

**Magnetron Sputtering Yöntemiyle Büyütülen Manyetik
Tünel Eklemleri' nin Yapısal, Elektronik ve Manyetik
Özelliklerinin İncelenmesi**

Proje No: 105T109

**Yrd.Doç.Dr. Süleyman TARI
Yrd.Doç.Dr. Yusuf SELAMET
Doç.Dr. Lütfi ÖZYÜZER
Arş. Gör. Kadir VAHAPLAR
Arş. Gör. Hüseyin TOKUÇ
Y.L. Öğ. H. Serhat ALAGÖZ**

**Mart 2009
İZMİR**

ÖNSÖZ

Bu projede Ferromanyetik/Yalıtkan/Ferromanyetik yapısından oluşan manyetik tünel eklemleri (MTJ) mıknatısal püskürtme yöntemiyle büyütülmüş, yapısal, manyetik ve elektronik özellikleri çalışılmıştır. MTJ' ler TÜBİTAK tarafından desteklenen 105T109 nolu projeden sağlanan maddi destek ile kurulan mıknatısal püskürtme sisteminde ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik bölümünün alt yapısı kullanılarak büyütülmüşlerdir. TÜBİTAK'a projenin gerçekleşmesinde verdiği katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Tubitak'tan sağlanan öğrenci burs desteğiyle Arş. Gör. Kadir Vahaplar, (Radboud University, Hollanda, doktora öğrencisi) ve Arş. Gör. Hüseyin Tokuç (Trinity College, Dublin, Ireland, doktora öğrencisi) Yüksek Lisans tez çalışmalarını yapmışlardır. İYTE öğrencisi Hüseyin Serhat Alagöz halen Yüksek Lisans tez çalışmasına devam etmektedir (Haziran 2009'da mezun olacaktır). Prof. Siva Sivananthan'a (Mikrofizik laboratuvarı, Fizik bölümü, UIC) projeye verdiği destekten ve x-ışını fotoelektron spektroskopisi imkanından dolayı teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	5
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	5
TABLoların LİSTESİ	5
BÖLÜM 1. SPİNTRONİK.....	10
1.1 Dev Manyetik Direnç	10
1.2 Manyetik Tünel Eklemleri	11
1.3 Manyetik Tünel Olayı.....	12
1.4 Manyetizma	15
1.5 Manyetik Karşılıklı etkileşme.....	16
1.5.1 Direk Karşılıklı Etkileşme	17
1.5.2 İndirek Karşılıklı Etkileşme	17
1.5.3 Süperetkileşme	18
1.6 Manyetik Bölgeler.....	18
1.7 Manyetik Anizotropi	19
1.7.1 Manyetokristal Anizotropi	19
1.7.2 Şekil Anizotropisi.....	20
1.7.3 Karşılıklılık Anizotropisi	21
BÖLÜM 2. DENEY	22
2.1 Amaç	22
2.2 Filmlerin Büyütülmesi.....	22
2.3 Yapısal Analiz Sistemleri	23
2.4 Manyetik Döngü Ölçümleri	24
2.5 Manyetik Tünel Eklemlerinin Oluşturulması.....	25
2.6 Manyetik Direnç Ölçüm Sistemleri	28
BÖLÜM 3. SONUÇLAR.....	30
3.1 Yapısal Analiz Sonuçları.....	30
3.1.1 X-Işını Kırınımı Sonuçları	30
3.1.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu Sonuçları	33
3.2 Manyetik Analiz Sonuçları	36
3.2.1 Manyetik Döngü Analizleri	36
3.2.2 Manyetik Ölü Katmanların İncelenmesi	47
3.3 X-Işını Photoelektron Spektroskopisi (XPS) Analizleri	51
3.4 Elektriksel Karakterizasyon: I-V ve TMR Ölçüm Sonuçları	57
BÖLÜM 4. TARTIŞMA	65
KAYNAKÇA	68

ÖZET

Elektronun spin özelliğini kullanarak yeni elektronik aygıtların yapılması zon zamanlarda çok yoğun araştırma konusu olmuştur. Bu aygıtlara spinin kontrol edilmesinden dolayı spintronik aygıtlar denmektedir. İki ferromanyetik katman arasına konulan bir yalıtkan bariyerden oluşan yapıya manyetik tünel eklemi denir. Elektronun bu katmanlardan yüzeye dik olarak geçisi quantum mekaniksel tünelleme olayı sayesinde. Manyetik alan altında göstereceği direnç ferromanyetik katmanların birbirlerine göre manyetik yönelimlerine bağlıdır. Bu dirence tünel manyetik direnç (TMR) denir ve yüksek TMR değeri elde edilmesi spintronik aygıtların daha küçük ve yoğun yapılabilmesine yol açar. Bununla birlikte hızlı bilgi iletimi için FM/Y ara yüzeyinde direnç-alan çarpımının (RA) küçültülerek ($\sim 1\Omega(\mu\text{m})^2$) yüksek sinyal-gürültü oranı elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için iki yöntem kullanılmaktadır: yalıtkan filmin kalınlığını inceltmek ($\sim 1\text{nm}$) veya arayüzeyde oluşan bariyer yüksekliğini küçültmek. İkinci yöntemde, küçük bant aralığına sahip yalıtkanların kullanılması gerekir. Yalıtkan olarak Ta_2O_5 kullanılması yenidir. Ta_2O_5 bant aralığı $\sim 3.5\text{eV}$ ' tur ve FM/ Ta_2O_5 arayüzeyinde $\sim 0.4\text{ eV}$ bariyer yüksekliği verir. Bu projede farklı FM katmanlar ve bariyerler kullanılarak MTJ' ler büyütülmüşlerdir. Öncelikle Ta_2O_5 olmak üzere Al_2O_3 , MgO bariyer olarak kullanılmıştır. MTJ' ler iki farklı yöntem ile elde edilmiş ve manyetik direnç ölçümleri yapılmıştır. Spin kutuplanmış elektronların geçişini kontrol eden ve FM katmanlarının yönelimlerinin değiştirilmesi için gerekli olan farklı H_c değerlerine sahip FM filmler kullanılmıştır. Sürekli olarak büyütülen filmlerin yapısal, ve manyetik özellikleri çalışılmıştır. Elektriksel ölçümlerden oluşturulan bazı MTJ yapılarında, %3.5 dolayında TMR değeri bulunmuştur. Fotoelektron spektroskopisi analizlerinden ferromanyetik katmanların oksitlendiği görülmüş, ayrıca manyetik analizlerden ferromanyetik/(yalıtkan, metal) arayüzeylerde manyetik ölü katmanların varlığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler:

Manyetik Tünel Eklemleri, Manyetik hafıza (MRAM), Spintronik, İnce film, Ferromanyetizm, Manyetik direnç (MR), Dev manyetik direnç (GMR), Spin vanası, Spin kutuplanması, Hafızada tutabilen, Okuyucu başlık, Manyetik döngü, Manyetik eşleşme, Manyetik anizotropi, Oksit yalıtkan barier.

ABSTRACT

There is a tremendous research in building novel electronic devices using the spin property of the electrons in recent years. The devices build manipulating the spin of electrons are called spintronics devices. The simple structure consisting of an insulator barrier layer sandwiched between two ferromagnetic layers (FM) is called magnetic tunnel junction (MTJ). The electron transport through this structure in perpendicular to the surface is due to the quantum mechanical tunneling phenomena. The resistance under an external magnetic field of the MTJ depends upon the orientation of the magnetizations of the FM layers. This resistance is called tunneling magnetoresistance (TMR). High TMR ratio allows to build smaller and denser spintronics devices. But it is also necessary to have low resistance area (RA) product at the junctions ($\sim 1\Omega(\mu\text{m})^2$) to increase the signal-noise ratio so that high data transfer speed is achieved. There are two ways to get small RA: the first one is to decrease the thickness of the insulator layer ($\sim 1\text{nm}$), the second one is to decrease the barrier height that forms at the FM/I interface. In the second method low band gap insulators need to be used. Ta_2O_5 is used recently as the barrier layer, since it has a band gap of 3.5 eV and results in a barrier height of 0.4 eV at the FM/ Ta_2O_5 interface. In this project different FM layers and barriers were used to grow MTJ's. Ta_2O_5 as well as Al_2O_3 , MgO were used as barrier layers. MTJ's were obtained by two different methods and their TMR measurements were done. Different FM layers were used in order to have different coercive field which is necessary to switch the magnetizations of the FM layers. Magnetic and structural properties of the continuously grown layers were studied. TMR ratio of about 3.5 % were found from the MTJ's formed from some structures. X-ray photoelectron spectroscopy analysis showed that the FM layers were oxidized. Manyetik analysis revealed that there exist magnetic dead layers at the both FM/(Insulator, metal) interaces.

Keywords:

Magnetic Tunnel Junction, Magnetic Random-Access-Memory (MRAM), Spintronics, Thin film, Ferromagnetism, Magnetoresistance (MR), Giant magnetoresistance (GMR), Spin valve, Spin polarization, Nonvolatile, Read-head, Magnetic hysteresis, Magnetic coupling, Magnetic anisotropy, Oxide insulator barrier.

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

	Sayfa Numarası
Şekil 1.1. Tipik bir GMR spin vanası yapısı.	10
Şekil 1.2. GMR yapısında transport olayı (a) paralel yönelim and (b) antiparalel yönelim.	11
Şekil 1.3. Fe/Cr çok katmalı yapısının düşük sıcaklıklarda manyetik direnç grafiği.	11
Şekil 1.4. Elektronların durum yoğunluklarının (DOS) şematik gösterimi (a) normal metal, (b) FM metal (oklar çoğunluk ve azınlık spin durumlarını gösterir).	12
Şekil 1.5. Antiparalel iki FM malzemenin DOS' ları ve spine bağlı saçılma olayı.	13
Şekil 1.6. Dalga fonksiyonunun bariyerden geçişi.	13
Şekil 1.7. Metal/Yalıtkan/Metal yapısının band diyagramı.	14
Şekil 1.8 Ferromanyetik bir malzemenin manyetik döngü grafiği.	16
Şekil 1.9 Atomlar arası küçük mesafe için antiparalel yönelim.	17
Şekil 1.10. Büyük atomlar arası mesafe için paralel yönelim.	17
Şekil 1.11. The Bethe-Slater eğrisi.	17
Şekil 1.12. İndirek etkileşimin atomlar arası uzaklığa karşı grafiği.	18
Şekil 1.13. İki geçiş iyonunun O ₂ iyonu sayesinde antiferromanyetik olarak eşleşmesi.	18
Şekil 1.14. Yeni manyetik bölgelerin oluşumu.	19
Şekil 2.1. Mıknatısal püskürtme başlığında mıknatısların konumu ve manyetik alan çizgileri. ...	22
Şekil 2.2. (a) AJA Orion 5 UHV mıknatısal püskürtme sistemi, (b) büyütme odası şematığı.	23
Şekil 2.3. Titreşimli örnek manyetometre sistemi (VSM).	24
Şekil 2.4. Titreşimli örnek manyetometre sistemi şematığı.	25
Şekil 2.5. Film büyüme esnasında litografi yöntemi ile MTJ oluşturma basamakları.	26
Şekil 2.6. Sürekli filmlerden aşındırma ve litografi yöntemi ile MTJ oluşturma basamakları.	26
Şekil 2.7. Fotolitografi basamakları.	27
Şekil 2.8. Film büyüme esnasında MTJ oluşturmada kullanılan maskeler.	27
Şekil 2.9. I-V ölçümleri için kullanılan program.	28
Şekil 2.10. Manyetik-direnç ölçümleri için kullanılan R-H programı.	29
Şekil 2.11. Manyetik-direnç ölçüm sistemi şematığı.	29
Şekil 3.1. SiO ₂ üzerine farklı kalınlıklarda büyütülen Fe' nin XRD spektrumları.	31

Şekil 3.2. SiO ₂ üzerine büyütülen (a)Fe(12nm) ve (b)Ta(24nm)/Fe(12nm) yapılarının XRD spektrumu.....	31
Şekil 3.3. Farklı kalınlılardaki Co filminin XRD spektrumları.....	32
Şekil 3.4. XRD spektrumları (a) Si/Ta(7 nm)/Co(25 nm) ve (b) Si/Ta(40 nm)/Co(25 nm).....	33
Şekil 3.5. Ta(6 nm) filminin AFM yüzey morfolojisi. Rms pürüzlülük 2.3 Å dur.....	33
Şekil 3.6. Fe(12 nm) filminin AFM yüzey morfolojisi. Rms pürüzlülük 4 Å dur.....	34
Şekil 3.7. SiO ₂ üzerine büyütülen Fe ve Ta' nın yüzey pürüzlülükleri grafiği.....	34
Şekil 3.8. SiO ₂ /Ta(24nm)/Fe(12nm)' nin yüzey morfolojisi. Rms pürüzlülük 1.2 Å dur.	34
Şekil 3.9. Si(100) üzerine büyütülen farklı kalınlılardaki Co filminin rms pürüzlülüğü grafiği.	35
Şekil 3.10. AFM yüzey morfolojileri (a) Si/Co(25nm), (b) Si/Ta(7nm)/Co(25nm).....	35
Şekil 3.11. Fe/Ta/Fe üç katmanlı yapısının SEM ara kesit mikrografigi.	36
Şekil 3.12. SiO ₂ üzerine büyütülmüş farklı kalınlılardaki Fe filmlerinin (a) M-H döngüleri, (b) H _c ve M _s ' in kalınlıkla değişim grafikleri.	37
Şekil 3.13. Fe(12nm) ve Ta(24nm)/Fe(12nm) filmlerinin M-H döngüleri.....	38
Şekil 3.14. SiO ₂ /Ta(24nm)/Fe(12nm) yapısının farklı açılardaki M-H döngüleri. Manyetik alan yüzeye paralel uygulanmıştır.....	38
Şekil 3.15. Ta ve Ta ₂ O ₅ in Fe' nin M-H döngüsü üzerindeki etkisi.....	39
Şekil 3.16. SiO ₂ /Ta(d)/Fe(12nm)/Ta ₂ O ₅ (4nm) yapısının M-H döngüleri.....	40
Şekil 3.17. Farklı kalınlılardaki Co filmlerinin (a) M-H döngüleri. (b) M _s , H _c ' nin kalınlığa bağlı değişimleri.....	41
Şekil 3.18. Açığa bağlı olarak ölçülen Co filminin M-H döngüleri, (a)Si/Co(8nm) (b)Si/Ta(24nm)/Co(8nm).....	41
Şekil 3.19. SiO ₂ /Ta(24nm)/Fe(12nm)/Ta ₂ O ₅ (d)/Co(8nm) M-H döngüleri.....	42
Şekil 3.20. SiO ₂ /Ta(24nm)/Fe(12nm)/Ta ₂ O ₅ (d)/Co(8nm) yapılarında Co katmanının küçük döngüleri.....	43
Şekil 3.21. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış SiO ₂ /Ta(24 nm)/Fe(12nm)/Ta ₂ O ₅ (18 nm)/Co(8) MTJ yapısının M-H döngüleri.	44
Şekil 3.22. SiO ₂ /Ta(15nm)/Co(20nm)/Fe(10nm)/Ta(2nm)+O/Fe(10nm)/Co(20nm)/Ta(10nm) yapısının M-H döngüsü.....	45
Şekil 3.23. SiO ₂ /Ta(20nm)/CoFeB(10nm)/Ta(2nm)+O/Fe(10nm)/Ta(10nm) yapısının M-H döngüsü.....	45
Şekil 3.24. SiO ₂ /Ta(15nm)/NiFe(45nm)/Al ₂ O ₃ (5nm)/CoFe(30nm)/Ta(10nm) yapısının M-H döngüsü.....	46

Şekil 3.25. SiO ₂ /Ta(15nm)/NiFe(45nm)/Ta(2nm)+O/CoFe(30nm)/Ta(10nm) yapısının M-H döngüsü	46
Şekil 3.26. SiO ₂ /Ta(15nm)/NiFe(45nm)/MgO(10nm)/CoFe(30nm)/Ta(10nm) yapısının M-H döngüsü	47
Şekil 3.27. SiO ₂ /Ta(5nm)/Fe(d)/Ta(3nm) yapısının (a)M-H döngüleri, (b)manyetik ölü katman grafiği.....	48
Şekil 3.28. SiO ₂ /Ta(5nm)/Fe(dnm)/Ta ₂ O ₅ (3nm) yapısının (a)M-H döngüleri, (b)manyetik ölü katman grafiği.....	48
Şekil 3.29. MÖK grafikleri: (a) SiO ₂ /Ta/NiFe(d)/Ta, (b) SiO ₂ /Ta/NiFe(d)/Ta ₂ O ₅ , (c) SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ /NiFe(d)/Ta ₂ O ₅ , (d) SiO ₂ /Ta/NiFe(d)/Al ₂ O ₃ , (e) SiO ₂ /Al ₂ O ₃ /NiFe(d)/Ta	49
Şekil 3.30. MÖK grafikleri: (a)SiO ₂ /Ta/CoFeB/Ta, (b) SiO ₂ /Ta/CoFeB/Ta ₂ O ₅ , (c) SiO ₂ /Ta/CoFeB/Al ₂ O ₃ , (d) SiO ₂ /Ta/CoFeB/MgO.....	50
Şekil 3.31. SiO ₂ /Fe(36 nmm)/Ta ₂ O ₅ (5 nm) yapısının XPS (a) Genel , (b) 20 nm epitaxial Fe pik (c) Fe2p, b) O1s spektrumları.	52
Şekil 3.32. SiO ₂ /Co/Ta yapısının XPS spektrumu.....	53
Şekil 3.33. XPS spektrumları (a) Co, (b) CoO (c) SiO ₂ /Co(20nm)/Ta(3nm) genel (d) SiO ₂ /Co(20nm)/Ta(3nm) pik spektrumu.	54
Şekil 3.34. Oksijen plazma ile oluşturulan Ta ₂ O ₅ filminin XPS spektrumu.	55
Şekil 3.35. XPS spektrumlar (a) SiO ₂ /Al, (b) SiO ₂ /Ta/Fe/Al ₂ O ₃	55
Şekil 3.36. SiO ₂ /Ta/NiFe/MgO yapısının XPS spektrumları (a) genel, (b) Fe 2p, (c) Ni2p, (d) MgO2p.	56
Şekil 3.37. Bir MTJ in litografi anındaki maske ayarlayıcısı altında görüntüsü.....	57
Şekil 3.38. SiO ₂ /Ta(24 nm)/Fe(12 nm)/Ta ₂ O ₅ (~8 nm)/Co(4 nm)/Ta(24 nm)/Au(~10nm)' dan oluşan MTJ' nin oda sıcaklığında I-V grafiği.	58
Şekil 3.39. SiO ₂ /Ta(24 nm)/Fe(12 nm)/Ta ₂ O ₅ (~8 nm)/Co(4 nm)/Ta(24 nm)/Au(~10nm) den oluşan MTJ' nin oda sıcaklığında I-V grafiği.	58
Şekil 3.40 SiO ₂ /Ta(20nm)/Fe(10nm)/TaO(20nm)/Co(10nm) yapısının I-V grafiği	59
Şekil 3.41. SiO ₂ /Ta(20)/Fe(10)/Ta ₂ O ₅ (20)/Co(10)/Ta(5) yapısının I-V grafiği	59
Şekil 3.42. SiO ₂ /Ta(20)/CoFeB(10)/Al ₂ O ₃ (5)/Fe(10)/Ta(20) yapısının I-V grafiği.	60
Şekil 3.43. SiO ₂ /Ta(15nm)/NiFe(45nm)/Al ₂ O ₃ (5nm)/CoFe(30m)/Ta(10nm) yapısının (a) M-H döngüsü, (b) I-V grafiği, (c) TMR grafiği.	61
Şekil 3.44. SiO ₂ /Ta(15)/NiFe(45)/MgO(10)/CoFe(30)/Ta(10) sürekli filimlerden oluşturulan TMR grafikleri (a) 30x30 µm ve 5mV bias, (b) 50x50 µm ve 10mV bias.....	62
Şekil 3.45. SiO ₂ /Ta/Co/Fe/Ta(2nm)+O/Fe/Co/Ta yapısının I-V grafiği.	63
Şekil 3.46. SiO ₂ /Ta(20nm)/Fe(10nm)/Ta ₂ O ₅ (20)//Co(10nm)/Ta(5nm) yapısının I-V grafiği.....	63
Şekil 3.47. SiO ₂ /Ta(20)/CoFeB(10)/Al ₂ O ₃ (5)/Fe(10)/Ta(20) yapısının I-V grafiği.	64

TABLULARIN LİSTESİ

Sayfa Numarası

Table 1.1. Bazı ferromanyetik malzemelerin Curie sıcaklıkları.....	16
Table 1.2. Küresel ve şekil anizotropisi olmayan bazı manyetik malzemelerin kritik büyüklükleri.	19
Table 3.1. Ferromanyetik filmlerde ölü manyetik katmanların hesaplanması için büyütülen çok katmanlı yapılar.....	51

BÖLÜM 1

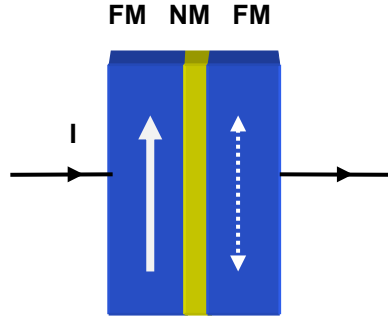
SPİNTRONİK

1.1 Dev Manyetik Direnç

Manyetizmin elektronik aygıtlara integre edilmesi son zamanlarda büyük bir araştırma konusu olmuştur. Manyetizmin orijininin spin olması gerçeği elektronun spininin kontrol edilerek elektronik aygıtların spintronik versiyonlarının yapılabileceğini gündeme getirmiştir. Spin tamamen quantum mekanisel bir olaydır. Spintronik aygıtlar günümüz teknolojisinin arzuladığı yoğun, hızlı, hafızada saklanabilirlik ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Özellikle bilgi depolama alanında spin vanası çok büyük ilerleme kaydetmiştir. Spintronik devre aygıtların kullanılması ileri aşamada kuantum bilgisayarlarının ve kuantum iletişimde kullanılabilecek aygıtların yapılmasına yol açabilecektir (Dirk 2002).

Spin vanası en basit haliyle iki ferromanyetik (FM) film arasına yerleştirilen manyetik olmayan bir metal filmden oluşan üç katmanlı yapıdır. FM filmlerin birbirlerine göre manyetik yönelimleri spin vanasının direncinde büyük değişiklik yapmaktadır. Bu etkiye dev manyetik direnç (Giant magnetoresistance, GMR) denir (Baibich 1988). GMR sensörler bilgisayarlarda okuyucu başlık olarak kullanılmaktadır. Bu yapı ayrıca ara katmanın kalınlığına bağlı olarak salınımlanan manyetik eşleşme (oscillatory magnetic coupling) özelliği göstermektedir (Parkin 1990).

GMR etkisi Fe/Cr/Fe yapısında 1988 yılında bulunmuş ve 2007 yılında Nobel fizik ödülünü almıştır. Basit bir GMR yapısı şekil 1.1 de gösterilmektedir.

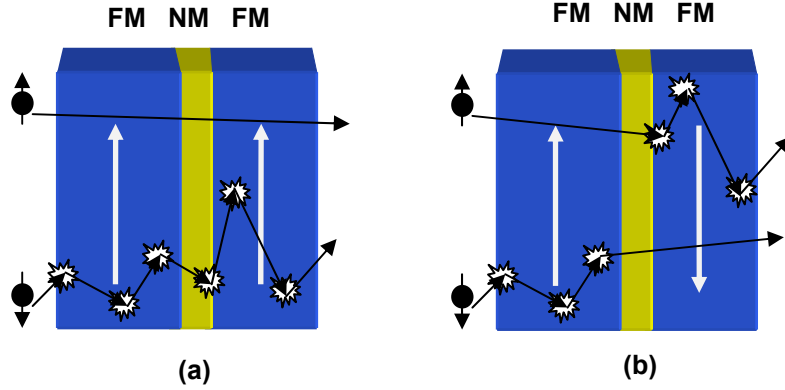


Şekil 1.1. Tipik bir GMR spin vanası yapısı.

FM katmanların manyetik yönelimleri aynı yönde ise direnç küçük ters yönde ise direnç büyüktür. Katmanlardan bir tanesi çivilenerek diğer katmanın yönelimi manyetik alan ile değiştirilir. Şekil 1.2 spin vanasının çalışma prensibini açıklamaktadır. Şekil 1.2(a) da gösterildiği gibi yukarı elektronlar saçılmadan her iki FM katmanından geçerler, oysa şekil 1.2(b) de ise yukarı ve aşağı spinler saçılmaya uğrayarak yüksek direnç oluştururlar. Manyetik direnç oranı

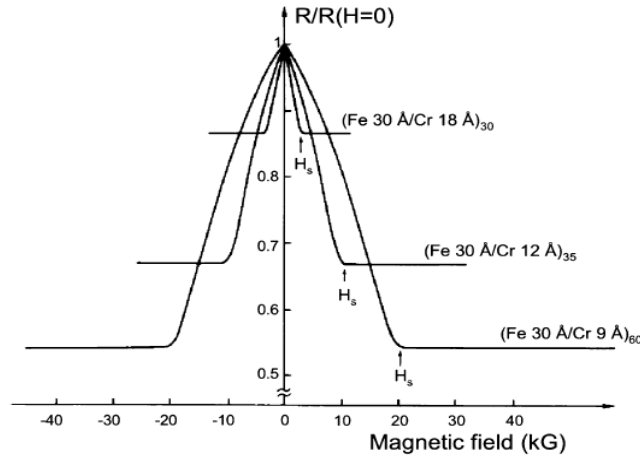
$$GMR = \left(\frac{R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}} \right) \times 100$$

formülü ile verilir. Burada $R_{\uparrow\downarrow}$ ters $R_{\uparrow\uparrow}$ ise aynı yönde yönelimleri gösterir.



Şekil 1.2. GMR yapısında transport olayı (a) paralel yönelim and (b) antiparalel yönelim.

Fe/Cr çok katmalı yapısının manyetik alan altında direnç değişimi şekil 1.3 de verilmiştir (Baibich 1988). Direnç değişim oranı Cr kalınlığı azaldıkça artmaktadır. Buda spin vana yapılarında kalınlığın ne kadar hassas (bir kaç atomik katman) olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.3. Fe/Cr çok katmalı yapısının düşük sıcaklıklarda manyetik direnç grafiği.

1.2 Manyetik Tünel Eklemleri

Ara katmanın yalıtkan olması durumundaki yapıya manyetik tünel eklemi (Magnetic tunnel junction, MTJ) denir ve aynı etki gözlenir (Modera 1995, Parkin 1999, Mitani 2003). Bu durumdaki manyetik dirence tünel manyetik direnç (tunneling magnetoresistance, TMR) denir ve transport olayı quantum mekanisel tünelleme olayı ile olur. Bu yüzden elektronların kutuplanmalarını kaybetmemeleri için bu yalıtkan tabakanın çok ince, 1-2 nm dolayında olması gerekir (Hehn 2000). TMR oranı

$$TMR = \left(\frac{R_{\downarrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}} \right) \times 100$$

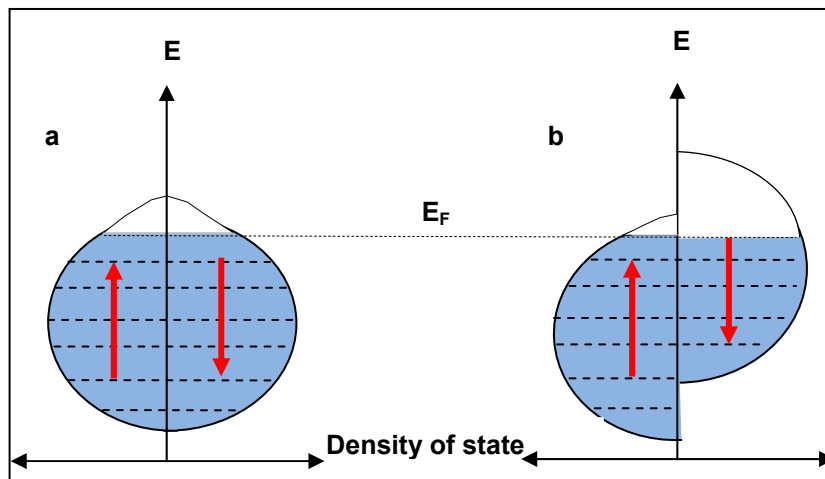
formülü ile verilir.

İlk TMR ölçümü düşük sıcaklıklarda Co/GeO/Fe ekleminde 14% olarak görülmüştür (Juliere 1975). Oda sıcaklığında TMR (Mooder, et al. 1995) tarafından CoFe/Al₂O₃/Co yapısı için %11 ve (Miyazaki 1995) tarafından Fe/Al₂O₃/Fe eklemlerinde 20% olarak bulunmuştur. Bu yapılarda Al₂O₃ amorf durumdadır. Çokkristalli CoFe (Han 2000) ve amorf CoFeB (Wang 2004) elektrodları için 50% ve 70% TMR oranı vermiştir. Yarı metalik malzemeler CrO₂, Fe₃O₄, La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃, La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃, Sr₂FeMoO₆ ve Hussler alaşımları NiMnSb ve Co₂MnSi (Alain 2005) kullanılarak yüksek TMR elde edilmiştir ancak oda sıcaklıklarında TMR azalmakta veya yok olmaktadır (Bowen 2003). Bir diğer yöntemde kristal bariyer kullanmaktır. Kristal MgO kullanmak daha az saçılma ve spinlerin kutuplanmalarını daha uzun süre muhafaza etmeye yol açar. Böylece daha yüksek TMR elde edilebilir. İlk denemeler Fe/MgO/FeCo(001) yapısında düşük sıcaklıklarda % 60 olarak elde edilmiştir, oysa aynı şartlarda amorf bariyer %13 TMR oranı vermektedir. (Bowen 2001).

Çok yüksek TMR oranı moleküler demet epitaksi yöntemi kullanılarak büyütülen tek kristal Fe/MgO/Fe yapısında düşük sıcaklıklarda %250 ve oda sıcaklığında ise %180 (Yuasa 2004) olarak verilmiştir. Aynı şekilde çokkristal CoFe/MgO/CoFe yapısında ısısal tavlama ile %300 TMR oranı elde edilmiştir (Parkin 2004). Miknatısal püskürtme ile büyütülen CoFeB/MgO/CoFeB çok katmalı yapısında düşük sıcaklıklarda 300% ve oda sıcaklığında 230% olarak bulunmuştur (Djayaprawira 2005). Bu yapıda CoFeB amorf, MgO ise (001) dokusal (textured) yapıdadır. Son olarak en yüksek TMR %500 ile CoFeB/MgO/CoFeB oda sıcaklığında (Lee 2007) tarafından tek kristal MgO barrier olmak üzere elde edilmiştir.

1.3 Manyetik Tünel Olayı

Manyetik tünel eklemlerinin çalışma prensibi FM malzeme içinde ve arayüzeylerden elektronların spinine bağlı saçılma olayı ile açıklanır. FM malzemelerde (Fe, Co, Ni) elektronların etkileşmelerinden dolayı Fermi seviyesinde elektronların durum yoğunlukları (DOS) arasında yukarı spin (çoğunluk elektronlar) ve aşağı spin (azınlık elektronlar) farklılık vardır. Bu elektronlara kutuplanmış (spin polarized) elektronlar denir. Bununla birlikte normal bir metalde Fermi seviyesinde yukarı spin ve aşağı spin durum yoğunlukları birbirine eşittir. Bu durum şekil 1.4 de şematik olarak gösterilmiştir.

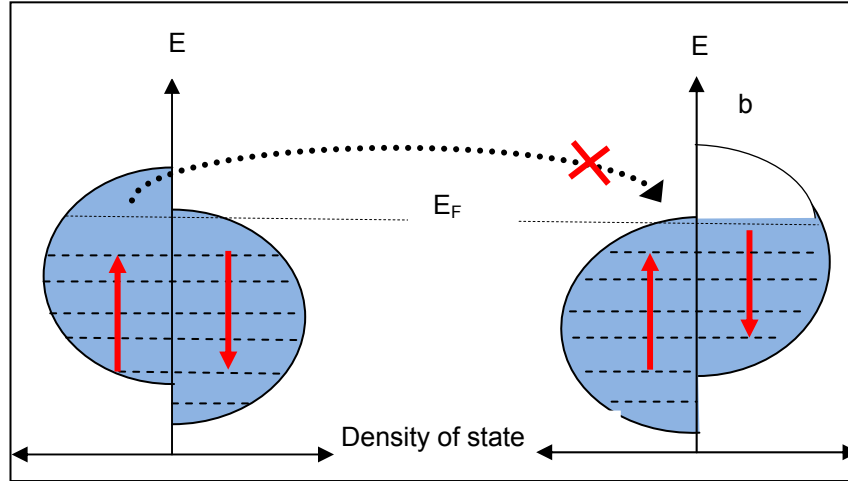


Şekil 1.4. Elektronların durum yoğunluklarının (DOS) şematik gösterimi (a) normal metal, (b) FM metal (oklar çoğunluk ve azınlık spin durumlarını gösterir).

FM malzemelerdeki farklı DOS azınlık ve çoğunluk elektronlarının farklı şekilde hareketine (transport) sebep olur (Mott 1936). Fermi seviyesinde farklı DOS' lara sahip iki FM

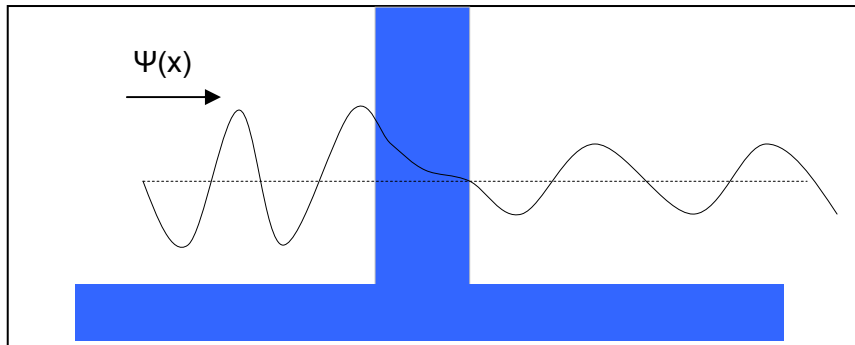
katman bir araya getirilirse, minimum enerji durumunu sağlamak için Fermi seviyesinde yüksek enerjiye sahip konumdaki FM katmanındaki kutuplanmış elektronlar Fermi seviyesinde düşük enerjiye sahip diğer FM katmanına geçiş yaparlar. Elektronlar diğer katmana ulaştıca o katmanın DOS' unun kutuplanma durumuna göre spine bağlı saçılma meydana gelebilir. Şekil 1.5 FM bir malzemede spine bağlı saçılma olayını göstermektedir.

Bu durum GMR olayını da açıklamaktadır. GMR transport olayında manyetik olmayan ara katmanda spine bağlı saçılma olmaz çünkü yukarı ve aşağı elektronlar için boş DOS' lar mevcuttur. Ayrıca yukarı ve aşağı elektronların DOS' ları eşittir, bu yüzden GMR' da ara katman elektronun hareketini önleyici bir etki yapmaz.



Şekil 1.5. Antiparalel iki FM malzemenin DOS' ları ve spine bağlı saçılma olayı.

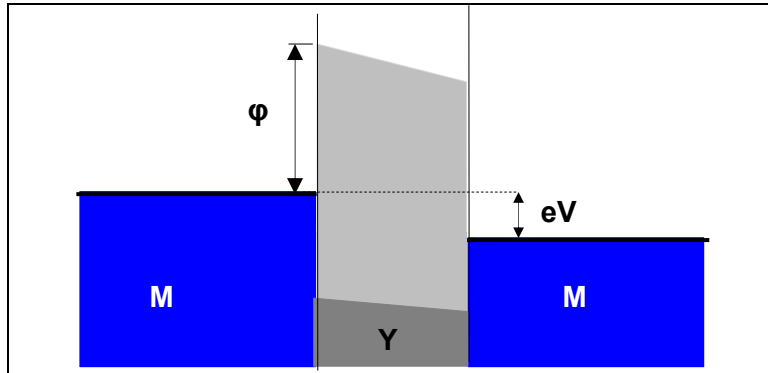
Elektronların yalıtkandan tabakadan geçişi tünelleme ile olur ve quantum mekaniksel bir olaydır. Elektronlar hem parçacık hemde tanecik özelliği gösterirler. Tünelleme elektronun dalga özelliğinin bir sunucudur. Tünelleme olayında elektronlar bir enerji bariyeri ile karşılaşınca enerjileri bariyerin enerjisinden küçük olsa bile bariyeri geçebilirler, çünkü dalga gibi davrandıkları için dalga fonksiyonları aniden yok olmaz. Bu olay klasik olarak gözlenemez. Şekil 1.6 tünelleme olayını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 1.6. Dalga fonksiyonunun bariyerden geçişi.

MTJ' lerde elektronlar bir elektrodan diğerine tünel ederler ve FM elektrodun Fermi seviyesinde farklı enerjiye sahipse tünel akımı oluşur. Elektrodun potansiyel farkı

oluşturmak için taban voltajı (eV) uygulanır. Tipik bir Metal/Yalıtkan/Metal eklemine taban voltajı uygulanmış durumu şekil 1.7 de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Metal/Yalıtkan/Metal yapısının band diyagramı.

Sol taraftaki elektrodan sağ taraftaki elektroda doğru bir tünel akımı oluşur ve bu akım

$$I_{l \rightarrow r}(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_l(E) \rho_r(E + eV) |M|^2 f(E) [1 - f(E + eV)] dE$$

formülü ile verilir. Burada, $\rho(E)$ soldaki, $\rho(E+eV)$ ise sağdaki elektrodun durum yoğunluklarını, $|M|^2$ matrix elementi bariyerden tünelleme olasılığını, $f(E)$ soldaki elektrodun dolmuşluk (occupation) olasılığını, $[1-f(E+eV)]$ ise sol taraftaki elektrodun boşluk yoğunluğunu gösterir. Toplam akım ise $I_{l \rightarrow r} - I_{r \rightarrow l}$ ile verilir. Bu tür eklemeler için Simmons tünel akım yoğunluğunu şu formülle açıklamaktadır.

$$I(V) = \frac{j_0}{d^2} \left(\varphi - \frac{eV}{2} \right) \exp \left[-Ad \sqrt{\varphi - \frac{eV}{2}} \right] - \frac{j_0}{d^2} \left(\varphi + \frac{eV}{2} \right) \exp \left[-Ad \sqrt{\varphi + \frac{eV}{2}} \right]$$

Bu formülde $J(V)$ tünel akım yoğunluğunu, A and j_0 sabitleri sırasıyla $4\pi\sqrt{2m_e^*}/\hbar$ and $e/2\pi\hbar$, φ ortalama bariyer yüksekliğini, d bariyer genişliğini, V uygulanan taban voltajı ve m_e^* ise elektronun etkin kütleğini göstermektedir (Simmons 1963). Bu formül küçük voltajlarda çizgisel (linear) davranış gösterir, ancak yüksek voltajlarda çizgisel olmayan davranış sergiler. Buda akımın M/I/M yapısından tünelleme olayı ile olduğunun göstergesidir. Ayrıca tünelleme akımının bariyerin genişliğine ve ortalama yüksekliğine exponansiyel olarak bağlı olduğu görülür. Bu formül sadece simetrik yapılar için yani her iki elektrod aynı ise geçerlidir. Eğer asimetrik yapı varsa Brinkman's formülü kullanılmalıdır (Brinkman 1970).

Tünel manyetik direnç durumunda TMR oranı spin kutuplanmış elektronlara çok sıkıca bağlıdır ve iletkenlik yukarı ve aşağı elektronlardan oluşmalıdır. Bu durumda TMR oranı şu formülle verilir,

$$TMR = \frac{R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}} = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2}$$

burada P_1 birinci ve P_2 de ikinci elektrodun kutupluluğunu gösterir. Bir ferromagnetin kutupluluğu şu formülle verilir

$$P = \frac{D_{\uparrow}(s_F) - D_{\downarrow}(s_F)}{D_{\uparrow}(s_F) + D_{\downarrow}(s_F)}$$

burada $D_{\uparrow}(s_F)$ and $D_{\downarrow}(s_F)$ ferromagnet katmanların Fermi seviyesindeki durum yoğunluklarını gösterir.

1.4 Manyetizma

Malzemeler kendilerine dışarıdan uygulanan bir manyetik alana karşı verdikleri tepkiye göre sınıflandırılırlar. Bir malzemenin mıknatıslanması verdiği tepkiyle orantılıdır ve şu formül ile verilir.

$$M = \chi H$$

Burada M mıknatıslanmayı gösterir ve hacim başına düşen manyetik dipol momenti ($M = \mu/V$) olarak verilir, χ ise manyetik duyarlılıktır. χ manyetik malzemenin cinsini ve şiddetini belirler. Bir malzeme eğer $\chi < 0$ ise diamanyetik, if $\chi > 0$ ise paramanyetik ve $\chi \gg 0$, ferromanyetik özellik gösterir.

Dış bir manyetik alan altında elektronların yörüngelerindeki değişmeden dolayı oluşan manyetizme diamanyetizm denir ve bu malzemelerin net manyetik momenti yoktur. Diamanyetik malzemeler manyetik alanda itilirler, duyarlılıkları negatiftir.

Paramanyetik malzemelerin kalıcı manyetik momentleri vardır ve pozitif duyarlılığa sahiptirler. Manyetik momentleri dış alan yokken keyfi olarak yönelirler. Manyetik alan altında net manyetik momentleri alan yönünde yönelirler. Manyetik momentler arasındaki etkileşim küçüktür ve duyarlılıkları genellikle $0 < \chi \leq 1$ arasındadır.

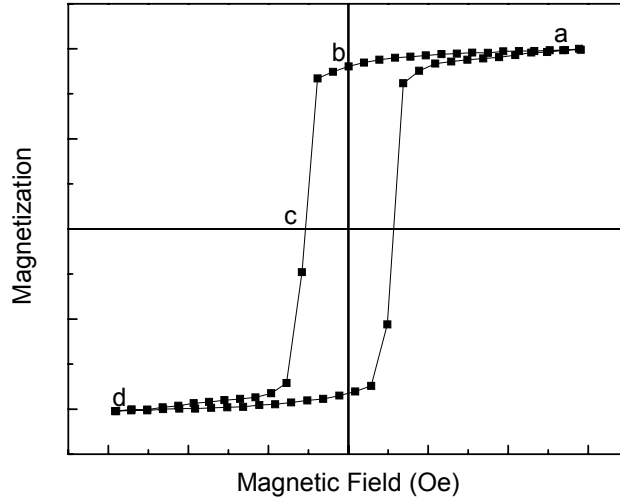
Ferromanyetizm paramanyetizmin özel bir durumudur ve kalıcı manyetik momentleri arasındaki güçlü etkileşimin sonucudur. Bu güçlü etkileşim Curie sıcaklığının altında geçerlidir, T_c . FM malzemeler dış alan yokluğunda etkileşimden dolayı aynı yönde yönelirler. Manyetik alan altında mıknatıslanmaları doyuma ulaşır. Manyetik alan kaldırıldığında momentler arasında güçlü etkileşimden dolayı yönelimlerini korurlar ve malzeme net mıknatıslanmaya (remanence magnetization) sahip olur. FM lerin duyarlılıkları büyüktür, ($\chi \gg 1$) ve manyetik alan ile exponansiyel olarak artar.

Fe, Co ve Ni en çok bilinen FM elementlerdir ve Curie sıcaklığının üzerinde paramanyetik özellik gösterirler. Tablo 2.1 bazı FM malzemelerin T_c lerini göstermektedir.

Table 1.1. Bazı ferromanyetik malzemelerin Curie sıcaklıkları.

Material	T _c (°K)
Fe	1043
Co	1394
Ni	631
Gd	317
Fe ₂ O ₃	893

FM' lerin doyum mıknatıslanması, kalıcı mıknatıslanma, coercive (zorlayıcı) alan, manyetik yapı (domain) davranışları hakkında bilgiler manyetik döngü grafiğinden elde edilir. Tipik bir manyetik döngü grafiği şekil 1.8 de gösterilmektedir.



Şekil 1.8 Ferromanyetik bir malzemenin manyetik döngü grafiği.

Bütün manyetik momentler uygulanan alan ile aynı yönde yöneldiklerinde FM doyuma ulaşır, a noktası. Alan ters yönde uygulandığında döngü aynı yolu takip etmez ve alan sıfır olduğunda malzeme mıknatıslanmıştır (remanence) b noktası. Malzemenin mıknatıslanması sıfır olduğu noktada uygulanan alan değeri zorlayıcı alandır H_c, c noktası.

1.5 Manyetik Karşılıklı etkileşme (Manyetik Exchange Interaction)

Karşılıklı etkileşme elektrostatik etkileşmedir ve FM davranışın nedenidir. Elektronların dalga fonksiyonları asimetriktir ve elektronlar aynı yerde ve aynı yönelimde bulunamazlar. Bu asimetriklilik elektronları birbirlerinden paralel yönelimde olmak üzere uzak tutarak Coulomb itme enerjisini azaltır. Bu duruma karşılıklı etkileşim denir ve atomlar arasında ki etkileşim enerjisi $E_{ex} = -2J_{ex}S_iS_j$, ile verilir. Burada $\hbar S_i$ ve $\hbar S_j$ i^{th} and j^{th} atomlarının spin açısall momentumlarını, J_{ex} ise karşılıklılık integralidir. Bu etkileşimin sonucu olarak komşu manyetik iyonlar paralel (FM) veya antiparalel (antiferromanyetik, AFM) olarak yönelirler. Karşılıklı etkileşim üç grupta incelenir.

1.5.1 Direk Karşılıklı Etkileşme

Direk etkileşme (direct interaction) atomlar arasındaki uzaklığın küçük olduğu durumdaki manyetik momentler arasındaki güçlü etkileşmedir. Atomlar arasındaki uzaklık arttıkça etkisi çok azalır. İki atom birbirine yakın ise değerlik elektronları zamanlarının büyük kısmını atomlar arasında geçirir, bu yüzden spinlerin yönelimleri antisimetrik dalga fonksiyonu ve Pauli ilkesi gereğince antiparalel olmak zorundadır. Antiparalel yönelim negatif etkileşmeye sebep olur. Şekil 1.9 da direk etkileşme şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Atomlar arası küçük mesafe için antiparalel yönelim.

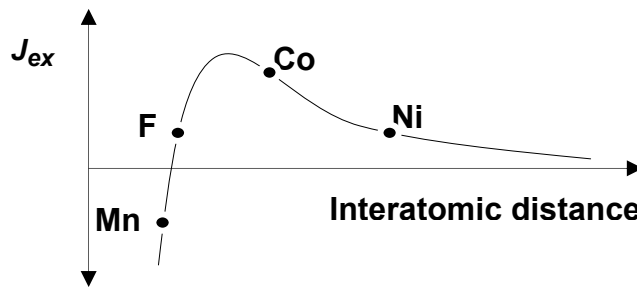
Atomlar arasındaki mesafe büyük ise elektronlar arasındaki etkileşim minimum olur ve bu durumda elektronlar Coulomb enerjisini küçültmek için paralel yönelimi tercih ederler, ayrıca karşılık integrali, J_{ex} , pozitif olur.



Şekil 1.10. Büyük atomlar arası mesafe için paralel yönelim.

J_{ex} integrali pozitif veya negatif olabilir. İntegralin işareti Coulomb ve kinetik enerji arasındaki dengeye bağlıdır. Şekil 1.11 J_{ex} integralinin atomlar arasındaki uzaklığa bağlı olarak değişim grafiğini (Bethe-Slater curve) göstermektedir. Küçük uzaklıklarda yönelim antiparalel ve J_{ex} negatif (AFM), büyük uzaklıklarda yönelim paralel ve J_{ex} pozitifdir (FM).

Spin vana yapılarında direk etkileşim bariyer katmanında oluşabilecek nokta deliklerden (pin holes) dolayı FM katmanlar arasında görülebilir.



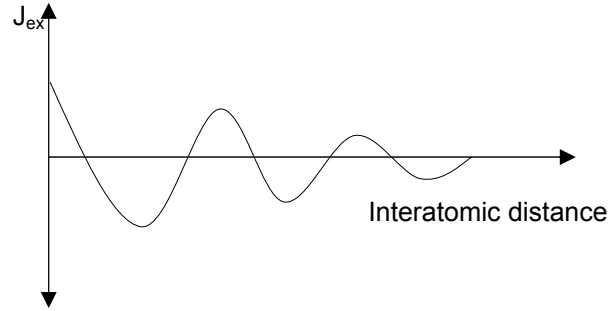
Şekil 1.11. The Bethe-Slater eğrisi.

1.5.2 İndirek Karşılıklı Etkileşme

İndirek etkileşme (indirect exchange interaction) atomik manyetik dipoller arasındaki uzaklığın büyük olduğu durumlarda görülür ve RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) etkileşmesi olarak bilinir. Metallerde görülen ve iletim elektronlarının sebep olduğu etkileşimdir. Manyetik bir iyon yakınındaki bir iletim elektronunu karşılıklı etkileşim yoluyla

kutuplar ve iletim elektronun bu kutuplanması yakınındaki başka bir manyetik iyon tarafından algılanır.

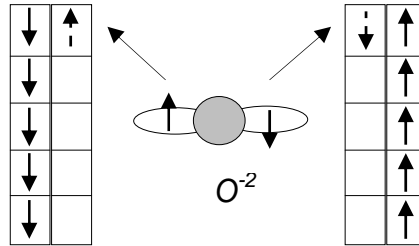
İndirek etkileşme $-2J_{ex}S_iS_j$ ile verilir. Burada J_{ex} in işareti değişir ve ayrıca şiddetide manyetik iyonlar arasındaki uzaklık arttıkça azalır. J_{ex} işaretine bağlı olarak etkileşme FM veya AFM olur. J_{ex} integralinin değişim grafiği şekil 1.12 de verilmiştir. Spin vanalarında bu etkileşme bariyerin bir kaç nanometreden büyük olduğu durumlarda gözlenir.



Şekil 1.12. İndirek etkileşimin atomlar arası uzaklığa karşı grafiği.

1.5.3 Süperetkileşme

Süperetkileşme (superexchange) geçiş metal iyonlarında ve uzaklığın büyük olduğu durumlarda görülür. Etkileşme P iyonları vasıtasıyla olur. P iyonunun P_x yörüngesinde iki elektron bulunur ve bu elektronlar taban seviyede ters yönelime sahiptirler. Bu iyonun her bir elektronu yakınındaki 3d yörüngesi ile paylaşılır. Böylece paylaşılan elektronlar yönelimlerini korurlar. Dolayısıyla 3d yörüngesindeki son spin konfigürasyonunu eşleşme mekanizmasını belirler. Şekil 1.13 de oksijen iyonu sayesinde AFM olarak etkileşen iki geçiş metal iyonu gösterilmektedir.



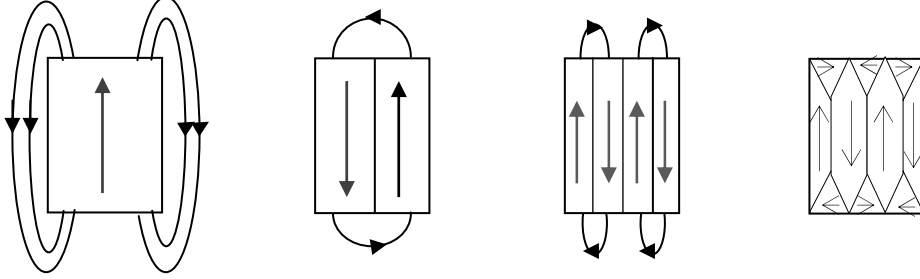
Şekil 1.13. İki geçiş iyonunun O_2 iyonu sayesinde antiferromanyetik olarak eşleşmesi.

1.6 Manyetik Bölgeler

Ferromanyetik malzemeler küçük manyetik bölgelerden (manyetik domains) oluşur. Bir manyetik bölge içindeki bütün manyetik momentler bir yönde yönelir ve birbirlerinden manyetik bölge duvarları ile ayrılırlar. Bu bölge duvarları küçük geçiş bölgeleridirler ve ferromanyetik malzemelerin manyetik özelliklerini anlamada büyük rol oynarlar.

Manyetik bölgeler manyetostatik enerjiyi minimize etme gereğinden doğarlar. Minimum enerji durumu stray alanlardan ve bölge duvarlarının katkılarından gelen enerjinin minimum olması durumunda gerçekleşir (Hook 1995). Bu durumda bölge büyüklüğü ideal ölçüye ulaşır. Manyetik parçacığın ölçüsü ideal ölçüden büyük olduğu durumda stray alandan gelen katkı yeni bir bölge duvarı oluşumunun yapacağı katkıdan daha büyüktür. Bu durumda

yeni stray alandan gelen enerjiyi azaltmak için manyetik parçacık manyetik bölgelere bölünür ve yeni bölge duvarları oluşur. Şekil 1.14 yeni manyetik bölgelerin oluşumunu göstermektedir. Bununla birlikte yeni bölge duvarlarının oluşumu toplam enerjiyi artırır, bu yüzden bölgelere bölünme işlemi manyetostatik enerjideki azalma yeni bölge duvarlarının oluşumu için gerekli enerjiden büyük olmasına kadar devam eder (Kumar 2004).



Şekil 1.14. Yeni manyetik bölgelerin oluşumu.

Eğer manyetik parçacığın ölçüsü ideal değerden küçük ise bölge duvarı enerjisi stray alan enerjisinden büyük olur ve bölgeler bölünme işlemi durur. Büyüklüğü bu kritik ölçüden küçük olan parçacıklara tek bölge parçacığı denir. Tablo 1.2 bazı manyetik malzemelerin kritik tek bölge büyüklüklerini vermektedir.

Table 1.2. Küresel ve şekil anizotropisi olmayan bazı manyetik malzemelerin kritik büyüklükleri.

Material	$D_{crit}(nm)$
Fe	70
Co	14
Ni	55
Fe_3O_4	128
$\gamma-Fe_2O_3$	166

Bu kritik ölçüler karşılıklı eşleşme ve manyetostatik enerjinin rekabetinden dolayı oluşur ve parçacıkların şekline, anizotropisine ve doyum manyetikleşmesine bağlıdır.

Dış bir manyetik alanın yokluğunda bir manyetik bölgedeki bütün manyetik momentler bir yönde yönelir ve bu tercih edilen yönetime kolay eksen denir. Kolay eksenin yönelimi farklı manyetik bölgeler için farklıdır.

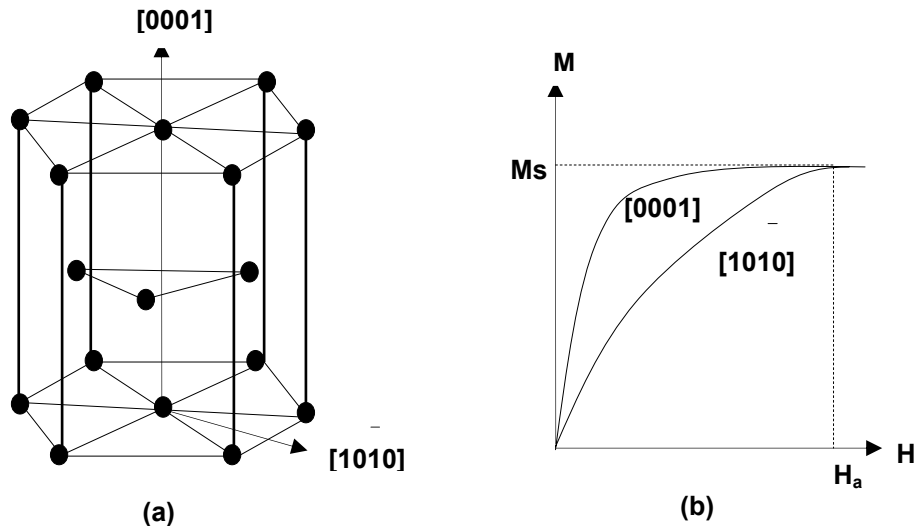
1.7 Manyetik Anizotropi

Manyetik anizotropi manyetik malzemelerin karakterizasyonunda en önemli faktörlerden biridir ve manyetik döngüyü kuvvetlice etkiler. En basit anlamıyla anizotropi manyetik malzemelerin özelliklerinin ölçüldükleri yöne bağlı olarak değişmesi olarak verilir. En önemli manyetik anizotropiler: manyetokristal, şekil ve karşılıklık (exchange) anizotropileridir.

1.7.1 Manyetokristal Anizotropi

Manyetik bir malzemenin manyetik momentleri genellikle kristal yapılarının bir yönünde yönelmeyi tercih ederler ki buda kolay eksenleridir. Kolay eksen elektronun spin-

yörünge eşleşmesinin sonucudur ve kolay eksen yönünde yönelim daha az alan gerektirir. Elektronun yörüngesel hareketi örgü noktasından (crystal field) kuvvetlice etkilenir. Bu etki dolayısıyla elektronun spin açısal momentumu üzerindedir spin-yörünge eşleşmesinden dolayı görülür. Bu yüzden elektronun kristal alanı, yörüngesel açısal momentumu ve spin açısal momentumu arasında bir ilişki (correlation) vardır. Bir dış alan spini döndürmeye çalıştığı zaman, elektronun yörüngeside dönmeye zorlanır. Ancak yörüngesel hareket kristal alan tarafından bloke edildiği için spin ekseninin yöneliminin değişmeside bloke edilmiş olur. Böylece elektronun manyetik dipole momentu bu etkiler altında bir yönde yönelmeyi tercih eder. Spin orbit eşleşmesini yenerek elektronun spin eksenini kolay eksen yönünden başka yöne değiştirmek için gerekli enerjiye anizotropi enerjisi denir. Şekil 1.15 kobaltın altıgen (hexagonal) kristal yapısını ve kolay ve zor eksenlerinin manyetik döngü eğrilerini göstermektedir. [0001] eğrisi kolay, [1010] eğrisi ise zor eksenini gösterir.



Şekil 1.15 (a) Kobaltın Hcp kristal yapısı, (b) kolay ve zor eksenlerdeki manyetik eğrileri.

Altıgen yapı için manyetokristal kolay eksen c eksenidir ve taban düzlemdeki herhangi bir yön zor eksenidir. Kolay ve zor eksen arasındaki enerji farkı manyetokristal anizotropi enerjisidir, (E_a), ve şu formül ile verilir.

$$E_a = K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots$$

Burada K_i enerji yoğunluğu ve θ manyetizasyon vektörü ve kolay eksen arasındaki açıdır. Simetrik kubik kristaller için, anizotropi enerjisi kristal eksene göre manyetizasyon cosinus yönleri (direction cosines of the magnetization) kullanılarak hesaplanır ve şu formülle verilir.

$$E_a = K_0 + K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2) + \dots$$

Burada $\alpha_i = \cos \theta_i$ mıknatıslanma yönü ve i^{th} eksen arasındaki açıdır.

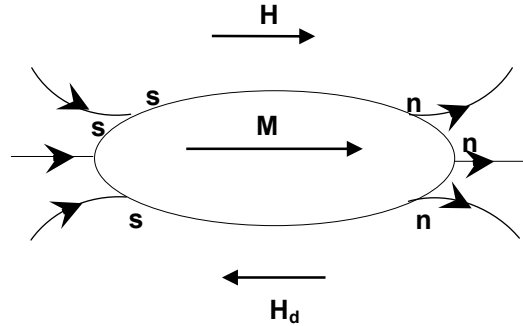
1.7.2 Şekil Anizotropisi

Şekil anizotropisi (shape anisotropy) manyetik malzemenin boyutlarına bağlıdır ve mıknatıslanmama (demagnetizing) faktörünün bir sonucudur. Mıknatıslanmış bir örnek yüzeyde manyetik kutuplar oluşturur ve bu kutuplar mıknatıslanmama alanı denen başka bir

mıknatıslanma kaynağı (H_d) oluşturur. Mıknatıslanmama alanı kendisini oluşturan alanın tersi yönündedir. Bu durumda örnek içindeki net mıknatıslanma şu formül ile verilir,

$$H_i = H - H_d$$

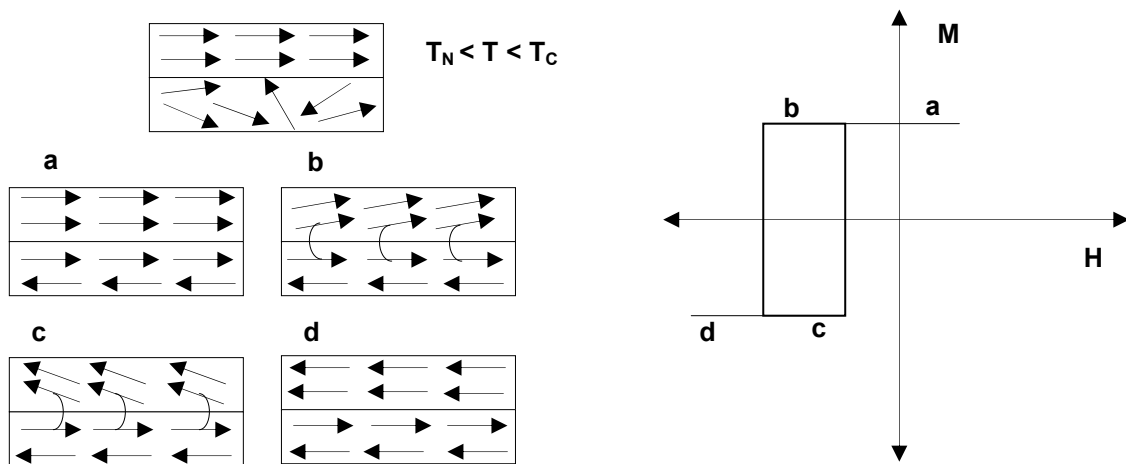
Mıknatıslanmama alan mıknatıslanma ile orantılıdır ve orantılılık sabitine mıknatıslanmama faktörü denir, $H_d = N_d M$. N_d örneğin geometrisine bağlıdır. Şekil 1.16 da gösterilen geotmetrik örneğe bir dış alan uygulandığında uzun eksen yönündeki mıknatıslanmama alanı kısa eksen yönündekinden küçük olur, böylece uzun eksen kolay eksen gibi davranır. Bu durum küresel bir örnekte görünmez çünkü küresel örneklerde şekil anizotropisi yoktur.



Şekil 1.16. Yüzey kutuplaşmadan dolayı oluşan mıknatıslanmama alanı.

1.7.3 Karşılıklılık Anizotropisi

Karşılıklılık (exchange bias) anizotropisi en önemli anizotropilerden biridir, çünkü bir çok teknolojik aygıtlarda ve özellikle manyetodirenç aygıt uygulamalarında kullanılmaktadır. Ferromanyetik ve antiferromanyetik katmanlar arasındaki etkileşmenin sonucudur (Meiklejohn 1957). FM/AFM bir sistem manyetik alan altında Neel sıcaklığının altına soğutulursa, ikinci katmandaki (AFM) spinler antiferromanyetik olarak sıralanırlar (ordered) ve FM katmanındaki spinlere bir tork uygulayarak kendilerinin yönünde yönlendirmelerini sağlarlar. Bir AFM' in yönünü değiştirmek FM' e göre daha zordur. Bu torktan dolayı FM/AFM sistemindeki FM katmanının manyetik yönelimi dış manyetik alan altında döndürülmesi zordur, ancak eğer dış manyetik alan yönü FM katmanının orijinal mıknatıslanma yönünde ise yönünün değiştirilmesi kolaydır. Bu iki etkinin sonucu olarak sistemin manyetik döngüsünde bir kayma oluşur. Şekil 1.17 de karşılıklılık anizotropi olayı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.17. FM/AFM sisteminde spin dinamiğinin şematik gösterimi.

BÖLÜM 2

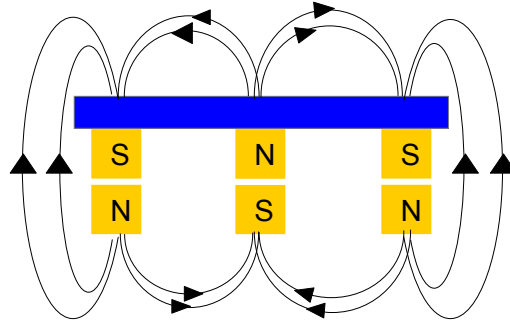
DENEY

2.1 Amaç

Bu çalışmanın amacı iki FM katman arasına yerleştirilen yalıtkan bir filmde oluşan ve spin vanası görevi yapan manyetik tünel eklemlerinin oluşturulması ve tünel manyetik direnç ölçümlerinin yapılmasıdır. MTJ' ler iki şekilde hazırlanabilir, birinci yöntemde maskeler ve litografi kullanılarak eklemler filmler büyütülürken oluşturur. İkinci yöntem ise sürekli çok katmanlı yapılar büyütülerek sonradan şekillendirme (etching, litografi) yöntemi ile eklemler oluşturulur. Biz her iki yöntemde kullanarak MTJ' ler oluşturduk, yapısal, manyetik ve elektriksel ölçümlerini yaptık. Bu bölümde filmlerin büyütülmesi, yapısal ve manyetik karakterizasyonlar, eklemlerin oluşturulması ve manyetik direnç ölçümlerinin yapılmasındaki deneysel adımlar anlatılacak ve kullanılan sistemler kısaca tanıtılacaktır.

2.2 Filmlerin Büyütülmesi

Filmler miknatisal püskürtme (magnetron sputtering) tekniği ile büyütülmüşlerdir. Püskürtme yöntemi ince film büyütülmesinde kullanılan çok yaygın bir tekniktir. Bir hedef üzerine yüksek enerjili iyonlar gönderildiğinde iyonların hedefle çarpışmasından dolayı (momentum transfer) hedefin yüzeyinden atomlar ve/veya moleküller halinde ayrılırlar, hedeften bir kaç santimetre uzağa yerleştirilen bir alttaş (substrate) üzerine bu ayrılan parçacıklar yapışırlar. Genellikle argon iyonları püskürtme için kullanılmaktadır. Magnetron püskürtme tekniğinde ise püskürtme başlığına miknatislar konarak manyetik alandan dolayı elektronlar hedefe yakın tutulur. Böylece argon gazının iyonlaşmasını arttırmak suretiyle püskürtme hızı artırılır. Tipik bir miknatisal püskürtme başlığında miknatisal alan şekil 2.1 de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Miknatisal püskürtme başlığında miknatisların konumu ve manyetik alan çizgileri.

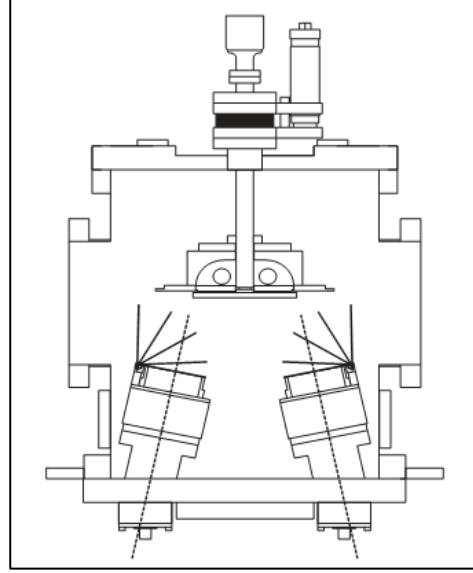
Büyütülecek malzemenin elektriksel özelliklerine bağlı olarak DC veya RF püskürtme kullanılır. DC püskürtme iletken malzemelerin, RF ise yalıtkanları püskürtmek için kullanılır. RF püskürtme hızı genellikle DC' den daha düşüktür. RF püskürtmede 13,56 Mhz' li güç kaynağı kullanılır. RF anod ve katod uçlarını değiştirdiği için yalıtkan malzemelerde hedef yüzeyinde yük birikmesi önlenir.

Bu çalışmada bütün filmler şekil 2.2a da gösterilen "AJA ORION 5 UHV" ultra yüksek vakum miknatisal püskürtme sistemi kullanılarak büyütülmüşlerdir. Bu sistem örnek yükleme odası ve film büyütme odasından oluşmaktadır. Beş adet 2" (inch) püskürtme başlık, quartz kristal kalınlık ölçer, halojen lambalı örnek ısıtıcı ve örnek döndürücü sistem bulunmaktadır. İki adet RF ve üç adet DC güç kaynağı mevcuttur. Püskürtme başlıklardan iki tanesi manyetik malzemeler büyütme için tasarlanmıştır. Alttaşları büyütme öncesi temizlemek için RF taban

voltajı (RF bias) uygulayacak sistem mevcuttur. Sistemin vakum seviyesi yüklenme odası için 2×10^{-6} torr ve film büyütme odası için ise 2×10^{-7} torr mertebesindedir. İnce ve çok katmanlı filmlerin tekrarlanabilirlikleri oldukça zordur. Püskürtme sistemimiz bilgisayar kontrollü olup yüksek seviyede tekrarlanabilirlik kolayca elde edilebilmektedir. Şekil 2.2b de sistemin büyütme odası şematiği gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.2. (a) AJA Orion 5 UHV mıknatsal püskürtme sistemi, (b) büyütme odası şematiği.

Film büyütme parametreleri:

Filmler yüksek saflıkta argon gazı kullanılarak genellikle 3 mtorr vakum ve oda sıcaklığında büyütülmüşlerdir. Kalınlığın tekdüze (uniform) olması için örnek büyütülme esnasında döndürülmüştür. Filmlerin kalınlıkları önce quartz kalınlık ölçer ile kalibre edilmiştir. Film kalınlıkları ayrıca atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ölçülerek ortalama kalınlık belirlenmiştir. Her iki sistem çok yakın değer vermektedir. Püskürtme başlıkları her film tabakasının büyütülmesinden önce kirliliğin önlenmesi için iki dakika önpüskürtmeye tabi tutulmuştur. Filmler Si(100)/SiO₂(1µm) üzerine büyütülmüşlerdir. SiO₂ seçmemizin sebebi elektriksel ölçümlerde alttaştan gelecek katkının önlenmesidir.

2.3 Yapısal Analiz Sistemleri

Öncelikle MTJ'lerin büyütülmesinde kullanılacak filmlerin yapısal özelliklerini anlamak için filmler tek katmanlı olarak büyütülerek x-ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle çalışılmıştır. XRD spektrumu genellikle 20-80° arasında yapılmıştır. XRD filmlerin kristal yapısını belirlemede kullanılan en etkin yöntemdir. XRD' de belirlenen pik genişliği (FWMH) sayesinde filmlerin yapı büyüklükleri ve piklerin buldukları açılar ilede kristal yönelimleri ve kristal yapıları belirlenir. Ayrıca ince filmlerde belirli piklerin açılarındaki kaymalardanda filmlerde oluşan stres anlaşılır. XRD ölçümleri İYTE malzeme araştırma merkezinde bulunan toz kırınım sistemi (powder diffractometer) ile yapılmıştır.

Tek ve çok katmanlı filmlerin yüzey pürüzlülükleri fizik bölümünde bulunan atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ölçülmüştür (NT-MDT Solver Nova Tech). Bütün ölçümler tıklama (tapping) modunda ve genellikle bir kaç mikron olacak şekilde yapılmıştır.

Filmlerin kesit görüntüleri İYTE malzeme araştırma merkezinde bulunan taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscopy, Phillips XL-30S FEG) ile yapılmıştır.

2.4 Manyetik Döngü Ölçümleri

Manyetik döngü (M-H) ölçümleri İYTE fizik bölümünde bulunan titreşimli örnek manyetometresi (VSM Lakeshore 7407) ile yapılmıştır. Şekil 2.3 de VSM sistemi ve şekil 2.4 de ise şematiği gösterilmektedir. VSM elektromıknatıs, titreştirici başlık ve iki adet bobinden (coil) oluşur. Çalışma prensibi Faraday kanunu ile açıklanır. Tekdüze bir manyetik alan içine bir örnek konulduğunda örnekte manyetik moment, m , indüklenme ile oluşur. Örnek bu durumda sinusoidal şekilde titreşmeye maruz bırakılır. Bobindeki manyetik akı değişiminden dolayı bobinlerde indüklenmeden dolayı voltaj oluşur. Bu voltaj örneğin mıknatıslanması ile orantılıdır. İndüklenmiş voltaj

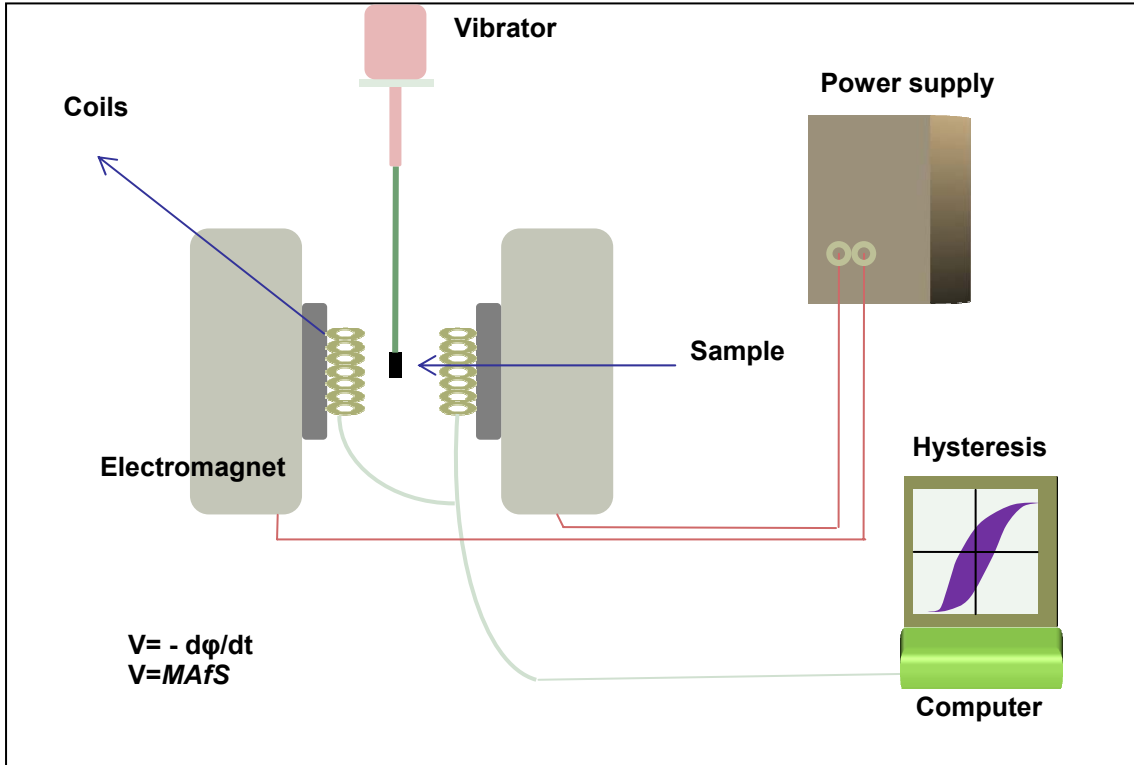
$$V = mAfS$$

ile verilir, burada m manyetik moment, A titreşimin şiddeti (amplitude) f titreşme frekansı, S ise bobinlerin hassasiyetini verir. Moment hassaslığı $0.1 \mu\text{emu}$ ve titreşme frekansı ise 84 Hz dir.

Tek katmanlı ferromanyetik filmler SiO_2 ve kontak Ta film üzerine büyütülerek manyetik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sürekli filmlerden oluşturulan MTJ yapılarının M-H ölçümlerinden FM filmlerin farklı H_c değerleri verdikleri gösterilmiştir. Ayrıca FM filmlerin manyetik anizotropi ölçümleri Si alttaşa göre farklı açılarda, genellikle $0-180^\circ$ arasında ölçülmüştür. Bazı MTJ yapılarının küçük (minor) manyetik döngüleri ölçülerek FM katmanları arasındaki eşleşme mekanizması çalışılmıştır.



Şekil 2.3. Titreşimli örnek manyetometre sistemi (VSM).



Şekil 2.4. Titreşimli örnek manyetometre sistemi şematiği.

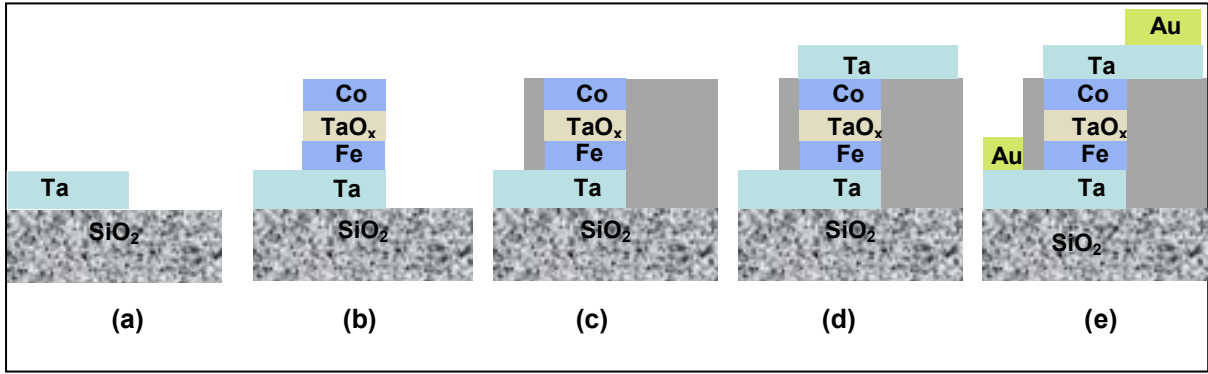
2.5 Manyetik Tünel Eklemlerinin Oluşturulması

MTJ' ler iki farklı yöntemle oluşturulmuşlardır.

Birinci yöntem:

MTJ yapılarının fotolitografi ile film büyütülme esnasında oluşturalma basamakları sırasıyla şöyledir.

1. Birinci maske kullanılarak SiO_2 üzerine Ta kontaklar büyütülmüştür, şekil 2.5a.
2. Örnek atmosfere çıkarılarak ikinci maske yapıldıktan sonra film tekrar büyütme sistemine konarak farklı boyutlarda 30x30, 50x50, 100x100 mikrometre eklem olarak, ilk FM katman (Fe,Co, NiFe)+ Ta_2O_5 , Al_2O_3 , + ikinci FM katman (Fe,Co, NiFe) büyütülerek örnek tekrar atmosfere çıkarılmıştır, şekil 2.5b.
3. Üst katman maskesi oluşturularak MTJ bloklarının kontak yapmasını önlemek için SiO_2 yalıtkan film ile kaplanmıştır, şekil 2.5c.
4. Üst Ta kontak maskesi hazırlanmış ve üst Ta kontak 24 nm olacak şekilde büyütülmüştür, şekil 2.5c.
5. Son olarak iletkenliği ve ayrıca oksitlenmeyi önlemek için kontaklar bir kaç nm altın (Au) ile kaplanmıştır, şekil 2.5c.
6. Alt ve üst Ta katmanlarından kontaklar gümüş boya ile alınarak I-V ölçümleri yapılmıştır.

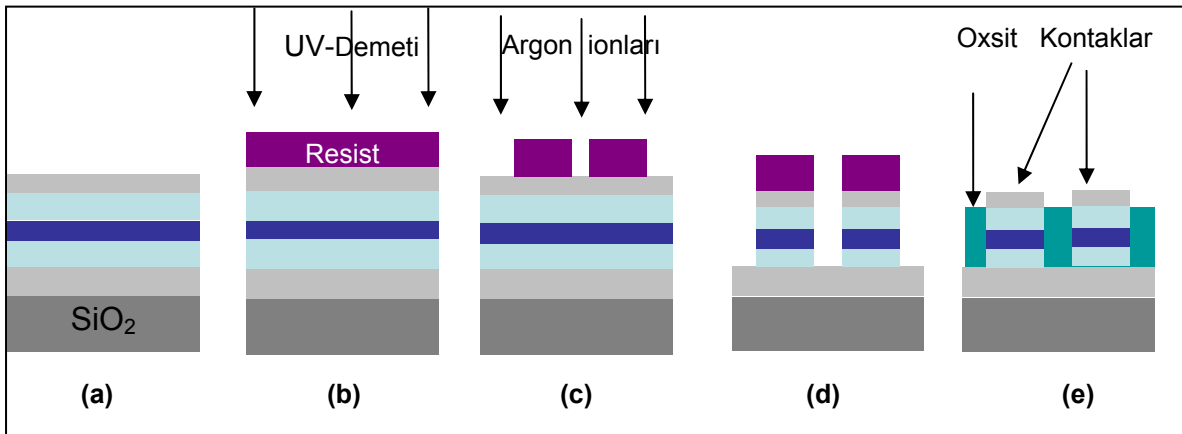


Şekil 2.5. Film büyüme esnasında litografi yöntemi ile MTJ oluşturma basamakları.

İkinci yöntem:

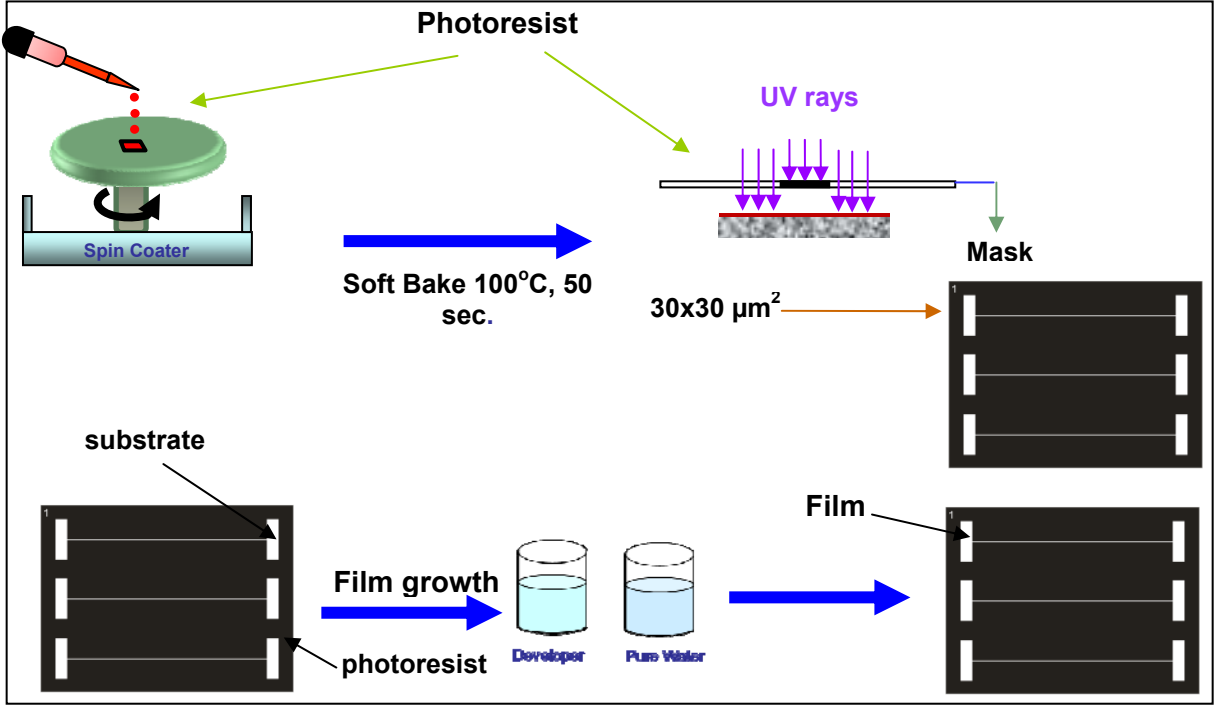
Şekil 2.6 İkinci yöntem ile MTJ oluşturma temel basamaklarını göstermektedir.

1. Çok katmanlı sürekli filmler 4 x 4 cm boyutlarında alttaş üzerine büyütülmüşlerdir. SiO₂ üzerine sırasıyla Alt kontak Ta + 1. FM katman + Oksit tabaka + 2. FM katman + son olarak yine Ta üst kontak büyütülmüştür, şekil 2.6a.
2. Örnek atmosfere çıkarılarak birinci maske kullanılarak litografi işlemi yapılmıştır, şekil 2.6b.
3. Örnek UV demetine tabi tutularak SiO₂ seviyesine kadar aşındırılmıştır, şekil 2.6c.
4. Aşındırma ve resist temizleme işleminden sonra şekil 2.6d elde edilmiştir.
5. İkinci defa resist işlemi ile oluşturulan yanal yüzeylerinin birbirleri ile kontak yapmasını önlemek için örnek film büyüme sistemine konarak yalıtkan SiO₂ kaplanmıştır, şekil 2.6e.
6. Örnek atmosfere çıkarılarak üçüncü defa litografi yapılarak üst kontak Cu takaba büyütülmüştür.
7. MTJ'ler farklı boyutarda 30x30, 50x50, 100x100 olacak şekilde oluşturulmuşlardır.



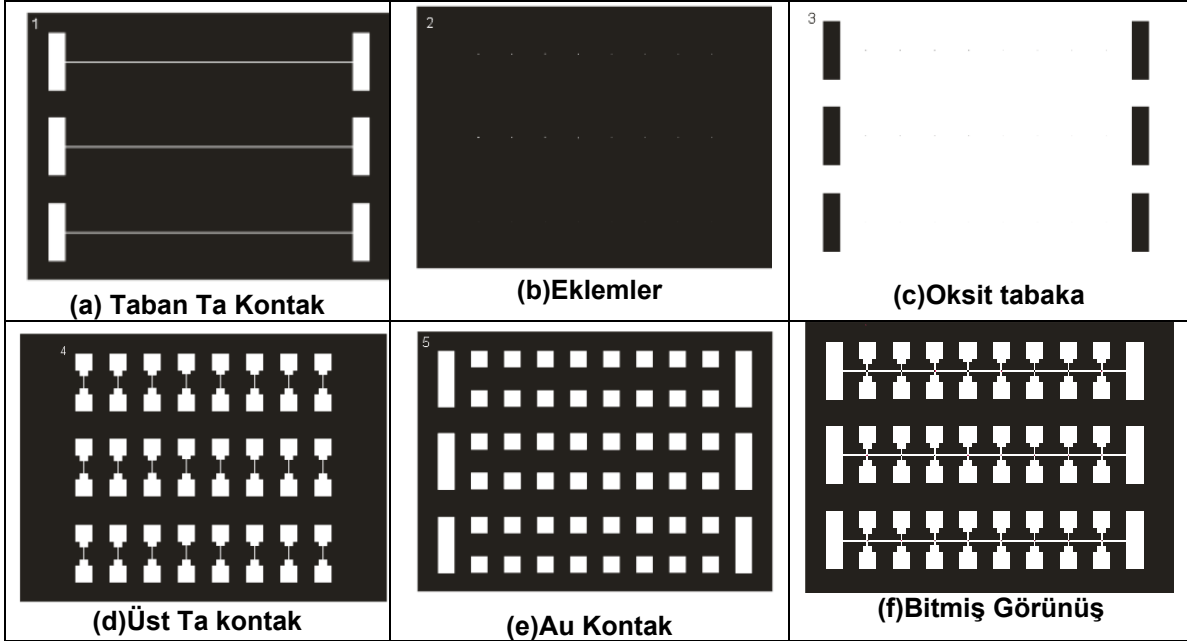
Şekil 2.6. Sürekli filmlerden aşındırma ve litografi yöntemi ile MTJ oluşturma basamakları.

Fotolitografi işlemleri her basamak için aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir. Bu fotolitografi işlemleri her bir maske için tekrarlanmıştır.



Şekil 2.7. Fotolitografi basamakları.

Birinci yöntem ile oluşturulan MTJ'lerde kullanılan maskeler Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Her iki yöntemde bitmiş görünüş Şekil 2.8f'deki gibidir. Üst sıradaki 8 eklemden ilk 4 tanesi 100x100 μm², ikinci dört tanesi 100x50 μm², ikinci sıradaki eklemlerden ilk dört tanesi 60x60 μm² ve ikinci dört tanesi 60x30 μm² ve alt sıradaki eklemlerden ilk dört tanesi 20x20 μm² ve ikinci dört tanesi ise 20x10 μm² boyutlarındadır. Bu değişik boyutlar, (2:1) oranı, dirençlerini farklı boyutlarda kontrol amaçlı olarak büyütülmektedir.



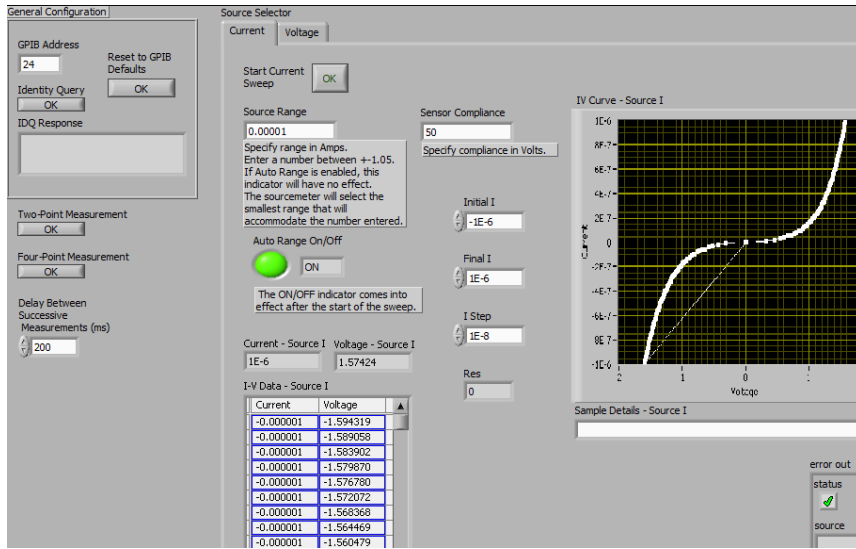
Şekil 2.8. Film büyüme esnasında MTJ oluşturmada kullanılan maskeler.

Şekil 2.8f'de bitmiş görünüşteki her iki uçtaki büyük dikdörtgen Ta filmler alt kontaklar bunların arasındaki küçük kare şeklindekiler ise üst Ta veya Cu kontaklardır. I-V ölçümleri için

alttaki (örneğin sol taraftaki) alt Ta ve herhangi bir üst Ta kontakta akım verilir, ve yine alttaki Ta (sağ) ve üstteki akım verilen Ta kontaklarının karşısındaki kontakta gerilim okunur. Üstteki küçük kontaklar sırasıyla değiştirilerek bütün eklemlerdeki I-V ler ölçülür.

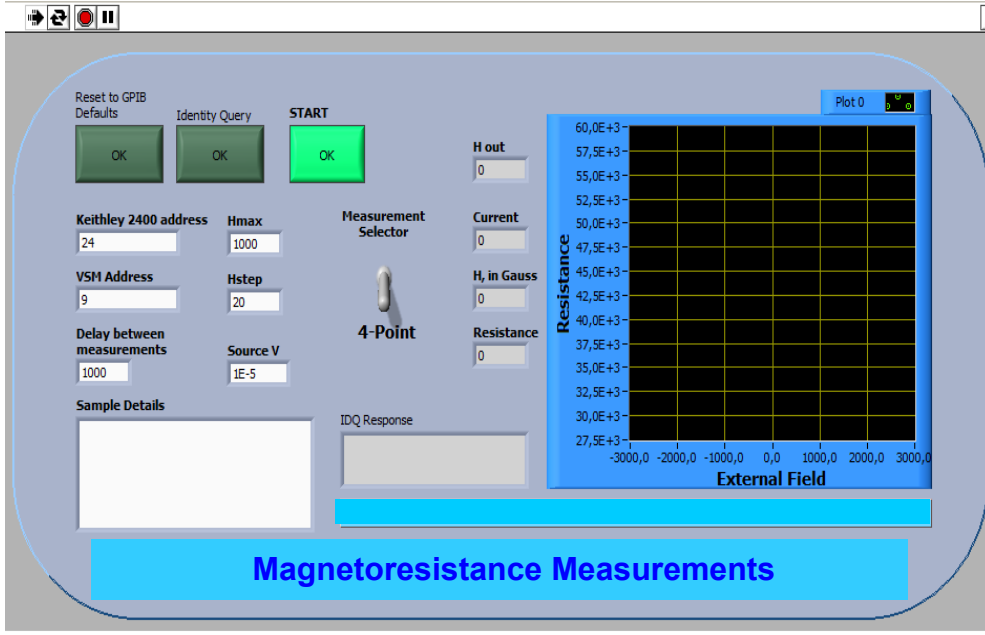
2.6 Manyetik Direnç Ölçüm Sistemleri

Elektriksel ölçümler 4 nokta (4 point probe) tekniği ile ölçülmüştür. Keithley 2400 akım kaynağı ve labView de yazılan I-V program bilgisayar kontrollu olacak şekilde kullanılmıştır. Akım değerleri genellikle $-1 \mu\text{A}$ to $1 \mu\text{A}$ arasında ve 10 nA basamaklarla olacak şekilde yapılmıştır. I-V için kullanılan program şekil 2.9 da gösterilmektedir.

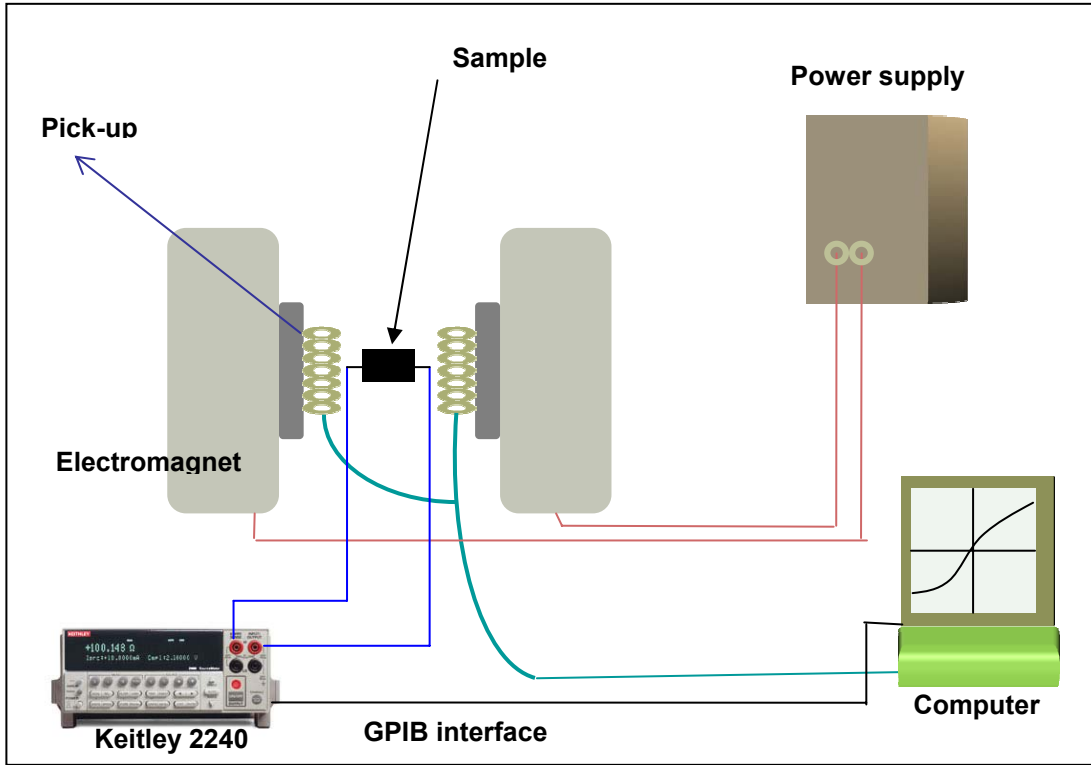


Şekil 2.9. I-V ölçümleri için kullanılan program.

Manyetik direnç ölçümleri için labView' de ayrı bir program yazılmıştır. VSM' e integre edilen bu program ile manyetik alan VSM software programından kontrol edilerek aynı zamanda I-V ölçülmüştür. TMR ölçümleri için yazılan program şekil 2.10 da ve manyetik direnç ölçüm sistemi şematığı şekilde 2.11 de gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Manyetik-direnç ölçümleri için kullanılan R-H programı.



Şekil 2.11. Manyetik-direnç ölçüm sistemi şematığı.

BÖLÜM 3

SONUÇLAR

Bu çalışmada manyetik tünel eklemleri oluşturmak için çok katmanlı sürekli filmler miknatısal püskürtme yöntemiyle büyütülmüş, yapısal ve manyetik özellikleri farklı karakterizasyon teknikleri ile yapılmıştır. MTJ' ler fotolitografi tekniği ile farklı boyutlarda oluşturulmuş ve elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Bu bölümde yapısal ve manyetik analiz sonuçları verilecek ve aralarındaki ilişki (correlation) gösterilecektir. Daha sonra oluşturulan bazı MTJ yapılarının elektriksel analiz sonuçları verilecektir.

3.1 Yapısal Analiz Sonuçları

3.1.1 X-Işını Kırınımı Sonuçları

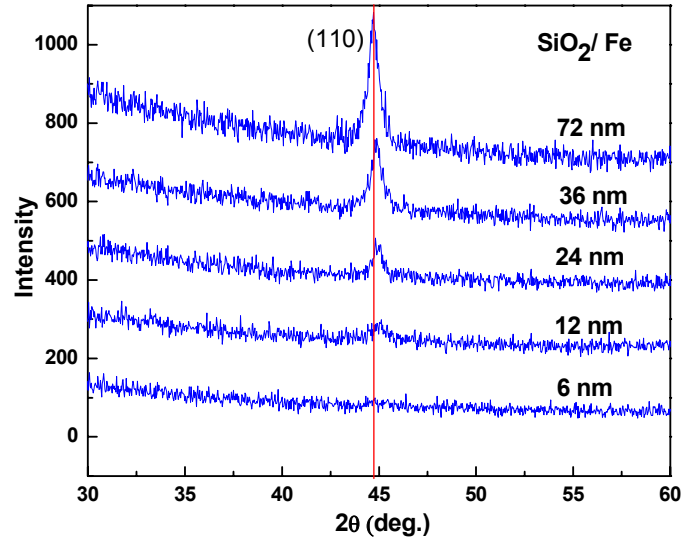
İnce filmlerin yapıları FM filmlerin manyetik özelliklerini son derece etkilemektedir (Ng. 2002). Bu sebeple MTJ' ler oluşturmak için kullanılan FM filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerini belirlemek için kullanılan filmler önce SiO₂ üzerine büyütüldü. SiO₂ altta kullanılmasının nedeni elektriksel ölçümlerde alttaştan gelecek etkileri önlemektir. Ta alt kontak olarak kullanılacağı için FM filmler Ta üzerinede büyütülerek yapısal değişikliklerin manyetik özellikler üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Ayrıca Ta filmler yapışkanlığı arttırmak için tampon katman olarak kullanılmaktadır. MTJ yapılarında film katmanları oldukça incedir, FM filmler genellikle 5-20 nm, yalıtkan bariyer ise 1-3 nm civarında olması gerekir. Bu sebeple FM katmanlar farklı kalınlıklarda büyütülerek yapısal özellikleri XRD ile çalışılmıştır. Bariyer katmanı çok ince olduğundan yapısını belirlemek XRD ile mümkün değildir.

SiO₂/Ta/Fe/Ta₂O₅/Co/Ta yapısının analizi:

SiO₂/Fe:

Bu projede öncelikle Fe ve Co ferromanyetik elektodlar olarak seçilmiştir, ayrıca Ni ve diğer manyetik alaşımlarda (permalloys) kullanılmıştır. Yalıtkan tabaka olarakta öncelikle Ta₂O₅ olmak üzere Al₂O₃ ve MgO kullanılmıştır. Bu filmlerin MTJ amacına yönelik olarak özelliklerini belirlemek için filmler tek ve çok katmanlı olarak büyütülmüşlerdir.

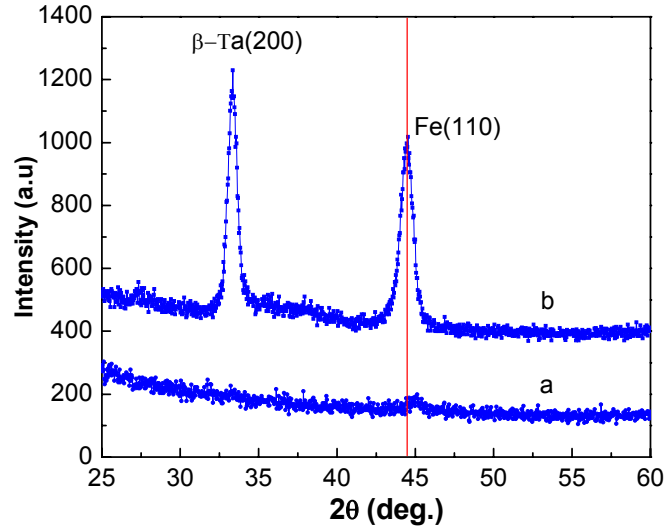
Şekil 3.1 de farklı kalınlıklardaki SiO₂ üzerine büyütülen Fe filmlerinin XRD spektrumu verilmiştir. İnce, 6 nm, Fe filminde pik görülmemekte ancak kalınlık arttıkça 44.96° de bcc Fe (110) düzlemlerine ait bir pik görülmektedir. Kalınlık arttıkça pikin şiddeti artmaktadır. Şiddetin artması Fe filminin dokusunun iyileşerek büyümeye devam ettiğini gösterir. Fe pikinin FWHM değeri 0,85° ve buna bağlı yapı büyüklüğü ise 10.1 nmdir. Kalınlık arttıkça FWHM küçülmekte ve 72 nm için 0.53° ve yapı büyüklüğü ise 16.1 nm olmaktadır. Bu durum kalınlık arttıkça Fe' nin dokusunun iyileştiğinin gösterir. Ayrıca pik pozisyonunda kalınlık arttıkça küçük bir kayma gözlenmektedir. Hesaplanan örgü sabitleri 12 ve 72 nm için sırasıyla 2,85 ve 2,86 Å dur. Fe' nin hacim (bulk) örgü sabiti 2.87 Å dir. Buda ince Fe filmlerinde küçük bir stres olduğunu gösterir. Kalınlık arttıkça bu stress kusurların oluşmasıyla yok olmakta ve örgü sabiti hacim (bulk) değerine yaklaşmaktadır.



Şekil 3.1. SiO₂ üzerine farklı kalınlıklarda büyütülen Fe' nin XRD spektrumları.

SiO₂/Ta/Fe:

Ta filmi alt kontak olarak kullanıldığı için Fe, Ta üzerine büyütülerek Ta' nın Fe üzerindeki yapısal etkisi belirlenmiştir. 24 nm Ta filmi kontak için yeterli olmaktadır. Ta filmi önce SiO₂ üzerine büyütüldükten sonra 12 nm Fe vakum bozulmadan büyütülmüştür. Şekil 3.2 de SiO₂/Fe(12nm) ve SiO₂/Ta(24nm)/Fe(12nm)' nin XRD spektrumları karşılaştırma amaçlı verilmiştir. SiO₂/Ta(24nm)/Fe(12nm) spektrumunda iki tane keskin pik görülmektedir. Bu pikler, 44.42° deki bcc Fe (110) düzlemine ve 33° deki ise β-Ta (200) düzlemine aittir. Ta' nin iki yapısal faza sahip olduğu bilinmektedir: bcc kübik ve β-Ta (Jiang 2005).



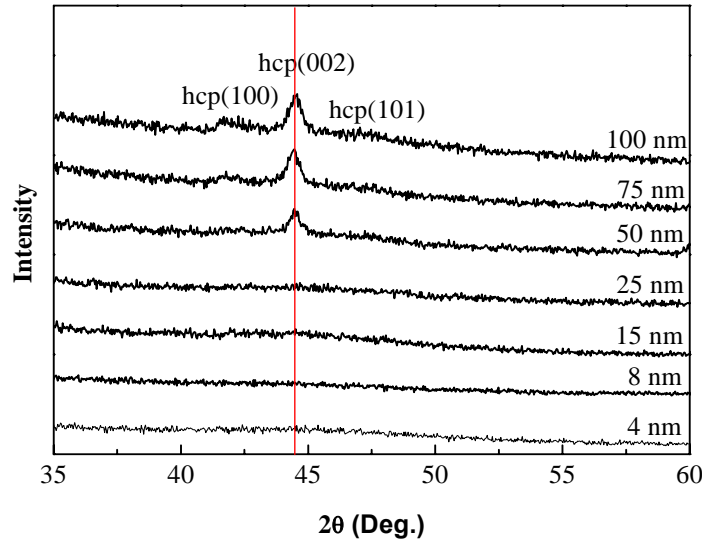
Şekil 3.2. SiO₂ üzerine büyütülen (a)Fe(12nm) ve (b)Ta(24nm)/Fe(12nm) yapılarının XRD spektrumu.

SiO₂/Fe ile karşılaştırıldığında pik şiddetinin artması Fe' nin dokusunun iyileştiğini gösterir. Ta alt katmanı Fe' nin kristal kalitesini arttırmaktadır. Bunun nedeni Ta' nın SiO₂ üzerine belli bir kalınlıktan sonra Fe' ye göre daha kolay kristalleştiği ve Fe' nin de bu kristal

Ta üzerine daha iyi büyüdüğüdür. SiO₂ amorf olduğu için Fe' nin dokusal yapıya geçmesi daha büyük kalınlıklarda olmaktadır. Hesaplanan FWHM 0.55 ve yapı büyüklüğü ise 14.9 nm dir. Hesaplanan örgü sabiti ise 2,88 Å dur ki bu Fe filminde yine küçük bir stress olduğunun işaretidir. Film büyüme parametreleri ve tampon (buffer) katmanının yapısı manyetik fimlerin yapısal özelliklerini kuvvetlice etkilemektedir (Park 2002).

Si(100)/Co:

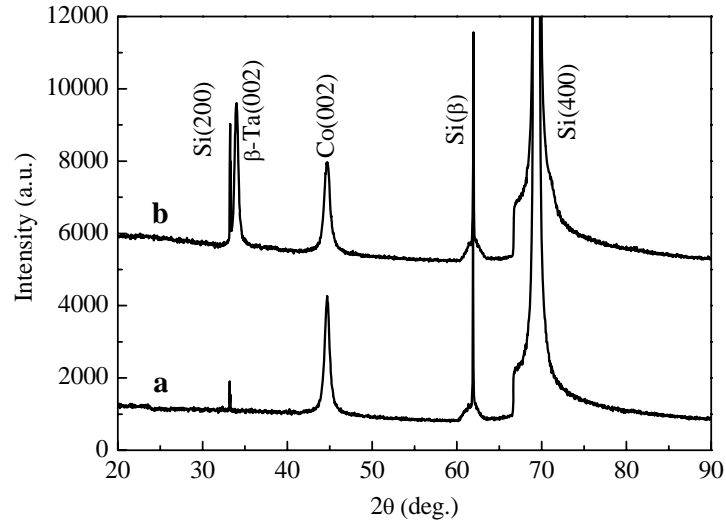
Şekil 3.3 de Si üzerine farklı kalınlıklarda büyütülmüş Co filminin XRD spektrumu verilmiştir. 25 nm Co kalınlığına kadar pik görülmemektedir ve bu kalınlıklarda Co amorf yapıdadır (Sharma 2007). Co altıgen (hexagonal) Si ise elmas (diamond) yapıya sahiptir. Co' nun amorf yapısının sebebi Si ve Co' nun kristal yapılarındaki farklılıktır. Co kritik bir kalınlığa ulaşınca kendi kristal yapısı olan altıgen yapıya ulaşır. 50 nm den itibaren 44.53° de Co' nun altıgen yapısına ait (002) piki görülmektedir ve kalınlık arttıkça şiddeti artmaktadır. Co pikinin yapı büyüklükleri 50, 70 ve 100 nm için sırasıyla 15.3, 17.4 ve 20.4 nm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca 100 nm için 41.68° and 47.41° de Co' nun (100) ve (101) düzlemlerine ait geniş pikler görülmektedir. Bu çalışmada ince, yaklaşık, 10 nm Co filmi üst FM elektrod olarak kullanılmıştır. Bu sebeple MTJ yapılarındaki Co filmleri amorf yapıdadır. Piklerde kayma yoktur yani bu kalınlılardaki Co filmde stress oluşmamaktadır, çünkü filmde kusurlar oluşarak örgü yapısı rahatlamıştır (relaxed) ve kendi hacim kristal örgü sabitine ship olmuştur.



Şekil 3.3. Farklı kalınlılardaki Co filminin XRD spektrumları.

Si(100)/Ta/Co:

Ta' nın Co üzerindeki yapısal etkisini incelemek için Co, 7 ve 40 nm Ta üzerine büyütüldü. Şekil 3.4 de Si(100) üzerine büyütülen Ta/Co' nun XRD spektrumu verilmiştir. Ta(7 nm) ince olduğu için pik görünmezken Co(25 nm) nin 44.65° de (002) düzlemine ait keskin bir pik görülmektedir. Oysa aynı kalınlıktaki Si üzerine büyütülen Co(25 nm) tamamen amorf yapıdadır (bkz. şekil 3.3). Bu pikin FWHM değeri 0.57 ve yapı büyüklüğü ise 15 nm dir. 7 nm Ta' nın bile Co' nun yapısını dramatik olarak değiştirdiği görülmüştür. 40 nm Ta üzerine büyütülen Co' da aynı özellikleri göstermektedir.



Şekil 3.4. XRD spektrumları (a) Si/Ta(7 nm)/Co(25 nm) ve (b) Si/Ta(40 nm)/Co(25 nm).

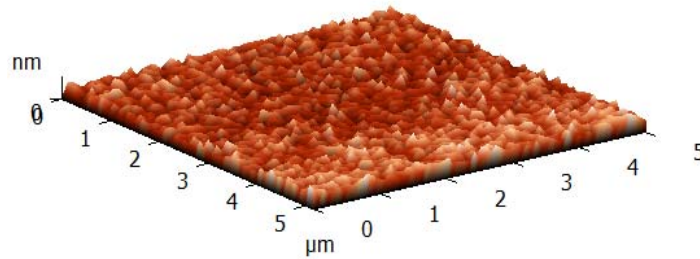
3.1.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu Sonuçları

Spintronik amaçlı büyütülen filmler çok ince oldukları için yüzey ve arayüzey pürüzlülükleri son derece önemlidir, çünkü arayüzeylerdeki pürüzlülük yaklaşık 2-3 nm kalınlığındaki bariyerden dolayı FM katmanları arasında manyetik eşlemeye sebep olur ve buda serbest manyetik katmanın mıknatıslanma yönünün manyetik alan altında değiştirilmesini zorlaştırır.

Tek ve iki katmanlı filmlerin yüzey morfolojileri AFM ile çalışılmıştır. Taranan alan $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ dir. Önce SiO_2 in yüzey morfolojisi taranmış ve 2 Å pürüzlülük gözlenmiştir ki bu oldukça pürüzsüz bir yüzeydir. Alttaşın pürüzlülüğü çok önemlidir çünkü üzerine büyütülen filmin pürüzlülüğünü büyük ölçüde etkiler.

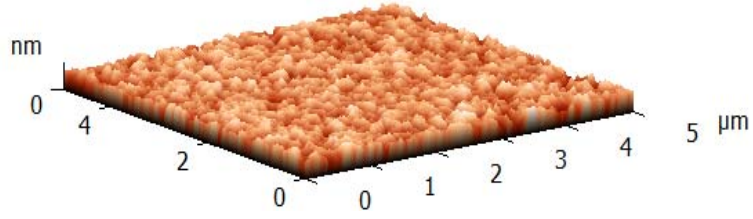
SiO_2/Ta , SiO_2/Fe , $\text{SiO}_2/\text{Ta}/\text{Fe}$:

SiO_2 üzerine büyütülen farklı kalınlıklardaki Ta filminin yüzey morfolojisi incelenmiştir. Şekil 3.5 de 6 nm Ta filminin yüzey morfolojisi gösterilmektedir. Rms (root mean square) pürüzlülüğü 2.3 Å olduğu görülmüştür. Bu yaklaşık SiO_2 alttaşın pürüzlülüğü kadardır. Ta oldukça pürüzsüz ve tekdüze (uniform) olarak büyümektedir.



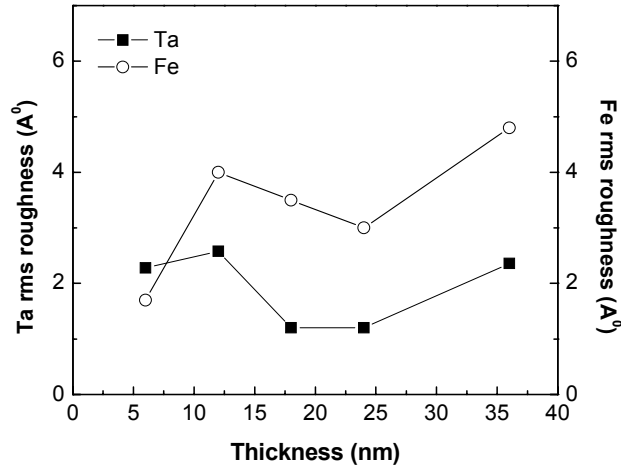
Şekil 3.5. Ta(6 nm) filminin AFM yüzey morfolojisi. Rms pürüzlülük 2.3 Å dur.

Şekil 3.6 de ise SiO_2 üzerine büyütülmüş 12 nm Fe filminin morfolojisi gösterilmektedir. Rms pürüzlülük 4 Å dur.



Şekil 3.6. Fe(12 nm) filminin AFM yüzey morfolojisi. Rms pürüzlülük 4 Å dur.

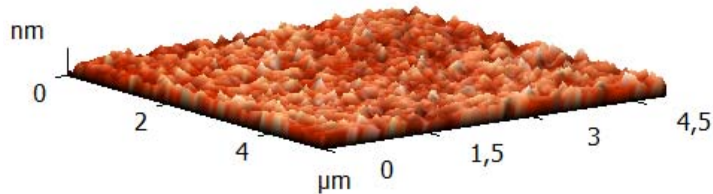
Şekil 3.7 de Ta ve Fe' nin farklı kalınlıklardaki rms pürüzlülüklerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 3.7. SiO₂ üzerine büyütülen Fe ve Ta' nın yüzey pürüzlülükleri grafiği.

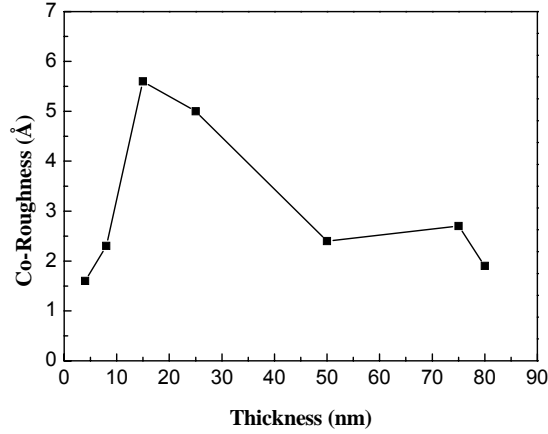
Görüldüğü gibi 6 nm Fe filminin rms pürüzlülüğü 1.7 Å ve 12 nm için 4 Å dur. XRD' den de görüldüğü gibi 12 nm civarında Fe' de dokusal yapı oluşmaya başlamaktadır. Bu kalınlıktan sonra pürüzlülük belli bir kritik kalınlığa, yaklaşık 24 nm, kadar azalmakta ve sonra yine artmaktadır. Bu 12 nm den sonraki azalmanın sebebi Fe' nin kendi kristal yapısına ulaşması ve tekdüze (uniform) film olarak büyümesi olarak açıklanabilir (Entani 2005). Bu kalınlıktan sonra ise kusurlar oluşur ve bu da yüzey pürüzlülüğünü artırır. Benzer eğilim Ta filmi içinde geçerlidir. Ortalama rms pürüzlülük Ta için 2, Fe için ise 4 Å civarındadır.

Şekil 3.8 de 24 nm Ta üzerine büyütülen 12 nm Fe' nin yüzey morfolojisi gösterilmektedir. Rms pürüzlülük 1.2 Å dur. Oysa aynı kalınlıktaki SiO₂/Fe' nin rms 4 Å dur. Ta filminin Fe' nin yapısını iyileştirdiğini ve dolayısıyla bunun Fe' nin yüzey pürüzlülüğünde etkilediğini görmekteyiz. XRD analizinden Fe' nin Ta üzerinde dokusal yapıda büyüdüğünü ve yapı büyüklüğünün (grain size) arttığı görülmüştü. Bu pürüzlülükler MTJ yapılarının oluşturulmasına uygundur.



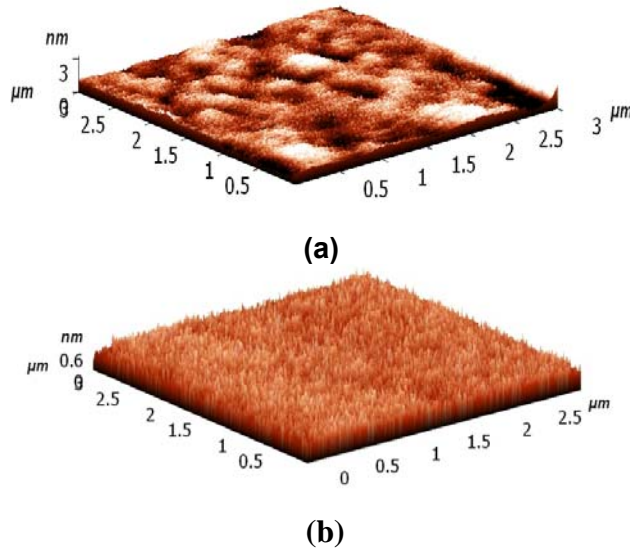
Şekil 3.8. SiO₂/Ta(24nm)/Fe(12nm)' nin yüzey morfolojisi. Rms pürüzlülük 1.2 Å dur.

Co filmleri içinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3.9 da Si üzerine büyütülen farklı kalınlıklardaki Co' nun rms pürüzlülüğü grafik olarak verilmiştir. Grafikteki değişim yukarıda Fe ve Ta' da açıklandığı şekildedir.



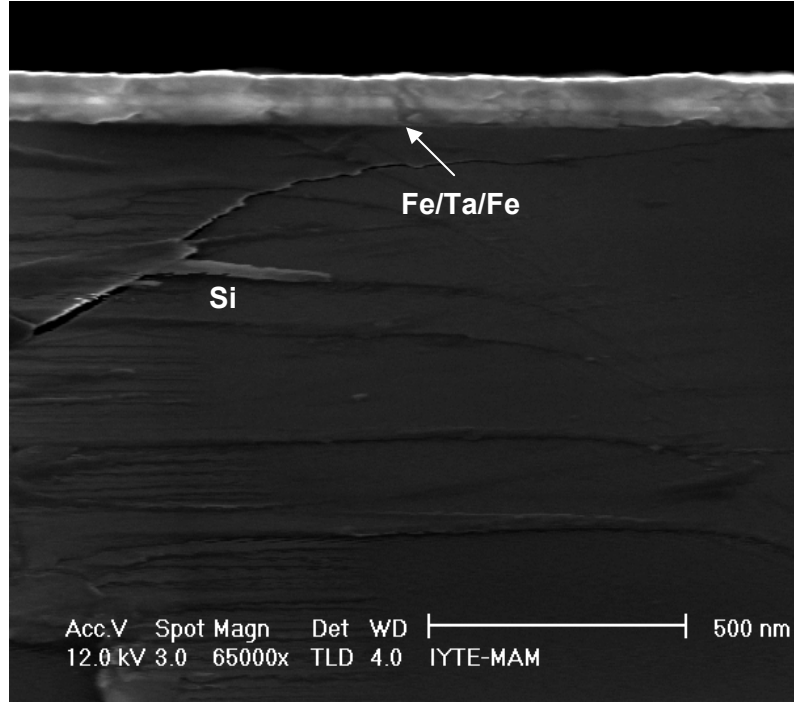
Şekil 3.9. Si(100) üzerine büyütülen farklı kalınlıklardaki Co filminin rms pürüzlülüğü grafiği.

Ayrıca Si üzerine büyütülen 25 nm Co' nun rms pürüzlülüğü 5 Å ve 7 nm Ta üzerine büyütülen Co' nunki ise 1.3 Å olarak bulunmuştur. Buradanda yine Ta' nın Co' nun yapısını XRD' de görüldüğü gibi iyileştirdiği ve yüzeyinin daha pürüzsüz olmasına neden olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 3.10. AFM yüzey morfolojileri (a) Si/Co(25nm), (b) Si/Ta(7nm)/Co(25nm).

Şekil 3.11 Fe/Ta/Fe üç katmanlı yapısının SEM ara kesitini göstermektedir. Filmlerin sürekli ve tekdüze olarak büyüdükleri görülmektedir. Bu filmler yeterli kalınlıklarda oldukları için SEM mikrografları çekilebilmektedir. MJT' lerde özellikle ara katman çok ince olduğu için SEM ile ara kesitlerini görmek mümkün değildir, ancak geçirgenli elektron mikroskobu ile görülebilir.



Şekil 3.11. Fe/Ta/Fe üç katmanlı yapısının SEM ara kesit mikrografigi.

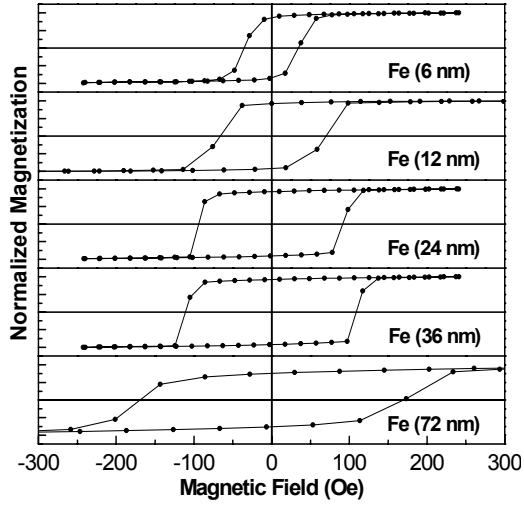
3.2 Manyetik Analiz Sonuçları

3.2.1 Manyetik Döngü Analizleri

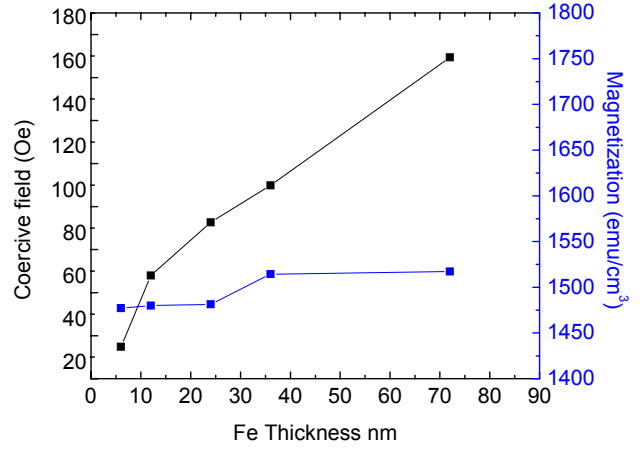
Bütün örneklerin manyetik döngü ölçümleri titreşimli örnek magnetometresi (VSM) ile yapılmıştır. Bu kısımda Fe ve Co' nun manyetik özellikleri detaylı analiz edilecek ve yapısal analiz ile ilişkilendirilecektir. Benzer çalışmalar diğer bazı tek katmanlı FM elektrodlar içinde yapılmıştır ancak bu sonuçları burada vermeye gerek yoktur çünkü amacımız MTJ yapılarını incelemek olduğu için daha çok tamamlanmış sürekli MTJ yapılarının manyetik özellikleri verilecektir.

SiO₂/Fe, SiO₂/Ta/Fe

SiO₂ üzerine büyütülen farklı kalınlıklardaki Fe filmlerinin manyetik döngüleri (magnetic hysteresis) ve H_c, M_s' in kalınlıkla değişim grafiği şekil 3. 12 de gösterilmiştir. Manyetik döngülerin şeklinde kalınlık arttıkça kayda değer bir değişiklik gözlenmemekle beraber 24 ve 36 nm kalınlıklar için manyetik geridönüşüm (magnetic reversal) daha keskinleşmektedir. H_c kalınlıkla yaklaşık olarak çizgisel (linear) olarak artış göstermektedir. Bu Fe yapısının kalınlık arttıkça kendi kristal yapısına kavuşması ve doku yapısının iyileşmesi ve ayrıca yapı büyüklüğünün artmasına bağlanabilir. Çünkü yapı büyüklüğünün artması her bir yapıdaki kristal manyetik anizotropiyi artırır. Her yapının manyetizasyonu farklı yönelir. Bu durumda manyetik alan altında yapıların manyetik yönelmeleri kolayca dönemezler ve böylece daha yüksek H_c ye sahip olurlar (Sharma 2005). M_s' de ise fazla bir değişiklik görülmemektedir, yani bu kalınlıklardaki Fe filmi hacim manyetizasyonu değerine (1700 emu/cm³) yakındır.



(a)

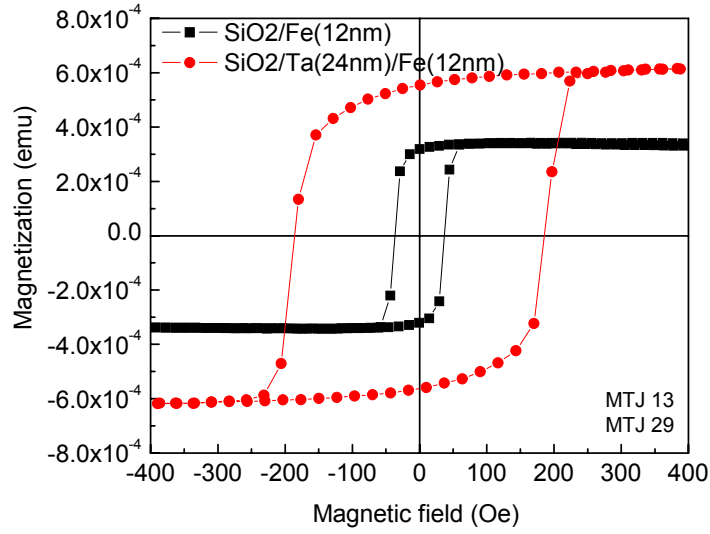


(b)

Şekil 3.12. SiO₂ üzerine büyütülmüş farklı kalınlıklardaki Fe filmlerinin (a) M-H döngüleri, (b) H_c ve M_s' in kalınlıkla değişim grafikleri.

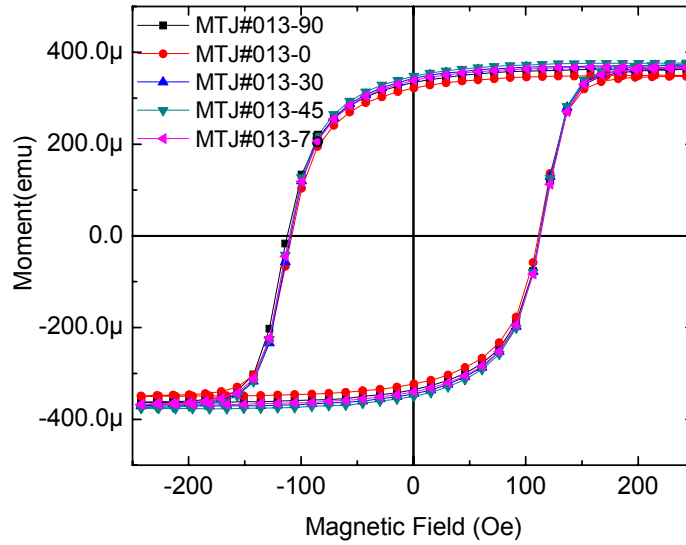
Manyetik döngüler hemen hemen kare şeklindedir ve farklı açılarda yapılan ölçümlerden manyetik anizotropi olmadığı görülmüştür. Buda manyetik geri dönüşümün manyetik bölge duvarlarının (magnetic domain walls) hareketinden dolayı olduğunu gösterir. (Kumar 2006, Swerts 2004). Eğer H_c bölge duvarı yapı sınırları boyunca hareketi ile ilişkilendirilirse, büyük yapıların daha küçük H_c vermesi gerekirdi, oysa biz Fe' de bunun tam tersini gözlüyoruz. Fe filmindeki büyük yapılar birbirlerinden izole olurlar ve yapı sınırları bölge duvarlarının hareketine karşı çivileme (pinning) etkisi yapar. Büyük yapılar ayrıca anizotropinin yok olmasında sebep olurlar.

Şekil 3.13 Fe(12nm) ve Ta(24nm)/Fe(12nm) filmlerinin M-H döngülerini göstermektedir. Burada Ta' nın Fe' nin manyetik özellikleri üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. H_c Ta/Fe durumunda yaklaşık iki kat artmaktadır. XRD analizinde görüldüğü gibi Fe' nin kristal yapısı Ta üzerine büyütüldüğünde iyileşmektedir. Yukarıda açıklandığı gibi Fe' nin yapı büyüklüğü artmakta ve buda H_c' yi arttırmaktadır, çünkü büyük yapılar büyük manyetik anizotropiye sahiptirler. Ancak Ta/Fe yapısındaki durumda Fe' deki her bir yapının içsel bir mıknatıslanması vardır ve bu yapıların mıknatıslanmaları birbirleri ile etkileşmez. Manyetik geri dönüşüm işlemi bağımsız olarak oluşur ve böylece H_c artar. Ayrıca Fe' deki streste H_c' nin artmasına neden olabilir.



Şekil 3.13. Fe(12nm) ve Ta(24nm)/Fe(12nm) filmlerinin M-H döngüleri.

SiO₂/Ta(24nm)/Fe(12nm) yapısının M-H döngüleri manyetik alan yüzeye paralel olacak şekilde farklı açılarda ölçülmüştür. Şekil 3.14 de görüldüğü gibi M-H' ler arasında bir fark yoktur, yani Ta üzerindeki Fe filmi anizotropik manyetizm göstermemektedir. Farklı Fe kalınlıklarında da anizotropi gözlenmemiştir.

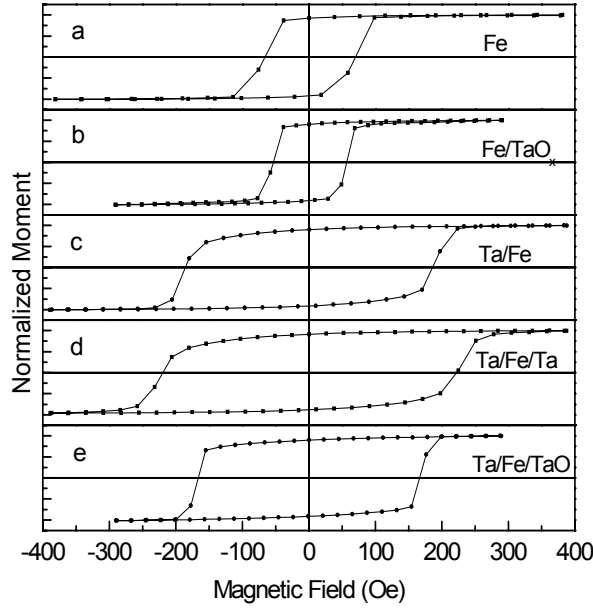


Şekil 3.14. SiO₂/Ta(24nm)/Fe(12nm) yapısının farklı açılardaki M-H döngüleri. Manyetik alan yüzeye paralel uygulanmıştır.

SiO₂/Ta/Fe, SiO₂/Ta/Fe/Ta and SiO₂/Ta/Fe/Ta₂O₅

Bariyer katmanı olarak Ta₂O₅ kullanıldığı için Fe üzerine Ta₂O₅ nun etkisi incelenmiş ve ayrıca Fe' nin oksitlenmesi anlaşılmasına çalışılmıştır. Bir önceki bölümde Fe büyütüldükten sonra atmosfere çıkarılarak H_c değerleri ölçülmüştür. SiO₂/Ta/Fe yapısında Ta kaplama olarak büyütüldüğünde Fe' nin atmosferden dolayı oksitlenmesi önlenmiştir ve H_c 185 den 218 Oe arttığı görülmüştür, şekil 15. SiO₂/Ta/Fe/Ta₂O₅ yapısında ise Fe' nin H_c değeri 185 den 168 azalmıştır ve bu yüzden Fe atmosferdekenden daha fazla oranda oksitlendiği

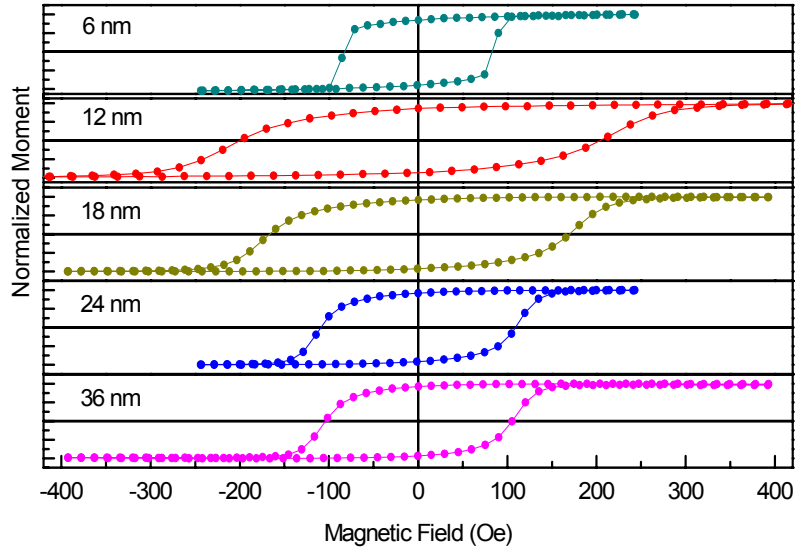
düşünülmektedir. Çünkü vakumda temiz Fe üzerine Ta₂O₅ büyütüldüğünde Fe Oksijen ile daha fazla reaksiyona girecektir, oysa atmosferde ise doğal oksitlenme olmaktadır.



Şekil 3.15. Ta ve Ta₂O₅ in Fe' nin M-H döngüsü üzerindeki etkisi

SiO₂/Ta(d)/Fe/Ta₂O₅

Elektriksel ölçümleri için 24 nm Ta ugun görülmüştür. Ancak Ta' nın kalınlığının FM filmleri üzerindeki etkisini incelenmek için SiO₂/Ta(d)/Fe(12)/Ta₂O₅ yapıları büyütülmüştür. Şekil 3.16 da farklı Ta kalınlıklarındaki yapıların M-H döngüleri gösterilmektedir. İnce 6 nm Ta filmindeki Fe' nin H_c değeri en küçüktür ve 12 nm için en büyük değeri alır. Bu kalınlıktan sonra H_c azalmakta ve 24 nm den sonra H_c değeri değişmemektedir. Bu davranışın nedeni şöyle açıklanabilir: 6 nm Ta ince olduğu ve henüz tamamen sürekli ve tekdüze bir filme ve/veya kristal yapısına ulaşmamış olabilir. Bu yüzden üzerine büyüyen Fe' nin dokusal yapısında zayıftır. 12 nm Ta' nın sürekli film olduğu ve kristal yapısına sahip olduğu ve dolayısıyla Fe' ninde dokusal yapısı iyileşmekte, yapı büyüklüğü artmakta ve dolayısıyla H_c artmaktadır. Bu Ta kalınlığından sonraki H_c deki azalış ise Ta filminin kalınlığının artması ile kusurların oluşması ve yüzey pürüzlülüğünün artması, bunda Fe' nin yapısına yansımaları ile açıklayabiliriz. Görüldüğü gibi Fe' nin yapısı manyetik özelliklerini çok büyük oranda etkilemektedir.



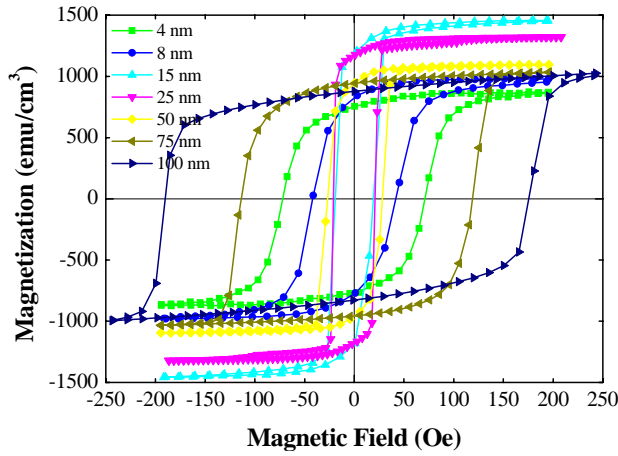
Şekil 3.16. SiO₂/Ta(d)/Fe(12nm)/Ta₂O₅(4nm) yapısının M-H döngüleri.

Si/Co and Si/Ta/Co

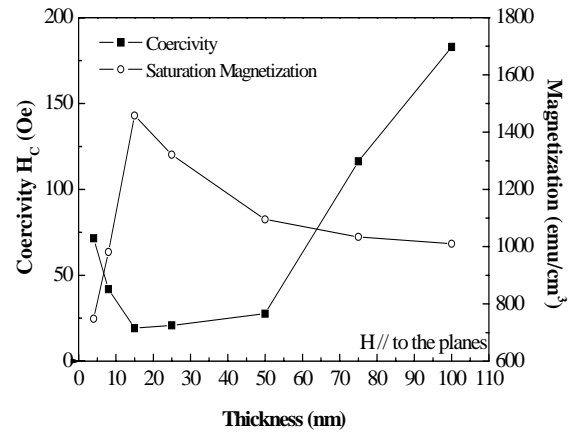
İnce Co filminin manyetik özelliklerini incelemek için Co filmler Si alttaş üzerine büyütülmüştür. Şekil 3.17(a) farklı kalınlıklardaki Co filmlerinin M-H döngülerini göstermektedir. M-H' lerin kareselliklerinde önemli bir değişiklik olmamakla beraber 15 ve 25 nm kalınlığındaki Co' ların manyetik geri dönüşümleri diğer kalınlıklara göre daha keskin düşüş göstermektedir.

Co filmlerinin M_s ve H_c ye bağlı grafiği şekil 3.17(b) de verilmiştir. Kalınlığın M_s ve H_c ' yi büyük oranda etkilediği görülmektedir (Munford 2001, Li 2000). İnce, 5 nm, Co filmi için H_c 70 Oe, ve 15 nm kalınlığa kadar azalmakta, 25-50 nm arasında sabit ve 50 nm den sonra çizgisel olarak artmaktadır. İnce Co filmindeki büyük H_c filmdeki stres ve nokta kusurlardan (point defects) dolayı olduğu düşünülmektedir. Co filmi kritik kalınlığa, 15 nm, ulaştığında tekdüze Co filmi oluşmuştur, bu kalınlıkta Co amorf haldedir ve H_c düşüktür, çünkü kristal yapı oluşmadığından momentler kolaylıkla dönerler. 50 nm den sonra Co kristal yapısına ulaşmıştır (bkz. Şekil 3.3) ve bu kalınlıktan sonra H_c kristal yapıya bağlı olarak çizgisel olarak artmaktadır, çünkü yapı büyüklükleri kalınlık arttıkça artmaktadır (Islam 2007).

Mıknatıslanmada ise 5 nm ince film için 25 Oe ve 15 nm kalınlığa kadar M_s artmakta ve bundan sonra kalınlık arttıkça bir azalma görülmektedir. İnce film için M_s küçüktür çünkü M_s birim hacimdeki manyetik moment ile orantılıdır. Co filmi yeterli kalınlığa ulaşana kadar, 15 nm, M_s artmakta ve hacim değeri olan (1422 emu/cm³) ulaşmaktadır. Bu kalınlıktaki amorf yapıdan dolayı mıknatıslanma kolaylıkla ulaşılır. Bu kritik kalınlıktan sonra M_s de küçük bir azalma görülmekle ve sabit bir değere ulaşmaktadır. Co filmi kristal yapıya kavuştuğunda büyük yapıların mıknatıslanması zorlaşmaktadır (Deo 2005).



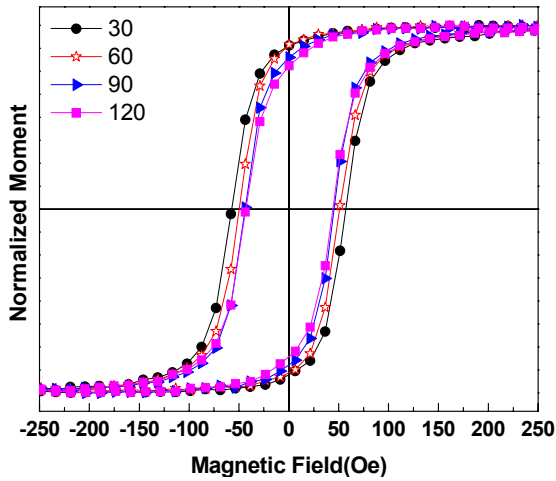
(a)



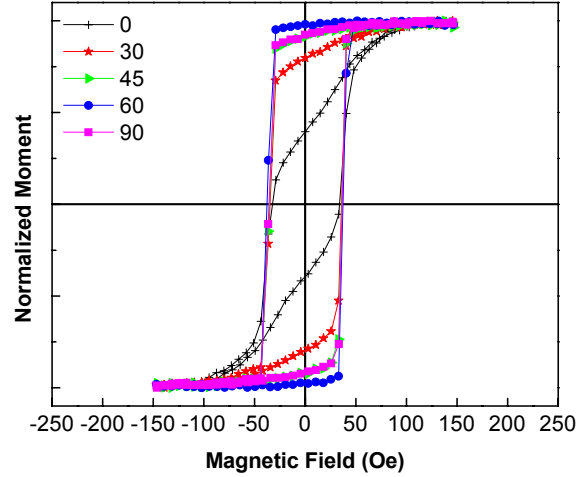
(b)

Şekil 3.17. Farklı kalınlıklardaki Co filmlerinin (a) M-H döngüleri. (b) M_s , H_c ' nin kalınlığa bağlı değişimleri.

Ta' nın Co' nun manyetik özellikleri üzerindeki etkisini çalışmak için 8 nm Co Si ve Si/Ta üzerine büyütülmüştür. Şekil 3.18(a) 8 nm Co' nun farklı açılarda ölçülen M-H döngüleri göstermektedir. Döngüler S şekline (S-like) benzemekte manyetik anizotropi gözlenmektedir. H_c ortalama 50 Oe civarındadır.



(a)



(b)

Şekil 3.18. Açığa bağlı olarak ölçülen Co filminin M-H döngüleri, (a) Si/Co(8nm) (b) Si/Ta(24nm)/Co(8nm)

Oysa Co filmi Ta üzerine büyütüldüğünde büyük bir manyetik anizotropi görülmektedir Şekil 3.18(b). H_c değeri 35 Oe düşmektedir. Döngülerin kareselliklerinde açığa bağlı olarak büyük değişiklik oluşmaktadır. Bazı açılarda manyetik geri dönüşüm eğrisi çok keskin şekilde değişmektedir. Bu açılarda mıknatıslanma tamamen manyetik bölge duvarlarının hareketinden dolayıdır. Diğer açılarda ise manyetik geri dönüşümüne manyetik bölge momentlerinin yönlerinin değişmesi büyük katkıda bulunmaktadır. Bu durum yine Ta' nın Co' nun amorf yapısını

iyileştirerek daha ince filmlerde texture yapıya sahip olmasına bağlanabilir ve böylece manyetik anizotropi oluşturmasına sebep olur.

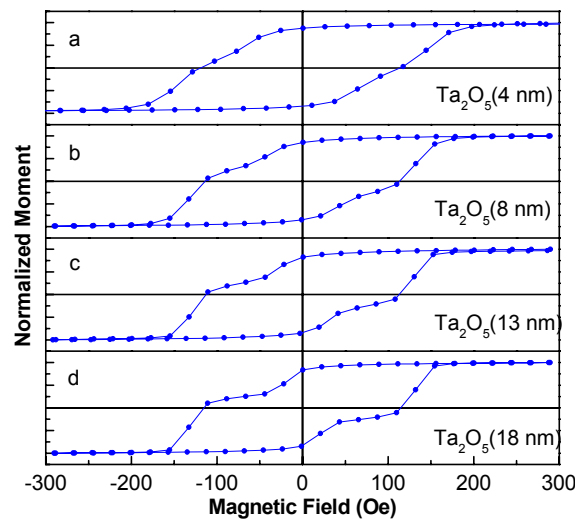
Ta üzerine büyütülen Fe ve Co' nun filmlerinin manyetik analizinden Fe daha büyük H_c ye sahip olduğu için çivileme FM katmanı ve Co' nun da serbet FM katmanı olarak kullanılması uygun görülmüştür. Fe oksijene çok duyarlı olduğu için alt katman FM olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca Fe ve Co' nu bariyer ile arayüzeyi çok hassastır ve keskin olması arzu edilir. Bu yüzden arayüzeylerin kimyasal analizi XPS ile yapılmıştır ve ileride açıklanacaktır.

SiO₂/Ta/Fe/TaO_x/Co spin vana yapısı

Alt kontak olarak 24 nm Ta ve sabit FM katman olarak 12 nm Fe belirlenmiştir. Bu projede öncelikle alt ve üst FM katmanlar olarak Fe kullanılması planlanmıştır. Ancak Fe/Ta₂O₅/Fe yapısında Fe' lerin birbirine yakın H_c değerleri vermesi bizi üst serbest FM katmanı olarak Co kullanmaya yöneltmiştir. Co kullanmamızın bir diğer nedeni de Fe' ye göre oksijene daha az duyarlı olması ve ayrıca kalınlık ile H_c ' sinin büyük farklılıklar göstermesidir.

Çok katmanlı filimlerde farklı H_c değeri iki yolla elde edilir: ilk yöntem her iki FM katmanında aynı elementten seçmek, ancak ikinci katmanı farklı koşullarda büyütürken farklı H_c değerini vermelerini sağlamaktır. İkinci yol ise FM katmanları farklı elementler kullanarak büyütme çünkü farklı FM elementler ve alaşımları (permalloys) farklı H_c ' lere sahiptirler.

Co filminin analizinden H_c değerinin 8 nm için 40 Oe olduğu görülmektedir. (bkz şekil 3.18a). Ta/Fe/Ta₂O₅ nin H_c değeri yaklaşık 100 Oe olduğundan 8 nm Co üst FM katman olarak seçilmiştir. Şekil 3.19 da tamamlanmış sürekli SiO₂/Ta(24nm)/Fe(12nm)/Ta₂O₅(d)/Co(8nm) yapılarının M-H döngüleri verilmiştir. Burada d oksit tabakasının kalınlığıdır ve 4, 8, 13 and 18 nm olarak büyütülmüşlerdir. 4 nm Ta₂O₅ kalınlığında Fe ve Co filmler FM olarak eşleşmişlerdir. Bunun iki nedeni olabilir, birincisi Ta₂O₅ katmanı henüz sürekli ve tekdüze bir film tabakası olarak büyümemiştir. Bu pürüzlü bir ara yüzeye yol açabilir ve FM elektrotlar pürüzlülüğe bağlı katmanlar arası (orange peel) (Néel 1967) eşleşebilirler. İkinci nedeni ise Ta₂O₅ nun iyi bir yalıtkan olarak büyümediğidir. Bu durumda bariyerdeki Ta katmanındaki iletim elektronları sayesinde FM katmanlar indirek karşılıklı eşleşebilirler (indirect exchange coupling). Ta₂O₅ nun yalıtkanlığı elipsometri ile ölçülmüştür. Refraktif indeks 5 ve 10 nm Ta₂O₅ için 2.6 (at 632.8 nm) bulunmuştur. Halbuki amorf Ta₂O₅ nun ideal değeri 2.1 ve 2.4 arasındadır. Buradan Ta₂O₅ nun yanısıra TaO_x ve/veya metal Ta metal bulunma olasılığı olduğunu söyleyebiliriz (Zhang 2000).

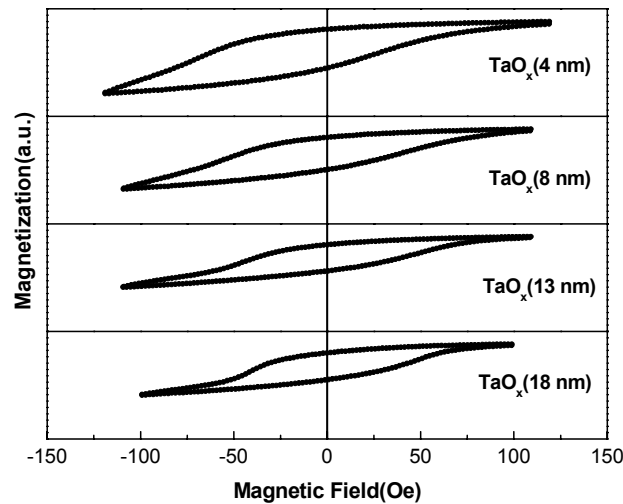


Şekil 3.19. SiO₂/Ta(24nm)/Fe(12nm)/Ta₂O₅(d)/Co(8nm) M-H döngüleri.

Ta₂O₅ kalınlığı arttıkça M-H döngüsündeki basamak açık şekilde görülmekte, Fe ve Co katmanları manyetik olarak eşleşmemektedirler. 18 nm Ta₂O₅ için eşleşme tamamen yok olmuştur ve Co' nun H_c değeri 50 Oe Fe' nin ise yaklaşık 120 Oe' dir. Ancak bu kalınlıklardaki Ta₂O₅ MTJ' lerde tünel olayından dolayı arzu edilmemektedir.

Eşleşme mekanizmasını anlayabilmek için küçük (minor) döngüleri ölçülmüştür. Şekil 3.20 de Co serbest FM katmanının tamamlanmış küçük döngüsü gösterilmektedir. Burada sabit Fe elektrodunun mıknatıslanması artık mıknatıslanma (remnant) durumundadır. Küçük döngüde 4 nm Ta₂O₅ büyük bir kayma görülmektedir. Bu FM katmanları arasında arayüzey pürüzlülüğüne bağlı güçlü bir manyetostatik Neel eşleşmesinin varlığına işaretler. Eşleşme şiddeti H_n=24 Oe dir. Bariyerin kalınlığı arttıkça eşleşme alanının şiddeti azalır ve sırasıyla 8,13,18 nm Ta₂O₅ için 16,8,5 Oe değerlerini alır. Bu ince Ta₂O₅ için , 4 nm, bulunan büyük eşleşme alanı beklenen bir sonuçtur, çünkü Neel eşleşme alanı bariyerin kalınlığı azaldıkça exponansiyel olarak azalmaktadır.

İnce bariyerlerde toplam mıknatıslanmaya her bir katmandan gelen katkıları belirlemek kolay değildir, çünkü Co filmindeki bütün manyetik momentler, Fe' nin mıknatıslanması tamamen ters yöne döndüğü zaman, dönmüş değillerdir. Co' nun H_c değerleri 4 nm kalınlık için tam geri dönüş noktasında (at the inflection point) 44 Oe dir ve Ta₂O₅ nun kalınlığı arttıkça sırasıyla 8, 13, 18 nm ler için 41, 38, 35 Oe olarak azalır. Aynı zamanda kalınlık arttıkça keskin geri dönüş davranışları gözlenmektedir.

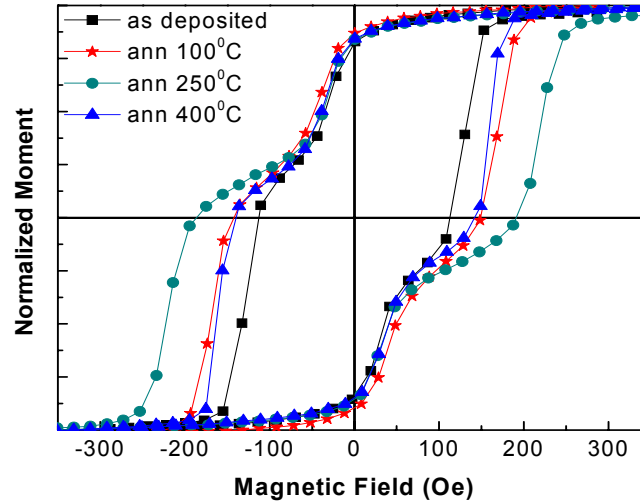


Şekil 3.20. SiO₂/Ta(24nm)/Fe(12nm)/Ta₂O₅(d)/Co(8nm) yapılarında Co katmanının küçük döngüleri.

Tavlama Etkisi SiO₂/Ta/Fe/Ta₂O₅/Co

Filmlerde ısıl tavlamanın kristal yapıyı iyileştirmek ve ara yüzey pürüzlülüğünü azaltmak gibi işlevi vardır. Bununla birlikte çok katmanlı yapılarda yüksek sıcaklıklarda kullanılan filme bağlı olarak katmanlar arasında karışımında beraberinde getirmektedir. Şekil 3.21 de 18 nm Ta₂O₅ bariyer kalınlığındaki MTJ'lerin farklı sıcaklıklarda 30 dakika yüksek vakumda 100, 250, 400 °C de tavlandıktan sonraki M-H döngüleri verilmiştir. 100 ve 250 °C tavlama Fe katmanının H_c değeri artmaktadır. Bu yukarıda açıkladığımız üzere ısıl özelliğinde görülen iyileşmeden dolayıdır. Bu sıcaklıklarda Fe' nin kristal yapısı iyileşmekte ve büyük kristal yapılar (grains) oluşmaktadır. Bu yapılar daha büyük manyetik bölgelere (manyetik domains) sahip oldukları için manyetik yönelimlerini değiştirmek zordur ve dolayısıyla H_c artmaktadır. Aynı zamanda Fe/Ta₂O₅ arayüzeyi muhtemelen oksijenin yeniden dağılımından (redistribution), dolayı daha az pürüzlü olmakta ve Ta₂O₅ da daha tekdüze bir yapıya ulaşmaktadır, bu da manyetostatik eşleşmeyi azaltır (Lee 2002). Co' nun H_c değerinde

bir değişiklik gözlenmemektedir, bunun sebebi Co' nun yaklaşık 450 °C kristalleşmeye başlamasıdır. 400 °C tavlama da Fe'nin H_c değerinde azalma görölmektedir. Buradanda Fe'nin bu sıcaklıklarda diğer katmanlarla Ta, Ta₂O₅ ile karışımının (intermixing) olduğu ve manyetik özelliklerinin değiştii dolayısıyla H_c değerinde manyetik alan ile daha kolay değiştii anlaşılmaktadır (Lin 2002). Bu sonuç arayüzeylerde FeO manyetik ölü katmanlar oluşmasına neden olabilir ki bu da spinlerin kutuplanmalarını kaybetmelerine ve ayrıca FM katmanlar arasında kısa devre oluşmasına neden olabilir. Tavlama sonuçları bize Fe ve Co arasındaki manyetik eşleşmenin yapısal ve ara yüzey pürüzlülüklerinden dolayı olduğunu söylemektedir. Bu tavlama sonuçları diğer Ta₂O₅ kalınlıkları içinde görölmüştür.



Şekil 3.21. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış SiO₂/Ta(24 nm)/Fe(12nm)/Ta₂O₅(18 nm)/Co(8) MTJ yapısının M-H döngüleri.

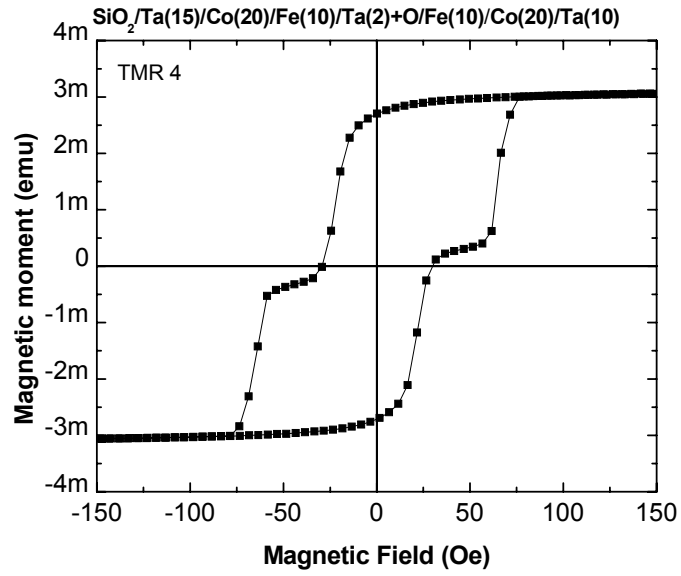
Buraya kadar Fe ve Co' nun MTJ yapısında kullanılmasından dolayı yapısal ve manyetik özellikleri ve ayrıca Fe/Ta₂O₅/Co MTJ yapısı detaylı şekilde verilmiştir. Bu projede ayrıca diğer ferromanyetik malzelerde kullanılmıştır, ancak onların tek tek yapısal ve manyetik özelliklerini açıklamak amacımıza fazla hizmet etmemektedir. Beşinci gelişme raporunda bazı FM filmlerin manyetik döngüleri verilmiştir. Bu yüzden kullanılan diğer FM elektrodlar ve bariyerler için tamamlanmış MTJ yapısındaki sistemlerin manyetik özellikleri verilecektir.

Tamamlanmış sürekli spin vana yapılarının manyetik özellikleri:

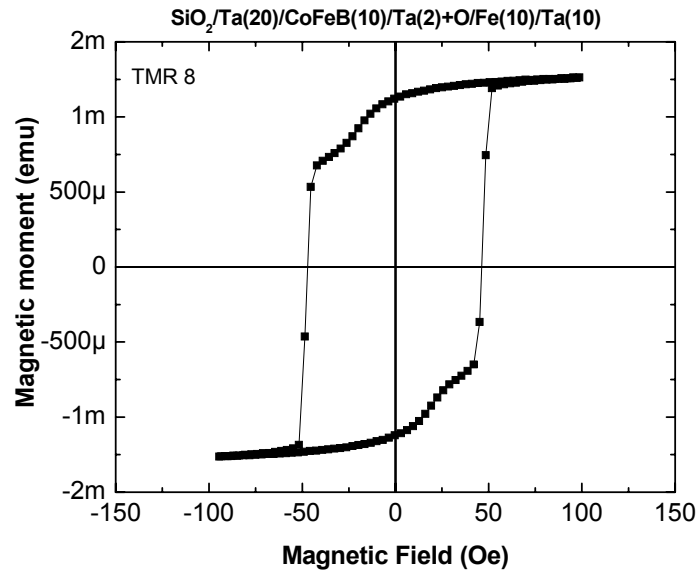
Beşinci raporda bir çok farklı spin vana yapılarının manyetik özellikleri verilmişti. Son dönemde yeni spin vana yapıları büyütülerek TMR ölçülmeye çalışılmıştır. Bu yapıların manyetik özelliklerini burada detaylı açıklanmaya gerek yoktur, çünkü Fe ve Co için yapılan detaylı çalışmalar diğer yapılar içinde gerekli görüldüğü oranda yapılmıştır.

Aşağıdaki şekillerde, Şekil 3. 22-26 da sürekli olarak büyütülen farklı FM ve yalıtkan bariyerlerden oluşan yeni spin vana sistemlerinin M-H döngüleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi bu sistemlerde manyetik geri dönüşüm keskin olmakta ve farklı H_c değerleri kolaylıkla ve rutin olarak elde edilebilmektedir. FM katmanlar arasında bariyer 3-5 nm olmasına rağmen manyetik eşleşme görölmemektedir. Buradan bariyer katmanın yeterli kalınlıkta, tekdüze ve iyi yalıtkan olduklarını söyleyebiliriz. Ta₂O₅ hedef kullanılarak büyütülen Fe/Ta₂O₅/Co yapısında daha büyük kalınlıklarda manyetik eşleşmeme görölmekteydi (bkz. Şekil 3.19). Oysa şekil 3.22 de görüldüğü gibi 2 nm Ta ve plasma oksitlenmesi yaklaşık 4 nm Ta₂O₅ oluşturur ve manyetik eşleşme yoktur. Ta oksitlendiği zaman oksijenden dolayı Ta kalınlığı yaklaşık %100 artar (Rottlander 2001). Buradan da Ta'nın oksitlenmesinin Ta₂O₅ hedeften büyütülen bariyerden daha iyi sonuç verdiğini söyleyebiliriz. XPS analizinden görüleceği gibi Ta(3nm)+Oksijen

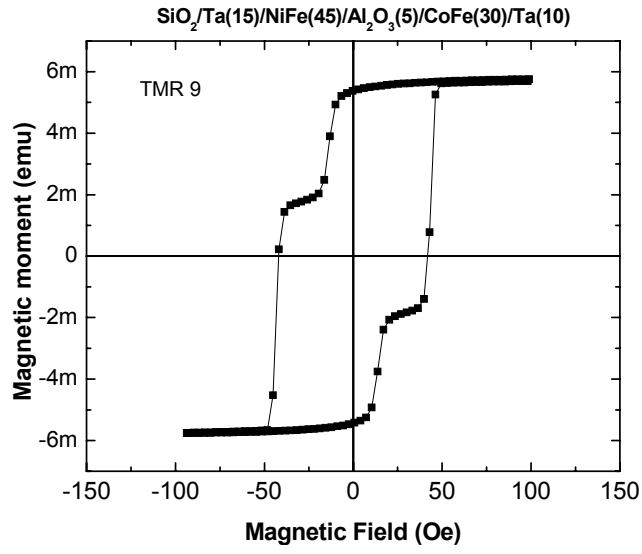
plazma ile büyütülen bariyer tamamen Ta₂O₅ oluşturmaktadır. Ta oksitlenince en kararlı faz olduğu için Ta₂O₅ oluştuğunu söylüyoruz.



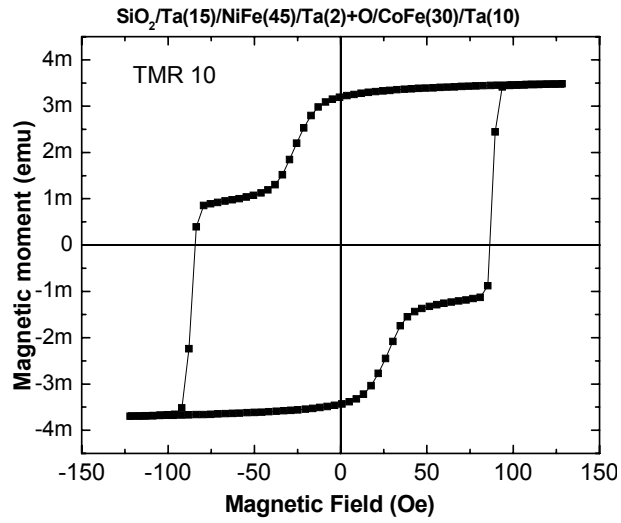
Şekil 3.22. SiO₂/Ta(15nm)/Co(20nm)/Fe(10nm)/Ta(2nm)+O/Fe(10nm)/Co(20nm)/Ta(10nm) yapısının M-H döngüsü.



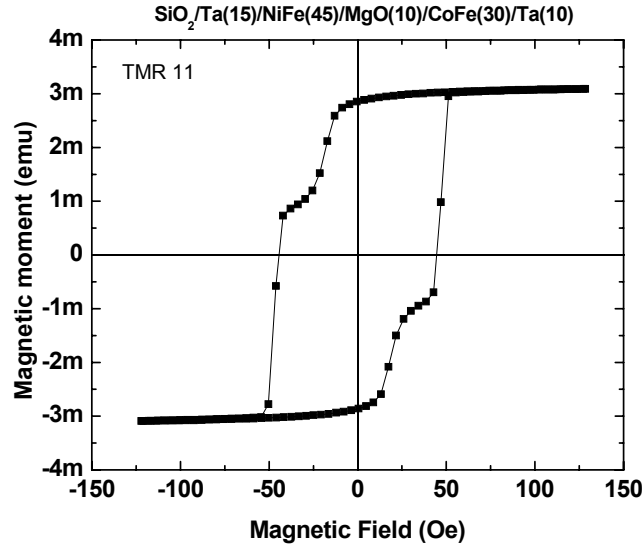
Şekil 3.23. SiO₂/Ta(20nm)/CoFeB(10nm)/Ta(2nm)+O/Fe(10nm)/Ta(10nm) yapısının M-H döngüsü



Şekil 3.24. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(15\text{nm})/\text{NiFe}(45\text{nm})/\text{Al}_2\text{O}_3(5\text{nm})/\text{CoFe}(30\text{nm})/\text{Ta}(10\text{nm})$ yapısının M-H döngüsü



Şekil 3.25. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(15\text{nm})/\text{NiFe}(45\text{nm})/\text{Ta}(2\text{nm})+\text{O}/\text{CoFe}(30\text{nm})/\text{Ta}(10\text{nm})$ yapısının M-H döngüsü



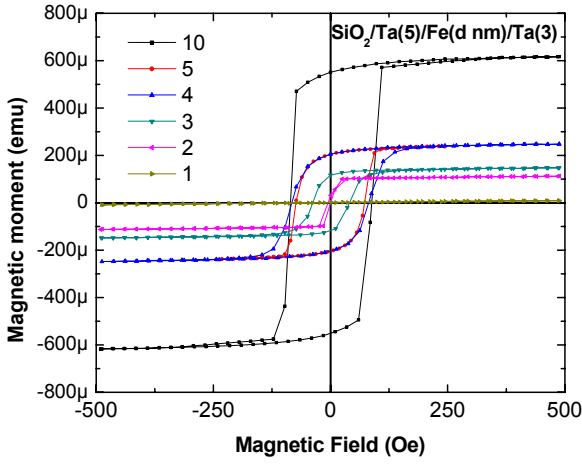
Şekil 3.26. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(15\text{nm})/\text{NiFe}(45\text{nm})/\text{MgO}(10\text{nm})/\text{CoFe}(30\text{nm})/\text{Ta}(10\text{nm})$ yapısının M-H döngüsü

Bu sistemlerden TMR 9 ve 11 numaralı örneklerin I-V ve TMR ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar elektriksel analiz kısmında verilecektir.

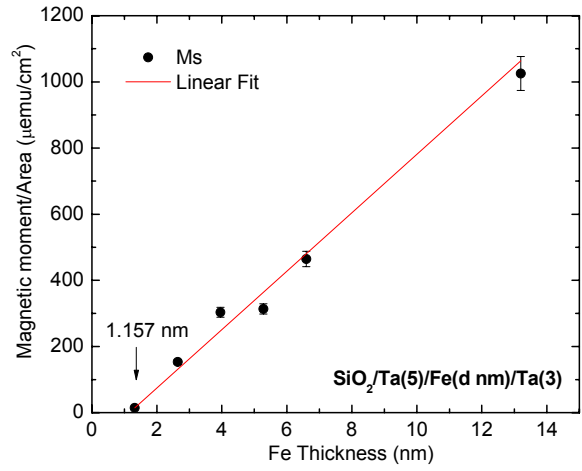
3.2.2 Manyetik Ölü Katmanların İncelenmesi

Oluşturulan spin vana yapılarında TMR ölçülememesinin nedenlerinden en önemlisi FM/(Yalıtkan, Metal) ara yüzeylerinde oluşabilecek manyetik ölü katmanların (magnetic dead layers) varlığıdır. Bu yüzden kullanılan FM filmleri ile metal ve yalıtkan arayüzeyleri incelenerek manyetik ölü katmanların (MÖK) varlığı araştırılmıştır. MÖK' ları belirlemek için FM filmi farklı kalınlıklarda ara yüzey oluşturacak filmler arasına büyütülür ve doygunluk mıknatıslanmasının kalınlığa bağlı olarak değişimi gözlenir. Ara yüzeylerde oluşan oksitlenme, bileşik oluşumu, arayüzeyin pürüzlülüğü gibi nedenler MÖK oluşmasına sebep olabilirler. Bu projede kullandığımız bir kaç FM filmin Ta filmi ve kullanılan yalıtkan filmlerle oluşturduğu spin vana yapıları incelenerek MÖK kalınlıkları belirlenmiştir. Buda, özellikle $\text{Fe}/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Co}$ yapısında, TMR ölçülemememizin nedenlerinden en önemlisi olduğu düşünülmektedir.

Şekil 3.27 de $\text{Ta}/\text{Fe}/\text{Ta}$ yapısının M-H döngüleri ve hesaplanan MÖK kalınlıkları verilmiştir. MÖK kalınlığı M_s değerlerinin çizgisel uyumunun (linear fit) x eksenini kestiği nokta olarak hesaplanır ve $\text{Ta}/\text{Fe}/\text{Ta}$ için 1.157 nm olduğu görülmektedir. Fe bcc örgüye sahiptir ve örgü sabiti 2.87 Å dır ve iki düzlem arasındaki kalınlık yaklaşık 1.5 Å dur. 11 Å Fe' de yaklaşık 6 atomik düzlem vardır, yani yaklaşık 6 katman Fe filmi manyetik değildir.



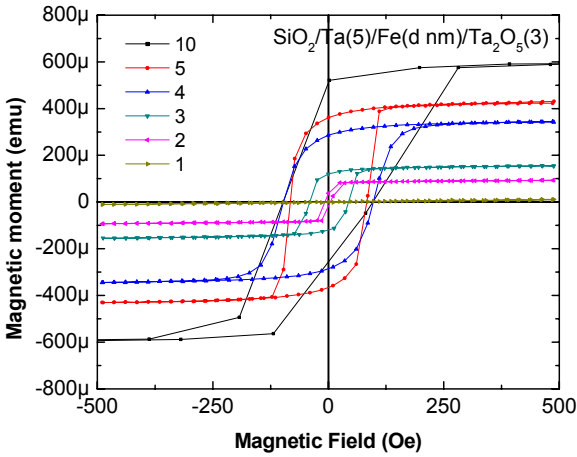
(a)



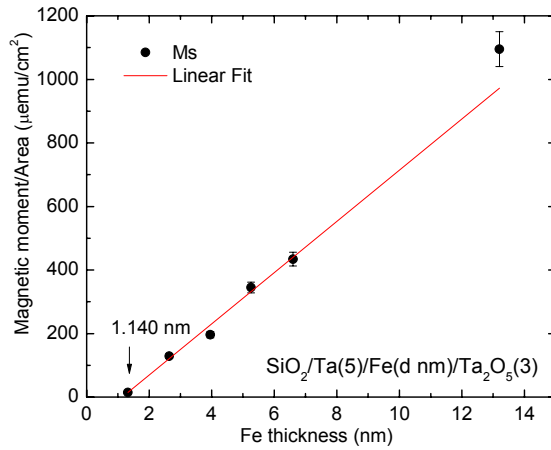
(b)

Şekil 3.27. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(5\text{nm})/\text{Fe}(d)/\text{Ta}(3\text{nm})$ yapısının (a)M-H döngüleri, (b)manyetik ölü katman grafiği.

Şekil 3.28 de ise $\text{Ta}/\text{Fe}/\text{Ta}_2\text{O}_5$ yapısının M-H ve MÖK grafiği verilmiştir. Görüldüğü gibi Fe Ta_2O_5 ile kaplandığında MÖK kalınlığında bir kayda değer bir değişiklik olmamıştır. Fe oksijene çok duyarlı olduğu için muhtemelen her iki arayüzeyde oksit tabakası mevcuttur. Ayrıca Fe ve Ta 'nın karışımından dolayı manyetik olmayan bileşik oluşması muhtemeldir. $\text{Fe}/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Co}$ yapısında tünelleme görmemize rağmen TMR ölçmememizin en önemli nedenin bu MÖK' lar olduğu düşünülmektedir.



(a)

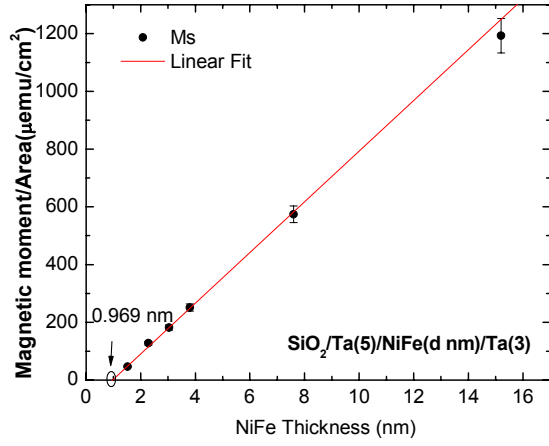


(b)

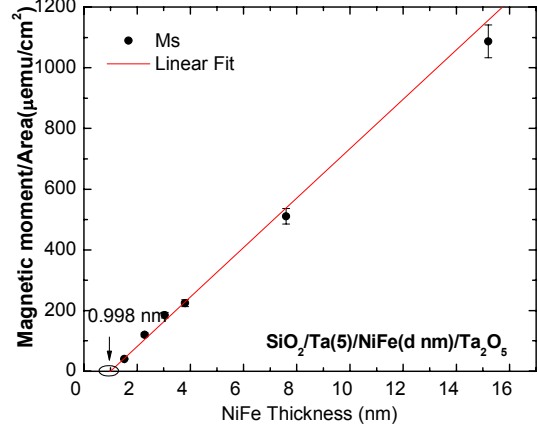
Şekil 3.28. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(5\text{nm})/\text{Fe}(d\text{nm})/\text{Ta}_2\text{O}_5(3\text{nm})$ yapısının (a)M-H döngüleri, (b)manyetik ölü katman grafiği.

Kullanılan diğer FM'lerin MÖK'ları aynı şekilde hesaplanmıştır. Burada bütün katmanlar için M-H'leri vermeye gerek yoktur bu yüzden sadece hesaplanan MÖK'ların grafikleri verilecektir.

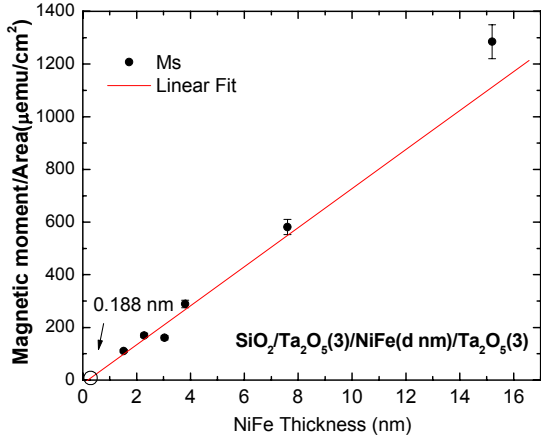
Şekil 3.29 da NiFe Ferromanyetik filminin Ta ve oksitlerle yaptıkları ara yüzeylerden hesaplanan MÖK grafikleri gösterilmektedir. NiFe/Oksit arayüzeyleri daha az MÖK' lar oluşturmaktadır.



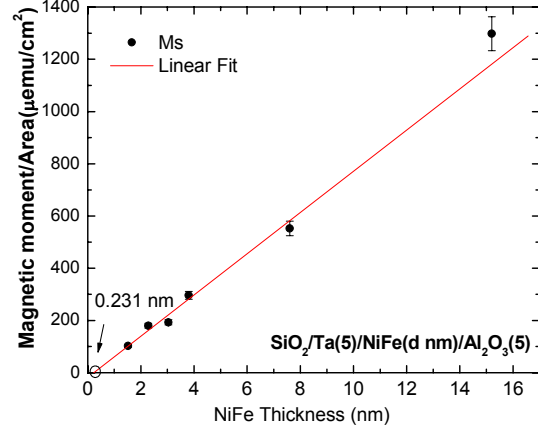
(a)



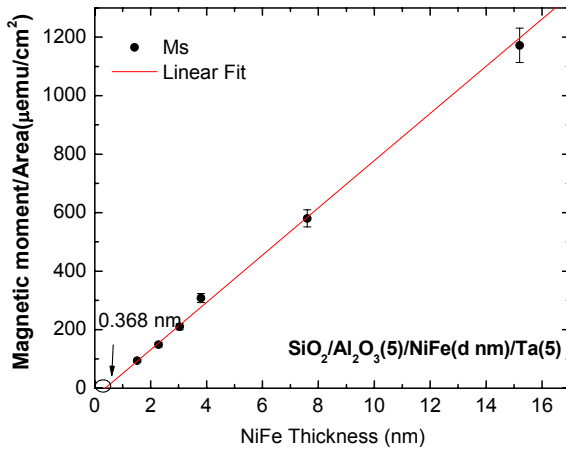
(b)



(c)



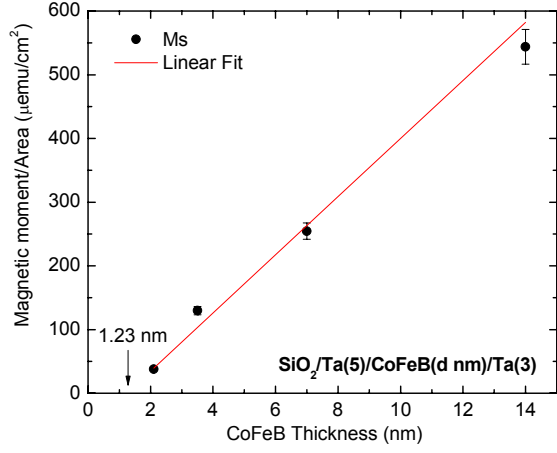
(d)



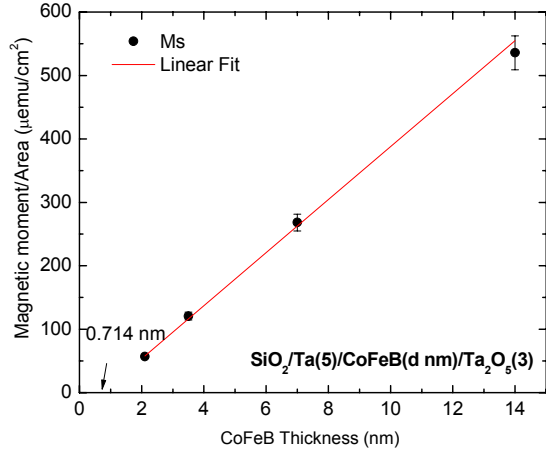
(e)

Şekil 3.29. MÖK grafikleri: (a) $\text{SiO}_2/\text{Ta}/\text{NiFe}(d)/\text{Ta}$, (b) $\text{SiO}_2/\text{Ta}/\text{NiFe}(d)/\text{Ta}_2\text{O}_5$, (c) $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{NiFe}(d)/\text{Ta}_2\text{O}_5$, (d) $\text{SiO}_2/\text{Ta}/\text{NiFe}(d)/\text{Al}_2\text{O}_3$, (e) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiFe}(d)/\text{Ta}$

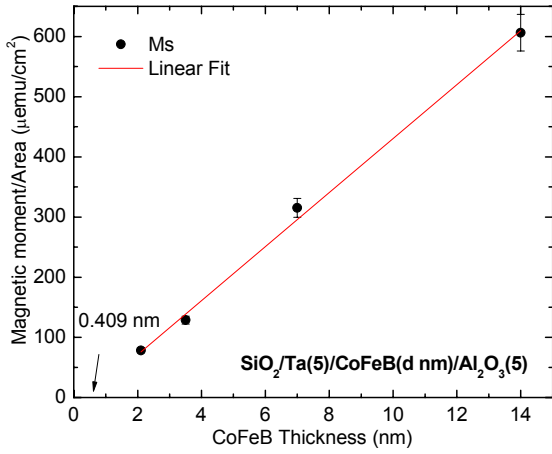
Şekil 3.30 da CoFeB Ferromanyetik filminin Ta ve oksitlerle yaptıkları ara yüzeylerden hesaplanan MÖK grafikleri gösterilmektedir. Buradada yine CoFeB/Oksit arayüzeyleri daha az MÖK' lar oluşturmaktadır.



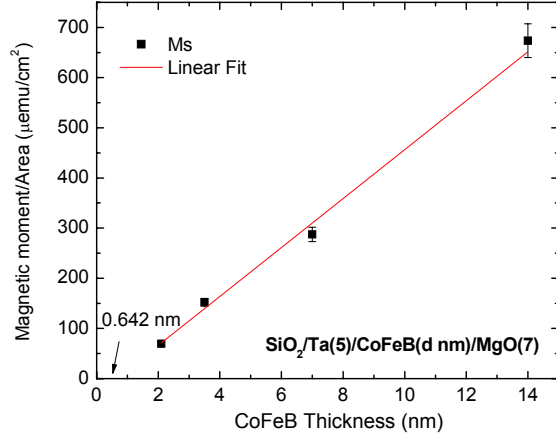
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.30. MÖK grafikleri: (a) SiO₂/Ta/CoFeB/Ta, (b) SiO₂/Ta/CoFeB/Ta₂O₅, (c) SiO₂/Ta/CoFeB/Al₂O₃, (d) SiO₂/Ta/CoFeB/MgO.

Tablo 3.1 de Fe, NiFe ve CoFeB ferromanyetik filmlerinin farklı metal ve yalıtkanlarla arayüzeylerinde oluşan ölü manyetik katmanların kalınlıkları verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi genel olarak FM' ler Ta(metal) ile arayüzey oluşturduğunda MÖK kalınlığı FM bir yalıtkan ile arayüzey oluşturduğu durumdakinden daha fazladır. Örneğin NiFe/Ta arayüzeyindeki MKÖ kalınlığı NiFe/Ta₂O₅ arayüzeyinkinden dört kat daha fazladır. Bununla birlikte buradan çalışılan yapılarda MKÖ lerin kalınlıkları için genel bir sonuç çıkarmak sağlıklı olmayacaktır. Her sistem kendi içinde incelenerek MÖK' ların oluşma mekanizması çalışılmalıdır. Ancak bu şimdilik bu projenin amcına uygun değildir.

FM/metal arayüzeyinden daha büyük MÖK oluşması, metallerde serbest elektronların olmasından dolayıdır. FM katmandaki spin kutuplanmış elektronlar manyetik olmayan metalden ve/veya arayüzeyden geçerken serbest elektronlar ile etkileşerek yönelimlerini kaybederler. FM/yalıtkan arayüzeyinde ise yalıtkindan dolayı serbest elektronlar bulunmaz ve elektronlar yalıtkan tabakadan tünelleme yapacağı için ve ortamda serbest elektronlar olmadığından kutuplanmalarını daha uzun mesafede mahafaza edebilirler.

Table 3.1. Ferromanyetik filmlerde manyetik ölü katmanların hesaplanması için büyütülen çok katmanlı yapılar.

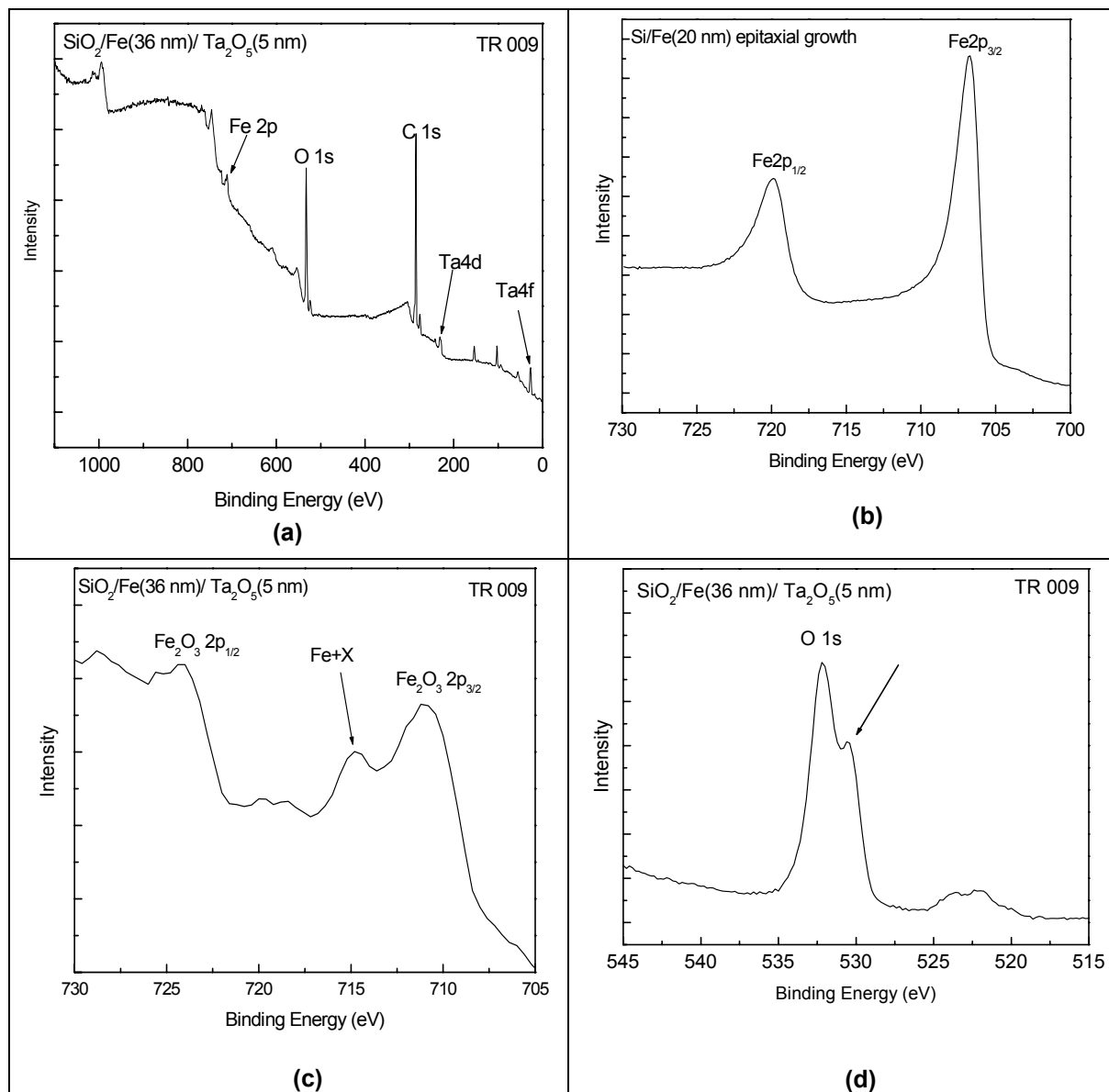
SiO ₂ /X/FM/Y yapıları	Manyetik Ölü Katman kalınlıkları (MÖK)
SiO ₂ /Ta(5)/Fe/Ta(3)	1.157
SiO ₂ /Ta(5)/Fe/Ta ₂ O ₅	1.14
SiO ₂ /Ta(5)/Fe/MgO(7)	0.09
SiO ₂ /Ta(5)/Fe/Al ₂ O ₃ (5)	0.361
SiO ₂ /Ta(5)/CoFeB/Ta(3)	1.23
SiO ₂ /Ta(5)/CoFeB/Ta ₂ O ₅	0.714
SiO ₂ /Ta(5)/CoFeB/MgO(7)	0.759
SiO ₂ /Ta(5)/CoFeB/ Al ₂ O ₃ (5)	0.409
SiO ₂ /Ta(5)/NiFe/Ta(3)	0.969
SiO ₂ /Ta(5)/NiFe/Ta ₂ O ₅	0.998
SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ /NiFe/Ta ₂ O ₅	0.188
SiO ₂ /Ta(5)/NiFe/Al ₂ O ₃ (5)	0.231
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (5)/NiFe/Ta(5)	0.368

3.3 X-Işını Photoelektron Spektroskopisi (XPS) Analizleri

XPS malzemeye zarar vermeyen özellikle malzeme hakkında kimyasal bilgi veren yüzeye (~5-6 nm) çok duyarlı analitik bir tekniktir. Bu projede XPS kullanılarak ara yüzeyler ve yüzeyler incelenmeye çalışılmıştır. Özellikle arayüzeylerde oluşan oksitlenme kolaylıkla görülebilmektedir. Manyetik analizlerde görülen ve oksitlenmeden dolayı oluşabilecek manyetik ölü katmanlar XPS ile desteklenmektedir.

Öncelikle sabit (alt) elektrod Fe' yi çalışmak için SiO₂/Fe(36 nm)/Ta₂O₅(5 nm) yapısı büyütülmüştür. Fe yapısını inceleyebilmek için üzerine sadece 5 nm Ta₂O₅ kaplayıp analiz edilmiştir. Genel (survey) spektrumu Şekil 3.31(a) da gösterilmiştir. Genel spektrumdan görüleceği gibi 533 eV' da oksijen ve 284 eV' da karbon büyük oranda mevcuttur. Bu oksijen üstteki Ta₂O₅ dan gelmektedir. Ancak karbon istenmeyen bir durumdur ve karbondan kurtulmak oldukça zordur, çünkü çok yüksek vakum ve temizlik işlemleri gerekmektedir. Fe pikleri: Fe2p_{3/2} 706 eV ve Fe2p_{5/2} 720 eV' de bulunur ve spin-orbit ayırımı 13 eV' dur. Ta pikleri: Ta4f_{7/2} 21.7 ve Ta4f_{5/2} 23.5 eV de bulunur ve spin-orbit ayırımı 1.8 eV dir (Wagner 1979).

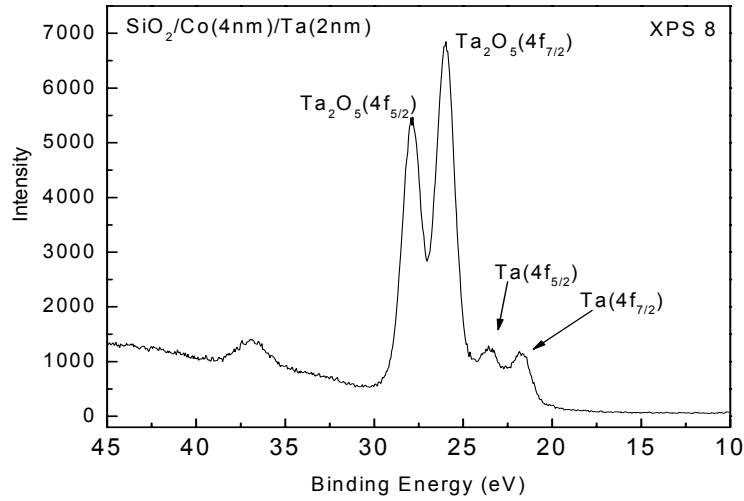
Elementlerin kimyasal analizleri sadece söz konusu piklerin olduğu kısım taranarak (peak scan) yapılır. Şekil 3.31(b) epitaxial olarak büyütülen 20 nm Fe filminin pik spektrumunu gösterilmektedir (Tari 2002). 706 eV' daki pik $Fe2p_{3/2}$ dir ve şiddeti 720 eV deki $Fe2p_{1/2}$ ' nin şiddetinin iki katı kadardır. İki pik arasındaki bağlanma enerji farkı spin-orbit ayırımından dolayıdır. XPS de S yörüngesinin dışındaki yörüngelerden gelen pikler spin-orbit etkisiyle çifttirler (doublet). Pikler simetrik değildir, bu metallerin özelliğidir. Şekil 3.31(c) de $SiO_2/Fe(36nm)/Ta_2O_5(5nm)$ yapısındaki Fe' nin spektrumu gösteriliyor. Görüldüğü gibi Fe pikleri 710.7 eV ye kaymış ve pik genişliği artmıştır ve ayrıca 715 civarında başka bir pik görülmektedir. Pikteki bu kayma Fe_2O_3 olduğunu gösterir. Ayrıca 715 eV' deki pik Fe+X bileşik oluşumuna işaret eder. Burada pik uyumu (peak fit) yapıp Fe+X in faz durumu belirlenebilir ancak spektrum XPS' de yeterli hassasiyetle ölçülmediği için (özellikle background düzgün değildir) fit yapmaya gerek duyulmamıştır. Ayrıca zaten Fe_2O_3 olduğu açıktır. Fazların ne olduğu çok önemli değildir çünkü herhangi bir faz dahi spin polarizasyonu yok edebilir. Bununla birlikte Fe+X pikinde Fe ve Ta nin bileşik yapma olasılığında düşünülmalıdır.



Şekil 3.31. $SiO_2/Fe(36\text{ nm})/Ta_2O_5(5\text{ nm})$ yapısının XPS (a) Genel , (b) 20 nm epitaxial Fe pik (c) $Fe2p$, (d) $O1s$ spektrumları.

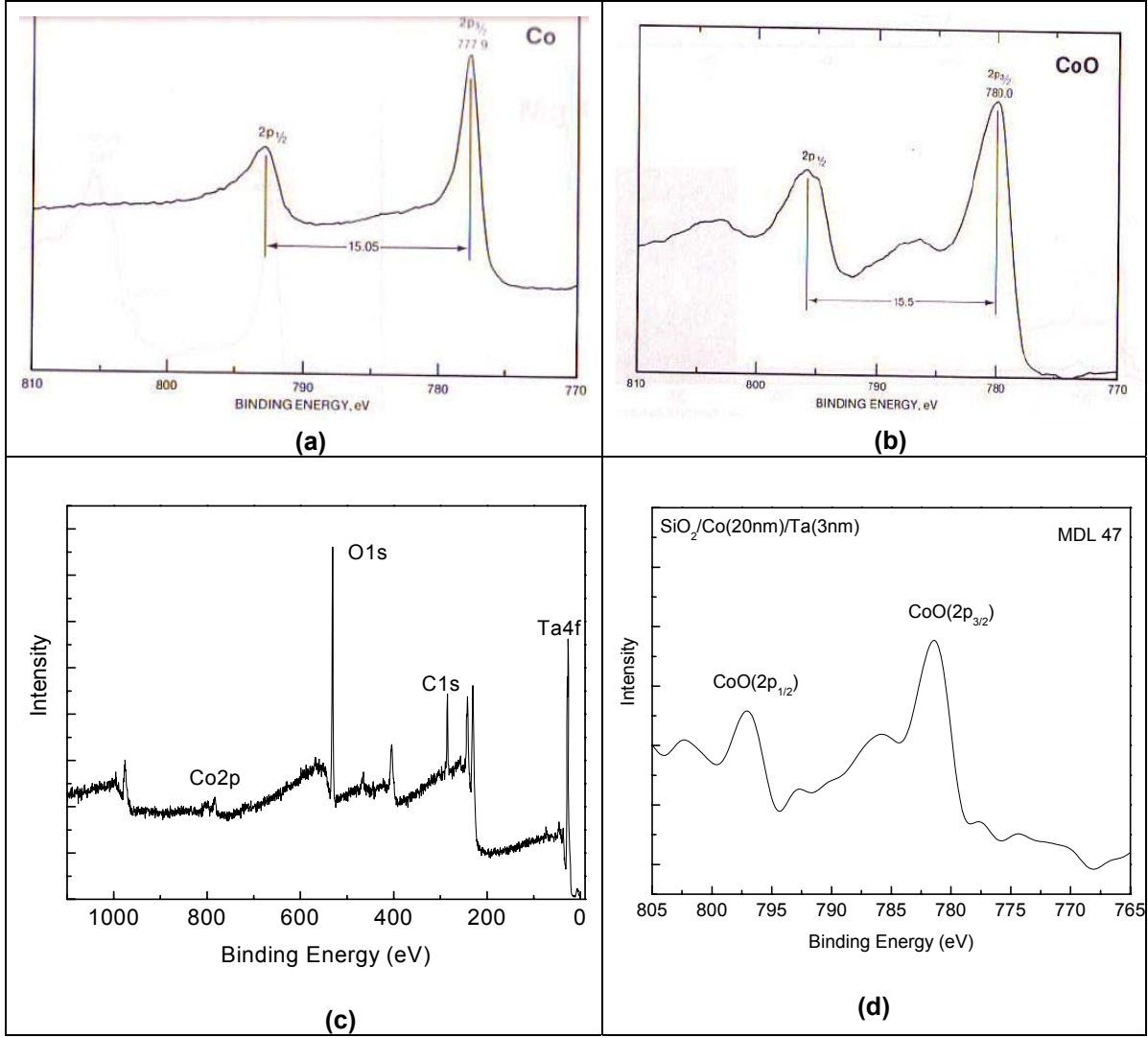
Oksijen 1s piki Şekil 3.31(d) de gösterilmiştir. S yörüngesinden gelen piklerde spin-orbit ayrımı yoktur. 531 eV' da okla gösterilen küçük çıkıntı oksijeninde sadece oksijen olmadığını ve bu sinyalin bir kısmının Ta₂O₅ dan geldiğini gösterir. Başka bir deyişle oksijen sinyali sadece örneğin atmosfere çıkarılmasından dolayı oluşan yüzey oksitlenmesinden dolayı değildir. Bu piki fit etmeye gerek yoktur.

Büyüttüğümüz bütün spin vana yapılarında Ta üst kontak katman olarak kullanılmıştır, bu sebeple Ta atmosfere çıkarıldığında yüzey kimyasını anlamak TMR ölçümlerinde direnc hakkında bilgi verir. Şekil 3.32 de SiO₂/Co/Ta yapısında Ta yüzeyi spektrumu görülmektedir. 20.8 eV de görülen Ta4f_{7/2} ve Ta 4f_{5/2} pikleri Metal Ta filmine aittir ve iki pik olması spin-orbit ayrışımından dolayıdır. 26 eV deki pik ise Ta₂O₅ dir. Metalik Ta oksitlendiğinde XPS spektrumunda kimyasal shift oluşur, yani pikin yeri oksitlenme derecesine göre kayma gösterir. Görüldüğü gibi sadece Ta filmi büyütülmesine rağmen film atmosfere çıkarıldığında Ta filmi ortamdaki çok büyük oranda oksitlenmektedir. Bu film büyüme esnasında oluşturmaya çalıştığımız (birinci yöntem) MTJ lerde direncin artmasına sebep olur.



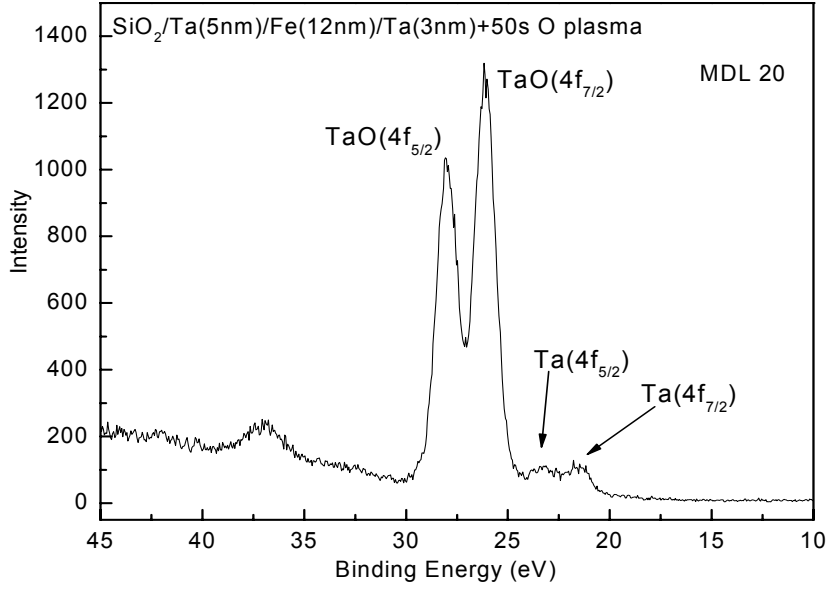
Şekil 3.32. SiO₂/Co/Ta yapısının XPS spektrumu.

Üst katman Co ve Ta yüzey ve ara yüzeyi çalışılmıştır. Şekil 3.33(a) ve (b) de sırasıyla sadece Co ve CoO filminin spektrumları karşılaştırma amaçlı verilmiştir. Co filminin 2p_{3/2} piki 778 eV oysa CoO filminin 2p_{3/2} piki 78 eV de bulunur. Spin orbit ayrımı 15.05 eV dir (Wagner 1979). Bizim büyüttüğümüz SiO₂/Co/Ta yapısının genel ve Co spektrumu ise sırasıyla şekil 3.33(c) ve (d) de verilmiştir. Genel spektrumda görüldüğü gibi yine yüzeyde oksijen ve karbon büyük oranda mevcuttur. Co pik spektrumunda görülen piklerden 780 eV deki pik CoO2p_{3/2} ve 796 eV deki pik ise CoO2p_{1/2} aittir. Co pikinde oksitlenmeden dolayı 2 eV lik kimyasal kayma görülmektedir.



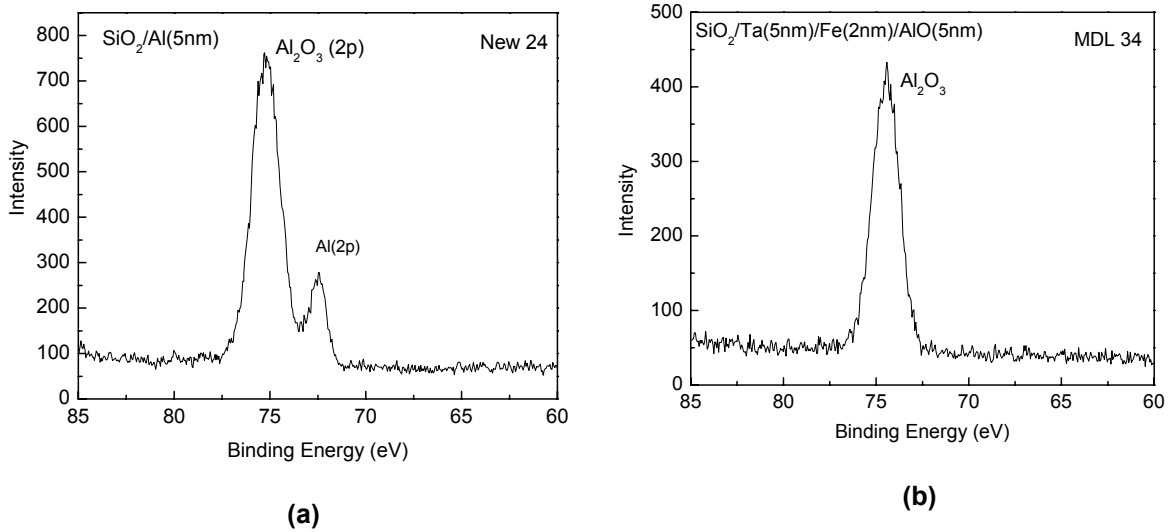
Şekil 3.33. XPS spektrumları (a) Co, (b) CoO (c) SiO₂/Co(20nm)/Ta(3nm) genel (d) SiO₂/Co(20nm)/Ta(3nm) pik spektrumu.

Şekil 3.34 de SiO₂/Ta(5nm)/Fe(12nm)/Ta(3nm)+(50s Oksijen plazma) yapısında Ta yüzeyinin XPS spektrumu verilmiştir. Bu yapıda Ta önce Fe üzerine 3 nm olacak şekilde büyütülmüş ve ardından 50 s oksijen plazmaya tabi tutulmuştur. Burada amaç bu yöntemle Ta'nın tamamen oksitlendiğini görmektir. Şekil 3.32 ile karşılaştırıldığında 21 eV'deki Ta filminin şiddetinin azalmasına rağmen yine de bir miktar Ta'nın oksitlenmediği görülmektedir. Bu FM katmanlar arasında eşleşmeye ve ayrıca spin vanasının ohmik davranış göstermesine neden olabilir. Ancak bu durum oksitlenme zamanının optimum edilmesi ile aşılabilir.



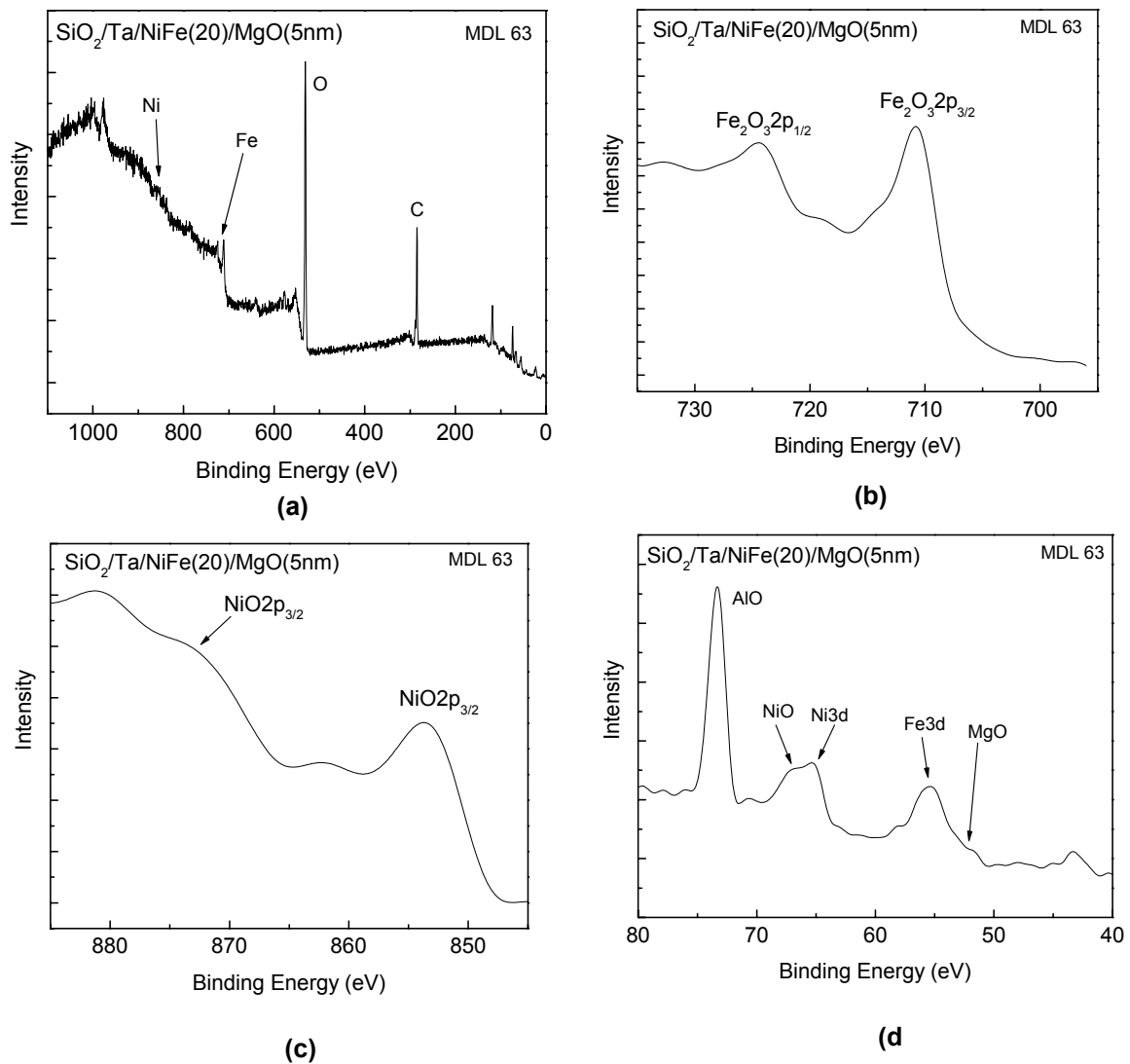
Şekil 3.34. Oksijen plazma ile oluşturulan Ta₂O₅ filminin XPS spektrumu.

Atmosferde Al oksitlenmesinin etkisi görmek için ayrıca SiO₂ üzerine metal Al ve Al₂O₃ büyütülerek XPS spektrumları incelenmiştir. Şekil 3.35(a) de SiO₂ üzerine büyütülen 5 nm Al metalinin XPS spektrumu görülmektedir. 73 eV deki pik Al ve 75 eV deki pik ise Al₂O₃ aittir. Görüldüğü gibi sadece Al büyütmemize rağmen film atmosfere çıkarılınca büyük oranda oksitlenmektedir. Şekil 3.35(b) de ise Al₂O₃ hedeften büyütülen 5 nm Al₂O₃ spektrumu verilmiştir. Bu spektrumda Al metalinden gelen pik yoktur ve sadece Al₂O₃ piki görülmektedir. Buradan bariyer olarak büyüttüğümüz Al₂O₃ ın tamamen yalıtkan olduğunu anlarız ve buda FM filmler arasındaki manyetik eşleşmeyi engeller.



Şekil 3.35. XPS spektrumlar (a) SiO₂/Al, (b) SiO₂/Ta/Fe/Al₂O₃

Alt FM katman olarak $\text{Ni}_{50}\text{Fe}_{50}$ alaşımı kullanılmıştır. Bu FM, MgO ve Al_2O_3 bariyer kullanılarak spin vana yapıları büyütülmüştür. NiFe oksitlenmesini çalışmak için $\text{SiO}_2/\text{Ta}(5\text{nm})/\text{NiFe}(20\text{nm})/\text{MgO}(5\text{nm})$ yapısı büyütülerek XPS analizi yapılmıştır. Şekil 3.36 da bu yapının genel ve pik spektrumları gösterilmektedir. Genel spektrumdan görüldüğü gibi 531 eV de oksijen ve 284 eV de karbon çok büyük oranda bulunmaktadır. Oksijenin analizinden bu oksijenin çok büyük bir kısmının yüzeyden geldiğini anlıyoruz çünkü oksijende bir kimyasal kayma veya herhangi bir bileşim oluşumu görülmektedir. Bu oksitlenmenin sebebi büyük oranda örneğin atmosfere çıkarılmasıdır. Bununla birlikte MgO büyüttüğümüzde Mg, Fe ve Nikelde oksitlenme görülmektedir. Şekil 3.36(b) Fe spektrumu, (c) Ni ve (d) ise MgO spektrumu verilmiştir. Fe spektrumunda görüldüğü gibi Fe_2O_3 710 eV de görünmekte ancak bileşim varlığının Fe/Ta ile karşılaştırılınca daha az olasılıklı olduğu söylenebilir (bkz şekil 3.31(c)). Bu bileşimlerin belirlenmesi için daha detaylı XPS çalışması (depth profile) gerekmektedir, biz ancak XPS sistemi ile yüzey analizi çalışması yapabildik.



Şekil 3.36. $\text{SiO}_2/\text{Ta}/\text{NiFe}/\text{MgO}$ yapısının XPS spektrumları (a) genel, (b) Fe 2p, (c) Ni2p, (d) MgO2p.

Şekil 3.36(c) Ni pik spektrumunu göstermektedir. Ni 2p piki 852.3 eV de ve NiO ise 853.3 eV de bulunur ve spin orbit ayırımı 18.4 eV dir (Wagner 1979). Spektrumda Ni piki 853.6 eV de, kimyasal kayma ve genişleme gösterdiğinden bu pikin NiO olduğunu söylüyoruz. Şekil 3.36(d) de ise MgO 2p, Fe 3d, Ni 3d ve Al_2O_3 pikleri görülmektedir. MgO 2p piki 53 ve Fe 3d 56

eV de bulunduğu için bu iki pik karışmış durumda görülmektedir. Ayrıca Al_2O_3 büyütmememize rağmen sistemde Al_2O_3 bulunduğu için bu pikde görülmektedir. Bu istenmeyen bir kirlilik sorunudur. Burada XPS' in ne kadar hassas olduğunda görüyoruz. Daha temiz filmler büyütmek için vakum sisteminin daha temiz ve taban basıncının mümkün olduğunca düşük ve kullanılan gazlarında çok hassas olması gerekir.

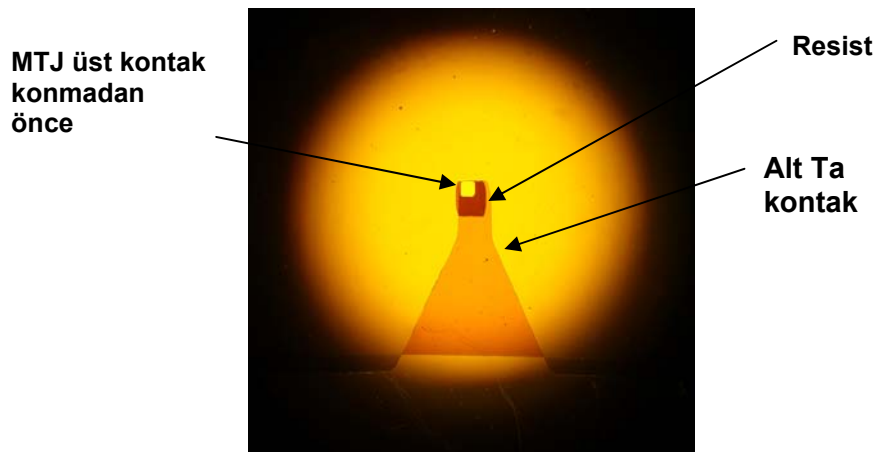
Diğer kullanılan FM ve bariyerlerde XPS çalışmaları yapılmıştır. Ancak UIC-MPL de kullandığımız XPS sistemi ile derinlik profili (dept profile) yapamadığımız için ara yüzeyleri daha detaylı çalışma olanağımız olmadı. Bu yapılan XPS çalışmaları genellikle yüzeyden alınan ölçümlerdir. Örneklerimiz atmosfere çıkarılıncada oksitlenmektedir. Bu nedenle faz analizlerini yapamıyoruz. Karşılaşılan bilimsel sorunların çözümü ancak vakum altında spin vana yapıları büyütülerek ve aynı zamanda (in situ) olarak faz analizleri yapılabilirse daha sağlıklı olacaktır.

TMR ölçemememizin daha çok arayüzeylerin oksitlenmesine ve/veya bileşik oluşmasına bağladık. Ancak bu öngörümüzü destekleyecek şekilde arayüzey analizleri yapma olanağımız, özellikle geçirgenli elektron mikroskobu (TEM), olmadığından kesin olarak söyleyemeyiz. Özellikle TEM kalınlık, ara yüzeyin pürüzlülüğü, çok ince filmlerde varsa kristal yapı ve kusurlar hakkında çok önemli bilgiler verebilecektir. Ancak manyetik analizlerden MÖK' ların varlığını anlamaktayız.

3.4 Elektriksel Karakterizasyon: I-V ve TMR Ölçüm Sonuçları

Bölümümüzdeki imkanlarla litografi yöntemi kullanılarak film katmanlarını büyütürken oluşturduğumuz (birinci yöntem) MTJ lerin I-V ve TMR ölçümleri yapılmıştır. MTJ oluşturma basamakları bölüm ikide detaylı verilmiştir.

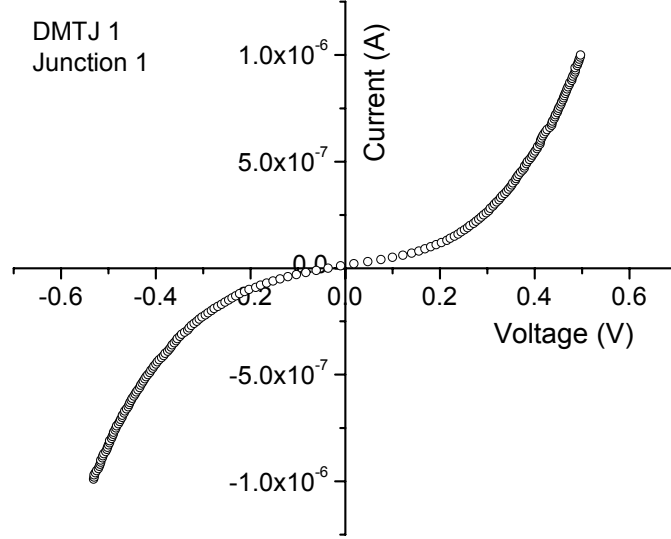
Oluşturduğumuz boyutları 50x50, 40x40 ve 30x30 μm dir. Litografi esnasındaki bir basamak, üst Ta kontak tabak büyütülmeden önce maske yerleştiricide (mask aligner) çekilen görüntü şekil 3.37 de gösterilmiştir.



Şekil 3.37. Bir MTJ in litografi anındaki maske ayarlayıcısı altında görüntüsü.

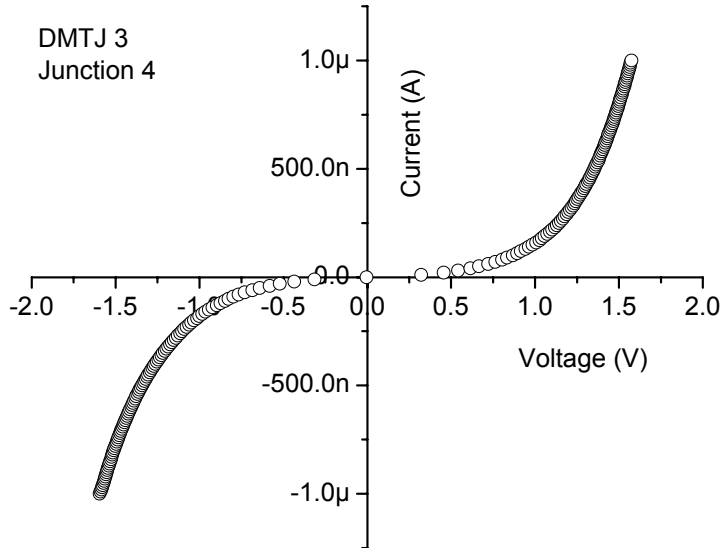
Şekil 3.38. $SiO_2/Ta(24 \text{ nm})/Fe(12 \text{ nm})/TaO_x(\sim 8 \text{ nm})/Co(4 \text{ nm})/Ta(24 \text{ nm})/Au(\sim 10 \text{ nm})$ olacak şekilde oluşturulan MTJ' I-V karakteristiği gösterilmektedir. I-V dört kontak (four point probe) olarak yapılmıştır. Uygulanan akım $\sim \pm 1 \times 10^{-6}$ amperdir. Bilindiği gibi eğer Ta kontaktarı arasında bir bağlantı (short) olsaydı ve/veya spin vanası tamamen metalik özellik gösterseydi I-V grafiği doğrusal olurdu. Ancak MTJ' nin I-V grafiği görüldüğü gibi doğrusal değildir. Buda bize spin vanasının tünelleme özelliği gösterdiğini söyler. Grafiğin simetrik olmasındanda akımın her iki taraftan gönderildiğindedede MTJ' nin aynı özelliği gösterdiğini, başka bir deyişle

her iki ferromanyetik/yalıtkan arayüzeylerinin ($\text{Fe}/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ve $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Co}$) benzer yapısal özellik gösterdiğini anlarız (Plat 1997).



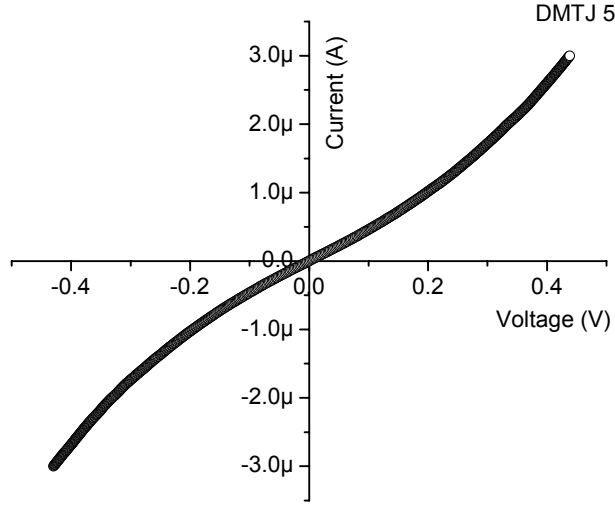
Şekil 3.38. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(24 \text{ nm})/\text{Fe}(12 \text{ nm})/\text{Ta}_2\text{O}_5(\sim 8 \text{ nm})/\text{Co}(4 \text{ nm})/\text{Ta}(24 \text{ nm})/\text{Au}(\sim 10 \text{ nm})$ ' dan oluşan MTJ' nin oda sıcaklığında I-V grafiği.

MTJ' lerde büyük bir sorunda tekrarlanabilirliktir. Şekil 3.38 deki MTJ yapısı tekrar büyütülmüş ve ölçülen I-V grafiği şekil 3.39 da gösterilmiştir. Aynı I-V grafiğinin elde edilmesi büyüttüğümüz tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir.



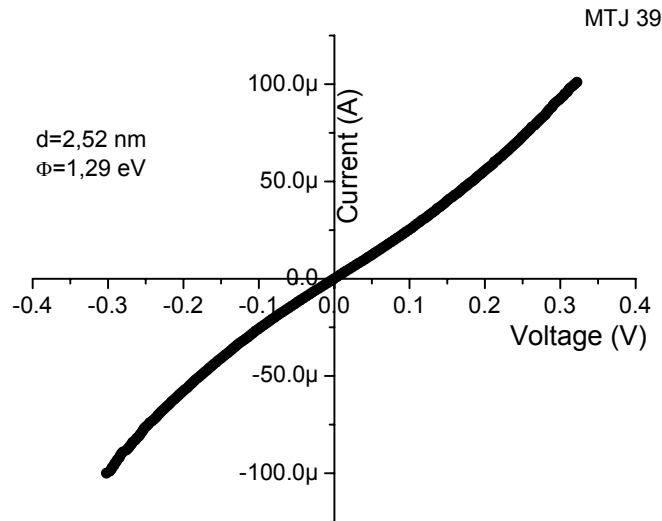
Şekil 3.39. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(24 \text{ nm})/\text{Fe}(12 \text{ nm})/\text{Ta}_2\text{O}_5(\sim 8 \text{ nm})/\text{Co}(4 \text{ nm})/\text{Ta}(24 \text{ nm})/\text{Au}(\sim 10 \text{ nm})$ den oluşan MTJ' nin oda sıcaklığında I-V grafiği.

Şekil 3.40 da $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20\text{nm})/\text{Fe}(10\text{nm})/\text{Ta}_2\text{O}_5(20\text{nm})/\text{Co}(10\text{nm})$ yapısının I-V grafiği verilmiştir. Grafikten yine tünellemenin olduğu anlaşılmaktadır.



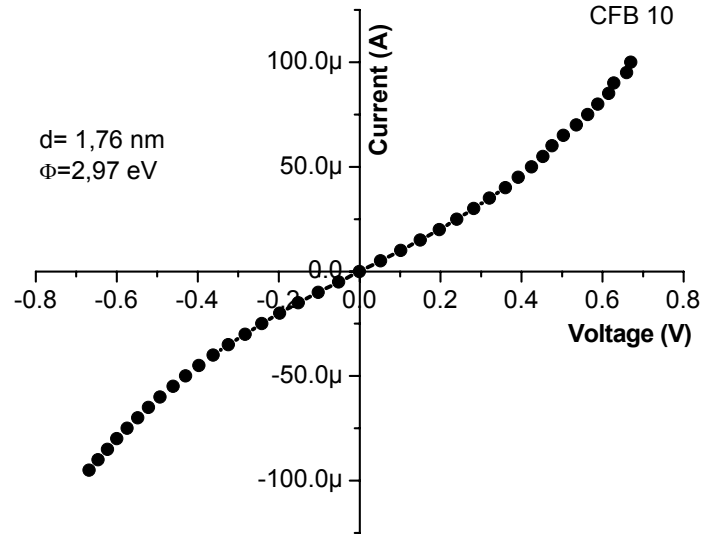
Şekil 3.40 $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20\text{nm})/\text{Fe}(10\text{nm})/\text{TaO}(20\text{nm})/\text{Co}(10\text{nm})$ yapısının I-V grafiği

Şekil 3.41. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20\text{nm})/\text{Fe}(10\text{nm})/\text{Ta}_2\text{O}_5(20\text{nm})/\text{Co}(10\text{nm})/\text{Ta}(5\text{nm})$ yapısının I-V grafiği verilmiştir. Bringmann denkleminde (Bringman 1970) I-V grafiği fit edilerek hesaplanan bariyer kalınlığı ve yüksekliği sırasıyla $d=2,52$ nm, $\Phi=1,29$ eV olarak bulunmuştur. Bariyer katmanı, Ta_2O_5 , 20 nm büyütülmesine (kalınlık ölçere göre) rağmen etkili kalınlık çok daha küçük bulunmuştur.



Şekil 3.41. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20)/\text{Fe}(10)/\text{Ta}_2\text{O}_5(20)/\text{Co}(10)/\text{Ta}(5)$ yapısının I-V grafiği

Şekil 3.42. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20)/\text{CoFeB}(10)/\text{Al}_2\text{O}_3(5)/\text{Fe}(10)/\text{Ta}(20)$ yapısının I-V grafiği verilmiştir. Bringmann denkleminde bariyer kalınlığı ve yüksekliği sırasıyla $d=1.76$ nm, $\Phi=2.97$ eV olarak bulunmuştur. Bariyer katmanı, Al_2O_3 , 5 nm büyütülmesine rağmen etkili kalınlık daha kalınlık ölçere göre yaklaşık yarısı kadardır. Bunun nedeninin ara yüzeylerde oluşan karışımın bariyer kalınlığını azalması olduğu tahmin edilmektedir.

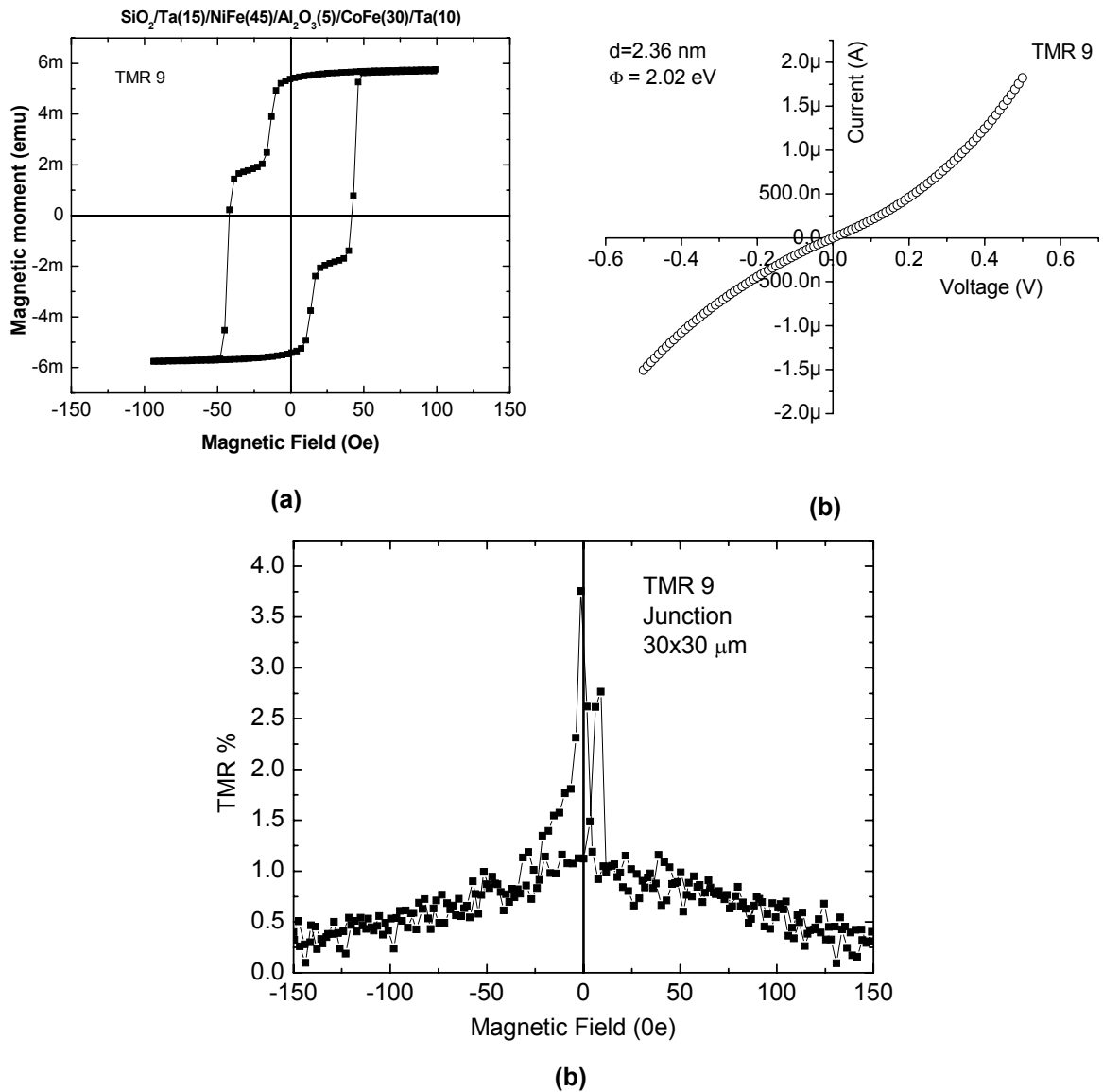


Şekil 3.42. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20)/\text{CoFeB}(10)/\text{Al}_2\text{O}_3(5)/\text{Fe}(10)/\text{Ta}(20)$ yapısının I-V grafiği.

Birinci yöntemle oluşturduğumuz MTJ lerden TMR değeri ölçülememiştir. Bunun nedenleri tartışma bölümünde açıklanacaktır.

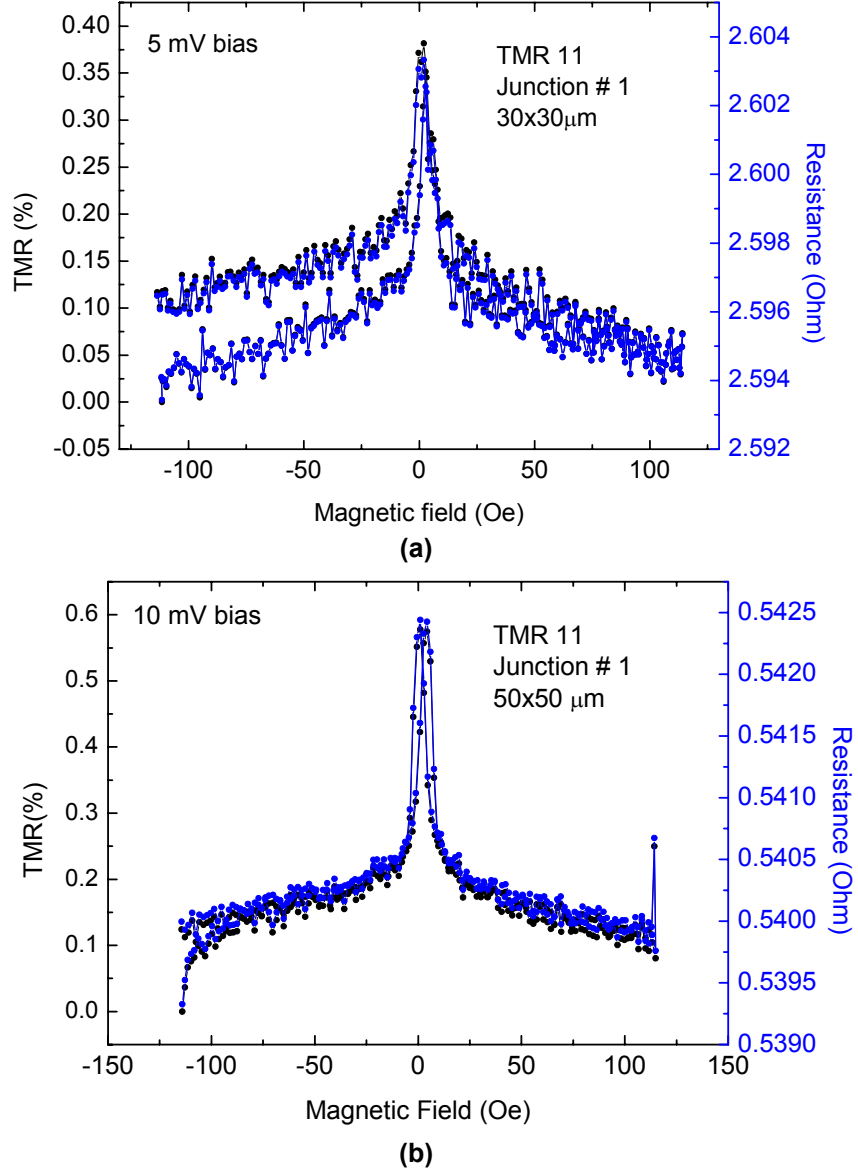
İkinci yöntem ile büyütülen MTJ' lerin elektriksel ölçümleri

MTJ' ler ayrıca aşındırma yöntemi (ikinci yöntem) ile sürekli film olarak büyütüldükten sonra TMR ölçümleri yapılmıştır. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(15\text{nm})/\text{NiFe}(45\text{nm})/\text{Al}_2\text{O}_3(5\text{nm})/\text{CoFe}(30\text{nm})/\text{Ta}(10\text{nm})$ yapısı büyütülmüş ve elektriksel ölçümler yapılmıştır. Bu yapıdaki eklemelerin boyutları $50 \times 50 \mu\text{m}$, $30 \times 30 \mu\text{m}$ olacak şekildedir. Uygulanan akım yine μA seviyesindedir. Şekli 3.43(a) ve (b) de M-H döngüsü ve I-V grafiği verilmiştir. M-H döngüsünde ilk manyetik geri dönüşüm eğrisi, NiFe için $H_c=15 \text{ Oe}$ ve CoFe için $H_c=50 \text{ Oe}$ dir. FM katmanlar arasında manyetik eşleşme yoktur ve manyetik geri dönüşüm eğrileri oldukça keskindir. Uygulanan voltaj 0.6 V civarındadır ve grafikten tünelleme olduğu görülmektedir. Bringmann denkleminde etkin bariyer kalınlığı ve yüksekliği sırasıyla $d=2.33 \text{ nm}$, $\Phi=0.95 \text{ eV}$ olarak bulunmuştur. Şekil 3.43(c) de TMR grafiği gösterilmektedir. Manyetik alan sıfır olduğu durumda direncin maximum ve diğer değerlerde ise minimum olduğu görülmektedir. TMR değeri %3.5 olarak ölçülmüştür. Ölçümler diğer bir kaç eklem içinde benzer sonuçlar vermektedir.



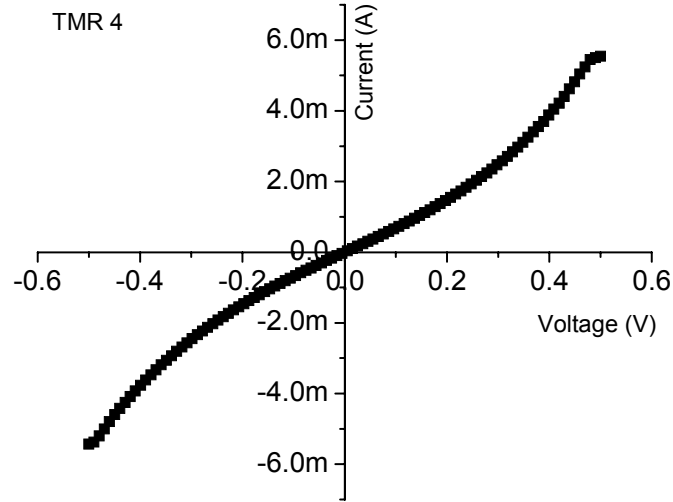
Şekil 3.43. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(15\text{nm})/\text{NiFe}(45\text{nm})/\text{Al}_2\text{O}_3(5\text{nm})/\text{CoFe}(30\text{nm})/\text{Ta}(10\text{nm})$ yapısının (a) M-H döngüsü, (b) I-V grafiği, (c) TMR grafiği.

Şekil 3.44 de $\text{SiO}_2/\text{Ta}(15)/\text{NiFe}(45)/\text{MgO}(10)/\text{CoFe}(30)/\text{Ta}(10)$ yapısının TMR grafiği gösterilmiştir. Ölçümler farklı iki taban voltajı ile alınmıştır. Her iki durumdada TMR oranı %0.5 olarak ölçülmüştür.



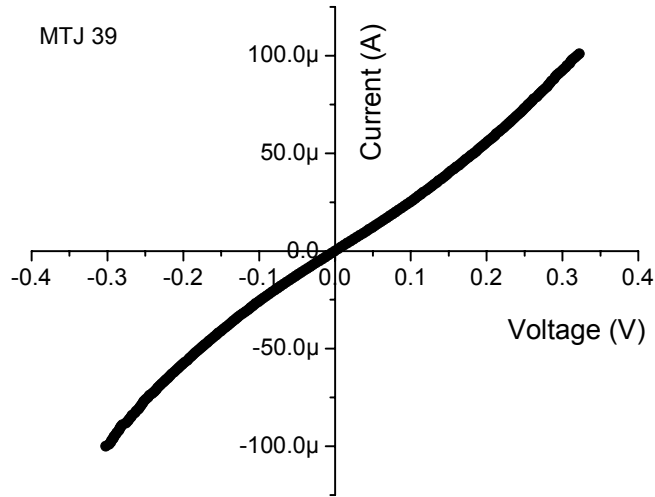
Şekil 3.44. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(15)/\text{NiFe}(45)/\text{MgO}(10)/\text{CoFe}(30)/\text{Ta}(10)$ sürekli filimlerden oluşturulan TMR grafikleri (a) 30x30 μm ve 5mV bias, (b) 50x50 μm ve 10mV bias.

Şekil 3.45 de $\text{SiO}_2/\text{Ta}(15\text{nm})/\text{Co}(20\text{nm})/\text{Fe}(10\text{nm})/\text{Ta}(2\text{nm})+\text{O}/\text{Fe}(10\text{nm})/\text{Co}(20\text{nm})/\text{Ta}(10\text{nm})$ yapısının I-V grafiği verilmiştir. Tünelleme görülmektedir. TMR ölçümleri yapılmıştır ancak TMR ölçülememiştir.



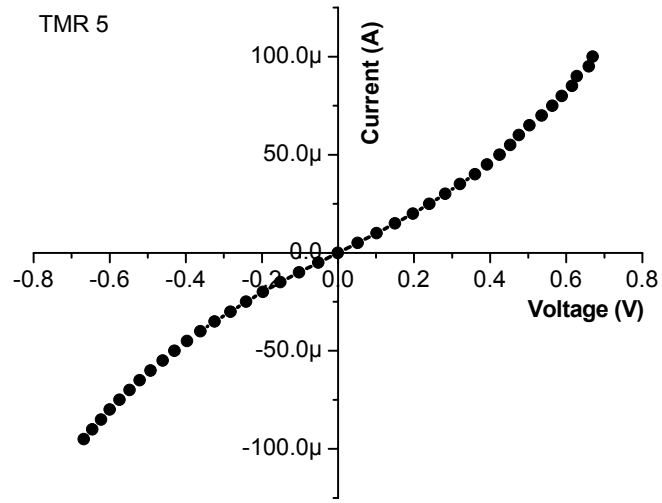
Şekil 3.45. $\text{SiO}_2/\text{Ta}/\text{Co}/\text{Fe}/\text{Ta}(2\text{nm})+\text{O}/\text{Fe}/\text{Co}/\text{Ta}$ yapısının I-V grafiği.

Şekil 3.46 da $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20\text{nm})/\text{Fe}(10\text{nm})/\text{Ta}_2\text{O}_5(20)/\text{Co}(10\text{nm})/\text{Ta}(5\text{nm})$ yapısının I-V grafiği gösterilmektedir. TMR ölçülememiştir.



Şekil 3.46. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20\text{nm})/\text{Fe}(10\text{nm})/\text{Ta}_2\text{O}_5(20)/\text{Co}(10\text{nm})/\text{Ta}(5\text{nm})$ yapısının I-V grafiği.

Şekil 3.47 de $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20)/\text{CoFeB}(10)/\text{Al}_2\text{O}_3(5)/\text{Fe}(10)/\text{Ta}(20)$ yapısının I-V grafiği gösterilmektedir. TMR ölçülememiştir.



Şekil 3.47. $\text{SiO}_2/\text{Ta}(20)/\text{CoFeB}(10)/\text{Al}_2\text{O}_3(5)/\text{Fe}(10)/\text{Ta}(20)$ yapısının I-V grafiği.

Bazı yapılarda TMR ölçemememizin nedenlerini tek tek açıklamak mümkün değildir çünkü her sistem kendi içinde incelenmelidir. Ancak biz genel olarak neden TMR ölçülemediğinin nedenlerini öngörebiliriz.

BÖLÜM 4

TARTIŞMA

Bu çalışmada manyetik tünel eklemleri oluşturmak için tek ve çok katmanlı filmler miknatsal püskürtme yöntemi ile büyütülmüş, yapısal ve manyetik karakterizasyonları yapılmıştır. İmkanlarımız dahilinde MTJ' ler iki ayrı yolla oluşturulmuş ve bazı yapılarda TMR ölçümleri yapılmıştır. Özellikle ferromagnet olarak Fe ve Co, bariyer olarak Ta₂O₅ üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu malzemelerin detaylı analizlerinden elde edilen bilgi birikimi ile diğer FM ve oksit bariyerlerden kullanılarak MTJ' ler büyütülmüştür.

Fe ve Co' nun SiO₂ üzerine büyütülmesinde yapılarının belli bir kalınlığa kadar dokusal olmadığı ancak Tantalum tampon film üzerine büyütüldüklerinde ise yapılarının dramatik olarak değiştiği ve bunda FM katmanların manyetik özelliklerini büyük oranda değiştirdiği görülmüştür. FM filmlerin yapıları iyileşmiştir yani büyük oranda dokusal yapıya sahip olmuşlardır. Ta aynı zamanda elektriksel ölçümler için kontak olarak kullanılmıştır.

Atomik kuvvet mikroskobu analizlerinden tek ve çok katmanlı filmlerin yüzeylerinin oldukça pürüzsüz olduğu görülmüştür. Bu spiktonik aygıtlarda oldukça önemlidir çünkü çok ince olan (1-3 nm) bariyer katmanının tekdüze büyümesi ve ayrıca FM katmanların eşleşmemesi gerekmektedir.

Tek katmanlı filmlerin manyetik döngü analizlerinden FM filmlerin manyetik davranışları belirlenmiştir. Bu çalışmada FM katmanının çivilenmesi yöntemi kullanılmadığından FM katmanlar olarak iki farklı ferromanyetik malzeme kullanılmıştır. Spin vana yapılarının manyetik analizlerinden görüldüğü gibi farklı zorlayıcı manyetik alanlara sahip ve manyetik olarak eşleşmemiş FM filmler rutin olarak büyütülmüşlerdir. Ayrıca farklı bariyer katmanlar kullanılarak yine FM katmanların eşleşmediği spin vana yapıları büyütülmüştür.

MTJ' ler iki farklı yöntemle oluşturulmuşlardır. I-V ölçümleri dört nokta yöntemi ile yapılmıştır. TMR ölçümleri ise yine dört nokta yöntemi ile ve manyetik alan altında yapılmıştır. Film büyütme anında oluşturulan (birinci yöntem) MTJ' lerin I-V grafiklerinden akımın tünelleme yoluyla geçtiği görülmüştür. I-V ölçümleri bir kaç yapı için tekrarlanmıştır ve tünelleme rutin olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte oluşturulan her bir spin vana yapısında oluşturulan yaklaşık 24 tane MTJ den ancak bir kaç tanesinde tünelleme görülmüş diğerleri ohmik davranış göstermektedir. Buda bu çalışmanın çok hassas olduğunu ve çok temiz ve kontrollü şekilde yapılması gerektiğini göstermektedir.

Birinci yöntemle oluşturulan MTJ' ler de TMR ölçülemezdir. Bu yöntemde örneği üç defa vakumdan çıkarılarak litografi yapılması gerektiğinden kirlilik ve oksitlenme sorunu doğmaktadır. Bölümümüzde henüz temiz oda bulunmamakta, buna bağlı olarak sürekli filmlerden MTJ oluşturmak için gerekli makine teçhizat olmadığı için zorluklar yaşanmıştır. Klasik yöntemle oluşturulan mikron seviyesindeki litografi işlemleri sağlıklı olmamaktadır. Bu sebeple TMR ölçülememesinin sebeplerini anlamakta güç olmaktadır. Çünkü sorunun litografidenmi yoksa MTJ filmlerindenmi kaynaklandığı ikilemi vardır.

İkinci yöntemle sürekli filmlerden oluşturulan MTJ lerden büyük çoğunluğu I-V lerden görüleceği gibi tünelleme göstermektedir. Bazı yapılarda, özellikle SiO₂/Ta(15nm)/NiFe(45nm)/Al₂O₃(5nm)/CoFe(30nm)/Ta(10nm) yapısında %3.5 oranında TMR ölçülmüştür. Bu birinci yöntemle büyütülen filmlerde sorunun kısmen litografiden kaynaklanabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte Ta₂O₅ yapısında TMR ölçülememesi Fe/Ta₂O₅/Co yapısından kaynaklandığını göstermektedir.

Fe/Ta₂O₅/Co yapısında bariyer katmanı Ta₂O₅ püskürtme hedefi kullanılarak büyütülmüştür. Bu durumda stokiyometrik Ta₂O₅ elde edilemediği elipsometry analizinde görülmüştür. Ayrıca FM filmler arasında eşleşme görüldüğünden bariyer kalınlığı artırılmıştır. Ancak eşleşmenin zayıfladığı kalınlıklarda yaklaşık 18 nm Ta₂O₅ TMR ölçmek mümkün

olmamaktadır. Bu yüzden Ta₂O₅ bariyeri çok ince, 2 nm Ta filmi büyütüldükten sonra oksijen plazma ile oksitlenmiştir. Bu durumda kalınlık kontrol edilebilmektedir. XPS analizinde görüldüğü gibi oksijen plazma ile daha kontrollü Ta₂O₅ büyütülebilmektedir. Ayrıca manyetik analizlerden plazma oksitlenmiş yaklaşık 4 nm Ta₂O₅ bariyerin manyetik eşleşmeyi engellediği görülmüştür. Yine XPS analizlerinde FM filmlerin Fe, Co, NiFe, büyük oranda oksitlendikleri görülmüştür, bu arayüzeylerde manyetik ölü katmanların oluşmasına dolayısıyla elektronların ara yüzeylerden geçerken spinleri yönelimlerini kaybetmelerine neden olur. Aynı zamanda FM/metal arayüzeyinde oluşan karışımdan dolayıda MÖK' lar oluşur ve bu durumda MÖK' ların kalınlıklarının daha fazla olduğu görülmüştür. FM katmanında spin kutuplanarak gelen elektronlar ara yüzeyde manyetik olmayan bir ortama geçtiklerinde ortamdaki elektronlarla etkileşerek yönelimlerinin kaybederler. Bu durum FM/Metal arayüzeyinde daha fazla görülür çünkü metallerde serbest elektronlar bulunmaktadır. FM/yalıtkan arayüzeyinde eğer manyetik ölü tabaka yok ise elektronlar tünelleme yapacağı için ve ortamda serbest elektronlar olmadığı için kutuplanmalarını daha uzun mesafede mahafaza edebilirler.

Manyetik analizlerden FM/Metal, FM/Yalıtkan arayüzeylerinde manyetik ölü katmanları olduğu görülmüştür. Ancak MÖK kalınlıkları kullanılan FM filmine ve bariyere göre değişmektedir. Özellikle NiFe/Al₂O₃ daha ince manyetik ölü katmana yol açmaktadır. MÖK ları tamamen yok etmek çok zordur, karışımın olmadığı, temiz ortamda ve büyüme parametrelerinin optimumlaştırılması ile çok keskin arayüzeyler büyütme gerekir. Bununla birlikte MÖK kalınlıkları mümkün olduğunca küçük olması oluşturulan MTJ' lerin çalışma olasılığını artırır. Manyetik analizlerden görüldüğü gibi Ta/Fe/Ta₂O₅ /arayüzeylerinde 1.14 nm MÖK oluşmaktadır. Buda TMR ölçmememizin nedenini büyük oranda açıklamaktadır. Ta/NiFe/Al₂O₃ yapısında daha az 0.23 nm MÖK olduğu görülmüş ve bu yapıda %3.5 TMR ölçülmüştür. Buda Fe için öngörümüzü desteklemektedir.

Öneriler:

Film büyütme olanaklarımızdan dolayı, hem oksitleri hemde ferromanyetik katmaları aynı sistemde büyütme durumundayız, buda yalıtkan oksit tabaka büyütüldüğünde diğer film büyütme hedeflerinin oksitlenmesine neden olmaktadır, ön püskürtme yapılmasına rağmen oksitten kurtulmak kolay değildir. Oksitlenmenin ve karışım oluşumunun önlenmesi veya azaltılması için mevcut film büyütme sistemine ek bir oksit büyütme vakum odası eklenmelidir. Ayrıca litografi imkanları iyileştirilmelidir.

Tipik spin vanaları normalde üçten fazla katman kullanılarak büyütülmektedir. Alt FM katman genellikle çivileme yöntemi ile zorlayıcı manyetik alan kontrol edilir. Buda antiferromanyetik bir katman kullanılarak yapılır, örneğin; Si/SiO₂/Ta(5)/Ru(50)/Ta(5)/NiFe(5)/MnIr(8)/CoFe(2)/Ru(0.8)/MgO(1.5)/free layer(3)/Ta(5)/Ru(15) olduğu gibi. Biz bu çalışmada katman sayısını azaltarak MTJ' ler yapmaya ve TMR ölçmeyi hedefledik. Bu başarılırsa aygıt işlemleri (process) açısından çok daha basit spintronik aygıtlar üretilir.

Ta' nın kontak olarak kullanılması çok uygun değildir. Literatürde genellikle rutenyum kullanılmaktadır, çünkü rutenyum daha pürüzsüz ve direnci Ta' dan daha düşüktür. Buda küçük RXA değeri vermektedir. Ancak rutenyum çok pahalı olduğu için bu çalışmada Ta seçilmiştir.

Ta₂O₅ literatürde de belirtildiği gibi küçük bant aralığına sahip olmasına rağmen yüksek TMR değeri vermemektedir. Teorik olarak Ta₂O₅ daha düşük TMR ve düşük RXA değeri vermesi beklenmekle beraber literatürde en fazla %10 civarında, Co/TaOx/Co, yapısında görülmüştür. Bu sebeple fazla çalışılmamıştır. Bu projenin çıkış noktalarından biride, gelişmiş analitik tekniklerle Ta₂O₅ bariyerden oluşan spin vana yapılarını inceleyerek TMR değerini arttırmak olarak düşünülmüştür. Ancak Mevcut olanaklarımız ile bunu yapmak pek kolay değildir. Zorluk film katmalarının özellikle bariyerin çok ince olması ve bu filmlerin çok iyi kontrol edilmelerinin gerekliliğinden kaynaklanmaktadır.

Arayüzeylerde karışımdan dolayı oluşabilecek film katmanlarını tespit edememekteyiz. Bunun için çok ince filmlerde kristalleşmenin ve kalınlığın incelenmesi için TEM ve kimyasal analizler için XPS (dept profile or in situ) gibi imkanlarının kullanılabilirdir.

Son zamanlarda literatürde kristal epitaksiyel oksitlerin daha yüksek TMR değeri verdiği belirtilmektedir. Örneğin “çok yüksek TMR oranı moleküler demet epitaxy kullanılarak büyütülen tek kristal Fe/MgO/Fe yapısında oda sıcaklığında %180 olarak verilmiştir (Yuasa 2004). Aynı şekilde çokkristal CoFe/MgO/CoFe yapısında ısıl tavlama ile %300 TMR oranı elde edilmiştir (Parkin 2004). Miknatısal püskürtme ile büyütülen CoFeB/MgO/CoFeB çok katmalı yapısında düşük sıcaklıklarda 300% ve oda sıcaklığında 230% olarak bulunmuştur (Djayaprawira 2005). Bu yapıda CoFeB amorf, MgO ise (001) dokusal (textured) yapıdadır. Son olarak en yüksek TMR %500 ile CoFeB/MgO/CoFeB oda sıcaklığında (Lee 2007) tarafından tek kristal MgO barrier olmak üzere elde edilmiştir.”

Bu yönde çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Baibich, R., et.al., Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic superlattices, *Phys. Rev. Lett.*, 61 (21), 2472-2475, (1988).
- Bowen, M., Bibes, M., Barthélémy, A., Contour, J.P., Anane, A., Lemaitre, Y., and Fert, Nearly total spin polarization in $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ from tunneling experiments, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 233-235, (2003).
- Bowen, M., et.al., Large magnetoresistance in Fe/MgO/FeCo(001) epitaxial tunnel junctions on GaAs(001), *Appl. Phys. Lett.*, 79, 1655-1657 (2001).
- Bringman, W.F., Dyness, R.C., and Rowell, J.M., Tunneling conductance of asymmetrical barriers, *J. Appl. Phys.*, 45, 1915-1921, (1970).
- Djayaprawira, D.D., Tsunekawa, K., Nagai, M., Maehara, H., Yamagata, S., Watanabe, N., Yuasa, S., Suzuki, Y., and Ando, K., 230% room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB manyetik tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 86, 92502(1-3), (2005).
- Grundler, D., Spintronics, *Physics World*, 15, 39-43 (2002).
- Han, X. F., Oogane, M., Kubota, H., Ando, Y., and Miyazaki, T., Fabrication of high magnetoresistance tunnel junctions using $\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}$ ferromanyetik electrodes, *Appl. Phys. Lett.*, 77, 283–285, (2000).
- Hehn, M., Lenoble, O., Lacour, D., and Schuhl, A., Manyetik anisotropy and domain duplication in transport properties of tunnel junctions, *Physical Review B*, 62 (17), 11344-11346, (2000).
- Hook, J. R. and Hall, H. E., *Solid State Physics*, Chicester: John Wiley & Sons. 1995.
- Jiang, A., Tyson, T.A., Axe, L., Gladczuk, L., Sosnowski, M., Cote, P., The structure and stability of β -Ta thin films, *Thin Solid Films*, 479, 166-173, (2005).
- Jullière, M., Tunneling between ferromagnetic films, *Physics Letters* , 54 A(3), 225-226, (1975).

- Kumar, G. 2004. Structural and manyetik characterization of Nd-based Nd-Fe and Nd-Fe-Co-Al metastable alloys. Technical University Dresden Ph.D Thesis.
- Kumar, D., and Gupta. A., Evolution of structural and magnetic properties of sputtered nanocrystalline Co thin films with thermal annealing, *J. Magn. Magn. Mater.*, 308, 318-324 (2007).
- Lee, Y. M., Hayakawa, J., Ikeda, S., Matsukura, F., Ohno, H., Effect of electrode composition on the tunnel magnetoresistance of pseudo-spin-valve manyetik tunnel junction with a MgO tunnel barrier, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 212507 (1-3), (2007).
- Liu, L., Wang, Y. and Gong, H., Annealing effects of tantalum films on Si and SiO₂/Si substrates in various vacuums, *J. Appl. Phys.*, 90, 416-420, (2001).
- Mitani, S., Moriyama, T. and Takanashi, K., Fe/MgO/FeCo(100) epitaxial magnetic tunnel junctions prepared by using *in situ* plasma oxidation, *J. Appl. Phys.*, 93, 8041 (2003).
- Miyazaki, T. and Tezuka, N., Giant manyetik tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe Junction, *J. Magn. Magn. Mater.*, 139(3), L231, (1995).
- Moodera, J. S., et. al., Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions, *Phys. Rev. Lett.*, 74(16), 3273-3276, (1995).
- Mott, N.F., The electrical conductivity of transition metals, *Proc. Roy. Soc. London A*, 153, 699, (1936).
- Néel, L., *Ann. Phys. (N.Y.)* 2, 61 (1967).
- Ng, V., Hu. J.F., Adeyeye, A.O., Wang, J.P. and Chong, T.C., "Radio frequency substrate bias effect on properties of Co thin film and multilayer structures. *J. Magn. Magn. Mater.*, 247, 339-344, (2002).
- Park, M.H., Honk, Y.K., Gee, S.H., Mottern, M.L., and Jang, T.W., Difference in coercivity between Co/Fe and Fe/Co bilayers, *J. Appl. Phys.*, 91(10), 7218-7220, (2002).
- Parkin, S. S., et. al., Exchange-biased magnetic tunnel junctions and application to nonvolatile magnetic random access memory (invited), *J. Appl. Phys.*, 85, 5828-5833, (1999).
- Parkin, S.S., Kaiser, C., Panchula, A., Rice, P.M., Hughes, B., Samant, M., and Yang, S.H., Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers, *Nature Materials*, 3, 862-867, (2004).

- Parkin, S.S., Roche, N.M., and Roche, K.P., Oscillations in exchange coupling and magnetoresistance in metallic superlattice structures: Co/Ru, Co/Cr, and Fe/Cr, *Phys. Rev.Lett.*, 64, 2304-23-7, (1990).
- Plat, C.L., Deny, B. and Berkowitz, A.E. "Spin polarized tunneling in reactively sputtered tunnel junctions," *J. Appl. Phys.*, 81 (8), 5523-5525, (1997).
- Rottlander, P., Hehn, M., Lenoble, O. and Schuhl, A., Tantalum oxide as an alternative low height tunnel barrier in magnetic junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 78, 3274-3276, (2001).
- Sharma, A., Tripathi, S., Brajpuriya, R., Shripathi, T., and Chaudhari, S. M. "Thickness Dependent Structural, Magnetic and Transport Properties of Nanostructured Cobalt Thin Films", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 7, 2041-2045, (2007).
- Simmons, J.G., Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes seperated by a thin insulating film, *J. Appl. Phys.*, 34(6), 1793, (1963).
- Swerts, J., Vandelande, S., Temst, K. and Haesendonck, C.V., Surface roughness effects on the magnetization reversal of polycrystalline Fe/Ag thin films. *Solid State Communications* 131, 359-363 (2004).
- Tari, S., Sporcken, R., Aoki, T., Smith, D. J., Metlushko, AbuEl- Rub, V. K. and Sivananthan, S., Growth of Fe/Ge(001) Heterostructures by Molecular Beam Epitaxy: Interface Structure, Electronic and Magnetic Properties, *JVST B* 20(4), 1586-1590, (2002).
- Wagner, C.D., Riggs, W.M., Davis, L.E., Moulder, J.F., Hanklbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy, ed: Muilenberg, G.E., Perkin Elmer Corporation, Minnesota (1979).
- Wang, D., Nordman, C., Daughton, J.M., Qian, Z., and Fink, J., 70% TMR at room temperature for SDT sandwich junctions with CoFeB as free and reference layers, *IEEE Transaction on Magnetics*, 40, 2269-2271, (2004).
- Yuasa, S., Nagahama, T., Fukushima, A., Susuki, Y., and Ando, K., Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe manyetik tunnel junctions, *Nature Materials*, 3, 868-871, (2004).
- Zhang, J.Y., Boyd, I.W., Pulsed laser depositiojn of Tantalum pentoxide film, *Appl. Phys. A.*, 70, 657-661, (2000).

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje No: 105T109

Proje Başlığı:

Magnetron sputtering yöntemiyle büyütülen manyetik tünel eklemleri' nin yapısal, elektronik ve manyetik özelliklerinin incelenmesi.

Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:

Yrd.Doç.Dr. Süleyman Tarı, Doç.Dr.Lütfi Özyüzer, Yrd.Doç.Dr. Yusuf Selamet, Arş. Gör. Kadir Vahaplar, Arş. Gör. Hüseyin Tokuç, Yük. Lis. Öğ. Hüseyin Serhat Alagoz.

Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fizik Bölümü, Urla-35430 İzmir

Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:

University of Illinois at Chicago, Department of Physics, Microphysics Laboratory
845 W.Taylor St, M/C 273 Chicago, IL60607-7059, USA

Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01 Ocak 2006 - 01 Ocak 2009

Öz (en çok 70 kelime)

Ferromanyetik filmler arasına konulan yalıtkan bir tabaka ile oluşturulan manyetik tünel eklemlerinde tünel manyetik direnç görülmektedir. Fe/TaOx/Co başta olmak üzere farklı FM/Y/FM çok katmanlı yapılar püskürtme yöntemi ile büyütülmüş, yapısal ve manyetik ve elektriksel özellikleri çalışılmıştır. Manyetik çalışmalarda, önerilen yapılarda gerekli olan farklı zorlayıcı manyetik alan özellikleri belirlenmiştir. Sürekli film olarak büyütülen yapılar litografi tekniği ile manyetik tünel eklemleri haline getirilmiştir. Bazı yapılardaki manyetik direnç ölçümlerinde TMR değeri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler:

Manyetik Tünel Eklemleri, Manyetik hafıza (MRAM), Spintronik, İnce film, Ferromanyetizm, Manyetik direnç (MR), Dev manyetik direnç (GMR), Spin vanası, Spin kutuplanması, Okuyucu başlık, Manyetik döngü, Manyetik eşleşme, Manyetik anizotropi, Oksit yalıtkan barier.

Projeden Yapılan Yayınlar:

- 1. K. Vahaplar, S. Tari, H. Tokuc, S. Okur, "Effect of buffer layer and thickness on the structural and magnetic properties of Co thin films", Journal of Vacuum Science Technology B (in review).**
- 2. H. Tokuc, S. Tari "Effect of Ta buffer layer and TaO_x barrier thickness on the evolution of the structural and magnetic properties of the Fe/TaO_x/Co trilayer," Applied Physics A (in review).**
- 3. Structural and magnetic properties of Si(100)/Ta/Co multilayers for spintronics applications, Kadir Vahaplar, Y. L. Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (2007).**
- 4. The growth and characterization of Fe/TaO_x/Co multilayers for spintronics applications, Hüseyin Tokuç, Y.L. Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (2008).**
- 5. Investigation of magnetic dead layers at the Ferromanyetik/Metal and Insulator interfaces, Hüseyin Serhat Alagöz, Y.L. Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (2009).**