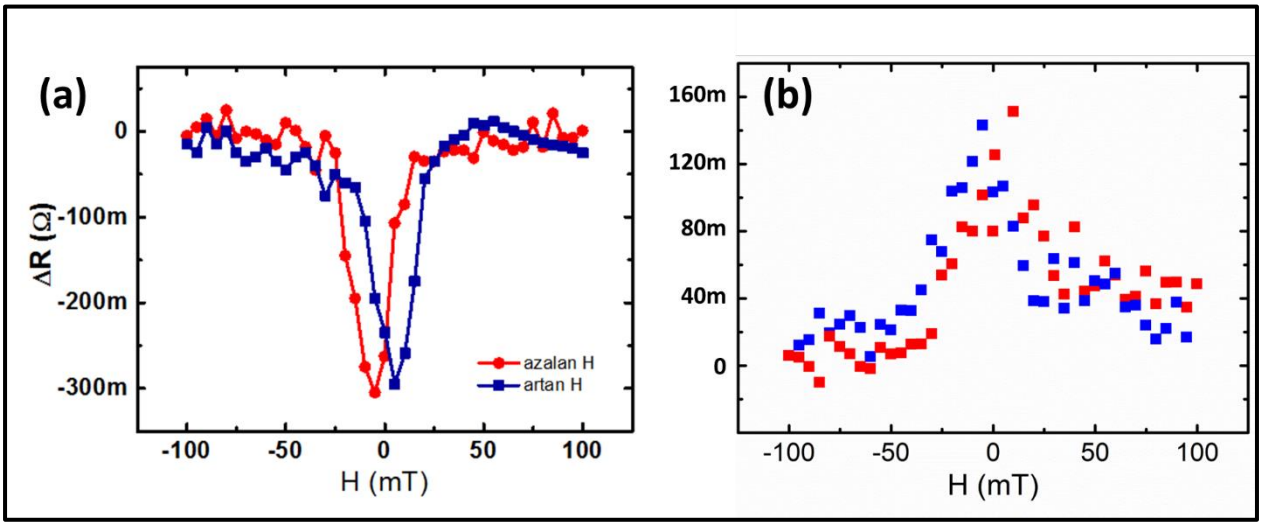
Şekil 88 HI-3 örneklerinden birinde AMR ölçümü

Astroidin geçirdiği mikro-manyetik değişim modelleme sonuçlarında belli olmuştur. Şekil 89 bu boyut ve kalınlıktaki bir astroid için yapılan modellemede hesaplanan direnci ve azalan manyetik alanla değişimini göstermektedir. Direnç değeri deneysel ölçülenden biraz farklılık göstermektedir. Bunun sebebi kontakların kalitesinin gerçekte teorideki kadar kusursuz olmamasından kaynaklanmaktadır. Model sonucunda 600 mΩ'luk bir direnç değişimi beklenirken deneysel veride 250 mΩ'luk değişim gözlenmiştir. Sebepler üzerine istişaremiz devam ederken modellemede kullanılan direnç hesabını ve örneklerin kalınlıklarının yüzeydeki oksit yüzünden 30 nm'den az olduğu gerçeğini değerlendirmekteyiz. Mikromanyetik yönelimlerin manyetik alanla değişimi incelendiğinde (Şekil 89) 60 mT'da hemen hemen doygunluk mıknatıslanmasından sıfır alanda çift antivorteksli konfigürasyona yavaş bir geçiş gözlenmekte ve sıfır manyetik alanın altına inildiğinde antivorteks çiftinin yerini bir vortekse bıraktığı fark edilmektedir. Negatif manyetik alanın artmasıyla bu vorteks yukarı doğru kaymakta ve kaybolmaktadır. Bu vorteks hali çift antivorteksli yönelime göre daha az dirence sahiptir. Bu da deneysel veride görülen sıfır manyetik alanın iki tarafındaki düşük direnç değerlerini açıklamaktadır.

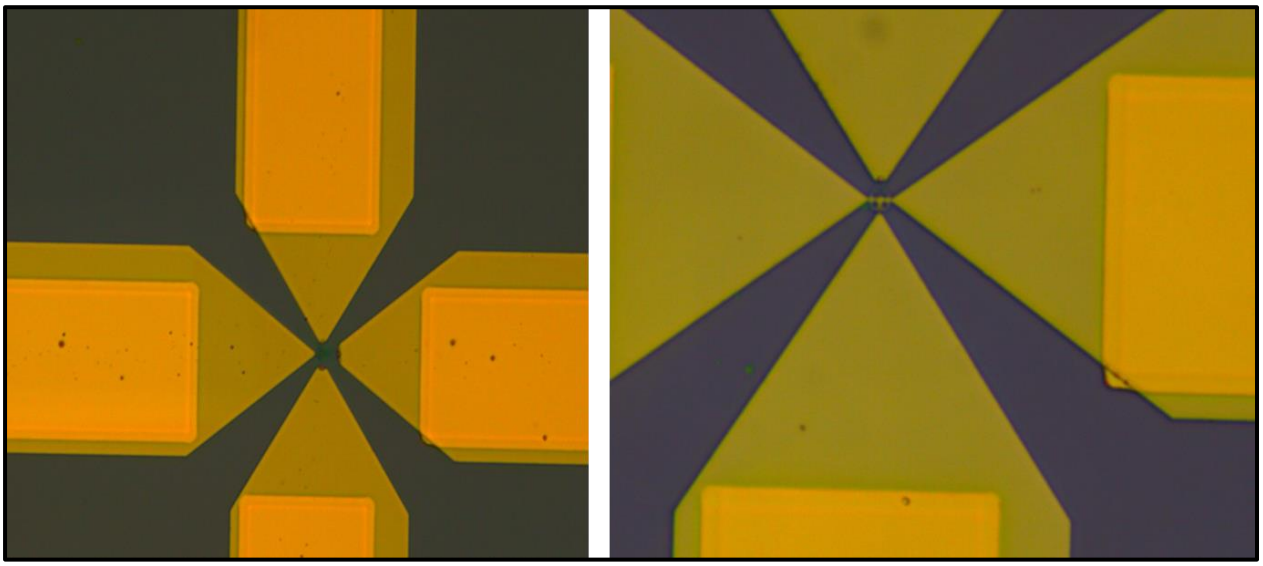


Şekil 89 Mikromanyetik modelleme sonucu oluşan AMR eğrisi ve ve çeşitli alanlardaki manyetik konfigürasyon

Kıyas olarak aynı veya daha düşük direnç seviyesindeki MT3 örneklerinde yapılan AMR ölçümleri Şekil 90'de gösterilmiştir. Daha kalın Py malzemesi bulunan bu örneklerde manyetik alana paralel gönderilen akımda 300 mΩ bir direnç değişimi kaydedilmiştir, Şekil 90a. Aynı örnekte manyetik alana dik uygulanan (bkz. Şekil 87) akımda alınan ölçümler Şekil 90b'de verilmiştir. Burada doygunluk mıknatıslanmasında manyetik alana dik bir akım olduğundan daha düşük bir direnç görülmekte ve sıfır alandaki antivorteks oluşumlarının buna kıyasla 150 mΩ daha fazla dirence sahip olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 90 MT3 örneğinde manyetik alana paralel (a) ve dik (b) gönderilen akımlarda alınmış AMR

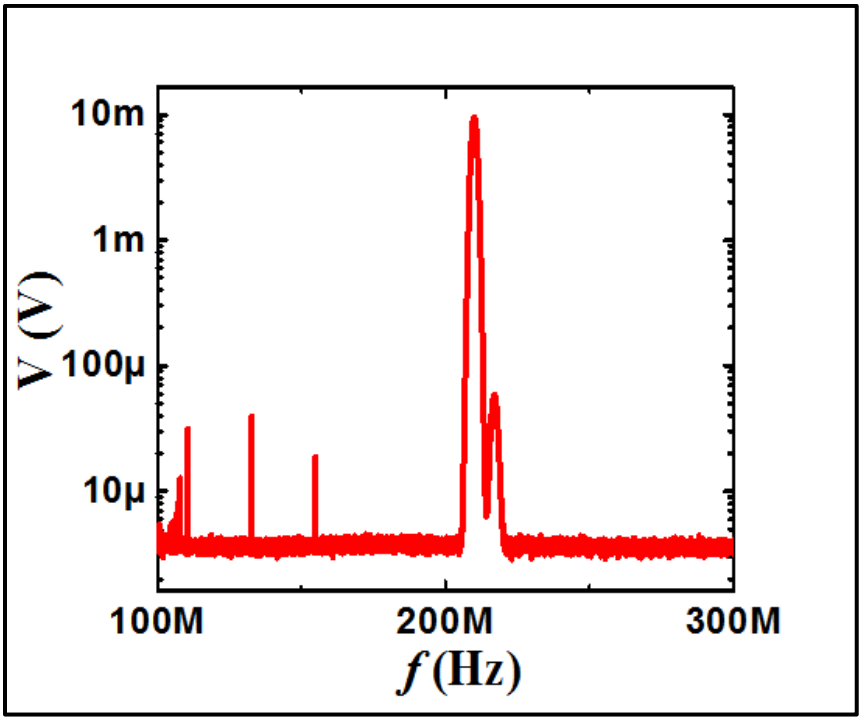


Şekil 91 Patlamış MT3 örnekleri

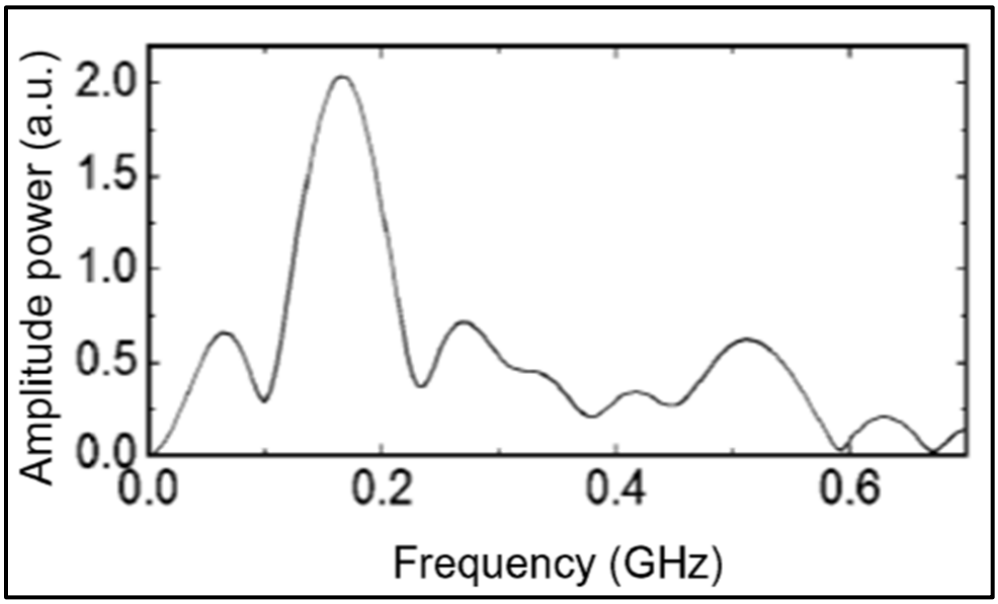
Bu örnek üzerinde yapılan yüksek frekans ölçümleri için örneklerin DC akım toleransı test edilmiştir. Yüksek DC akım ve devrede oluşan istemsiz voltaj pikleri örnekleri kolayca patlatabilmektedir. 8 mA üstü akımlarda patladıkları keşfedilen örneklerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 91'da gösterilmiştir.

Örneklerden biri üzerinde akım arttırılırken 10 MHz- 3 GHz arasındaki spektrum 100 MHz aralıklarla taranmıştır. Ölçülen sinyal arka fon spektrumu ile kıyaslanmıştır (program tarafından). 7mA mertebesinde 200- 300 MHz aralığında bir sinyal belirmiş, 8 mA akım geçmesi halinde bu pik belirgin olmuştur. Şekil 92'da gösterilen 10 mV'a kadar uzanan bu sinyal 210 MHz'te konumlanmış 2,5 MHz çizgi genişliğine sahip bir pik ve hemen yanında küçük bir pik içermektedir. Yükselteç hesaba katıldığında büyük pik 1,2 mV büyüklüğündedir ve 217 MHz'te merkezi olan ikinci pik 10 μV seviyesindedir. Daha düşük akımlarda var olmayan bu pikler açıkça 8 mA'lik bir eşik akımıyla tetiklenen mikro-manyetik dinamiklerin bir göstergesidir.

İtalya tarafında yapılan simülasyonlarda antivorteks oluşumlarının manyetik alan darbeleriyle tetiklenmesi sonucu yine 200 Mhz civarında bir sinyal ortaya çıkmıştır. Şekil 93'de 300 mT ve 10 psn'lik düzleme dik bir manyetik alan darbesi sonrasında (20 psn sonra) oluşan sinyal gösterilmektedir. Simülasyonlara göre bu darbe ile asteroid merkezinde bir vorteks-



Şekil 92 8 mA DC akımla tetiklenen anti-vorteks dinamiklerinin frekans uzayında oluşturduğu sinyal 210 MHz merkezli bir pik olarak kaydedilmiştir.



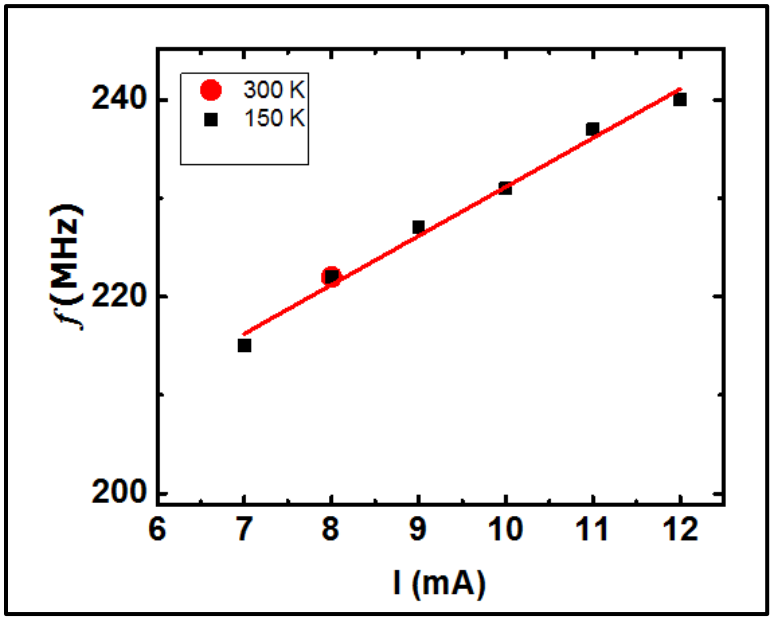
Şekil 93 Mikromanyetik modellemede 300 mT ve 10 psn'lik düzleme dik bir manyetik alan darbesi sonrasında (20 psn sonra) oluşan sinyal

antivorteks çifti dönme hareketi yapmakta ve zamanla vorteks kutubu yön değiştirmektedir. Bu salınımlar 180 MHz'de konumlanmış 100 MHz kadar geniş bir pik oluşturmaktadır. Bu pikin her iki tarafında da küçük pikler de oluşmuştur. Deneysel olarak elde edilen verilerin ve modelde görülenden farklı olmalarının bir açıklaması farklı tetiklenme mekanizmalarının yanı sıra modelde vorteks-antivorteks çiftinin salınım hareketi yapmasına rağmen gerçek aygıtlarda karşılıklı iki antivorteksin bir dönme hareketi yapması olduğunu söyleyebiliriz. Yine de frekans aralığı olarak yakım bir sinyal tespit edilmiştir.

Akım ve manyetik alanla tetiklenen dinamiklerinin bir faz diyagramı çıkarılması planlanmış olsa da eldeki verilerin azlığı buna pek imkan tanımamıştır. Py malzemesinin çok yumuşak olması ve düşük manyetik alanlarda doygunluğa ulaşması sonucu az bir manyetik alan uygulaması bile (düzleme paralel veya dik) Şekil 92'de gösterilen sinyalin kaybolmasına neden olmuştur. Akıma bağlı dinamiklerin çalışılması ise örneklerin ısınarak patlaması nedeniyle gerçekleşememiştir. Bu durumda örnekler PPMS sisteminde düşük sıcaklıklarda çalışılmıştır. Bu sayede soğuk ortam bir ısı rezervuarı olarak davranmış ve biraz daha yüksek akımların geçişine olanak sağlamıştır. Ayrıca bu ölçümler için H tipi Au kontaklı örneklere geri dönülmüştür ki ısınma etkisi biraz daha azalsın.

HT örnekleri wire-bonding ile bağlanarak PPMS sistemine konmuştur. Ölçüm sonucu Şekil 94'de gösterilmektedir. 245 mΩ'luk AMR değeri olan bu örneklerde yüksek frekans tarama Labview programı oda sıcaklığında 8 mA'de 219 MHz'de 1,5 mV'luk bir pik tespit etmiştir. Bu pikin çizgi genişliği 2.5 MHz'dir. Sistem 150K'e soğutulup program tekrar çalıştırılmış ve örneğin üzerinden geçen akım örnek patlayana kadar arttırılarak ölçüm devam etmiştir. Şekil 94 deki grafik 150K ve 300 K'de çakışan frekans değerlerini göstermektedir. Frekansı değişmeyen 8 mA'deki pik 150 K'de 3,3 mV büyüklüğe ulaşmıştır. Çizgi genişliği de 1.9 MHz'e inmiştir. 150K sıcaklıkta akım değerleri 12 mA'e kadar artabilmiştir ve frekansın akımla arttığı gözlenmiştir. Şekil 94'de doğrusal bir çizgi ile temsil edilen lineer değişimin eğimi 5'tir. Her ne kadar antivorteks dinamiklerinin çizgi genişliği fazla olsa da akıma bağlı değişim frekansın belirli bir aralıkta akımla ayarlanabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak antivorteks dinamikleri vortekslere kıyasla daha düşük frekanslarda oluşmaktadır. Modellemelerle tahmin edilen birkaç yüz MHz seviyesindeki sinyaller DC akımla tetiklenerek 200 MHz'in üzerindeki frekanslarda deneysel olarak tespit edilmiştir. Anti-vortekslerin hareketleri pek az incelenmiş olduğundan bu çalışmanın sonuçları heyecan vericidir. Ancak vortekslere kıyasla çok daha düşük frekanslarda ortaya çıkmaları ve tespit edilen sinyallerin çizgi genişliğinin oldukça fazla olması bu aygıtların çip-üstü osilatör uygulamaları için uygun olmadıklarının düşünülmesine yol açmaktadır.

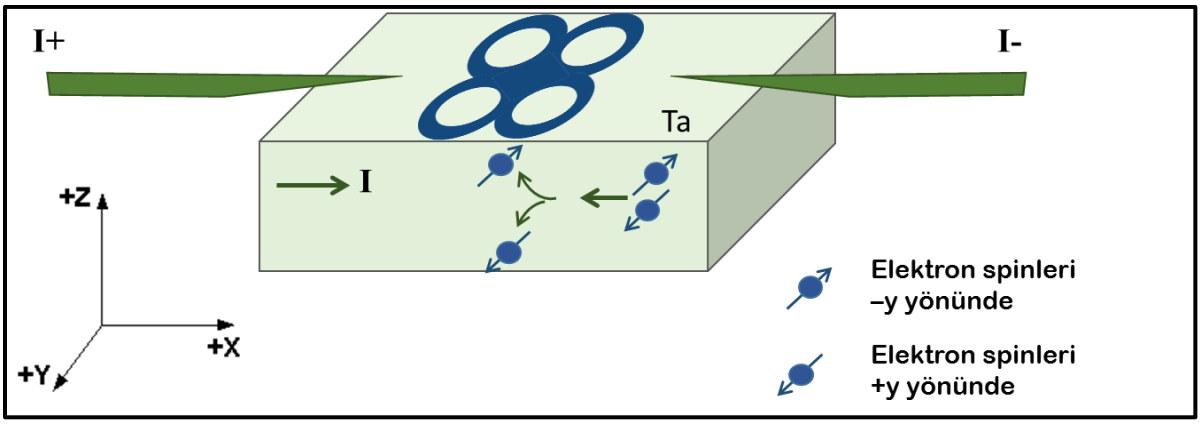


Şekil 94 HT1 örneği üzerinde yapılan yüksek frekans ölçümlerinde frekansın akıma bağlı değişimi

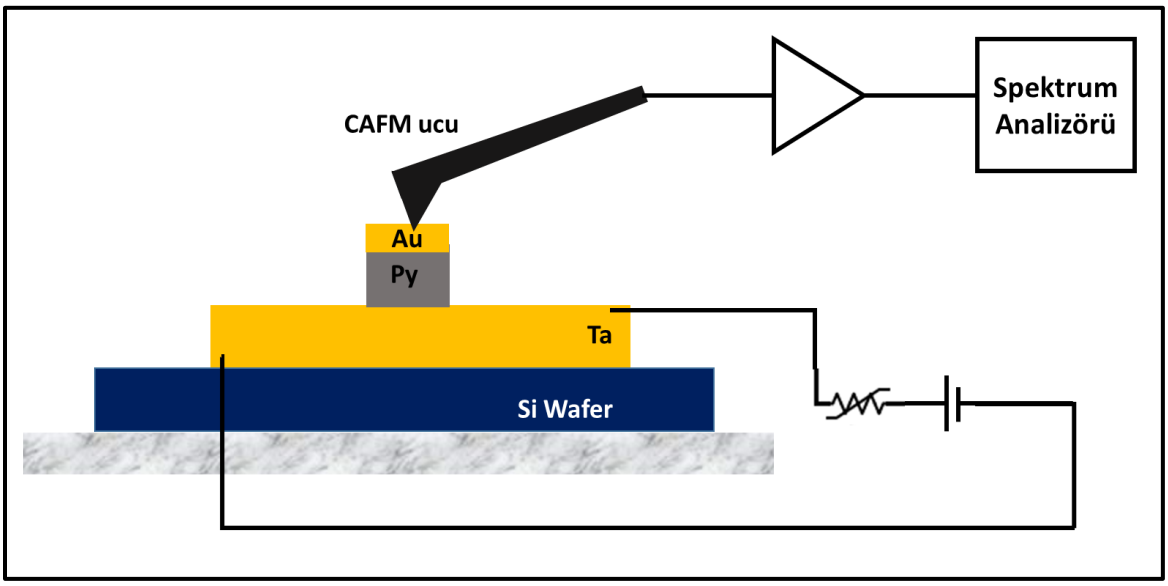
4.1.3. SHE Ölçümleri

10. iş paketinde yer alan SHE ölçümleri bu bölümde anlatılmaktadır. Yüksek frekans dinamikleri düzleme dik gönderilen akım altında da tetiklenebilir. Bunun için oda sıcaklığında SH1 aygıtlarında SHE ölçümleri yapılmıştır. Üretilen SH1 aygıtlarında SHE'nin nasıl oluştuğu Şekil 95'de resmedilmiştir. +x yönünde Ta tellerden geçirilen akım Ta malzemesinde elektronların spine bağlı saçılması nedeniyle z yönünde bir spin akımına neden olur, SHE. Burada +y yönünde polarize olan spinler -z yönünde hareket ederken, -y yönünde polarize olan spinler +z yönünde hareket eder. Bu durumda Ta'dan +x yönünde geçen akım -y yönünde polarize olan spinleri astroide doğru gönderir yani astoride doğru net bir spin akımı oluşur. Aygıtlar bu spin akımının iletken-AKM yardımı ile tespit edilmek üzere tasarlanmıştır ve Py üzerinde Au bir katman bulunmaktadır.

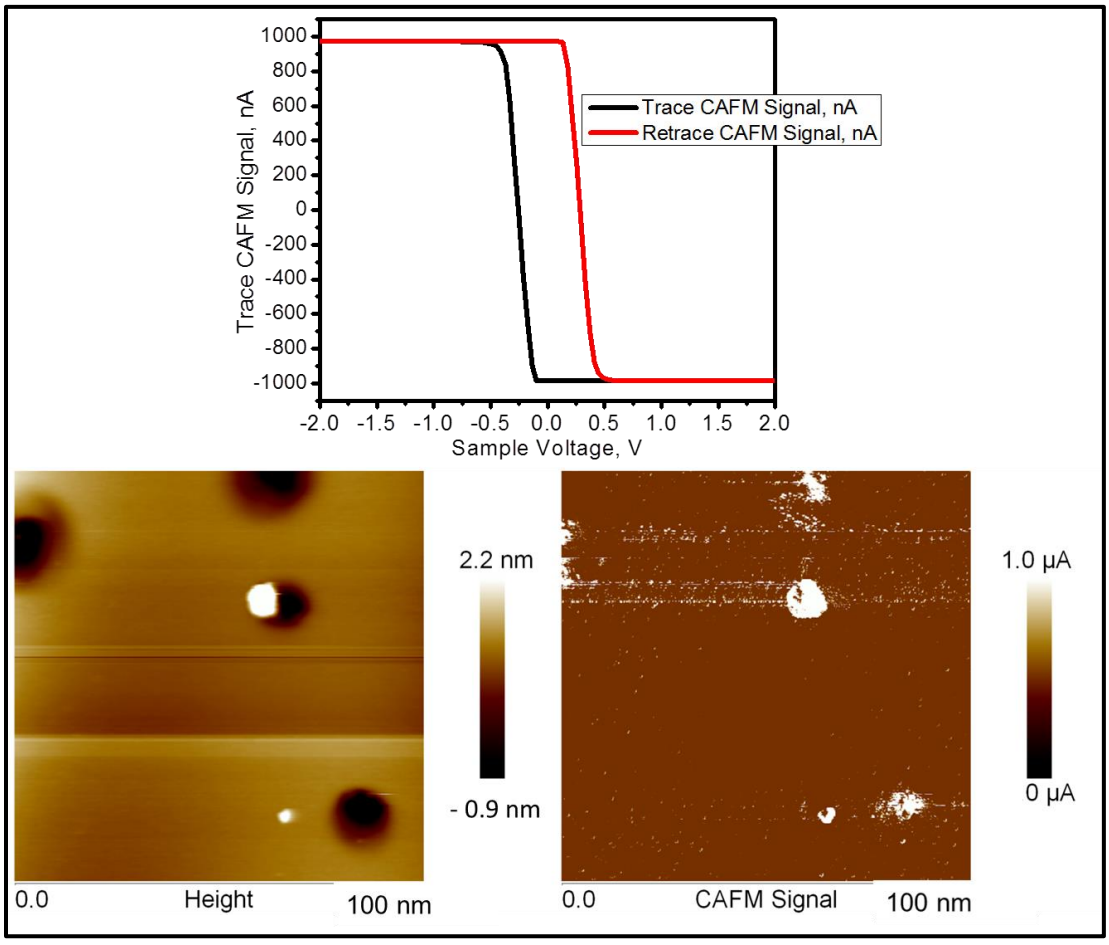
SH1 aygıtlarında Ta'dan akım geçirecek dört elektrot bulunmaktadır. Bunlardan ikisine wire-bonding ile bağlantı yapılmış ve örnek çip tutucular üzerinde AKM sistemine yerleştirilmiştir. Devre çizimi Şekil 96'de verilen düzenekte toprağı havada DC güç kaynağı ile Ta elektrotlardan akım geçirilmektedir. İletken-AKM yardımı ile üç terminal bağlantı kurulan aygıtta uçtan gelen sinyal hem DC olarak iletken-AKM'nin kendi donanımı ile hem de RF salınımlar olarak spektrum analizörü ile tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 95 SH1 aygıtlarında SHE'nin şematik çizimi



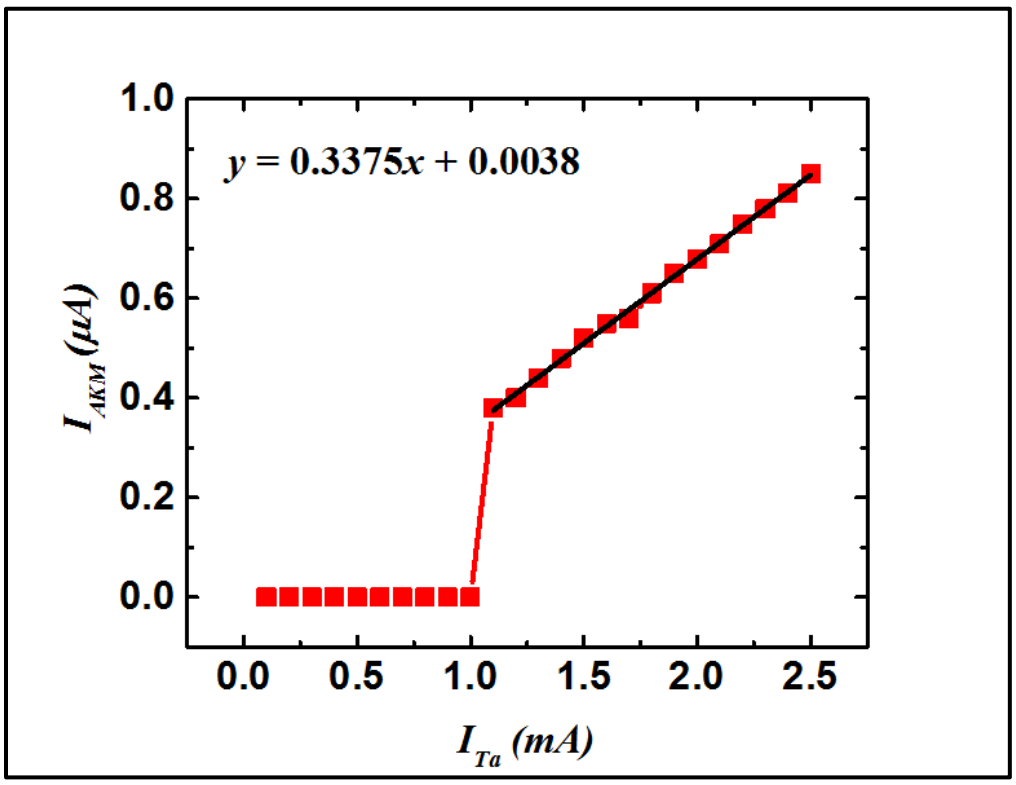
Şekil 96 İletken-AKM ile SHE ölçümleri şematiği



Şekil 97 Au üst kontak üzerinde yapılan iletken AKM görüntüleri

İletken-AKM ile üst Au elektrot üzerine inilmiş ve alt Ta elektrot örnek platformuna bağlı iken deneme ölçümleri alınmıştır. İnilen noktada alınan bir akım-voltaj grafiği Şekil 97'de gösterilmiştir. Burada 500 mV ve üstü voltajlarda akımın yükselteci doygun hale ulaştırdığı ve ölçüm alınamadığı görünüyor. Bu ölçümden Ta kablosunun direnci hesaba katıldığında aygıtın kendisinin mOhm mertebesinde dirence sahip olduğu görünüyor. Astroidin orta bölgesinde 100 nm'lik bir alan örnek platformu 100 mV gerilimde iken iletken-AKM modunda taranmış ve yüzey topografisi yine Şekil 97'de verilmiştir. Bu topografide bölgesel tespit edilen akım değerleri de bu şekilde gösterilmiştir. Au kontak yüzeyinde iletkenliği yüksek çukur bölgeler tespit edilmiştir. Bu ölçümler, iletken-AKM'nin bir elektrot olarak kullanılabileceğinin bir göstergesidir.

Şekil 96'daki düzenek kurularak SHE aygıtlarında SHE tespit edilmeye çalışılmıştır. Ta elektrotlardan Keithley 2400 güç kaynağı ile akım geçirilerek Ta elektrotların direnci 1,2 kΩ olarak belirlenmiştir. İletken-AKM kontak moduna alınarak astroidin orta bölgesine bağlantı kurularak iletken AKM'nin akım değerleri tespit edilmiştir. Ta malzemesinden geçen akıma bağlı



Şekil 98 SHE aygıtlarında Şekil 96'daki kuruluma göre alınan ölçümde iletken AKM'nin tespit ettiği akımın Ta elektrotlardan geçen akıma göre değişimi

olarak kaydedilen akım Şekil 98'de gösterilmiştir. Ta'dan 1 mA akım geçene kadar AKM belirli bir akım tespit edememiştir. 1,1 mA değerinde AKM 400 μA akım değeri okumuş ve Ta'dan geçen akım arttıkça bu akım değeri de artmıştır. Artışın lineer olduğu görülmüştür. Bu verilere yapılan doğrusal bağdaştırmada eğimin 0,337 değerine sahip olduğu görülmektedir.

Tespit edilen akım, 1 mA eşik değeri üstünde bir SHE ile gelen astroid düzlemine dik bir spin akımıdır. Doğrunun eğimi bize spin akımının, I_s, yük akımına, I_c, oranını vermektedir. Spin akımını mA birimine çevirdiğimizde bu değer:

$$\frac{I_s}{I_c} = 3{,}37 \times 10^{-4}$$

olarak hesaplanır. SHE görülen malzemelerde SH açısı, θ, denen parametre spin akım yoğunluğunun yük akım yoğunluğuna oranını verir:

$$\theta = \frac{j_s}{j_c}$$

5 nm yarı-çapta yüzeye bağlantı yapan AKM ucunu spin akım yoğunluğunu hesaplamak üzere kullanırsak ve 5 nm kalın ve 5 μm geniş Ta malzemesinin akım yoğunluğunu kullanırsak şu hesabı elde ederiz:

$$\theta = \frac{I_s/25\pi \times 10^{-18}}{I_c/25 \times 10^{-15}} = 318{,}5\frac{I_s}{I_c}$$

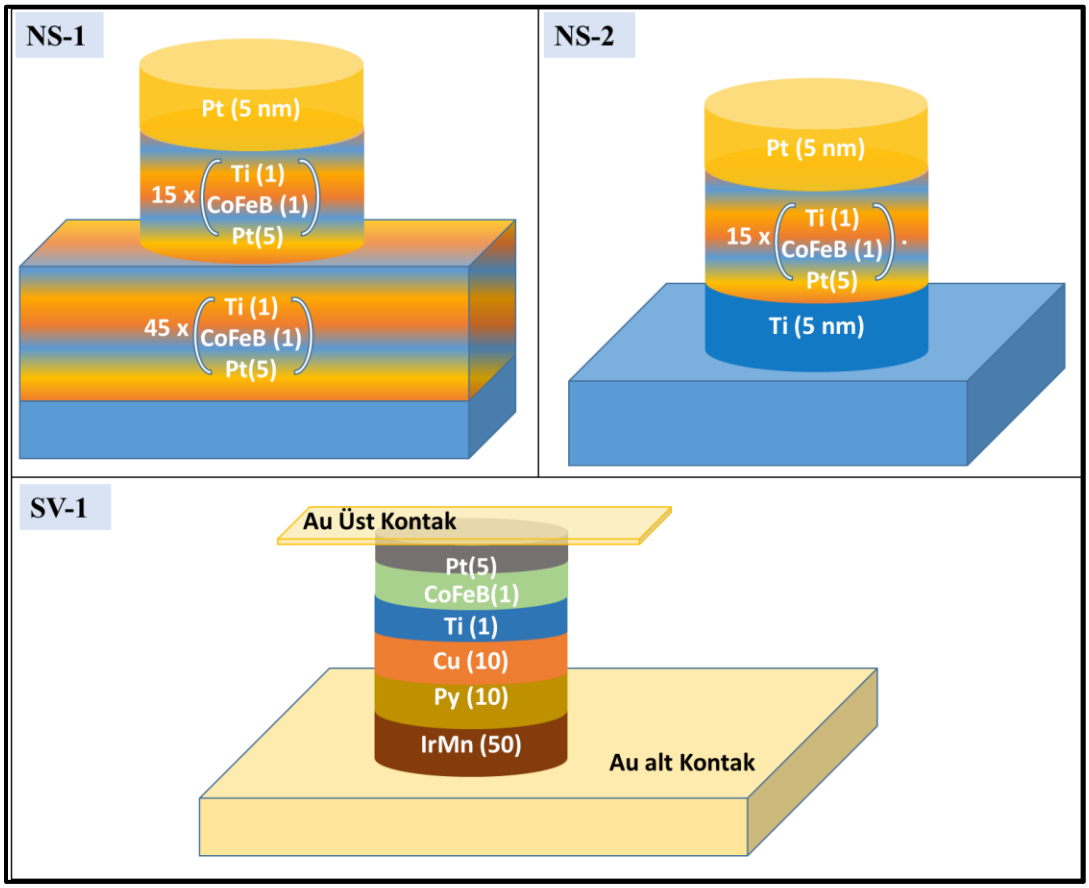
Yukarıda belirlediğimiz I_s / I_c, oranını kullanarak *θ* değerini 0,107 olarak buluruz. Bu SH açısı değeri literatürde 0,12 olarak belirtilen değere çok yakındır.

Tespit edilen spin akımı mıknatıslanma dinamiklerini tetiklemekte etkindir çünkü %100 aynı yöne spin polarize olmuş elektronlardan oluşmaktadır. Antivorteks dinamiklerini tetiklemek için bu akımın kullanılması planlanmıştır. Bu kez uçtan gelen akımdaki salınımlar spektrum analizöründe incelenmiştir. Ta'dan geçen akım taranırken yüksek MHz frekansındaki spektrum analiz edilmiştir. Arkafon harici bir sinyal tespit edilememiştir. Buradan yola çıkarak incelediğimiz geometride ortaya çıkan maksimum spin akımının manyetizasyon dinamiğini tetikleyecek eşik akım yoğunluğunun altında olduğu anlaşılmaktadır. Literatürde mıknatıslanma dinamikleri 10^6-10^7 MA/cm^2 değerlerindeki akım yoğunlukları ile tetiklenmektedir. Burada astroid aygıttan geçen maksimum düzleme dik akım yoğunluğu $j_s = 1 \times 10^6$ A/cm^2 seviyesindedir. Bu değer eşik akım değerlerine yakın olsa da yeterli olamamıştır. Ta elektrotlarının yerine Pt elektrot kullanılması spin Hall açısını biraz daha arttıracağından daha uygun bir aygıt tasarımına yön verebilir.

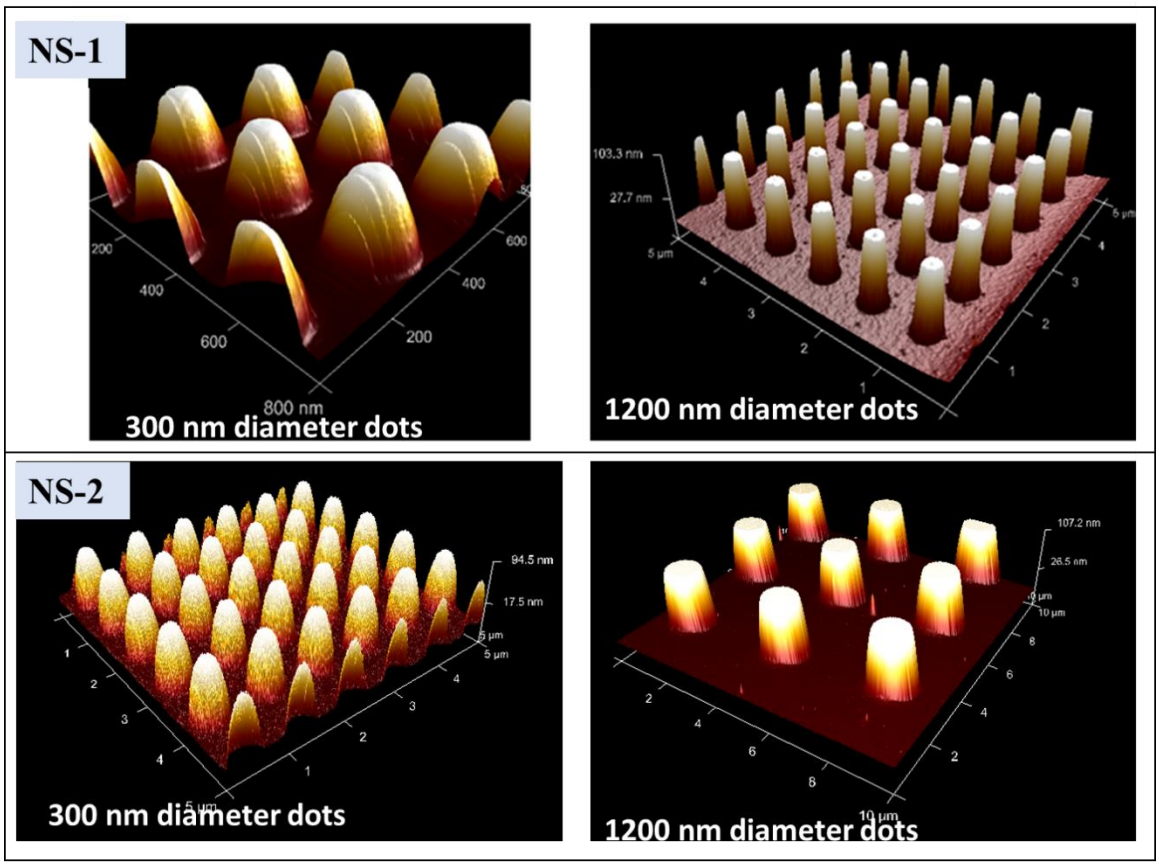
4.2. Skyrmion Bazlı Aygıtların Manyetik ve Elektriksel Karakterizasyonu

Yüksek spin yörünge etkileşimi altında skyrmion yapılarının incelenmesini içeren 6. iş paketi kapsamında modellemeler yapılmış ve CoFeB/Pt katmanlarının ara-yüzünde radyal vorteks skyrmionlarının incelenmesine karar verilmiştir (bkz. bölüm 3.1.2). Yüksek spin yörünge etkileşimli Pt malzemesinin üzerine tekrarlı bir şekilde büyütülen CoFeB malzemesi 7. iş paketi dahilinde farklı boyutlarda nano-sütunlar halinde üretilmiştir. Bu nano-sütunlarda skyrmion dinamiğinin tespit edilmesi ve sıcaklıkla değişiminin incelenmesi yani 8. ve 10. iş paketleri bu bölümde anlatılmaktadır.

Proje kapsamında üç çeşit skyrmion bazlı aygıt tasarlanmıştır: Ti(1 nm)/CoFeB(1)/Pt(5) çoklu katmanlı yapısının tekrarlarından oluşan nano-sütunlar NS1 ve NS2, üst ve alt kontak ile elektriksel bağlantı kurulan spin valf yapıları SV1. Bu aygıtların şematik çizimleri Şekil 99'de gösterilmiştir.



Şekil 99 Radyal Vorteks Skyrmionlarına elverişli aygıt tasarımları



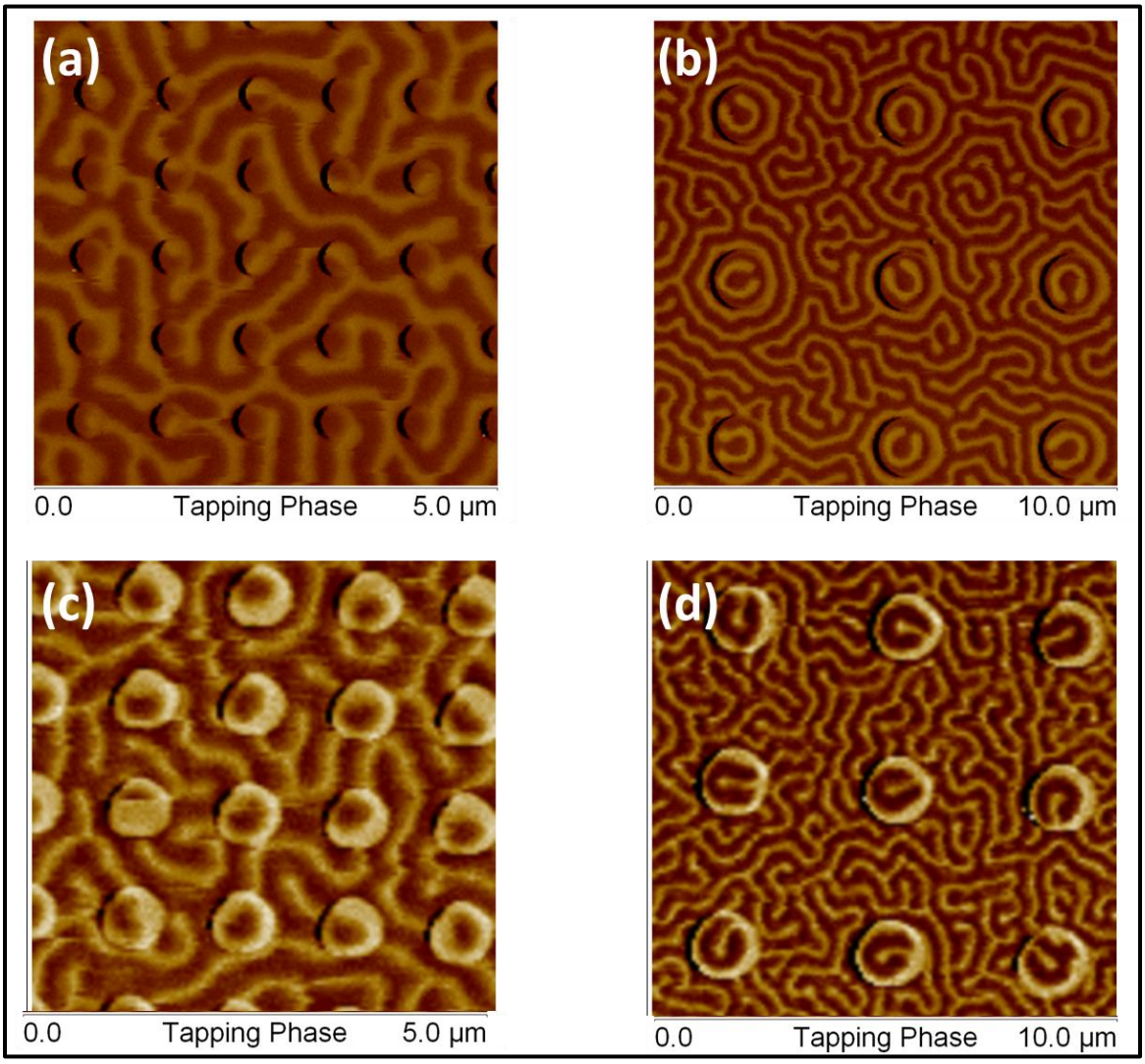
Şekil 100 NS1 ve NS2 örneklerinin AKM görüntüleri

NS1 ve NS2 5 nm Pt üzerine 1 nm CoFeB konularak ve 1 nm Ti sonrasında bu basamaklar tekrar edilerek yapılmıştır. NS1 aygıtları ilk testlerin yapıldığı aygıtlardır. Manyetik sinyalin ölçülebilir düzeyde olması açısından ve örneklere düzleme dik anizotropi verebilmek adına 45 tekrarlı filmin üzerinde 100 nm kalınlığında 15 tekrarlı yapıların oluşturulması ile yapılmıştır. Düzeleme dik anizotropili aygıtların incelenmesi ve BLS ölçümleri sonrasında 15 tekrarlı yapılar (NS2) üretilmiştir. MKM görüntülemeleri ile radyal vorteks yapılarının varlığını tespit ettikten ve manyetik alan altında statik davranışlarını inceledikten sonra dinamik özelliklerin incelenmesi için spin valf yapıları, SV1, üretilmiştir.

NS1 ve NS2 örnekleri 100-1200 nm arası çaplarda nano-disklerden oluşurken SV1 örneklerinde 300 ve 400 nm çaplarında nano-sütunlar kullanılmıştır. NS1 ve NS2 nano-sütunlarından bazılarının üç boyutlu AKM görüntüleri Şekil 100'da gösterilmiştir. Üç örnek de iyon-aşındırması yoluyla üretilen nano-sütunlardan oluşmaktadır ve bu şekilde de görüldüğü üzere disk kenarlarında kalıntı olmadan düzgün aygıtlar üretilebilmiştir.

4.3.1. Manyetik Karakterizasyon

Üretilen örneklerde oluşan manyetik mikro-konfigürasyonlar MKM'de MESP-LM uçlarla incelenmiştir. İncelemelerde üretilen manyetik alan platformları kullanılmıştır (bkz. 3.2.2.2). İlk üretilen örneklerde düzleme dik anizotropi gözlenmiştir. NS1 örneklerinin MKM görüntüleri Şekil 101'de sunulmuştur. MKM öncesinde örnekler AC manyetik alan altında 800 mT'dan 10 mT azalan basamaklarla mıknatıslığı giderilmiş sonra da düzleme dik bir manyetik alan uygulanmış

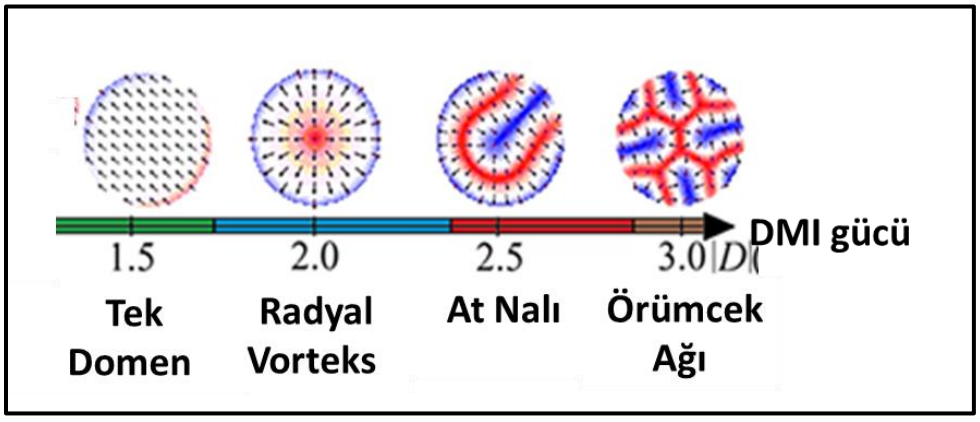


Şekil 101 NS1 örneklerinin MKM görüntüleri AC mıknatıslığı giderilmiş örneklerin üzerine düzleme dik uygulanmış manyetik alan sonrası (a) 300 nm ve (b) 1200 nm çaplı disklere 800 mT uygulandıktan sonra (c) 400 nm ve (d) 1200 nm disklere 9T uygulandıktan sonra

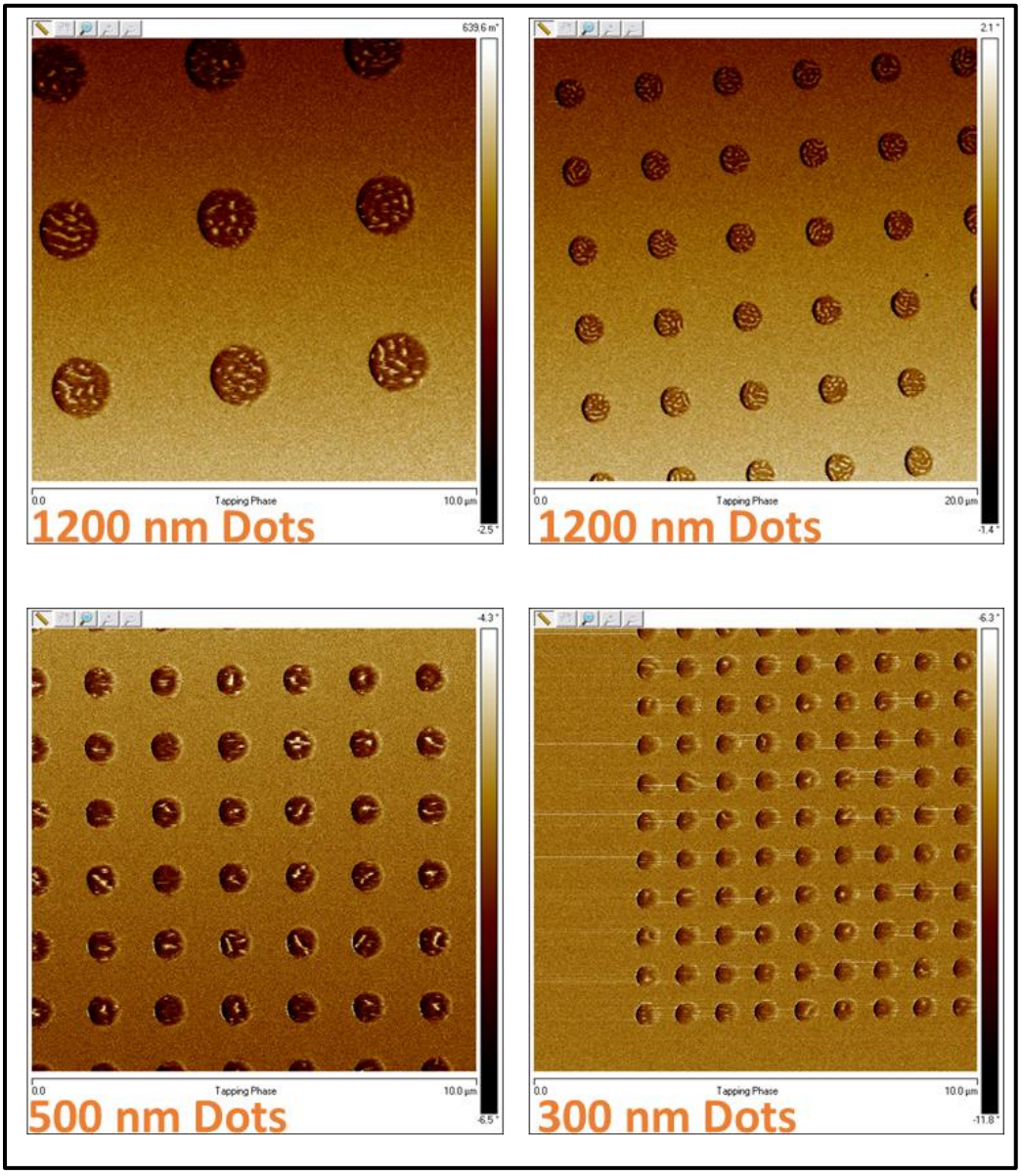
ve kapatılmıştır. Şekil 101a ve b'de 300 ve 1200 nm çaplı diskler gösterilmektedir. Bu resimler düzleme dik 800 mT manyetik alan uygulandıktan sonra çekilmiştir. Her iki resimde de nano-sütunların alt kısmında yer alan manyetik film görülmektedir. Burada labirent domen yapısı vardır ve düzleme dik anizotropiye işaret etmektedir. Bu yapılanmanın sebebi yüzeyler arası DMI parametresinin büyüklüğü veya katmanların tekrarının fazla olması olabilir. Bu koşullandırma altında küçük çaplı disklerde alttaki labirent yapının devamı nano-dikslerde tekrar etmektedir. 600 nm'den büyük çaplı örneklerde disklerin ortasında at nalı şeklinde manyetik yönelimler tespit edilmiştir. Bu at nalı yönelimleri 1,2 μm çapındaki disklerde Şekil 101'de gösterilmiştir ve en kuvvetli sinyali vermektedir.

800 mT manyetik alan bu manyetik yapıyı doygunluğa eriştirememiş olduğundan örnekler PPMS sistemine konulup 9T manyetik alan altında doygunluğa ulaştırılmıştır ve sonrasında manyetik alan kapatılarak MKM ile incelenmiştir. 400 ve 1200 nm çaplı diskler için gösterilen Şekil 101'deki MKM görüntülerinde bu denli yüksek bir manyetik alanın yapılanmayı değiştirdiğini görmekteyiz. Öncelikle labirent domen yapısında daha yoğun koyu bölgeler ve daha az açık renkli bölgeler mevcut. 1200 nm çaplı disklerde at nalı yapılanması varlığını korurken küçük çaplı disklerde alt yapının devamı yerine manyetik baloncuk yapısına benzer yapılar oluşmuştur. Manyetik baloncuk yapılarında ortada düzlemden dışarı doğru bir mıknatıslanma var iken kenarlarda düzleme doğru bir mıknatıslanma olur. Bu da bu MKM görüntülerindekine benzer bir kontrast ortaya koyar.

Bu resimler Mikromanyetik modellemelerle kıyaslanmıştır. Modelleme ile belirlenen domen yapılanmasının DMI gücüne bağlı değişimi Şekil 102'de gösterilmiştir. Burada at nalı yapılanması görülmektedir. Bu yapının radyal vorteks oluşumuna elverişli katmanlara kıyasla



Şekil 102 DMI gücüne bağlı olarak CoFeB/Pt katmanlarında oluşabilecek manyetik yapılanmalar

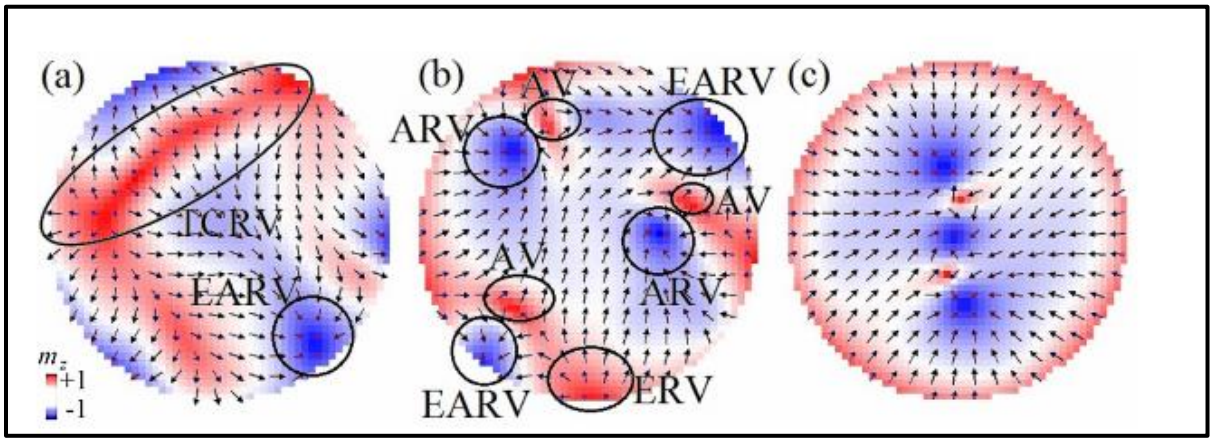


Şekil 103 NS2 örneklerinin MKM görüntüleri disk çapları resimlerin üzerinde belirtilmiştir

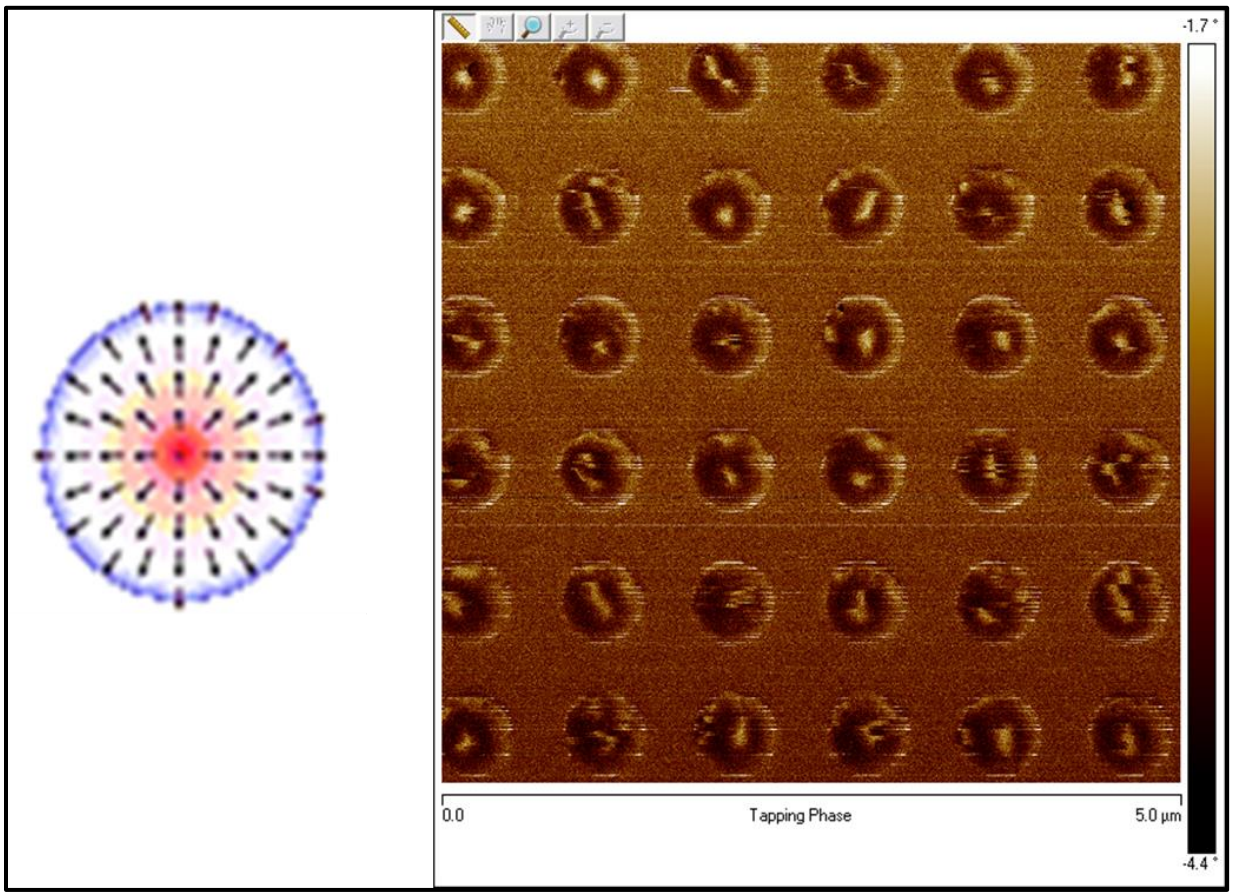
daha fazla DMI gücü neticesinde ortaya çıktığı gözlenmiştir. NS1 örneklerindeki at nalı ve baloncuk yapılanmaları katmanların kalınlığından kaynaklanabilmektedir. BLS ölçümleri MKM görüntülerini yorumladığımız sırada tamamlanmış ve Pt(5)/CoFeB(1)/Ti(1) 15 tekrarlı yapısının DMI parametresi hesaplanmıştır (bkz. 3.2.1.6). Bu yapıda D gücü 2'ye yakın çıkmıştır. Bunun üzerine 15 tekrarlı NS2 örnekleri üretilmiştir.

NS2 nano-sütunları üzerinde yapılan MKM ölçümleri Şekil 103'da gösterilmektedir. Bu ölçüm öncesinde örnekler AC manyetik alanda mıknatıslığı giderilmiş ve 9T düzleme dik manyetik alana maruz bırakılmıştır. Şekilde 1200 nm çaplı disklerde çizgisel ve dairesel bölgeler görünmektedir. Açık tonlardaki bu bölgeler çoklu domen yapılanmasına işarettir. 600 nm çaplı disklere kadar bu yapılanma görülmüştür. 500 nm çaplı disklerde (Şekil 103) çizgisel domenler ve noktasal beyaz bölgeler görünmektedir. 400 ve 300 nm çaplı disklerde tamamen noktasal domenler görülmektedir. Şekil 104'de radyal vortekslerin oluşurken veya manyetik alana doyurulurken hareketleri sırasında oluşabilecek çeşitli konfigürasyonların modellemesi görülmektedir. 500 nm disklerde görülen çizgiler burada oluşan radyal vorteks ve kutbu zıt yöne olan anti-radyal vortekslerin bir kombinasyonu olabileceğini göstermektedir. Radyal vorteksler hareketleri sırasında yüzeyde olan kusurlarda takılıp kalabilirler ve böylece statik görüntülemede ortaya çıkabilirler.

Şekil 105 noktasal manyetik yapılanmayı 300 nm çaplı diskler için daha küçük skalada gösteren MKM görüntüsünü ve radyal vorteksin model yapısını içermektedir. Modelde kırmızı kontrast bölgeler MKM görüntüsünde kontrast yaratacak bölgeyi temsil etmektedir. Bu durumda radyal vorteksin MKM görüntüsü de dairesel olması beklenmektedir. Şekil 105'de görünenler birer radyal vorteks olabilirler. Ancak manyetik baloncuk ve manyetik vorteks yapıları da MKM görüntülemesinde noktasal ya da dairesel olarak belirebilir. Modelleme sonuçlarında radyal vortekslerin 100 nm altında çaplarının olması beklenmektedir. Şekil 105'de ve benzeri



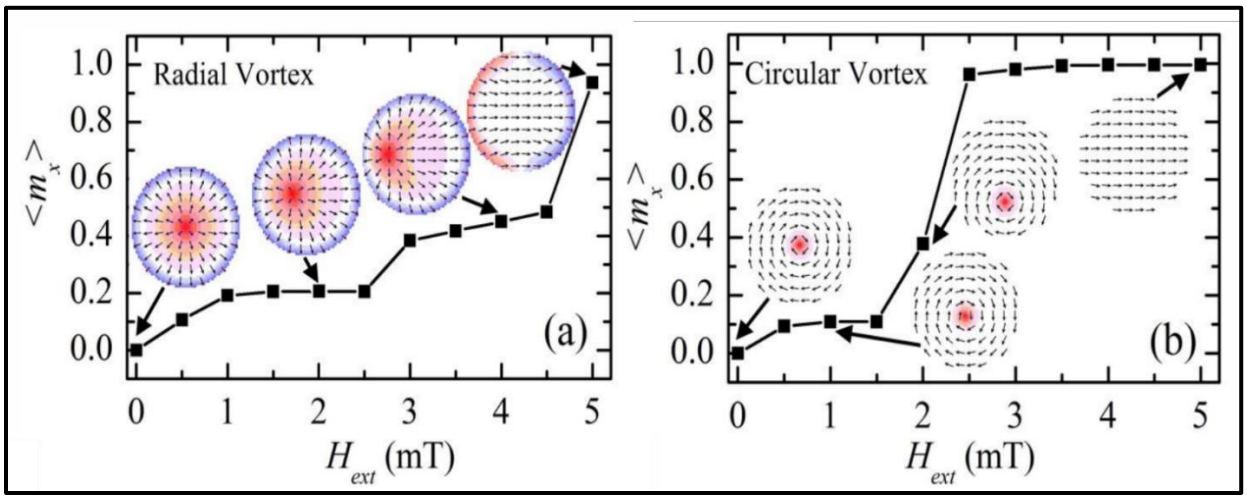
Şekil 104 Modelleme sonuçlarına göre radyal vorteks oluşumu ve hareketi sırasında oluşabilecek radyal vorteks (RV) ve kutbu ters bakan anti-radyal vorteks (ARV) kombinasyonları



Şekil 105 300 nm çaplı disklerde radyal vorteks yapılanması

görüntülerde MKM analiz programlarıyla inceleme yapılmış ve bu beyaz kontrastlı bölgeler 100 nm ve altında (genelde 70 nm) genişliklerde ölçülmüştür. Ölçüm yapılan MESP-LM uçlar 60 nm çapa sahiptir. Yani görüntü çözünürlüğü göz önüne alındığında bu bölgelerin 100 nm'nin altında olduğu düşünülebilir. Manyetik baloncuk yapılarını bu şekilde elememiz mümkün olabilir. Ayrıca düzleme dik manyetik alanda alınan görüntü yukarıdaki görüntünün birebir aynısı çıkmıştır. Bu da demektir ki bu yapılar manyetik baloncuk değildir. Eğer baloncuk olsalardı düzleme dik manyetik alan altında büyümeleri veya küçülmeleri gerekirdi.

Bu yapıları vortekslerden ayırt etmek için düzleme paralel manyetik alanda incelenmelidir. Şekil 106 radyal vortekslerin düzleme paralel manyetik alanda nasıl hareket ettiğini göstermektedir. Histerezis eğrisi de verilen bu grafikte sağa doğru uygulanan manyetik alanın şiddeti arttıkça radyal vorteks kutbu sola kaymıştır. Eğer radyal vorteksin kutbu ters yöne olsaydı (yani sayfadan içeri doğru) o zaman da radyal vorteks alanla aynı yönde yani sağa

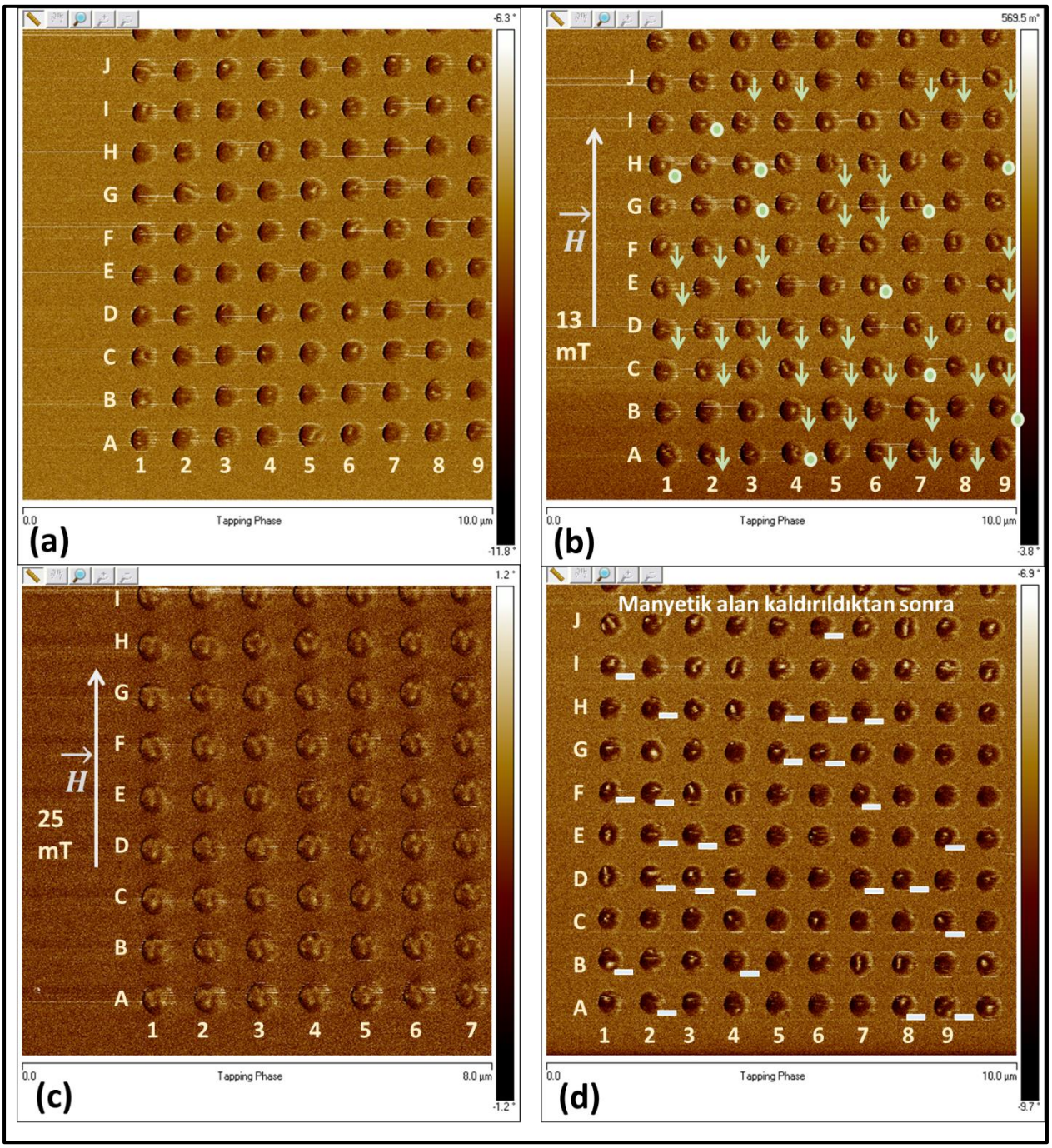


Şekil 106 Radyal vorteks (a) ve normal vortekslerin (b) düzleme paralel ve sağa doğru uygulanan manyetik alan altında histerezis eğrileri ve alan büyüklüğüne bağlı hareketleri

doğru hareket edecekti. Vorteks oluşumları ise Şekil 106b'de gösterildiği üzere sağa doğru manyetik alanın şiddeti arttıkça aşağı doğru kaymıştır yani manyetik alana dik yönde hareket etmiştir. O halde düzleme paralel manyetik alan uygulamasında vorteksler manyetik alana dik yönde, radyal vorteksler manyetik alana paralel doğrultuda hareket etmektedir.

Düzleme paralel manyetik alan altında MKM ile 300 nm çaplı diskler incelenmiştir. Yapılan sistematik inceleme Şekil 107'da gösterilmektedir. Sıfır manyetik alan altındaki görüntüde radyal vortekse benzer yapılar görünmektedir. Bazı disklerde boyutları çok küçük olduğundan zor seçilmektedirler. Düzlem içi yukarı doğru 13 mT manyetik alan uygulandığında aynı disklerde ortaya çıkan yönelimler Şekil 107b'de gösterilmiştir. Burada diskleri ayırt edebilmek adına alttan itibaren satırlara harfler ve kolonlara sayılar atanmıştır.

Şekil 107b'de oluşan yapılanmalar Şekil 107a ile kıyaslanmış ve radyal vorteks benzeri yapıların hareket yönü alt köşelerine yerleştirilen oklarla belirtilmiştir. Dairesel işaretler önceki resimde olmayıp sonradan beliren dairesel yapılar için konulmuştur. Radyal vorteks kutuplarının MKM tarama ucu ile kıyaslanabilir boyutlarda olması tespit edilebilirliklerini zorlaştırmaktadır. MKM tarama hızı, tarama çözünürlüğü ve gürültü parametreleri her ölçümde sonucu etkilemektedir. Burada ilk taramada görünmeyen radyal vorteks benzeri yapıların ikinci taramada ortaya çıktığını görüyoruz . I2, H1, A4 ve B9 bunlara birer örnektir. Bunların varlığını bilerek



Şekil 107 300 nm çaplı disklerde yapılan MKM görüntülemeleri sırasıyla: (a) manyetik alanda (yani AC manyetik alan koşullandırması sonrasında), (b) düzleme paralel ve şekilde gösterildiği yönde 13 mT bir manyetik alan altındayken, (c) düzleme paralel ve şekilde gösterildiği yönde 25 mT bir manyetik alan altındayken ve (d) son olarak manyetik alan kaldırıldıktan sonra 0 manyetik alan altında

Şekil 107a'ya tekrar baktığımızda silik olarak var olduklarını görebiliriz. Sonradan ortaya çıkan radyal vorteksler de hesaba katıldığında disklerde radyal vorteks benzeri yapıların elde edilme olasılığının %100 olduğunu görüyoruz.

Şekil 107b'de yanlarında ok olan örneklerin ilk resimdekine yani sıfır manyetik alandakine kıyasla ters yönde hareket ettiğini görüyoruz. Disklerin %38'inde dairesel yapılar aşağı doğru hareket etmiştir. Bazı disklerde dairesel domen yapılarında aşağı doğru bir uzama olmuştur, örneğin H5, H6 ve G5 disklerinde. Muhtemel bir açıklama yüzey kusurları yüzünden bu radyal vorteks benzeri yapıların hareket ederken takılmasıdır. Genel görüntüde dairesel yapılar manyetik alana paralel ancak ters yönde hareket etmiştir. Teorik olarak beklenen radyal vorteks davranışı sergilemişlerdir. Bu durumda bu yapıların radyal vorteks (RV) oldukları sonucuna varabiliriz.

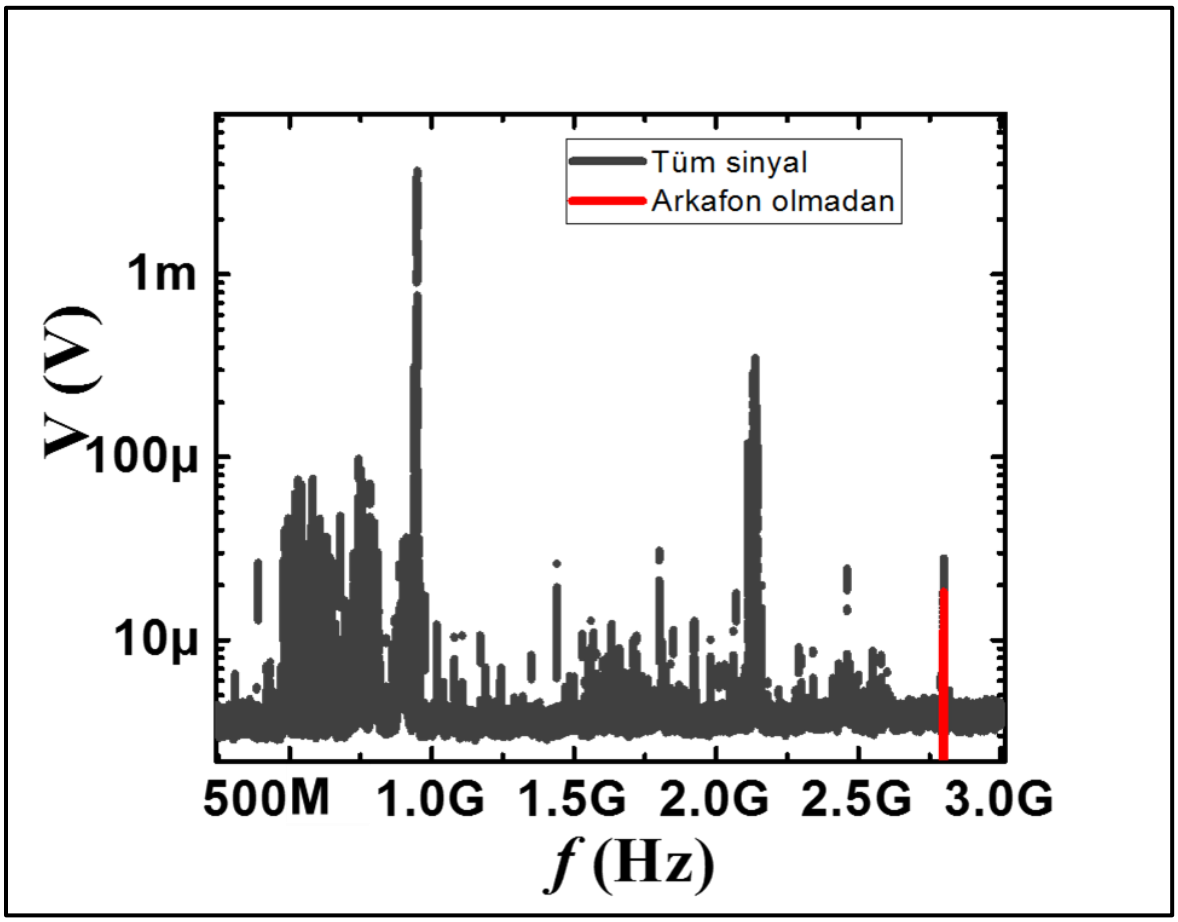
Şekil 107c'de aynı yönde ancak daha yüksek bir manyetik alanda, 25 mT, alınan görüntüler gösterilmiştir. Manyetik alan arttıkça RV yapıları yerini at nalı benzeri bir çoklu domen yapısına bırakmıştır. Her bir disk bu özelliği göstermektedir. Manyetik alan kapatıldığında RV yapılanmasına geri dönülmüştür. Şekil 107d'de gösterilen bu durumda Şekil 107a'daki ile aynı hale dönen diskler alt köşelerinde çizgilerle belirtilmiştir. Bunlar haricindekiler ya görünmemektedir ya da bir şekilde takılmış veya uzamış RV görüntüleri göstermektedir.

4.3.2. Elektriksel Ölçümler

NS1 ve NS2 örneklerinin manyetik karakterizasyonu doğrultusunda 300 nm çaplı spin valf nano-sütunları içeren SV örnekleri üretilmiştir. SV tasarımında kontak elektrotların altındaki nanodiskler kalın Au katman nedeniyle MKM ile görüntülenememektedir. Bundan dolayı elektriksel ölçümü yapılan nanosütunların hangi manyetik yönelimde olduğu kesin olarak bilinmemektedir.

Tablo 6 SV örneklerinin direnç değerleri

Örnek	Direnci	Örnek	Direnci
SV1	11,2 Ω	**SV5**	96 Ω
SV2	10,3 Ω	**SV6**	10,5 Ω
SV3	11,5 Ω	**SV7**	9,7 Ω
SV4	88 Ω	**SV8**	99 Ω



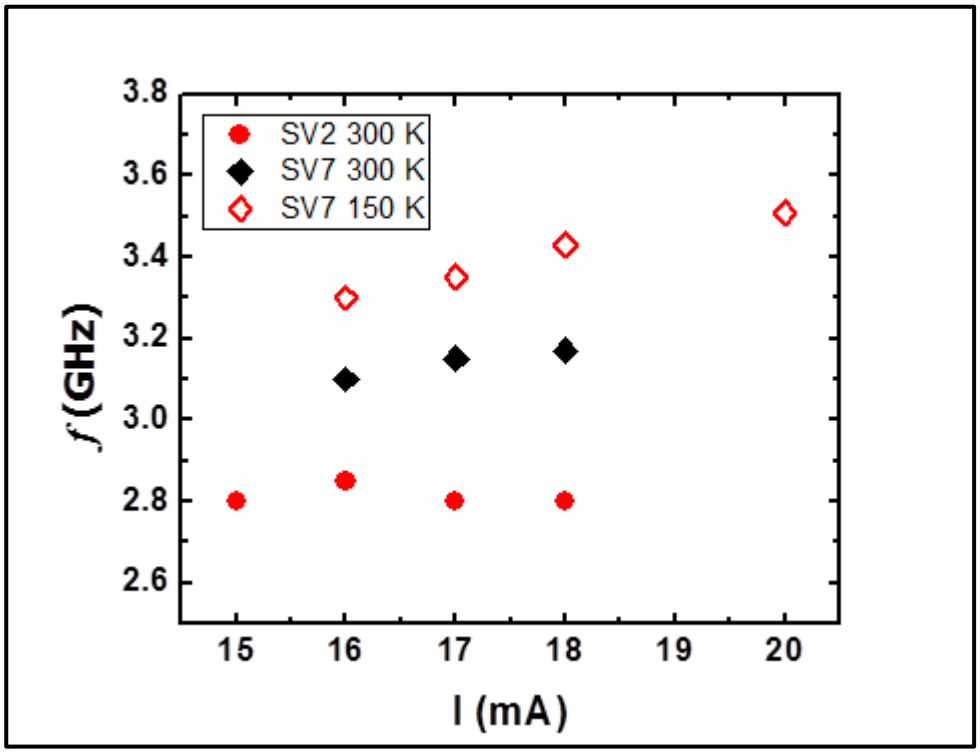
Şekil 108 SV2 örneğinin yüksek frekans dinamiklerinin tespiti

SV örnekleri wire-bond tekniği ile elektriksel bağlantı yapılmak suretiyle PPMS sisteminde pak adı verilen çip tutucular üzerinde ölçülmüştür. İlk olarak direnç karakterizasyonu yapılan SV örnekleri AC direnç ölçümü yöntemiyle ölçülmüştür. Aşağıdaki tabloda (Tablo 6) çeşitli örnekler ve direnç seviyeleri verilmiştir. Bu tabloya göre çoğu örnek 9,5-10,5 Ω aralığındadır. Ancak arada direnci yüksek aygıtlar da tespit edilmiştir. Neredeyse 100 Ω seviyesine ulaşan bu dirençler bazı aygıtlarda kontakların yeteri kadar iyi olmadığına işaret etmektedir.

Aygıtlardaki düşük dirençlerin bir avantajı yüksek akımlarda dahi kolay ısınmamalarıdır. SV2 numaralı örnek üzerinde oda sıcaklığında DC akımla tetiklenen dinamikler incelenmiştir. Manyetik alan kapalı iken yapılan ölçümlerde Labview programı ile akım arttırılırken 300 – 7 GHz arası sinyaller taranmıştır. GHz frekanslarında düşük arkafonda dahi pek çok pik bulunmaktadır. Program alınan spektrumdan 0 mA akımdaki spektrumu çıkarmakta ve kalan sinyalleri incelemektedir. Bu şekilde artan akımlarda alınan spektrumda kaydedilen saf veriler ve

arkafon çıkarıldığındaki veriler Şekil 108'de gösterilmiştir. Burada örnekten 15 mA akım geçirilirken ortaya çıkan küçük bir pik görülmektedir. Arkafon çıkarıldığında kırmızı çizgi ile gösterilen pik 22 μV büyüklüktedir. 2,8 GHz frekansta konumlanmış bu pik, 3 MHz çizgi genişliğine sahiptir.

Şekil 109 SV2 örneğinin oda sıcaklığı ölçümlerinin akımla değişimini vermektedir. Tespit edilen 2.8GHz'deki sinyalin akımla pek değişmediği gözlenmiştir. Bu örneğin hasar görmesi üzerine başka örnekler de taranmıştır. SV2 ve SV3 örnekleri 18 mA akıma kadar taranmış, hiçbir pik tespit edilememiştir. Bunun sebebi piklerin genliklerinin çok küçük olması ve arkafondaki piklerle çakışması olabilir. SV7 örneği spektrumunda belirgin bir pik tespit edilen ikinci örnektir. Yine Şekil 109'de gösterilen bu örnekte 16 mA ve daha büyük akımlarda 3,1 GHz mertebesinde ve 27 μV büyüklüğünde bir sinyal belirmiştir. Oda sıcaklığında bu frekans akımla pek değişmez iken sistem 150K'e soğutulduğunda frekans 3,3 GHz'e artmış ve sinyal büyüklüğü 30 μV'a ulaşmıştır. Bu sıcaklıkta frekansın akımla daha belirgin bir şekilde değiştiği gözlenmiştir. Pik genişliği oda sıcaklığında 5 MHz olarak ölçülürken 150K'de 3 MHz olarak tespit edilmiştir.



Şekil 109 SV2 ve SV7 örneklerinde yüksek frekans dinamiklerinin akımla değişimi

Bu veriler radyal vorteks yapılarının dinamik hareketlerinin düzleme dik bir akımla tetiklenebildiğini göstermektedir. Dinamikler için tespit edilen eşik akım yoğunluğu MA/cm^2 seviyesindedir. Örnekler arası farklı davranışlar örnekler arasında manyetik yapılanmada farklılıklar görülmesi olabilir. Bazı örnekler tek RV bulundururken bazı örnekler çizgi şeklinde beliren RV ve anti-RV çiftlerini barındırıyor olabilir. Bu da akımla tetiklenen dinamiklerde farklı frekansta salınımlara yol açıyor olabilir. Antivortekslere kıyasla çok daha yüksek frekanslarda ortaya çıkan salınımlar çip-üstü ösilatör uygulamaları için daha uygundur. Ölçülen frekans büyüklüğüne göre çizgi genişliği daha küçük kalmaktadır.

4.3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu projede öngörülen tüm iş paketleri tamamlanmıştır ve elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- ★ Astroid şekilli $Ni_{81}Fe_{19}$ (Py) nanomıknatıslarda literatürde pek az rastlanan ve tek başlarına tespit edilememiş olan anti-vorteks mikro-manyetik yapıları başarı ile gözlenmiştir. Uygun manyetik alan koşullanması altında astroidin orta bölgesinde karşılıklı anti-vorteks çiftleri kararlı bir şekilde oluşmaktadır. Farklı Py kalınlıkları ve astroid boyutlarında da kararlı antivorteks çifti gözlemlenebilmiştir.
- ★ Anti-vorteks çifti manyetik alanla orta bölge etrafında statik konfigürasyonunu değiştirmektedir.
- ★ Mikromanyetik modellemeler manyetik alan darbeleri ile bu antivortekslerin dinamik hareketini öngörmüş ve 180-200 MHz civarında bir rezonans oluşturacağını belirlemiştir.
- ★ Astorid aygıtlarına elektrot bağlanması yoluyla düzlem-içi akıma elverişli aygıtlar tasarlanmış ve temiz oda ortamında üretilmiştir. Bu aygıtlarda direnç seviyeleri 90-100 Ω arasındadır. Oda sıcaklığında manyetik alan altında yapılan ölçümlerde 250-300 mΩ'luk bir AMR sinyali tespit edilmiştir.
- ★ Aygıtlardan direk akım geçirilerek spin transfer torku etkisiyle antivortekslerin dinamik hareketi tetiklenmiştir. Spektrum analizörü ile tespit edilen sinyaller 200 MHz üzerindedir ve birkaç MHz çizgi genişliğine sahiptir.
- ★ Sıcaklığa bağlı yapılan ölçümlerde dinamiklerin frekansının sıcaklıkla değişmediği ancak sinyal çizgi genişliğinin düşük sıcaklıklarda daraldığı gözlenmiştir. Yine düşük sıcaklıklarda frekansın akımla lineer olarak arttığı gözlenmiştir.
- ★ Ta yüksek spin yörünge etkileşimli malzemesinden üretilen elektrotlar üzerine büyütülen astroid aygıtlarında SHE gözlenmiştir. SHE ile düzleme dik bir spin akımı üretilmiş ve iletken AKM ile tespit edilmiştir. Spin hall açısı 0,107 olarak hesaplanmıştır.
- ★ Yüksek spin yörünge etkileşimli Pt malzemesinin CoFeB ile arayüzünde radyal vorteks (RV) skyrmionlarının oluşacağı mikro-manyetik simülasyonlarla belirlenmiştir.

- ★ Üretilen 15 tekrarlı Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı nano-sütunlarında radyal vorteks benzeri yapılar MKM ile gözlenmiştir. Bu yapıların manyetik alan içindeki davranışları ölçülmüştür. Modelleme ile örtüşen bu ölçümlerle çapları 100 nm altında RV 'lerin 300 nm çaplı disklerde kararlı bir şekilde elde edildiği anlaşılmıştır.
- ★ RV'ler manyetik alana paralel olarak hareket etmektedirler. Yüksek manyetik alanlarda at-nalı yapılarına dönüşmektedir.
- ★ RV yapılarına elverişli spin valf aygıtları tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu aygıtlarda yapılan ölçümlerde 2,6 - 3,6 GHz aralığında yüksek frekans dinamikleri tespit edilmiştir. Çizgi genişliği yine birkaç MHz olan bu sinyallerin büyüklüğü antivortesklerde ölçülene kıyasla daha küçüktür.
- ★ Çeşitli örneklerde sinyal frekansları ve bu frekansların akımla değişimi farklılık göstermektedir. Bunun farklı RV içeren farklı mikro-manyetik konfigürasyonların varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- ★ Sıcaklığa bağlı ölçümlerde sinyal büyüklüğünün arttığı ve çizgi genişliğinin küçüldüğü gözlenmiştir. Ayrıca örneğin titreşim frekansı ve akıma bağlı davranışı da değişebilmektedir. Bazı örneklerde oda sıcaklığında frekans akımla sabit kalırken düşük sıcaklıklarda akımla artış göstermiştir.

Bu proje sonucunda nadir rastlanan anti-vorteks yapıları kararlı bir şekilde oluşturulmuş ve deneysel olarak gözlenmiştir. Yapılan deneylerde belirlenen anti-vorteks dinamiklerinin GHz mertebesinde salınan vorteks dinamiklerine kıyasla çok daha düşük frekanslarda oluştuğu ve çizgi genişliklerinin daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Her ne kadar bu bulgular heyecan verici ise de antivortekslerin çip-üstü osilatör uygulamaları için çok da uygun yapılar olmadığı sonucuna varılmıştır. Ta malzemesinden Py astoridlere SHE ile bir spin akımı enjekte edilebilmiştir. Pt gibi daha yüksek spin Hall açısına sahip malzemeler ve daha uygun bir elektrot yapısı ile bu etki yüksek frekans dinamiklerini tetiklemek üzere kullanıma uygundur.

RV dinamikleri antivortekslere oranla çok daha yüksek rezonans frekansı ve kalite faktörüne sahiptir. RV yapılarının spin-valf aygıtlarında kullanılabildikleri gösterilmiştir. Bu şekilde çip-üstü osilatör uygulamaları için elverişli oldukları sonucuna varılmıştır. RV skyrmionlarının teorik modellemesi üzerine Physical Review Letters yüksek etki faktörlü dergisinde yayınlanmıştır: "Magnetic Radial Vortex Stabilization and Efficient Manipulation Driven by the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Spin-Transfer Torque" Siracusano, G; Tomasello, R;

Giordano, A; Puliafito, V; Azzerboni, B; Ozatay, O; Carpentieri, M ve Finocchio, G. Physical Review Letters, 117, 8, 087204, 2016. RV'lerin deneysel olarak gözlenmesi ve statik özellikleri ile ilgili ikinci makale yazım aşamasındadır.

SHE ölçümlerinden yola çıkarak saf spin akımlarının kullanıldığı 3B bir manyetik hafıza ünitesi tasarlanmıştır. Patent başvurusu için tarifname yazım aşamasındadır. Bu tamamlandığında fikri ürün bildiriminde bulunulacaktır.

Bu proje boyunca uluslararası konferanslardan APS 2016, APS 2015, MMM 2015'de dört adet bildiri sunulmuştur. Bir doktora öğrencisi ve üç lisans öğrencisi bursiyer olarak desteklenmiştir. Proje çıktılarından bir makale yayınlanmış, bir makale yazım aşamasındadır. Aynı zamanda bir aygıt tasarımı patentlenmek üzere tarifname yazım aşamasındadır. Proje kapsamında bir doktora öğrencisi İtalya'ya seyahat etmiş ve aygıt tasarımlarına dahil olmuştur. İtalya tarafı da Türkiye'yi ziyaret ederek ölçümler hakkında bilgi edinmiştir. Ayrıca İtalya ve Türkiye arasında Skype aracılığıyla düzenli toplantılar yapılmış ve bilgi alışverişi, veriler üzerinde istişareler sağlanmıştır.

5. KAYNAKÇA

[1] Chien C. L., Zhu F. Q. & Zhu J.-G., 2007 “Patterned Nanomagnets”, Phys. Today 60, 40.

[2] Choe S.-B., Acremann Y., Scholl A., Bauer A., Sto J. & Padmore H. A., 2004, “Vortex Core-Driven Magnetization Dynamics”, Science 304, 420–422.

[3] Jiang L., Gokce A., da Silva F. C. S. & Nowak E. R., 2005, “Zigzag-shaped AMR magnetic sensors: Transfer characteristics and noise (Invited Paper)”, in Noise Inf. Nanoelectron. Sensors Stand. III (Bergou, J. A., Smulko, J. M., Dykman, M. I. & Wang, L.) 5846, 156–168.

[4] Abes M., Venuat J., Muller D., Carvalho A., Schmerber G., Beaurepaire E., Dinia A. & Pierron-Bohnes V., 2004, “Magnetic patterning using ion irradiation for highly ordered CoPt alloys with perpendicular anisotropy”, J. Appl. Phys. 96, 7420–7423.

[5] Im M.-Y., Fischer P., Yamada K., Sato T., Kasai S., Nakatani Y. & Ono T., 2012, “Symmetry breaking in the formation of magnetic vortex states in a permalloy nanodisk”, Nat Commun 3, 983.

[6] Shigeto K., Okuno T., Mibu K., Shinjo T. & Ono T., 2002, “Magnetic force microscopy observation of antivortex core with perpendicular magnetization in patterned thin film of permalloy”, Appl. Phys. Lett. 80, 4190.

[7] Haldar A. & Buchanan K. S., 2013, “Magnetic antivortex formation in pound-key-like nanostructures”, Appl. Phys. Lett. 102, 112401–4.

[8] Ragusa C., Carpentieri M., Celegato F., Tiberto P., Enrico E., Boarino L. & Finocchio G., 2011, “Magnonics Crystal Composed by Magnetic Antivortices Confined in Antidots”, IEEE Trans. Magn. 47, 2498–2501.

[9] Pues M., Martens M., Kamionka T. & Meier G., 2012, “Reliable nucleation of isolated magnetic antivortices”, Appl. Phys. Lett. 100, 162404.

[10] Moutafis C., Komineas S., Vaz C., Bland J., Shima T., Seki T. & Takanashi K., 2007, “Magnetic bubbles in FePt nanodots with perpendicular anisotropy”, Phys. Rev. B 76.

[11] Fert A., Cros V. & Sampaio J., 2013, “Skyrmions on the track”, Nat Nano 8, 152–156.

[12] Yu X. Z., Onose Y., Kanazawa N., Park J. H., Han J. H., Matsui Y., Nagaosa N. & Tokura Y., 2010, “Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal”, Nature 465, 901–904.

[13] Rößler U. K., Bogdanov A. N. & Pfleiderer C., 2006, “Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals”, Nature 442, 797–801.

[14] Heinze S., von Bergmann K., Menzel M., Brede J., Kubetzka A., Wiesendanger R., Bihlmayer G. & Blugel S., 2011, “Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions”, Nat Phys 7, 713–718.

[15] Shinjo T., 2000, “Magnetic Vortex Core Observation in Circular Dots of Permalloy”, Science 289, 930–932.

[16] Bader S., 2006, “Colloquium: Opportunities in nanomagnetism”, Rev. Mod. Phys. 78, 1–15.

[17] Kasai S., Nakatani Y., Kobayashi K., Kohno H. & Ono T., 2006, “Current-Driven Resonant Excitation of Magnetic Vortices”, Phys. Rev. Lett. 97.

[18] Kim S.-K., Choi Y.-S., Lee K.-S., Guslienko K. Y. & Jeong D.-E., 2007, “Electric-current-driven vortex-core reversal in soft magnetic nanodots”, Appl. Phys. Lett. 91, 082506.

[19] Pribiag V. S., Krivorotov I. N., Fuchs G. D., Braganca P. M., Ozatay O., Sankey J. C., Ralph D. C. & Buhrman R. A., 2007, “Magnetic vortex oscillator driven by d.c. spin-polarized current”, Nat. Phys. 3, 498–503.

[20] Finocchio G., Torres L., Consolo G., Carpentieri M. & Azzerboni B., 2009, “Magnetic vortex driven by non-uniform injection of spin-polarized current in nano-scale spin valves”, J. Magn. Magn. Mater. 321, 602–606.

[21] Finocchio G., Ozatay O., Torres L., Buhrman R., Ralph D. & Azzerboni B., 2008, “Spin-torque-induced rotational dynamics of a magnetic vortex dipole”, Phys. Rev. B 78.

[22] Drews A., Krüger B., Bolte M. & Meier G., 2008, “Current- and field-driven magnetic antivortices”, Phys. Rev. B 77.

[23] Wang H. & Campbell C., 2007, “Spin dynamics of a magnetic antivortex: Micromagnetic simulations”, Phys. Rev. B 76.

[24] Ruotolo A. et al., 2009, “Phase-locking of magnetic vortices mediated by antivortices”, Nat. Nanotechnol. 4, 528–32.

[25] Jonietz F. et al., 2010, “Spin Transfer Torques in MnSi at Ultralow Current Densities”, Science 330, 1648–1651.

[26] Schulz T. et al., 2012, “Emergent electrodynamics of skyrmions in a chiral magnet”, Nat. Phys. 8, 301–304.

[27] Pfleiderer C. & Rosch A., 2010, “Single skyrmions spotted”, Nature 465, 880–881.

[28] Lee M., Kang W., Onose Y., Tokura Y. & Ong N. P., 2009, “Unusual Hall Effect Anomaly in MnSi under Pressure”, Phys. Rev. Lett. 102, 186601.

[29] Neubauer A., Pfleiderer C., Binz B., Rosch A., Ritz R., Niklowitz P. G. & Böni P., 2009, “Topological Hall Effect in the A Phase of MnSi”, Phys. Rev. Lett. 102, 186602.

[30] Kanazawa N., Onose Y., Arima T., Okuyama D., Ohoyama K., Wakimoto S., Kakurai K., Ishiwata S. & Tokura Y., 2011, “Large Topological Hall Effect in a Short-Period Helimagnet MnGe”, Phys. Rev. Lett. 106, 156603.

[31] Kato Y. K., 2004, “Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors”, Science 306, 1910–1913.

[32] Wunderlich J., Kaestner B., Sinova J. & Jungwirth T., 2005, “Experimental Observation of the Spin-Hall Effect in a Two-Dimensional Spin-Orbit Coupled Semiconductor System”, Phys. Rev. Lett. 94.

[33] Sinova J., Culcer D., Niu Q., Sinitsyn N., Jungwirth T. & MacDonald A., 2004, “Universal Intrinsic Spin Hall Effect”, Phys. Rev. Lett. 92.

[34] Hirsch J. E., Spin hall effect, 1999, Phys. Rev. Lett. 83, 1834.

[35] Jungwirth T., Wunderlich J. & Olejník K., 2012, Spin Hall effect devices, Nat. Mater. 11, 382–390.

[36] Seki T., Hasegawa Y., Mitani S., Takahashi S., Imamura H., Maekawa S., Nitta J. & Takanashi K., 2008, Giant spin Hall effect in perpendicularly spin-polarized FePt/Au devices, Nat. Mater. 7, 125–9.

[37] Nakayama H., Ando K., Harii K., Kajiwara Y., Yoshino T., Uchida K. & Saitoh E., 2010, Inverse Spin-Hall Effect Induced by Spin Pumping in Different Thickness Pt Films, Magn. IEEE Trans. 46, 2202–2204.

[38] Mosendz O., Pearson J. E., Fradin F. Y., Bauer G. E. W., Bader S. D. & Hoffmann A., 2010, “Quantifying Spin Hall Angles from Spin Pumping: Experiments and Theory”, Phys. Rev. Lett. 104, 046601.

[39] Mosendz O., Vlaminck V., Pearson J. E., Fradin F. Y., Bauer G. E. W., Bader S. D. & Hoffmann A., 2010, “Detection and quantification of inverse spin Hall effect from spin pumping in permalloy/normal metal bilayers”, Phys. Rev. B 82, 214403.

[40] Obstbaum M., Hartinger M., Meier T., Swientek F., Back C. H. & Woltersdorf G., Inverse Spin Hall Effect in Ni81Fe19 / Normal Metal Bilayers, arXiv:1307.2947v1

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ÖZHAN ÖZATAY
Proje No:	113F378
Proje Başlığı:	Nano-Ölçekli Manyetik Aygıtlarda Spintronik Ve Spinorbitronik Etkileşimleri
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	ARİF ÖZBAY
Danışmanlar:	HAMDİ TORUN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	BOĞAZİÇİ Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/04/2014 - 15/10/2016
Onaylanan Bütçe:	248470.0
Harcanan Bütçe:	211845.08
Öz:	Yığın (bulk) halinde, makroskopik düzeyde, basitçe kuzey ve güney kutuplarından oluşan bir mıknatıs nano boyutlara indirgendiğinde tek yönelimli (single domain) mıknatıslanmadan, vorteks, anti-vorteks ve baloncuklara (bubble) kadar çok farklı mikromanyetik konfigürasyonlar gösterebilir. Bu oluşumlardan hangisinin kararlı olacağını belirleyen birbirleriyle yarışan magnetostatik, değiş-tokuş (exchange) ve magneto-kristal ve/veya şekil anizotropisi enerjileridir. Bununla beraber güçlü spin-yörünge yönelimli ağır metallerle (Pt gibi) arayüze sahip manyetik nano-aygıtlarda spin yönelimleri döngüsel yapı gösteren ve Skyrmion adı verilen vorteks benzeri farklı topolojik yapılara rastlanmıştır. Bu döngüsel yönelimlere manyetik kristaldaki akis (inversion) simetrisinin bozulması ve buna bağlı Dzyaloshinskii?Moriya etkileşimlerinin (DMI) yol açtığı düşünülmektedir. Bu projenin ana bilimsel hedefi bu tür karmaşık spin yönelimlerinin oluşum koşullarının mikromanyetik simülasyonlarla belirlenmesi; söz konusu oluşumların gözlemlenebileceği farklı geometrili nano-yapıların fabrikasyonu; üretilen aygıtların spin kutuplanmış elektrik akımı, dış manyetik alan ve sıcaklığa bağlı dinamik davranışlarının güçlü ve zayıf spin-yörünge etkileşimi durumlarında incelenmesinden ibarettir. İtalya tarafında Prof. Finocchio ve Prof. Carpentieri grupları tarafından nümerik modelleme ile belirlenen aygıt tasarımları İtalya?da Prof. Albertini ve Prof. Tiberto grupları ve eş zamanlı olarak Türk tarafında üretilmiştir. Oluşan karmaşık spin yönelimleri manyetik kuvvet mikroskobunda görüntülenmesi Prof. Torun?un da danışmanlığında Türk tarafında gerçekleştirilmiştir. Üretilen astroid şekilli Ni81Fe19 nanomıknatıslarda kararlı anti-vorteks yapıları başarıyla oluşturulmuştur. Bu aygıtların elektriksel özelliklerinin manyetik alanla değişimi incelenmiş, 200 m??luk direnç değişimi (manyetik-direnç, MR) kaydedilmiştir. MR mekanizması bir okuma yöntemi olarak kullanılarak aygıtların direk akım altında spin-aktarımı yoluyla tetiklenen radyo frekansındaki magneto-dinamik özellikleri araştırılmış, manyetik alan, spin-kutuplanmış akım ve sıcaklığa bağlı tüm elektriksel karakterizasyonu Türk tarafında gerçekleştirilmiştir. Yoğun spin-yörünge etkileşimli Pt metalinin üzerine büyütülen manyetik ince filmlerin kullanıldığı çoklu katmanlı manyetik nano-disklerde DMI etkileşimi incelenmiş, bu etkinin belirli değerlerinde özgün radyal-vorteks skyrmion yapılarının oluştuğu gözlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları çok yoğun veri depolama üniteleri, manyetik mantık devreleri, yonga (çip) üzerinde mikrodalga üreteçleri, modülatör ve dedektör, skyrmion bazlı spin-tork belleği ve spin mantık aygıtları gibi spintronik aygıtlarda potansiyel uygulama alanı bulabilecek aygıt tasarımları için yol göstericidir.
Anahtar Kelimeler:	Skyrmiyonlar, Spin Hall Etkisi, Anti-vorteks, Spin Tork Etkisi, Mikro-manyetik Modelleme
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Spin Torque induced anti-vortex excitations (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 2- Spin Torque Driven Anti-vortex Dynamics in Patterned Nanomagnets (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 3- Static and Dynamic Properties of Magnetic Antivortices in Patterned Permalloy Nanomagnets (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 4- Static and Dynamic Properties of Magnetic Antivortices inAstroid-Shaped Permalloy Nanomagnets (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 5- Magnetic Radial Vortex Stabilization and Efficient Manipulation Driven by the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Spin-Transfer Torque (Makale - İndeskli Makale),

TÜBİTAK