Nanoaygıtlarda Manyetik Baloncukların Manyetik Alan Ve/Veya Spin-Kutuplanmış Akım İle Etkileşimi

Program Kodu: 2504

Proje No: 114F318

Proje Yürütücüsü:

Doç. Dr. Özhan ÖZATAY

Araştırmacı(lar):

Yard. Doç. Dr. Arif ÖZBAY

Danışman(lar):

Doç. Dr. Hamdi TORUN,

Prof. Dr. Giovanni FINOCCHIO (Y.Dışı)

Bursiyer(ler):

Vedat KARAKAŞ, Ali Taha HABİBOĞLU, İbrahim ÇİNAR, Aytaç PAÇAL

Mayıs 2017

ÖNSÖZ

Manyetik malzemeler ve bu malzemelerin desenlenmesi sonrasında oluşan mikro-manyetik yönelimler potansiyel uygulama alanları ile teknolojik aygıtlarda yerlerini almaya başlamıştır. Vorteks, anti-vorteks, skyrmion ve manyetik baloncuk yapıları enerjik olarak kararlı yapılardır. Özellikle yeni fabrikasyon tekniklerinin gelişmesi, ve manyetik görüntüleme yöntemlerinin geliştirilmesi, yeni ölçüm metotlarının keşfi ve manyetizma dinamiklerinin daha iyi anlaşılması ile bu yapılar ilgi odağı haline gelmiştir. Manyetik baloncuk yapıları düzleme dik manyetik anizotropili (DDMA) malzemelerde görülen kararlı manyetik yönelimlerdir. Baloncuk vb. mikromanyetik yapılar spin transfer torkunun (STT) etkisinde düzenli olarak değişen moment yönelimleri sonucunda yapının dönmesine benzer bir hareket ortaya koyarlar. Nano-saniye mertebesinde bir periyodu olan bu hareket GHz frekansında mıknatıslanma salınımlarına tekabül eder.

Bu proje kapsamında manyetik baloncukların oluşumuna elverişli DDMA filmler büyütülmüş ve nano ve mikro boyutlarda desenlenmiş diskler üretilmiştir. Bu disklerde öncelikle farklı manyetik alan koşullandırmaları ile baloncuk oluşumları manyetik kuvvet mikroskobunda incelenmiş ve oluşumun verimliliğine göre alternatif baloncuk oluşturma yöntemi olan baloncuk yazma işlemi değerlendirilmiştir. Projenin ikinci etabında baloncuk oluşumu gözlenen disklerden üretilen spin-valf çoklu katmanlı yapılarında yine STT etkisiyle baloncukların disk merkezinde dönme hareketi tetiklenerek GHz salınımları GMR yoluyla tespit edilmiştir. Bu şekilde manyetik baloncuk yapısına sahip disklerin statik ve dinamik özellikleri karakterize edilmiştir.

TÜBİTAK “114F318” kodlu ikili ilişkiler projesinde Fransız tarafıyla işbirliği sayesinde gerek farklı çok katmanlı manyetik ince filmler gerekse farklı aygıt geometrilerinde ölçümler yapılması mümkün olmuştur . Nano-aygıt tasarımı ve üretimi kapsamında da Fransız ekiplerden destek alınmış ve Fransız ekiplerine manyetik ve elektriksel karakterizasyon yönünde destek verilmiştir. Proje için gerekli sarf malzemeleri ve darbe üreteci ile temiz oda işlemleri için hizmet alımları Tübitak tarafından desteklenmiştir. Bu şekilde karşılıklı iş birliği ile yürüyen projede iki doktora öğrencisi (İbrahim Çinar ve Vedat Karakaş) ve iki yüksek lisans öğrencisi (Aytaç Paçal ve Ali Taha Habiboğlu) bursiyer olarak desteklenmiştir. Her iki doktora öğrencisi de Fransa seyahat desteği ile oradaki grubu ziyaret ederek nano-aygıt tasarımında eğitim almış, konferans seyahat desteği ile uluslararası bir konferansta bildiri sunmuştur. Bu yolla yüksek nitelikli genç bilim adamlarının yetiştirilmesine katkıda bulunulmuştur.

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ....16
1.1 Kapsam ve Amaç....16
2. LİTERATÜR ÖZETİ....18
3. GEREÇ VE YÖNTEM....23
3.1. YÖNTEM....23
3.2. ARAÇ ve GEREÇLER....27
3.2.1. İnce Film Üretimi ve Karakterizasyonu....27
3.2.2. Manyetron Saçtırma ile Film Büyütme....27
3.2.3. Profilometre ile Kalınlık Kalibrasyonu....29
3.2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 34
3.2.5. XPS ve EDX....36
3.2.6. Titreşen Örnek Magnetometresi (VSM)....44
3.2.7. Atomik ve Manyetik Kuvvet Mikroskobu....51
3.2.8. Elektron Demet Litografisi ile Aygıt Desenleme....60
3.2.8.1. Lift-off Yöntemi....61
3.2.8.2. İyon Aşındırma Yöntemi....63
3.2.8.3. Nano-Kontaklı yapılar....66
3.2.8.4. Fotolitografi ile Kontak Yüzeylerinin oluşturulması....67
3.2.8.5. Spin-Valf Nano Sütunlarının Üretim Basamakları....69
3.2.9. Filmlerin Manyetik, Elektriksel ve Yüzey Ölçümü için Deney Düzenekleri....74
3.2.9.1.Manyetik Ölçüm Düzeneğinin Kurulması....74
3.2.9.2.Elektriksel Ölçüm Düzeneğinin Kurulması....75
3.2.9.2.1. Elektriksel Bağlantılar....78
3.2.9.2.2. AC Direnç Ölçümleri....81
3.2.9.2.3. Yüksek Frekans Sinyal Ölçüm Düzeneği....83
3.2.9.2.4. Sıcaklığa Bağlı Ölçüm Düzeneği....88
3.2.10. GMW AC Manyetik Alan Koşullama....92
4. BULGULAR....94
4.1. Manyetik Karakterizasyon....95
4.2. Baloncuk Oluşumu Çalışmaları için Üretilen Örnekler....104
4.3. Baloncuk Oluşum Koşullarının Araştırılması....105
4.3.1.Manyetik Alan Koşullanması İle Baloncuk Oluşumu....106
4.3.1.1. B1 örneklerinde baloncuk oluşumu....106
4.3.1.2. B3 örneklerinde baloncuk oluşumu....116

4.3.2. Isı-Destekli Baloncuk Oluşumu.....119
4.3.3. İletken AKM ile Akım Aşılayarak Baloncuk Oluşumu.....124
4.4. Spin-Valf Üretimi ve Baloncuk Oluşum Koşulları.....132
4.4.1. Spin-valf Aygıtlarında Baloncuk Oluşum Koşullarının Tespit Edilmesi.....136
4.5. Yüksek Frekans Dinamiklerinin Elektriksel Tespiti.....141
4.6. Sonuçlar ve Tartışma.....145
5. KAYNAKLAR.....147

Şekil Listeleri

Şekil 2.1: Nanomıknatıslarda olası farklı mikromanyetik konfigürasyon örnekleri a) vorteks b) antivorteks c) baloncuk.....19
Şekil 2.2: Kare şeklindeki manyetik ince film için dairesel hareketin a) şematik gösterimi ve b) gerçek XMCD görüntüsü.....20
Şekil 2.3: D=0,5 μm çapında ve 50 nm kalınlığındaki FePt disklerde a) atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) ve b) magnetik kuvvet mikroskopisi (MFM) yöntemi ile gözlenen manyetik baloncuk.....21
Şekil 2.4: Skyrmion sayısı n=1 olan bir manyetik baloncuğun bir dış alan gradienti uygulanmadan a) önceki ve b) sonraki spin dizilimi. Mavi düzlem gözlemciye, kırmızı sayfaya yönelimi göstermektedir. Beyaz ise momentlerin sayfa düzleminde olduğu durumdur.....22
Şekil 3.1.1: Manyetik baloncuk nano-osilatör.....24
Şekil 3.1.2: Mikromanyetik simülasyon (ön çalışma) sonuçları (a) Rezonans frekansının alana ve spin kutuplanmış akım yoğunluğuna göre değişimi (ön çalışmalar için yapılan disk örnekler ve MFM ile gözlemlenen baloncuk oluşumu- ekli resim) (b) Spin kutuplanmış akım etkisiyle baloncuk hareketi.....25
Şekil 3.1.3: Manyetik baloncuk dinamiğinin dışardan uygulanan manyetik alan ve elektrik akımına bağlı olarak RF spektrumunun ölçüm düzeneği.....27
Şekil 3.1.4: 1.25 mikro metre çaplı (Co/Ni)x10 çok katmanlı disklerde (a) 4000 Oe ve b) 4500 Oe genlikli ac demagnetizasyon sonucunda elde edilen kararlı manyetik baloncukların manyetik kuvvet mikroskobu görüntüsü.....28
Şekil 3.2.2.1: Saçtırma sisteminin basit bir çizimi.....29
Şekil 3.2.2.2: AJA Manyetron Saçtırma Sistemi.....30
Şekil 3.2.3.1: Kalınlık kalibrasyonu için kullanılan alttaşların şematik çizimi, optik mikroskop görüntüsü.....31
Şekil 3.2.3.2: KLA Tencor marka yüzey profilometresi ve çalışma prensibi.....32
Şekil 3.2.3.3: Profilometre ile alınmış kalibrasyon ağı ölçümü.....32
Şekil 3.2.3.4: (a) CoNi ince filmlerin EDX grafiği ve bulunan Co:Ni yüzdeleri (b) CoNi filmlerinin yüzeyinden bir SEM görüntüsü (c) CoNi filminin oda sıcaklığında düzleme paralel manyetik alanda alınmış VSM ölçümü..... 35
Şekil 3.2.4.1: SEM şematik çizimi ve örnek bir SEM görüntüsü.....36
Şekil 3.2.4.2: CoNi filmlerin yüzeyinden farklı tarama alanları için alınan bir SEM görüntüsü.....36
Şekil 3.2.4.3: Farklı çaplı Pt/CoFeB/Ti nano-sütunlarının yüzeyinden alınan SEM görüntüleri.....37

Şekil 3.2.5.1: X-ışını radyasyonu altında fotoelektrik etkinin gösterimi.....38
Şekil 3.2.5.2: XPS çalışma prensibi.....39
Şekil 3.2.5.3: SiO_2 filminin CasaXPS yazılımındaki tarama görüntüsü.....40
Şekil 3.2.5.4: XPS verileri üzerinde piklerin ve pik parametrelerinin belirlenmesi.....41
Şekil 3.2.5.5: EDX şematik çizimi.....43
Şekil 3.2.5.6: Üretilen ince filminde yapılan EDX ölçümleri ve ölçüm sonucunda hesaplanan elementlerin ağırlık ve atomik yüzdeleri (a) Py (Ni81Fe19) (b) CoPt (c) CoNi..45
Şekil 3.2.6.1: Quantum Design Dynacool Fiziksel Ölçüm Cihazı (PPMS) sistemine entegre edilmiş Titreşen örnek manyetometresi (VSM) ve şematik çizimi.....47
Şekil 3.2.6.2: Torna cihazında üretimi (a) ve bitmiş hali (b) gösterilen VSM cihazı çubukları Delrin denen yumuşak malzemeden yapılmıştır.....47
Şekil 3.2.6.3: 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.....48
Şekil 3.2.6.4: AFM/FM çoklu katmanlarında değiş-tokuş eğilimi etkisiyle oluşan M-H grafiği ve mikro-manyetik konfigürasyonun şematik çizimi.....49
Şekil 3.2.6.5: 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.....50
Şekil 3.2.6.6: Py filmin sıcaklığa bağlı doygunluk mıknatıslanması düşük sıcaklıklarda ve VSM-fırın modülü ile alınan veriler 51
Şekil 3.2.6.7: $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ malzemesinin VSM'de yapılmış sıcaklığa bağlı manyetik karakterizasyonu. Ölçümler düzleme paralel 2k Oe manyetik alan altında yapılmıştır.....52
Şekil 3.2.7.1: AKM çalışma prensibi ve örnek bir yüzey profili.....53
Şekil 3.2.7.2: AKM ile alınmış SiO_2 filminin yüzey topografisi.....54
Şekil 3.2.7.3: MKM çalışma prensibi ve örnek topografi görüntüsü ve benzer yapıdaki MKM görüntüsü.....55
Şekil 3.2.7.4.: Bruker AKM'de manyetik alan altında MKM görüntülemeleri için tasarlanmış manyetik alan uygulayan platformları (b) düzleme dik ve (c) düzleme paralel manyetik alan uygulayabilmektedir.....56
Şekil 3.2.7.5.: 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.....57
Şekil 3.2.7.6: Z eğrisi metodunun 400 nm yarıçaplı nano sütunun AKM görüntüsü üzerindeki gösterimi.....58

Şekil 3.2.7.7: Örneğimizin çizimi ve üzerindeki altın kontağın gösterimi (sol taraftaki gösterim). Örneğimiz ve İ-AKM tablası arasında elektriksel bağlantıyı yapmak için kullandığımız devre (sağ taraftaki resim).....59
Şekil 3.2.7.8: Manyetik Uç (solda) ve 400 nm yarıçaplı nano sütunların manyetik momentlerinin (sağda) gösterimi.....59
Şekil 3.2.7.9: Akım darbesi gönderilmeden önce (CoFeB)60 400 nm yarıçaplı nano-sütunun durumu ve MKM fotoğrafı (sol tarafta) ve akım darbesi gönderildikten sonra 400 nm yarıçaplı nano-sütunun durumu ve MKM fotoğrafı (sağ tarafta).....60
Şekil 3.2.7.10: MKM iğnesinin manyetizasyonunu değiştirmek için kullandığımız aletin içinde bulunan mıknatısın ters çevrilme işleminin gösterimi.....60
Şekil 3.2.8.1: SUNUM'da bulunan EBL cihazı ve örnek bir astroid çizimi.....62
Şekil 3.2.8.1.1: Lift-Off yöntemiyle astroid şekilli nano-mıknatıs üretim aşamaları.....63
Şekil 3.2.8.1.2.: a) ve b) 1.2 μm çapındaki, Lift-off yöntemi ile üretilmiş olan örnekler.....64
Şekil 3.2.8.2.1: Nano-diskler için çeşitli çaplarda hazırlanmış disk dizinleri ve üretim sonrası alttaş üzerine çizilen desenin optik mikroskop görüntüsü..... 65
Şekil 3.2.8.2.2: İyon aşındırması ile nano-disklerin üretim basamakları.....66
Şekil 3.2.8.2.3: Nano-disklerin üretim sonrası AKM görüntüleri (a) 1200 nm, (b) 400 nm çaplı disk dizinleri CoNi/Pd için (c) 100 nm ve (d) 400 nm çaplı disk dizinleri CoFeB için.....66
Şekil 3.2.8.3.1: (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.....68
Şekil 3.2.8.4.1: SUNUM'daki Midas maske hizalayıcı..... 69
Şekil 3.2.8.4.2: Mikro-tel üretimi için kullanılan papyon şekilli fotomaske ve kontak maskesi hizalama işaretleri ile gösterilmiştir..... 69
Şekil 3.2.8.4.3: Birinci maskenin üretiminden sonra bir papyon deseni ve hizalama sonrası kontak yerleştirilmiş hali.....70
Şekil 3.2.8.5.1: Spin valf nano-sütunu ve kontaklar ile birlikte tasarımı.....71
Şekil 3.2.8.5.2: Spin valf aygıtlarının üretim prosedürü.....72
Şekil 3.2.8.5.3: AJA sisteminde son iyon aşındırması basamağı için tasarlanan örnek platformu.....73
Şekil 3.2.8.5.4: Spin-valf yapıları için tasarlanan üst kontak maskesi.....73
Şekil 3.2.8.5.5: Üretilmiş spin-valf aygıtlarının fotolitografi ile desenlenmiş üst elektrotlarının optik mikroskop görüntüsü..... 74
Şekil 3.2.9.1.1: Torna cihazında üretimi (a) ve bitmiş hali (b) gösterilen VSM cihazı çubukları Delrin denen yumuşak malzemeden yapılmıştır.....76
Şekil 3.2.9.2.1: a) Örnek platformunun ve (b) mikroskop tutucunun Solidworks çizimleri.....77
Şekil 3.2.9.2.2: Üretilen örnek platformu ve mikroskop tutucu, elektromıknatıs ve mikroskop

ile birlikte.....78
Şekil 3.2.9.2.1: Yonga tutucu için üretilen ek platform ve bunun örnek platformuna yerleştirilmiş hali.....79
Şekil 3.2.9.2.1.1: (a) Cascade marka RF prob kafası (b) Prob astroid aygıtının kontaklarına elektriksel bağlantı yaparken çekilmiş mikroskop görüntüsü.....80
Şekil 3.2.9.2.1.2: (a) KnS marka 4700 model Wire-Bonder ultrasonik kablo yapıştırıcı (b) Wedge adı verilen çelik iğne (c) wire-bonding yönteminin şematik bir çizimi.....81
Şekil 3.2.9.2.1.3: (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.....81
Şekil 3.2.9.2.2.1: AC direnç ölçümü için tasarlanan devre. Rx ile belirtilen 0.1 m Ω çözünürlüğe sahip bir değişken direnç ve Rx+δ ile ifade edilen örnek direncidir.....82
Şekil 3.2.9.2.2.2: AC direnç ölçüm düzeneği.....83
Şekil 3.2.9.2.2.3: Labview yazılımı ile yazılmış AMR ölçüm programı.....84
Şekil 3.2.9.2.3.1: Yüksek frekans sinyal tespiti için hazırlanmış düzenek. Osiloskopta 10 MHz bir test sinyali ve yükseltilmiş hali görülmektedir.....85
Şekil 3.2.9.2.3.2: Frekans uzayında sinyal analizi yapan ve kaydeden Labview programı....86
Şekil 3.2.9.2.3.3: 10 MHz test sinyali ve tüm frekans uzayındaki voltaj salınımları.....87
Şekil 3.2.9.2.3.4: Yüksek frekans ölçüm bağlantılarının şematik çizimi.....88
Şekil 3.2.9.2.3.5: 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.....89
Şekil 3.2.9.2.4.1: PPMS'e entegre edilmiş elektriksel ölçüm düzeneği PPMS kontrol bilgisayar ünitesi, örnek çemberi ve cihaz sisteminden oluşur.....90
Şekil 3.2.9.2.4.2: Lemo kablosunun bağlı olduğu anahtar kutusu ve PPMS'e ve cihaz sistemine bağlı görüntüsü..... 90
Şekil 3.2.9.2.4.3: PPMS örnek tutucusu (a), bunu düzlem içi manyetik alan sağlayacak biçime dönüştürecek tutucu ayak tasarımı ve tutucu ayağın (b) için hazırlanan yonga tutucu düzenek..... 91
Şekil 3.2.9.2.4.4: (a) CoNi/Pd ince filminden üretilmiş papyon desenli aygıt ve Au elektrotlar üzerine wire-bond tekniğiyle yapılmış bağlantılar (b) sıcaklığa bağlı öz direnç ölçümü.....93
Şekil 3.2.10.1: LabVIEW yazılım programında 22. Dereceden polinom (kırmızı çizgi) ile fit edilmiş manyetik alan'a karşılık akım değerlerinin (mavi noktalar) bulunduğu grafik gösteriyor ki -1 Tesla'dan ile +1 Tesla'ya uzanan fit fonksiyonu (kırmızı çizgi) ve gerçek değerler (mavi noktalar) arasında yer yer 20 mT'ya kadar farklar

görülebiliyor.....94
Şekil 3.2.10.2: Zamana bağlı manyetik alan değerleri kalibrasyon yapılabilmesi için ilk basamakta yapılam ölçümleri AC demagnetizasyon tekniği ile nasıl topladığımızı gösteriyor.....95
Şekil 4.1.1: Manyetik filmlerin farklı sıcaklıklarda düzleme dik manyetik alanda elde edilmiş VSM verileri (a) Ti/Pd/[CoNi/Pd]x22/Pd/Ti (b) Ta/Pt/[Co/Ni]x7/Pt (c) Ta/Pt/[Co/Ni]x12/Pt (d) Ta/Pt/[Co/Ni]x20/Pt..... 97
Şekil 4.1.2: VSM verilerinden elde edilen sıfırlayıcı alanın, Hc, (a-b) ve doygunluk mıknatıslanmasının, Ms, (c-d) sıcaklığa bağlı değişimi (a), (c) Ti/Pd/[CoNi/Pd]x22/Pd/Ti ve (b),(d) Ta/Pt/[Co/Ni]xN /Pt manyetik filmleri için tekrar sayısına göre çizilmiştir.....98
Şekil 4.1.3: CoNi/Pd filmlerinin yüksek sıcaklıklardaki doygunluk mıknatıslanması.....99
Şekil 4.1.4: CoNi/Pd filmlerinin (a), (b) AKM ile alınmış yüzey topografisi; (c) düzleme dik uygulanan 800 mT'dan 20 mT azalan basamaklarla azalan AC manyetik alan uygulaması sonrasında, (d) AC manyetik alan uygulaması sonrası 8 mT dik manyetik alanda ve (e) AC alan uygulaması sonrası 140 mT düzleme dik manyetik alanda alınmış MKM görüntüleri.....99
Şekil 4.1.5: Oda sıcaklığında düzlem içi bir manyetik alanda alınan VSM ölümleri $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$, 60 tekrarlı [Pt(5nm)/ $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ (1nm) /Ti(1nm] çoklu katmanlı yapısı için verilmiştir. $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$malzemesinin VSM'de yapılmış sıcaklığa bağlı manyetik karakterizasyonu. Ölçümler düzleme paralel 2k Oe manyetik alan altında yapılmıştır.....100
Şekil 4.1.6: Düşük sıcaklıklarrda düzleme dik (a ve b) ve düzlem içi (c ve d) manyetik alanda alınan . $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$için VSM ölçümleri.....101
Şekil 4.1.7: CoFeB ince filmi için alınan yüzey topografisi ve yüzey pürüzlülüğü.....102
Şekil 4.1.8: MKM görüntüsü a) (CoFeB)60\Pt(5 nm) b) (CoFeB)60\Pt(15 nm), c) (CoFeB)60\Pt(80 nm), d) (CoFeB)60\Pt(100 nm).....102
Şekil 4.1.9: Düzleme dik manyetik alan altında alınan VSM ölçümleri (((Ta(5)/Pt(10)/[Co(0,2)/Ni(0,6)]x8/Pt(5nm))).....103
Şekil 4.1.10: Ta(5)/Pt(10)/[Co(0,2)/Ni(0,6)]x8/Co(0.2nm)/Pt(5nm) AKM ile alınmış yüzey topografisi; MKM ile alınmış olan manyetik görüntü.....104
Şekil 4.2.1: Baloncuk oluşumuna elverişli mikro ve nano aygıtlar.....106
Şekil 4.3.1: Bruker AKM'de manyetik alan altında MKM görüntülemeleri için tasarlanmış manyetik alan uygulayan platformları (b) düzleme dik ve (c) düzleme paralel manyetik alan uygulayabilmektedir.....107
Şekil 4.3.1.1.1: 2400 nm çaplı disklerde baloncuk oluşumlarının düzlem içi manyetik alan altındaki Görüntüleri.....109

Şekil 4.3.1.1.1.2: 700 mT Hmax değerinden 20 mT basamaklarla 40 mT/sn hızla azalan AC mıknatıslığı.....111
Şekil 4.3.1.1.3: 20 mT basamaklarla 40 mT/sn artış hızıyla yapılmış AC alanda mıknatıslığı giderilmiş disklerde baloncuk oluşumu yüzdesi Hmax ve disk çapına göre çizdirilmiştir..... 112
Şekil 4.3.1.1.4: 675 mT Hmax değeri ve 40 mT/sn artış hızı ile AC alanda mıknatıslığı giderilmiş disklerde baloncuk oluşumu..... 114
Şekil 4.3.1.1.5: 675 mT Hmax değeri, 20 mT basamak ve 40 mT/sn artış hızı ile koşullandırılan disklerde farklı bekleme sürelerine ait MKM resimleri karşılaştırılmıştır.....115
Şekil 4.3.1.1.6: AC manyetik alan koşullandırma işlemi için kullanılan programın bir ekran görüntüsü. 6500 Oe maksimum manyetik alan, 120 dakika toplam süre, 4 dakika sinyalinin periyodu ve sinüs dalga şekli.....115
Şekil 4.3.1.1.7: 6500 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri sırayla 1.0 μm, 1.25 μm ve 1.5 μm çapındaki diskler için gösterilmiştir. Her birinin altında yüzde kaç baloncuk oluştuğu gösterilmektedir.....116
Şekil 4.3.1.1.8 6250 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleme 1.5 μm çapındaki diskler için gösterilmiştir.....117
Şekil 4.3.1.1.9: 6500 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 0.8 μm, 1.0 μm ve 1.2 μm ince teller için gösterilmiştir.....117
Şekil 4.3.2.1.1: B3 örneklerinin AKM görüntüleri (a) 300 nm ve (b) 1200 nm çaplı diskler için verilmiştir.....118
Şekil 4.3.2.1.2: B3 örneklerinin MKM görüntüleri (a)-(b) AC mıknatıslığı giderilmiş örnekler (a) 300 nm ve (b) 1200 nm çaplı diskler. (c)-(f) Düzleme dik uygulanmış 9T manyetik alan sonrası (c) 400 nm, (d) 1200 , (e) 500 nm ve (f) 600 nm çaplı disklerde.....120
Şekil 4.3.2.1: 2 μm x 12 μm mikrotellerin (a) AKM görüntüsü (b) düzleme dik manyetik alanda doygunlaştırıldığı haliyle MKM görüntüsü (c) düzlemden içer manyetik alanda doygunlaştırılmış yakın görüntüsü ve (d) düzleme dik AC manyetik alanda mıknatıslığı giderilmiş hali.....121
Şekil 4.3.2.2: AKM ile baloncuk yazma deneylerinin şematik çizimi ve buna elverişli örnek yerleştirme platformu.....122
Şekil 4.3.2.3: 2 μm x 12 μm ebatlarında mikrotelin mıknatıslanmış hali ve 3,2V luk 10 ns genişliğindeki akım darbeleri sonrası çekilmiş MKM görüntüsü.....123
Şekil 4.3.2.4: 300 nm genişliğindeki ve 3μm uzunluğundaki mikrotel üzerinde yapılan deneyler (a) Akım darbeleri sonucu oluşan MKM görüntüsü ve (b) AKM ucu ile yazma işlemi sonrası.....123
Şekil 4.3.2.5: 2 μm x 12 μm ebatlarında mikrotelde yapılan baloncuk yazma deneyinde telin

ilk hali ve bu duruma uygulanmış iki ayrı voltaj darbesi sonrası MKM görüntüleri...124
Şekil 4.3.3.1: İletken AKM 'de kullanılan test direnç kutusu ve bu kutu takılı iken alınan akım-voltaj Grafikleri....126
Şekil 4.3.3.2: Au kalınlık kalibrasyonu dörtgenlerinde yapılan i-AKM ölçümleri topografi ve i-AKM görüntüleri verilmiştir....126
Şekil 4.3.3.3: iletken AKM nin devre düzeneğinin şematik çizimi ve kurulu halinin resmi....128
Şekil 4.3.3.4: B3 örneklerinde yapılan i-AKM taraması....128
Şekil 4.3.3.5 : 100 kΩ seri dirençle bağlı Au alt kontaklı CoFeB/Pt dörtgen sütunlarında alınan Ölçümler....129
Şekil 4.3.3.6: CoFeB/Pt sütunlarında yapılan bir tarama....130
Şekil 4.3.3.7: (CoFeB) 60 tekrar 400 nm yarıçaplı nano-sütunun MKM görüntüleri, MKM iğnesinin manyetizasyonu iğnenin içine doğru iken (sol tarafta) ve MKM iğnesinin manyetizasyonu iğneden dışarı doğru iken (sağ tarafta)....131
Şekil 4.3.3.8: (CoFeB)60 tekrae 400 nm yarıçaplı nano-sütunun İ-AKM ile akım darbeleri gönderilerek deneyler yapılmasından önceki MKM görüntüsü (sol tarafta) ve aynı nano sütunların deneylerden sonraki görüntüsü (sağ tarafta). Mavi ve tonlarında işaretli olan yerlerde deneyden sonra Neel skyrmion'lar görülmeye başlanırken kırmızı ve tonlarındaki yuvarlakların işaret ettiği nano sütünların tek bir manyetizasyona sahip oldukları görülmektedir....132
Şekil 4.4.1: Temel Spin-valf Şeması....132
Şekil 4.4.2: Büyütülen Co/Pt malzemesinin DDMA özellik gösterdği VSM sonucu görülmektedir....133
Şekil 4.4.3: Büyütülen düzleme dik anizotropili manyetik malzemenin katmanlar halinde yapısı gösterilmektedir. Malzemeler ve parantez içinde film kalınlıkları belirtilmiştir....134
Şekil 4.4.4: Büyütülen Spin-valf malzemesinin VSM ölçümü görülmektedir....134
Şekil 4.4.5: Büyütülen düzleme dik anizotropili manyetik malzemenin katmanlar halinde yapısı gösterilmektedir. Malzemeler ve parantez içinde film kalınlıkları belirtilmiştir....135
Şekil 4.4.6: Büyütülen Spin-valf malzemesinin VSM ölçümü görülmektedir....135
Şekil 4.4.7: Büyütülen Spin-valf malzemesinin VSM ölçümü görülmektedir....136
Şekil 4.4.8 : Büyütülen düzleme dik anizotropili manyetik malzemenin katmanlar halinde yapısı gösterilmektedir. Malzemeler ve parantez içinde film kalınlıkları belirtilmiştir....136
Şekil 4.4.9: Büyütülen Spin-valf malzemesinin VSM ölçümü görülmektedir....137
Şekil 4.4.1.1: 6450 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.5 μm diskler için gösterilmiştir....139

Şekil 4.4.1.2: 6450 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.25 μm diskler için gösterilmiştir.....140
Şekil 4.4.1.3: 6450 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.0 μm diskler için gösterilmiştir.....140
Şekil 4.4.1.4 : 6450 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.0 μm, 0.6 ve 0.2 teller için gösterilmiştir.....141
Şekil 4.4.1.5 : 6950 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.0 μm, diskler için gösterilmiştir.....142
Şekil 4.5.1: (a) Elektriksel ölçümler için devre şeması; PPMS örnek platformları (b) düzlem içi ve (c) düzleme dik manyetik alan uygulaması için; (d) Ölçüm düzeneği ve (e) PPMS'e bağlı hali.....143
Şekil 4.5.2: (a) Frekans uzayı taraması sonucu örnek bir sinyal (b) B4 örneklerinde frekansın akıma bağlı değişimi (oda sıcaklığında) açık semboller 15 mT manyetik alan altında alınan verileri göstermektedir (w/H).....144
Şekil 4.5.3: B1-4 örneğinin sıcaklığa bağlı yüksek frekans salınım parametreleri.....145

Tablo Listeleri

Tablo 3.2.3.1. İnce filmlerin manyetron saçtırma sisteminde saçtırma koşulları.....33
Tablo 3.2.3.2. İyon aşındırma hızları.....34
Tablo 3.2.3.5.1 XPS Analizi sonuçları.....42
Tablo 4.3.1. B1 Örneklerinde Baloncuk Oluşum Koşulları ve Oluşum Yüzdesi.....110

ÖZET

Düzleme dik manyetik anizotropili (DDMA) malzemelerden üretilen nanoyapılarda manyetik konfigürasyonlardan hangisinin kararlı olacağını belirleyen magnetostatik, değiş-tokuş (exchange) ve magneto-kristal ve/veya şekil anizotropisi enerjileri ile birlikte dış manyetik alan varlığında ise Zeeman enerji ile birlikte belirleyici rol oynamaktadırlar. 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 çok yoğun veri depolama üniteleri, manyetik mantık devreleri, yonga (çip) üzerinde mikrodalga üreteçleri, modülatör ve dedektör gibi spintronik aygıtlarda potansiyel uygulama alanı bulabilecek, nano-aygıtlarda ve DDMA ince filmlerde spin-kutuplanmış akım ve/veya manyetik alan ile tetiklenebilen, manyetik baloncuk çekirdeklenmesi (nucleation), kuasi-statik düzenlenme biçimleri ve dinamiğinin gösterimi ve anlaşılması üzerinedir. Bu iddialı hedeflere ulaşmada başarılı olmak için ince film büyütme/ malzeme tasarlama, nanomanyetizma, manyetik ince filmlerin nano-fabrikasyonu ve karakterizasyonu ve spintronik aygıt tasarımı gibi tamamı Türk ve Fransız araştırma grupları tarafından eş zamanlı olarak yürütülmüştür. Proje süresince ihtiyaç duyulan nümerik modelleme için İtalya'dan Dr. Finnocchio'nun araştırma grubunun desteği alınmıştır. Manyetik kuvvet mikroskobu ölçümlerinin yorumlanması konusunda ayrıca Dr. Torun'un danışmanlığından faydanılmıştır. Bu proje çerçevesinde Türk tarafında CoNi/Pd, Fransa tarafında Co/Ni DDMAçok katmanlı ince filmlerde ve onlardan üretilen nanoyapılarda (disk, ince tel) manyetik baloncuk oluşumu, kuasi-statik konfigürasyonları ve manyetik alan içinde veya dışında spin-kutuplanmış akım ile etkileşimle tetiklenen manyetizasyon hareket dinamiğinin gösterimi ve anlaşılması üzerine çalışılmıştır. Bununla birlikte bir spin-valf yapısında RF osilatör ve manyetik sensör uygulamaları için radyo frekans (RF) manyetik baloncuk dinamiği sinyali ölçülerek ve akıma, manyetik alana bağlı olarak optimizasyonu yapılmıştır. Bu sayede kararlı olarak elde edilen baloncuk yapısının bir elektriksel devre elemanı olarak kullanılması sağlanmıştır. 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

Magnetostatic energy, exchange energy and magneto-crystalline and / or shape anisotropy energy and also in the presence of external magnetic field, Zeeman energy have an important role in determining on which magnetic configurations is stable in the nanostructures with perpendicular magnetic anisotropic (PMA) materials. However, magnetic nano-devices with strong spin-orbit-oriented heavy metals (such as Pt) have showed different vortex-like topological structures known as Skyrmion, which exhibit cyclic spin orientation. These cyclical orientations are thought to lead to the disruption of the inversion symmetry in the magnetic crystal and the resulting Dzyaloshinskii-Moriya interactions (DMI). The main scientific aim of this project is to find potential application areas in spintronic devices such as very dense data storage units, magnetic logic circuits, chip (microwave) generators, modulators and detectors, in nano-devices and in PMA thin films, spin-polarized current and / or the display and understanding of magnetic bubble nucleation, quasi-static regeneration, and thier dynamics. To succeed these ambitious goals, all research steps has been conducted simultaneously by Turkish and French research groups, such as thin film deposition / material design, nanomagnetism, nanofabrication and characterization of magnetic thin films and spintronic device design. Dr. Finnocchio's research group gave support for the numerical modeling during the project. Also, regarding the interpretation of magnetic force microscopic measurements, we benefited from Dr. Torun's advice. In this project, magnetic bubble formation in the CoNi / Pd on the Turkish research group, Co / Ni on the French research group PMA multilayer thin films and nanostructures produced (disk, wire), quasi-static configurations and in the presence and absence of magnetic field the magnetization motion dynamic induced by interaction with spin polarized current have been studied and understood. In addition to that, in a spin-valve structure, the radio frequency (RF) magnetic bubble dynamics signal was measured for RF oscillator and magnetic sensor applications, and it was optimized depending on the current and the magnetic field. It is ensured that the stable bubble structure can be used as an electrical circuit element. The results of this work are a guideline for device designs that can find potential applications in spintronic devices such as very dense data storage units, magnetic logic circuits, microwave generators on chip, modulator and detector, skyrmion based spin-torque memory and spin logic devices.

1.GİRİŞ

1.1 Kapsam ve Amaç

Bu projenin temel hedefi CoNi/Pd, Co/Pd ve/veya Co/Pt gibi DDMA ince filmlerde ve onlardan üretilen nanoyapılarda vorteks benzeri bir konfigürasyon olan manyetik baloncuk oluşumu, kuasi-statik konfigürasyonları ve manyetik alan içinde veya dışında spin-kutuplanmış akım ile etkileşimle tetiklenen manyetizasyon hareket dinamiğinin gösterimi ve anlaşılmasından oluşmaktadır. Her ne kadar spin transferle tetiklenen vorteks hareketi kavramı açıkça gösterilmiş olsa da, bu konudaki araştırmalar geleneksel geçiş metal alaşımlarına (NiFe, CoFe gibi) yoğunlaşmıştır. Bu düzlem içi anizotropiye sahip malzemeler genellikle anizotropinin aygıt geometrrisiyle belirlendiği yumuşak manyetik malzemelerdir. Bu proje ise yüksek yoğunluklu spin-kutuplanmış akım ile DDMA malzemelerde tetiklenen baloncuk adı verilen vorteks-benzeri konfigürasyonların, çekirdeklenme (nucleation) ve dinamik uyarılma mekanizmalarının derinlemesine tetkikini içermektedir.

Projede görev alan Türk ve Fransız ekiplerin geçtiğimiz yıllarda da çok başarılı ortak çalışmaları olmuştur [1,2]. Daha önceki çalışmalarda Landau-Lifshitz-Bloch makrospin modeli yardımıyla manyetik ince filmlerde Curie sıcaklığına yakın sıcaklıklarda boylamsal duygunluğun (longitudinal susceptibility) belirlenmesi [1], DDMA manyetik ince filmlerde lokal anizotropi dağılımı tespiti [2] gibi önemli bilimsel problemler ele alınmıştır. Taraflar elde edilen bu verimli işbirliğini bu projeyle genişletmişlerdir. Özetle projenin temel hedefleri aşağıda maddeler halinde listelenmiştir:

1. Düzleme dik anizotropili çok katmanlı manyetik ince filmlerin DC saçtırma metoduyla (DC Magnetron Sputtering) üretimi

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

3. Üretilen ince filmlerin X ışını kırınımı (XRD) ile kristal yapı ve X-ışını fotoelektron spektrometresi (XPS) ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi (EDX) ile stoikiometrisinin karakterizasyonu

4. Manyetik anizotropi, magnetizasyon gibi manyetik özelliklerin titreşen örnek magnetometresi ile sıcaklığa bağlı olarak ölçülmesi.

5. İletken atomik kuvvet mikroskobu ile üretilen filmlere ve nanoyapılara manyetik bir iğnenin ucundan spin-kutuplanmış akım aşılanması ve bunun sonucunda manyetik baloncuk oluşum koşullarının manyetik kuvvet mikroskobunda görüntüleme yoluyla belirlenmesi.

6. Baloncuk oluşum koşullarının tespitinin ardından DDMA film/ Bakır / CoNi veya FeNi yapılı spin-valf üretimine geçilmesi

7. Spin polarize akım aşılamasıyla çekirdeklenen baloncukların manyetik alana ve elektrik akımına bağlı radyo frekans hareket dinamiğinin magnetodirenç sinyalindeki değişimden faydalanarak ölçülmesi

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

Bu iddialı hedeflere ulaşmada başarılı olmak için ince film büyütme/ malzeme tasarlama, nanomanyetizma, manyetik ince filmlerin nano-fabrikasyonu ve karakterizasyonu ve spintronik aygıt tasarımı gibi tamamı Türk ve Fransız araştırma gruplarında yer alan pek çok uzmanlık alanı gerekmektedir. Bu nedenle projenin bir uluslarası işbirliği çerçevesinde yürütülmesi büyük önem kazanmıştır. Proje süresince gözlemlenen mikromanyetik konfigürasyonların ve dinamik modların derinlemesine analizi için ekibimizde yer alan bu konuda dünyanın önde gelen gruplarından biri olan Prof. Finocchio ve grubunun desteği alınmıştır.

[1] APPLIED PHYSICS LETTERS 101, 252407 (2012)

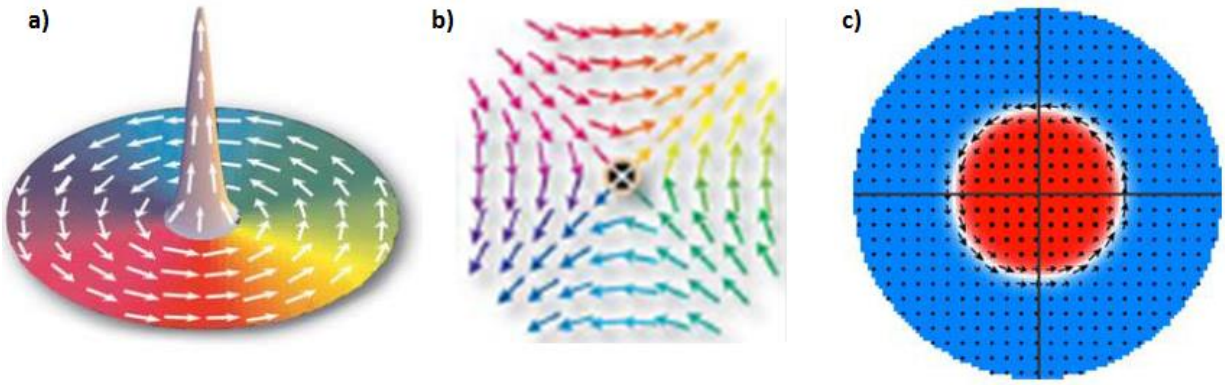
[2] APPLIED PHYSICS LETTERS 95, 172502 (2009)

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Nanomanyetizma genel anlamıyla, geometrik olarak nano metre düzeyinde boyutlandırılmış manyetik yapılarda ortaya çıkan ve çok geniş uygulama alanları vadeden, elektronun spin özelliğine bağlı taşınım ve spin dinamiği gibi yeni fiziksel olayların araştırılmasını içeren bir disiplindir. Bu çerçevede ultra-yoğun veri depolama araçları, spin tranzistörleri, manyetik mantık, mikrodalga osilatörleri, spine dayalı kuantum hesaplama, biomanyetik sensörler başta olmak üzere ekonomik ve sosyal getirisi çok yüksek olacak yeni teknolojilerin geliştirilmesine öncülük etmektedir. Bu hedeflere ulaşmak için önemli bazı temel fiziksel sorulara hem deneysel hem de teorik olarak cevap bulunması gerekmektedir. Bu soruların başında net spin taşıyan bir spin-kutuplanmış (spin-polarized) akım ile nanomıknatıslardaki vorteks ve benzeri gibi lokal konfigürasyonların etkileşim mekanizmalarının ne olduğu ve spintronik cihaz uygulamaları için hangi optimum koşullara ihtiyaç olduğudur. Bu projenin konusu düzleme dik manyetik anizotropili (DDMA) ince filmlerde yoğun spin-kutuplanmış akım aşılaması ile manyetik baloncukların oluşumu ve spin açısal momentum transferi etkileşimi sonucu baloncukların GigaHertz frekanslı dinamik özelliklerinin incelenmesi ve RF spintronik aygıtları için uygulama koşullarının belirlenmesinden ibarettir.

Projenin kapsamında düzleme dik anizotropili manyetik ince filmlerin hazırlanması, yapısal ve manyetik özelliklerinin karakterizasyonu, nano/mikro yapılandırma ile geometrik etkilerin inceleneği nanosütun ve disk benzeri yapıların hazırlanması, manyetik kuvvet mikroskobu ile spin aşılanmış örneklerde baloncuk oluşumu ve kuasi-statik benzeri konfigürasyonların görüntülenmesi, spin- kutuplanmış akım ve manyetik alan etkisiyle oluşan yüksek frekanslı dinamik hareketin karakterizasyonu ve spintronik aygıt uygulamaları için uygun koşulların belirlenmesi ve sonuçların mikromanyetik simülasyonlarla desteklenmesi yer almaktadır.

Manyetik malzemelerde manyetik moment dağılımını belirleyen, belli başlı enerji terimleri arasındaki ilişkidir. Bu enerjilerden şekle, boyuta ve malzemenin kendine has özelliklerine dayalı olan değiş-tokuş enerjisi atomik momentler arasındaki uyumu, magnetostatik enerji dış manyetik alanla etkileşimi, magnetokristal anizotropi enerjisi ise manyetizasyonun kolay yönelim eksenlerini tanımlar. Söz konusu manyetik malzemeler nanoboyutlara indirgendiğinde bu enerjiler arasındaki hassas dengedeki oynamalar neticesinde vorteks, antivorteks gibi farklı mikromanyetik düzenlenimler kararlı hale gelebilir [1,2] (Bkz. Şekil.2.1). Bu nano-oluşumlar statik özellikleriyle manyetik kayıt okuyucu, magnetodirenç rastgele erişim belleği (MRAM), manyetik alan ve/veya elektrik akımına bağlı dinamik davranışlarıyla da mikrodalga osilatör, rf dedektör ve modülatör gibi pek çok spitronik aygıtta uygulama alanına sahiptir.

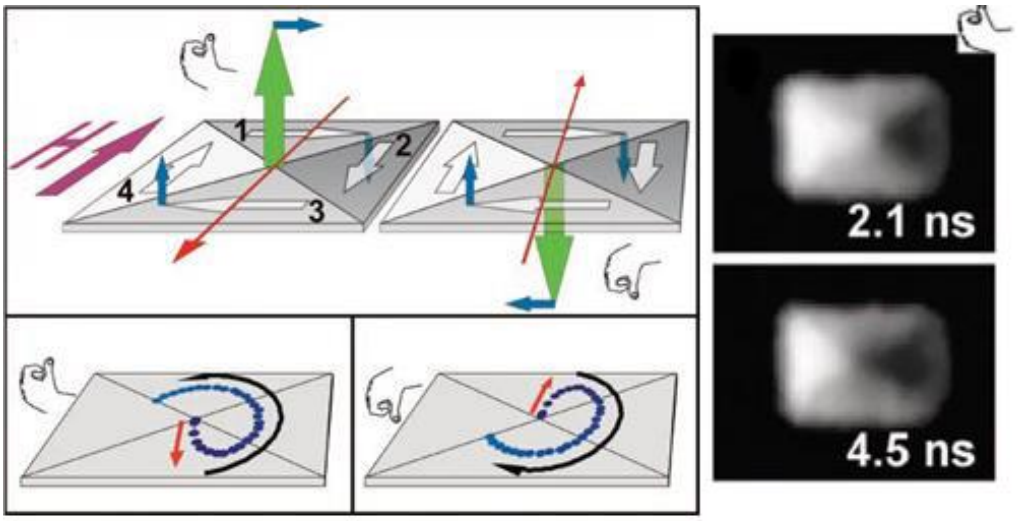


Şekil 2.1: Nanomıknatıslarda olası farklı mikromanyetik konfigürasyon örnekleri a) vorteks b) antivorteks c) baloncuk

Nano boyutlardaki düşük magnetokristal anizotropi enerjisine sahip manyetik ince filmler tek domen oluşumu için gerekli kritik bir çaptan büyük olduklarında manyetik vorteks düzenleniminde olma eğilimi gösterirler. Bu durum magnetostatik enerjinin diğer enerjilere göre baskın çıkmasının bir sonucudur. Bu vortekslerin merkezinde manyetik değiş-tokuş etkileşim enerjisinde meydana gelen süreksizlikten dolayı lokal manyetik momentlerin ince film düzlemine dik olarak yöneldiği tekil noktalar oluşur. Manyetik vorteksler genel olarak, merkezlerindeki bu tekil noktaların aşağı veya yukarı yönelimi (polaritesi), merkez etrafındaki manyetik momentlerin sarmalliği (winding number) ve sarma yönü (kiralite) 'ne bağlı olarak değer alan ve skyrmion sayısı adı verilen bir topolojik parametre ile sınıflandırılır. Örneğin Şekil 2.1a kiralitesi saat yönünün tersi yönde, polaritesi p=+1, sarmallığı n=+1 ve dolayısıyla skyrmion sayısı q=np/2=+1/2 olan bir vorteks konfigürasyonunu göstermektedir. Spine duyarlı görüntüleme tekniklerinden manyetik kuvvet mikroskopisi (MFM), vorteks merkezindeki polariteyi algılayabilirken, fotoemisyon elektron mikroskobu (PEEM) kiraliteyi belirleyebilir [1].

Teknolojik uygulamalar açısından bakıldığında manyetik vorteksler, kendi üzerine kapanan bir manyetik akıya (flux closure) sahip olduklarından diğer mikromanyetik oluşumlara göre hem daha kararlıdırlar hem de komşu vortekslerle etkileşimleri minimum (cross-talk ihmal edilebilir) düzeydedir. Bunun yanı sıra vortekslerin uygulanan bir dış manyetik alana tepki vererek hareket etmesi söz konusudur. Vorteks düzlemine paralel uygulanan DC bir manyetik alan içerisinde (alan büyüklüğü vorteks-tek domen geçiş eşik değerinden düşük olmak kaydı ile), uygulanan alanın yönü ve vorteksin sarma yönüne bağlı olarak vorteks merkezi kenarlara doğru geri döndürülebilir (sıfır manyetik alanda merkeze geri dönecek) şekilde kayar. Aynı zamanda düşük genlikli AC manyetik alan içerisinde vorteks merkezi GHz mertebesinde doğal bir titreşim frekansı ile bir dairesel hareket (gyration) yapar. Söz

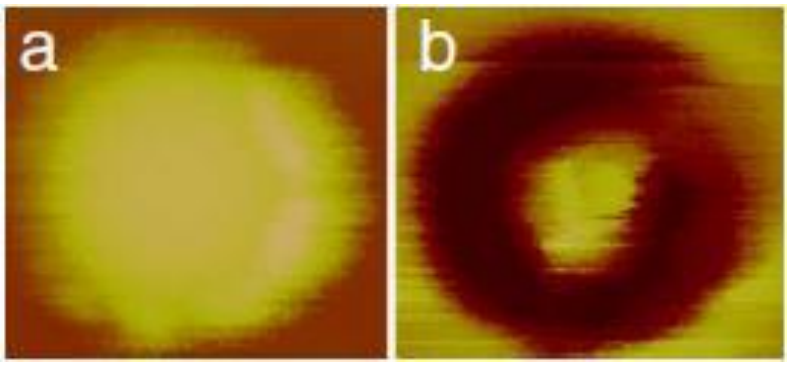
konusu dairesel hareket yüksek çözünürlüklü X-ışını manyetik dairesel dikroizm (XMCD) tekniği ile doğrudan gözlemlenebilmektedir. Şekil.2.2a 'da kare şeklindeki manyetik ince film için bu dairesel hareketin şematik gösterimi, Şekil.2.2b' de ise 1,5x1 μm2 alana sahip, 20 nm kalınlığında CoFe alaşımı ince film örnekte XMCD tekniği ile iki farklı anda alınan gerçek görüntüler verilmektedir [3].



Şekil 2.2: Kare şeklindeki manyetik ince film için dairesel hareketin a) şematik gösterimi ve b) gerçek XMCD görüntüsü

Manyetik vortekslerde gözlenen bu tür dinamik davranış yalnızca bir dış alan uygulanmasıyla değil aynı zamanda örnek üzerinden spin kutuplanmış (spin polarized) elektrik akımından ince filmdeki lokal momentlere spin açısal momentum transferi yoluyla da gerçekleştirilebilir [4]. Bu türde birden fazla osilatörün faz uyumlu şekilde bir dizi halinde kullanılması ve/veya manyetik tünelleme eklemi (MTJ) şeklinde tasarlanması ile rf çıkış gücünün artırılması cep telefonu gibi çip üzerinde mikrodalga üreteci gerektiren uygulamalar için yeterli güç seviyesine çıkılması için umut vaat eden bir teknolojidir [5]. Dışarıdan manyetik alan uygulanmasına gerek olmadan, hem rezonans frekansının akımla kontrol edilebildiği, hem de benzer teknolojilerle karşılaştırıldığında yüksek kalite faktörüne (Q-faktörü birkaç bin seviyesinde) sahip olan spin kutuplanmış akımla çalışan manyetik vorteks nano-osilatörler yapılabilirliği yakın zamanda deneysel olarak kanıtlanmıştır [6,7]. Benzer şekilde vorteks-antivorteks osilatörlerinin de nanomıknatıslara yüksek yoğunluklu akım enjeksiyonu ile oluşturulabildiği ve sıfır manyetik alanda yüksek genlikli mikrodalga yayınımı yapabildiği de gösterilmiştir [8].

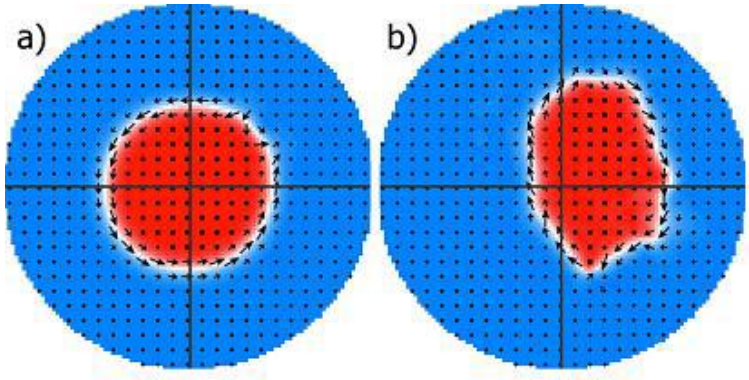
Manyetik vorteks düzenleniminin özel bir hali manyetik baloncuklardır. Yüksek düzleme dik manyetik anizotropiye (DDMA) sahip ince filmlerde ancak ve ancak bir dış manyetik alan altında veya bazı egzotik ferromagnetlerde sıfır manyetik alanda ama düşük sıcaklıklarda oluşabildiği 1970 'lerden beri bilinmektedir [9-11]. 2005 yılında Komineas vd. [12] yaptığı mikromanyetik simülasyonlar ile ileri nanoteknolojik fabrikasyon yöntemlerinin gelişmesine paralel olarak yüksek DDMA' ya sahip malzemelerde manyetik baloncukların oluşturulabileceğini öngörmüştür. Hemen ardından 2007 yılında bilinen en yüksek DDMA' ye sahip malzemelerden olan FePt nanoboyutlu manyetik disklerde dış manyetik alan olmaksızın kalıcı manyetik baloncukların kararlı olduğu magnetik kuvvet mikroskopisi (MFM) yöntemiyle gözlemlenmiştir [13] (Şekil 2.3). Bu manyetik baloncuklar çok daha geniş çapta fakat daha dar bir dış manyetik alan değer aralığı altında oluşabilmeleri, dipol enerjisinin oluşumunda önemli rol oynamaları ile vortekslerden farklılık gösterirler. Aynı zamanda detaylı olarak spin dağılımına bakıldığında biri düzlem içine diğeri düzlem dışına yönelmiş mikromanyetik konfigürasyonu temel olarak iki bölgeye ayırmakla birlikte bu bölgeler arasındaki domen duvarı incelendiğinde merkez düzlemde Bloch, üst ve alt yüzeylerde ise Neel tipi karmaşık bir yapıya sahiptir. Vorteks benzeri bu topolojik oluşumlar da skyrmion sayılarıyla karakterize edilirler ancak vortekslerden farklı olarak skyrmion sayısı tamsayı değerleri alır. (Manyetik baloncuklar için skyrmion sayısının detaylı hesaplaması [14] 'de verilmektedir)



Şekil 2.3: D=0,5 μm çapında ve 50 nm kalınlığındaki FePt disklerde a) atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) ve b) magnetik kuvvet mikroskopisi (MFM) yöntemi ile gözlenen manyetik baloncuk

Manyetik baloncuklar da vorteksler gibi bir dış manyetik alan uygulanması ile alan büyüklüğüne bağlı olarak dairesel hareket yapabilmekte ve/veya skyrmion topolojik sayısı farklı olan baloncuklara dönüşebilmektedirler [14-17] (Şekil 2.4). Yapılan mikromanyetik simülasyonlar ile düzgün dış manyetik alan içerisinde zıt spin yönelimine sahip iki bölge arasındaki domen duvarlarının hareket etmesi sureti ile baloncukların çaplarının yine periyodik olarak (yaklaşık olarak 1 GHz frekansında) küçülüp büyüyeceği öngörülmektedir.

Ancak bir alan gradienti uygulandığında ise domen duvarının farklı doğrultulardaki hareketi düzgün olmayacağından manyetik alan açık olduğunda kenarlara doğru kayma ve manyetik alan kapatıldığında merkeze doğru geri kaymadan oluşan (vortekslerde olduğu gibi) bir hareket dinamiği beklenmektedir.



Şekil 2.4: Skyrmion sayısı n=1 olan bir manyetik baloncuğun bir dış alan gradienti uygulanmadan a) önceki ve b) sonraki spin dizilimi. Mavi düzlem gözlemciye, kırmızı sayfaya yönelimi göstermektedir. Beyaz ise momentlerin sayfa düzleminde olduğu durumdur.

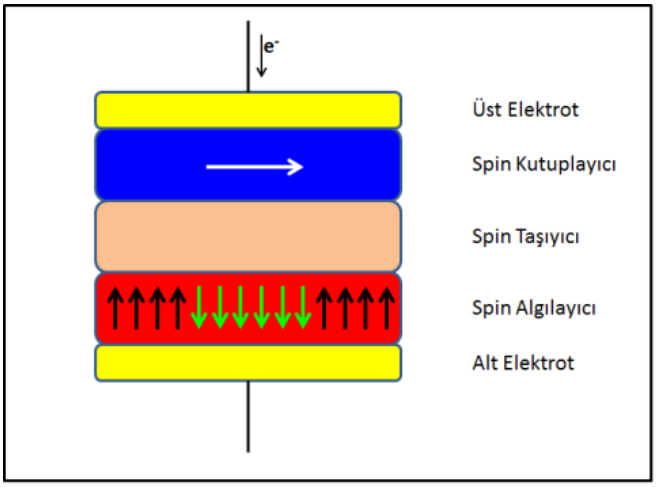
Yakın zamanda spin kutuplanmış akım etkisiyle ince filmlerde kararsız baloncuklar üretilmiştir. Bu başarı baloncukların ancak akım açık olduğunda var olmaları ile sınırlanmıştır. Ancak manyetik diskler kararlı baloncuk oluşumuna imkan verdikleri için büyük bir avantaja sahiptir. Manyetik baloncuk ve spin kutuplanmış akım etkileşimi için teorik çalışmalar yayımlanmış ve düşük duraksama ve manyetik nanotellerde yüksek hareket hızları bu ekip tarafından hesaplanmıştır [19,20]. Ancak henüz deneysel gösterim yapılmamıştır.

Buna karşılık yoğun spin kutuplanmış akım aşılaması ile baloncukların dinamik etkileşimleri konusunda literatürde önemli bir boşluk bulunmaktadır. Buna ek olarak literatürdeki az sayıda deneysel çalışma FePt' den üretilen nanomıknatıslara odaklanmış, projede çalışılması öngörülen CoNi/Pd, Co/Pd, Co/Pt gibi farklı DDMA malzemeler için baloncuk oluşma koşulları, manyetik alan ve spin kutuplanmış elektrik akımı ile etkileşimi henüz tam olarak açıklanmamıştır [18,19]. Hem bu tür nano-osilatörlerin vadettiği geniş teknolojik uygulama alanları, hem de manyetik baloncukların dinamik özellikleri konusundaki kısıtlı temel fizik bilgisi göz önünde bulundurulduğunda önerilen projenin yaygın etkisi olacak yayınların ve patenti alınacak spintronik aygıt tasarımlarının önünü açacağı kesindir.

3. YÖNTEM VE GEREÇLER

3.1. YÖNTEM

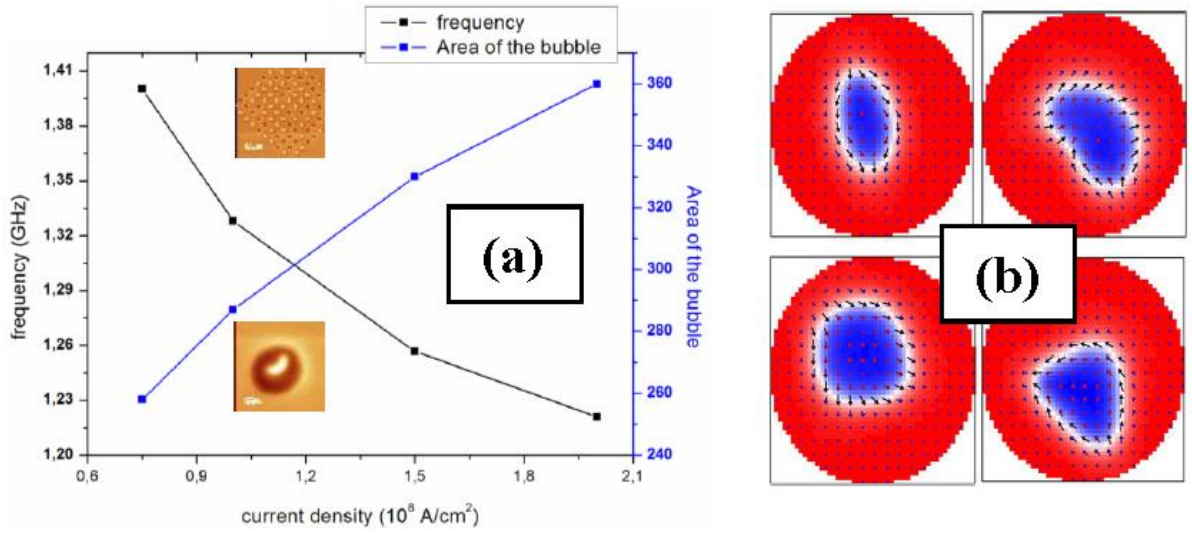
Bu proje sonucunda üretilen örnek manyetik nano-osilatör tasarımı Şekil 3.1.1'de verilen çok katmanlı manyetik ince filmlerden oluşan bir nanosütun olarak düşünülebilir. Bu spintronik aygıtı meydana getiren üç ana unsur, spin kutuplayıcı düzlem içi anizotropiye sahip manyetik katman (polarizer), normal metal (non-magnetic) spin taşınım ortamı ve manyetik baloncuk içeren düzleme dik anizotropili (DDMA) spin algılayıcı (analizor) manyetik katmandan oluşmaktadır. Spin kutuplayıcı birinci katman örneğin Ni81Fe19 (permalloy) gibi yumuşak ve düzlem içi anizotropiye sahip 15-20 nm kalınlığında bir manyetik ince filmden, spin taşınım ortamı 10-15 nm kalınlığında bir Cu(bakır) ince filmden ve DDMA manyetik baloncuklu katman 5-10 nm kalınlığında bir CoNi/Pd ince filmden oluşabilir. Böyle bir tasarım iki aktif manyetik katman arasındaki spin açısal momentum transferinin oldukça verimli olmasını sağlar. Zira ortalama elektrik akımının taşıdığı spin kutuplanma yönünün manyetik baloncuk içi manyetizasyona dik olması etkileşimi arttırıcı bir unsurdur.



Şekil.3.1.1: Manyetik baloncuk nano-osilatör

Şekil 3.1.2'da manyetik baloncukların spin kutuplanmış akım ile projede varsayılan etkileşime girip girmeyeceği ve bunun sonucunda GHz frekanslarda rezonans gösterip göstermeyeceği ile ilgili Landau-Lifshitz-Gilbert hareket denkleminin sonlu eleman metoduna uygulanmasıyla elde edilen mikromanyetik simülasyon sonuçları yer almaktadır. Bu simülasyonlar düzleme dik anizotropiye sahip Co/Ni ince film için yapılmış ve şekilden de anlaşılacağı üzere 10^7-10^8 A/cm^2 spin kutuplanmış akım yoğunluğu ile bu tür dinamik bir davranışın olması gerektiği ve aynı zamanda buna tekabül eden mikromanyetik dinamik modun ne tür bir yörünge izleyeceği (bkz Şekil 3.1.2(b)) anlaşılmaktadır. Ayrıca ilk testler için 1 μm çaplı diskler üretilmiş ve bir kısmında doğal olarak baloncukların oluşabildiği gözlemlenmiştir. (bkz. Şekil 3.1.2 (a) ekli küçük resim)

Spintronik aygıt aşamasına geçildiğinde Şekil 3.1.1'deki gibi bir tasarım uygulanmıştır. Burada spin kutuplayıcı düzlem içi anizotropili ferromanyetik katmandan geçen elektronlar net spin polarizasyonu taşırlar. Bu spinler ince bakır katmanda çok kısa bir süre geçirdiklerinden spin polarizasyonda kayba yol açacak spin ters çevirme (spin-flip scattering) saçılmalarına maruz kalmadan manyetik baloncuğun bulunduğu arayüze ulaşırlar. Burada manyetik baloncuğu oluşturan yerel momentler ile yoğun akımın taşıdığı spin açısal momentum arasındaki etkileşim sonucu manyetik baloncuğun belirli bir yörüngede harekete geçmesi sağlanır. Söz konusu osilasyonlar aygıtın magnetodirencindeki değişimler vasıtasıyla voltaja çevrilir ve böylelikle nanoölçekli bir manyetik osilatör olarak işlev görür. Herbir osilatörden pico/nanowatt seviyesinden oldukça düşük RF gücü elde edilebileceğinden uygulamalar için binlerce osilatörden oluşacak ve senkronize olmuş bir dizilim kullanılması gerekecektir. Bu ön çalışmalar ve tasarım ışığında hazırladığımız projede uygulanan yöntem(ler) sistematik olarak aşağıda listelenmiştir.



Şekil.3.1.2: Mikromanyetik simülasyon (ön çalışma) sonuçları (a) Rezonans frekansının alana ve spin kutuplanmış akım yoğunluğuna göre değişimi (ön çalışmalar için yapılan disk örnekler ve MFM ile gözlemlenen baloncuk oluşumu- ekli küçük resim) (b) Spin kutuplanmış akım etkisiyle baloncuk hareketi

1-) Oda sıcaklığında düzleme dik anizotropisi olan çok katmanlı Co/Pd/ ,CoNi/Pd, Co/Pt ,Co/Ni gibi manyetik ince filmler büyütülmelidir. Bu işlem için iki farklı teknik kullanılacaktır. Fransa tarafındaki moleküler epitaksi (MBE) sistemi ile tek kristal örnekler üretilirken Türkiye tarafında DC saçtırma (sputter) tekniğinden (Boğaziçi Üniversitesi Fiziki Bölümü Katıhal Fiziği Laboratuvarı ve/veya Kandilli Kampüsü Yaşam Bilimleri Araştırma Merkezi-Temiz Oda) faydalanılacaktır. Burada ince filmlerin istenilen yüksek düzleme dik anizotropiye sahip

olması için gerekli optimum büyütme koşulları belirlenecektir. Ayrıca farklı büyütme teknikleri ile üretilen ince filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerini incelemek imkanı bulunacaktır.

2-) Üretilen ince filmlerin yapısal karakterizasyonu için hem Fransa tarafında hem de Türkiye tarafında kristal yapı için X-ışını kırınım (XRD), ince filmdeki element oranlarını belirlemek için enerji dağılımlı x ışını spektrokopisi (EDX), yüzey morfolojisi karakterizasyonu için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Boğaziçi Üniversitesi İleri-Arge Laboratuvarı) ölçümleri yapılacaktır.

3-) Curie sıcaklığı, sıcaklığa bağlı doyum magnetizasyonu, anizotropi gibi manyetik özelliklerin karaterizasyonu için titreşen örnek magnetometresi (VSM) tekniği kullanılacaktır. Burada yapılacak ölçümler hem düzleme parallel hem de düzleme dik manyetik alanlar içerisinde ve sıcaklığa bağlı olarak tekrar edilecek ve böylelikle dışardan uygulanan manyetik alanın düzlem ile yaptığı açıya ve aygıt sıcaklığına bağlı (daha sonra yapılacak yoğun spin kutuplanmış akım aşılaması sırasında ısınma etkisini dikkate alabilmek amacıyla) tam bir manyetik karakterizasyon elde edilmesi mümkün olacaktır. Bunun için VSM opsiyonlu ve 1000K'e kadar ısıtma imkanı sağlayan fırın opsiyonu ile fiziksel özellik ölçüm sistemi (Dynacool-PPMS) (Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü Katı Hal Fiziği Laboratuvarı) kullanılacaktır. Bu sistemde kapalı devre sıvı Helyum sayesinde 4.2K 'den 1000K'e kadar geniş bir alanda sıcaklığa bağlı ölçümler alınması mümkün olacaktır.

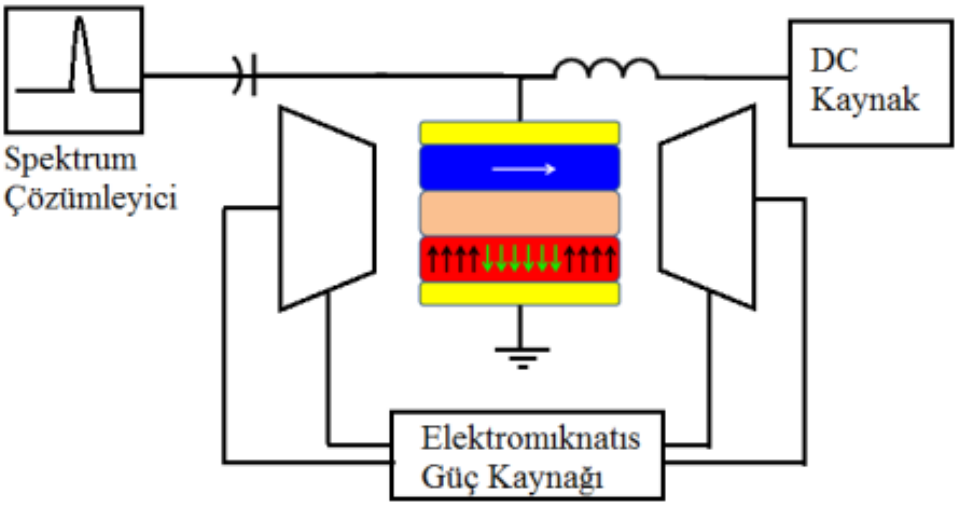
4-) Manyetik baloncuk oluşumu ve spin kutuplanmış akım etkisini inceleneceği nano yapılar için elektron demet litografisinden (E-beam Litho) ve reaktif iyon aşındırma (RIE) faydalanılacaktır. (Bu işlemler hem Fransa tarafındaki merkez laboratuvarda hem de Türkiye tarafında- Sabancı Üniversitesi SUNUM nanoteknoloji merkezinde hizmet alımı yoluyla yapılabilecektir.) Fransa tarafında ön çalışma olarak üretilen nano-disklerin AFM ölçümleri Şekil 6 (a) ekli küçük resimde görülmektedir.

5-) İletken atomik kuvvet mikroskobu (c-AFM) ile üretilen filmlere ve nanoyapılara manyetik bir iğnenin ucundan spin-kutuplanmış akım aşılaması yapılacak ve bunun sonucunda manyetik baloncuk oluşum koşulları manyetik kuvvet mikroskobunda (MFM) görüntüleme yoluyla belirlenecektir. İletken atomik kuvvet mikroskobuyla spin momentum aktarımı yapılabildiği daha önce Evarts vd. (*Appl. Phys. Lett.* ***95****, 132510 (2009))* tarafından gösterilmiştir. Manyetik kuvvet mikroskobunda nano yapılardaki domen yapısının ve özellikle baloncukların gözelenebildiği de hem literatürde yer almaktadır hem de ön çalışmalarda (bkz Şekil 3.1.2 (a) ekli küçük resim) gözlemlenmiştir.

6-) Bundan sonraki aşamada istenilen özelliklere sahip DDMA ince film kullanılarak Şekil 3.1'de tasarımı verilen nano-osilatörlerin üretimine geçilmesi planlanmaktadır. Altın veya Pt alt ve üst elektrot, krom veya titanyum ince ara katman (adhezyonu arttırmak için) ve 2 manyetik katman arasında normal metal spin taşınım ortamından oluşan bir yapı büyütülecektir. Arayüzlerde oksitlenmeye imkan vermemek için bütün yapı tek bir sistemde

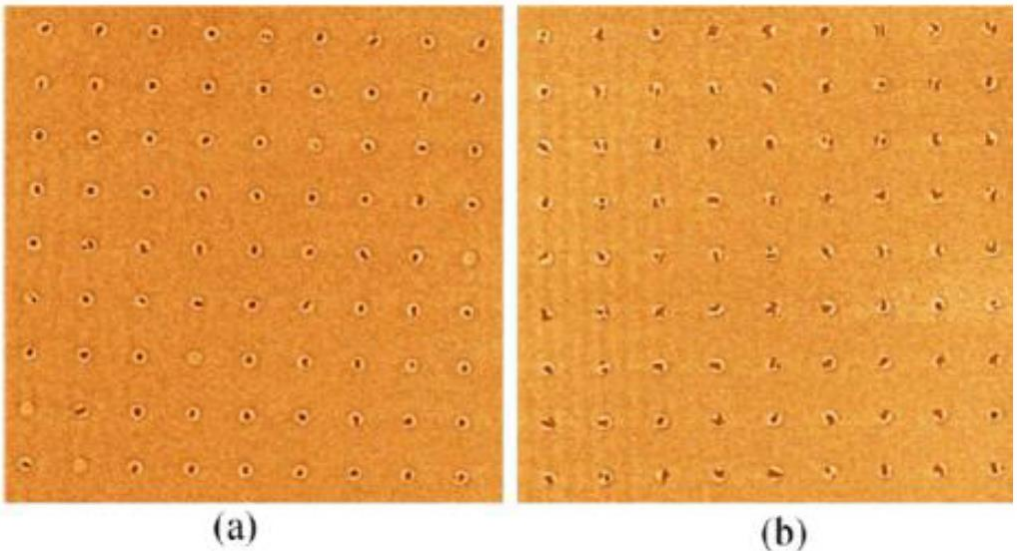
vakum kırılmadan üretilecektir. Bu gibi çok katmanlı ince film sistemleri için Fransa tarafındaki özel tasarım MBE-saçtırma ultra yüksek vakum (UHV) entegre sisteminden faydalanılacaktır.

7-) Üretilen nano-yapıların manyetik alana ve elektrik akımın bağlı radyo frekans dinamik tepkisinin ölçümleri Türkiye tarafındaki RF duyarga istasyonunda (probe station) gerçekleştirilecektir. Şekil 3.1.3 'te RF spektum ölçümleri için kullanılacak deneysel düzeneğin bir şematiği verilmiştir. Bir bias-tee yardımıyla DC ve RF sinyalleri birbirinden izole edilirler. DC akım ile uyarılan manyetizasyon dinamiği magneto-direnç etkisiyle voltaja çevrilerek bir spektrum çözümleyici (spectrum analyzer) ile algılanır ve dışardan uygulanan manyetik alana ve akım miktarına bağlı olarak rezonans spektrumdaki değişimler gözlenebilir.



Şekil.3.1.3: Manyetik baloncuk dinamiğinin dışardan uygulanan manyetik alan ve elektrik akımına bağlı olarak RF spektrumunun ölçüm düzeneği

Yapılan ölçümler neticesinde manyetik nano-osilatör ve/veya manyetik bellek ve/veya manyetik mantık uygulamaları için optimum spintronik aygıt tasarımlarının yapılması planlanmıştır. Şekil 3.1.4'te elde edilen kararlı manyetik baloncukların manyetik kuvvet mikroskobundaki görüntüsü verilmiştir. Ekibimiz bu şekilde tekrarlanabilir kararlı baloncuk dizileri oluşumunu ön çalışmalarda göstermiştir.



Şekil 3.1.4: 1.25 mikro metre çaplı (Co/Ni)x10 çok katmanlı disklerde (a) 4000 Oe ve b) 4500 Oe genlikli ac demagnetizasyon sonucunda elde edilen kararlı manyetik baloncukların manyetik kuvvet mikroskobu görüntüsü

3.2. ARAÇ ve GEREÇLER

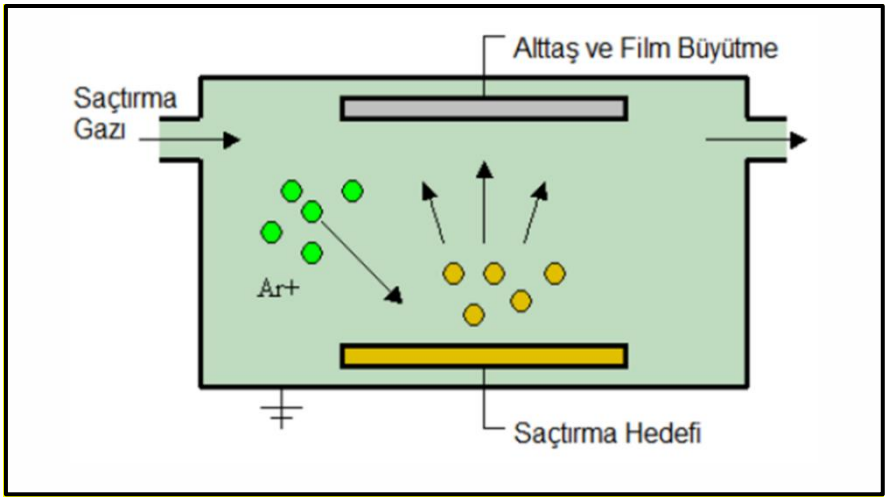
3.2.1.İnce Film Üretimi ve Karakterizasyonu

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. İlk olarak ince film büyütme işlemi ve özelliklerine değinelim.

3.2.2. 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 3.2.2.1. 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 3.2.2.1'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 3.2.2.1: 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 3.2.2.2'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 3.2.2.2: AJA Manyetron Saçtırma Sistemi

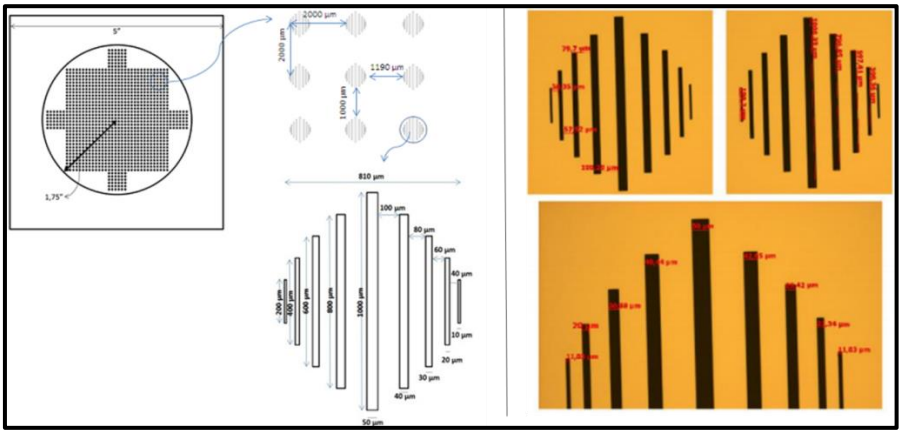
İnce filmlerin kalitesinin optimizasyonu film üretimi ve sonrasında saçtırma hızının belirlenmesi, karakterize edilmesi, prosedürlerin geliştirilerek tekrar üretim ve karakterizasyonunu içerir. Bu şekilde projede Py, Co, CoFeB, CoNi manyetik filmleri DC manyetron saçtırma ile üretilmiştir. Titreşen örnek manyetometresi (VSM) ile karakterizasyonu yapılan filmler istenilen manyetik özellikler elde edilene kadar tekrar üretilmiş ve karakterize edilmiştir.

3.2.3.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 3.2.3.1'de 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 ve üzerine biriktirilen materyalin kalınlığı ölçülür.

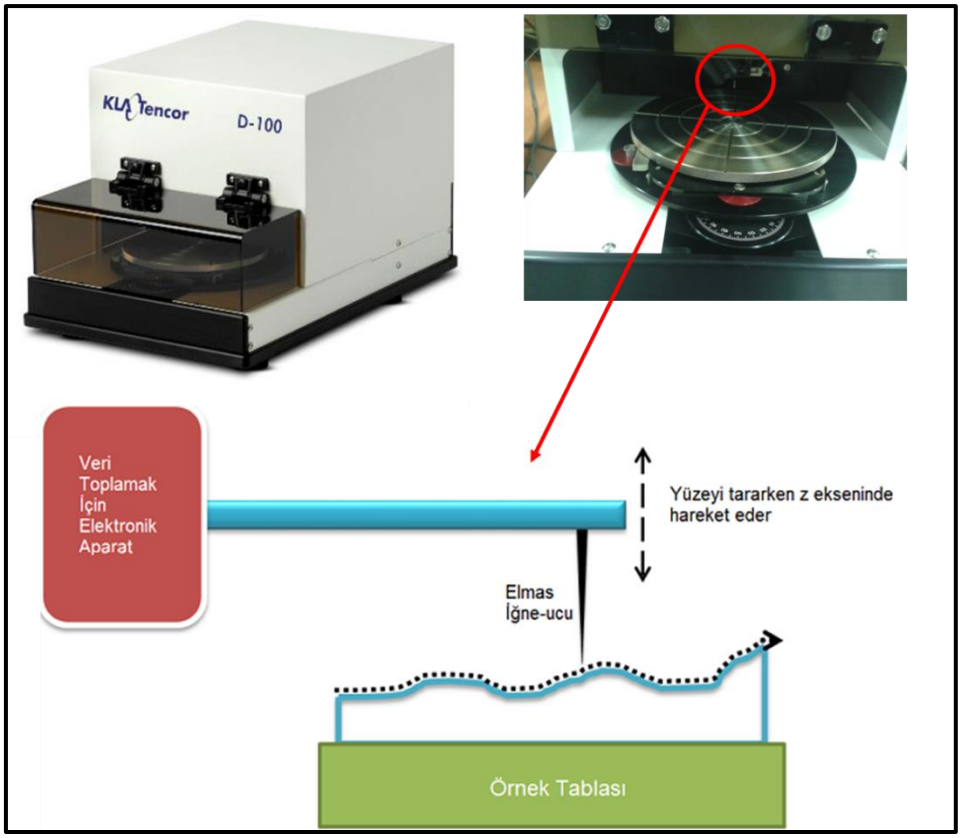


Şekil 3.2.3.1: Kalınlık kalibrasyonu için kullanılan alttaşların şematik çizimi ve optik mikroskop görüntüsü

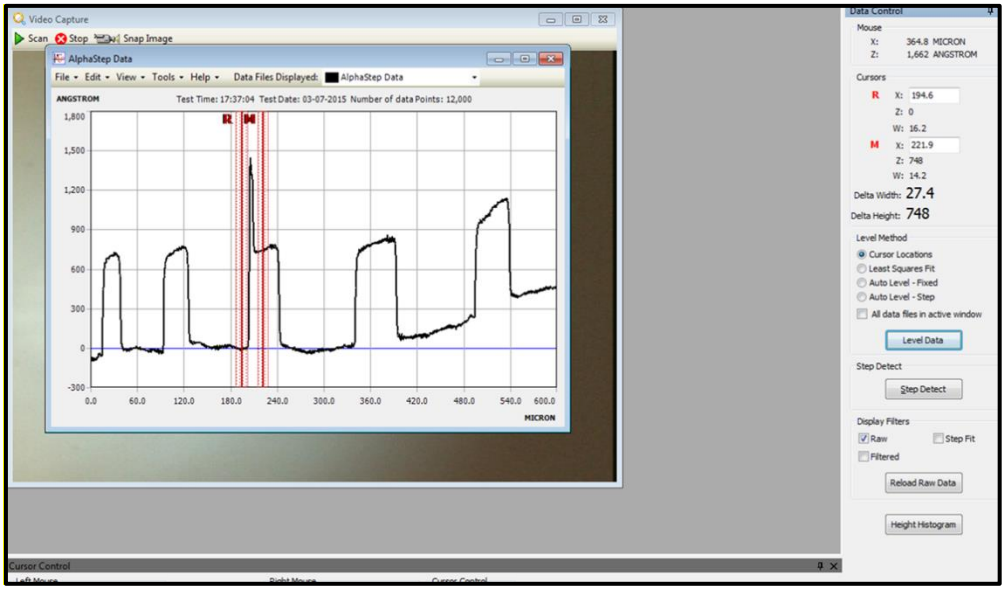
Kalınlık ölçümleri için Şekil 3.2.3.2'de gösterilen KLA Tencor Alpha-Step D100 yüzey profilometresi kullanılmıştır. Profilometre 3 ana bölümden oluşur; tarama esnasında yüzeyle fiziksel temas kurarak dikey yükseklik verisini oluşturan iğne, iğneden aldığı yükseklik bilgisini elektrik sinyallerine dönüştüren 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 3.2.3.3'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 3.2.3.1'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 kullanılmıştır.



Şekil 3.2.3.2: KLA Tencor marka yüzey profilometresi ve çalışma prensibi



Şekil 3.2.3.3: Profilometre ile alınmış kalibrasyon ağı ölçümü

Katmanların büyütme koşullarının belirlenmesine ilk önce alt ve kapaklama katmanları olarak kullanılan Ti, Ta ve Pt malzemelerinden başlanmıştır. Tablo 3.2.3.1'de bu malzemelerin

optimum büyütme koşulları ve bu koşullardaki büyütme hızları verilmiştir. 2 mTorr basınçta Ar ortamında büyütülen bu filmlerin saçtırma hızları 100W DC güç altında büyütülen Ti ve Ta için sırasıyla 0,41 ve 0,70 Å/sn; Pt için ise 50W güç altında 1,23 Å/sn olarak bulunmuştur. Pd malzemesi 20 W güç ile 2 mTorr Ar basıncında 0,32 Å /sn hızda saçtırılırken CoNi malzemesi 20W güç ile 0,1 Å /sn hızla büyütülmüştür.

Tablo 3.2.3.1: İnce filmlerin manyetron saçtırma sisteminde büyütme koşulları ve saçtırma hızları

Hedef	Saçtırma Tipi	Ar Basıncı (mTorr)	Güç (Watt)	Büyüme Hızı (°A/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

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 3.2.3.2'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 3.2.3.2: İyon aşındırma hızları

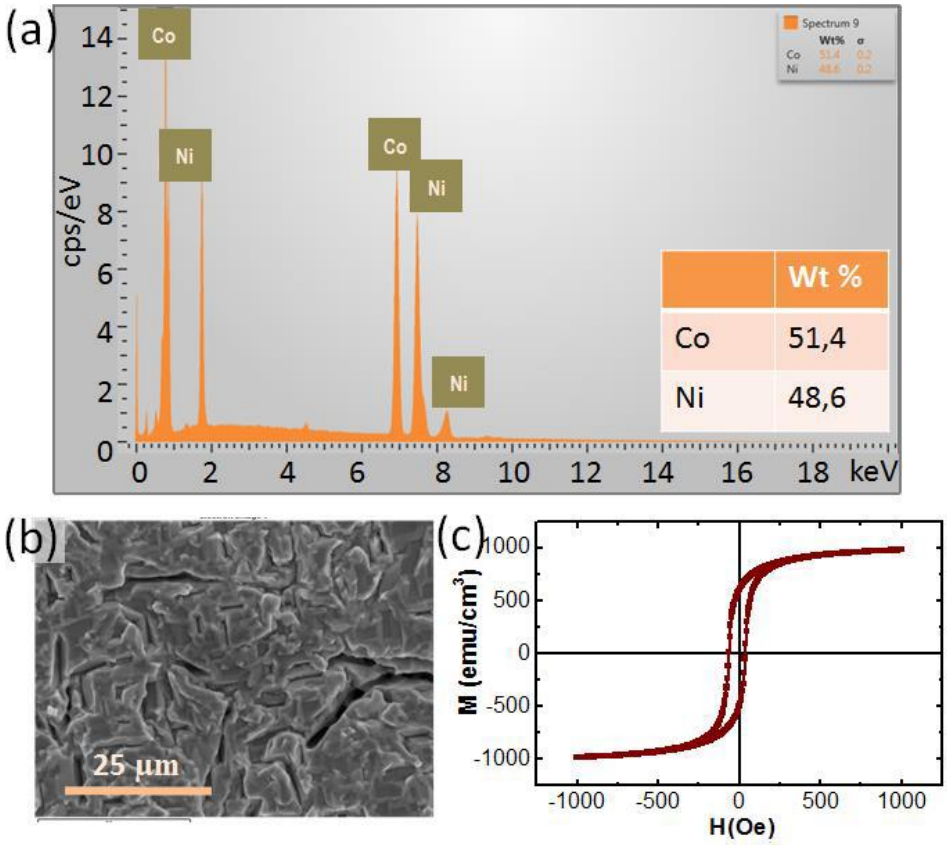
Hedef	Aşındırma Hızı (°A/sn)
Ti	0,358
Ta	0,323
NiFe	0,375
Si	0,44
C	0,097
CoFeB	0,315
CoNi	0,337
Cr	0,161
Au	0,5
Pt	0,5
SiO_2	1,2

CoNi ince filmleri tek bir CoNi hedefinden 200 W DC güç ile 2 mTorr basınçta üretilmiş ve saçtırma hızı 1 Å/sn olarak ölçülmüştür. Bu koşullarda 10 nm Ti üzerine üretilen 500 nm CoNi filminin stoikiometresi enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDX) ile incelenmiştir. Şekil Şekil 3.2.3.4 a'da gösterilen EDX verisi filmin içindeki Co:Ni oranını 51.4:48.6 olarak göstermektedir. Bu oran, beklenen 50:50 oranına oldukça yakın bulunmuştur. Bu ölçümün alındığı yüzey topografisi Şekil Şekil 3.2.3.4 b'deki taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünde sunulmuştur.

Filmlerin manyetik özellikleri laboratuvarımızda bulunan PPMS-dynacool sistemine entegre edilmiş titreşen örnek magnetometresi (VSM) ile incelenmiştir. Şekil Şekil 3.2.3.4 c'de CoNi filminin düzlemiçi manyetik alanda, oda sıcaklığında yapılan VSM ölçümünün sonucu görülmektedir. Beklendiği üzere CoNi ince filmi düzlemiçi anizotropiye sahiptir ve doygunluk mıknatıslanması 1 kemu/cm^3'e ulaşmaktadır. Sıfırlayıcı alanı 50 Oe olarak tespit edilmiştir. Belirtilen üretim koşullarının başarılı olduğu sonucuna varılmış ve bu malzemenin Şekil Şekil 3.2.3.4 c'de gösterilen film yapısındaki düzleme dik anizotropili yapıda kullanımına uygun olduğuna karar verilmiştir.

İlgili DDMA'lı çoklu katmanlı filmin üretimi için AJA sisteminde bazı ayarlamalar yapılması gerekmiştir. Katmanların arasında kontaminasyon olmadan üretilebilmesi için ek bir DC güç kaynağı temin edilmiş ve saçtırma sistemine eş zamanlı püskürtmeye olanak sağlayacak şekilde entegre edilmiştir. Sistemi kontrol eden yazılımda da ayarlamalar yapılmıştır. Bunun sonucunda program CoNi ve Pd malzemelerinde eş zamanlı plazma oluşturup bu hedeflerin kapaklarını istenen kalınlıklar için gerekli süre kadar açıp kapatarak CoNi ve Pd katmanları art arda kontaminasyon olmadan hassas bir şekilde üretilebilmiştir. 0,22 nm CoNi

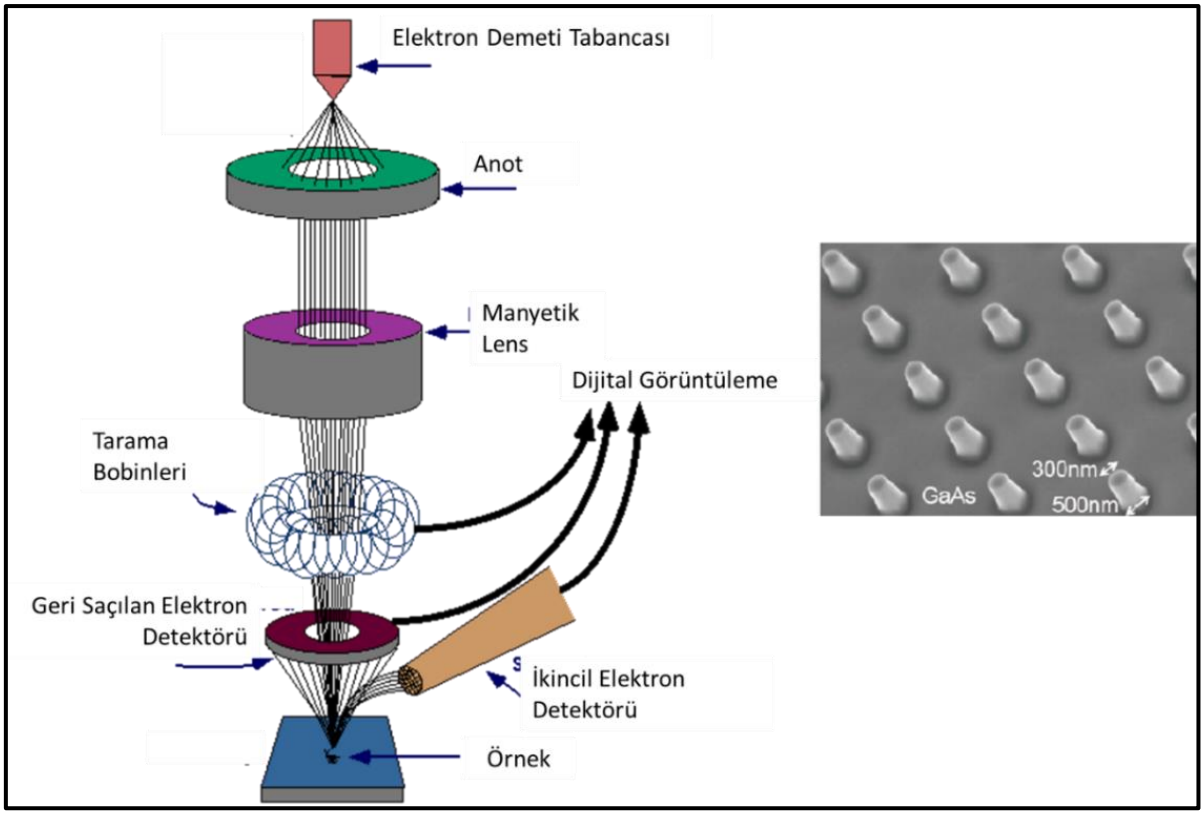
katmanının üzerine 1,2 nm Pd malzemesi ve bu yapının 22 tekrarla Ti üzerine büyütülmesi ile elde edilen 43 nm kalınlığındaki çoklu katmanlı yapı, Ti(5)/Pd(3)/[CoNi(0,22)/Pd(1,2)]x22/Pd(2), son olarak Ti ile kapaklanmış ve oksitlenmesi bu şekilde engellenmiştir. Üretilen filmler titreşen örnek manyetometresi (VSM) sistemlerinde düzlem içi ve düzleme dik manyetik alanlarda sıcaklığa bağlı olarak incelenmiştir.



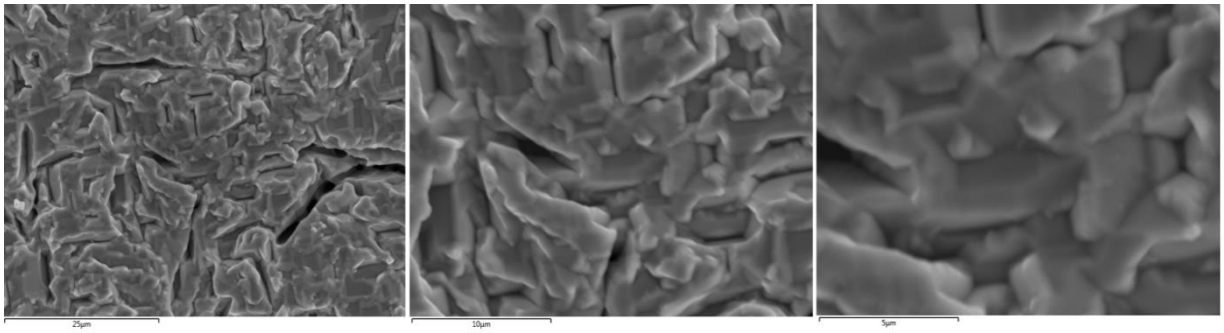
Şekil 3.2.3.4: (a) CoNi ince filmlerin EDX grafiği ve bulunan Co:Ni yüzdeleri (b) CoNi filmlerinin yüzeyinden bir SEM görüntüsü (c) CoNi filminin oda sıcaklığında düzleme paralel manyetik alanda alınmış VSM ölçümü.

3.2.4.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

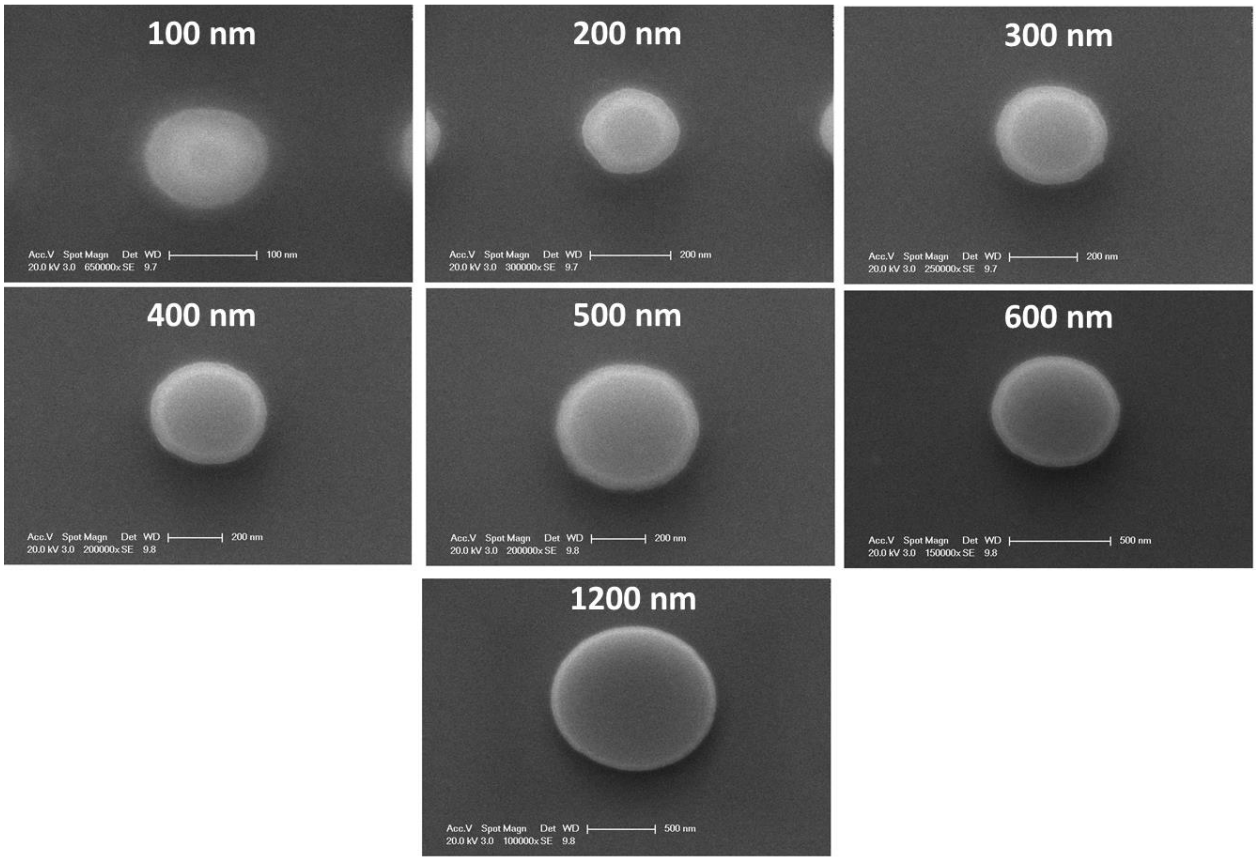
EDX mekanizması ile çok benzer olan taramalı elektron mikroskobu yani SEM, bir örneğin yüzey topografisini belirlemek için odaklanmış elektron demeti kullanır. Şekil 3.2.4.1'de özetlenen şematik çizimde elektron demeti yüzeyle etkileşir ve yüzeyden yayılan ikincil elektronlar detektörler tarafından tespit 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 3.2.4.1'de nano sütunlar olan bir yüzeyin SEM görüntüsü örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2.4.1: SEM şematik çizimi ve örnek bir SEM görüntüsü



Şekil 3.2.4.2: CoNi filmlerinin yüzeyinden farklı tarama alanları ve ölçeklendirmeleri için alınan bir SEM görüntüsü



Şekil 3.2.4.3: Farklı çaplı Pt/CoFeB/Ti nano-sütunlarının yüzeyinden alınan SEM görüntüleri

3.2.5. XPS ve EDX

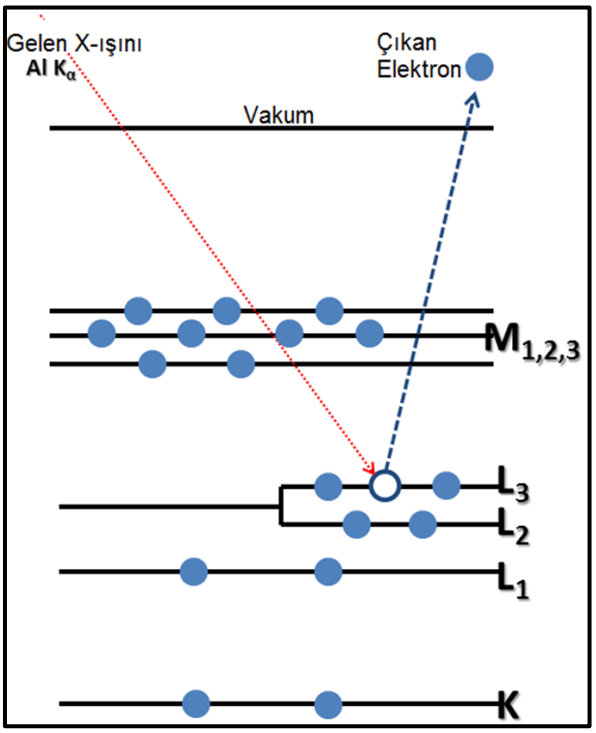
X-ışını Fotoelektron Spektroskopi (XPS) iyi bilinen örneğin yüzeyindeki elementel ve kimyasal durum bilgilerini belirleyebilen yüzey analiz tekniğidir. Bu yöntem malzemenin üzerine belli enerjili bir foton düştüğündeki elektron yayılımı olan fotoelektrik etkiden faydalanır. En yaygın olarak, monokromatik, 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:

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

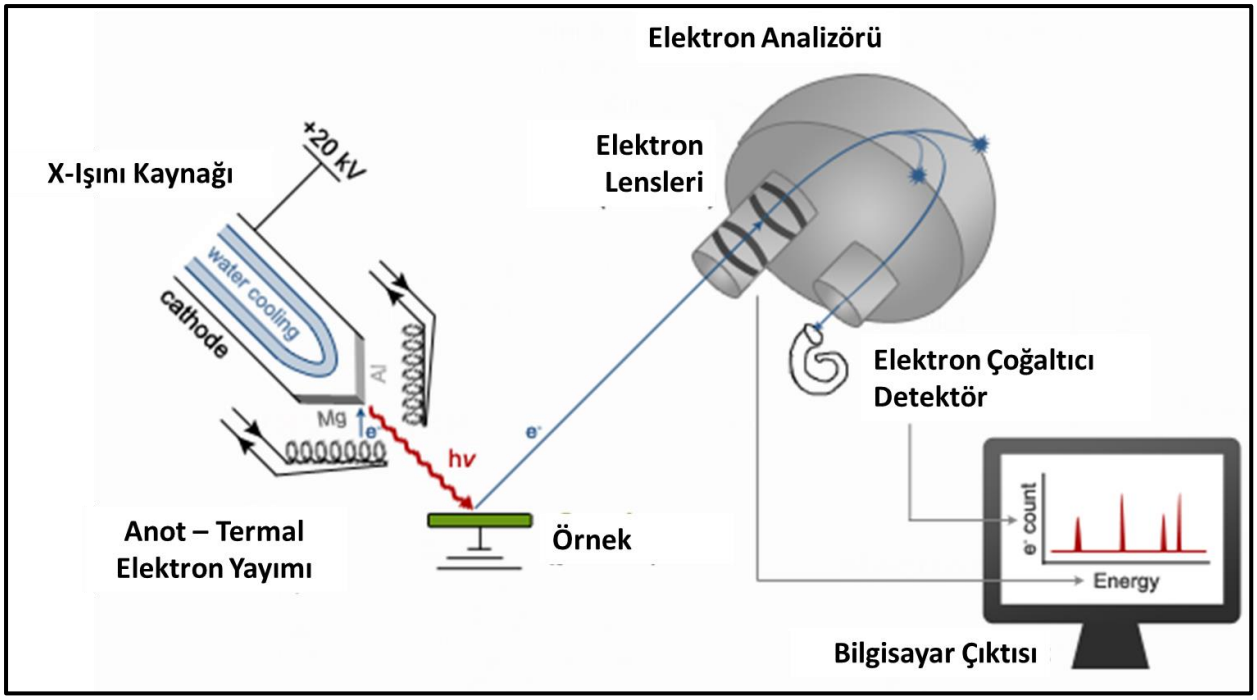
Bu formülde φ iş fonksiyonu, E_b elektronun bağlayıcı enerjisi, E_X X-ışını radyasyonunun enerjisi ve E_K elektronun kinetik enerjisidir.

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 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.



Şekil 3.2.5.1: X-ışını radyasyonu altında fotoelektrik etkinin gösterimi



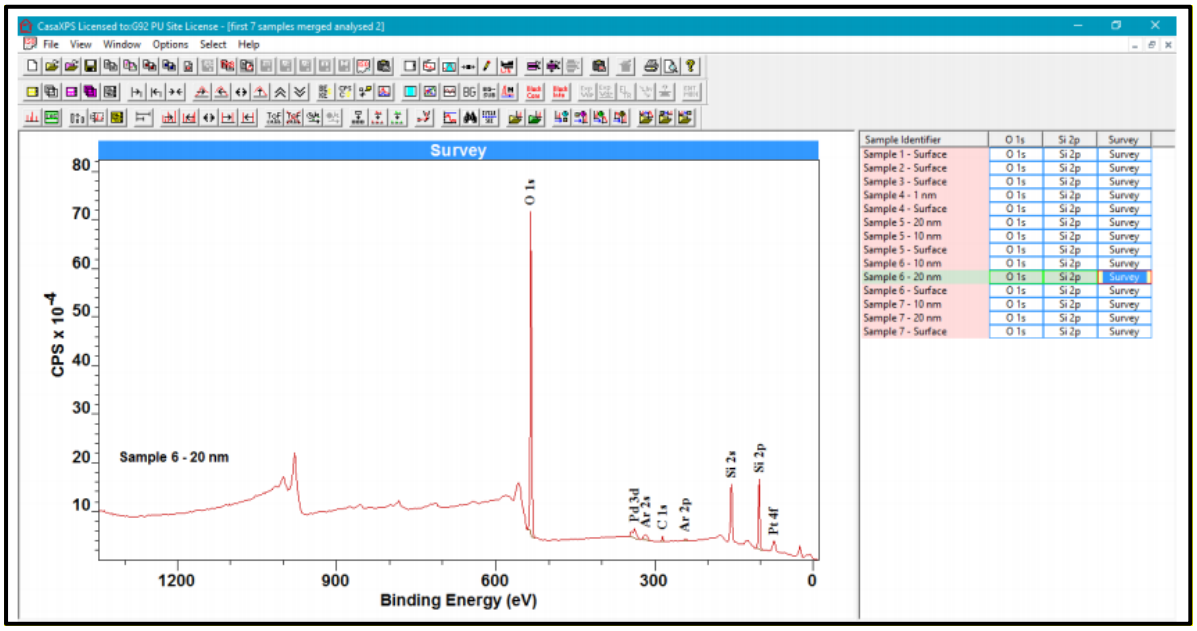
Şekil 3.2.5.2: XPS çalışma prensibi

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

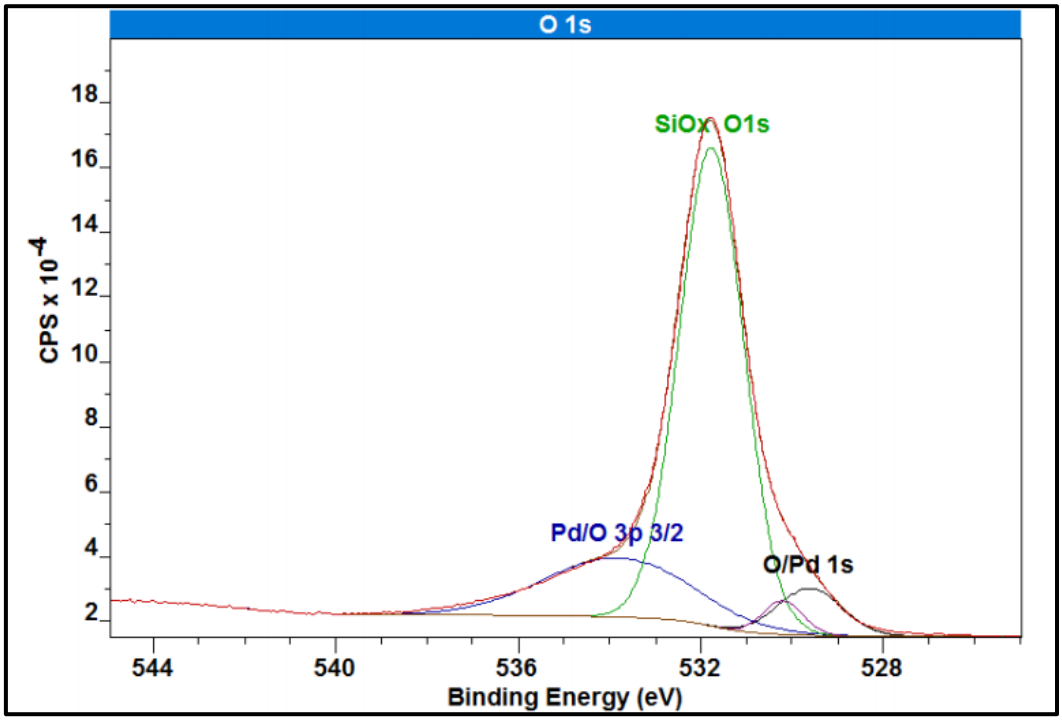
değerlerini içinde bulunduran fotoelektron enerji değerleri listelenir. İkinci olarak uygun olan arka plan çıkarımı her grafiğe uygulanmalıdır. Literatürde lineer, yatay, Shirley'nin ve Tougaard'ın olmak üzere üç farklı arka plan çıkarımı metodu vardır. En çok tercih edilen metot olarak sayısal analizlerimizde 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 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.



Şekil 3.2.5.3: SiO_2 filminin CasaXPS yazılımındaki tarama görüntüsü

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 3.2.5.3 CasaXPS yazılımına aktarılmış bir XPS yüzey taraması verisini göstermektedir. Bütün elementlerin gösterildiği bu figürdeki pikler NIST veritabanına göre incelenmiş ve pik parametreleri belirlenmiştir. Bu pikleri gösteren Şekil 3.2.5.4'te 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 3.2.5.4: 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 3.2.3.5.11 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 3.2.5.55'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 3.2.3.5.1: XPS analizi sonuçları

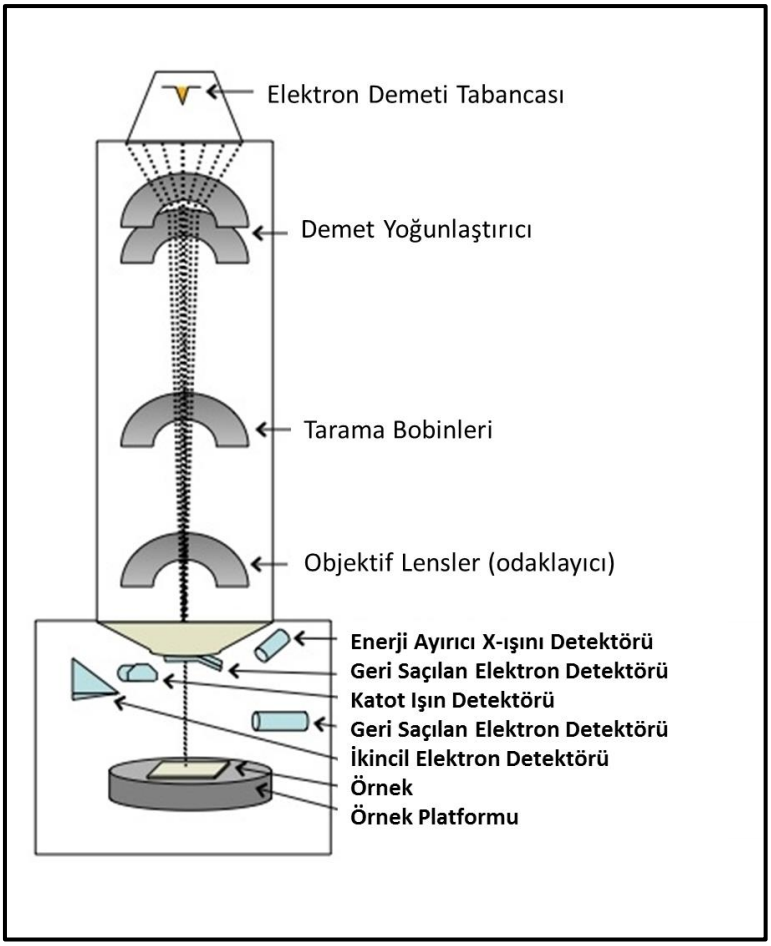
T (°C)	O_2/Ar	*Alttaş gerilimi*	*Güç* (W)	*Büyüme Hızı (A/sn)*	SiO_x
25	Pure Ar	0	100	0.155	1.42
25	0.25	0	150	0.11	1.53
25	0.25	20 W RF	200	0.10	1.50
100	0.25	0	200	0.23	1.45
25	0.25	0	200	0.14	1.54 *(yüzey)* 1.49 (20 nm)
25	0.25	+20 V DC	200	0.14	1.57 *(yüzey)* 1.50 (20 nm)
25	0.25	-10 V DC	200	0.12	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 3.2.5.5: EDX şematik çizimi

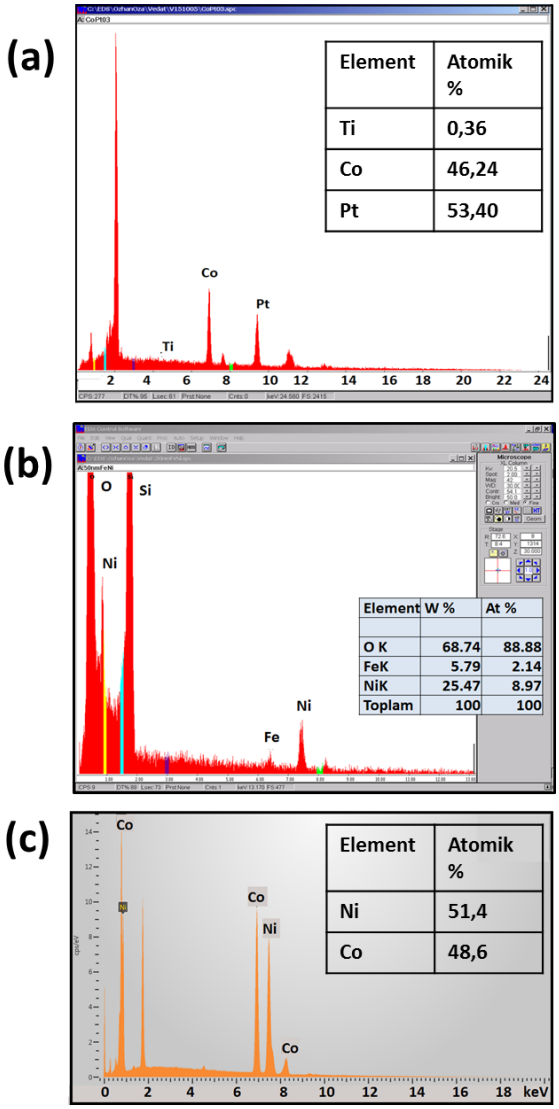
Elektronlarla gelen ışın yeterli enerjiyle atoma çarptığında atomun iç kabuğundan bir elektron fırlatılır ve arkasında bir delik bırakır. İç kabuktaki bu boşluk hemen aynı atomun dış katmanlarındaki bir elektronla doldurulur. Yüksek enerji düzeyinden düşük enerji düzeyine geçiş tam elektromanyetik spektrumda 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 3.2.5.6'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.



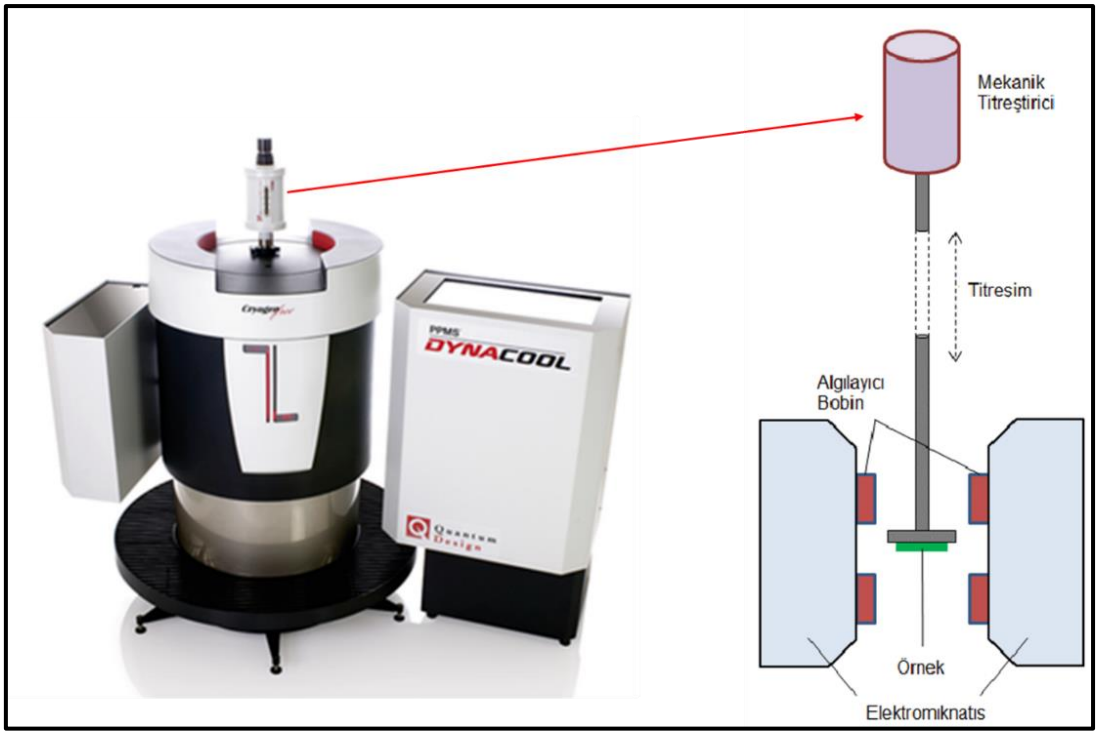
Şekil 3.2.5.6: Üretilen ince filminde yapılan EDX ölçümleri ve ölçüm sonucunda hesaplanan elementlerin ağırlık ve atomik yüzdeleri (a) Py ($Ni_{81}Fe_{19}$) (b) CoPt (c) CoNi

3.2.6. Titreşen Örnek Magnetometresi VSM

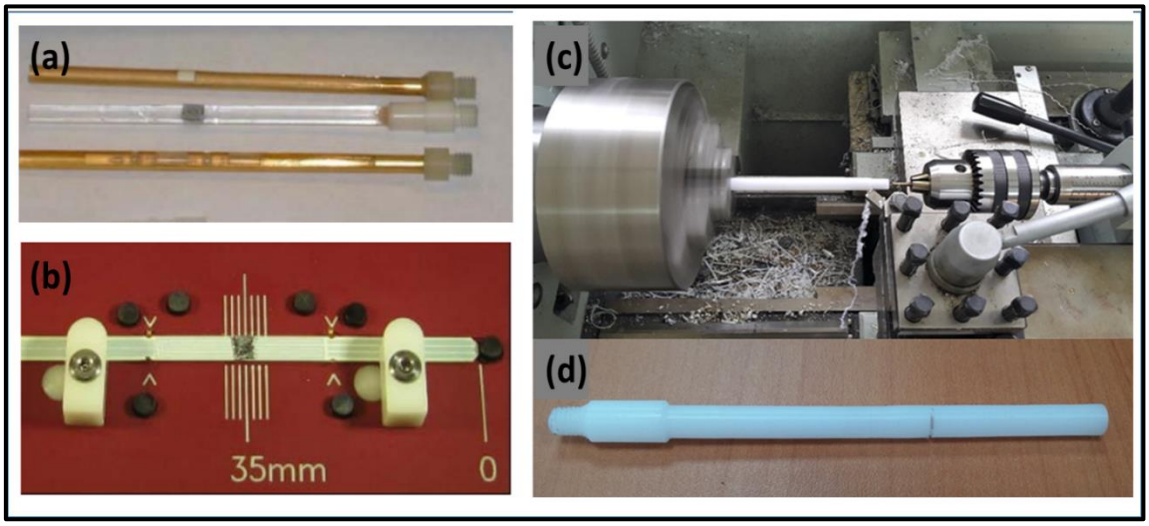
Üretilen manyetik filmlerin manyetik özellikleri titreşen örnek manyetometresinde (VSM) ölçülmüştür. Bunun için Quantum Design marka DynaCool fiziksel ölçüm sistemi (PPMS) kullanılmıştır. Bu sistem sıvı He soğutmalı ve kapalı He döngüsünü bir kompresör ile sağlayan bir "kryostat"tır. Sisteme çeşitli 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 3.2.6.'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 3.2.6.2a'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 3.2.6.2b'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 çubukları atölyemizde üretilmiştir. Şekil 3.2.6.2c'de gösterilen torna işleminde düşük sıcaklıklara dayanıklı ve manyetik karakteristiği olmayan Derlin malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.2.6.2d'deki resimde çubuğun ortasındaki kesitten içeri itilen alttaş parçası kapton ile de sarılarak sabitlenir. Bu şekilde örnek kaymadan düzleme dik manyetik alanda da titreştirilebilir.



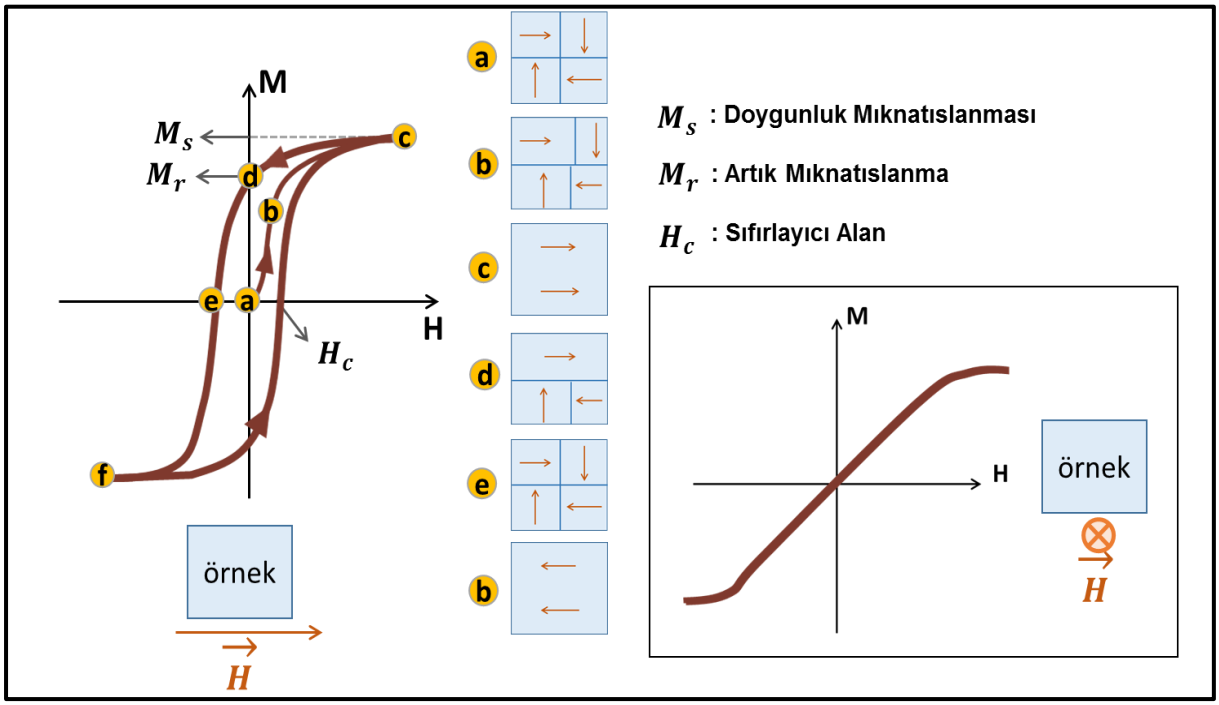
Şekil 3.2.6.1: Quantum Design Dynacool Fiziksel Ölçüm Cihazı (PPMS) sistemine entegre edilmiş Titreşen örnek manyetometresi (VSM) ve şematik çizimi



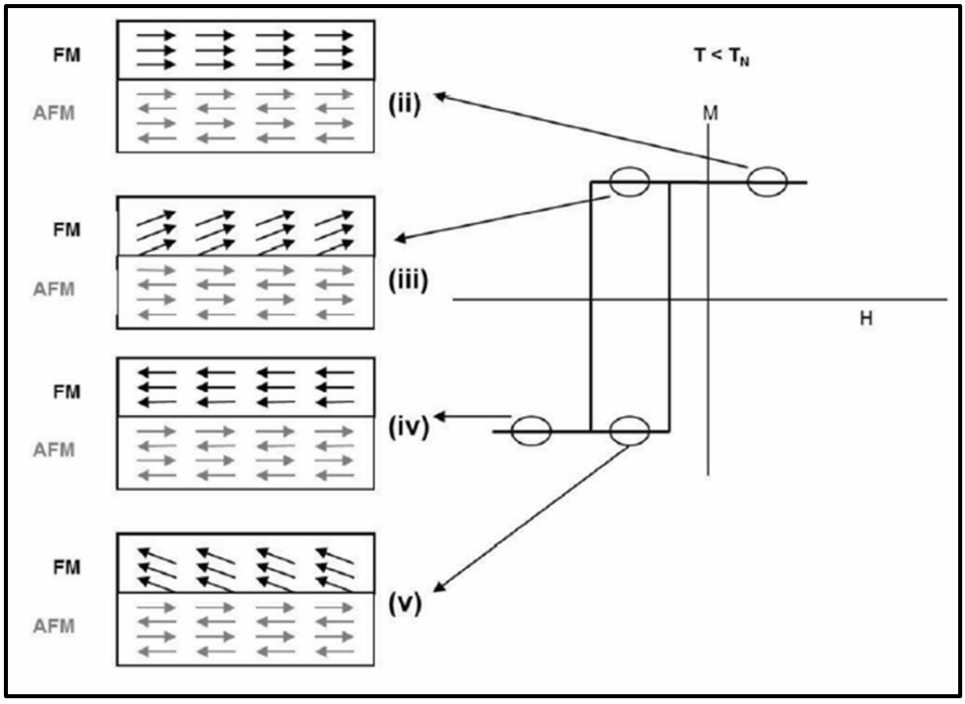
Şekil 3.2.6.2: Torna cihazında üretimi (a) ve bitmiş hali (b) gösterilen VSM cihazı çubukları Delrin denen yumuşak malzemeden yapılmıştır

Düzlem-içi anizotropiye sahip ferromanyetik malzemelerde görülen örnek bir histerezis döngüsü Şekil 3.2.6.3'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- 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.

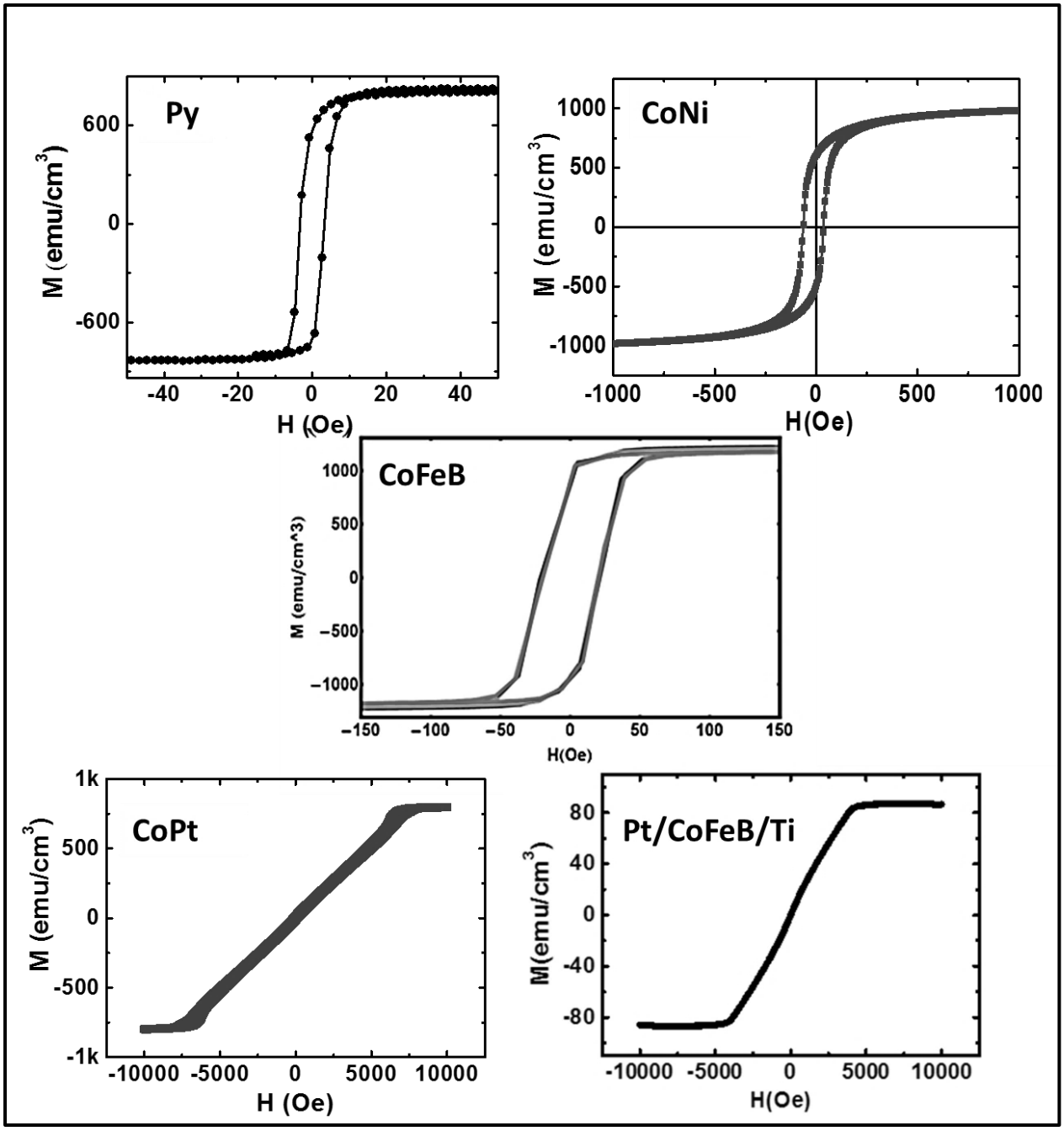


Şekil 3.2.6.3: Histerezis döngüsü ferromanyetik bir malzeme için verilmiştir. Örnek bir manyetik malzeme üzerinde farklı manyetik alanlarda domen yapısının değişimi gösterilmiştir. Düzleme dik bir manyetik alanda aynı örneğin VSM ölçümü histerezis göstermemektedir.



Şekil 3.2.6.4:1 AFM/FM çoklu katmanlarında değiş-tokuş eğilimi etkisiyle oluşan M-H grafiği ve mikro-manyetik konfigürasyonun şematik çizimi

Histerezis döngüsünün simetrisinin olmadığı durum, bir ferromanyetik (FM) ve anti-ferromanyetik (AFM) malzemenin üst üste üretildiği durumdur, bkz. Şekil 3.2.6.4:1 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.

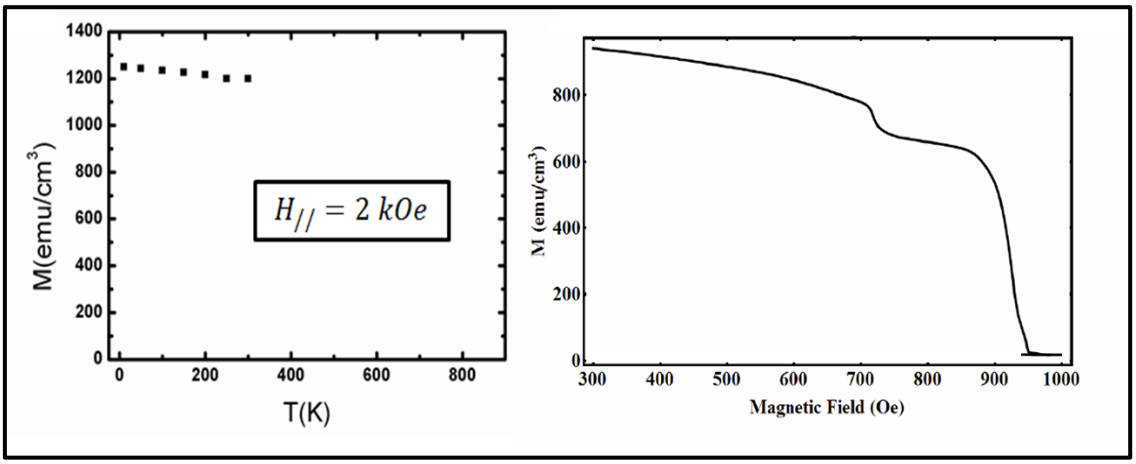


Şekil 3.2.6.5: Oda sıcaklığında düzlem içi bir manyetik alanda alınan VSM ölümleri Py, $Ni_{81}Fe_{19}$, CoNi, $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$, CoPt filmleri ve 60 tekrarlı [Pt(5nm)/$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ (1nm) /Ti(1nm] çoklu katmanlı yapısı için verilmiştir.

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 3.2.6.5 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.

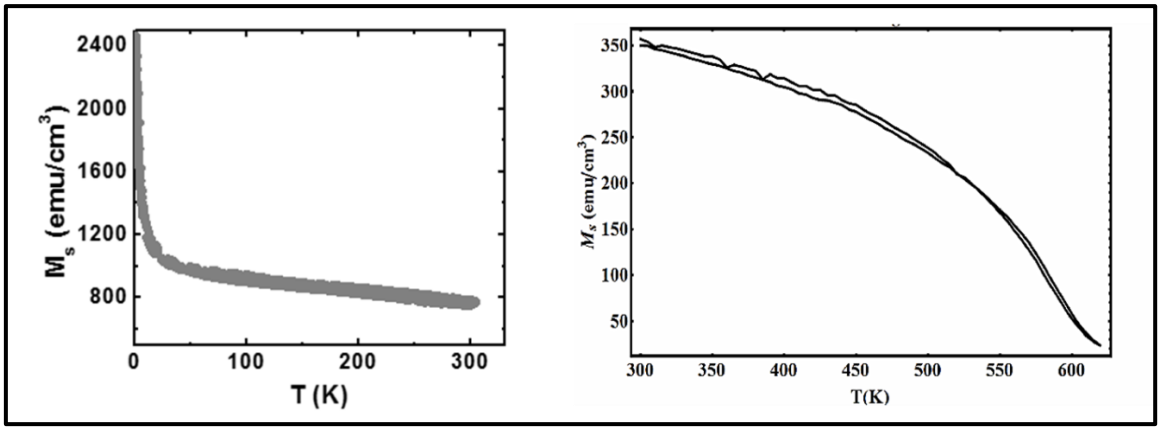


Şekil 3.2.6.6: $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ malzemesinin VSM'de yapılmış sıcaklığa bağlı manyetik karakterizasyonu. Ölçümler düzleme paralel 2k Oe manyetik alan altında yapılmıştır.

Bununla birlikte $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ ince filmi için hem düşük sıcaklıklarda hemde yüksek sıcaklıklar için doygunluk mıknatıslanması gözlemlenmiştir. Şekil 3.2.6.6 da yüksek ve düşük sıcaklıklar için değişimi görülmketedir. CoFeB filminin doygunluk mıknatıslanması düşük sıcaklıklarda pek değişmemiştir. Yüksek sıcaklıklarda alınan verilerde Curie sıcaklığının 950 K olduğu görülmektedir. Ayrıca Py filmi de farklı sıcaklıklarda incelenmiştir. Şekil 3.2.6.7'da 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 sıcaklığı 620 K olarak tespit edilmiştir.

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

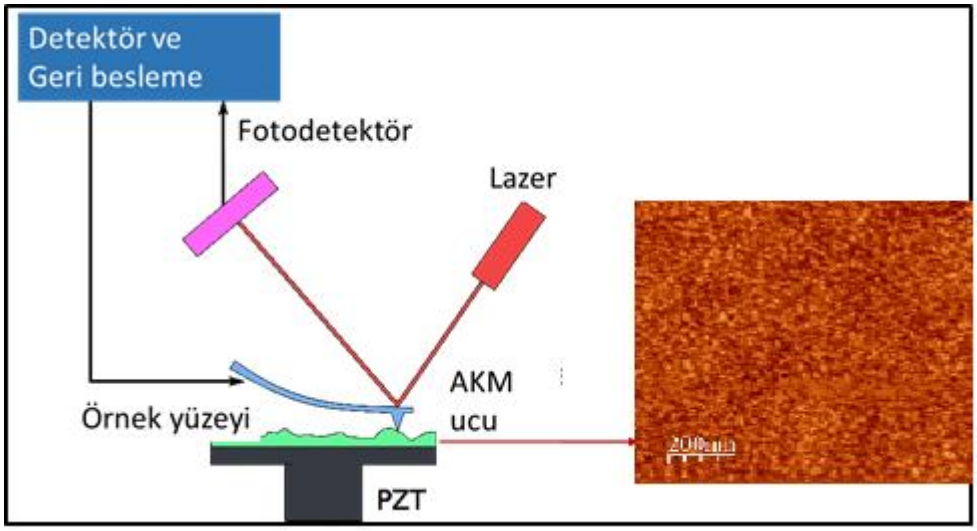
3.2.7. Atomik ve Manyetik Kuvvet Mikroskobu

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 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.



Şekil 3.2.7.1: AKM çalışma prensibi ve örnek bir yüzey profili

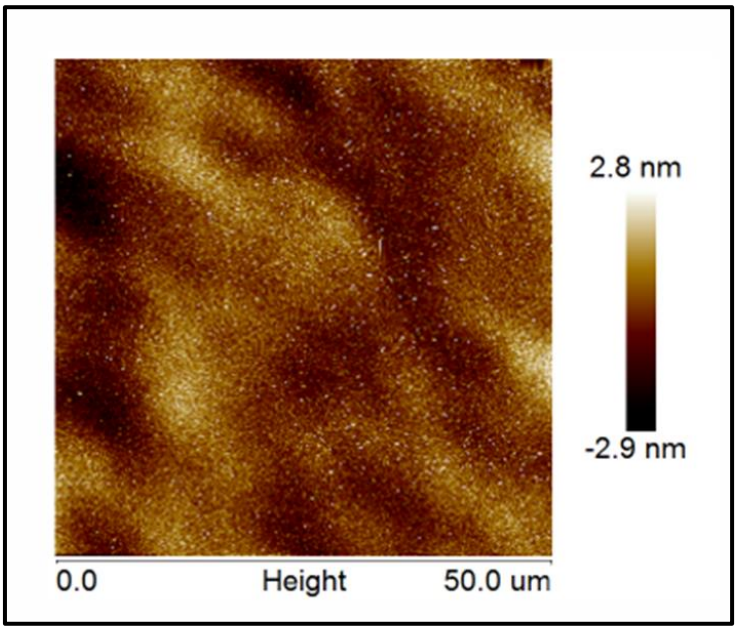
Temas yüzeyinde AKM'yi çalıştırmanın iki yolu vardır. Bunlardan biri tarayıcı yüksekliği sabit olduğundan topografik bilgiyi elde etmek için konsolun aşındığı sabit yükseklik modudur. Diğeri ise sabit kuvvet modu olarak adlandırılır. Bu modda geri besleme devresi kullanılarak

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 3.2.7.1 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 100-200 nm 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 3.2.7.1'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 bir CO/Ni ince film yüzeyinin profili gösterilmiştir ve bu yüzeyin pürüzlülüğü 1 nm olarak hesaplanmıştır. Spin valf yapılarında kullanılan aygıt izolasyonu için kullanılan SiO_2 malzemesinin yüzey pürüzlülüğüne ait topografi görüntüsü de Şekil 3.2.7.2'de gösterilmiştir. Bu ölçüm üzerinden yapılan hesaplamada yüzey pürüzlülüğü 0,7 nm çıkmıştır. Bu şekilde düz bir yüzey spin valf aygıtlarının üst kontaklarının yerleştirilmesinde gereklidir.



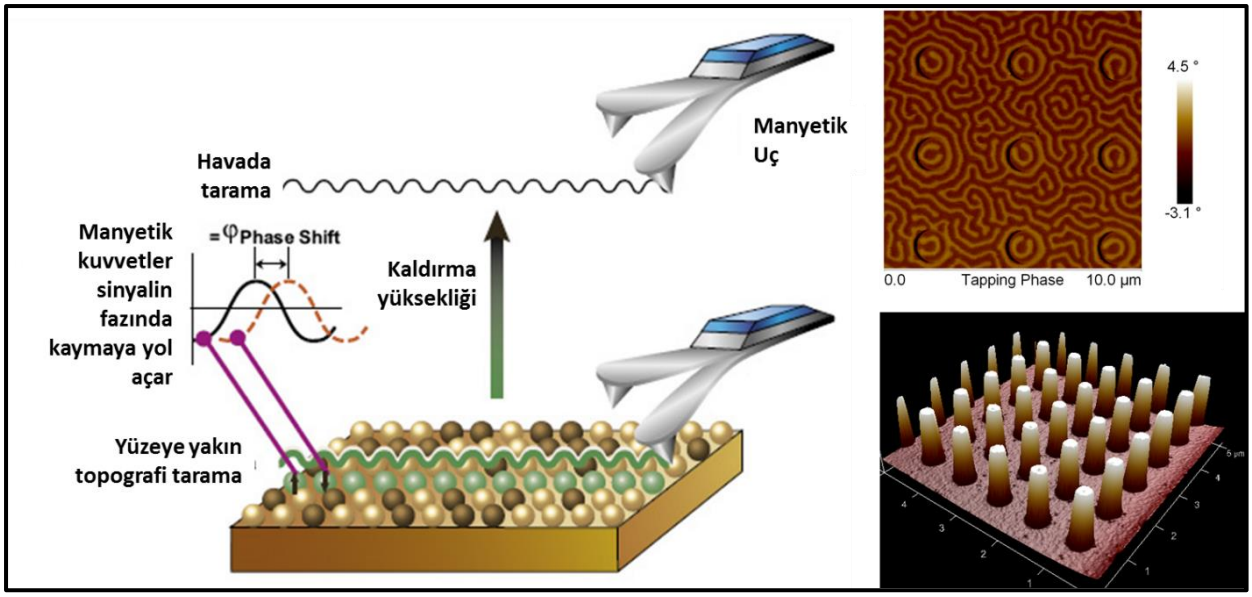
Şekil 3.2.7.2: AKM ile alınmış SiO_2 filminin yüzey topografisi

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.

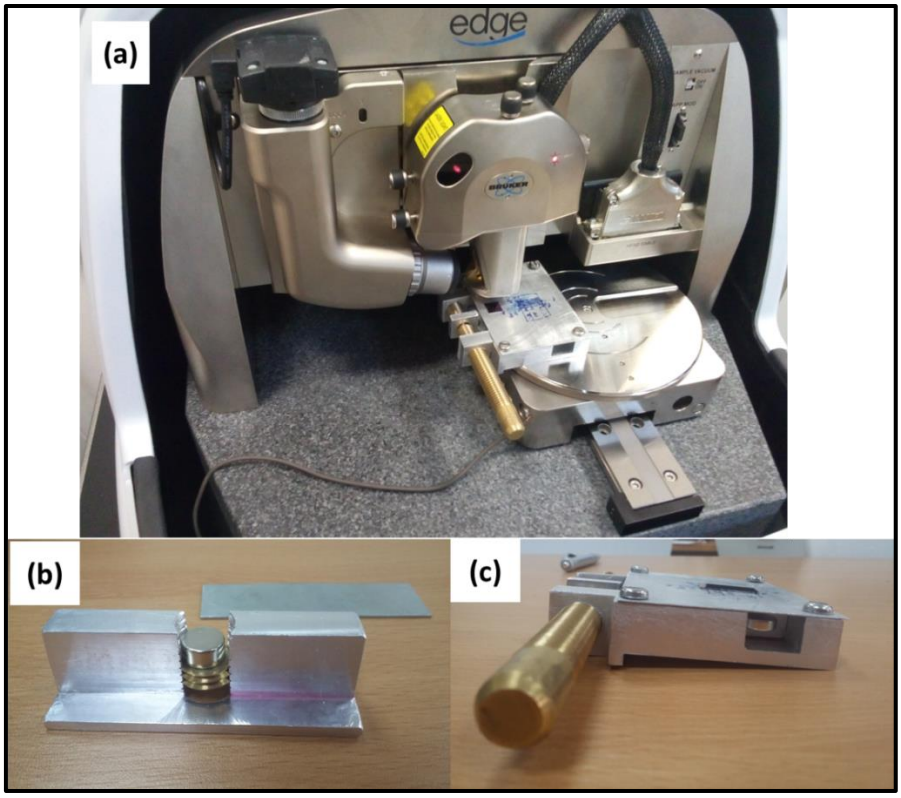
Manyetik görüntüyü elde etmek için AKM vurma modunda çalıştırılmalıdır. Manyetik örneğin normal vurma modu taraması için manyetik ve elektrostatik kuvvetler salınım frekansındaki sapmalara yardım eder. Bu yüzden, MKM yükselme modunda çalışır. Uç yüzeyi tararken örnek boyunca düz çizgiler halinde tarar ve her çizgi öne ve arkaya olmak üzere iki defa taranır, bkz. Şekil 3.2.7.3. 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 yükselir. En sonunda son geri faz görüntüsü örneğin manyetik dağılımını ortaya çıkarır. Şekil 3.2.7.3'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.



Şekil 3.2.7.3: MKM çalışma prensibi ve örnek topografi görüntüsü ve benzer yapıdaki MKM görüntüsü

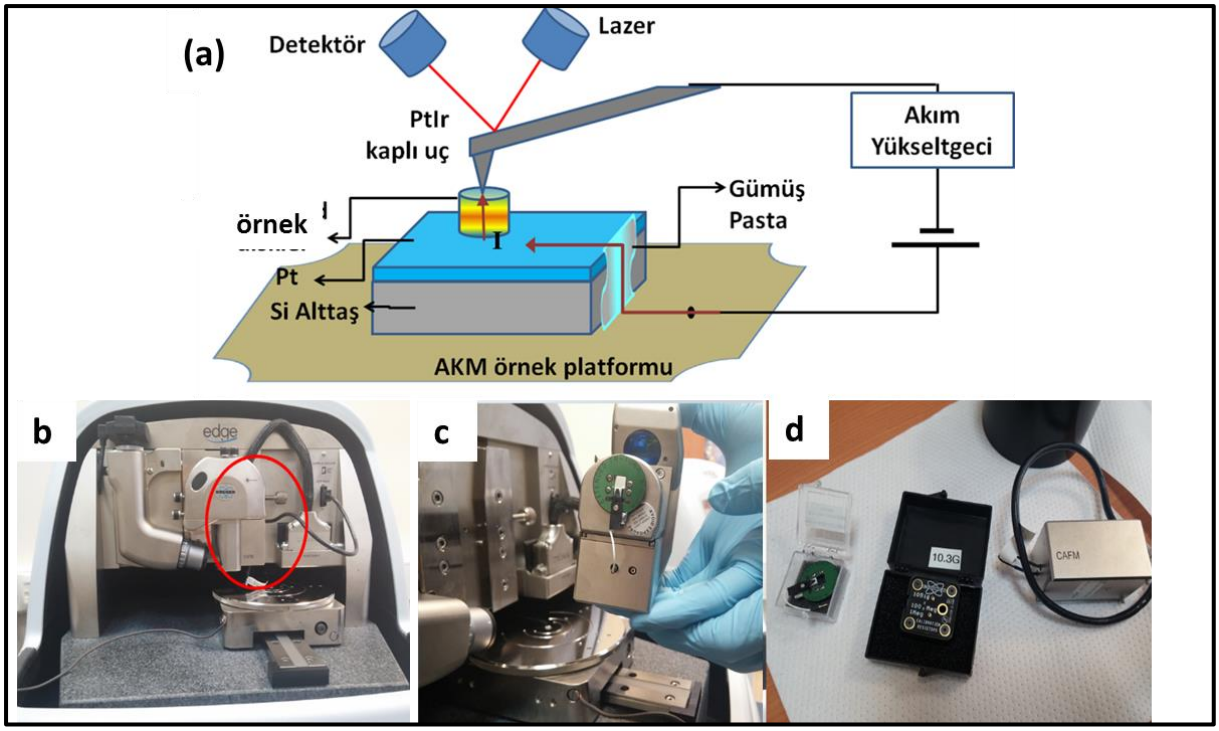
MKM görüntülemesi manyetik alan altında da yapılabilir. Bunun için laboratuvarımızda üretilen manyetik alan platformları kullanılmıştır. Manyetik olmayan malzemelerden (Al ve pirinç) torna ve frezede iki ayrı platform yapılmıştır. Bruker AKM ile entegre edilebilen bu manyetik alan platformları Şekil 3.2.7.4'te gösterilmiştir. Biri yüzeye dik (Şekil 3.2.7.4b), biri yüzeye paralel (Şekil 3.2.7.4c) 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.



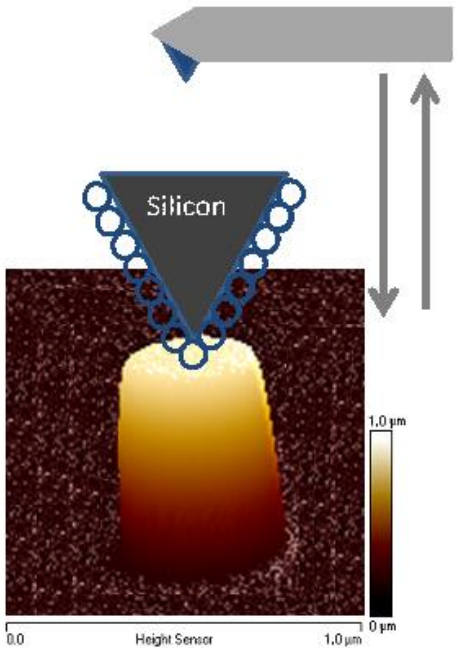
Şekil 3.2.7.4: Bruker AKM'de manyetik alan altında MKM görüntülemeleri için tasarlanmış manyetik alan uygulayan platformları (b) düzleme dik ve (c) düzleme paralel manyetik alan uygulayabilmektedir.

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 3.2.7.5c). 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. Laboratuvarımızda Şekil 3.2.7.5'te gösterilen Bruker marka Dimension Edge model bir AKM kullanmaktayız



Şekil 3.2.7.5: 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

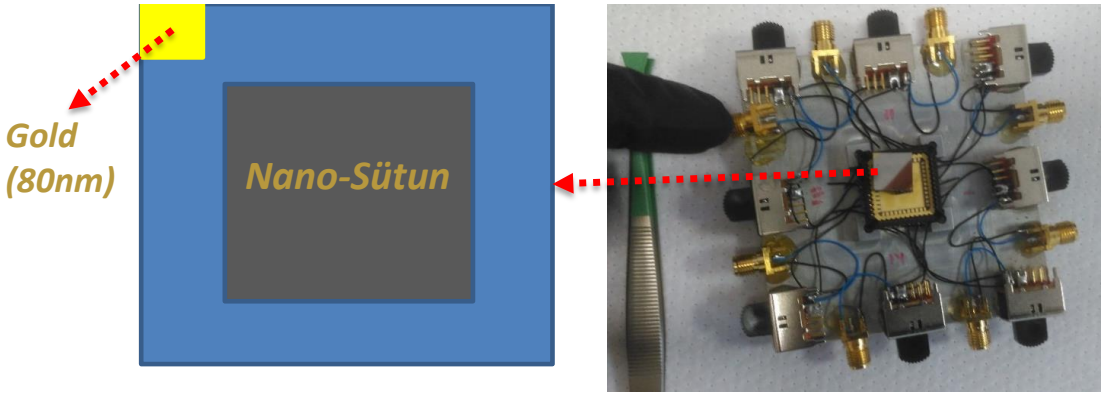
Tüm ince filmin üst katmanının oksitlenerek yalıtkan olması için iyon aşındırma işlemi Titanyum katmanına kadar yapılmata ve bu katman üst katman olacak şekilde işlem sonlandırılmaktadır. Bunun sebebi Titanyum oksitlenerek ayıtın en üst katmanında yalıtkan bir tabaka oluşturulur. İyon aşındırma işleminin sonunda, nano sütunun üzerini saran parçacıklar son olarak aşındırdığımız katmandan kopan parçacıklar olacağından Titanium veya CoFeB da iyon aşındırmasını durdurmaya özen gösteriyoruz. Bu da iyon aşındırması yapılırken durmamız için 2 nm'lik bir hata payı bırakıyor. Tüm örnek yalıtkan bir katmanla kaplandıktan sonra üst kısımda Platin kontak filmin de ince bir izolasyon tabakası olduğunu biliyoruz ancak C-AFM ölçümlerinde oksitlenmiş ince bir tabakanın kırılması için bir yöntem mevcut. "Z eğrisi" yöntemi, ince oksit katmanlarını çatlatmamıza ve iyi bir elektrik bağlantısı kurmamızı sağlıyor. Temel olarak, Z eğrisi yönteminde AKM iğnesi kontak bölgesi üzerinde bir kuvvet uygular ve tekrar orijinal konumuna geri döner. Ardından yaptığımız ölçümlerde iyi bir IV eğrisi Şekil 3.2.7.6. da elde edildi. Bu yöntem, ince oksitlenmiş tabakayı kırmanın yanı sıra çok ince (5 nm) Platin tabakasından kaynaklanan elektrik bağlantı problemini de çözmektedir.



Şekil 3.2.7.6 : Z eğerisi metodunun 400 nm yarıçaplı nano sütunun AKM görüntüsü üzerindeki gösterimi

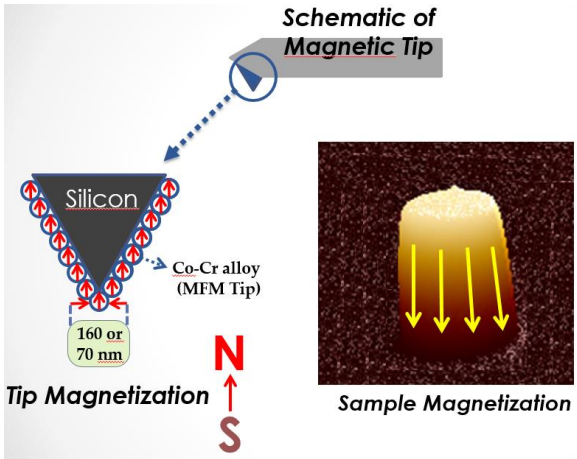
İletken Atomik Kuvvet Mikroskobu'nde İ-AKM iğnesi vasıtasıyla akım darbeleri gönderebilmek için nano-sütunun üstünden geçen akım örneğin yerleştirildiği tablaya gidebilecek şekilde bir elektriksel bağlantı kurulmalıdır. Ancak akımın direk olarak nano sütunlardan tablaya ulaşmasını engellemek ve bizim tanımladığımız belirli bir yolu izlemesi için, önce örneğin tabladan izole edilmesini sağlamak durumundayız. Elektriksel izolasyonu sağlamak için örnek kalın bir SiOx üzerinde büyütülür. Bu şekilde nano sütundan geçen akım örneğin üstünden alınan başka bir bağlantı yardımıyla çekilir.

İ-AKM deney düzeneği ve örneğin film yüzeyi arasında iyi bir elektrik bağlantısı kurmak için, 45 tekrar (Pt/CoFeB/Ti) çoklu katmanından oluşan filmin 3 nm'sini AJA saçtırma sisteminin içinde bulunan iyon aşındırma sistemi ile aşındırdık. İyi bir elektrik bağlantısı yapmak için aşındırma işleminden sonra vakum kırılmadan 80 nm'lik bir katman oluşturacak kadar altın saçtırdık. Örneği yonga taşıyıcısı üzerine yerleştirdik. Mikron çaplı teller kullanan tel bağlayıcımız tarafından bu Altın kontak ve yonga taşıyıcı arasına bağlantı kurduk.

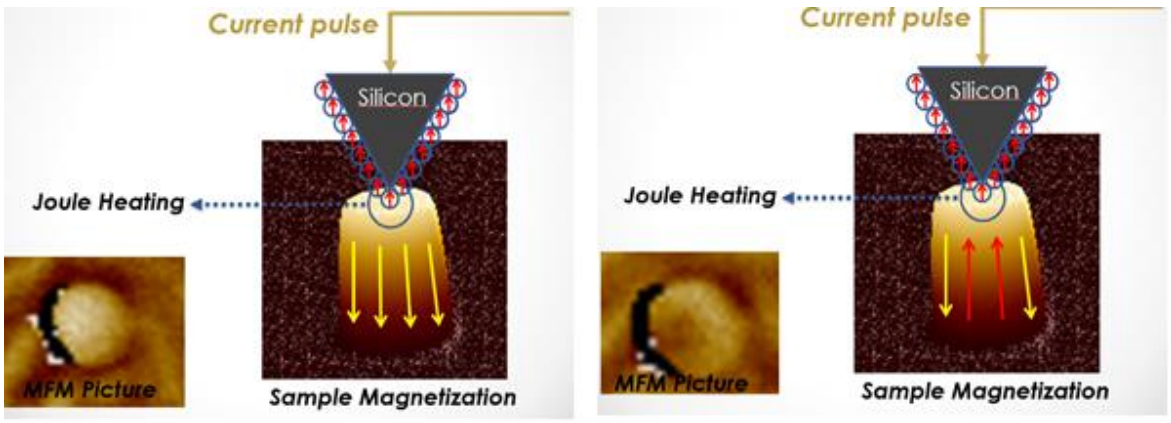


Şekil 3.2.7.7 : Örneğimizin çizimi ve üzerindeki altın kontağın gösterimi (sol taraftaki gösterim). Örneğimiz ve İ-AKM tablası arasında elektriksel bağlantıyı yapmak için kullandığımız devre (sağ taraftaki resim)

İ-AKM iğnesinin ucundan yayılan manyetik alan aracılığıyla manyetizasyon yönünü değiştirmek istiyoruz. Bunun için sıfırlayıcı alanı azaltmamız gerekiyor çünkü uç tarafından uygulanan manyetik alan, örneğin sıfırlayıcı manyetik alanından daha düşüktür. Nano sütunun ucun temas ettiği kısmı, sıfırlayıcı alanı azaltmak için akım darbesi ile ısıtılır. Temas bölgesi üzerinde yüksek akım yoğunluğu olduğu için, manyetik alan nano sutunların bir bölümünü etkiler. Ayrıca, manyetik uçlarımızın uçları farklı boyutlarda üretilmiş olan nano sütunlar çapından daha küçük olduğunda nano sütunun bir kısmının manyetizasyonunu değiştirmek için uygundur (Şekil 3.2.7.8 ve Şekil 3.2.7.9). Mevcut darbeleri göndermek ve aynı zamanda manyetizasyonu değiştirmek için iki çeşit manyetik uç kullanıyoruz. Bu manyetik uçlar Bruker MESP-HM (Uç çapı 16 0nm - Manyetik moment $3e^{-13}$ emu) ve Bruker MESP-LM (Uç çapı 70 nm - Manyetik moment $0,3e^{-13}$ emu) 'dir.

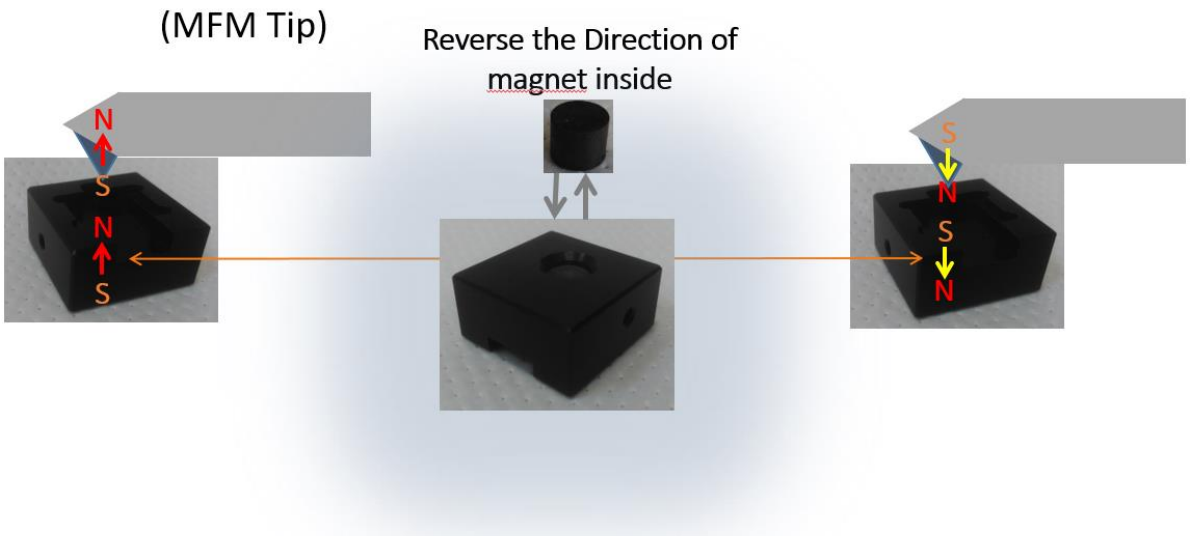


Şekil 3.2.7.8: Manyetik Uç (solda) ve 400 nm yarıçaplı nano sütunların manyetik momentlerinin (sağda) gösterimi



Şekil 3.2.7.9 : Akım darbesi gönderilmeden önce $(CoFeB)_{60}$ 400 nm yarıçaplı nano-sütunun urumu ve MKM fotoğrafı (sol tarafta) ve akım darbesi gönderildikten sonra 400 nm yarıçaplın nano-sütunun durumu ve MKM fotoğrafı (sağ tarafta)

Bu deneyler sırasında kullanılan İ-AKM iğneleri aynı zamanda Manyetik olduğu için MKM ucu diye de geçmektedir. MKM uçlarının manyetizasyonunu bir alet ile vermekteyiz. Manyetizasyonu vermek için kullandığımız aletin mıknatısını söküp ters çevirerek kullandığımızda ters yönde manyetizasyona sahip bir iğne elde edilmiş olunur. Şekil 3.2.7.10 bu değişimi göstermek için hazrılanan bir şekildir.



Şekil 3.2.7.10: MKM iğnesinin manyetizasyonunu değiştirmek için kullandığımız aletin içinde bulunan mıknatısın ters çevrilme işleminin gösterimi

3.2.8. 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 3.2.8.1).

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.

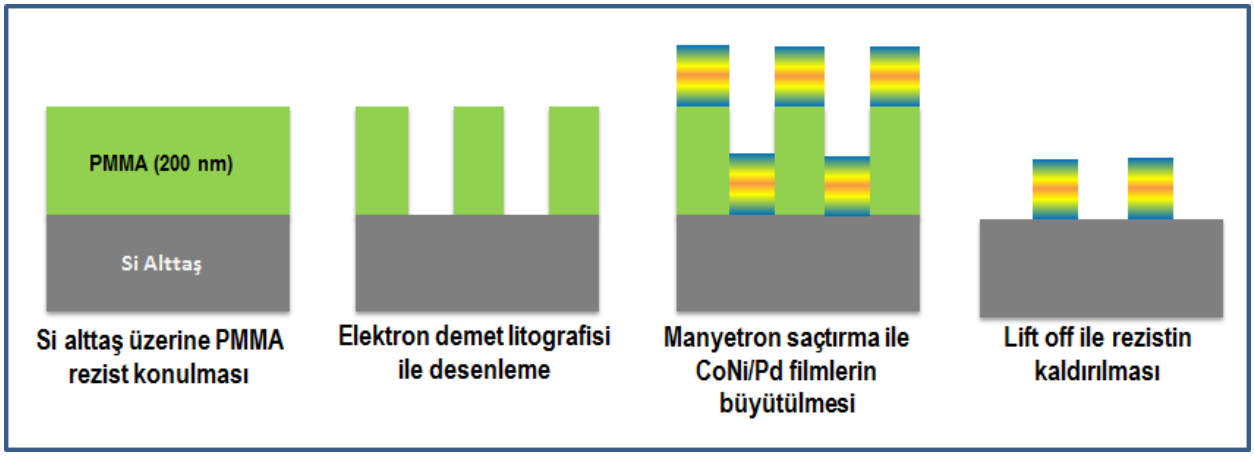
Disk dizinlerinin üretilebilmesi hem demet litografisinin dozuna hem de lift-off koşullarına bağlı olduğu bulunmuştur. 800 $\mu C/m^2$ dozunun altındaki dozlarda dizinler lift-off ile tamamen kalkmıştır. 800-900 $\mu C/m^2$ arası değerler disk dizinleri için en uygun dozlar olarak tespit edilmiştir. Lift-off aşamasında uzun süreli yüksek güçte titreşimler disklerin kalkmasına sebep olmaktadır. En uygun koşullar örneklerin bir gün asetonda bekletildikten sonra 5 sn %50 ultrasonik güçte titreştirilmesi olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2.8.1: SUNUM'da bulunan EBL cihazı ve örnek bir astroid çizimi

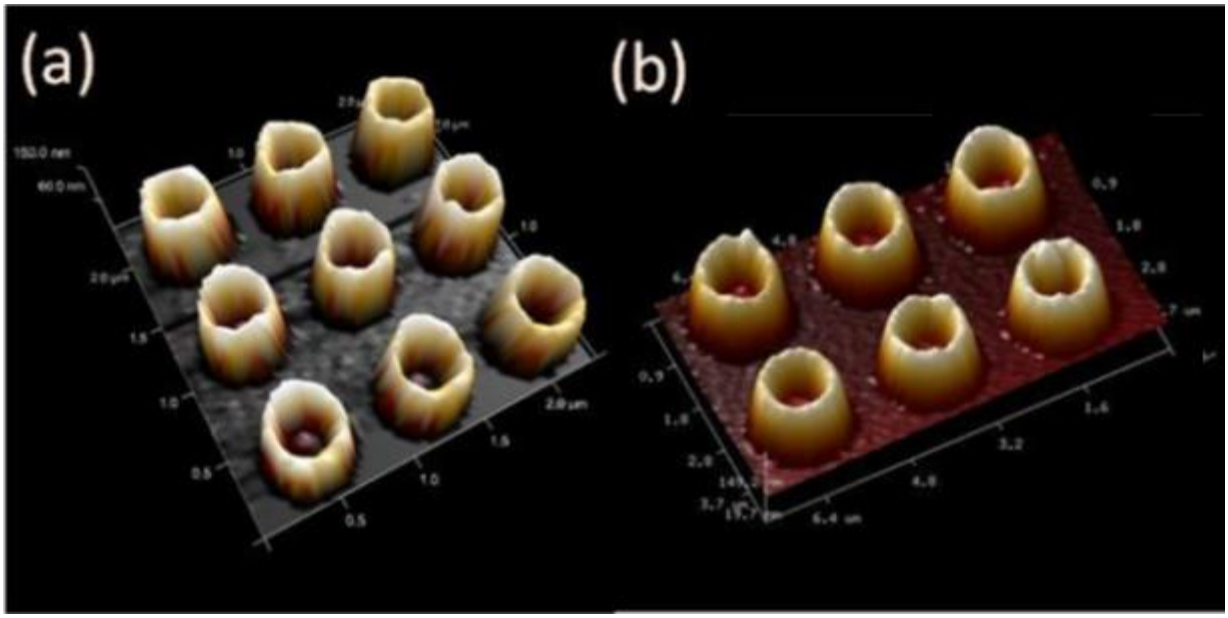
3.2.8.1. Lift-off Yöntemi

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 3.2.8.1.1'de 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 CoNi/Pd 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 CoNi/Pd ince filmi kalır.



Şekil 3.2.8.1.1: Lift-Off yöntemiyle astroid şekilli nano-mıknatıs üretim aşamaları

Lift-off basamağı aygıtların temiz ve düzgün olması açısından önemli bir basamaktır. Şekil 3.2.8.1.2'de lift off sonrası nano disk 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 170^0 C 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. Bu sayede lift-off yöntemi ile nnodisk üretimi tamamlanmıştır. Fakat diskler etrafında belirgin bir şekilde ressist kalıntıları mevcuttur. Şekil 3.2.8.1.2'de lift off sonrası nano disk aygıtlarınının AFM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere manyetik malzeme kısmı halkanın içersinde kalan kısım ve bu bölgenin alttaştan optimum yüksekliği 36 nm civarında iken, nanodiskler etrafında bulunan resist kalnıntılarının yükseklikleri 150 – 200 nm civarında bulunmaktadır. Bu açıdan lift-off yöntemi nanpdisk üretimi için iyi bir yöntem olmamaktadır. Bu sonuca MFM analizlerinden spnra tekrar değinilecektir.



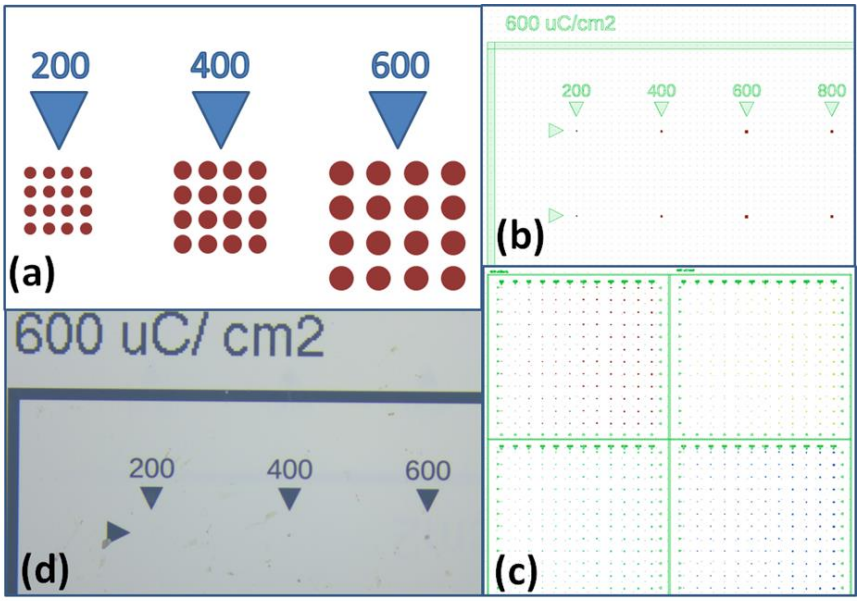
Şekil 3.2.8.1.2: a) ve b) 1.2 µm çapındaki, Lift-off yöntemi ile üretilmiş olan örnekler

3.2.8.2. 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. CoNi/Pd ve Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı nano sütunların ve spin-valf nano sütunların üretimi bu şekilde yapılması planlanmıştır.

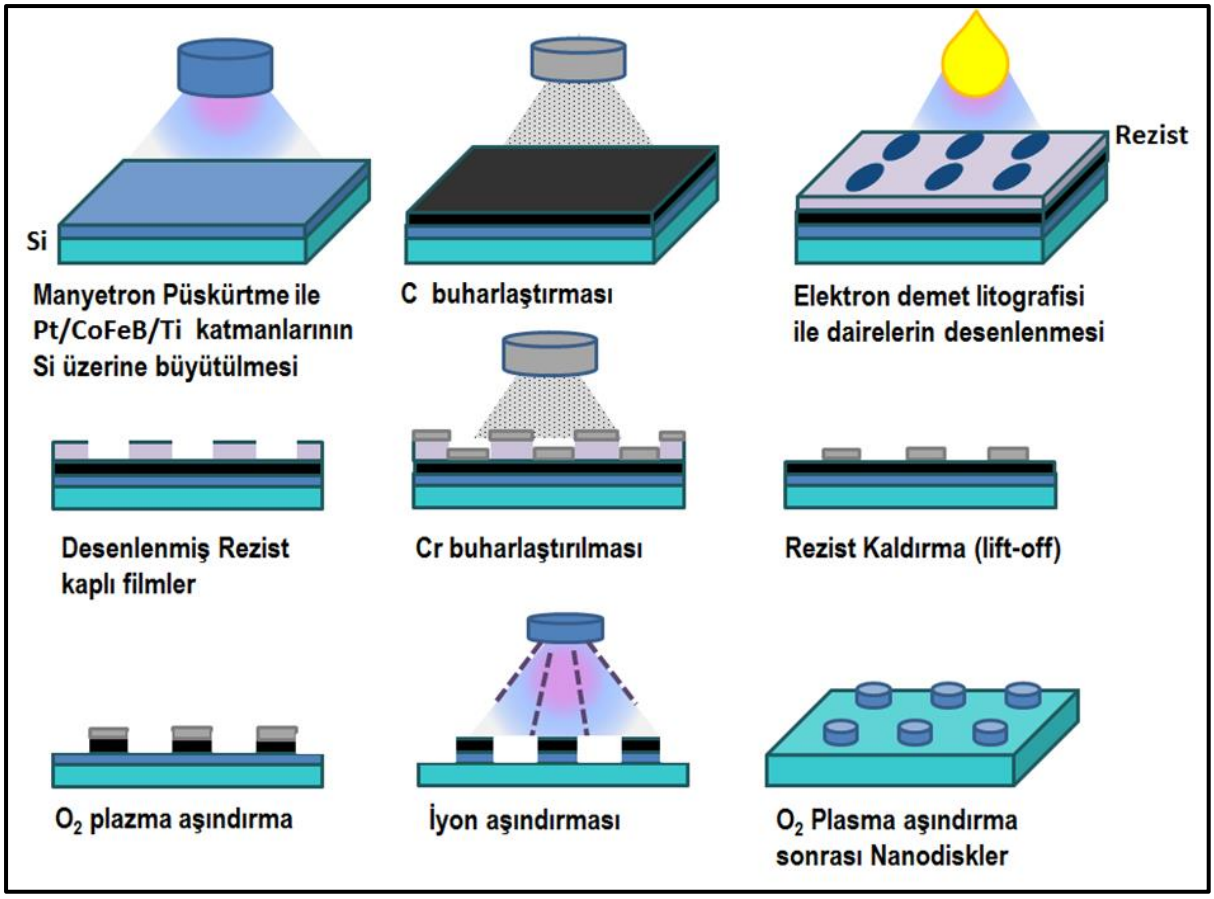
Nano-diskler için şablon bir desen hazırlanmıştır. Şekil 3.2.8.2.1'de gösterilen çizimde 100 ila 1200 nm arasında çaplara sahip disklerin dizin halinde bulunduğu dizin grupları disk çapına göre işaretlenmiştir. Üretim öncesi lift-off yöntemi ile desene elverişli demet dozu belirlenmiştir. Astorid aygıtları 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 3.2.8.2.2.2'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.

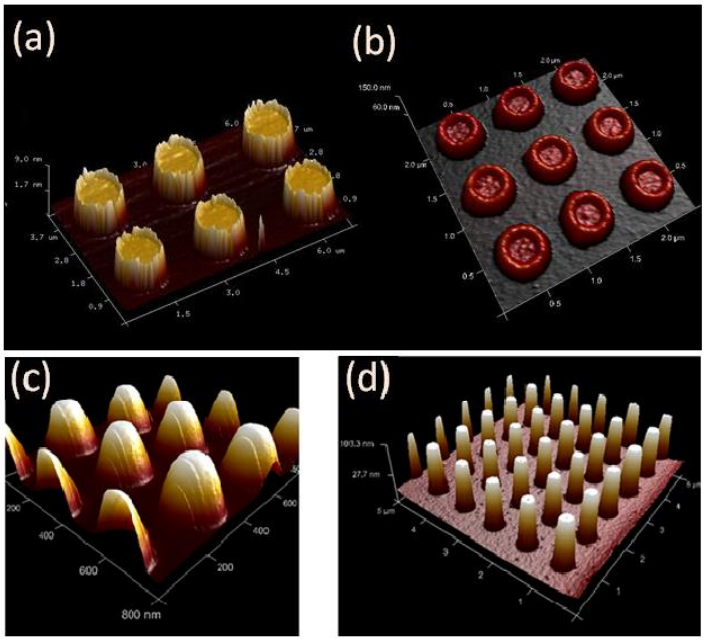


Şekil 3.2.8.2.1: Nano-diskler için çeşitli çaplarda hazırlanmış disk dizinleri ve üretim sonrası alttaş üzerine çizilen desenin optik mikroskop görüntüsü

Şekil 3.2.8.2.2.2'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.



Şekil 3.2.8.2.2.2: İyon aşındırması ile nano-disklerin üretim basamakları



Şekil 3.2.8.2.3: Nano-disklerin üretim sonrası AKM görüntüleri (a) 1200 nm, (b) 400 nm çaplı disk dizinleri CoNi/Pd için (c) 100 nm ve (d) 400 nm çaplı disk dizinleri CoFeB için

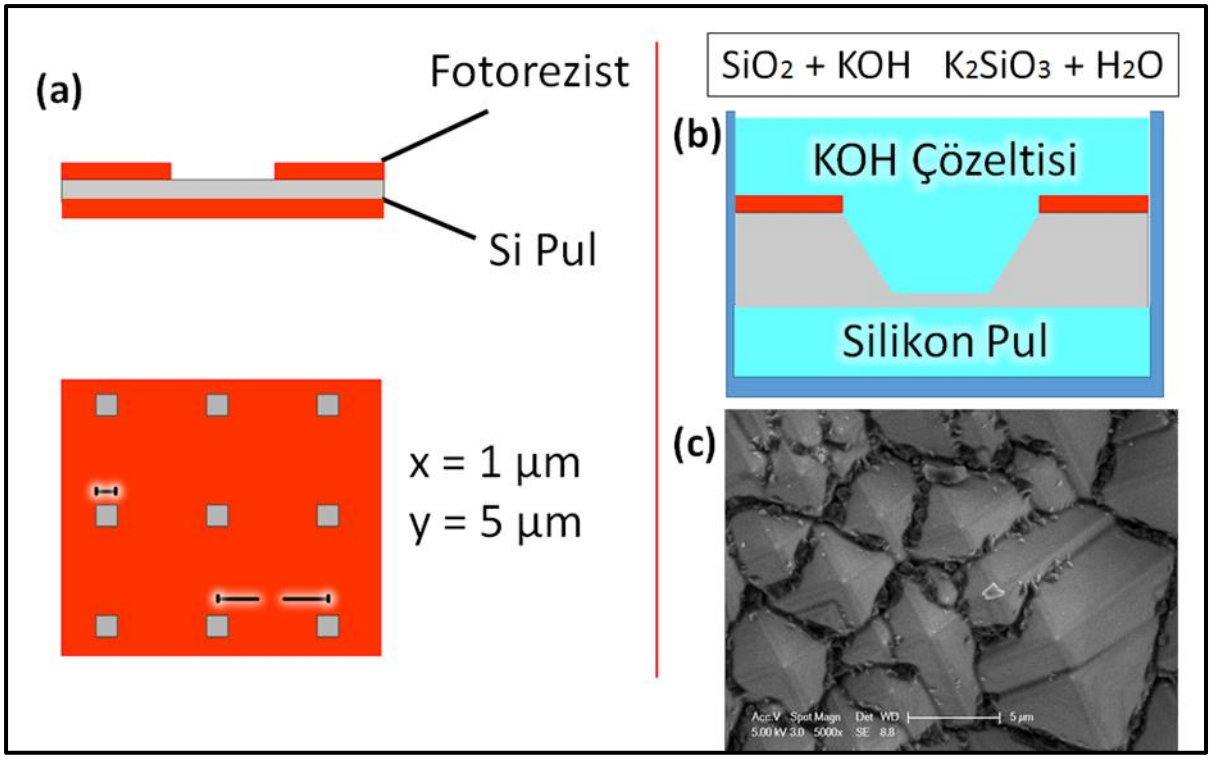
Bu yöntemle başarı ile üretilen CoNi/Pd ve Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı yapısına ait nano diskler Şekil 3.2.8.2.3 a) ve b) CoNi/Pd için, Şekil 3.2.8.2.3 c ve d CoFeB için gösterilmektedir. Sırasıyla 1200 ve 400 nm (CoNi/Pd) ve 100 nm ve 400 nm (CoFeB) çapındaki disklere ait AKM görüntülerinde disklerin kenarlarında kalıntı olmadan başarı ile üretildiği görülmektedir.

3.2.8.3. 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 3.2.8.3.1). Zar oluşumu için şöyle bir prosedür uygulanmıştır:

- Si pulların temizlenmesi
- Si pullar üzerine iki tarafa da PMMA rezist malzemesi kaplanması (Şekil 3.2.8.3.1 a)
- Tek yüzde elektron demet litografisi ile kare boşluklar açılması (Şekil 3.2.8.3.1 a)
- Yüksek ısıda (75^0 C) 1,5 lt, 1 Molar KOH solüsyonuna batırılan Si pulun belirli bir süre bekletilmesi (Şekil 3.2.8.3.1 b)
- Pulun önce soğuk suya batırılması ve ardından aceton ve izopropanol'de temizlenmesi.

İlk etapta Şekil 3.2.8.3.1a'daki 1 μm boyutunda kareler demet litografisi ile desenlenmiştir. Bu proses sonrası çekilen SEM resmi Şekil 3.2.8.3.1c'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.



Şekil 3.2.8.3.1: (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

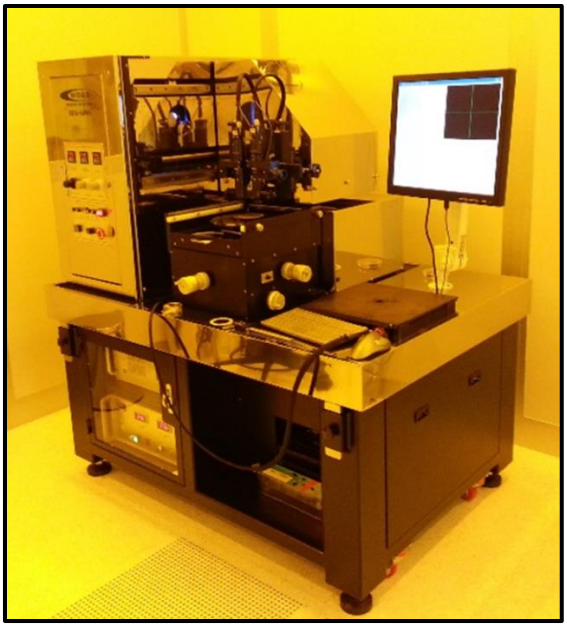
Bu tecrübe sonrasında bu işlem için en uygun rezist araştırılmış ve piyasada oldukça pahalı olan Shipley rezistlerinin kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. En az dört elektron demet litografisi ve iki fotolitografi basamağı gerektiren bu proses rezist malzemesinin de pahalı olmasıyla birlikte oldukça maliyetli bir proses olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle nano-kontak yapılarına alternatif olarak modellenen CoFeB/Pt çoklu katmanlı nano-sütunları üretilmesine karar verilmiş ve işlem basamağı durdurulmuştur.

3.2.8.4. Fotolitografi ile Kontak Yüzeylerinin oluşturulması

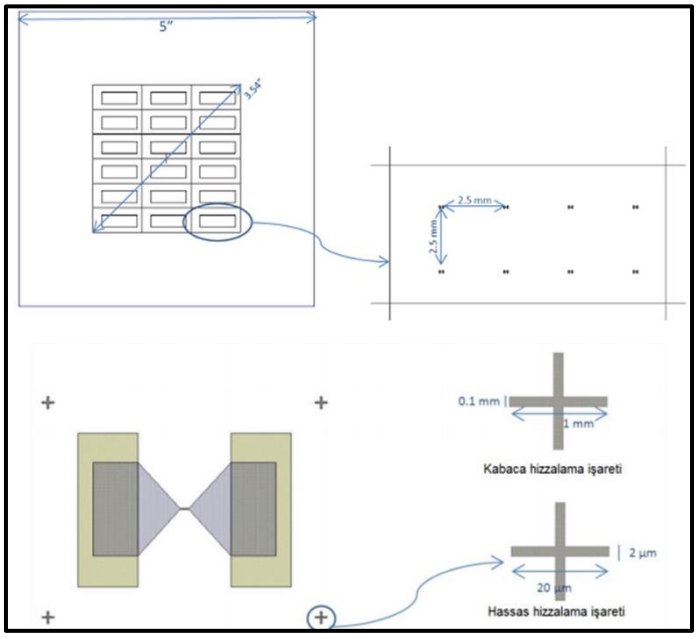
Elektriksel bağlantı için gerekli elektrotlar fotolitografi ile desenlenmiş ve lift-off yöntemiyle üretilmiştir. Fotolitografi tekniği mikron üstü ebatlarda geometrik desenler üretmek için kullanılır bir mikro-fabrikasyon işlemidir. Bu işlemde, fotorezist denen bir kimyasalla kaplı olan alttaş üzerine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



Şekil 3.2.8.4.1: SUNUM'daki Midas maske hizalayıcı

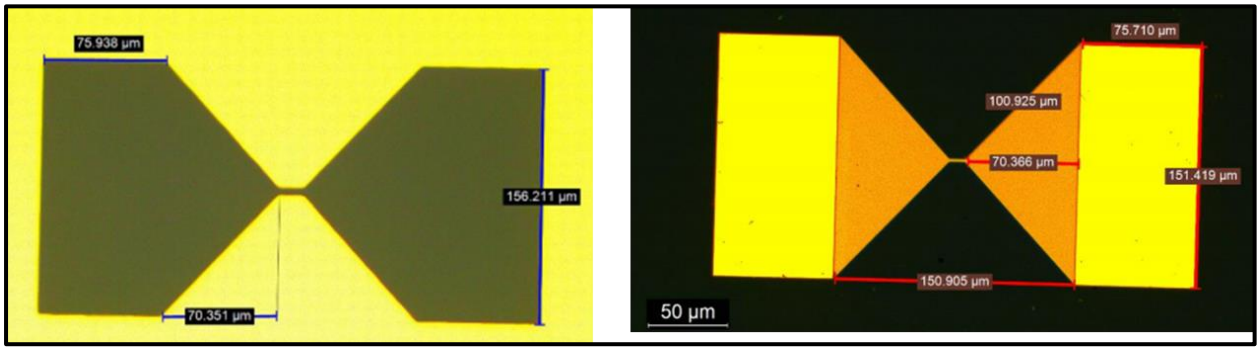


Şekil 3.2.8.4.2: Mikro-tel üretimi için kullanılan papyon şekilli fotomaske ve kontak maskesi hizalama işaretleri ile gösterilmiştir.

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. Bunlar Bilkent Üniversitesi UNAM'da yapılmıştır: Malzemelerin elektriksel özelliklerini belirlemek için üretilmiş mikro teller içeren maske (UNAM) ve spin valf aygıtlarında kullanılan üst kontak maskesi (UNAM). Üretilen filmlerin elektriksel karakterlerini belirleyebilmek adına papyon şeklinde mikro-teller üretilmiştir. Bunu için maske kullanılmıştır. Birinci maske ile mikro-teller üretilmiş (3.2.8.4.2) bunun üzerine hizalama işaretleri kullanılarak kontak dörtgen şekilleri fotolitografi ile desenlenmiştir.



Şekil 3.2.8.4.3: Birinci maskenin üretiminden sonra bir papyon deseni ve hizalama sonrası kontak yerleştirilmiş hali

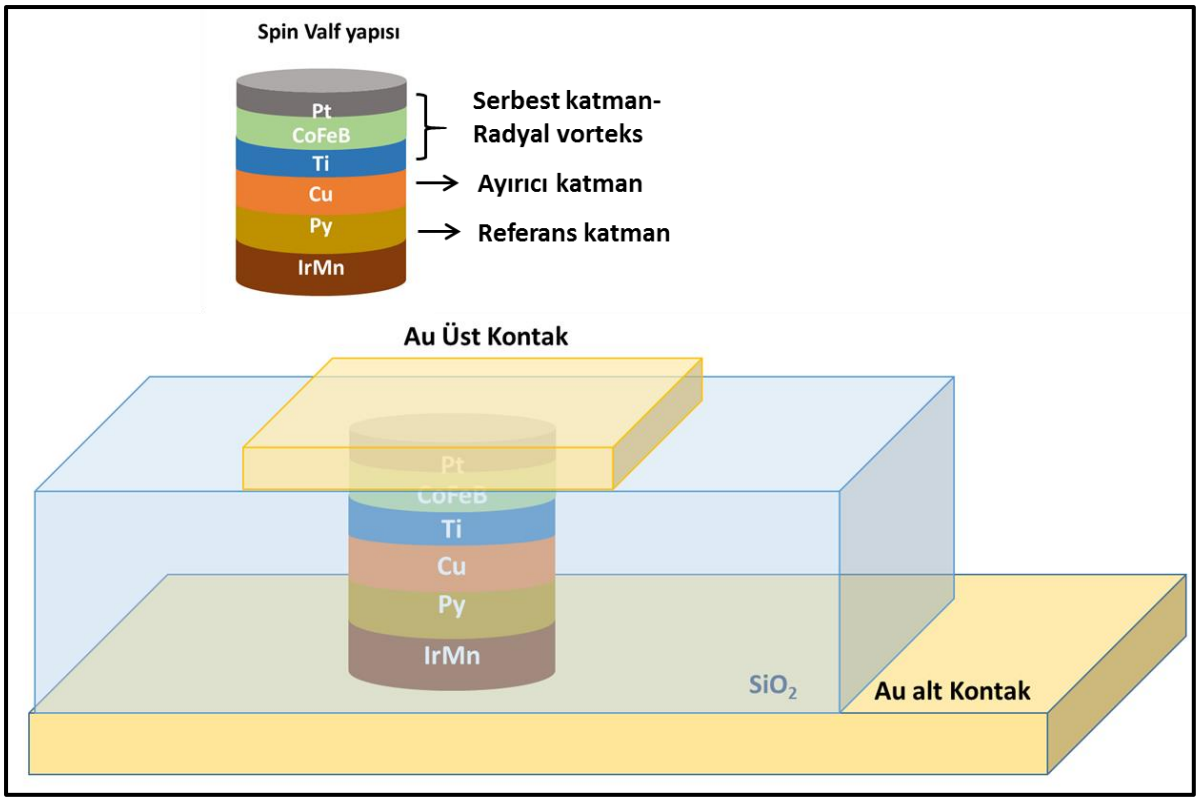
Birinci maskede her dikdörtgen biçimindeki bölgelere ilişkin mikro-teller 2x10, 2x8, 2x6, 2x4, 2x20, 2x15, 2x16, 4x20, 5x15, 5x10, 3x30, 4x30, 5x25, 5x20, 7x21, 10x20 ve 4x40 boyutlarındadır (hepsi mikron mertebesinde). İkinci maske altın bağlantılar için 100x250 mikron, diğeri de 75x150 mikron boyutunda dörtgenler içermektedir.

Şekil 3.2.8.4.3'te birinci ve ikinci maskelerin üretiminden sonraki optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Bu tasarımla Au filmlerin elektriksel bağlantıları kontrol edilmiş ve üretim basamakları optimize edilmiştir. CoNi/Pd ve CoFeB thin filmlerinin de öz direncinin hesaplanması ve Au kontaklar ile bağlantı kalitesi kontrol edilmiştir.

3.2.8.5. 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

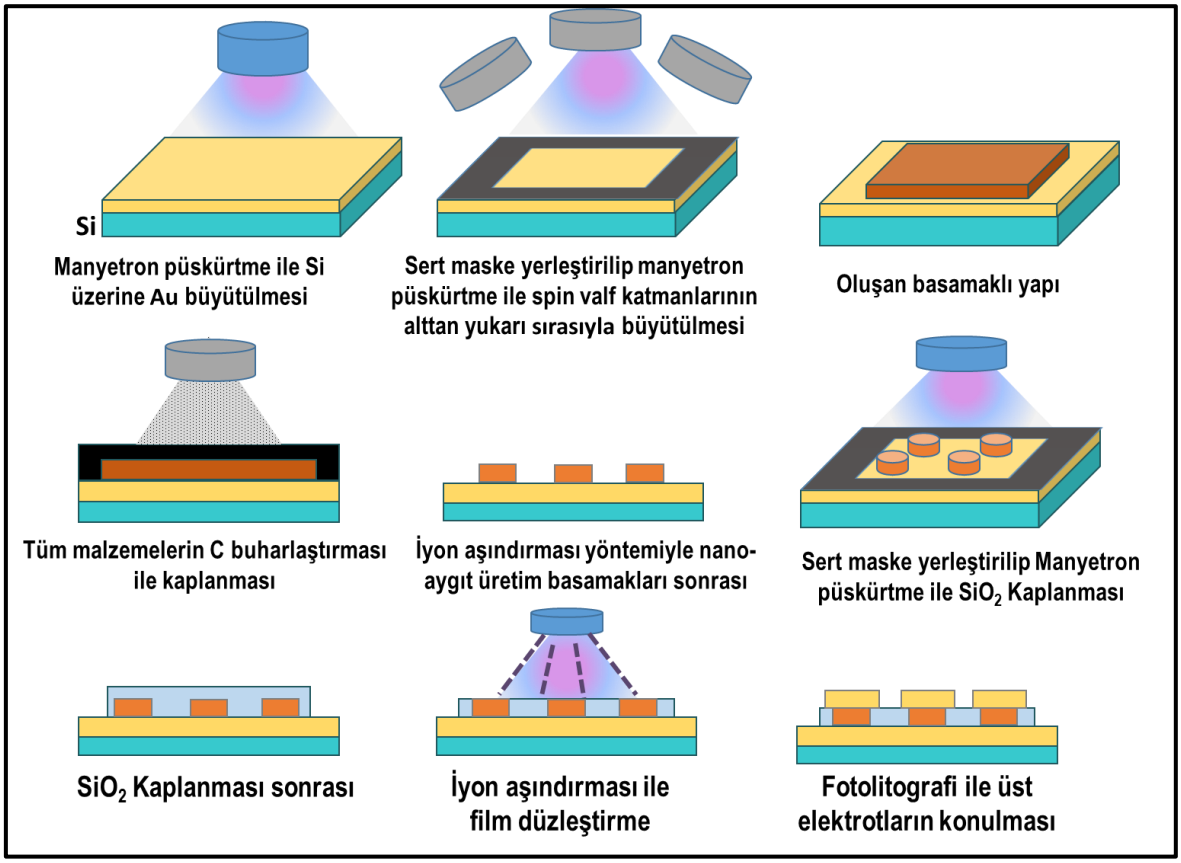
mıknatıslanma dinamiklerini tetiklemek ve ölçmek amacıyla tasarlanmıştır. Bunun için modelleme kısmında öngörülen radyal vorteks oluşumuna elverişli Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı yapısı değerlendirilmiştir. Pt/CoFeB/Ti katmanları serbest katman olarak kullanılmış, ayırıcı katman olarak Cu ve değiş-tokuş mekanizmasıyla sabitlenmiş Py katmanı da spin-polarize akım aşılayıcı katman olarak üretilmiştir. Şekil 3.2.8.5.1'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 3.2.8.5.1 Spin valf nano-sütunu ve kontaklar ile birlikte tasarımı

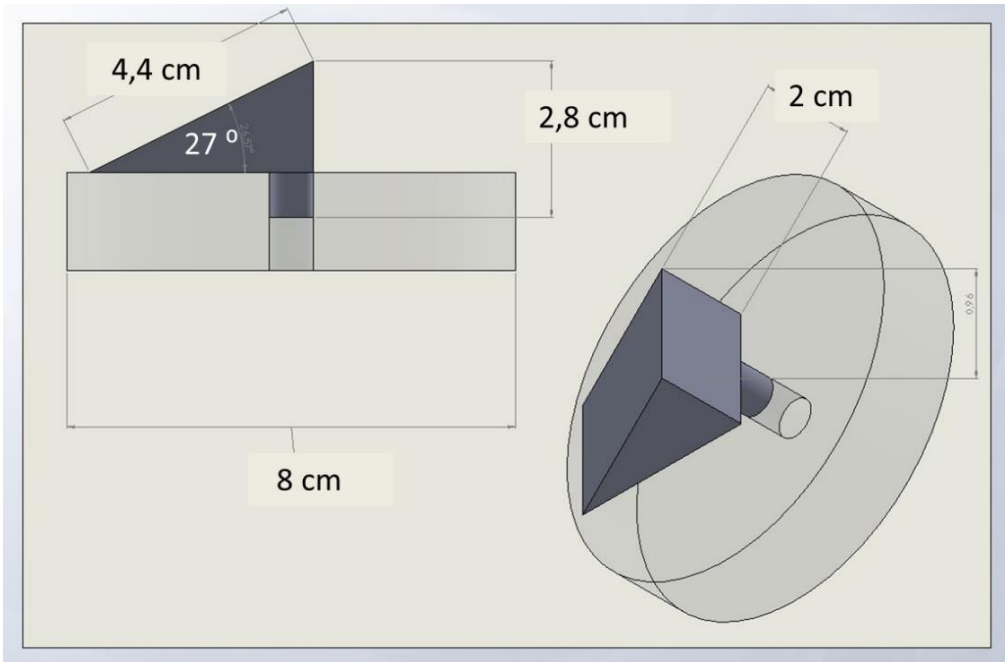
Spin-valf aygıtlarının üretim basamakları Şekil 3.2.8.5.2'de gösterilmiştir. 2cm x 2cm ebatlarında kesilmiş Si alttaşlar üzerine önce alt elektrot olarak 150 nm Au büyütülmüştür. Bu Au malzemenin üzerine ortasında 1,7cm x 1,7cm kare bir boşluk olan metal bir maske yerleştirilmiştir. Bu şekilde yüksek vakumda Şekil 3.2.8.5.1'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 3.2.8.5.2'de gösterilmiştir. Bu yapının üzeri buharlaştırma ile C kaplanmıştır. İyon aşındırması yöntemi ile nano-sütun büyütme basamakları tek tek uygulanmış ve Şekil 3.2.8.5.2'daki gibi geniş Au alt

elektrot üstünde silindirik nano-sütunlar 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.

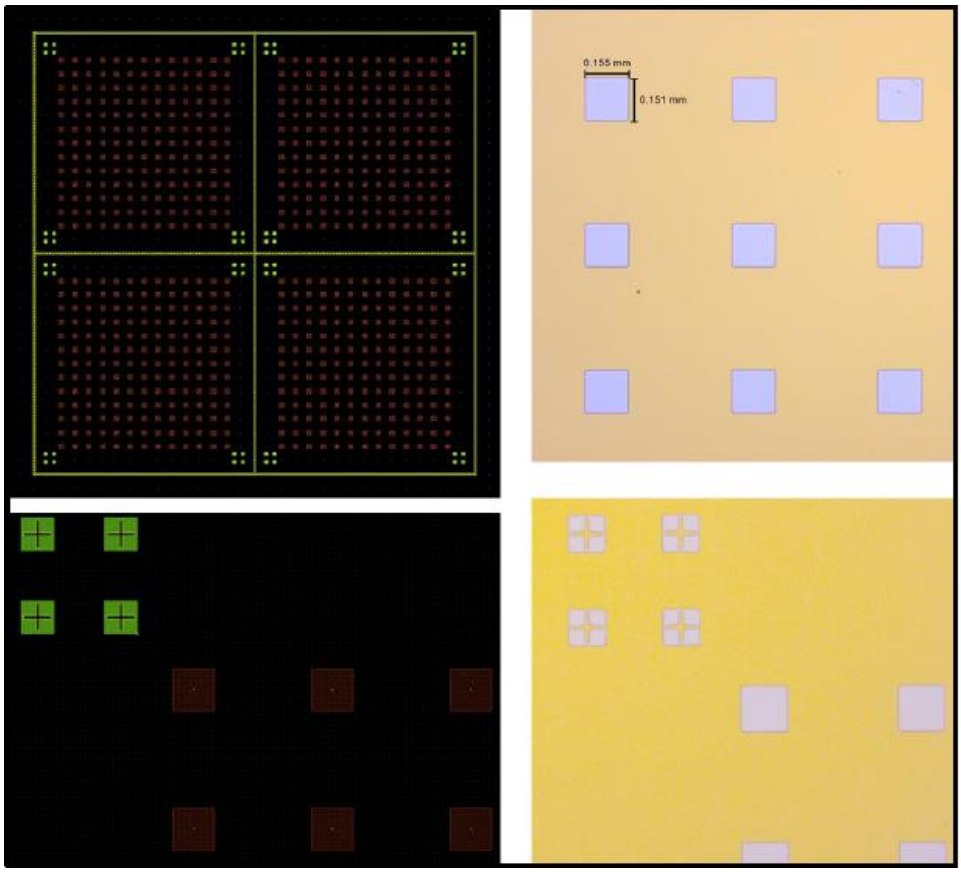


Şekil 3.2.8.5.2: Spin valf aygıtlarının üretim prosedürü

Mevcut iyon aşındırma açısı ile iyon aşındırma hemen hemen düzgün dağılımlı bir etki vermektedir. Bu şekilde aşındırma yapmak ancak örnekleri SiO_2 üretimi öncesine döndürecektir. Bu nedenle en optimum aşındırma seçeneği yüzeye neredeyse paralel bir açıyla aşındırma yapıp sütunların üst kısmında kalan Au çıkıntıların düzleştirilmesi olacaktır. AJA sisteminde iyon aşındırma tabancasının açısı sabit olduğundan örnek platformunun açısını tabancaya paralel hale getirmek gerekmektedir. Bunun için açılı bir örnek platformu tasarlanmıştır. Şekil 3.2.8.5.3'de gösterilen Solidworks çiziminde yuvarlak platform üzerine 27 derece açı ile konumlandırılmış üçgen bir parça görülmektedir. Sistemde sabit bir şekilde duracak platform üzerine vida delikleri açılarak alttaşlar bu deliklere sabitlenen tutucu kollarla tutulacaktır. Bu tasarımın son detayları gözden geçirilip atölyemizde üretilecektir.



Şekil 3.2.8.5.3: AJA sisteminde son iyon aşındırması basamağı için tasarlanan örnek platformu

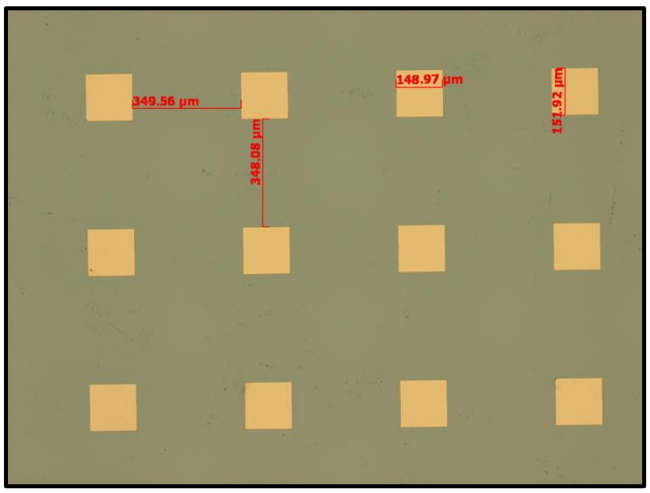


Şekil 3.2.8.5.4: Spin-valf yapıları için tasarlanan üst kontak maskesi

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.

Spin valf üretim basamaklarının son aşaması olan üst kontak maskesi üretimi bu dönemde tamamlanmıştır. Çizimleri Layout Editor ile yapılan (bkz Şekil 3.2.8.5.4) maske 4 inç bir alttaş üzerinde beşayrı 2cm x 2cm lik bölgeye fotolitografi yapacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede hem tam bir Si pul hem de 2cm x 2cm lik parçalar üzerine örnek yapılabilecektir. Hizalama işaretleri kare içinde + işaretleri olarak belirlenmiştir. Şekil 3.2.8.5.4 maske çizimi ile birlikte üretilen maskenin optik mikroskop görüntüsünü göstermektedir. Bilkent Üniversitesi UNAM (ulusal nanoteknoloji araştırma merkezi) laboratuvarlarında üretilen maskede tasarlandığı gibi 150 µm x 150 µm ebatındaki üst kontak alanları Cr kaplı cam üzerinde açıklıklar olarak oluşturulmuştur. Bu kontak alanı birden fazla wire-bonding ile bağlantı olanağı sağlamaktadır. Üst kontak maskesi ilk olarak iletken AKM deneylerinde Au zemin üzerine CoFeB/Pt katmanları üretimi için kullanılmıştır.

Şekil 3.2.8.5.2'deki üretim basamaklarının çoğu optimize edilmiştir. En son kontak elektrotların konulma aşaması optimize edilecek basamaktır. Burada SiO_2 ile ayırılmış spin valf yapılarının üstüne düzgün kontak kurabilmek için SiO_2 üretim basamağından sonra iyon aşındırması ile kontak elektrotların bağlantı kuracağı üst spin valf katmanına kadar yüzey kaldırılacaktır.



Şekil 3.2.8.5.5:3 Üretilmiş spin-valf aygıtlarının fotolitografi ile desenlenmiş üst elektrotlarının optik mikroskop görüntüsü

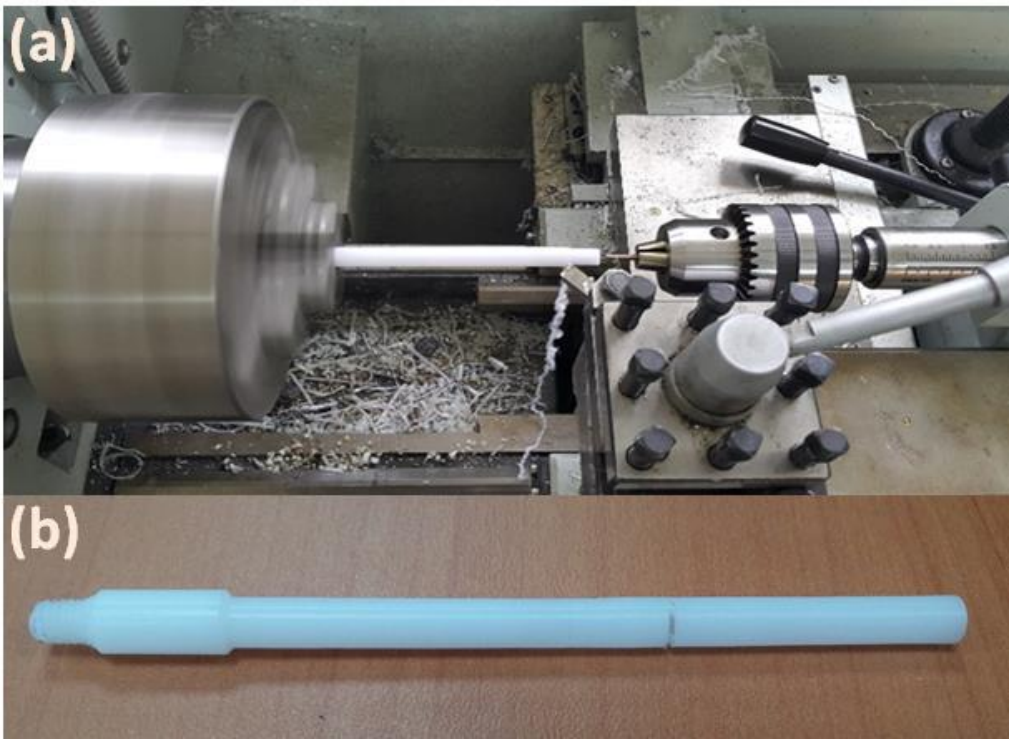
Litografi işlemi için SUNUM'da bulunan Midas marka maske hizalayıcı kullanılmıştır. Az-5214 fotorezist ile kaplanan alttaşlar 100 ºC'de 1 dk ısıtılır. Maske maske-tutucusuna yüklenirken örnek vakum tutucu üzerine yerleştirilir. Mikroskop yardımıyla maske üzerindeki hizalama işaretleri örnek üzerindekilerle 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.

Spin-valf aygıtlarının üretim basamaklarının en son aşaması olan fotolitografi ile elektrot üretimi sonucu örneklerin optik mikroskop görüntüsü Şekil 3.2.8.5.5:3'te gösterilmiştir. 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 3.2.8.5.1'de gösterilmiştir. Katmanları sırasıyla şu şekildedir: Au(150 nm)/IrMn(50)/Py(10)/Cu(10)/Ti(1)/CoFeB(1)/Pt(5)/Au(100).

3.2.9. Filmerin Manyetik, Elektriksel ve Yüzey Karakterizasyonu

3.2.9.1. Manyetik Ölçüm Düzeneğinin Kurulması

Manyetik malzemelerin özelliklerini belirlemek için kullanılacak olan PPMS sistemi VSM modülü cam çubuklar üzerine yerleştirilen örnekler ancak düzlemiçi manyetik alanda inceleyebilmektedir. Bu modülü düzleme dik manyetik alanlarda örnekleri düşürmeden inceleyebilmek adına atölyemizde yeni bir çubuk tasarlanmıştır. Delrin (Polyoxymethylene) denen dia-manyetik bir malzemeden yapılan bu çubuklar Şekil 3.2.9.1.1a'da gösterildiği gibi torna cihazında VSM'e uyacak ölçülerde şekillendirilmiştir. Bitmiş hali Şekil 3.2.9.1.1b'de gösterilen çubuğun zeminden 33 mm yukarıda bir kısmına açılan ince deliğe kesilen örneklerin yerleştirilmesi ve bu çubuğun VSM örnek tutucusuna monte edilmesi ile örnekler düzleme dik manyetik alanda incelenebilir hale getirilmiştir. Bu ve diğer VSM çubuklarının sıcaklığa bağlı manyetik özellikleri belirlenmiş ve bu veriler arka fon olarak kaydedilmiştir. Yazılan bir Matematika programı ile PPMS verilerinden çubukların arka fon gürültüsü ve Si pulların VSM verileri çıkartılmış, yalnız manyetik filme ait mıknatıslanma değerleri elde edilmiştir.

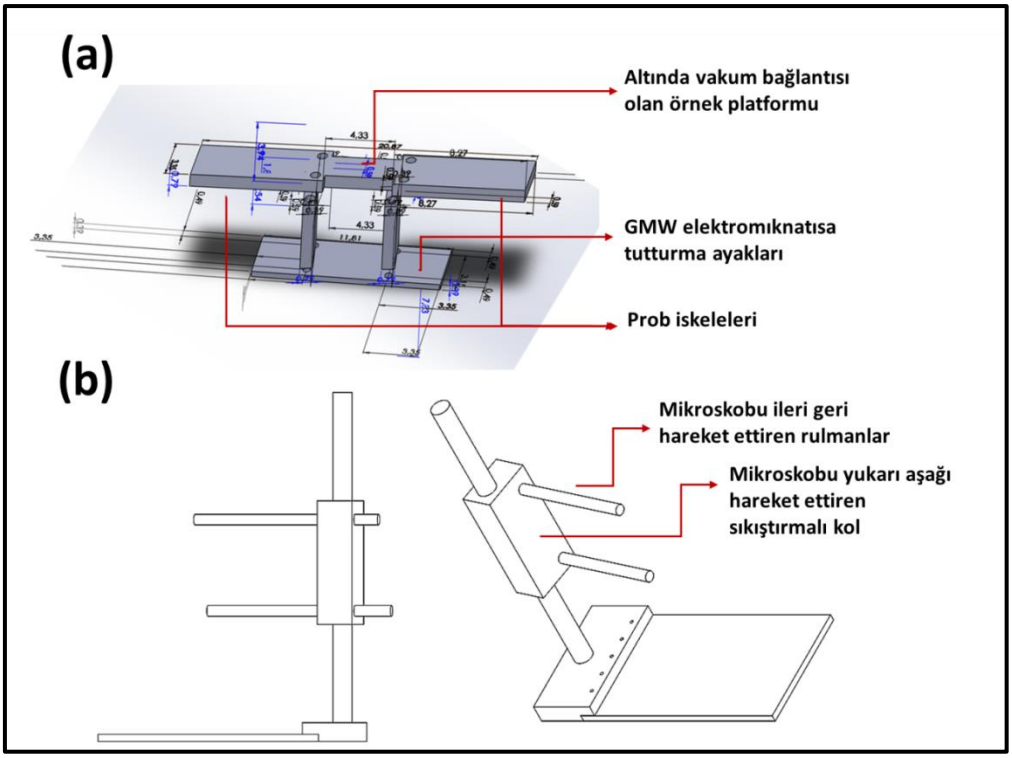


Şekil 3.2.9.1.1 Torna cihazında üretimi (a) ve bitmiş hali (b) gösterilen VSM cihazı çubukları Delrin denen yumuşak malzemeden yapılmıştır

3.2.9.2. 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.

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.

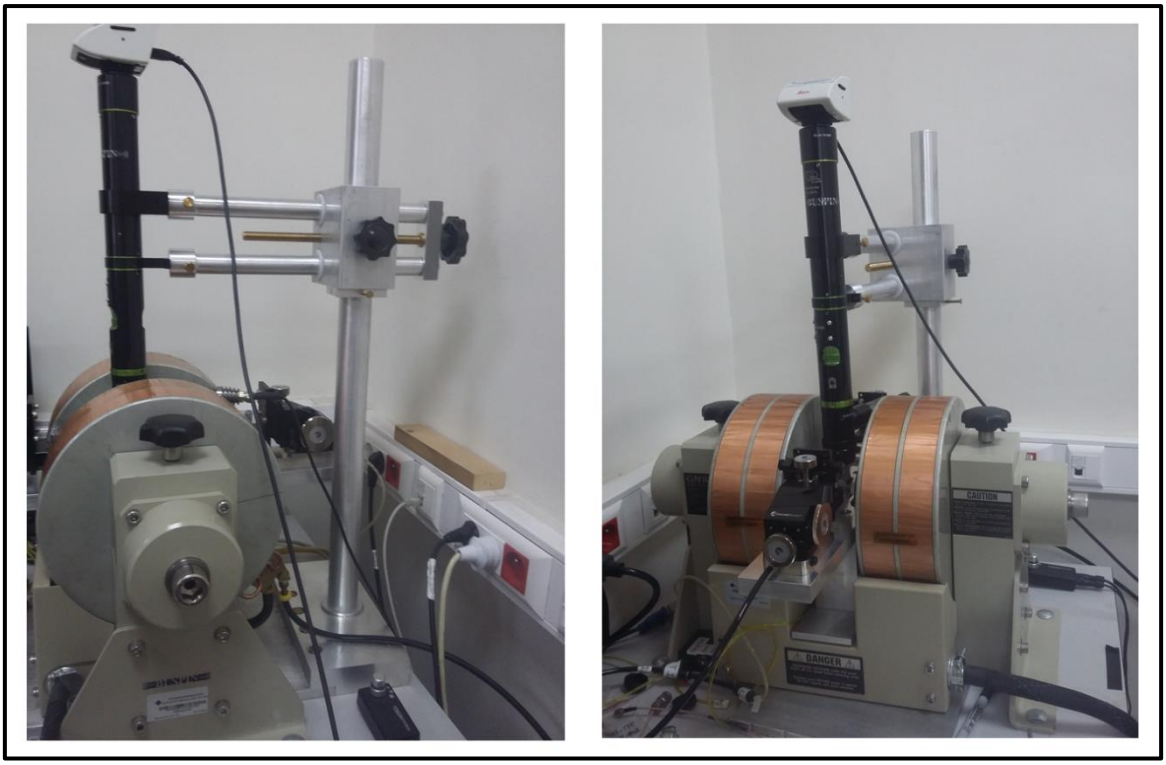


Şekil 3.2.9.2.1: (a) Örnek platformunun ve (b) mikroskop tutucunun Solidworks çizimleri

Şekil 3.2.9.2.1'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 3.2.9.2.1b'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.

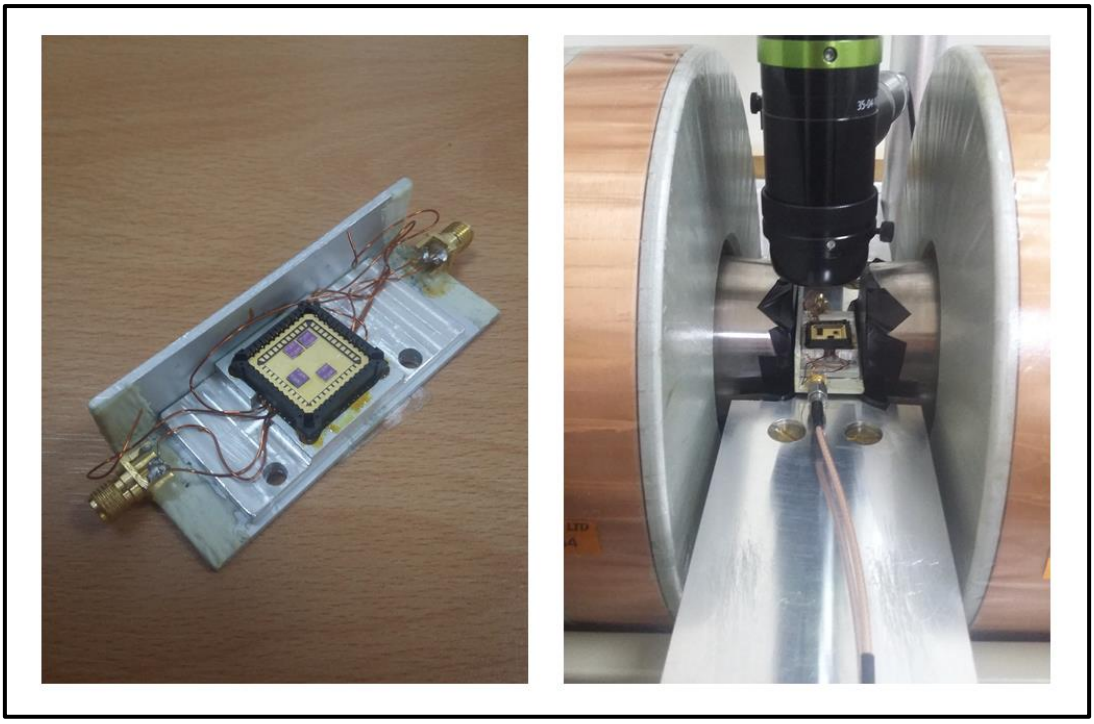
Üretilen parçalar Şekil 3.2.9.2.2'de gösterilmiştir. GMW marka elektromıknatısın kutupları arasına üretilen örnek platformu yerleştirilmiştir. Burada uzun mikroskop ve tutucusu, mikroskobun tepesindeki kamera ekipmanı görülmektedir. QI-optics marka mikroskop yüksek



Şekil 3.2.9.2.2: 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 ku- rarken rahatlıkla görüntülenebilmektedir. Wire-bonding tekniği ile bağlanan örneklerdeki ölçümler için Şekil 3.2.9.2.3'te 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 3.2.9.2.3: 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.

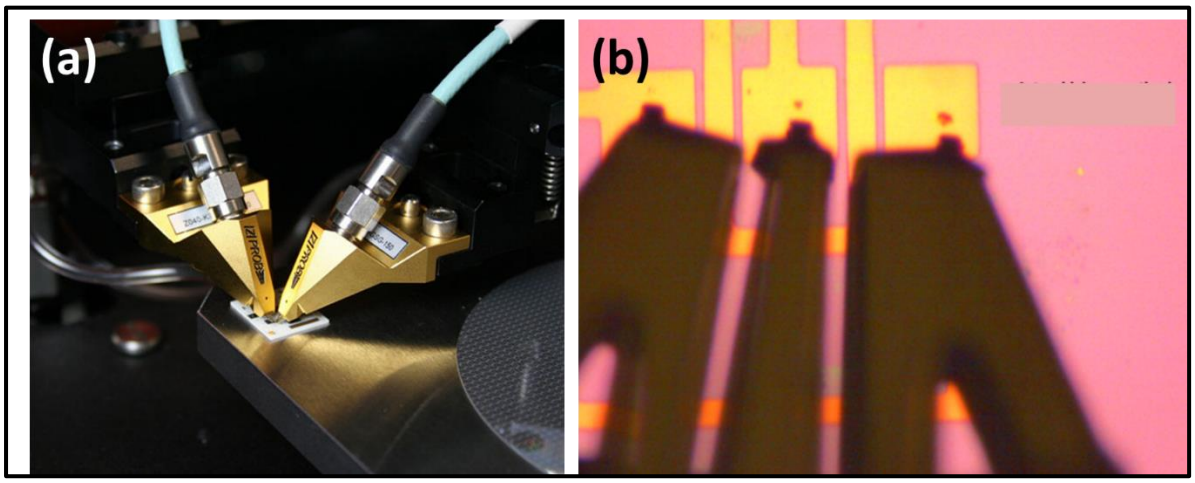
3.2.9.2.1. Elektriksel Bağlantılar

Aygıtlarının bağlantı bölgeleri Cascade marka prob ucuna uygun şekilde ayarlanmıştır. Bu RF prob kafaları Şekil 3.2.9.2.1.1'te 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 3.2.9.2.1.1 b'de gösterilmiştir.

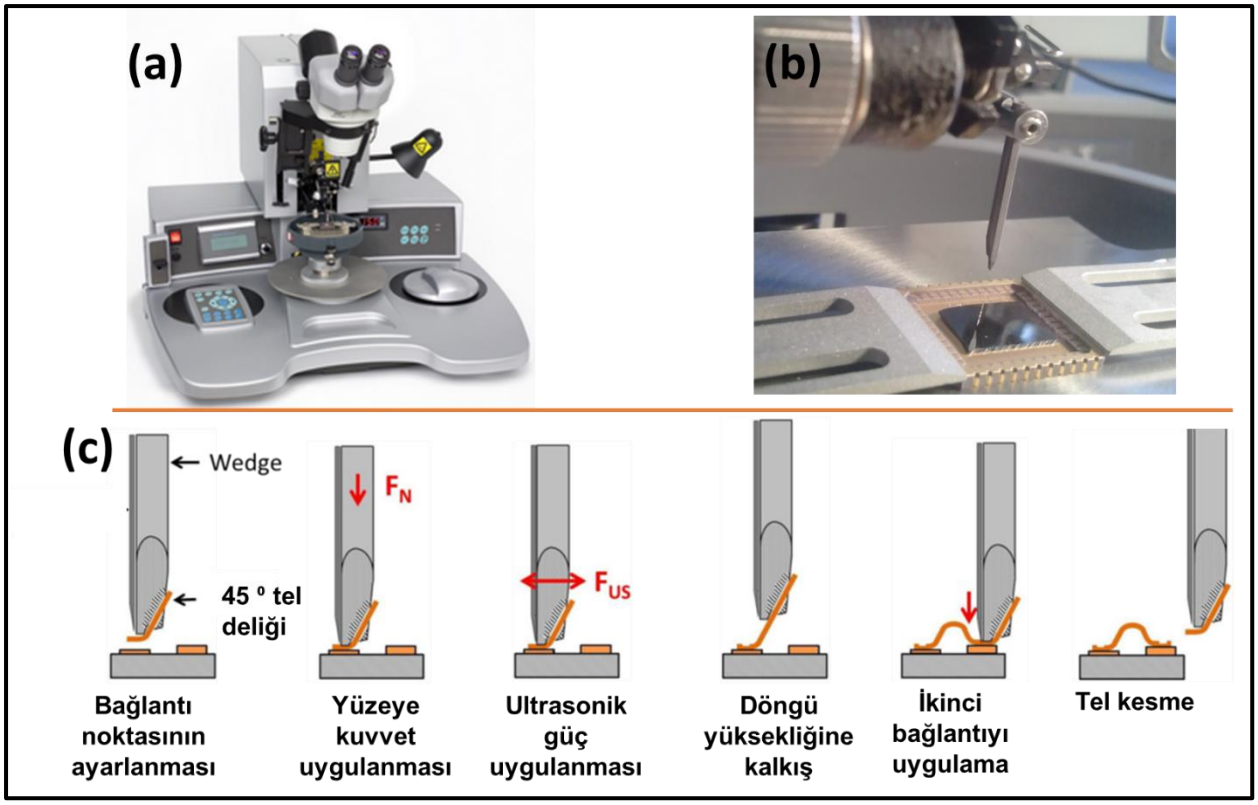
Örneklere elektriksel bağlantılar wire-bonding tekniği ile de yapılmıştır. Şekil 3.2.9.2.1.22 a'da gösterilen KnS marka 4700 model wire-bonder cihazı laboratuvarımızda kullanılmıştır. Bu cihaz "wedge" adı verilen çelik bir iğne yardımıyla (Şekil 3.2.9.2.1.2 b) ince Al teli yüzeye bağlar. Yuvarlak ve 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 3.2.9.2.1.2c'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.

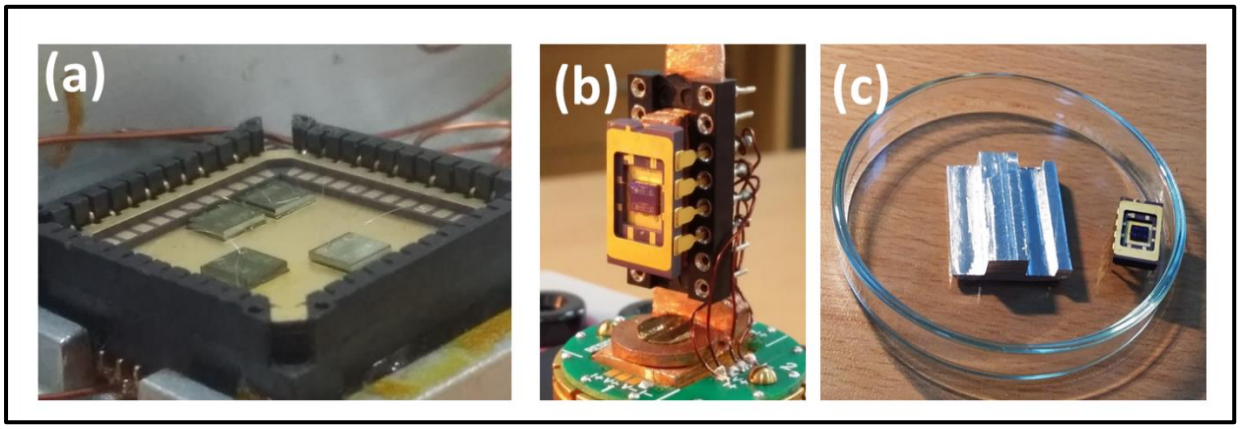
Wire-bonding parametreleri dijital ekrandan ayarlanabilmektedir. Her yüzey için değişen ve hatta aynı yüzey için ortamın nemine ve yüzeyin temizliğine göre değişen bu parametreler, özellikle kuvvet, ultrasonik güç ve zaman, bağlantı kalitesi açısından çok önemlidir. Her wire-bonding işleminde önce o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



Şekil 3.2.9.2.1.1: (a) Cascade marka RF prob kafası (b) Prob astroid aygıtının kontaklarına elektriksel bağlantı yaparken çekilmiş mikroskop görüntüsü



Şekil 3.2.9.2.1.2: (a) KnS marka 4700 model Wire-Bonder ultrasonik kablo yapıştırıcı (b) Wedge adı verilen çelik iğne (c) wire-bonding yönteminin şematik bir çizimi



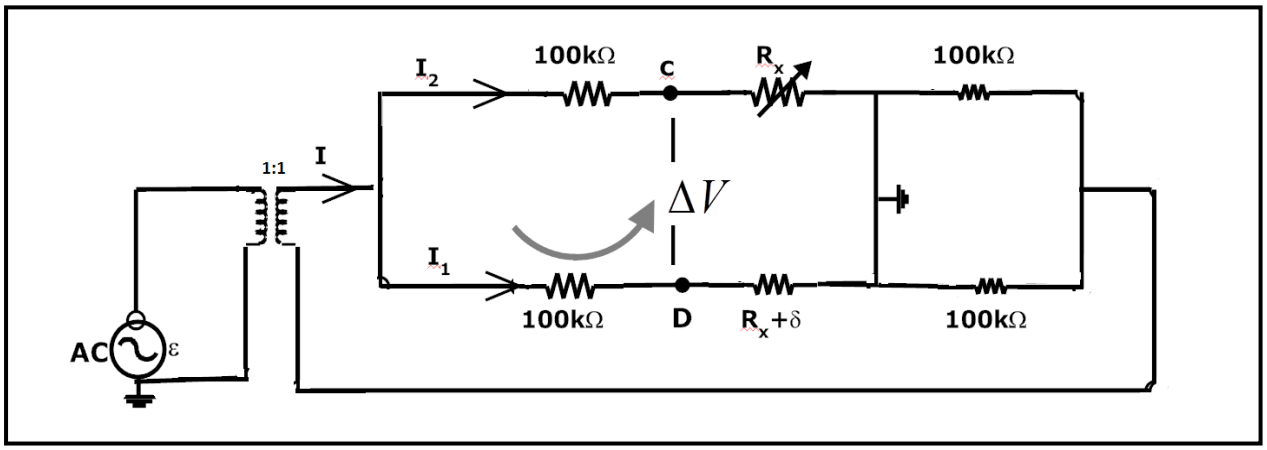
Şekil 3.2.9.2.1.3: (a) 44-pinli yonga tutucu üzerinde wire bonding (b) 8-pinli bir yonga tutucu üzerinde wire-bonding (e) 8-pinli yonga tutucuya kablo bağlamak için üretilen Al yonga destek platformu

Örneklerin kontak bölgeleri üzerine yapıştırıldıkları yonga tutucuların ilgili pinlerine bağlanmıştır. Şekil 3.2.9.2.1.3'te 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 3.2.9.2.1.3'te gösterilen platforma oturtulan yonga tutucuya kolayca wire-bond yapılabilmektedir.

3.2.9.2.2. 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 3.2.9.2.2.1 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+δ ile ifade edilen aygıt direnci, C ve D noktaları arasındaki voltaj farkını gözlemleyerek R_x ile belirtilen sahip değişken direnci değiştirerek bulunur. Wheatstone



Şekil 3.2.9.2.2.1: AC direnç ölçümü için tasarlanan devre. R_x ile belirtilen 0.1 m Ω çözünürlüğe sahip bir değişken direnç ve R_x+δ ile ifade edilen örnek direncidir.

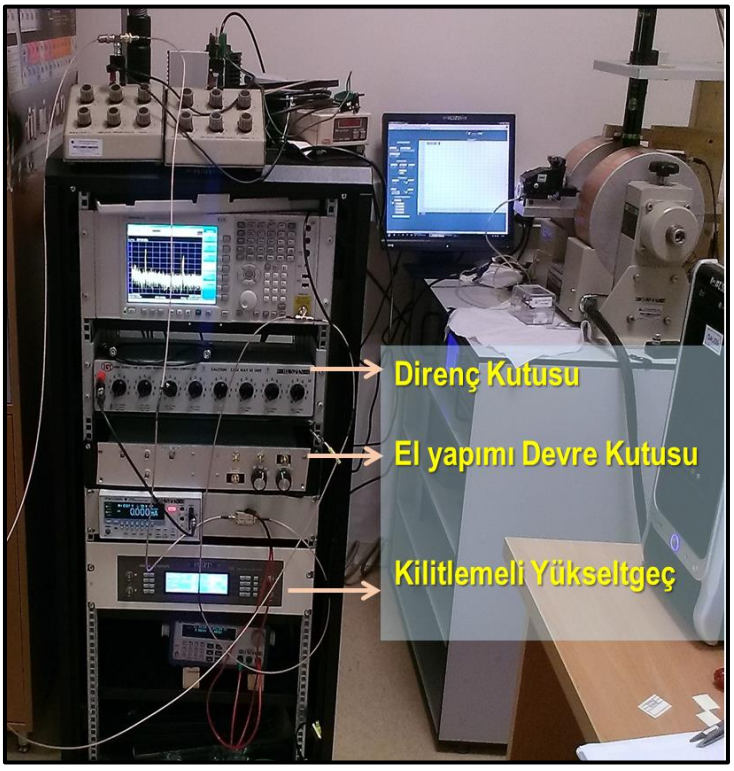
köprüsü dengelendiğinde yani R_x ile R_x+δ eşleştiğinde bu voltaj farkı, ΔV, sıfırlanır ve değişken direncin değeri okunarak aygıt direnci tespit edilir. Wheatstone devresi, ilgili konektörler ve aygıtı kısa devre ile koruyucu ek bir anahtarlı devre içeren devre kutusu Şekil 3.2.9.2.2.2'de gösterilmiştir. 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 3.2.9.2.2.3'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:

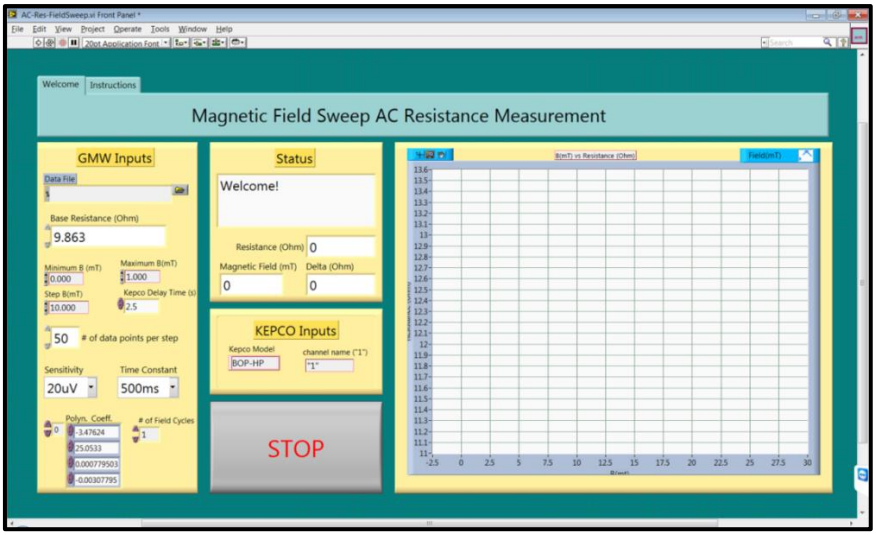
$$\delta = \frac{2\Delta V(100k\Omega + R_x)}{(\varepsilon - \Delta V)} \qquad (1)$$

Bu şekilde tespit edilen direnç, R_x+δ, kaydedilir.

Manyetik alan kalibrasyonu, sıcaklığa bağlı ölçümler ve yüksek frekans sinyalinin kontrolü için de aynı şekilde Labview ile yazılan programlar kullanılmıştır. Şekil 3.2.9.2.2.2'deki düzenekte gösterilen cihazlar ve PPMS'teki sıcaklık ve manyetik alan kontrolü GPIB bağlantısı ile yapılabilmektedir. Labview are yüzeyi Şekil 3.2.9.2.2.3'te görülmketedir.



Şekil 3.2.9.2.2.2: AC direnç ölçüm düzeneği

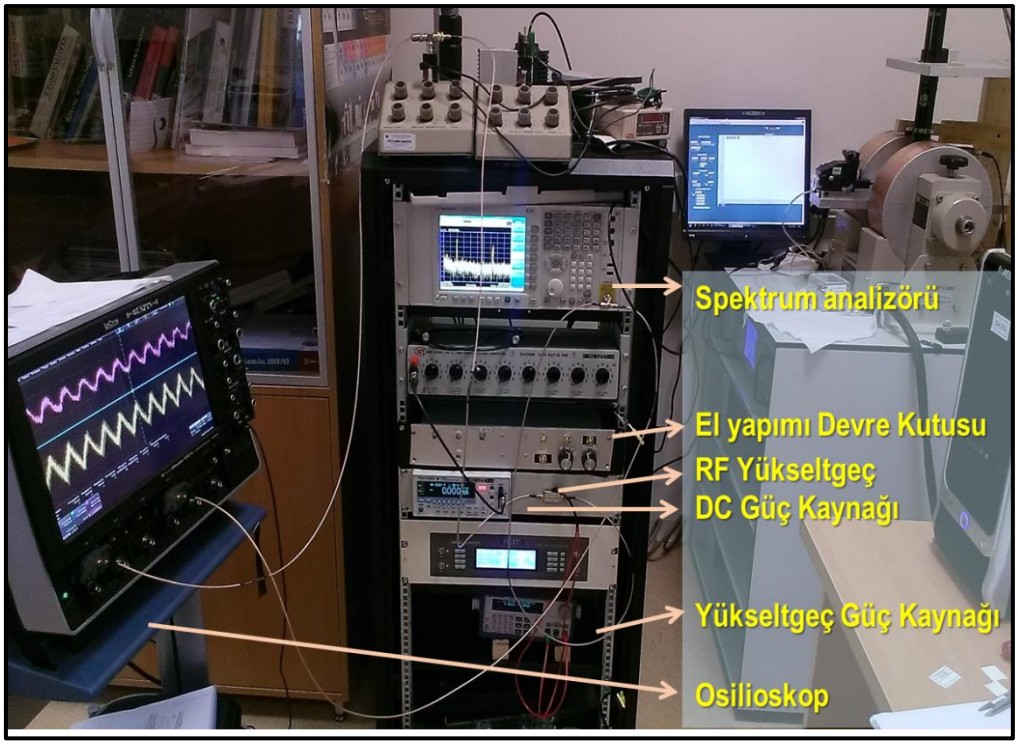


Şekil 3.2.9.2.2.3:4 Labview yazılımı ile yazılmış AMR ölçüm programı

3.2.9.2.3 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.

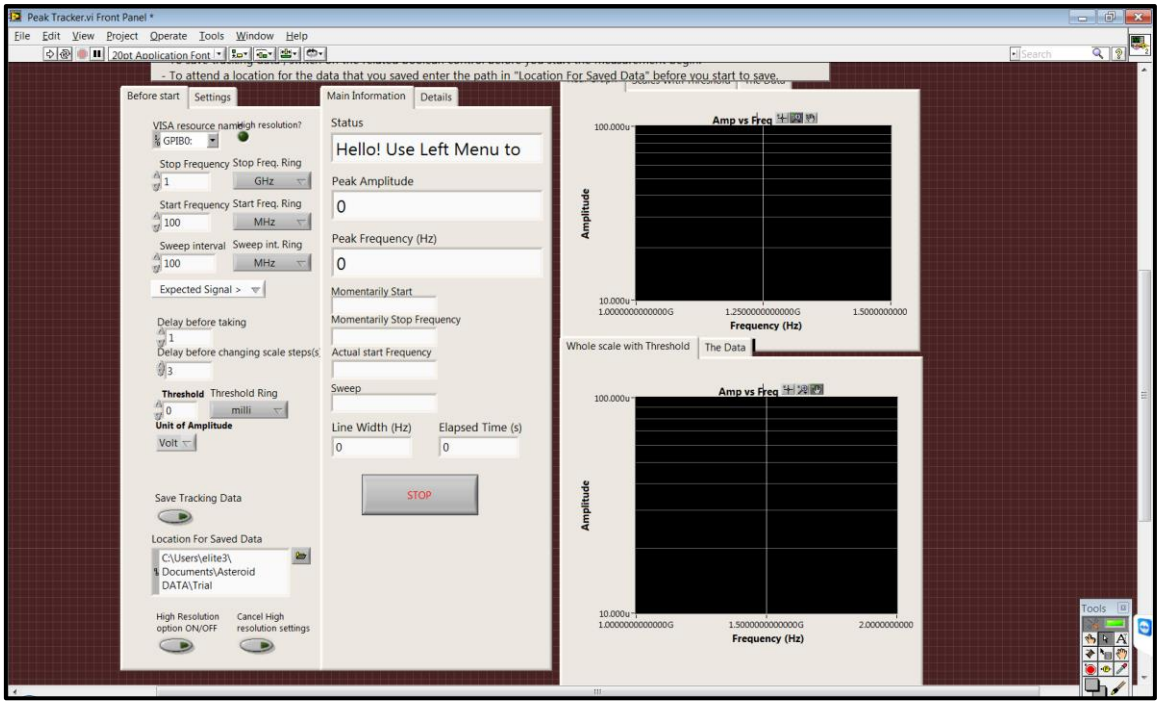
Şekil 3.2.9.2.3.1'de gösterilen ölçüm sistemi gerek GMW elektromıknatısın kutupları arasına gerekse sıcaklığa bağlı ölçümler için PPMS sistemine monte edilen örnekler üzerinde yüksek frekansta oluşacak salınımların tespiti için kurulmuştur. Mikro-manyetik dinamiklerin DC akımla tetiklenebilmesi için sistemde bir Yokogawa DC güç kaynağı bulunmaktadır. dinamiklerin bir spektrum analizörü ile tespit edilmesi hedeflenmiştir. Burada manyetik malzemeden geçen



Şekil 3.2.9.2.3.1: 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 3.2.9.2.3.1'te 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 gürültü seviyesinin üstünde olabilmesi için 9 MHz-3 GHz arası sinyalleri 50 kat arttıran bir yükselteç temin edilmiştir.



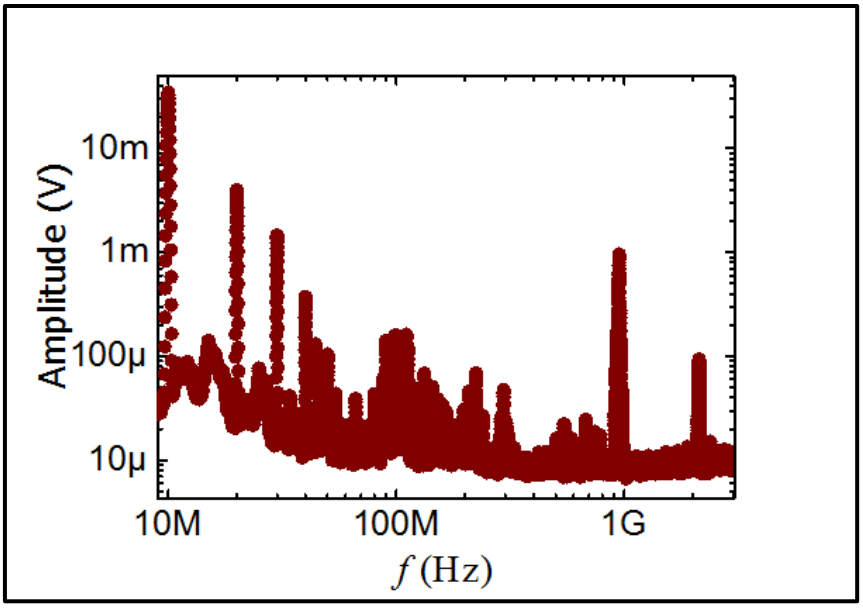
Şekil 3.2.9.2.3.2: Frekans uzayında sinyal analizi yapan ve kaydeden Labview programı

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 3.2.9.2.3.1''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 3.2.9.2.3.3 yapılan bir test ölçümünü göstermektedir. 10 mV'luk sinyal burada net bir şekilde görülmektedir. 9 MHz ile 3 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.



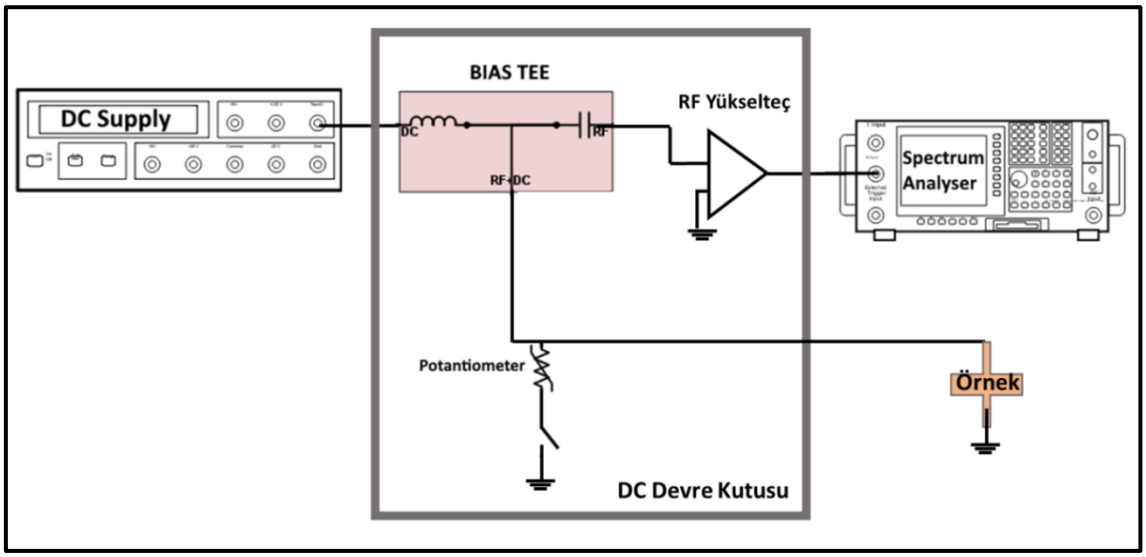
Şekil 3.2.9.2.3.3: 10 MHz test sinyali ve tüm frekans uzayındaki voltaj salınımları

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

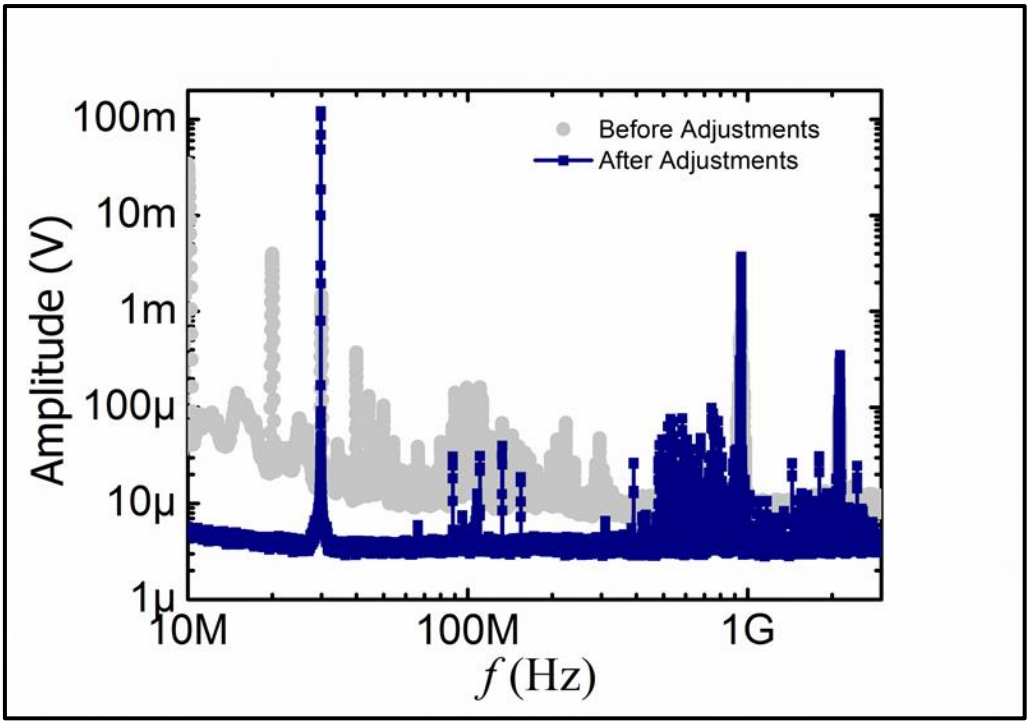
- Topraklamalar gözden geçirilip toprak akım döngüleri engellenmesi bu çalışmalardan biri olmuştur. Kullanılan cihazların aynı toprağa bağlı olması ve bu toprakların arasında uzun kablolamaların olmamasına dikkat edilmiştir. Devre kutusunun dışı alet rafının toprağından ayırılmıştır. DC güç kaynağı havada 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 3.2.9.2.3.4'te 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 3.2.9.2.3.4'de gösterilen ölçüm düzeneği ile alınan arka fon gürültüsü Şekil 3.2.9.2.3.5'te gösterilmektedir. Yine 50 Ω'luk bir test direncinden 2 mA DC akım altında 30 MHz bir test sinyali geçirilmiştir. Şekil 3.2.9.2.3.5'te 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 3.2.9.2.3.4 Yüksek frekans ölçüm bağlantılarının şematik çizimi



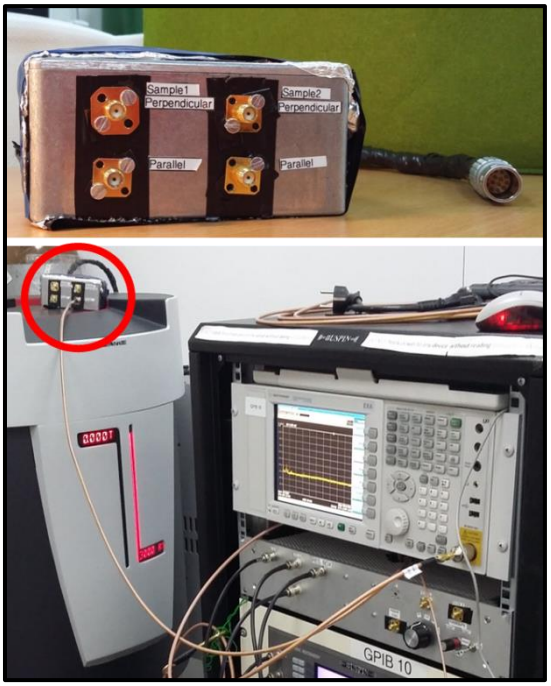
Şekil 3.2.9.2.3.5: Radyo Frekansındaki sinyalleri tespit ettiğimiz ölçüm düzeneğinde alınan 30 MHz lik bir test sinyalinin spektrumu lacivert karelerle gösterilmektedir. Bu ölçümde kaydedilen elektronik gürültü ilk raporda bildirilen gri dairelerle çizilmiş gürültüye kıyasla daha küçüktür.

3.2.9.2.4.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 2'te 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 3.2.9.2.4.1: PPMS'e entegre edilmiş elektriksel ölçüm düzeneği PPMS kontrol bilgisyar ünitesi, örnek çemberi ve cihaz sisteminden oluşur

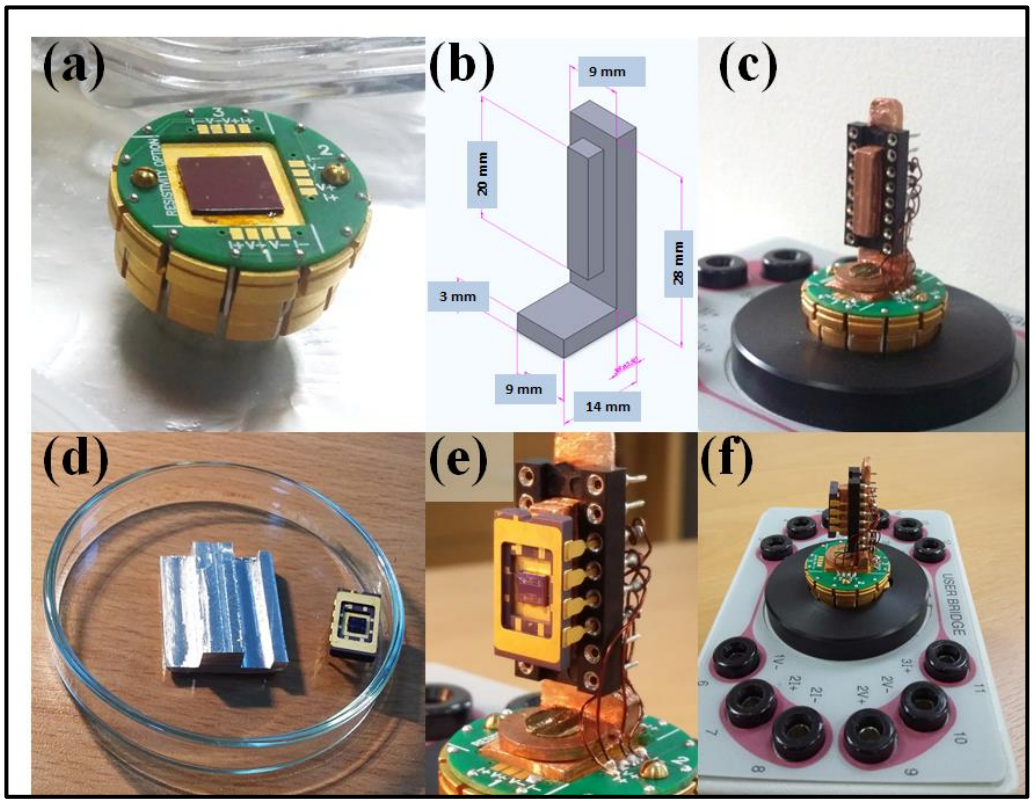


Şekil 3.2.9.2.4.2: Lemo kablosunun bağlı olduğu anahtar kutusu ve PPMS'e ve cihaz sistemine bağlı görüntüsü

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 3.2.9.2.4.2'de gösterilen anahtar kutusu 4 farklı kanalı SMA konektörlerine dönüştürmekte ve bu sayede örneklerde iki-problu veya dört-problu ölçümler yapılmasına imkan sağlamaktadır.

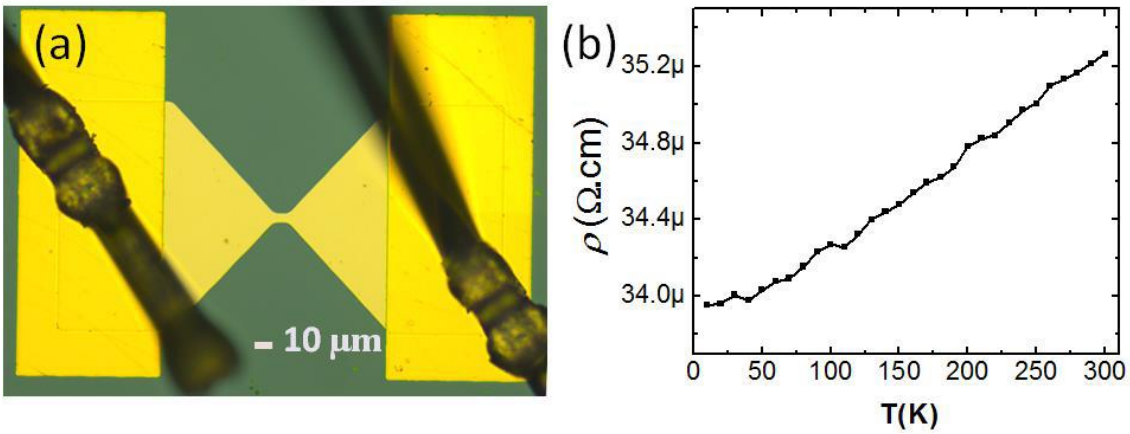
Pak örnek tutucularına bir örnek Şekil 3.2.9.2.4.3'te gösterilmiştir. Çipler düşük sıcaklıklarla uyumlu GE Varnish ile pak ortasındaki altın kaplı alan üzerine yapıştırılmıştır. Wire-bonding yöntemi ile kenardaki pinlere bağlanan kontak noktaları lemo konektörü üzerinde ilgili pinlere oradan da anahtar kutusundaki SMA konektörüne bağlanır. Anahtar kutusu üzerinde iki ayrı örnek üzerinde manyetik alana dik veya paralel akım uygulanabilecek şekilde düzenlenmiş 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.



Şekil 3.2.9.2.4.3: PPMS örnek tutucusu (a), bunu düzlem içi manyetik alan sağlayacak biçime dönüştürecek tutucu ayak tasarımı ve tutucu ayağın (b)için hazırlanan yonga tutucu düzenek

Bunu için çizimleri Şekil 3.2.9.2.4.3b'de gösterilen bir dik tutucu ayak tasarlanmış ve kriyojenik sıcaklıklarda ısıl çekmesi çok az olan bakırdan atölyemizde imal edilmiştir. Tutucu ayak Şekil 3.2.9.2.4.3c'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 3.2.9.2.4.3'de örnekleri IC konektöre monte edebileceğimiz 8-pinli seramik çip taşıyıcısı görülmektedir. Aynı resimdeki (3.2.9.2.4.3 d) Alüminyum parça, çip taşıyıcılarını wire-bonding sistemine entegre etmeye yardımcı olacak bir zemin olarak yine atölyede üretilmiştir. Şekil 3.2.9.2.4.3 e 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 3.2.9.2.4.3'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 CoNi/Pd malzemesinin öz direncinin tespit edilmesi için papyon şeklinde fotolitografi ile desenlenmiş CoNi/Pd mikro-telleri kullanılmıştır. Şekil 3.2.9.2.4.4:5a'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 oda sıcaklığında öz direnç 35.27 μΩ.cm olarak hesaplanmıştır. Sıcaklığa bağlı direnç ölçümleri Şekil 3.2.9.2.4.4b'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 3.2.9.2.4.4:5 (a) CoNi/Pd ince filminden üretilmiş papyon desenli aygıt ve Au elektrotlar üzerine wire-bond tekniğiyle yapılmış bağlantılar (b) sıcaklığa bağlı öz direnç ölçümü

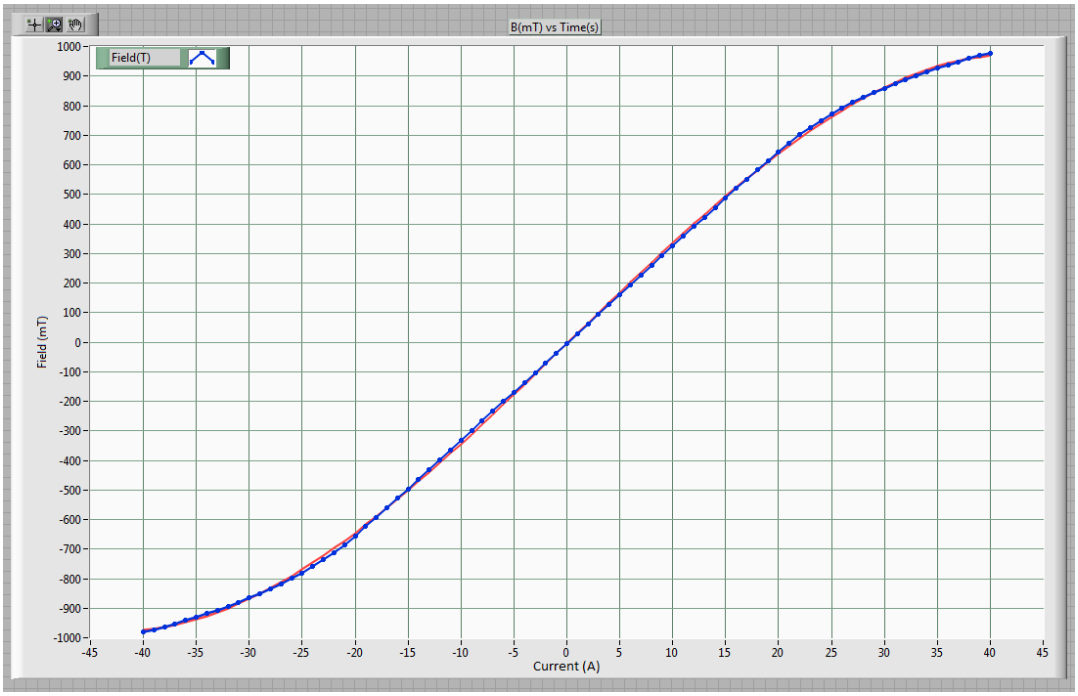
3.2.10 GMW ACDüzlem İçi Manyetik Alan Koşullama

Manyetik malzemelerinde baloncuk oluşumu işlemi için gerekli olan bir işlem de aygıtların AC manyetik alan koşullandırılmasıdır. Bı işlme için GMW sisteminde bir Labview programı yardımıyla AC mangetik alan koşullandırma işlemi yapmaktayız. Burada dikkat edilmesi gereken, sistemin iyi bir şekilde kalibre edilmiş olması gerekmektedir. Çünkü, mangetik alan değerindeki en küçük bir değişim baloncuk oluşumunu etkileyeceğin ve baloncuk oluşum değeirini optimizasyonu için önem teşkil etmektedir. İlk olarak kalibrasyon işleminin nasıl yapıldığı konusu açıklanmalıdır.

GMW marka elektromıknatısa 40 Amper'e kadar akım uygulayarak 1 Tesla'ya kadar manyetik alan üretebilmektedir. Genelde bir elektromıknatısın kalibrasyonu bir üreteç ve elektromıknatıs kullanılarak alınan manyetik alan ve akım değerlerinin bir grafikte çizdirilerek üzerine bir fonksiyonun fit edilmesiyle yapılır. Fonksiyon kulanılarak akım değerine denk gelen manyetik alan değerleri bulunur. Manyetik alan ve akım değerlerini toplayabilmek için akım değeri en yüksek değerden en düşük değerine kadar indirilirken belli aralıklarla ölçüm alınır. Fit edilen fonksiyonun grafik ile birebir örtüşememesi belli aralıklarda fonksiyon tarafından tahmin edilen akım ve manyetik alan değerlerinin izin verilen bir hata değerinden (1 mT) büyük olmasına neden olur. Fit edilen fonksiyon 22. dereceden bir polinom dahi olsa aradaki hata farkını izin verilen bir hata değerine (1 mT) çekemez. Şekil 3.2.10.1 de de fit fonsiyonu ile değerler de küçük faklılıklar görülmketedir. Ek olarak, fonksiyonun uyumsuzluğu farklılık gösterdiği için hata miktarı değişkenlik gösterir. Bu problemi çözmek için GMW Elektromıknatıs'ının bilgisayar kontrolü için kullanılan LabVIEW tabanlı yazılım

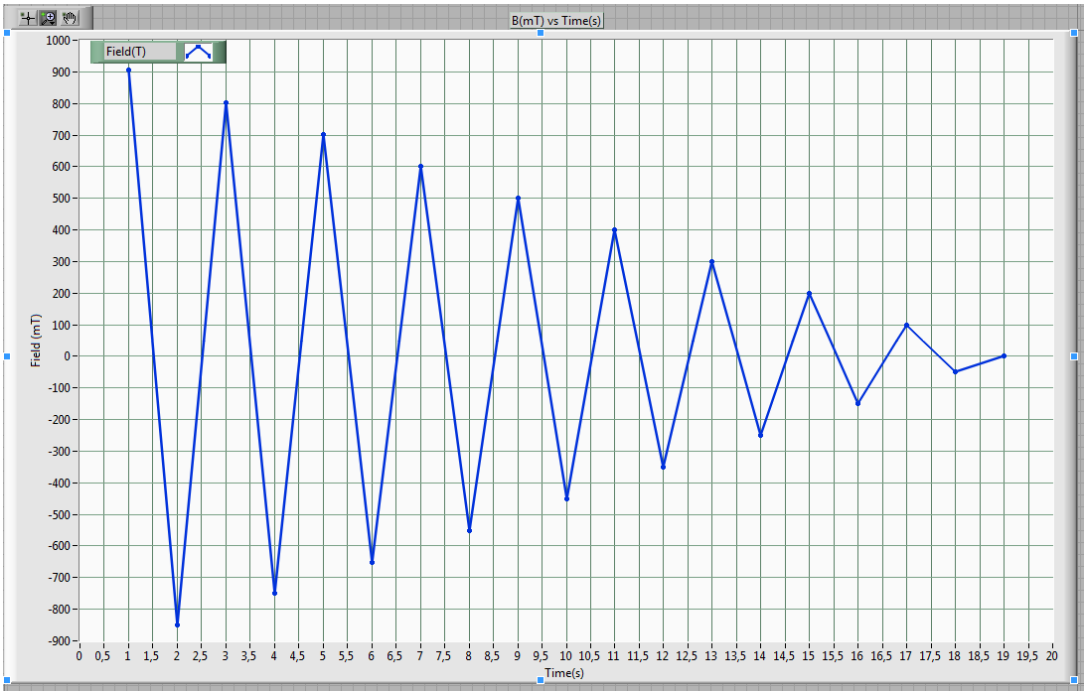
programı yenilendi. Fonksiyon üzerinden yola çıkmak yerine gerçek ölçüm değerlerini kullanarak uygulaması gereken akımı ve üreteceği manyetik alan değerini bulan bir program yapıldı. LabVIEW tabanlı program (VI) uygulamak istediğimiz manyetik alan değerine en yakın alt ve üst değerleri bularak aralarına 1. dereceden bir fonksiyon (iki noktayı birbirine bağlayan 1. dereceden bir fonksiyon) yerleştirerek uygulanmak istenen manyetik alan değerine karşılık gelen akım değerini buluyor.

Kalibrasyonun ilk basamağı olarak uygulanan akım ve karşılık gelen manyetik alan değerlerinin kaydedilmesi işlemi yapılmaktadır. Genelde, bu işlem sırasında akım değeri en yüksek değerinden, en düşük değerine kadar küçük adımlarla azaltılarak oluşturduğu manyetik alan değerleriyle Şekil 3.2.10.1 de olduğu gibi beraber kaydedilir. Ancak elektromıknatısın ortasındaki manyetik malzemenin kalıntı manyetik alan inden dolayı, akımı azaltırken ölçülen manyetik alanın olması gerekenden daha yüksek olduğunu gözlemliyoruz. Kalıntı manyetik alan maksimum manyetik alan değerine bağlı olarak maksimum uygulanmış olan manyetik alan değerinin %1'i kadar bir hata oluşturmasından dolayı büyük manyetik alan değerlerinden (1 Tesla) küçük manyetik alan değerlerine (yüz miliTesla ve altı) inildiğinde uygulanmak istenen değere göre çok yüksek sapmalar gözlemleniyor.



Şekil 3.2.10.1: LabVIEW yazılım programında 22. Dereceden polinom (kırmızı çizgi) ile fit edilmiş manyetik alan'a karşılık akım değerlerinin (mavi noktalar) bulunduğu grafik gösteriyor ki -1 Tesla'dan ile +1 Tesla'ya uzanan fit fonksiyonu (kırmızı çizgi) ve gerçek değerler (mavi noktalar) arasında yer yer 20 mT'ya kadar farklar görülebiliyor.

AC manyetik alan koşulanması prosedürünü taklid ederek kalıntı manyetik alan problemini çözüldü. İlk olarak en yüksek akım değerini (1. maksimum) uygulanmakta, ikinci olarak en düşük akım (1. minimum) değerini uygulanmaktadır. Üçüncü olarak 1. maksimum değerinden bir basamak küçük bir akım değerini (2. maksimum) uygulır. Ardından aynı akım değerinin eksi işaretlisini (2. minimum) uygulayarak işlemlere böylece akım değeri sıfırlanıncaya kadar devam ediliyor (Şekil 3.2.10.2). Her uygulanan akım değeri için ölçülen manyetik alan değerleri kaydediliyor. Her defasında manyetik alan yön değiştirdiği için ölçümde yüksek kalıntı manyetik alan kaynaklanan bir sapma oluşmuyor.



Şekil 3.2.10.2: Zamana bağlı manyetik alan değerleri kalibrasyon yapılabilmesi için ilk basamakta yapılam ölçümleri AC demagnetizasyon tekniği ile nasıl topladığımızı gösteriyor.

Deneyde kullanılan aletlerin hassaslığı deneyin sonuçlarının güvenilirliği ve geçerliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden deney düzeneğinde kullanılan her aletin yeterli hassaslıkta olmasına özen gösteriyoruz. Yapmış olduğumuz kalibrasyon sonucunda her manyetik alan değeri için ±1mT maksimum hata değerini elde ettik.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Projenin ilk döneminde iş takvimine uygun olarak 1., 2. ve 3. iş paketleri tamamlanmış, 4., 5. ve 6. iş paketlerinin çalışmalarına başlanmıştır. 1. İş paketinde belirtilen düzleme dik anizotropili ferromanyetik filmler üzerinde çalışılmış, büyütme koşulları optimize edilen filmlerin 2. iş paketinde belirtildiği gibi manyetik ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır.

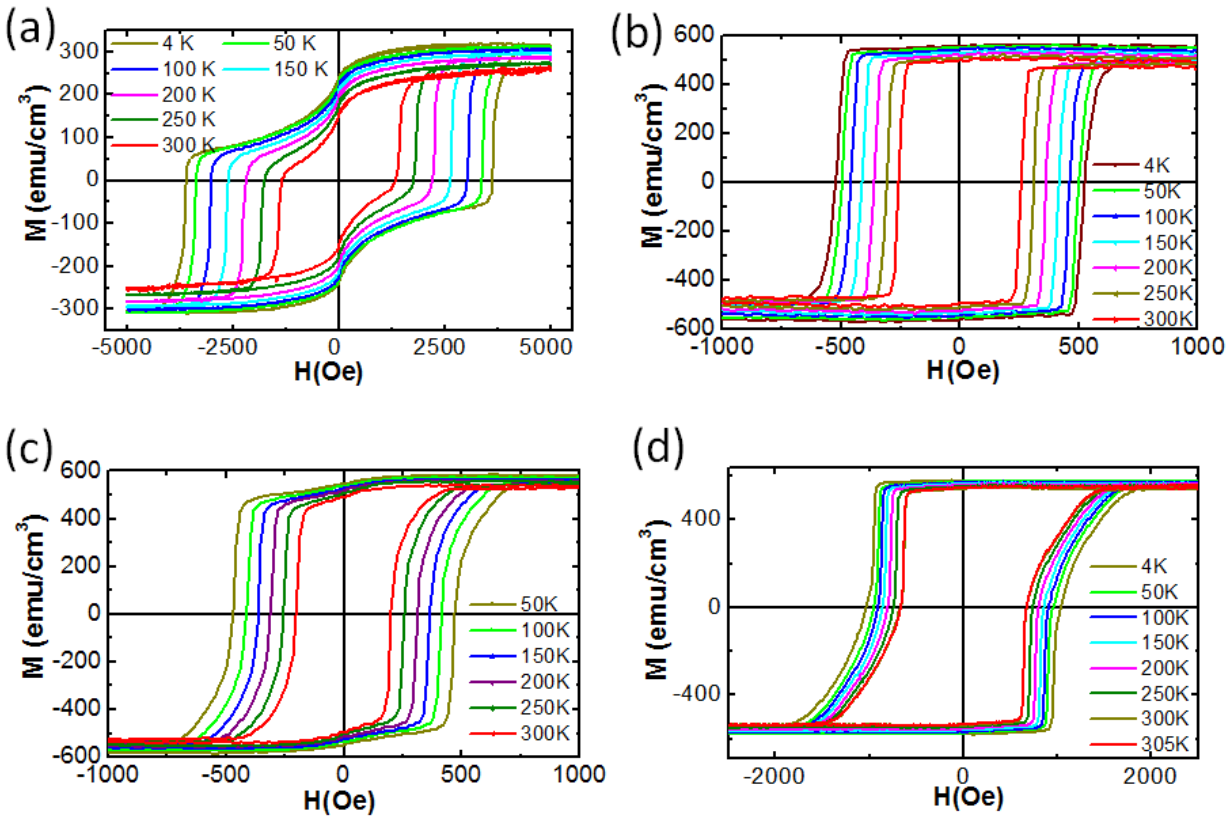
Başarılı bir şekilde elde edilen düzleme dik anizotropiye sahip filmler üzerinde 3. iş paketi dahilinde desenleme çalışmaları yapılmıştır. Bu şekilde filmlerden iki farklı yöntemle üretilen nano ve mikro disklerin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) ve Manyetik Kuvvet Mikroskobu (MKM) kullanılarak yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiş, farklı manyetik alan koşullarında baloncuk oluşma istatistikleri araştırılmıştır.

Projenin 4. iş takviminde belirtilen iletken-atomik kuvvet mikroskobu uygulaması için gerekli düzenek kurulmuştur. 5. iş paketi kapsamında üretimi gerçekleştirilen metal ara katmanlı manyetik filmlerin spin-valf yapıları için uygunluğu tespit edilmektedir. Bu aygıtların üretimi tamamlandığında yapılacak ölçümler için (6. İş paketi) gerekli düzenek kurulmuş ve test edilmiştir.

4.1. Manyetik Karakterizasyon

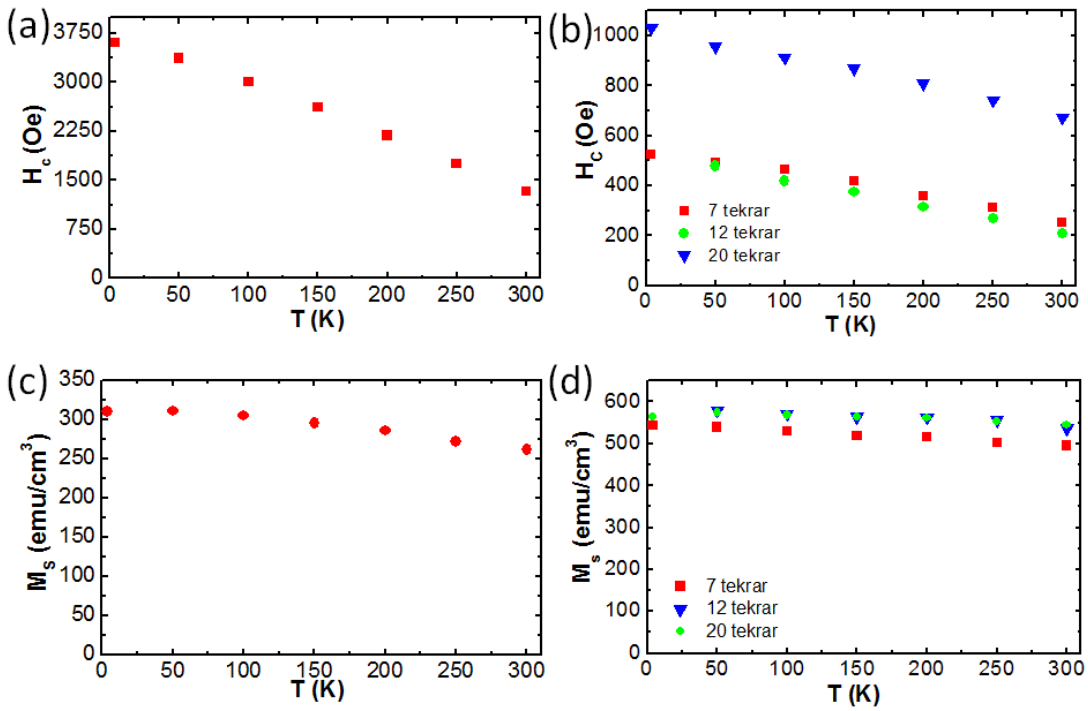
Üretilen Ti(5)/Pd(3)/[CoNi(0,22)/Pd(1,2)]x_{22}/Pd(2)/Ti(1,5) filmler (kısaca CoNi/Pd) ve İbrahim Çinar'ın Fransa ziyareti sırasında teslim aldığı üç örnek, 7, 12 ve 20 tekrarlı Ta(5)/Pt(10)/[Co(0,2)/Ni(0,6)]xN/Pt(5nm) kısaca Co/Ni yapıları Türkiye'de ve Fransa'da VSM'de incelenmiştir. Şekil 4.1.1 ve Şekil 4.1.2 Türkiye tarafında düzleme dik manyetik alanda yapılan ölçümlerin tümünü göstermektedir. Şekil 4.1.1 a CoNi/Pd filmlerinin, Şekil 4.1.1 c-e sırasıyla 7, 12, 20 tekrarlı Co/Ni filmlerinin manyetik alanla değişen mıknatıslanma grafiğini farklı sıcaklıklar için göstermektedir.

Toplam film kalınlığı 43 nm olan CoNi/Pd filmlerin mıknatıslanması histerezis göstermektedir, Şekil 4.1.1 a, ki bu da filmin düzleme dik bir manyetik anizotropiye sahip olduğuna işaret etmektedir. Oda sıcaklığında oldukça yüksek, 1,3 kOe, sıfırlayıcı alanı, Hc, olan filmler güçlü mıknatıslık özellikleri göstermektedir. Yine oda sıcaklığında 300 emu/cm^3 büyüklüğünde doygunluk mıknatıslanması, Ms, kaydedilmiştir. Histerezis eğrisindeki basamaklı değişim, doygunluk mıknatıslanmasından küçülen manyetik alanla 0 manyetik alan civarında baloncuk domen yapısına geçiş ve sonrasında sıfırlayıcı alanda labirent domenlerine geçiş olarak yorumlanmıştır. 43 nm CoNi/Pd film için düzlem içi manyetik alanda yapılan VSM ölçümleri arka fon mıknatıslanmasından başka değer vermemiştir. 25, 30 ve 46 nm kalınlığındaki sırasıyla 7, 12, 20 tekrarlı Co/Ni filmleri için de düzlem içi manyetik alandaki ölçümler arka fon ölçümleriyle aynı çıkmış, manyetik sinyal yetersiz kalmıştır. Bu filmlerin düzleme dik manyetik alandaki mıknatıslanma dinamiği de histerezis göstermektedir, yani bu filmler de DDMA'ya sahiptir. Sıfırlayıcı alanı CoNi/Pd'dan daha küçük olan bu malzemelerin (0,2-0,7 kOe) doygunluk mıknatıslanması oldukça yüksektir, 550 emu/cm^3.



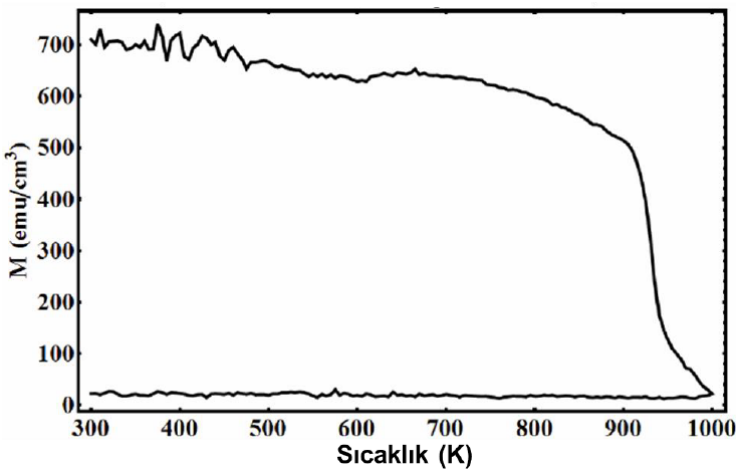
Şekil 4.1.1 Manyetik filmlerin farklı sıcaklıklarda düzleme dik manyetik alanda elde edilmiş VSM verileri (a) Ti/Pd/[CoNi/Pd]x22/Pd/Ti (b) Ta/Pt/[Co/Ni]x7/Pt (c) Ta/Pt/[Co/Ni]x12/Pt (d) Ta/Pt/[Co/Ni]x20/Pt

CoNi/Pd örneklerinde görülen basamaklı yapı en belirgin olarak 12 tekrarlı Co/Ni filmlerde görülse de 7 ve 20 tekrarlı yapılarda da bu geçiş mevcuttur. Manyetik parametreleri oldukça yakın olan bu malzemelerin histerezis eğrileri birbirinden oldukça farklıdır. Bu da baloncuk yapılanması için farklı koşullandırmaların gerekli olacağına işaret etmektedir.

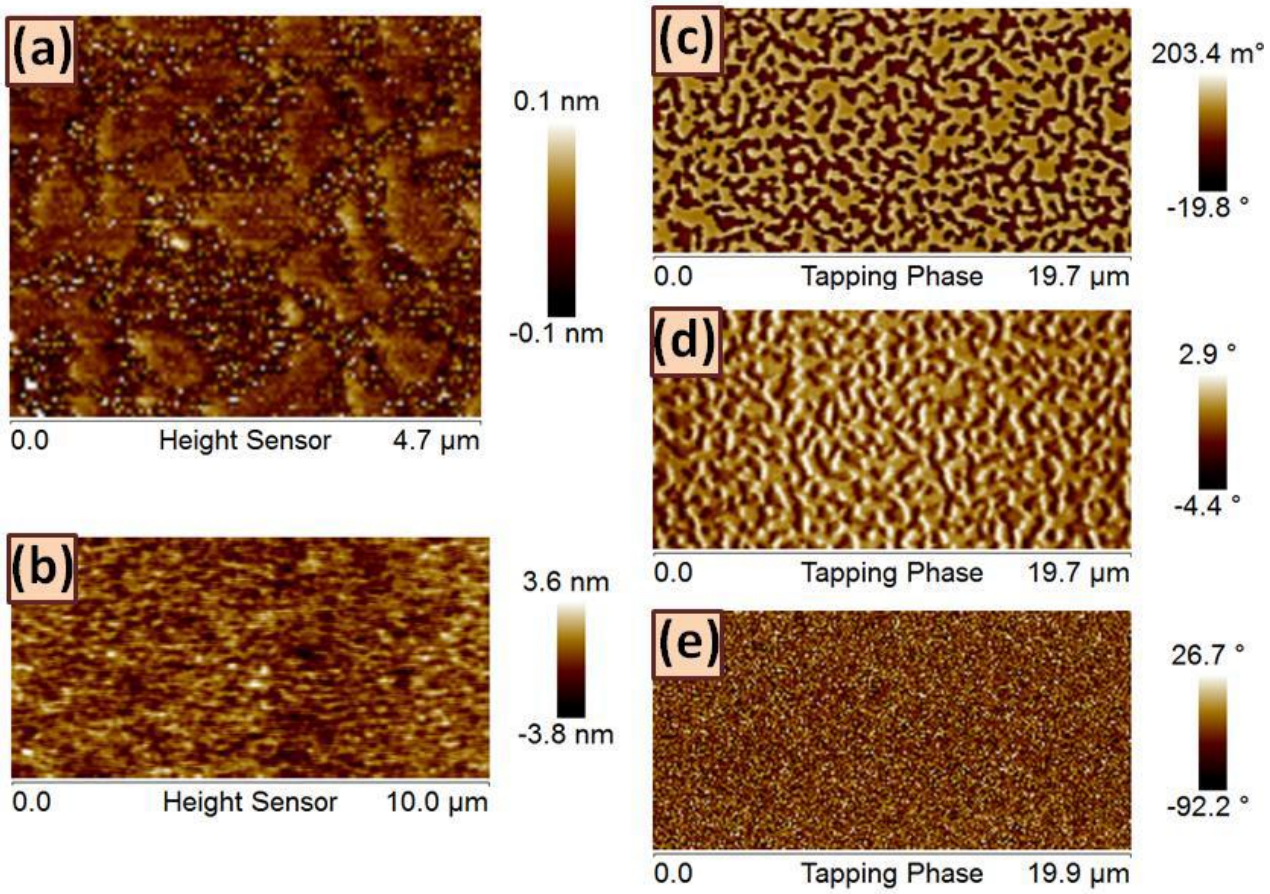


Şekil 4.1.2 VSM verilerinden elde edilen sıfırlayıcı alanın, *Hc*, (a-b) ve doygunluk mıknatıslanmasının, Ms, (c-d) sıcaklığa bağlı değişimi (a), (c) Ti/Pd/[CoNi/Pd]x22/Pd/Ti ve (b),(d) Ta/Pt/[Co/Ni]xN /Pt manyetik filmleri için tekrar sayısına göre çizilmiştir

Şekil 4.1.2 mevcut örneklerin Hc (a-b) ve Ms (c-d) değerlerinin sıcaklıkla değişimini kıyaslamaktadır. En yüksek Hc değerine sahip olan CoNi/Pd filmler için 4K'de 3,7 kOe olarak kaydedilen Hc oda sıcaklığında 1,3 kOe'ye düşmüştür. Co/Ni filmler için 7 ve 12 tekrarlı yapılarının Hc değerleri birbirine yakın (oda sıcaklığında sırasıyla 210 ve 250 Oe) ve 20 tekrarlı yapıdan çok daha az olduğu (oda sıcaklığında 675 Oe) gözlenmektedir (Şekil 4.1.2 b). Oda sıcaklığında ölçülen Ms değerleri 500-550 emu/cm^3 aralığındadır ve sıcaklıkla pek az değişmektedir. Şekil 41.2 c'de gösterilen CoNi/Pd filminin Ms değerlerinin de sıcaklıkla pek değişmediği gözlenmektedir. Bu durumda filmlerin Curie sıcaklıklarının oda sıcaklığının çok üstünde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Fransa tarafında yapılan VSM ölçümlerinde Co/Ni filmlerinin anizotropi sabiti 7, 10, 12 ve 20 tekrarlı yapılar için sırasıyla 3.8, 2.7, 3.1 ve 4.5 x10^5 J/m^3 olarak bulunmuştur. CoNi/Pd filmlerinin yüksek sıcaklıklardaki doygunluk mıknatıslanması için alınan VSM ölçümü aşağıdaki Şekil 4.1.3'te verilmiştir.



Şekil 4.1.3: CoNi/Pd filmlerinin yüksek sıcaklıklardaki doygunluk mıknatıslanması

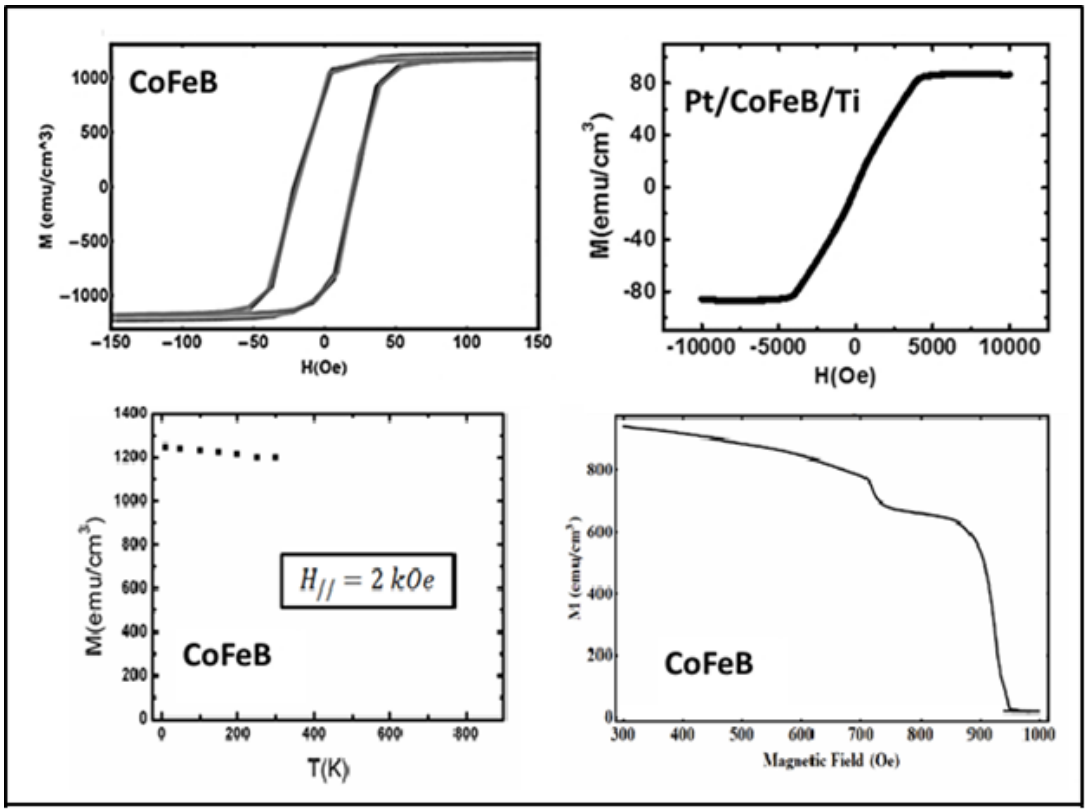


Şekil 4.1.4 CoNi/Pd filmlerinin (a), (b) AKM ile alınmış yüzey topografisi; (c) düzleme dik uygulanan 800 mT'dan 20 mT azalan basamaklarla azalan AC manyetik alan uygulaması sonrasında, (d) AC manyetik alan uygulaması sonrası 8 mT düzleme dik manyetik alanda ve (e) AC alan uygulaması sonrası 140 mT düzleme dik manyetik alanda alınmış MKM görüntüleri.

CoNi/Pd filmlerin yüzey topografisi AKM'de incelenmiş ve AKM görüntüleri Şekil 4.1.4 b ve 4.1.4 c'de sergilenmiştir. Bu iki farklı şekil örneğin iki faklı yerinden alınmıştır ve 4.1.4 b'deki

görüntüdeki ölçüm şekil 4.1.4 a'ya göre biraz daha gürültülü bir ölçüm olmuştur. Bu iki resim ölçülen en düşük 0,2 nm ve en yüksek 7 nm yüzey pürüzlülüğünü temsil etmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,7 nm olarak tespit edilmiştir. Bu şekilde aynı zamanda yüzeyin yüksek manyetik momenti olan bir manyetik uçla incelendiği MKM görüntüleri verilmiştir, Şekil 4.1.4 c-e. Filmin düzlemine dik uygulanan 800 mT'dan başlayarak 20 mT basamaklarla azalan AC manyetik alanda mıknatıslığı giderilmiş filmin MKM görüntüsü Şekil 4.1.4c'de gösterilmiştir.

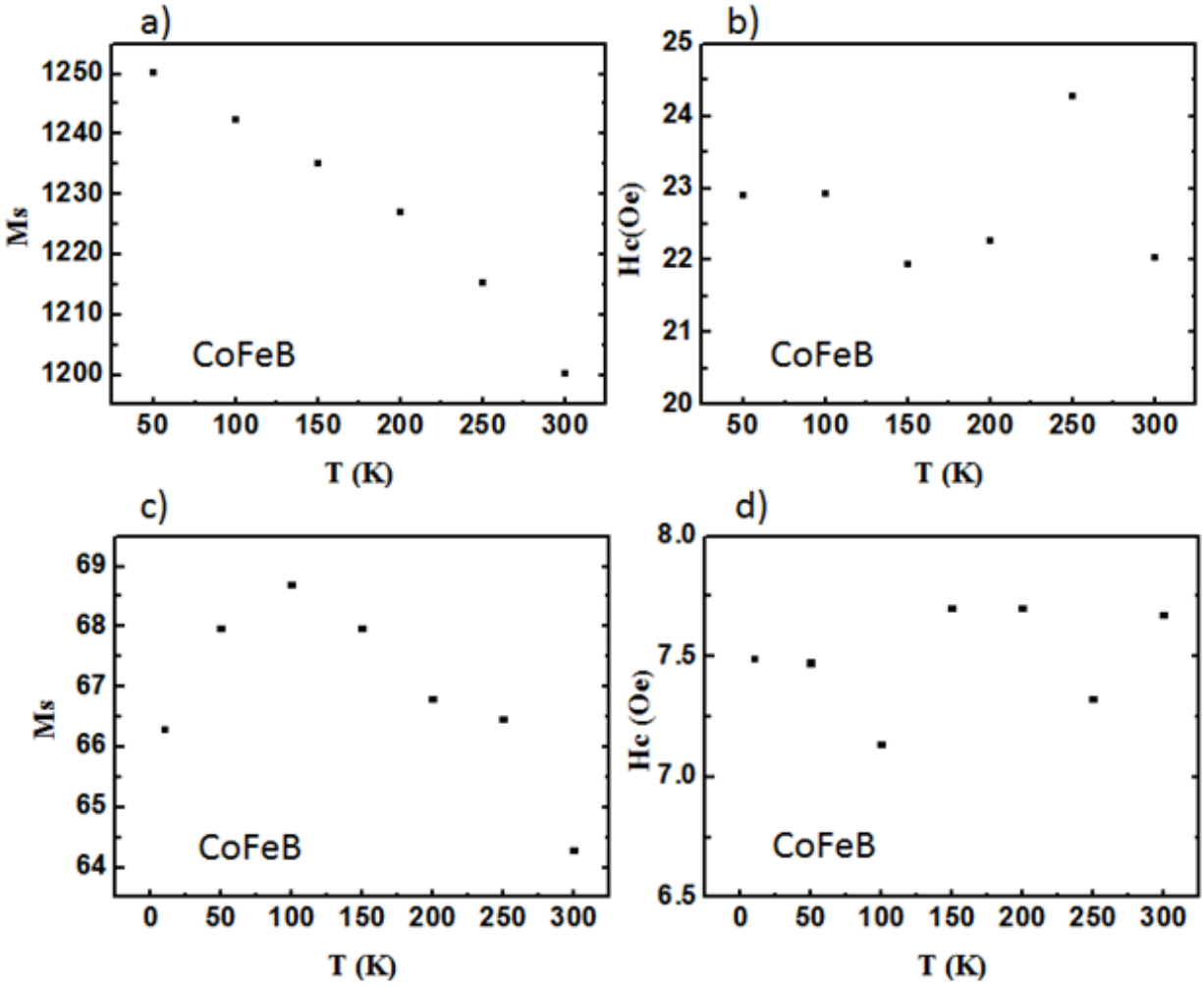
Burada DDMA malzemelerde rastlanan labirent domen yapılanması görülmektedir. Koyu renkli alanlar düzlemden dışarı mıknatıslanmış alanları gösterirken açık renkli alanlar düzlemden içeri mıknatıslanmış alanlardır.



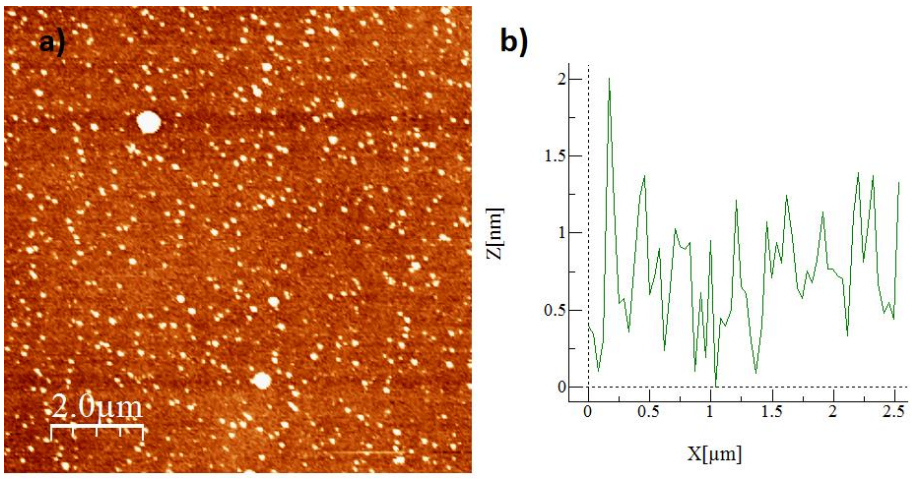
Şekil 4.1.5. Oda sıcaklığında düzlem içi bir manyetik alanda alınan VSM ölümleri $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$, 60 tekrarlı [Pt(5nm)/ $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ (1nm) /Ti(1nm] çoklu katmanlı yapısı için verilmiştir. $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ malzemesinin VSM'de yapılmış sıcaklığa bağlı manyetik karakterizasyonu. Ölçümler düzleme paralel 2k Oe manyetik alan altında yapılmıştır.

Manyetik filmlerin oda sıcaklığında alınmış VSM verilerini analiz edildikten sonra Şekil 4.1.5'te göstermektedir. Bu grafikler yüzeye paralel bir alanda alınmıştır. Co20Fe60B20 filmler düzlem-içi anizotropiye sahiptir. $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ filmi için sıfırlayıcı alan 23 Oe ve 2 kOe

altında doygunluk mıknatıslanması 1,2 kemu/cm^3 olarak belirlenmiştir. 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. CoFeB filminin doygunluk mıknatıslanması düşük sıcaklıklarda pek değişmemiştir. Yüksek sıcaklıklarda alınan verilerde Curie sıcaklığının 950 K olduğu görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.1.6'da . $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ malzemesi için dizlem içi ve düzleme dik manyetik alan altında düşük sıcaklıklardaki VSM ölçümleri görülmketedir.

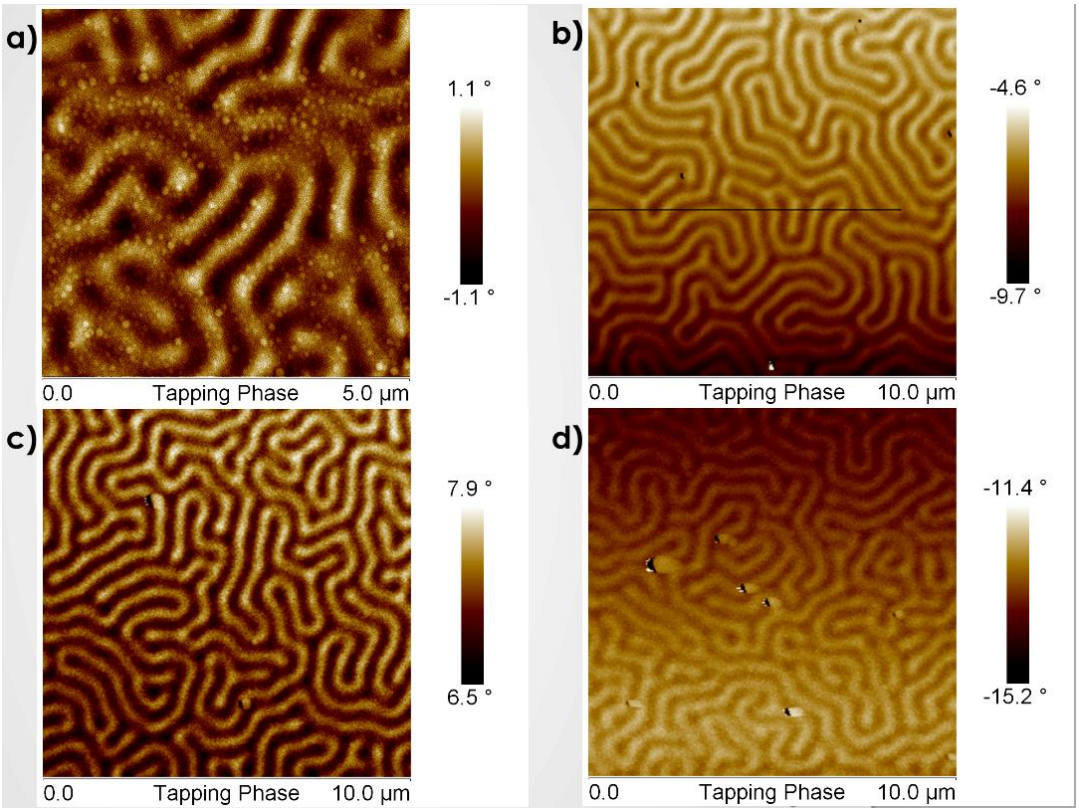


Şekil.4.1.6: Düşük sıcaklıklarrda düzleme dik (a ve b) ve düzlem içi (c ve d) manyetik alanda alınan . $Co_{20}Fe_{60}B_{20}$ için VSM ölçümleri.



Şekil.4.1.7: CoFeB ince filmi için alınan yüzey topografisi ve yüzey pürüzlülüğü.

Yukarıdaki şekilde CoFeB ince filmi için alınan AKM görüntüsü bulunmaktadır. Bununla birlikte yüzey üzerindeki pürüzlülüğü belirlemek için alınan yükseklik ve yatay eksen grafiği Şekil 4.1.7 b de verilmiştir.



Şekil 4.1.8 : MKM görüntüsü a) $(CoFeB)_{60}$\Pt(5 nm) b) $(CoFeB)_{60}$\Pt(15 nm), c) $(CoFeB)_{60}$\Pt(80 nm), d) $(CoFeB)_{60}$\Pt(100 nm)

İyi bir elektrik bağlantısı saplamak ve yüksek kaliteli manyetik görüntüler almanızı sağlamak amacıyla örnek için optimum platin kalınlığını bulmak için, çeşitli platin kalınlıklarına sahip (CoFeB) 60 \ Pt (x nm) film örnekleri üretildi. (a) Pt (5m) , B) Pt (15m), c) Pt (80m), a) Pt (100m)). Farklı Pt kalınlıklarına sahip örneklerin MFM görüntülerinde, labirent şeklinde domen alanının 80 nm Pt kalınlığa kadar açıkça görülebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, 100 nm Pt kalınlığı için alınan manyetik görüntüden, malzemeden alınan magnetizasyon şiddetinin azaldığını görüntünün puslu hale gelmesinden anlamaktadız. Buradan net bir görüntü elde etmek için yeterli manyetik alan için belirli bir Pt kalınlığının üzerine çıkılmaması gerektiği sonucuna ulaşmaltayız.. Şekil 4.1.8 d) 'de (100-nm Platin) manyetik labirent alanının kenarları 2.4 c)' nin aksine (80 nm Pt) puslu gibidir.

Doktora öğrencimiz İbrahim Çinar BİDEB 2214 A Yurtdışı Araştırma Bursu kazanmış olup Bu amaçla Fransa'ya gitmiş ve burada araştırmalara katkı sağlamak üzere guruba dahil olmuştur. Kendisini orada üretmiş olduğu (Ta(5)/Pt(10)/[Co(0,2)/Ni(0,6)]xN/Pt(5nm)) manyetik ince filmler düzleme dik manyetik alanda sahip olup aşağıdaki şekil 4.1.9 da VSM ölçümleri (oda sıcaklığında) görülmektedir.

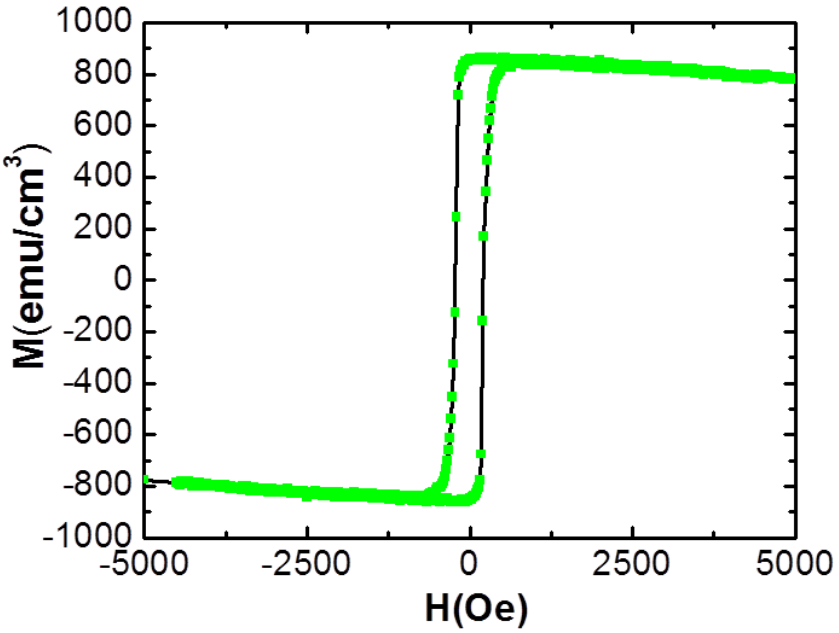
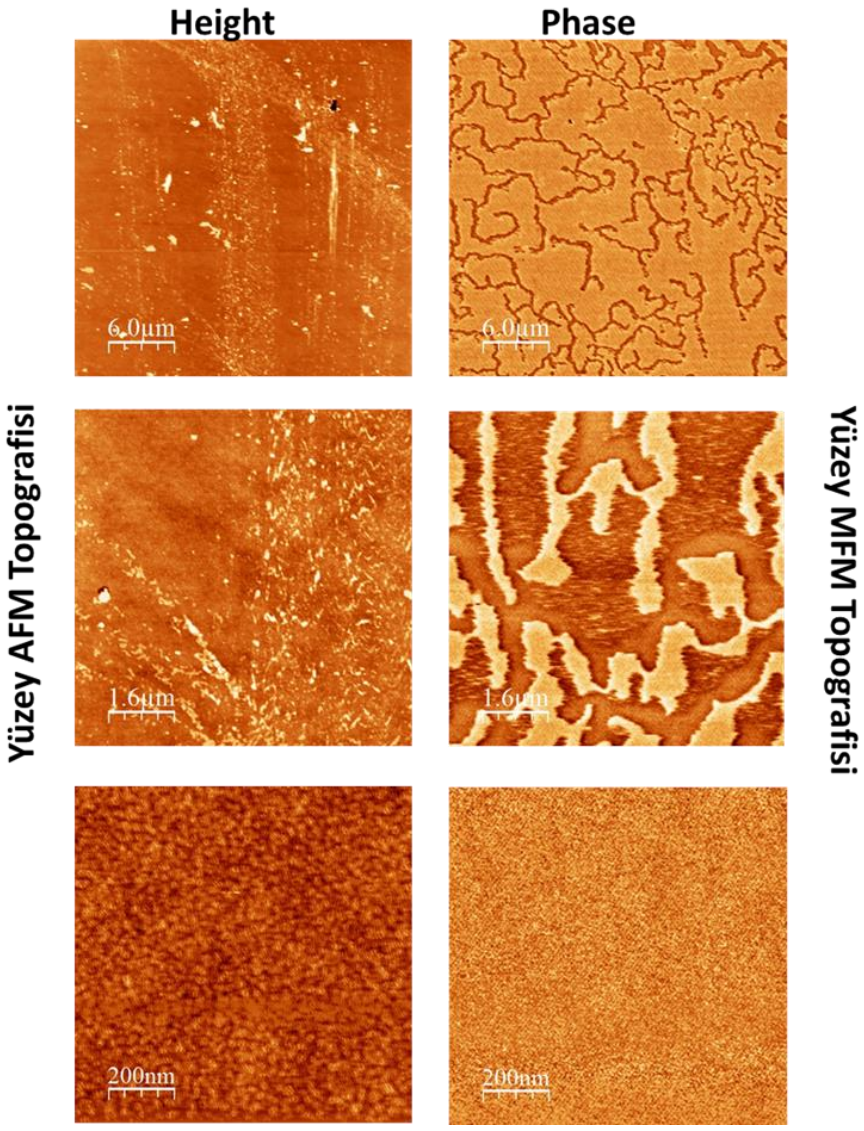


Figure 4.1.9 : Düzleme dik manyetik alan altında alınan VSM ölçümleri.(((Ta(5)/Pt(10)/[Co(0,2)/Ni(0,6)]x8/Pt(5nm)))

BU malzeme için yapılan manyetik karakterisasyon sonrası elde edilen özellikler; Ms 820 emu/cm^3, Hc 200 Oe, Hk 6600 Oe ve K değeri 6.9 10^{5}J/m^3 olarak belirlenmiştir.

Ta(5)/Pt(10)/[Co(0,2)/Ni(0,6)]$_{x8}$/Co(0.2nm)/Pt(5nm) filmlerin yüzey topografisi AKM'de incelenmiş ve AKM görüntüleri Şekil 4.1.10'da verilmektedir. Yüzey analizlerinde genel yapı fazla pürüzlü olmayıp en fazla 1-3 nm yüksekliğe sahiptir. En küçük ölçekli AKM görüntüsünde tanecik yapıları açık bir şekilde gözlenmektedir.



Şekil 4.1.10. Ta(5)/Pt(10)/[Co(0,2)/Ni(0,6)]$_{x8}$/Co(0.2nm)/Pt(5nm) AKM ile alınmış yüzey topografisi; MKM ile alınmış olan manyetik görüntü

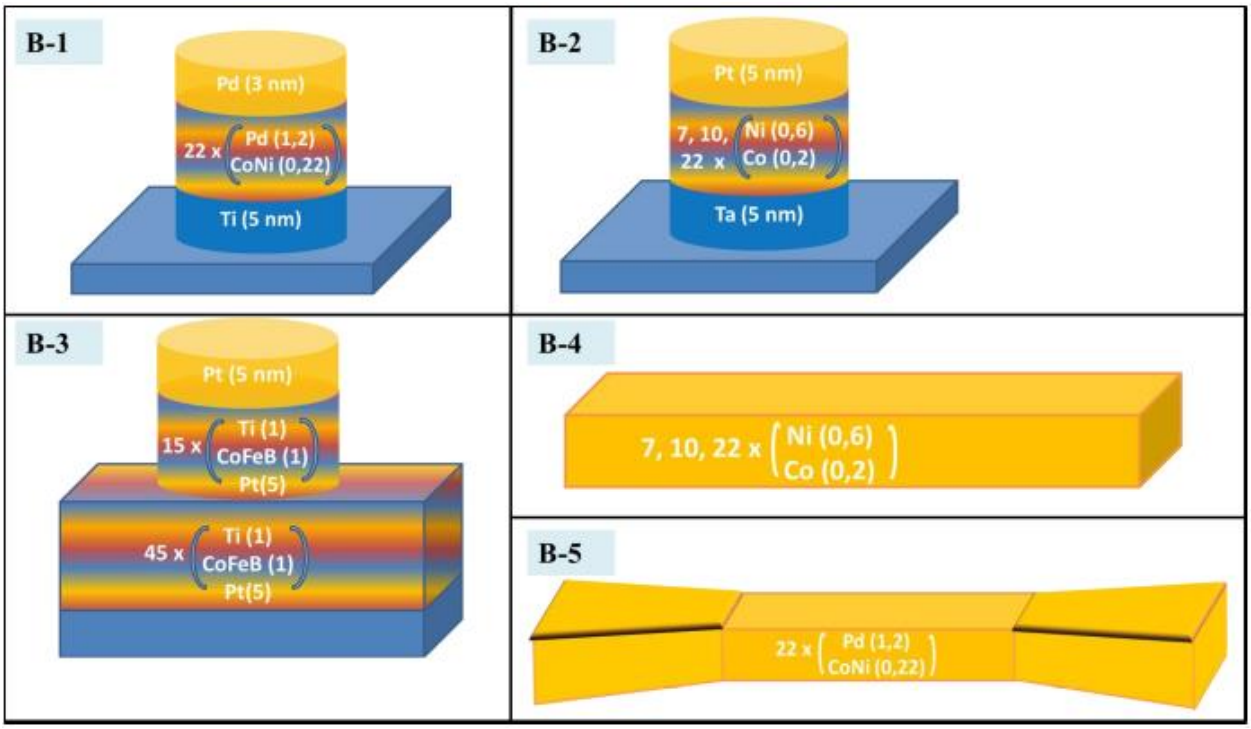
Şekil 4.1.10 daki MKM resimlerinde üç farklı ölçekte, DDMA malzemelerde rastlanan labirent domen yapılanması (ilk iki resimde) görülmektedir. Üçüncü en küçük ölçekli resimde alan küçük olduğundan sadece tek bir doman yapısı içersinde herhangi bir değişim olmayacağı için tek bir şekilde görülmektedir.

4.2. Baloncuk Oluşumu Çalışmaları için Üretilen Örnekler

Şekil 4.2.1 projenin ilk döneminden bu yana üretilen örnekleri tablo halinde sunmaktadır. Bununla birlikte İbrahim Çinar'ın Fransa tarafında yapmış olduğu çalışmalarda ürettiği Ta(5)/Pt(10)/[Co(0,2)/Ni(0,6)]$_{x8}$/Co(0.2nm)/Pt(5nm) ince filmleri ve bunlardan üretilen disk ve teller de mevcuttur. Bunlar ile ilglili deney sonuçları ilk setlerin sonuçlarından sonra verilmketedir. Özetle B2 nano-diskleri ve B4 mikro-telleri Fransa tarafında moleküler demet epitaksi yöntemiyle büyütülen Co/Ni çoklu katmanlı yapısının iyon aşındırması yöntemiyle desenlenmesi suretiyle üretilmişlerdir. B1 nano diskleri CoNi/Pd malzemesinin magnetron saçtırma yöntemiyle büyütülüp iyon aşındırması yöntemiyle desenlenmesi sonucu elde edilmiştir. B3 ve B4 örnekleri bu proje döneminde Türkiye tarafında üretilen nano disk ve mikrotellerden oluşmaktadır. B1 ve B2 örnekleri 300-2400 nm çapındaki disk dizinlerinden oluşmaktadırlar.

B3 örnekleri ise 100 – 1200 nm arası çaplarda disk dizinleri içermektedir. Bu örnekler Pt/CoFeB/Ti filmden gelecek manyetik sinyali arttırmak adına 45 tekrarla 400 nm kalınlıkta manyetik malzeme içermektedir. Sütun şeklinde desenlenmeleri durumunda yıkılmamaları için 100 kalın sütunlar halinde iyon aşındırması ile desenlenmiştir. Bu durumda elde edilen örnekte nano-sütunlar 300 nm manyetik filmin üzerinde yer almaktadırlar. Bu tasarımda üstte 5 nm Pt bırakılmış ve iyon aşındırması basamağı Pt seviyesine kadar yapılmıştır. Bu sayede iletken AKM ile baloncuk aşılama deneyleri mümkün olmuştur.

B4 örnekleri CoNi/Pd malzemesinden elektron demet litografisi ile desenlenmiş ve iyon aşındırması yöntemiyle üretilmiştir. Burada en üstte elektriksel kontak kurma ve kapak katman olarak Pt kullanılmıştır. Elektriksel ölçümler için geliştirilen mikrotel kontak maskesi kullanılarak fotolitografi ile üzerine kontak kurulmuştur. Bu örneklerdeki elektriksel bağlantılar sayesinde tellerden akım geçirilebilecek ve bu şekilde ısıtılan tellere ısı-destekli mıknatıslama yapılacaktır. Isınan tellerin sıfırlayıcı alanı düşmektedir. Bu sayede dış manyetik alanlara hassasiyeti artmakta ve küçük manyetik alanlarla kolayca mıknatıslanabilmektedirler. Bir MKM ucunun manyetik alanı bu durumda teli mıknatıslama için yeterli olmaktadır.



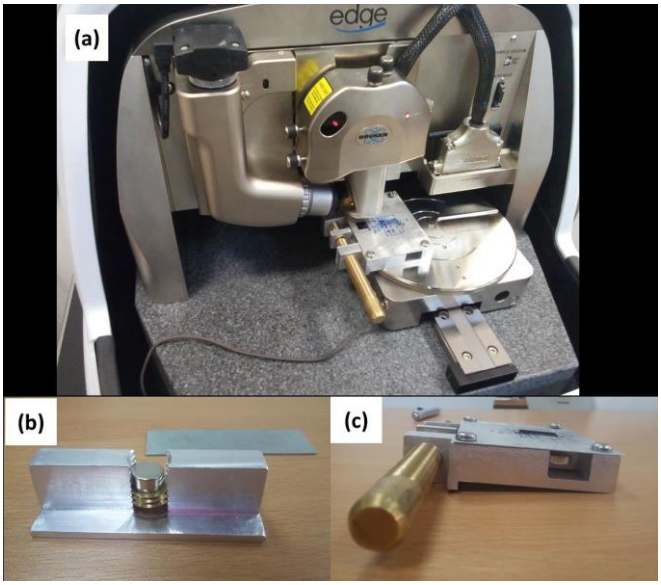
Şekil 4.2.1: Baloncuk oluşumuna elverişli mikro ve nano aygıtlar

4.3. Baloncuk Oluşum Koşullarının Araştırılması

Üretilen örneklerde baloncuk oluşum koşullarının belirlenmesi için 4. iş paketi kapsamında baloncuk oluşum koşulları test edilmiştir. Önceki dönemde manyetik alan koşullandırması ile B1 örneklerinde yapılan çalışmalar bu dönemde tamamlanmıştır ve bir istatistik tablosu çıkartılmıştır. 4. Iş paketinde vurgulanan iletken-AKM ile baloncuk yazma çalışmaları için ölcüm çalışmaları bu dönemde devam etmiş ve iletken-AKM kullanım prosedürleri geliştirilmiştir. Alternatif olarak mikroteller üzerinde ısı-destekli baloncuk yazma işlemleri uygulanmış ve Manyetik Kuvvet Mikroskobu (MKM) ile görüntülenmiştir. Aşağıda başlıklar halinde anlatılan çalışmalarda baloncuk oluşumları MKM'de yüksek momentli uç kullanılmak suretiyle darbe modunda (tapping mode) incelenmiştir.

Baloncukların uygulanan manyetik alana verdikleri tepkilerin belirlenmesi için manyetik alan altında MKM görüntülemesi planları yapılmış ve bir önceki dönemde alan altında ölçüm platformları hazırlanmıştı. Bu platformlar ile testler beklenildiği gibi olmamış, yüzey eğimleri fazla olmuştur. Bu nedenle yeni manyetik alan platformları tasarlanmıştır. Manyetik olmayan malzemelerden (Al ve pirinç) torna ve frezede iki ayrı platform yapılmıştır. Bruker AKM ile entegre edilebilen bu manyetik alan platformları Şekil 7'de gösterilmiştir. Biri yüzeye dik (Şekil 7b), biri yüzeye paralel (Şekil 7c) 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 4.3.1: Bruker AKM'de manyetik alan altında MKM görüntülemeleri için tasarlanmış manyetik alan uygulayan platformları (b) düzleme dik ve (c) düzleme paralel manyetik alan uygulayabilmektedir.

4.3.1. Manyetik Alan Koşullannası İle Baloncuk Oluşumu

4.3.1.1. B1 örneklerinde baloncuk oluşumu

B1 örnekleri farklı manyetik alan koşullandırmalarına tabi tutulmuş ve bunun sonucunda oluşan manyetik yönelimler MKM ile incelenmiştir. 4. İş paketi kapsamında yapılan baloncuk oluşumuna elverişli manyetik alan koşullandırmasının belirlenmiştir.

Bu çalışmaların bir devamı olarak baloncuk benzeri yapıların manyetik alana verdiği tepkiler araştırılmıştır. Şekil 4.3.1.1.1'de düzleme dik 800 mT maksimum manyetik alanda AC mıknatıslığı giderilmiş örneklerden 2400 nm çaplı disklere ait MKM görüntüleri gösterilmektedir. Bu disklerde alınan büyültmüş görüntülerde 200-300 nm çapında açık renkli bölgeler görülmektedir. Baloncuk oluşumunun vorteks ve radyal vorteks manyetik yapılarından MKM görüntülemesinde ayırt edilebilememektedir. Oluşumların orta bölgesinin büyüklüğü bunların baloncuk yapıları olduğuna birinci işarettir. Baloncuk, vorteks ve radyal vorteks yapıları manyetik alanda farklı davranışlar sergilerler. Düzleme paralel uygulanan bir manyetik alan, vorteksleri alana dik bir doğrultuda ve radial vorteksleri alana paralel bir doğrultuda kaydırır.

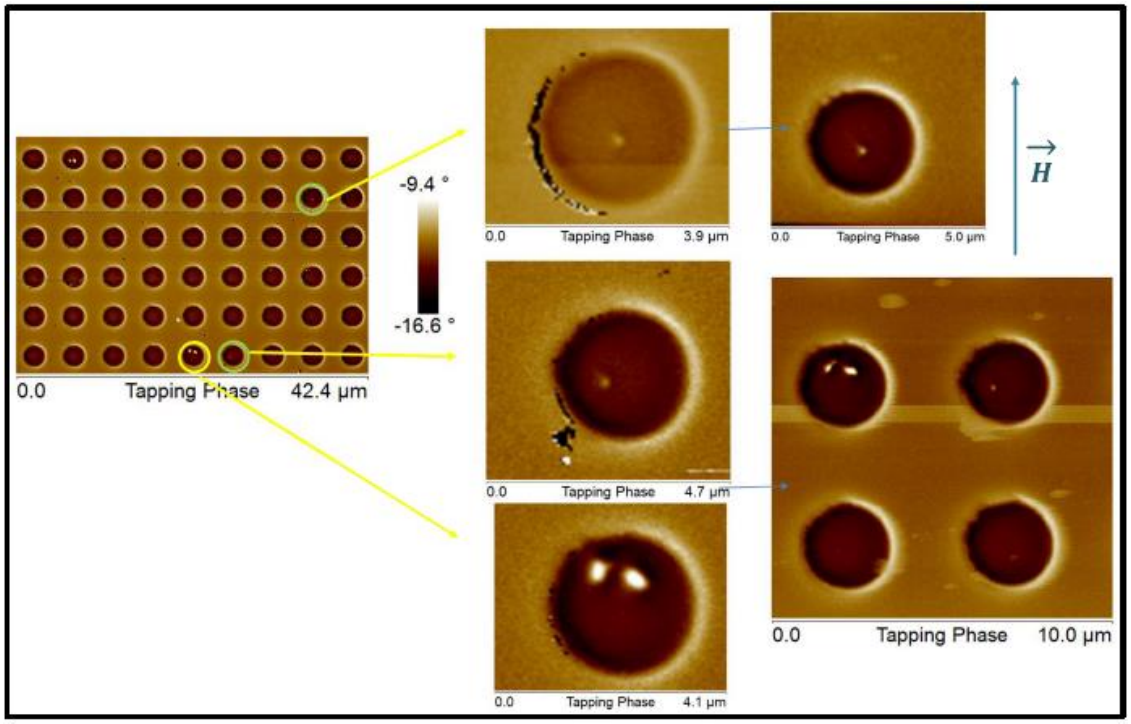
Şekil 4.3.1.1.1'de gösterilen sağdaki MKM resimleri bir önceki kısımda resmedilen düzlemiçi manyetik alan platformunun üzerinde 37 mT manyetik alan altında alınmıştır. Baloncukların konumları alan uygulanmadan önceki resimlerle kıyaslandığında değişmemiştir. İkili baloncuk yapısı da yine yerini korumuştur. Benzer bir şekilde bu disklere 100 mT manyetik alan uygulanmış, bu alan kaldırıldıktan sonra MKM resimleri incelenmiş ve yine konumların değişmediği gözlenmiştir. 200 mT alan da yine aynı sonucu vermiştir. Bu ikinci veri de bu yapıların vorteks veya radyal vorteks olmadığını, baloncuk yapılanması olduklarını doğrulamaktadır.

Bu dönemdeki çalışmalarda düzleme dik AC alan koşullanması sonrası örnekler incelenmiştir. Sistematik olarak AC manyetik alan koşulanması işleminde, Hmax, manyetik alan değiştirirken uygulanılan artma hızı ve manyetik alan basamakları değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Tablo 3'de yapılan çalışmaların özeti verilmiştir. Burada önce 20 mT basamaklarla 40 mT/sn artma hızı ile baloncuk oluşumu incelenmiştir. Farklı Hmax değerleri için 800 – 1400 nm arası çaplardaki disklerde taranan toplam disk sayısının baloncuk içeren disklere oranı ve yüzdesi hesaplanmıştır. Tabloda renk kodlaması kullanılarak kırmızı renklerle yüksek baloncuk oluşumları ve yeşil tonlarla hiç ya da düşük baloncuk oluşumu ifade edilmektedir. Düzleme dik manyetik alandaki görüntüler henüz başarılı olamamıştır. Nitekim bu platformda da MKM ucu yüzey ile bağlantısını kaybetmektedir.

700 mT Hmax değerinden başlayarak 20 mT basamaklarla azalan AC manyetik alanda mıknatıslığı giderilmiş örnekler oldukça yüksek verime sahiptir. Bu koşullarda taranan diskler . Şekil 4.3.1.1.2'de gösetirilmiştir. 800 nm çaplı disklerde her dizinde en çok 1-2 baloncuğa rastlanmaktadır. Bundan küçük çaplı dizinlerde rastgele düzlemden içeri veya dışarı doğru mıknatıslanmış (sırf koyu veya sırf açık tonda) diskler bulunmaktadır. 1000, 1200 ve 1400 nm çaplı disklerde yer yer merkezi diskin köşelerine kaymış baloncuklar görülmektedir. Bunun haricinde tek domenli veya çoklu domenli yapılar göze çarpmaktadır. 1600, 1800 ve daha büyük çaplı disklerde tamamen çoklu domenli yapı görülmektedir. Bu bulgular ışığında Tablo 3'teki çalışmada 800 -1400 nm arası çaplardaki diskler incelenmiştir.

Tablo 4.3.1.1.1'te baloncuk oluşumunun en çok 1000 nm ve 1200 nm çaplı disklerde belirdiği ortaya çıkmaktadır. Buna göre 1000 nm çaplı disklerde en çok %7, 1200 nm çaplı disklerde en çok % 12,5'lik bir baloncuk oluşumu görülmüştür. 20 mT basamaklarla değişen AC manyetik alana ait istatistikler Şekil 10'daki kontur grafiğinde verilmiştir. Renkli ölçekte maviden kırmızıya doğru değişen renkler hiç baloncuk olmayan %0 değerinden maksimum baloncuk oluşumu olan %12,5'e kadarki değerleri temsil etmektedir. Buna göre Hmax ve

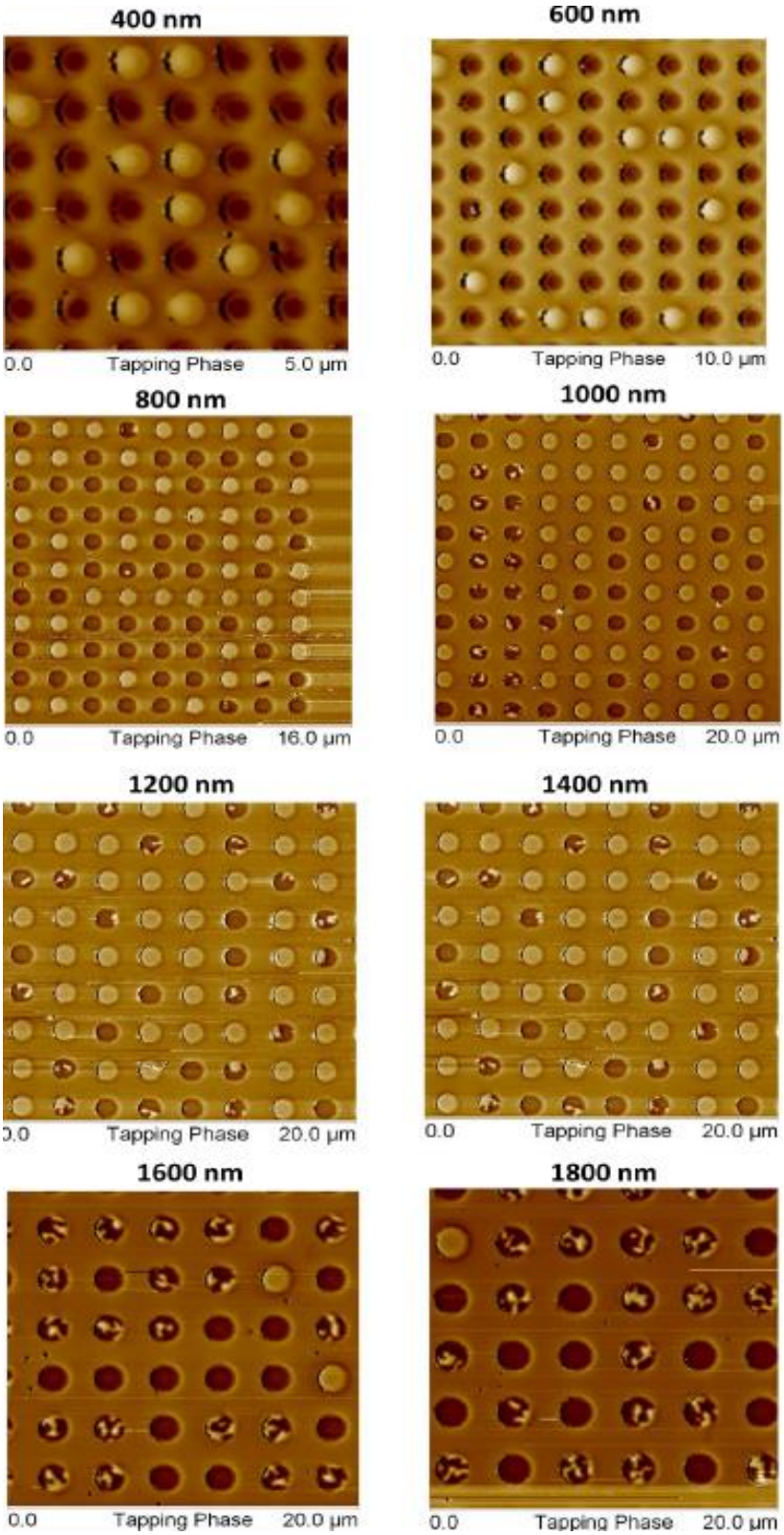
disk çapına göre en çok baloncuk oluşumu gözlenen bölgeler görülebilmektedir. Tablo 3'deki resmi burada da görmekteyiz. Şekil 4.3.1.1.3'den çıkan sonuca göre en baloncuk oluşumuna en elverişli diskler 1200 nm çapındaki disklerdir ve en verimli manyetik alan koşullandırması 675 mT maksimum manyetik alandan 40 mT/sn hızla 20 mT basamaklarla azalan AC manyetik alandır.



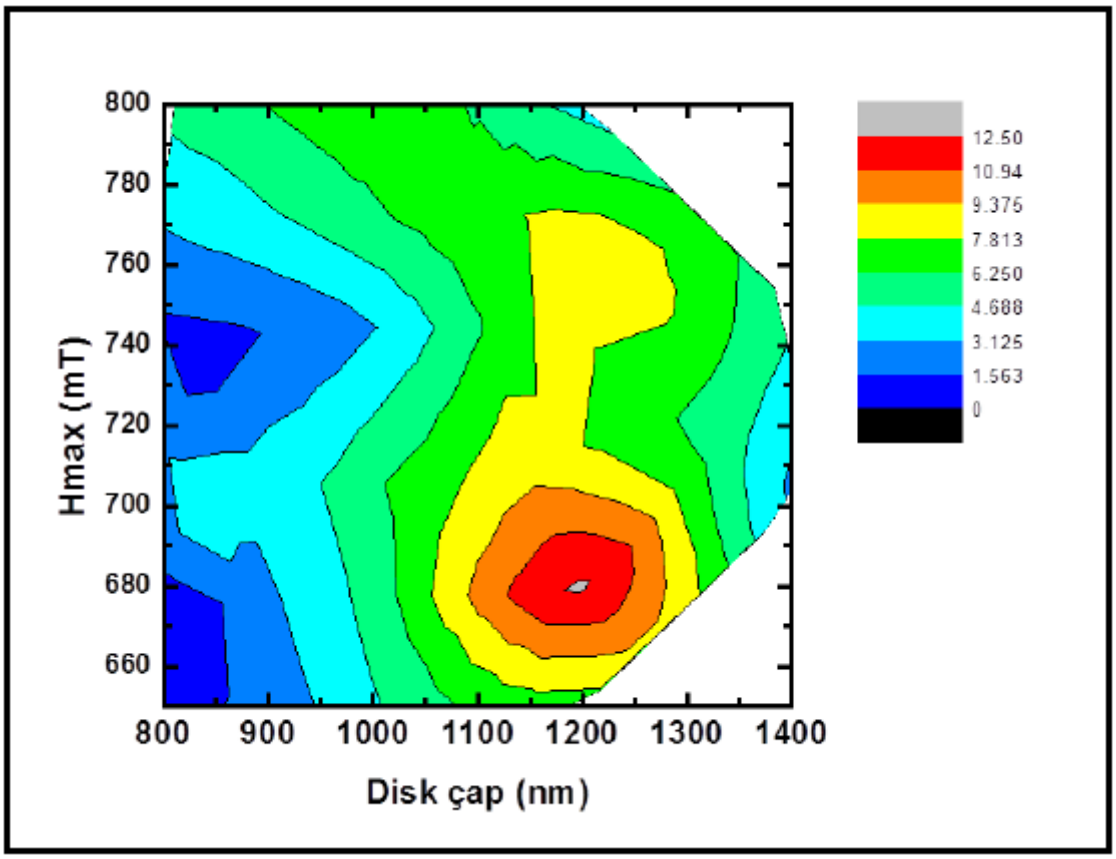
Şekil 4.3.1.1.1: 2400 nm çaplı disklerde baloncuk oluşumlarının düzlem içi manyetik alan altındaki Görüntüleri

Tablo 4.3.1.1.1: B1 Örneklerinde Baloncuk Oluşum Koşulları ve Oluşum Yüzdesi

H max	Artma Hızı	Basamak	Disk Çapına Göre % Baloncuk			
			800 nm	1000 nm	1200 nm	1400 nm
650 mT	40 mT/s	20 mT	1.01%	4.50%	6.94%	0.00%
675 mT			0.00%	6,60%	12.50%	0.00%
700 mT			4.86%	7.00%	10.91%	2.73%
725 mT			0.80%	1.65%	6.00%	0.00%
750 mT			1.74%	3.81%	9.52%	5.00%
800 mT			5.00%	7.27%	4.00%	0.00%
675 mT	40 mT/s	5 mT	1.50%	3.00%	5.50%	0.00%
650 mT	40 mT/s	10 mT	0.00%	2.78%	1.01%	0.00%
675 mT			0.00%	6.00%	9.40%	0.00%
800 mT			2.38%	4.00%	10.00%	2.38%
650mT			0.00%	4.86%	6.00%	0.00%
675 mT	40 mT/s	15 mT	0.00%	5.00%	5.50%	0.00%
675 mT	40 mT/s	25 mT	0.00%	2.00%	7.80%	0.00%
675 mT	40 mT/s	30 mT	0.00%	3.50%	10.80%	0.00%



Şekil 4.3.1.1 .2: 700 mT Hmax değerinden 20 mT basamaklarla 40 mT/sn hızla azalan AC mıknatıslığı giderilmiş örnekler

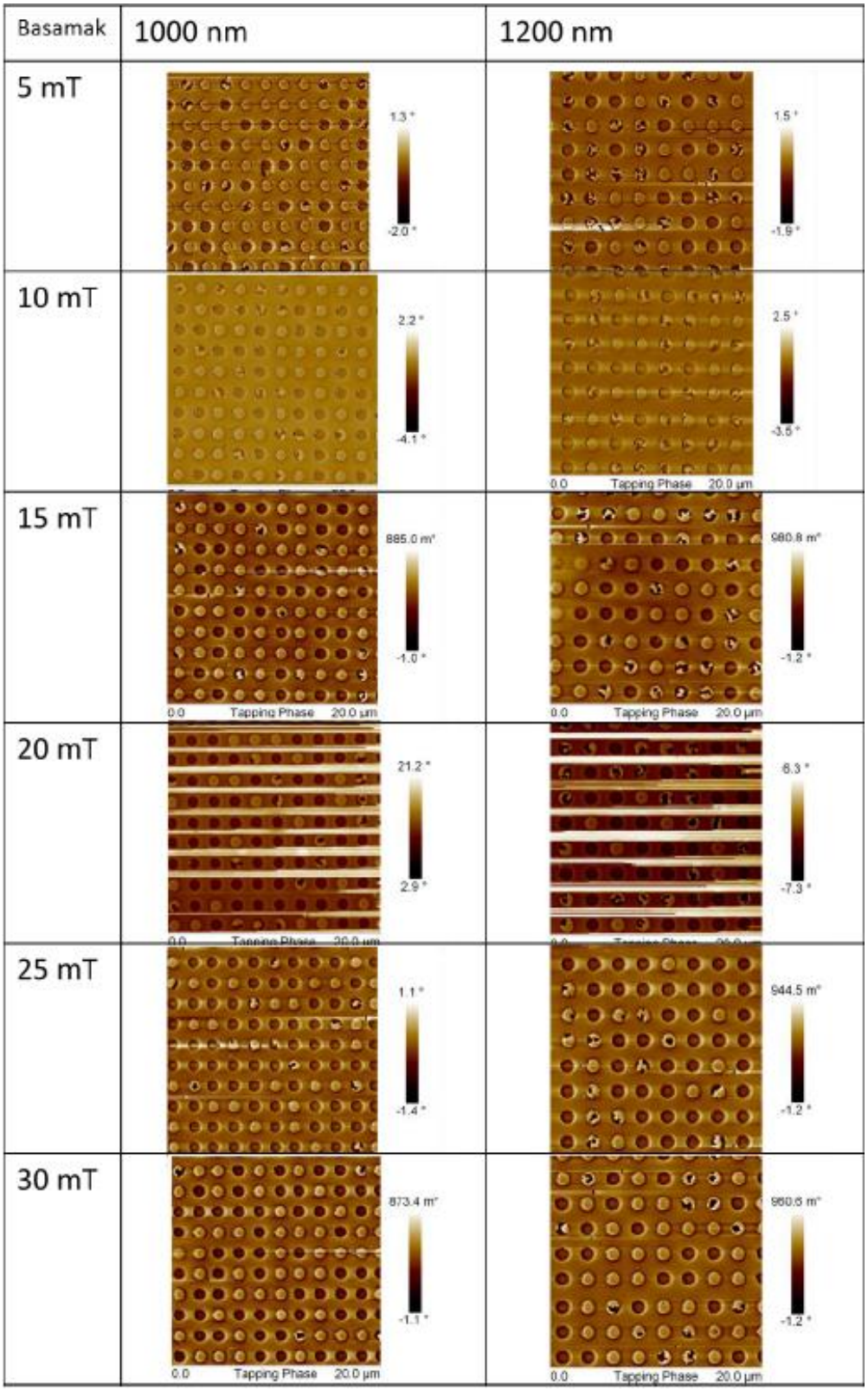


Şekil 4.3.1.1.3: 20 mT basamaklarla 40 mT/sn artış hızıyla yapılmış AC alanda mıknatıslığı giderilmiş disklerde baloncuk oluşumu yüzdesi Hmax ve disk çapına göre çizdirilmiştir

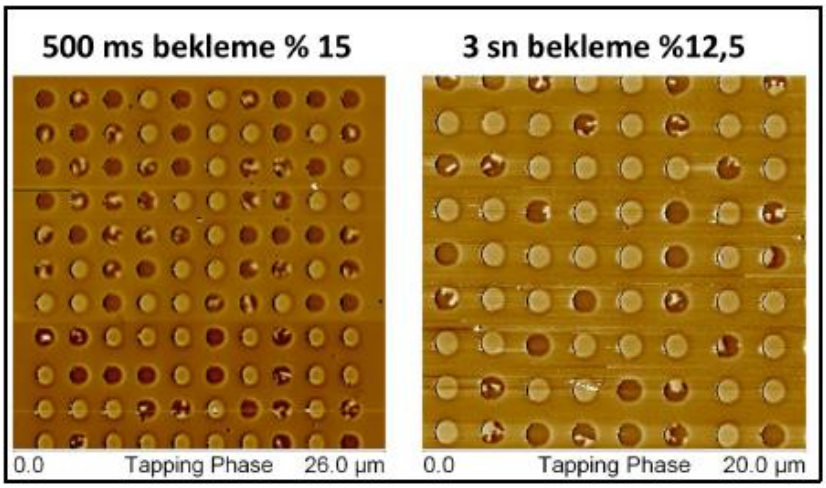
675 mT maksimum alan değerinin bu şekilde tespitinden sonra AC alan koşullandırmasında basamak değerinin baloncuk oluşumu incelenmiştir. Şekil 4.3.1.1.4'de gösterilen bu çalışmada 40 mT/sn artış hızı ve Hmax sabit tutulmuş ve basamak değeri 5 mT- 30 mT arası değiştirilerek 1000 nm ve 1200 nm çapındaki diskler taranmıştır. Bu değerler ve baloncuk % verimliliği yine Tablo 4.3.1.1.1'te verilmiştir. Gösterilen MKM resimlerinde baloncuk kalitelerinde farklılıklar görünse de en verimli oluşum koşulları yine 20 mT basamaklar için gözlenmiştir.

Son bir çalışmada her basamakta bekleme süresi değiştirilmiştir. Yukarıda verilen tüm verilerde her bir manyetik alan basamağında 3 sn beklenmekte daha sonra manyetik alan negatif olan bir sonraki basamak değerine 40 mT/sn hızla değiştirilmektedir. Bu bekleme süresinin etkisini anlamak için 3 sn süre 500 ms'ye indirilmiştir. Şekil 4.3.1.1.5'de bu iki durum karşılaştırılmaktadır. % verimlilik hesaplandığında 500 ms bekleme süresi olan manyetik alan koşullandırması disklerin %15'inde baloncuk oluşumuna yol açmıştır. Bu daha önce görülen en yüksek %12,5 değerinden daha yüksektir.
Bu çalışmanın sonuçlarını şu şekilde özetleyebiliriz:

- CoNi/Pd DDMA malzemesinden üretilen nano-disklerde baloncuk oluşumu gözlenmektedir.
- Baloncuk Oluşumları 200-500 nm arası çaplarda orta bölgelere sahiptirler.
- Düzleme parallel uygulanan manyetik alanlarda hareket etmezler.
- En verimli olarak 1000-1200 nm çap aralığındaki disklerde baloncuk oluşmaktadır.
- Baloncuk oluşumu için düzleme dik uygulanan maksimum bir değerden AC olarak basamaklarla azalan manyetik alanda disklerin mıknatıslığı giderilir.
- Uygulanan maksimum alan, azalma basamakları ve basamaklar arasındaki manyetik alan artış hızı bunlara ek olarak her basamakta bekleme süresi baloncuk oluşum yüzdesini etkilemektedir.
- Manyetron saçtırma ile üretilen bu örneklerde yüzey kusurları çok olduğundan baloncuklar disklerin tam ortasında yer almayabilmektedir.
- CoNi/Pd malzemesinden üretilen disk dizinlerinde baloncuklar 1000 – 1200 nm çapındaki disklerde oluşmuşlardır.
- En verimli baloncuk oluşumu maksimum alanı 675 mT olan ve 20 mT basamaklarla 40 mT/sn hızla azalan AC manyetik alan koşullandırmasında bekleme süresi 1 sn altında iken gözlenmiştir ve %15'tir.



Şekil 4.3.1.1.4: 675 mT Hmax değeri ve 40 mT/sn artış hızı ile AC alanda mıknatıslığı giderilmiş disklerde baloncuk oluşumu



Şekil 4.3.1.1.5: 675 mT Hmax değeri, 20 mT basamak ve 40 mT/sn artış hızı ile koşullandırılan disklerde farklı bekleme sürelerine ait MKM resimleri karşılaştırılmıştır

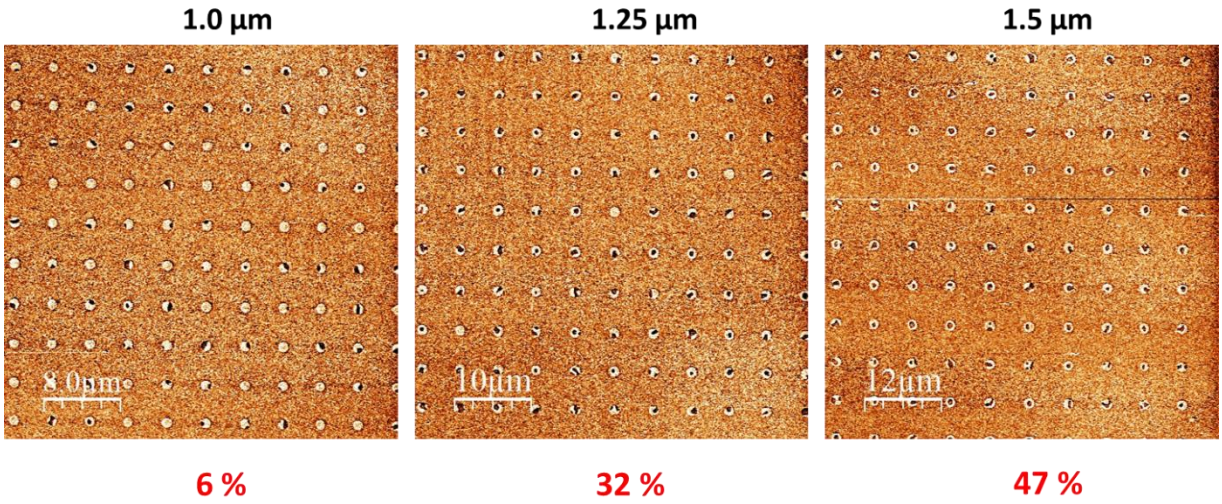
İbrahim Çinar'ın yaptığı çalışmalarda AC manyetik alan koşullaması ile baloncuk oluşumunu incelemektedir. Aşağıdaki şekilde AC manyetik alan koşullama islemi verilmiştir.. Filmin düzlemine dik uygulanan 650 mT'dan (6500 Oe, burada uygulanan değer) başlayarak 0 mT giden 120 dakika süren 4 dakika periyoda sahip olan bir azalan sinüs dalgası şeklinde değişen manyetik alan altında koşullandırma işlemi sonrası manyetik topografisi görülmektedir. Bu manyetik alan ile koşullandırma işlemi öncesi malzeme doygunluğa ulaşması açısından düzleme dik 7700 Oe manyetik alan uygulanmaktadır.



Şekil 4.3.1.1.6: AC manyetik alan koşullandırma işlemi için kullanılan programın bir ekran görüntüsü. 6500 Oe maksimum manyetik alan, 120 dakika toplam süre, 4 dakika sinyalinin periyodu ve sinüs dalga şekli.

Burada amacımız uygun AC manyetik alan koşullandırma değerini elde etmektir. Yapılan MKM ölçümleri sonucunda elde edilen en iyi AC manyetik alan koşullandırma değeri

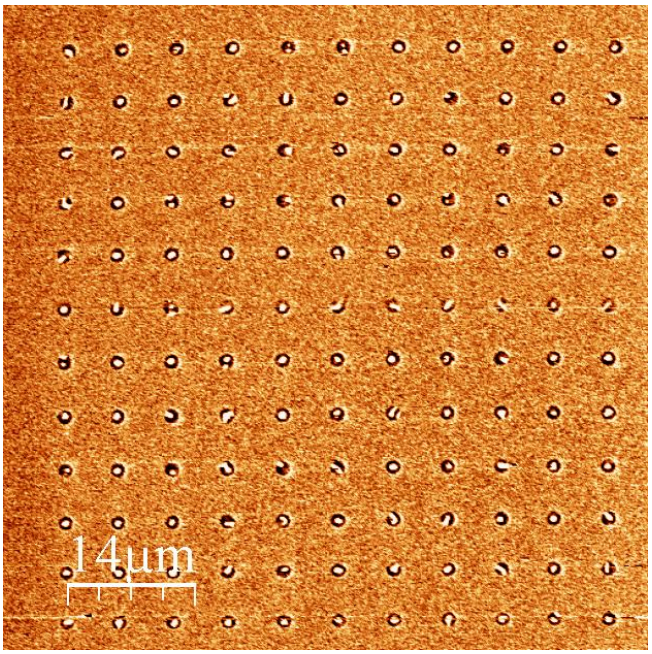
maksimum değer 6500 Oe olarak elde edilmiştir. Bu şu ana kadarki en çok baloncuk yapısının elde edildiği değerdir fakat bu değerin optimizasyonu devam etmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.3.1.1.7'de 6500 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.0 µm, 1.25 µm ve 1.5 µm çapındaki diskler için gösterilmektedir. Her birinin altında yüzde kaç baloncuk oluştuğu gösterilmektedir.



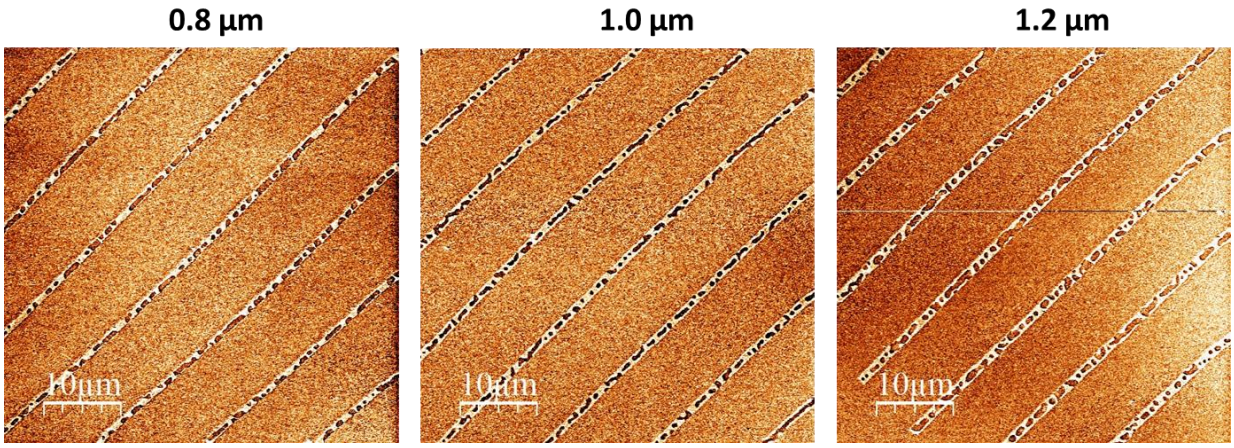
Şekil 4.3.1.1.7: 6500 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri sırayla 1.0 µm, 1.25 µm ve 1.5 µm çapındaki diskler için gösterilmiştir. Her birinin altında yüzde kaç baloncuk oluştuğu gösterilmektedir.

Burada 1.5 µm diskler için % 47 gibi bir yüzde yakalanmış olup, bu değerin artırılması için son optimizasyonlar yapılmaya devam edilmiş ve 1.5 µm çapındaki diskler 6250 AC düzlem için manyetik alan koşullaması için %70 baloncuk oluşumu güzlemlenmiştir. Şekil 4.3.1.1.8 de açık şekilde görülmektedir. Bu sonuç spin-valf yapılması için yeterli bir başlangıçtır. Bu değer şuan itibariyle elde edilen en yüksek yüzdedir.

Nano-mikro teller için uygun olan AC manyetik alan koşullandırma değeri için yapılan MKM görüntüleri Şekil 4.3.1.1.9'de gösterilmektedir. Açıkça görülmektedir ki, bu değer için mikto teller üzerinde baloncuk oluşumunun sağlandığı gözlenmektedir.



Şekil 4.3.1.1.8: 6250 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleme 1.5 µm çapındaki diskler için gösterilmiştir.



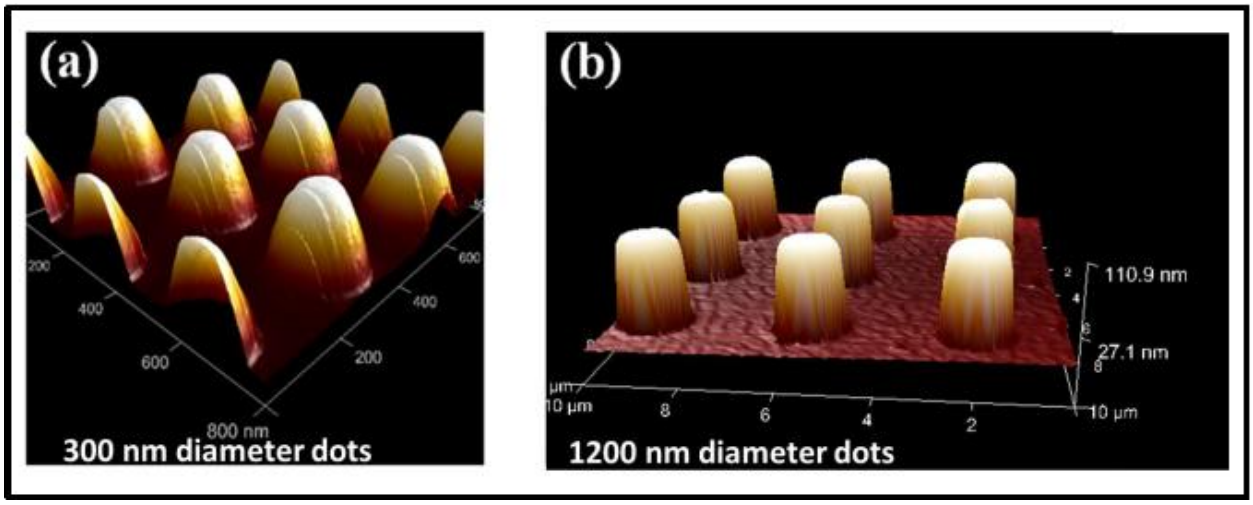
Şekil 4.3.1.1.9: 6500 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 0.8 µm, 1.0 µm ve 1.2 µm ince teller için gösterilmiştir.

4.3.1.2. B3 örneklerinde baloncuk oluşumu

B1 örneklerinde en fazla %15 verimlilik görülmesi ve kusurlar ve düzgün olmayan anizotropi nedeniyle baloncukların disklerin kenarlarına kaymış olması alternatif malzeme arayışlarına yön vermiştir. Bu durumda CoFeB malzemesinin Pt ve Ti katmanları arasına konulduğu çoklu katmanlı yapı olan B3 örneklerinin çalışmalarına geçilmiştir. Bir önceki bölümde anlatılan 1. ve 2. İş paketleri kapsamında yeniden DDMA film üretimi ve karakterizasyonu yapılmış ve 3. İş paketi çerçevesinde desenlenerek B3 nano-diskleri üretilmiştir. B3

örneklerinin AKM görüntüleri Şekil 4.3.1.2.1'de gösterilmektedir. 100 – 1200 nm çaplarında disk dizinlerinden oluşan B3 örnekleri iyon aşındırması yöntemiyle üretilmiştir. Üretim basamaklarının optimize edilmiş olması Şekil 4.3.1.2.1'de gösterildiği üzere temiz (kenar kalıntısız) örnekler elde edilmesini sağlamıştır.

Şekilde gösterilen disklerin alt kısmında 300 nm kalınlığında tekrarlı Pt/CoFeB/Pt manyetik katmanları bulunmaktadır. Alınan MKM görüntüleri Şekil 4.3.1.2.2'de gösterilmiştir. Disklerin altında filmed oluşan labirent domen yapısı görülmektedir. Bu da malzemenin DDMA'ye sahip olduğunu doğrulamaktadır. Şekil 4.3.1.2.2a ve Şekil 4.3.1.2.2b'deki görüntüler düzleme dik uygulanan 800 mT maksimum alanda AC mıknatıslığı giderilmiş hallerdir. Sırasıyla 300 ve 1200 nm çaplı disklere ait olan MKM resimlerinde iki farklı davranış görmekteyiz. Birincisi küçük çaplı disklerde (500 nm ve altı) alttaki labirent domen yapısının disklerde kendini tekrar etmesidir. Alttaki domen ne ise diskin içinde de bu yapının devamı oluşmuştur.

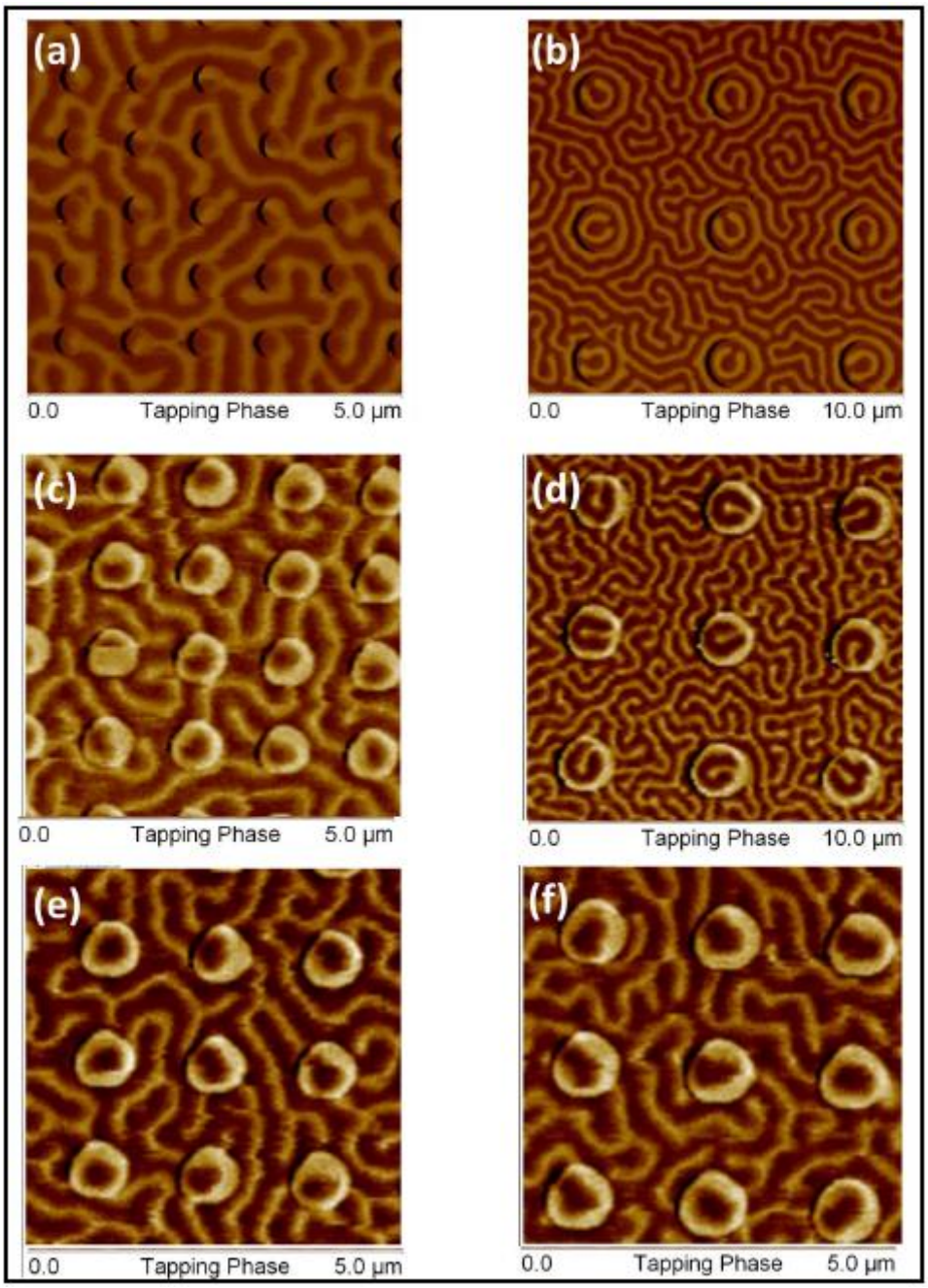


Şekil 4.3.1.2.1: B3 örneklerinin AKM görüntüleri (a) 300 nm ve (b) 1200 nm çaplı diskler için verilmiştir.

İkinci davranış ise 600 nm ve daha büyük çaplı disklerde at nalına benzer domen yapısına bir geçiş olmasıdır. Farklı manyetik alan koşullanmalarında bu yapıların nasıl davrandığı incelenmiştir. Düzleme dik uygulanan AC manyetik alanda mıknatıslığı giderilmiş örneklere 9T düzlemden dışarı doğru manyetik alan uygulanmış ve bu alanın etkileri Şekil 4.3.1.2.2c, d, e ve f'de 400-1200 nm çaplı diksler için gösterilmiştir. Öncelikle alttaki domen yapısında koyu bölgelerin arttığını ve beyazımsı renkte bölgelerin azaldığı göze çarpmaktadır. Şekil 14d'de 1200 nm çaplı disklerde at nalı yapıları konumunu korumuştur. Ancak 400, 500 ve 600 nm çaplı disklerde birbirleriyle tutarlı bir şekilde etraflarında açık renkli ve merkezlerinde dairesel koyu renkli bölgeler oluşmuştur. Düzlemiçi alanda konumunu değiştirmeyen bu

yapılar da neel skymiyon yapılanmalarıdır. Bu yapılar ile baloncuk yapıları arasında büyük benzerlik vardır. Bu yapılarda GHz mertebesinde sinyal sağlama özelliğine sahip olup temel manyetik konfigürasyoları bir birlerine yakındır. En belirgin faklılıkları domain wall yapılarından gelen fark ve skirmiyon sayısındaki farklılıktır. Çalışmalarımızda gözlemlenen baloncuk yapılarının skirmiyon sayısı 0 iken Neel skirmiyonların skirmiyon sayısı 1 dir. B3 örneklerinde özellikle Pt katmanların etkisinden oluşan DMI etkisinden dolayı bu örneklerde baloncuk yerine Neel skirmiyon oluşmaktadır. Fakat temel davranışları benzer olduğundan ilerisi için amaçladığınz aygıt tasartımı için herhangi bir sorun teşkil etmemekle beraber bu örneklerde %100 verimlilikte neel skirmiyon oluşumu elde edilmiştir. Bu açıdan iyi bir başarı sağlanmıştır.

Bu örneklerde üst ve alt yüzeylerde 3 nm Pt katmanı vardır. Bu da bu örnekleri iletken AKM deneyleri için uygun kılmaktadır.

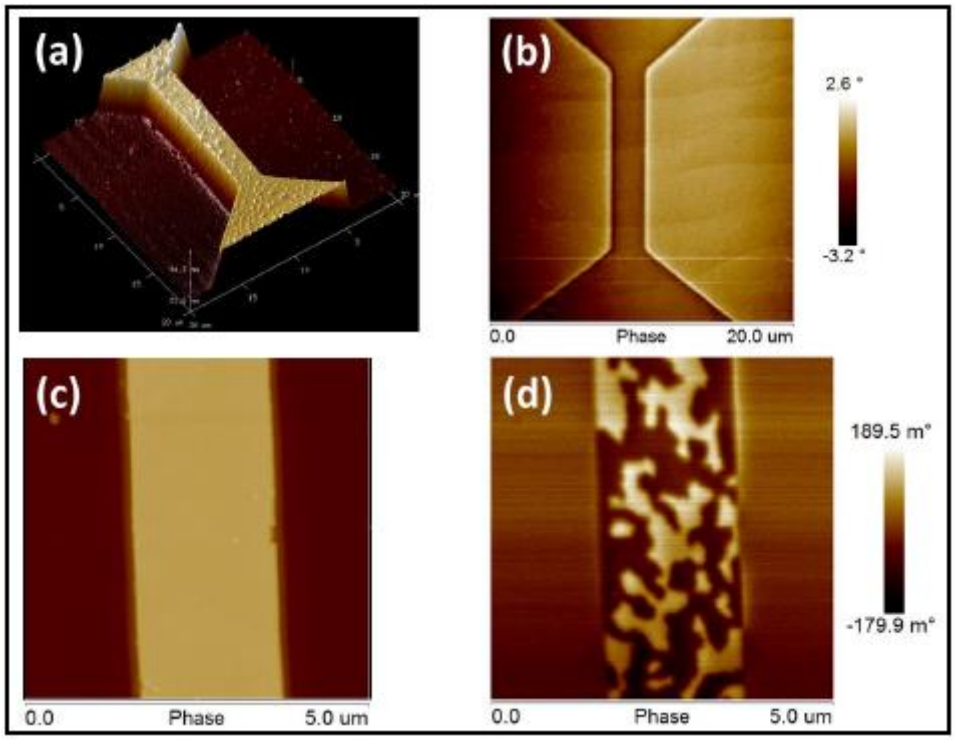


Şekil 4.3.1.2.2: B3 örneklerinin MKM görüntüleri (a)-(b) AC mıknatıslığı giderilmiş örnekler (a) 300 nm ve (b) 1200 nm çaplı diskler. (c)-(f) Düzleme dik uygulanmış 9T manyetik alan sonrası (c) 400 nm, (d) 1200 , (e) 500 nm ve (f) 600 nm çaplı disklerde

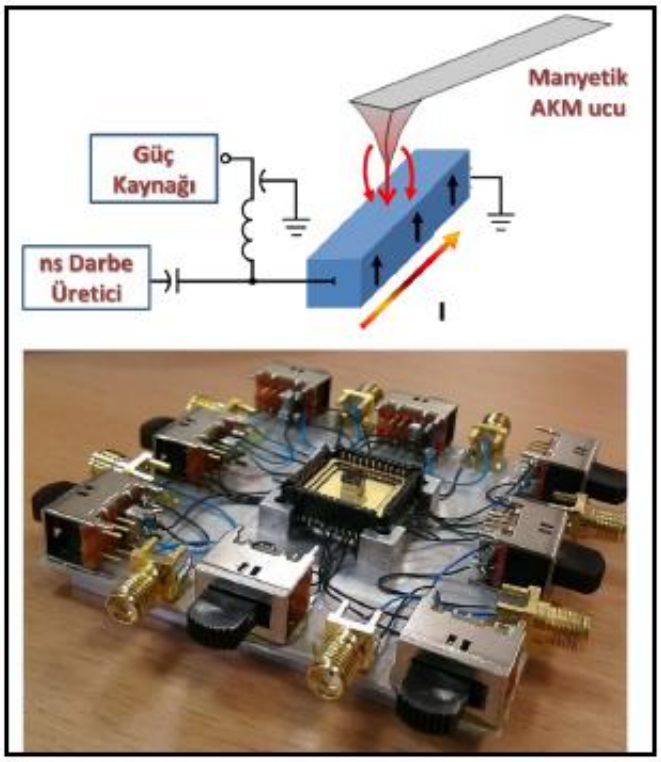
4.3.2. Isı-Destekli Baloncuk Oluşumu

4. iş paketi kapsamında baloncuk oluşumu için elverişli koşulların tespit edilmesi ve AKM ucuyla baloncuk yazma deneyleri yapılmıştır. Bunun için 4.2. kısmında belirtilen CoNi/Pd malzemesinden yapılan mikroteller yani B5 örnekleri kullanılmıştır. Bu mikrotellerde elektrik darbesiyle baloncuk yazımı işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.3.2.1a'da bu tellerden 2μm genişliğinde ve 12μm uzunluğunda olan bir tanesinin 3 boyutlu AKM görüntüsü gösterilmiştir. Başarı ile üretilen bu telde düzleme dik bir manyetik alanda doygunluğa uşlaşmış halde iken alınan MKM taraması Şekil 4.3.2.1b'de sunulmuştur. MKM ucu düzlemden uca gelen bir manyetik alanla mıknatıslanmıştır. Doygunluğu düzlemden içeri doğru manyetik alanda elde edilmiş (800 mT) telin yakın görüntüsü Şekil 4.3.2.1c'de gösterilmektedir. Burada kontrastın (b)'ye göre ters döndüğü görülmektedir. Düzleme dik 800 mT maksimum alanda AC mıknatıslığı giderilmiş MKM görüntüsünün verildiği Şekil 4.3.2.1d'de yine labirent yapılanmasına benzer açık ve koyu bölgeler belirmiştir.



Şekil 4.3.2.1: 2 μm x 12 μm mikrotellerin (a) AKM görüntüsü (b) düzleme dik manyetik alanda doygunlaştırıldığı haliyle MKM görüntüsü (c) düzlemden içeri manyetik alanda doygunlaştırılmış yakın görüntüsü ve (d) düzleme dik AC manyetik alanda mıknatıslığı giderilmiş hali.

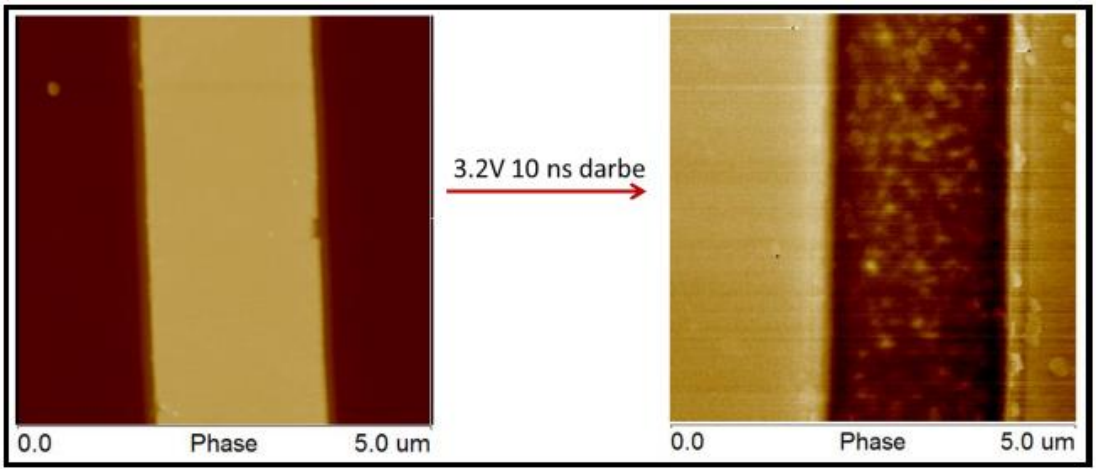


Şekil 4.3.2.2: AKM ile baloncuk yazma deneylerinin şematik çizimi ve buna elverişli örnek yerleştirme platformu

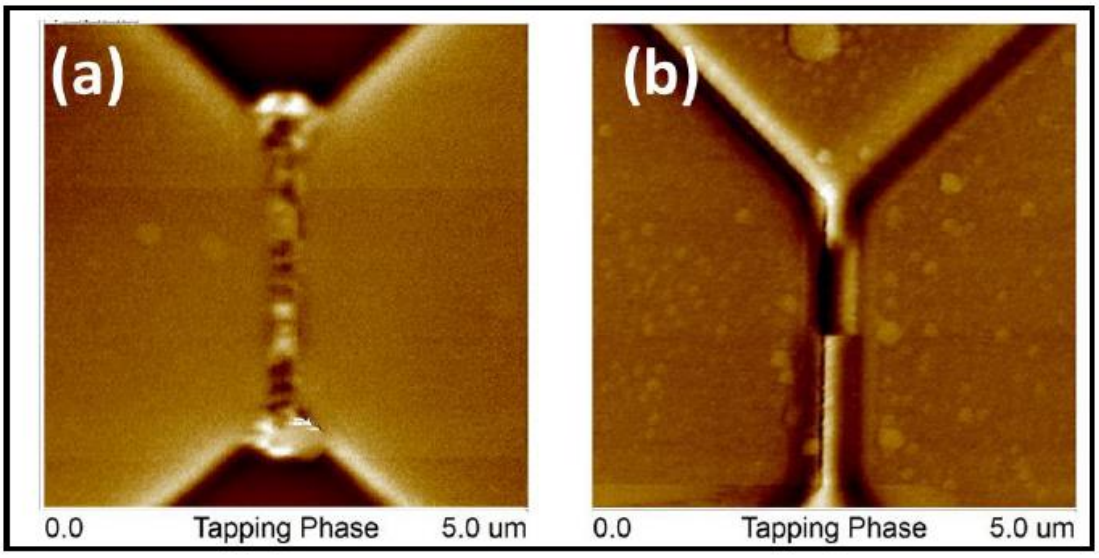
Bir önceki dönemde Fransa tarafında üretilen B4 mikrotellerinde AC manyetik alanda mıknatıslığı giderildikleri halde baloncuk oluşumları gözlenmişti. Bu dönemde B5 örneklerinde alternatif olarak akım darbeleriyle ısı destekli etkilerle baloncuk oluşumu elde edilmeye çalışılmıştır. Bu ve AKM ile terllere baloncuk yazma işlemleri için kurulan düzenek Şekil 4.3.2.2'te gösterilmketedir. Burada AKM cihazının içine yerleştirilen bir örnek platformu görülmektedir. Daha önce üretilen bu örnek platformunda çip tutucular üzerine yapıştırılan mikro-tel içeren Si çiplere wire-bonding ile elektriksel bağlantı yapılmakta ve sokete yerleştirilen çip tutucu lehimli teller ile SMA tipi konektörlere bağlanmaktadır. Tellerin elektriksel bağlantılar esnasında zarar görmemesi için tellere kısa devre yapan anahtarlar da bu platform üzerinde bulunmaktadır. Bu sayede bir darbe üreticisine bağlanan mikrotellerden akım darbeleri geçirilebilmekte ve aynı anda görüntüleme yapılabilmektedir. Burada AKM ucu ile yazma işlemi sırasında ucun yüzeye yaklaşmış hali de gösterilmektedir.

Yapılan ilk deneylerde doygunluk mıknatıslanmasına ulaştırılan tellere akım darbeleri uygulanmıştır. Şekil 4.3.2.3'te gösterilen deneyde 2μm x 12 μm ebatlarındaki mikrotele 3,2 V genliğinde ve 10 ns genişliğinde voltaj darbeleri uygulanmıştır. Mikrotelin önceki ve sonraki görüntüleri gösterilen şekilde akım darbeleri sonucunda açık renkli bölgeler koyu zemin

üzerinde açık renkli dairesel bölgeler oluşmuştur. Görüntü analizi sonucu 100-170 nm çaplarında olduğu anlaşılan bu dairesel bölgeler manyetik baloncuklardır.



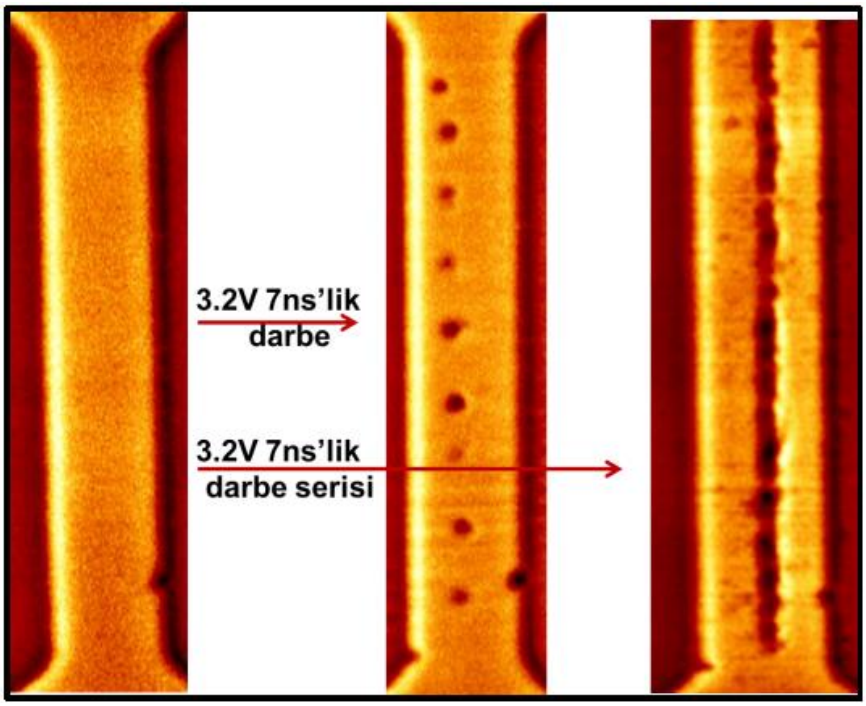
Şekil 4.3.2.3: 2 µm x 12 µm ebatlarında mikrotelin mıknatıslanmış hali ve 3,2V luk 10 ns genişliğindeki akım darbeleri sonrası çekilmiş MKM görüntüsü



Şekil 4.3.2.4: 300 nm genişliğindeki ve 3µm uzunluğundaki mikrotel üzerinde yapılan deneyler (a) Akım darbeleri sonucu oluşan MKM görüntüsü ve (b) AKM ucu ile yazma işlemi sonrası

400 nm ve daha dar olan mikrotellerde yapılan deneylerde aynı etkinin oluşamadığı görülmüştür. Şekil 4.3.2.4a'da 300 nm genişliğinde bir telde tekrar edilen deneyde oluşan konfigürasyon gösterilmektedir. Tel, baloncuk boyutuna kıyaslanır genişlikte olduğu için daha çok çizgisel domenler olmuştur.

Yine bu genişlikteki bir tel üzerinde yapılan AKM ile yazma deneyi Şekil 4.3.2.4b'de verilmiştir. Düzleme doğru mıknatıslanan tele elektriksel bağlantılar yapıldıktan sonra örnek platformuna yerleştirilmiştir. Bir yüksek momentli MKM ucu kullanılarak gerçekleştirilen bu deneyde MKM taraması yapıldıktan sonra tel üzerindeki bir bölgenin konumu tespit edilmiş ve bu odak bu nokta olmak üzere 0,1 Hz hızda 10 nm lik bir tarama başlatılmıştır. Ucun yüksekliği yüzeyden 10 nm yüksekte iken telden 240 mV luk 100 ns lik bir voltaj darbesi geçirilmiştir. Genişliği uzun olan bu darbe sırasında tel ısıtılmış ve sıfırlayıcı alanı azalmıştır. Bu sayede manyetik uçtan gelen manyetik alana hassas hale gelen telin ucun altında kalan bölgesi mıknatıslanmıştır. Şekil 4.3.2.4b'deki işlem sonrası MKM resminde düzlemden içeri mıknatıslanmış telin üzerinde tele düzlemden dışarı doğru mıknatıslanmış bölge görünmektedir. Mıknatıslanan bölge bir mikrona yakın uzunluktadır ve telin genişliğini kaplamaktadır. Bu durumda baloncuk yerine geniş bir domen yazılmıştır.



Şekil 4.3.2.5: 2 µm x 12 µm ebatlarında mikrotelde yapılan baloncuk yazma deneyinde telin ilk hali ve bu duruma uygulanmış iki ayrı voltaj darbesi sonrası MKM görüntüleri

Baloncuk oluşumu için 2 µm genişliğindeki teller çalışılmıştır. 2 µmx 12 µm boyutundaki mikrotel düzlemden içeri mıknatıslanmış ve elektriksel bağlantıları yapıldıktan sonra sisteme yerleştirilmiştir. Şekil 4.3.2.5'deki MKM görüntüleri verilen deneyde ilk olarak başlangıç hali gösterilmiştir. Tel üzerinde konumlandırılan (10 nm yukarıda) MKM ucu tele 3,2 V luk 10 ns lik voltaj darbesi verilerek altındaki bölgeyi mıknatıslamıştır. Daha sonra uç üst bölgelere kaydırılarak işlem birkaç kez tekrarlanmıştır. Oluşan MKM görüntüsünde darbe geçirildiğinde ucun altında olan bölgeler koyu kontrast renkte görünmektedir. Dairesel bölgeler 250-300

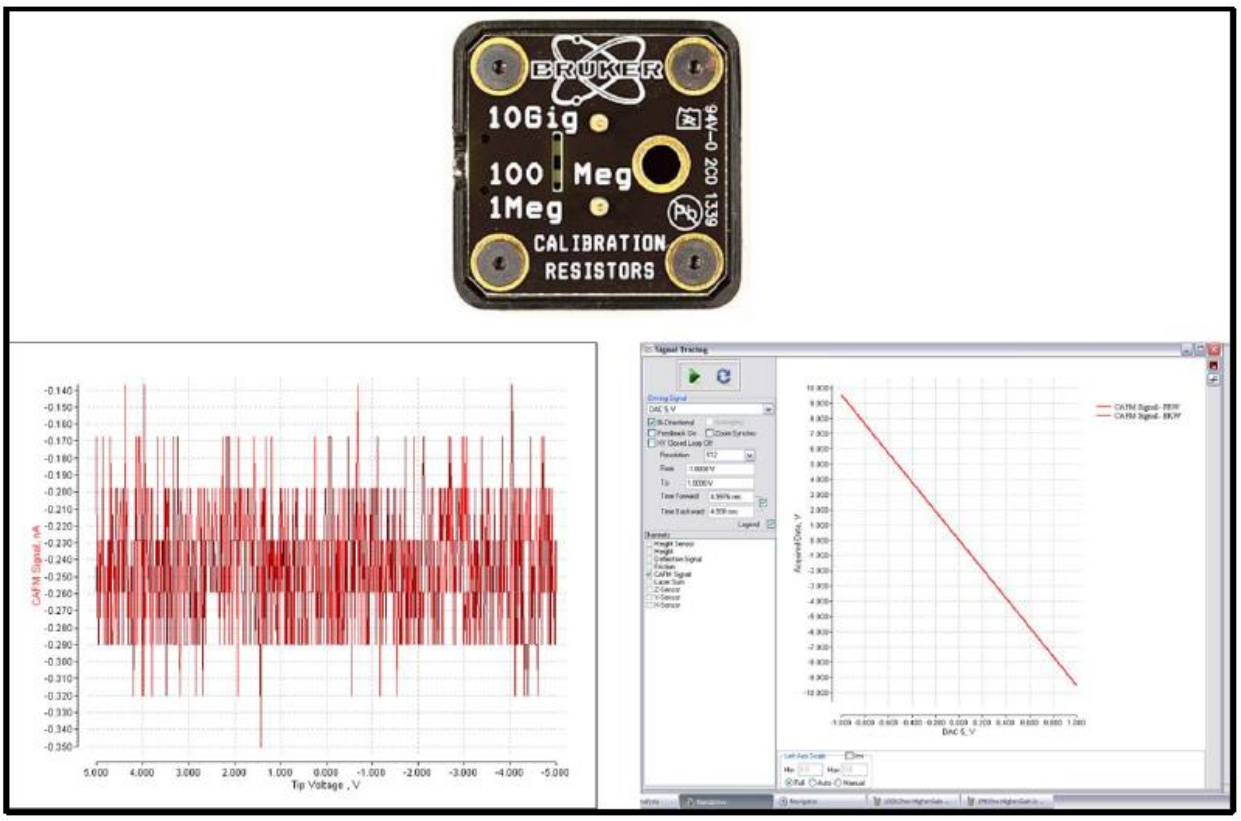
nm çaplarında baloncuk oluşumlarıdır. Yine doygunluk mıknastıslanmasından başlanan durumda bu sefer uç tel üzerinde bir çizgi boyunca hareket ederken bir voltaj darbesi dizini telden geçirilmiştir. Şekil 4.3.2.5'de verilen darbe dizini sonrası görüntüde çizgi şeklinde yazılan bir bölge oluşmuştur.

Bu çalışmalar sonucunda baloncuk oluşumu için iki ayrı durum tespit edilmiştir. Birincisi 1 mikrondan geniş tellerde akım darbeleri uygulanması yoluyla rastgele konumlanmış baloncuklar oluşturulmasıdır. İkinci yöntem ise yine mikron üstü genişlikteki tellerde manyetik bir uç kullanılmak suretiyle ısı destekli baloncuk yazma işlemidir.

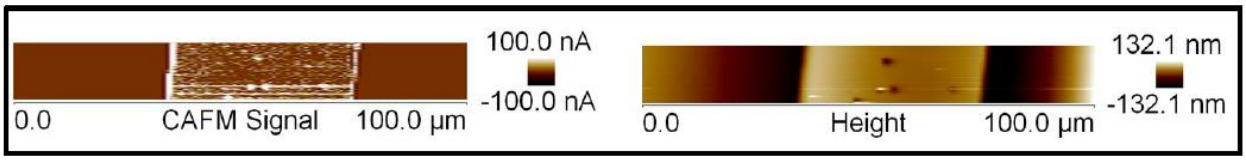
4.3.3. İletken AKM ile Akım Aşılayarak Baloncuk Oluşumu

Yine 4. İş paketi kapsamında iletken AKM ile baloncuk yazma deneyleri için yapılan çalışmalar devam etmiştir. İletken AKM kullanımı oldukça zor bir cihazdır. İlk dönemde kurulumuna başlanan i-AKM ölçüm düzeneğinde ilk yapılan ölçümlerde sonuç almakta zorluklar yaşanmıştır. Problemin örneklerden kaynaklandığı düşünülerek yeni örnekler hazırlansa da anlamlı ölçümler almakta zorluklar yaşanmıştır. Bu sorunlar bazı literatür taramaları ve Bruker firmasının destek hattıyla birlikte bu dönem itibarı ile çözülmüş ve ilk test ölçümler alınmıştır.

Öncelikle i-AKM modülüne 1 MΩ test direnci takılı iken alınan akım-voltaj eğrileri yalnızca gürültü benzeri bir sinyal ortaya koymuştur. Şekil 20'de bu direnç kutusu ve alınan gürültü benzeri ölçüm gösterilmektedir. Firma ile yapılan görüşmelerde bir program güncellemesi yapılmıştır. Aynı zamanda aletin kullanım klavuzunda bağlantı yapılması söylenen pin in doğru gösterilmediği ve yükselteç üzerindeki ikinci pin e bağlantı kurulması gerektiği tespit edilmiştir. Sonuçta test direncinden alınan akım-voltaj eğrisi Şekil 4.3.3.1'de gösterilmiştir. Lineer olan bu görüntü dirence bağlantı sağlandığına işarettir.



Şekil 4.3.3.1: İletken AKM 'de kullanılan test direnç kutusu ve bu kutu takılı iken alınan akım-voltaj Grafikleri



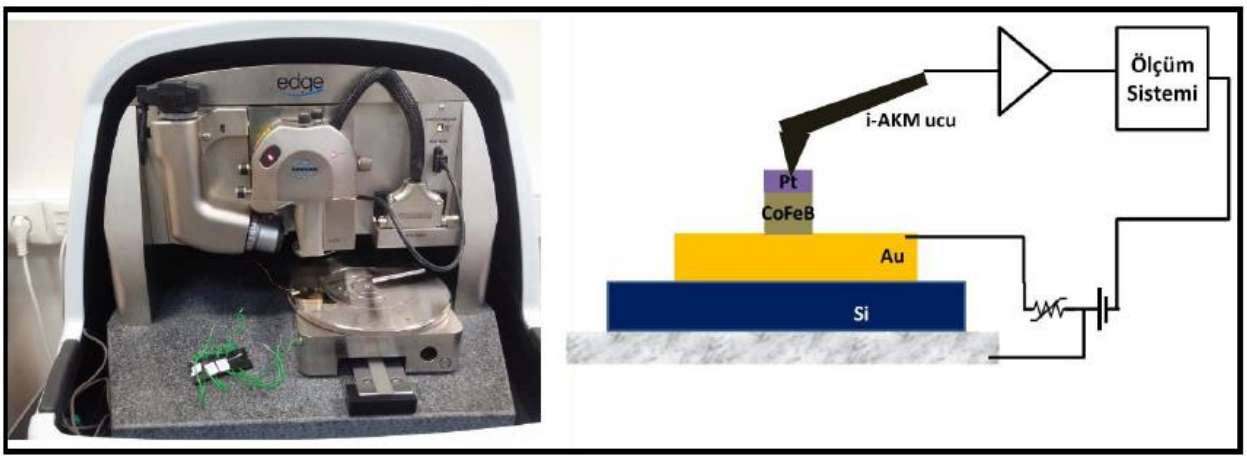
Şekil 4.3.3.2: Au kalınlık kalibrasyonu dörtgenlerinde yapılan i-AKM ölçümleri topografi ve i-AKM görüntüleri verilmiştir.

Altında Au kontaklar olan manyetik filmler geçen proje döneminde gösterilmişti. Bu örneklerde yüzeye bağlantı kurulduğu halde taramalarda sonuç alınamamıştı. Yapılan akım-voltaj ölçümlerinde örnek platformuna 10 V'a kadar sinyal verilmiş ve sadece gürültü görüntüsü elde edilmiştir. Bunun üzerine yüzey oksitlerinin problem olacağı düşünülmüş ve Au malzemesinden örnekler yapılmıştır Şekil 4.3.3.2'de gösterilen Au dikdörtgen tellerde (bunlar kalınlık kalibrasyonu için kullanılan örneklerdir) ölçüm yapabilmek için tellerin ucuna gümüş pasta ile kontak kurulmuştur. Şekil 4.3.3.2'deki taramada topografi görüntüsünde bu telin bir kısmı ve buna denk gelen i-AKM taraması gösterilmektedir. Örnek platformuna 1V sinyal verilirken alınan bu görüntüde alttaş yüzeyine göre daha iletken Au tel görünmektedir. Ancak bu ölçüm taranan bu küçük kısımdan sonra bembeyaz bir görüntü vermiştir ve ölçüm yarıda kalmıştır.

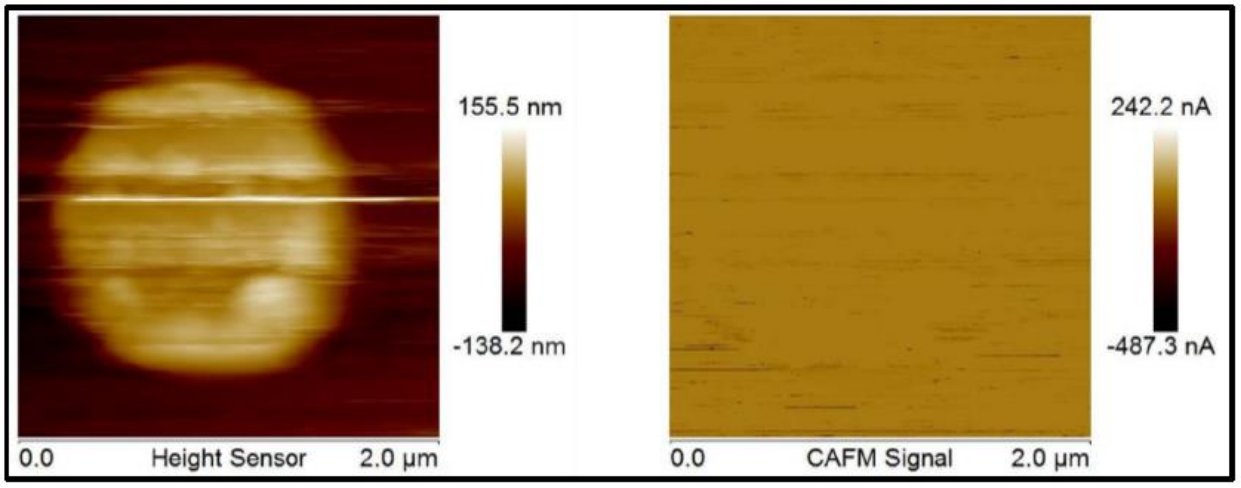
Sonraki denemelerde görüntü alınmakta zorlanılmıştır. Yüzey topografisindeki görüntü de kaybolduğundan ucun örnekle bağlantıyı kaybetmiş olacağı anlaşılmıştır. Yapılan literatür taramalarında yüksek akımların (µA mA seviyeleri) i-AKM içindeki yükselteci doygunluğa ulaştırdığı ve yükseltecin bir süre bu halde kaldığı öğrenilmiştir. Buna çözüm olarak örnek platformu ile örnek arasına bir direnç kutusu yerleştirilmesi düşünülmüştür. Aynı zamanda Au gibi parlak yüzeylerde yüzeyden yansıyan ışınlar cihaza yüzeyle temas ettiğine dair yanlış bilgi verebilmektedir. Ek olarak uçtan geçen mA seviyesindeki akımlar uç üzerindeki malzemeyi eritmekte ve ucun tarama kalitesini bozmaktadır.

Tüm bu bilgiler ışığında i-AKM ölçüm düzeneği optimize edilmiştir. Şekil 43.3.3'te gösterilen düzenekte şematik bir çizimi de verilmiştir. kΩ ve MΩ seviyesinde dirençlerin olduğu mini direnç kutusu örnek platformunun vidasına bağlanmıştır. Örnek üzerine ince bakır telin gümüş pasta ile yapıştırılması da optimize edilmiştir. Buradaki kontağı güçlendirmek adına basamak basamak bir çokkatman pasta sürülmüştür. Basamak aralarında ısı ile kurutulan pasta daha az bir kontak direncine sahiptir ve çıkma ihtimali kalmamıştır. Uçtan yükseltece giden mini kablo da kapton bandı ile yükseltece yapıştırılmış ve yüzeye değmesi engellenmiştir. Gerilimin mutlaka yüzeye verilmesine ve ucun topraklanmasına karar verilmiştir. Yüzeyin oksitlerden arındırılmış olması ve metal bir kontak yüzeyi olması önemlidir. Ucun yüzeye temasını sağlamak için odadaki ışıklar kapatılarak manuel olarak temas sağlanmalıdır. Bu sırada optik masada hava olduğuna emin olunarak hava kompresörü kapatılacaktır. Bu tedbirler ve yöntemler sayesinde başarılı ölçüm yapmak mümkün olmuştur.

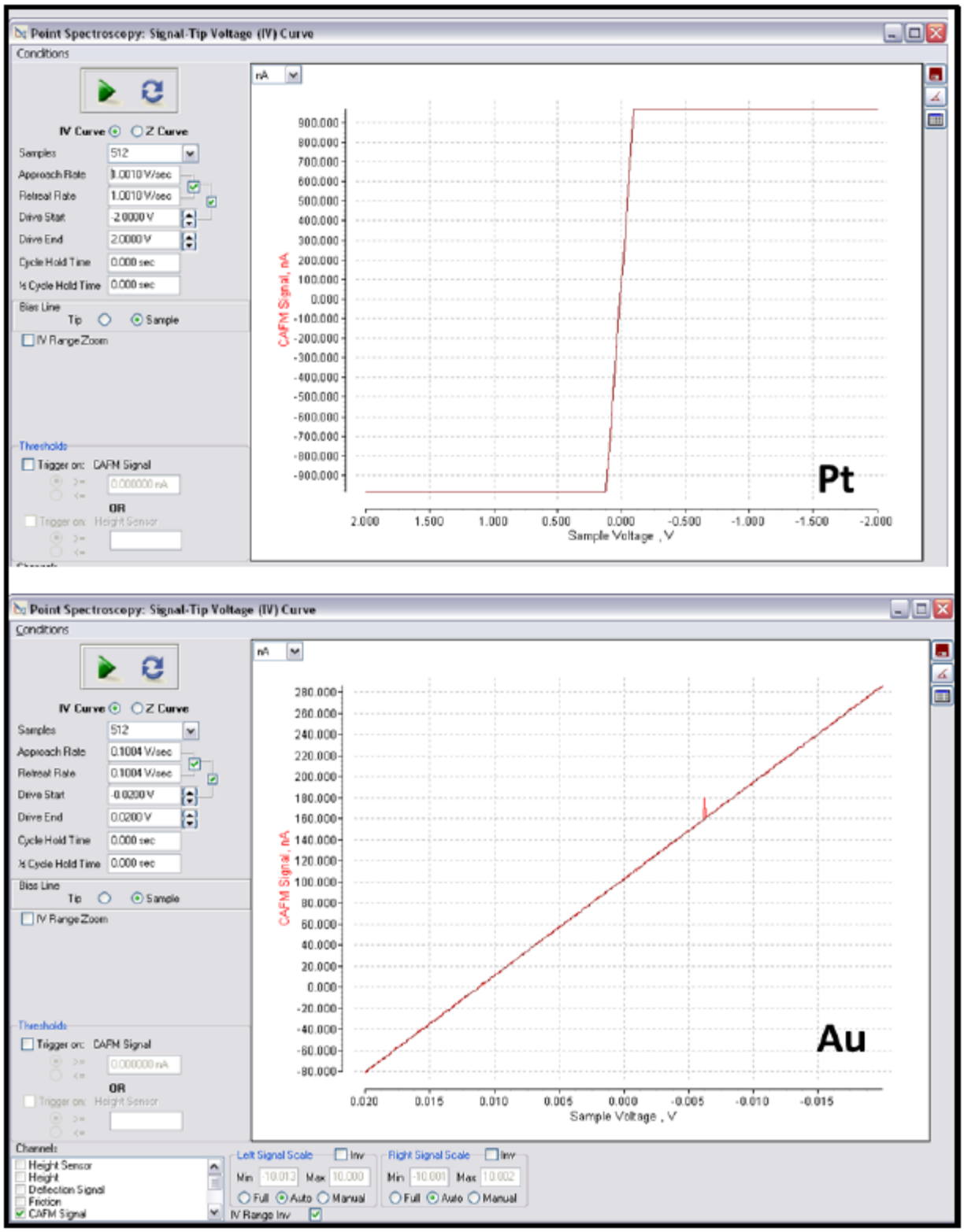
B3 örneklerinde yapılan ölçümlerde başarılı temas sağlanmış, topografi görüntüsü başarılı bir şekilde alınmıştır. Şekil 4.3.3.4'de 1200 nm çaplı disk 8V gerilim altında 100 kΩ paralel direnç takılı iken yapılan tarama görülmektedir. Yükseklik görüntüsünde 100 nm lik nano-sütun görünmektedir. Ancak iletken-AKM deneyinde disk ile yüzey arasında hiçbir iletkenlik farkı görülmemektedir. Ayrıca şekildeki renk kontrastı 0 akım seviyesine denk gelmektedir. Bunun sebebi yüzeylerde olan Pt katmanının yeterli olmadığı olabilir.



Şekil 4.3.3.3: iletken AKM nin devre düzeneğinin şematik çizimi ve kurulu halinin resmi



Şekil 4.3.3.4: B3 örneklerinde yapılan i-AKM taraması

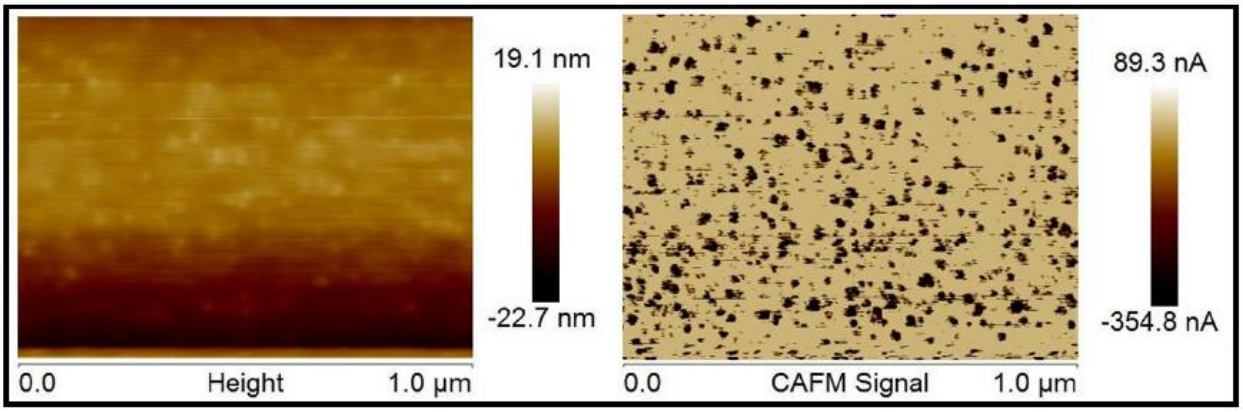


Şekil 4.3.3.5: 100 kΩ seri dirençle bağlı Au alt kontaklı CoFeB/Pt dörtgen sütunlarında alınan ölçümler

Daha kalın üst kontak katmanı ile denemeler yapmak adına bir sonraki bölümde tanıtılacak üst kontak maskesi kullanılarak nano sütunlar üretilmiştir. 150 μmX150 μm olan bu dörtgen

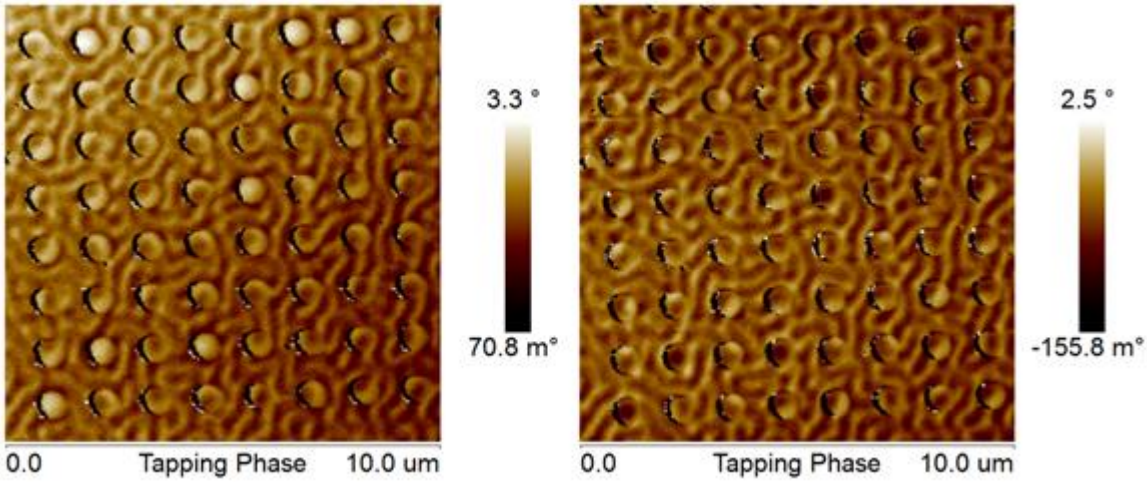
sütunlarda 40 nm kalınlığında CoFeB malzemesi kullanılmış ve 15 nm Pt ile kaplanmıştır. İletken AKM sisteminde 100 kΩ seri dirençle yapılan ölçümler Şekil 4.3.3.5'te gösterilmiştir. Au ve Pt katmanlarına başarı ile temas edildiğini gösteren bu grafiklerde lineer akım-voltaj eğrileri gözlenmiştir. Ancak yüzeyden uca doğru geçen akımlar negatif akım olarak nitelendiğinden pozitif voltaj değerlerinde negatif akımlar kaydedilmiştir. Au katman ve seri dirençten geçen akımla hesaplanan direnç 107 kΩ bulunmuştur. Pt eğrisinden hesaplanan direnç ise 131 kΩ olarak tespit edilmiştir. Pt eğrisinde 125 mV'tan fazla uygulanan gerilimde yükseltecin doygunluğa ulaştığı görülmektedir.

Hazırlanan dörtgen sütunlarda yapılan bir tarama görüntüsü Şekil 4.3.3.6'te sunulmuştur. Bu taramada yüzeye 50 mV uygulanmıştır. Yüzeyin tamamına hakim gelen pembemsi renk 0 civarında bir akım değerine denk gelmektedir. Ancak yer yer görülen siyah bölgeler Skalada -350 nA değerindeki akımları temsil etmektedir. Bu siyah bölgeler topografide beyazlıklarla yer yer örtüşme göstermektedir. Pt yüzeyinde iletken dairesel bölgeler ve akım geçirmeyen bölgeler olduğu ortaya çıkmaktadır. Bunun yüzey temizliği ile alakalı bir etki olabileceği düşünülmektedir.



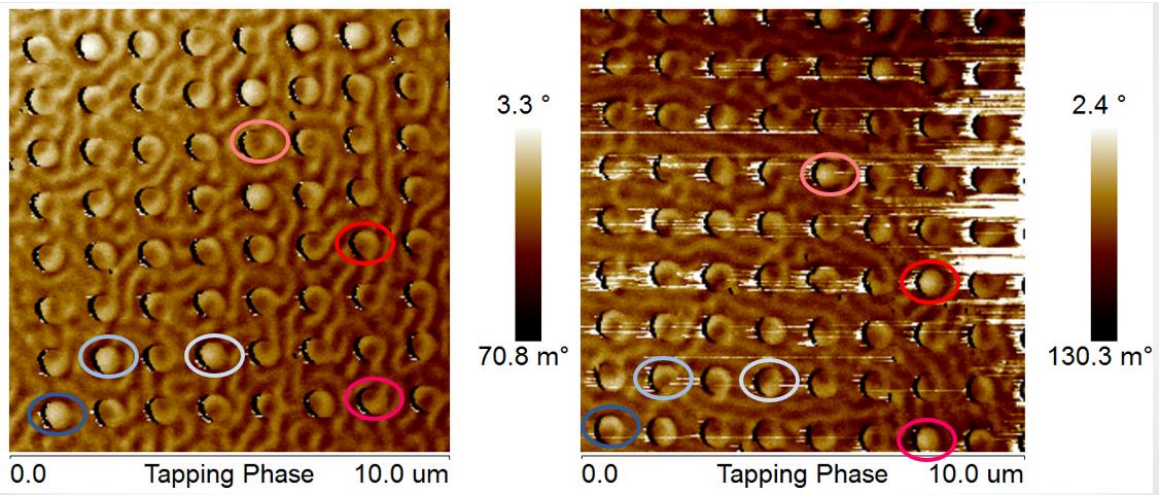
Şekil 4.3.3.6: CoFeB/Pt sütunlarında yapılan bir tarama

İ-AKM deney düzeneyinin tam olarak kurulmasından sonra asıl örnekler üzerinde deny yapılmaya başladı. MKM iğnesinin ucundaki manyetizasyonun yönünü içeri ve ardından dışarı doğru olacak şekilde manyetize ederek (CoFeB) 60 tekrarlı 400 nm nano-sütunun üzerinden 2 MKM görüntüsü alındı ve Şekil 4.3.3.7 de göterilmketedi.



Şekil 4.3.3.7 : (CoFeB) 60 tekrar 400 nm yarıçaplı nano-sütunun MKM görüntüleri, MKM iğnesinin manyetizasyonu iğnenin içine doğru iken (sol tarafta) ve MKM iğnesinin manyetizasyonu iğneden dışarı doğru iken (sağ tarafta)

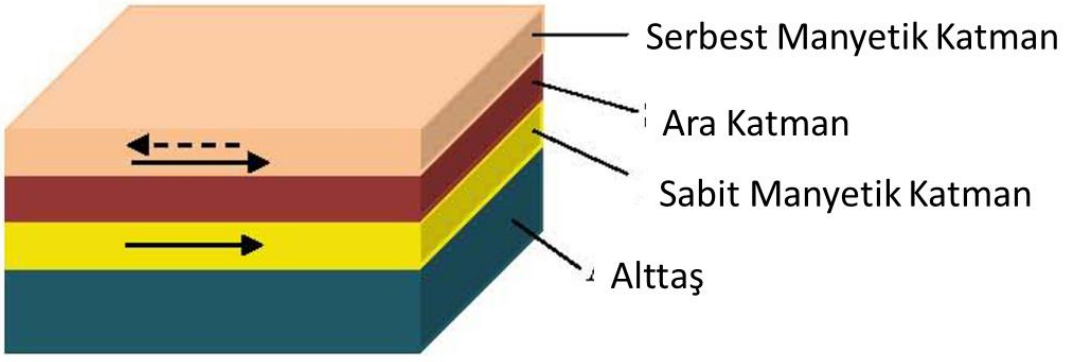
Birçok değişkene sahip olan İ-AKM ile akım darbeleri göndererek 400 nm yarıçaplı nano sütunların üzerinde Neel skyrmion oluşturmak için deneyler yaptık. Deney de ilk olarak Nano sütunların olduğu bölgeyi düşük manyetik momente sahip MESP-LM MKM iğnesi ile tarama yapıldı. Ardından Nano sütunların MKM görüntüsünü veya yüzey topografi görüntüsü kullanılarak elektronik bir koordinat sisteminde yüksek manyetizasyona sahip MESP-HM İ-AKM iğnesini nano sütunların üzerine odaklıyoruz. Kontrollü bir deney yapabilmek için başta aynı voltaj değerini kullanarak bir sıra boyunca görünen tüm nano sütunlara farklı genişliğe sahip (10 ms' den 1 saniye'ye kadar) darbeler gönderildi. Ardından üst satırlara geçerek farklı voltaj miktarlarıyla en alt sıraya yapılan işlemi tekrar edilir. Bu deneyler de iyi bir elektriksel bağlantı kurulup yeterince akım yoğunluğuna ulaşabilmek zor olduğundan, deneylerde elde edilen verileri değerlendirmek zorlaşmaktadır. Ancak yapılan deneylerde gözlemlenen değişiklikler Neel skymion'ları nano-sütunların üzerinde oluşturulduğunu Şekil 4.3.3.8 den de görüleceği gibi elde edilmektedir.



Şekil 4.3.3.8 : (CoFeB)60 400 nm yarıçaplı nano-sütunun İ-AKM ile akım darbeleri gönderilerek deneyler yapılmasından önceki MKM görüntüsü (sol tarafta) ve aynı nano sütunların deneylerden sonraki görüntüsü (sağ tarafta). Mavi ve tonlarında işaretli olan yerlerde deneyden sonra Neel skyrmion'lar görülmeye başlanırken kırmızı ve tonlarındaki yuvarlakların işaret ettiği nano sütünların tek bir manyetizasyona sahip oldukları görülmektedir.

4.4. Spin-Valf Üretimi ve Balolcuk Oluşum Koşulları

Projenin bir diğer adımı olan spin-valf yapısı oluşturmak ve bu yapı içerisinde balouncuk oluşumları ile spin-valfın akım ve manyetik alan altındaki davranışını incelemektir. Bu amaçla başlangıç olarak spin-valf yapısı üzerinde duruldu. Şekil 4.4.1'da genel spin-valf yapısının şeması görülmektedir.



Şekil 4.4.1: Temel Spin-valf Şeması

Spin-valf yapısı için ilk olarak yapı içerisinde bulunacak olan sabit manyetik katmanın hangisi olması gerektiğine karar verilmeye çalışıldı. Bu amaç için, ilk olarak, hangi kalınlıkta Co katmanı kullanılması gerektiğine belirlemek için Pt kalınlığı 0.8 nm sabit tutularak, Co

kalınlığı 0.2 nm, 0.3nm, 0.4nm, 0.5nm ve 0.6 nm olarak değiştirilirek ince filmler üretildi. Ardından, aynı işlem hangi Pt kalınlığınını uygun olacağına karar vermek için, Co kalınlığı sabit tutularak, 0.4nm, 0.6nm, 0.8nm ve 1nm olacak şekilde değiştirilerek VSM ölçümleri alınarak uygun Pt kalınlığı için 0.6 nm ve Co için ise 0.3 nm en uygun olarak seçildir. Co kalınlığı için 0.2 nm, 0.3 nm ve 0.6 nm denemeleri aşağıda listelenmiş olup ayrıca iki farklı yapı birleştirilerek nasıl bir manyetik özellik göstereceği araştırrıldı.

A5 Ta(5)/Pt(20)/$[Co(0,3)/Pt(0,6)]_{x5}$/Pt(5nm)

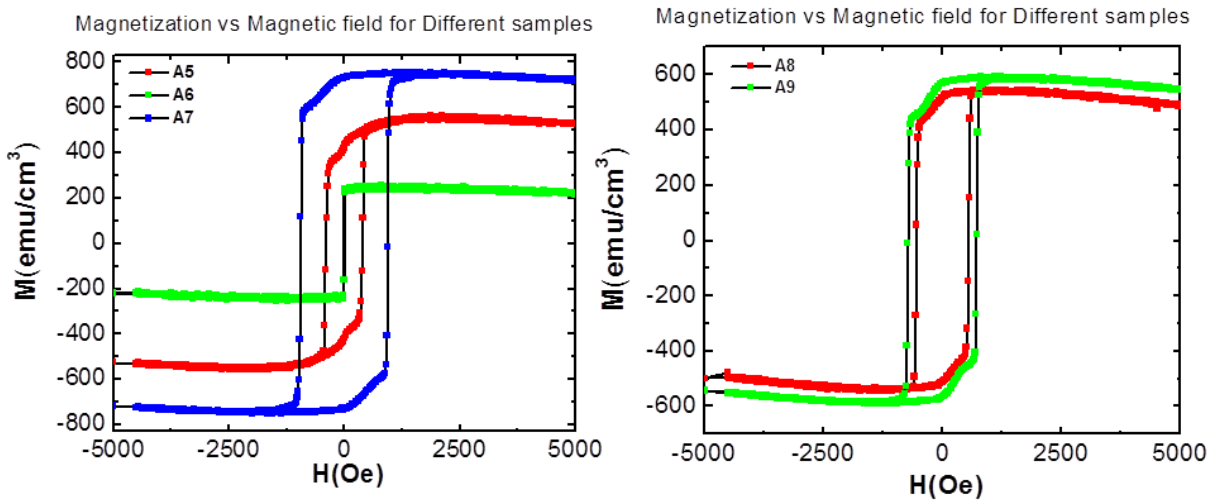
A6 Ta(5)/Pt(20)/$[Co(0,2)/Pt(0,6)]_{x5}$/Pt(5nm)

A7 Ta(5)/Pt(20)/$[Co(0,6)/Pt(0,6)]_{x5}$/Pt(5nm)

A8 Ta(5)/Pt(20) /[Co(0,6)/Pt(0,6)]/$[Co(0,3)/Pt(0,6)]_{x5}$/Pt(5nm)

A9 Ta(5)/Pt(20) /$[Co(0,6)/Pt(0,6)]_{x2}$/$[Co(0,3)/Pt(0,6)]_{x5}$/Pt(5nm)

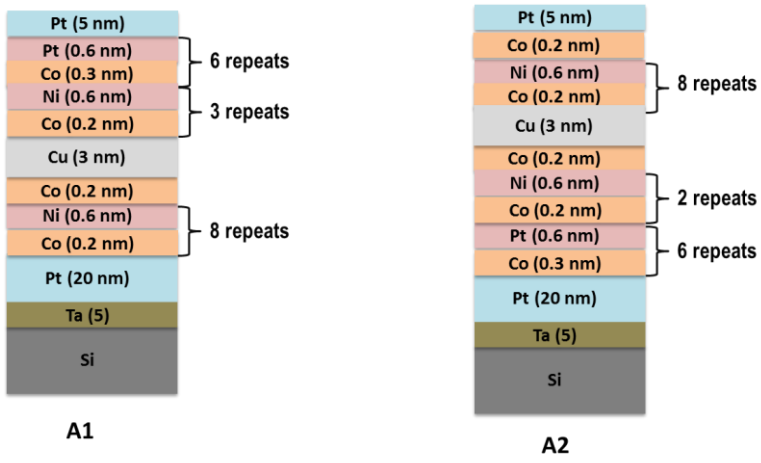
Bununla birlikte farklı spin-valf yapıları oluşturularak bunlar için VSM ölçümleri yapıldı ve yapının manyetik özelliklerinin istenen özellikte olup olmadığı araştırıldı. Şekil 4.4.2'de yukarıda listelenen malzemeler için VSM sonuçları gösterilmektedir. Bu malzemelerin DMMA özelliği gösterdiği açık bir şekilde görülmketedir.



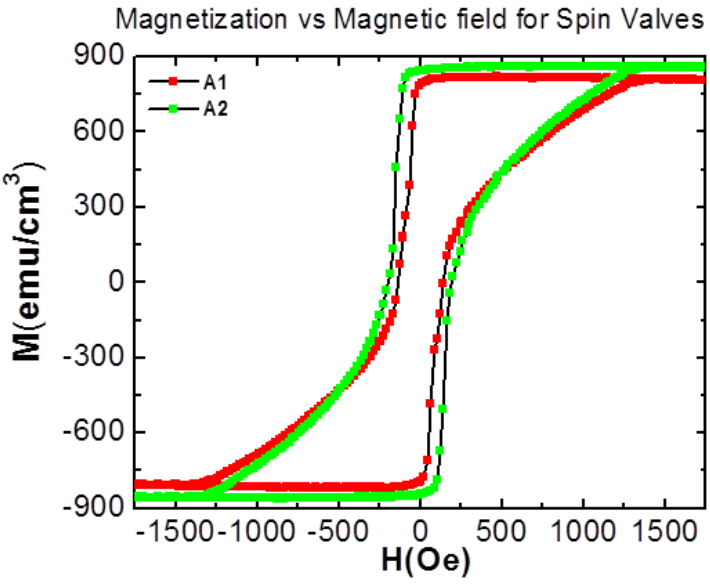
Şekil 4.4.2: Büyütülen Co/Pt malzemesinin DDMA özellik gösterdği VSM sonucu görülmektedir.

Şuan itibariyle uygun kombinasyonlar denenmektedir. Şekil 4.4.3'da uygulanan iki farklı spin-valf yapısı ve bunlar için olan VSM ölçümleri ise Şekil 4.4.4'de verilmektedir. Fakat VSM ölçümlerinden de anlaşılacağı gibi uygun bir spin-valf VSM ölçümü değildir. Çünkü

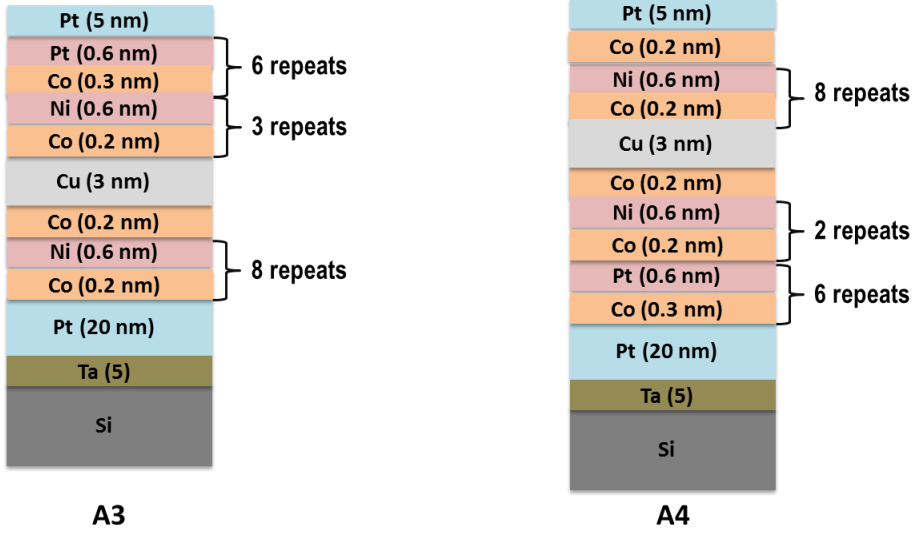
yapısındaki farklı tekrarlı manyetik katmanların farklı özelliklerinden dolayı basamaklı bir yapı göstermesi beklenmektedir. Bu nedenle farklı kombinasyonlar ve uygun basınç ortamı incelenmektedir. Bu amaçla magnetron saçtırma yönteminde uygulanan ortam basıncını değiştirerekte spin-valf yapısının manyetik özellikleri incelenmektedir. Ortam basınçı 3 mTorr, 4 mTorr, ve 5 mTorr olarak belirlenmiştir. Bu farklı basınçlar sadece manyetik katmanlar ve tekrarlı katmanlar için uygulanmaktadır. Şekil 4.4.5 bu amaçla büyütülen spin-valf yapılarını ve Şekild 4.4.6 ise bu spin-valf yapısı için alınan VSM ölçümlerini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında uygun bir spin-valf yapısı elde etmeye yakınız ve çalışmalara devam etmekteyiz.



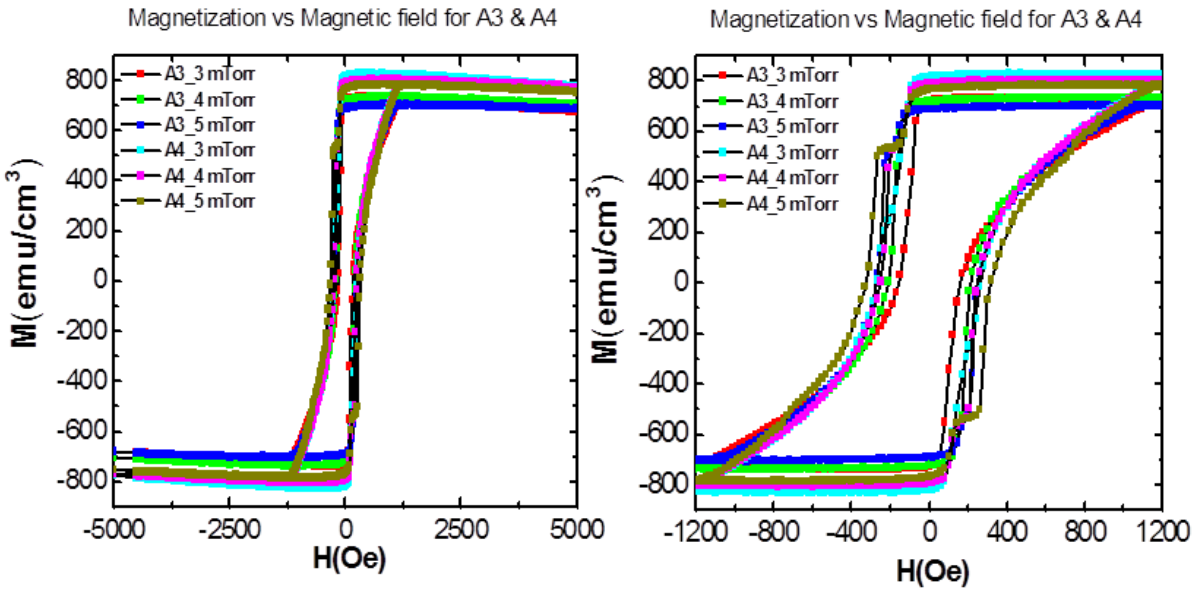
Şekil 4.4.3: Büyütülen düzleme dik anizotropili manyetik malzemenin katmanlar halinde yapısı gösterilmektedir. Malzemeler ve parantez içinde film kalınlıkları belirtilmiştir.



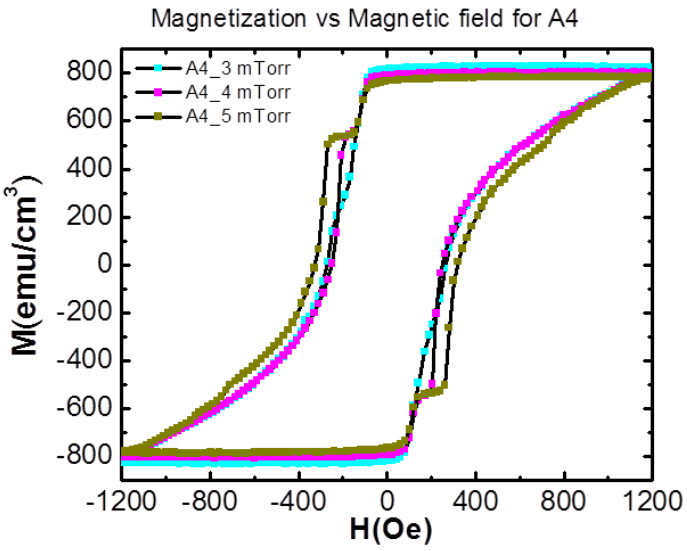
Şekil 4.4.4: Büyütülen Spin-valf malzemesinin VSM ölçümü görülmektedir.



Şekil 4.4.5: Büyütülen düzleme dik anizotropili manyetik malzemenin katmanlar halinde yapısı gösterilmektedir. Malzemeler ve parantez içinde film kalınlıkları belirtilmiştir.

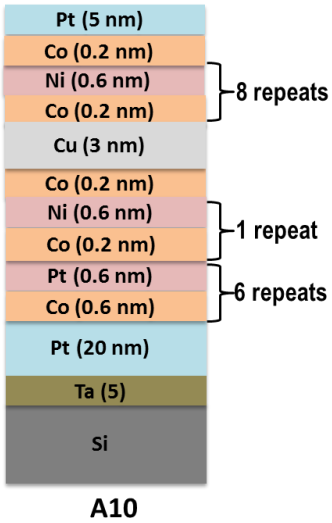


Şekil 4.4.6: Büyütülen Spin-valf malzemesinin VSM ölçümü görülmektedir.



Şekil 4.4.7: Büyütülen Spin-valf malzemesinin VSM ölçümü görülmektedir.

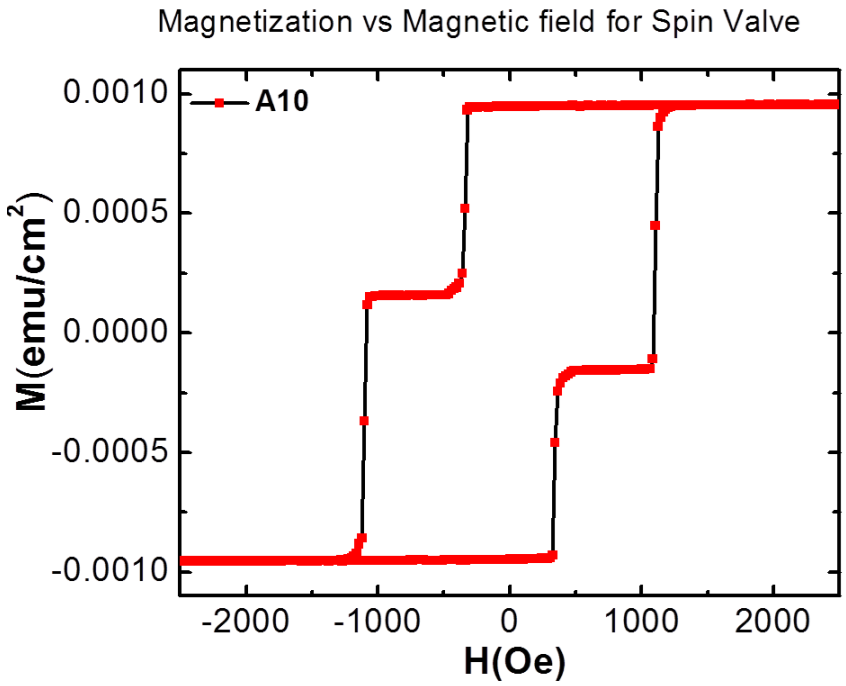
Yukarıdaki Şekil 4.4.7 de VSM sonucundan da görüleceği gibi A4_4mTorr ve A4_5mTorr malzemelerinin histerizis grafiklerinde basamak elde edilmiştir. Özellikle A4_5mTorr malzemesi için basamak açık bir şekilde belirgindir. Bir spin-valf grafiğinde olması beklenen basamak yapısına benzemekle beraber yeri olarak beklenen yerden farklı yerde olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.4.8: Büyütülen düzleme dik anizotropili manyetik malzemenin katmanlar halinde yapısı gösterilmektedir. Malzemeler ve parantez içinde film kalınlıkları belirtilmiştir.

Bu deneyler ışığında yukarıda verilen ince film kombinasyonu denendi ve yapılan VSM ölçümlerinde istenen basamak histeresis şekli elde edildi. Aşağıdaki şekilde açıkca basamak şekli görülmekle beraber serbest ve sabit katmanların manyetizasyon değerleri göz önünde

alındığında basamak şeklinin grafiğin ortasına yakın olması öngörülmüştü ve hysterisis sonucu bunu desteklemektedir.



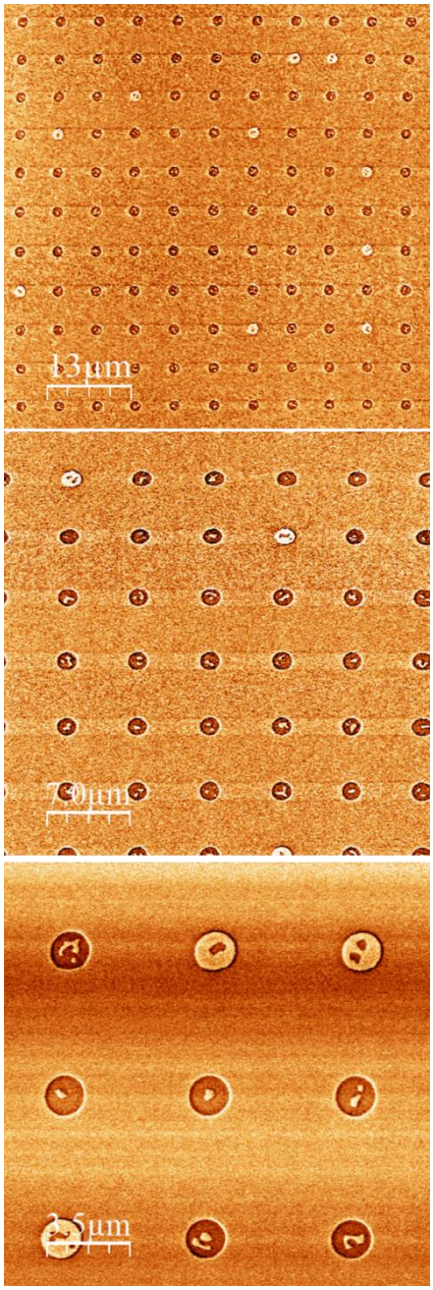
Şekil 4.4.9: Büyütülen Spin-valf malzemesinin VSM ölçümü görülmektedir.

Spin valf için üretilen ince filmin istenen özelliği göstermesinden sonra yapılaması gereken bir sonraki adım bu ince film kullanılarak tekrardan nano- mikro disk ve mikro tel üretilmesi aşamasıdır. Daha önce göstrilen iyon aşındırma yöntemi kullanılarak örnekler hazırlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken ince film yapısının çok katmanlı oluşundan dolayı aşındırma adımı ve gerekli süreler katman sayısı ve kalınlıkları göz önüne alınarak tekrarda ayarlanması gerekmektedir.

4.4.1. Spin-valf Aygıtlarında Baloncuk Oluşum Koşullarının Tespit Edilmesi

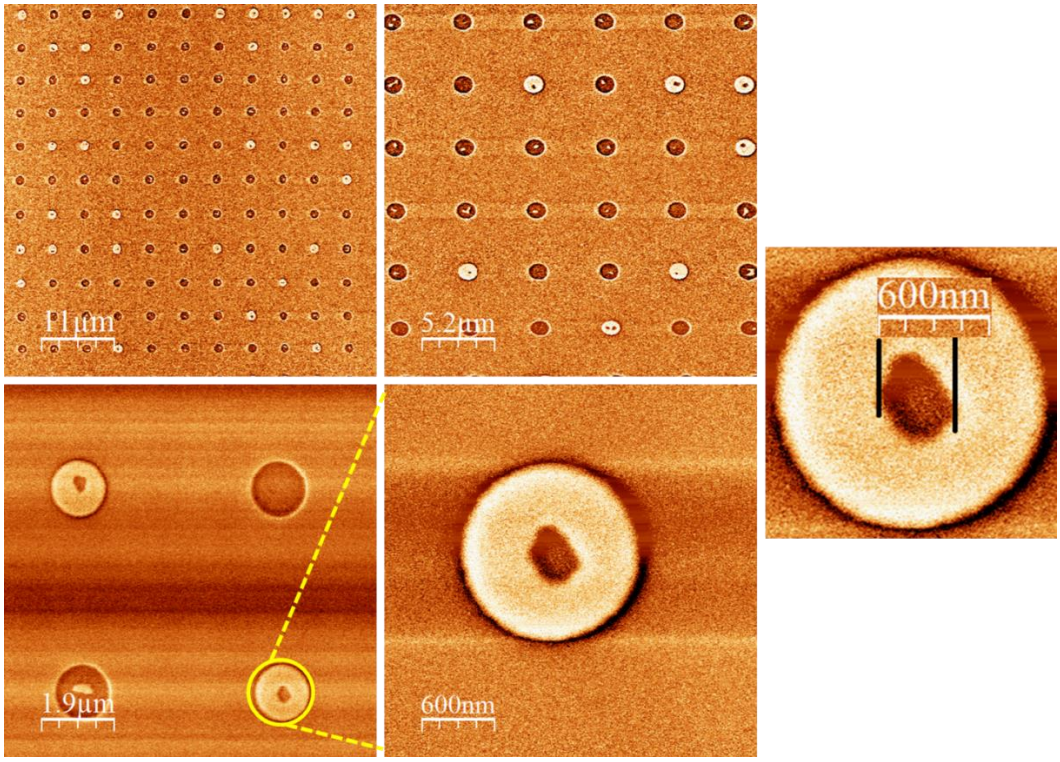
Nano-mikro spin-valf disklerde baloncuk oluşum koşulları öncelikle manyetik alan uygulamaları ile test edilmiştir. Farklı manyetik alan koşullandırmaları sonrası MKM görüntülemeleri yapılmış ve farklı boy disklerde baloncuk oluşumu araştırılmıştır. İlk olarak örnekler manyetik alan altında 7600 Oe ile doygunluğa ulaşmış olan diskler, AC manyetik alan altında koşullandırılmış olup farklı farklı yarıçapa sahip diskler için MKM ölçümleri sonucunda baloncuk oluşumunun en fazla olduğu manyetik alan koşullandırma değeri elde edilmeye çalışılmıştır. AC manyetik alan koşullandırma işleminin açık tarifi Şekil 4.3.1.1.6'da gösterilmektedir.

İlk olarak nano-mikro disklerde baloncuk oluşumları incelendiğinden spin-valf yapıları için AC manyetik alan koşullaması için farklı değerler denemek gereklememktedir. İlk olarak bize iyi sonuç veren 7700 Oe ile doygunluğa ulaşan örneklere 6450 Oe AC maneytik alan koşullandırması yapılmıştır. Bunu takiben alınan MKM ölçümlerinde ilk olarak 1.5 μm disklere bakıldı. Şekil 4.4.1.1'ten de görüldüğü gibi farklı tarama alanları için MKM görüntüleri verilmiştir. Burada açık bir şekilde balonvuk yapıları belirgin olup ayrıca ikili baloncuk be çoklu ve labirent domenlerine de raslamaktayız. Bu sonuçlardan, spin–valf aygıtı için bu AC manyetik alan koşullaması 1.5 μm diskleri için iyi görönmemektedir. Bu yüzden faklı çapa sahip disk örneklerine bakıldı.



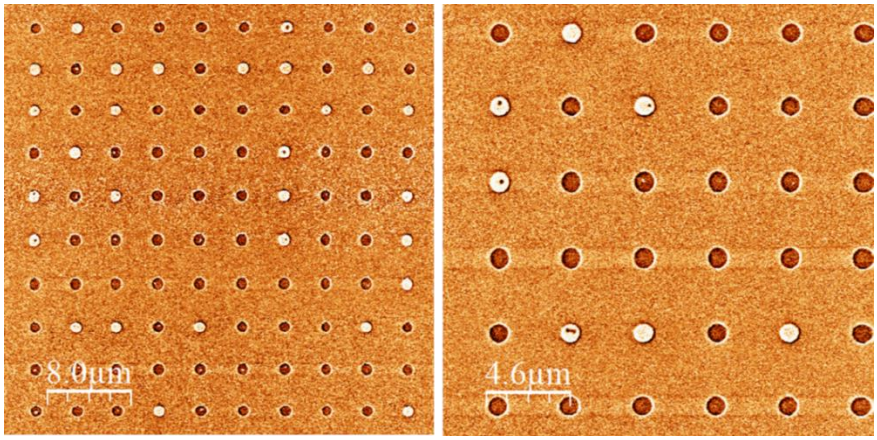
Şekil 4.4.1.1: 6450 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.5 μm diskler için gösterilmiştir.

1.25 μm disk örnekleri için yapılan farklı tarama alanları için MKM görüntülemeleri Şekil 4.4.1.2 verilmiş olup, şekilden de anlaşılacağı gibi başarılı bir şekilde baloncuk oluşumunu sağlamış bulunmaktayız. Elde edilen baloncuk büyüklüğü Şekil 4.4.1.2 de gösterildiği gibi yaklaşık olarak 400 – 450 nm civarındadır. Bu baloncuk büyüklüğü bizim öngörülerimiz doğrultusunda gözlemlenmektedir. Fakat yine de bir kaç çoklu, ikili ve labirent domen yapılarına rastlamaktayız.



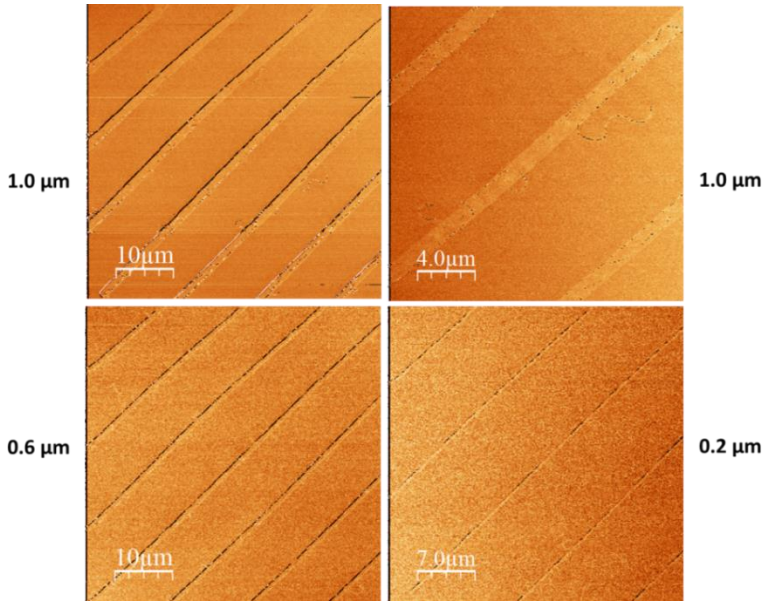
Şekil 4.4.1.2: 6450 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.25 µm diskler için gösterilmiştir.

1.0 µm disk örnekleri için yapılan farklı tarama alanları için MKM görüntülemeleri Şekil 4.4.1.3 verilmiş olup, şekilden de görüldüğü gibi tek domen yada baloncuk yapılı diskler gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan, 1.0 µm disk örnekleri için AC manyetik alan koşullanması değerinin arttırılması durumunda sadece baloncuk yapısı oluşacağını göstermektedir.



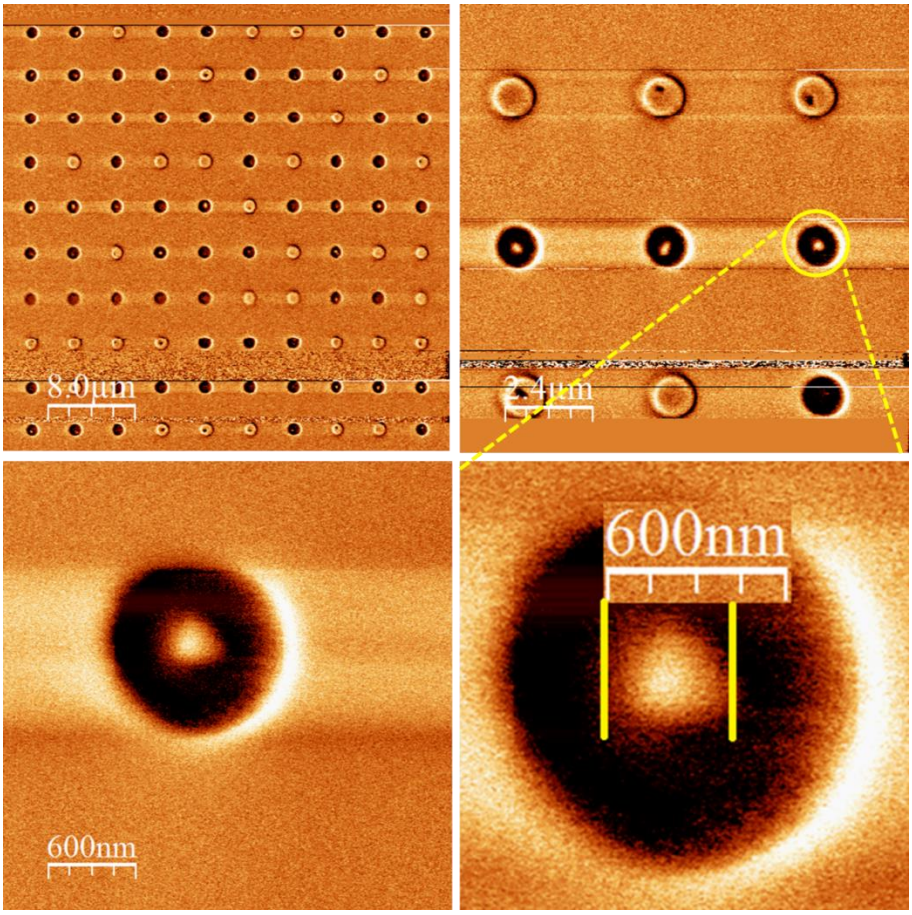
Şekil 4.4.1.3: 6450 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.0 µm diskler için gösterilmiştir.

Bununla birlikte mikro teller üzerinde baloncuk oluşumunun olup olmadığını gözlemlemek amacıyla yapılan MKM görüntülemesinde teller üzerinde herhangi bir manyetik yapı gözlenmemektedir. Şekil 4.4.1.4'te 0.2, 0.6 ve 1.0 μm telleri için MKM görüntüleri verilmiştir. Yapılar üzerinde herhangi bir manyetik yapı görülmemektedir.



Şekil 4.4.1.4: 6450 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.0 μm, 0.6 ve 0.2 teller için gösterilmiştir.

Bir sonraki AC manyetik alan koşullaması için 7600 Oe doygunluk sonrası 6950 Oe AC manyetik alan koşullası yapılmıştır. Bu işlemden sonra yapılan MKM görüntülemsinde 1.0 μm disk örnekleri için belirgin bir şekilde baloncuk yapıları gözlemlenmiş ve Şekil 4.4.1.5 den de anlaşılacağı gibi sadece baloncuk manyetik yapılanmasının bulunduğu görülmektedir. Bu örnek için de gözlemlenen balonvuk büyüklüğü 400 - 450 nm civarında olduğu Şekil 4.4.1.5 den de görülmektedir.



Şekil 4.4.1.5 6950 Oe AC manyetik alan koşullandırması sonrası yapılan MKM görüntüleri 1.0 μm, diskler için gösterilmiştir.

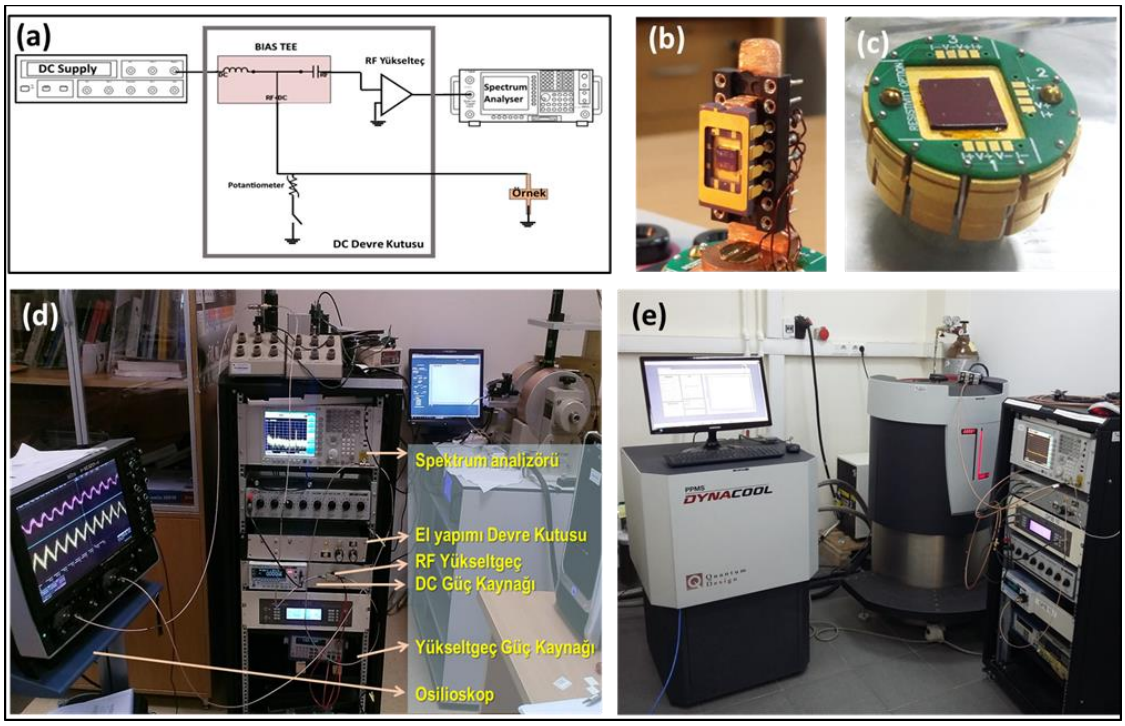
4.5. Yüksek Frekans Dinamiklerinin Elektriksel Tespiti

B4 örnekleri %100 verimlilikte baloncuk görülen B2 disklerinden yapılmıştır. Bu yapıların spin valf aygıtlarında algıç katman olarak kullanıldığı örneklerde spin polarize akımı sağlayacak Py malzemesi vardır. Baloncuk oluşumuna elverişli manyetik alan koşullandırması ile hazırlanan örnekler üzerinde elektriksel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Üst ve alt kontaklara elektriksel bağlantı yapılmak suretiyle spin valf aygıtından düzleme dik akım geçirilerek yüksek frekans dinamiklerinin tetiklenmesi ve bir spektrum analizörü ile algılanması mümkün olmuştur.

Ölçümler için kurulan düzeneğin şematik çizimi Şekil 4.5.1a'da verilmiştir. Bir DC güç kaynağı "Bias Tee" aracılığıyla örneğe bağlanmıştır. Bias Tee'nin RF ucu bir spektrum analizörüne bağlanmıştır. Aygıttan gelen sinyali yükseltmek adına bir yükseltgeç de kullanılmıştır. Bias Tee sayesinde DC akım sadece örneğe gidebilmektedir ve yükseltgeç ve spektrum analizörü yüksek DC güçten güvende tutulacak ve kaynaktan gelecek RF

salınımlar burada filtrelenecektir. Örneği de güvende tutmak adına bir potansiyometre ile örnek korunmaktadır. Bağlantılar yapılırken ve cihazlar ayarlanırken örnek kısa devre yapıtırılarak korunabilmektedir.

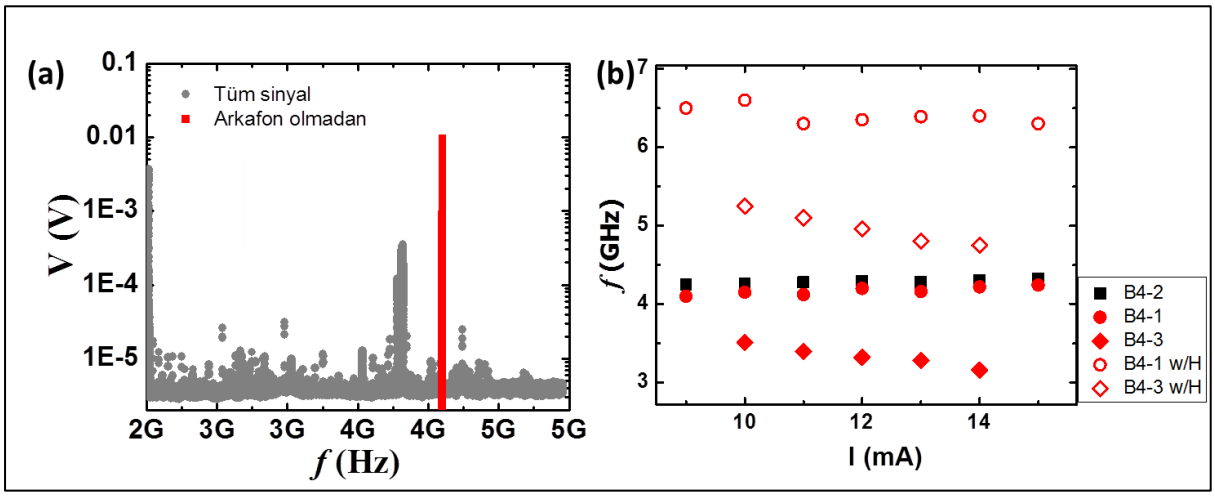
Örneklere elektriksel bağlantılar wire-bonding tekniği ile laboratuvarımızda yapılmıştır. Bu cihaz "wedge" adı verilen çelik bir iğne yardımıyla ince Al teli yüzeye bağlar. Wedge yüzeye belirlenen parametrede bir kuvvet uygulayarak Al teli yüzeye bastırır. Aynı anda ultrasonik bir güçle ve belirli bir süre (yine belirlenen parametreler) wedge titreştirilir ve telin yüzeye yapışması sağlanır. PPMS sisteminin örnek tutucularına yapıştırılan örnekler Şekil 4.5.1 b ve c'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5.1: (a) Elektriksel ölçümler için devre şeması; PPMS örnek platformları (b) düzlem içi ve (c) düzleme dik manyetik alan uygulaması için; (d) Ölçüm düzeneği ve (e) PPMS'e bağlı hali.

Bunlar sırasıyla düzleme paralel ve dik manyetik alan uygulamaları içindir. Wire-bonding ile bağlantıları yapılan örnekler PPMS sistemine bir çubuk yardımıyla indirilir. Vakum ortamında yapılan ölçümler oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda aynı zamanda manyetik alan altında alınabilir. Sisteme konulan örneklerin direnç aralıkları 17-30 Ohm arasındadır. Düzleme dik uygulanan manyetik alanla sıfır manyetik alan arasında %10'luk bir direnç farkı kaydedilmiştir. Bu GMR etkisi ile mıknatıslanmadaki salınımlar direnç ölümlerinde salınımlara yol açar ve spektrum analizörü ile tespit edilebilir.

Ölçümlerin takibi için manyetik alan ve sıcaklığı kontrol ederek akıma bağlı sinyal ölçümünü kontrol eden bir program Labview uygulamasıyla yazılmıştır. PPMS ve tüm aygıtları kontrol eden bu program frekans uzayını 1-10 GHz aralığında tarayarak verileri kaydeder. Her ölçümde sıfır akımda kaydedilen veriler arkafon gürültüsü olarak kabul edilir. Bunun bir örneği Şekil15a'da gri renkle gösterilmiştir. Arkafonun kaynağı cihazlardan gelen gürültüler, bağlantı noktalarında algılanan radyo frekansları, kablosuz ağ ve cep telefonu sinyalleridir. Her ne kadar örnek bir faraday kafesinde yer alsa da devre kutuları ve bağlantı noktaları bu sinyalleri kapabilmektedir. Labview programı ile akım değeri arttırılarak frekans uzayı taranmış, arkafon çıkartılarak kalan sinyal incelenmiştir.



Şekil 4.5.2: (a) Frekans uzayı taraması sonucu örnek bir sinyal (b) B4 örneklerinde frekansın akıma bağlı değişimi (oda sıcaklığında) açık semboller 15 mT manyetik alan altında alınan verileri göstermektedir (w/H)

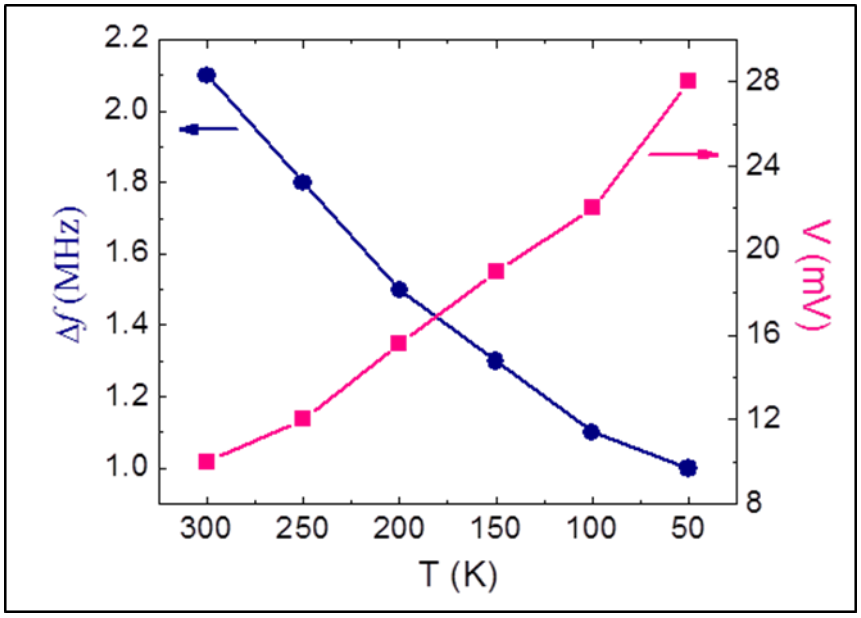
Şekil 4.5.2 B4 örneklerinden 500 nm çapta nano-sütunlar üzerinde alınmıştır. Bu ölçümde B3-1 örneğinin akımla dinamikleri incelenmiştir ve örnek bir sinyal olarak 9 mA akımda oluşan sinyal Şekil 15a'da gösterilmiştir. 9 mA akım değerine kadar sinyal gürültü seviyesi ile aynı kalmışken bu akım değerinde 4,1 GHz frekansında bir sinyal belirmiştir. Arkafon çıkarıldığında bu sinyal Şekil 4.5.2a'daki kırmızı ile gösterilen bu sinyalin büyüklüğü 10 mV'a kadar ulaşmaktadır ve sinyal 2 MHz bant genişliğine sahiptir. Her bir ölçümde sinyalin frekansı ve bant genişliği kaydedilerek Şekil 4.5.2b'deki grafik elde edilmiştir.

Şekil 4.5.2b çeşitli örneklerin oda sıcaklığında yüksek frekans dinamiklerinin akımla değişimini göstermektedir. Öncelikle içi dolgulu semboller manyetik alan kapalı iken alınmış verileri, açık semboller ise düzleme paralel uygulanan 15 mT manyetik alan altında alınan verileri temsil etmektedir. Manyetik alan kapalı olduğunda örneklerin 3-4,5 GHz frekans

aralığında bir salınım yaptıkları görülmektedir. 2-3 MHz arasında değişen bant genişlikleri akımla değişmemektedir. Şekil 4.5.2b'de çizilen B4-1 ve B4-2 örneklerinin frekansı 4,1-4,2 GHz olarak kaydedilmiştir. Akım arttırıldığında bu değer pek değişmemiştir yani frekans sabit kalmıştır. B4-3 örneği ise 3,51 ile 3,16 GHz aralığında artan akımla azalan bir dinamik frekansı sergilemiştir. Manyetik alanın açılması ile bu örneğin salınım frekansı 1,5 katı kadar artmış ve düşük akımda 5,25 GHz'e ulaşmıştır. Manyetik alan altında da yine azalan bir davranış sergilemektedir. Aynı şekilde B4-1 örneği de 15 mT düzleme paralel alan altında hemen hemen 1,5 kat artmış ve 6,5 GHz seviyesine çıkmıştır. Yine akım arttıkça ufak varyasyonlar gösteren salınım frekansının neredeyse akımla değişmediğini söyleyebiliriz.

Düzleme paralel uygulanan manyetik alanın şiddeti arttıkça sinyal kuvveti azalmış ve yüksek alanlarda kaybolduğu gözlenmiştir. Benzer bir çalışma düzleme dik manyetik alan altında da denenmiştir. Ancak akım arttıkça taranan frekans uzayında belirgin bir sinyal göze çarpmamıştır. Bu da düzleme dik uygulanan alanların baloncukları soğurarak tek domenli yapının hakim olma olasılığını düşündürmektedir.

Sıcaklığa bağlı yapılan çalışmalara bir örnek Şekil 4.5.3'te gösterilmiştir. 9 mA akımda manyetik alan kapalı iken kaydedilen bu veriler için salınım frekansı değişmemiş, 4,1 GHz seviyesinde ufak varyasonlarla sabit kalmıştır. Ancak sıcaklık düştükçe sinyalin büyüklüğü artmıştır (V (mV) skalası). Bununla birlikte frekans bant genişliği , Δf, daralarak 50K'de 1 MHz'e düşmüştür. Bu beklenen bir sonuçtur ki termal etkiler bastırıldıkça sinyal kalitesi artmaktadır.



Şekil 4.5.3: B1-4 örneğinin sıcaklığa bağlı yüksek frekans salınım parametreleri

4.6. Sonuçlar ve Tartışma

Proje de sunulan tüm iş paketleri başarılı bir şekilde tamalanmıştır. Proje kapsamında farklı DDMA malzemelerden üretilen nano-disklerde manyetik baloncuk oluşumu gözlenmiştir. Baloncuk oluşumu için elverişli disk boyutları ve manyetik alan koşullandırmaları belirlenmiştir. Alternatif olarak nano-disklere akım enjekte etme yoluyla STT etkisiyle baloncuk yazma işlemi yapılmıştır. Başka bir yöntemde ısı-destekli mıknatıslanma etkisi kullanılarak mikro-tellere baloncuk yazılabilmiştir. Projenin baloncuk oluşumu ile bulguları şu şekildedir:

- ✓ Düzleme dik manyetik anizotropiye sahip üç farklı malzeme keşfedilmiştir: [CoNi(0,22)/Pd(1,2 nm)]x22 çoklu katmanlı yapısı, [Pt(5)/CoFeB(1)/Ti(1)]x45 katmanlı yapısı ve Ta(5)/Pt(10)[Co(0.2)/Ni(0.6)]x8/Pt(5) çoklu katmanlı yapısı.
- ✓ CoNi/Pd DDMA malzemesinden üretilen nano-disklerde ve en verimli olarak 1000-1200 nm çap aralığında baloncuk oluşumu gözlenmektedir.
    - ➢ Baloncuk Oluşumları 200-500 nm arası çaplarda orta bölgelere sahiptirler.
    - ➢ Manyetron saçtırma ile üretilen bu örneklerde yüzey kusurları çok olduğundan baloncuklar disklerin tam ortasında yer almayabilmektedir.
    - ➢ Baloncuk oluşumu için düzleme dik uygulanan maksimum bir değerden AC olarak basamaklarla azalan manyetik alanda disklerin mıknatıslığı giderilir. En verimli baloncuk oluşumu maksimum alanı 675 mT olan ve 20 mT basamaklarla 40 mT/sn hızla azalan AC manyetik alan koşullandırmasında bekleme süresi 1 sn altında iken gözlenmiştir ve %15'tir.
- ✓ Pt/CoFeB/Ti çoklu katmanlı yapısından oluşturulan disklerde 300-500 nm çaplı yapılarda baloncuk oluşumu gözlenmektedir.
    - ➢ 100-250 nm arasında çaplara sahip baloncuklar düzleme dik AC manyetik alan koşullandırması sonrasında yine düzleme dik uygulanan 3T ve üzeri manyetik alanlarla oluşturulmaktadır.
    - ➢ Bu disklerde baloncuk oluşum verimliliği %100'dür.
- ✓ Co/Ni çoklu katmanlı yapısından oluşturulan disklerde 1000 nm - 15000 çapı arasındaki disklerde baloncuk oluşumu gözlenmektedir.
    - ➢ 6500 Oe düzlem içi AC manyetik alan koşullaması sonrası 1000 nm ,1250 nm ve 1500 nm çaplara sahip disklerde %6, %31 ve %47 olarak baloncuk oluşumu gözlemlendi.
    - ➢ Ayrıca düzlem içi AC manyetik alan koşullaması optimizasyonu sonrasında 6250 Oe AC manyetik alan koşullaması sonrası1500 nm disklerde %70 baloncuk oluşumu gözlemlendi.

- Co/Ni ince tellerinde düzlem içi 6500 Oe AC manyetik alan koşullamasına ve telin kalınlığına bağlı olarak baloncuk oluşumu gözlemlenmiştir.

✓ Baloncuk oluşumu için alternatif bir yöntem geliştirilmiştir: DDMA malzemeden üretilen küçük çapta (örneğin 300 nm) disklerde iletken AKM kullanılarak baloncuk yazılması.

- Düzleme dik bir alanda doygunluğa ulaştırılmış CoNi/Pd nano-disklerine iletken AKM'nin ucu ile 900 nA'e kadar akım uygulanmıştır. Bu akımın malzeme içinde oluşturduğu spin transfer torku etkisiyle kontak bölgesinin altında bir baloncuk çekirdeklenmiştir ve MKM ile gözlenmiştir.
- 0,3 MA/cm^2 lik bir akım yoğunluğu ile % 60 verimliklikle 100 nm civarı çaplara sahip baloncuklar oluşturulabilinmiştir.

✓ Denenen ikinci bir alternatifte DDMA'lı mikro-tellere (CoNi/Pd malzemesinden) ısı-destekli mıknatıslanma değişimi ile baloncuk yazılmıştır.

- Mikroteller yeteri kadar ısıtıldığında 10 nm üzerine konumlandırılmış MKM ucunun manyetik alanıyla mıknatıslandığı ve oluşan konfigürasyonun bir baloncuk olduğu tespit edilmiştir.
- Literatür ile kıyaslandığında bu şekilde yazılan baloncuklar domen duvarı yapılanmasının şekli itibariyle birer manyetik soliton (skyrmion) olma özelliği taşımaktadırlar. Yüzey kusurlarından etkilenmeden tel üzerinde manyetik alan veya akım darbeleri ile hareket ettirilebilen bu baloncuklar manyetik mantık devreleri ve üç boyutlu manyetik hafıza üniteleri için uygun adaylardır. Skyrmion olmaları sebebiyle düşük akımlarla yüksek hızlarda hareket etme potansiyelleri vardır.

Baloncuk oluşumlarının ortaya çıkmaları için dört farklı koşul bu proje ile belirlenmiştir. Başarı ile oluşturulan baloncuklar MKM ile gözlenebilmiştir. Projenin bir başka iş paketi olan spin-valf üretimi ve spin-valf yapılarında elektriksel ölçümleri yapılmasıdır. Bu kapsamda spin valf yapısı başarılı bir şekilde üretilmiş olup spin-valf yapısı için elektriksel ölçümler yapılarak GHz mertebesinde RF sinyalı gözlemlenmiştir. Bu ölçümlerin sonuçları baloncuk dinamiklerinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır:

✓ Spin valf yapısında DDMA malzemenin algıç katman olarak kullanılması yoluyla GMR etkisiyle baloncukların yüksek frekans dinamikleri deneysel olarak tespit edilebilmiştir.

✓ DC akımla tetiklenen baloncuk yapılarının jiroskobik hareketi 3-6,5 GHz frekans aralığında gerçekleşmektedir.

✓ Spin-valfler arasındaki frekans farklılıkları baloncukların yapısal farklılıklarından kaynaklıdır.

- ✓ Bazı baloncukların dinamik frekansı akım ile azalmakta, bazılarınınki ise sabit kalmaktadır.
- ✓ Manyetik alan uygulaması frekansı arttırmaktadır.
- ✓ Sinyal kalite faktörü oldukça iyi olan (2MHz/3 GHz) baloncuk bazlı spin-valflerin kalitesi sıcaklık düştükçe artmaktadır ve sinyal büyüklüğü de artmaktadır.

Bu proje bulguları manyetik baloncukların nano-osilatör olarak değerlendirilmelerini mümkün kılmaktadır. Baloncukların şekline göre hangi türlerin akımla değişen frekans özelliği olduğunun tespit edilerek bunların aygıt uygulamalarında değerlendirilmelerin mümkün olduğunu göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

[1] Chien, C. L., Zhu, F. Q. ve Zhu, J-G. 2007. “Patterned Nanomagnets”, Physics Today, 60, 40-45.

[2] Hehn, M., Ounadjela, K., Bucher, J-P., Rousseaux, F., Decanini, D., Bartenlian, B., Chappert, C. 1996. ”Nanoscale Magnetic Domains in Mesoscopic Magnets”, Science, 272, 1782-1785.

[3] Choe, S. B., Acremann, Y., Scholl, A., Bauer, A., Doran, A., Stöhr, J., Padmore, H. A. 2004. " Vortex core-driven magnetization dynamics”, Science, 304, 420-422.

[4] Ozatay,O., Gowtham, P.G., Tan K.W., Read, J.C., Mkhoyan, K.A., Thomas, M.G., Fuchs, G.D., Braganca, P. M. Ryan, E. M., Thadani, K.V., Silcox, J., Ralph, D. C. ve Buhrman R. A. 2008. “Sidewall oxide effects on spin-torque- and magnetic-field-induced reversal characteristics of thin-film nanomagnets”, Nature Materials 7, 567.

[5] Kent, A. D. 2007. “Spintronics: A nanomagnet oscillator”, Nature Materials, 6, 399-400.

[6] Silva, T. J. 2007. ”Spintronics: Field-free ringing of nanomagnets”, Nature Physics, 3, 447-448.

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

[8] Finoccio, G., Ozatay, O., Torres, L., Buhrman, R. A., Ralph, D. C. ve Azzerboni, B. 2008. “Spin-torque-induced rotational dynamics of a magnetic vortex dipole ”, Physical Review B, 78, 174408-6.

[9] Ivanov, B. A., Stephanovich, V. A. and Zhmudskii, A. A. 1990. “Magnetic vortices - the microscopic analogs of magnetic bubbles”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 88, 116-120.

[10] Fukumura, T., Sugawara, H., Hasegawa, T., Tanaka, K., Sakaki, H., Kimura, T. and Tokura, Y.1999. “Spontaneous bubble domain formation in a layered ferromagnetic crystal”, Science, 284, 1969-1971.

[11] Thiele, A. A.1973. ”Steady-state motion of magnetic domains”, Physical Review Letters, 30, 230-233.

[12] Komineas, S., Vaz, C. A. F. ve Bland, J. A. C., Papanicolaou, N. 2005. “Bubble domains in disc-shaped ferromagnetic particles”, Physical Review B, 71, 060405-4.

[13] Moutafis, C., Komineas, S., Vaz, C. A. F., Bland, J. A. C., Shima, T., Seki, T. ve Takanashi, K. 2007. “Magnetic bubbles in FePt nanodots with perpendicular anisotropy” Physical Review B, 76, 104426-5.

[14] Moutafis, C., Komineas, S. ve Bland, J. A. C. 2009. “Dynamics and switching processes for magnetic bubbles in nanoelements”, Physical Review B, 79, 224429-8.

[15] Makhfudz, I., Krüger, B. ve Tchernyshyov, O. 2012. “Inertia and Chiral Edge Modes of a Skyrmion Magnetic Bubble”, Physical Review Letters, 109, 217201-4.

[16] Vukadinovic, N. ve Boust, F. 2007. ”Three-dimensional micromagnetic simulations of magnetic excitations in cylindrical nanodots with perpendicular anisotropy”, Physical Review B, 75, 014420.

[17] Vukadinovic, N. and Boust, F. 2008. “Three-dimensional micromagnetic simulations of multidomain bubble-state excitation spectrum in ferromagnetic cylindrical nanodots”, Physical Review B, 78, 184411.

[18] Mohseni S.M. vd. 2013.” Spin Torque-Generated Magnetic Droplet Solitons” Science 339, 1295.

[19] Iwasaki J. vd. 2013. “Current-induced skyrmion dynamics in constricted geometries” Nature Nanotechnology 8, 742-747.

[20] Sampaio J. vd. 2013. “Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic skyrmions in nanostructures”, Nature Nanotechnology 8, 839.

[21] Hellwig, O., Hauet, T., Thomson, T., Dobisz, E., Risner-Jamtgaard, J. D., Yaney D., Terris B. D., Fullerton, E. E. 2009. “Coercivity tuning in Co/Pd multilayer based bit patterned media”, Applied Physics Letters, 95, 232505.

[22] Piraux, L., Anthoe V. A., Arajuo, F. A., Srivastava, S. K., Hehn, M., Lacour D., Mangin, S. and Hauet, T.2012. “Periodic arrays of magnetic nanostructures by depositing Co/Pt multilayers on the barrier layer of ordered anodic alumina templates”, Applied Physics Letters, 101, 013110.

[23] Gottwald, M., Andrieu, S., Gimbert, F., Shipton, E., Calmels, L., Magen, C., Snoeck E., Liberati M., Hauet T., Arenholz, E, Mangin, S. ve Fullerton, E. 2012. “ Co/Ni(111) superlattices studied by microscopy, x-ray absorption, and ab initio calculations”, Physical Review B., 86, 014425

[24] Puliafito, V., Torres, L., Ozatay, O., Hauet, T., Azzerboni, B., Finocchio, G. 2014, “”, Journal of Applied Physics, 115, 17D139.

[25] Finocchio, G., Puliafito, V., Komineas, S., Torres, L., Ozatay, O., Hauet, T., Azzerboni, B. 2013. “Nanoscale spintronic oscillators based on the excitation of confined soliton modes”, Journal of Applied Physics, 114, 163908.

[26] Evarts E. R., Cao, L., Ricketts, D. S., Nicholas, D. R., Bain, J. ve Sara, A. M. 2009. “Spin transfer torque switching of magnetic tunnel junctions using a conductive atomic force microscope”, Applied Physics Letters 95, 132510.

[27] Bernstein D.P. vd. 2011. “Nonuniform switching of the perpendicular magnetization in a spin-torque-driven magnetic nanopillar”, Physical Review B (R) 83, 180410.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ÖZHAN ÖZATAY
Proje No:	114F318
Proje Başlığı:	Nanoaygıtlarda Manyetik Baloncukların Manyetik Alan Ve/Veya Spin-Kutuplanmış Akım İle Etkileşimi
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	HAMDİ TORUN, GİOVANNİ FİNNOCCHİO (Yurt Dışı)
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	BOĞAZİÇİ Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2015 - 01/05/2017
Onaylanan Bütçe:	455200.0
Harcanan Bütçe:	382335.3
Öz:	Düzleme dik manyetik anizotropili (DDMA) malzemelerden üretilen nanoyapılarda manyetik konfigürasyonlardan hangisinin kararlı olacağını belirleyen magnetostatik, değiş-tokuş (exchange) ve magneto-kristal ve/veya şekil anizotropisi enerjileri ile birlikte dış manyetik alan varlığında ise Zeeman enerji ile birlikte belirleyici rol oynamaktadırlar. 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 çok yoğun veri depolama üniteleri, manyetik mantık devreleri, yonga (çip) üzerinde mikrodalga üreteçleri, modülatör ve dedektör gibi spintronik aygıtlarda potansiyel uygulama alanı bulabilecek, nano-aygıtlarda ve DDMA ince filmlerde spin-kutuplanmış akım ve/veya manyetik alan ile tetiklenebilen, manyetik baloncuk çekirdeklenmesi (nucleation), kuasi-statik düzenlenme biçimleri ve dinamiğinin gösterimi ve anlaşılması üzerinedir. Bu iddialı hedeflere ulaşmada başarılı olmak için ince film büyütme/ malzeme tasarlama, nanomanyetizma, manyetik ince filmlerin nano-fabrikasyonu ve karakterizasyonu ve spintronik aygıt tasarımı gibi tamamı Türk ve Fransız araştırma grupları tarafından eş zamanlı olarak yürütülmüştür. Proje süresince ihtiyaç duyulan nümerik modelleme için İtalya?dan Dr. Finnocchio?nun araştırma grubunun desteği alınmıştır. Manyetik kuvvet mikroskobu ölçümlerinin yorumlanması konusunda ayrıca Dr. Torun?un danışmanlığından faydanılmıştır. Bu proje çerçevesinde Türk tarafında CoNi/Pd, Fransa tarafında Co/Ni DDMAçok katmanlı ince filmlerde ve onlardan üretilen nanoyapılarda (disk, ince tel) manyetik baloncuk oluşumu, kuasi-statik konfigürasyonları ve manyetik alan içinde veya dışında spin-kutuplanmış akım ile etkileşimle tetiklenen manyetizasyon hareket dinamiğinin gösterimi ve anlaşılması üzerine çalışılmıştır. Bununla birlikte bir spin-valf yapısında RF osilatör ve manyetik sensör uygulamaları için radyo frekans (RF) manyetik baloncuk dinamiği sinyali ölçülerek ve akıma, manyetik alana bağlı olarak optimizasyonu yapılmıştır. Bu sayede kararlı olarak elde edilen baloncuk yapısının bir elektriksel devre elemanı olarak kullanılması sağlanmıştır. 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:	Manyetik Baloncuk, Manyetik Kuvvet Mikroskobu, Düzleme Dik Anizotropi,
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Reproducible formation of single magnetic bubbles in an array of patterned dots (Makale - İndeskli Makale), 2- Method for Reproducible Single Bubble Formation in Patterned Dot Array (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 3- Evolution of Magnetic States From Néel Skyrmions to Radial Vortices (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),

TÜBİTAK