

Atıf İçin: Kocaman B, 2022. Tek-eksenli Manyetik Anizotropiye Sahip Permalloy ($\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}$) İnce Filmlerin Manyetik ve Yapısal Karakterizasyonu. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(4): 2153 - 2165.

To Cite: Kocaman B, 2022. Magnetic and Structural Characterization of Permalloy ($\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}$) Thin Films with Uniaxial Magnetic Anisotropy. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(4): 2153 - 2165.

Tek-eksenli Manyetik Anizotropiye Sahip Permalloy ($\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}$) İnce Filmlerin Manyetik ve Yapısal Karakterizasyonu

Bayram KOCAMAN

ÖZET: Bu çalışmada, Si(100)/SiO₂(~200 nm) alttaş üzerine 4 - 20 nm arasında değişen kalınlıklarda büyütülen permalloy ince filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri araştırılmıştır. Permalloy ince filmler eğik açılı magnetron saçırma tekniği kullanılarak yüksek vakumlu odada hazırlandı. X-ışını foto-elektron spektroskopisi ölçüm sonuçlarından, permalloyun alaşım kompozisyonu oranı %21 Fe ve %79 Ni olarak bulundu. X-ışını kırınım ve yansıma ölçümleri, permalloy filmlerinin (111) yönünde, düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip ve nominal kalınlıklarda büyüdüğünü gösterdi. Elde edilen ince filmlerin manyetik özellikleri ferromanyetik rezonans (FMR) ve titreşimli örnek manyetometresi (VSM) teknikleri kullanılarak araştırıldı. Film hazırlamada kullanılan eğik biriktirme nedeniyle, filmlerde düzlem içi tek-eksenli manyetik anizotropi gözlemlendi. Mıknatıslanma yönüne göre serbest enerji minimizasyonu yöntemini kullanan bir bilgisayar kodu yazılarak deneysel FMR verileri simule edildi ve bu sayede filmlerin tek eksenli anizotropi sabitleri belirlendi. Ayrıca, zorlayıcı alan ve anizotropi alanı gibi manyetik özelliklerin kalınlığa bağlı olarak değişimleri tartışıldı.

Anahtar Kelimeler: Permalloy ince film, manyetik oblique anizotropi, anizotropik manyeto direnç

Magnetic and Structural Characterization of Permalloy ($\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}$) Thin Films with Uniaxial Magnetic Anisotropy

ABSTRACT: In this study, the structural and magnetic properties of permalloy thin films with thicknesses varying from 4 to 20 nm on Si (100) / SiO₂ (~ 200 nm) substrate were investigated. Permalloy thin films were prepared in a high vacuum chamber using the oblique angle magnetron sputtering technique. From the in-situ X-ray photoelectron spectroscopy measurements, the alloy composition ratio of permalloy was found as 21% Fe and 79% Ni. X-ray diffraction and reflectivity measurements showed that permalloy films grew in (111) orientation with low surface roughness and at the nominal thicknesses. Magnetic properties were investigated using ferromagnetic resonance (FMR) and vibrating sample magnetometry (VSM) techniques. In-plane uniaxial magnetic anisotropy was observed in the films due to the oblique deposition used in film preparation. Experimental FMR data were simulated by writing a computer code using the free energy minimization method according to the magnetization direction, and thus these uniaxial anisotropy constants of the films were determined. In addition, variations of magnetic properties such as coercive field and anisotropy field depending on thickness are discussed.

Keywords: Permalloy thin film, magnetic oblique anisotropy, anisotropic magneto resistance

Bayram KOCAMAN ([Orcid ID: 0000-0002-9439-3604](https://orcid.org/0000-0002-9439-3604)), Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Bayram KOCAMAN, e-mail: bayram.kocaman @siirt.edu.tr

Makale 03-05 Haziran 2016 tarihlerinde Kocaeli’de düzenlenen “12th International Nanoscience and Nanotechnology (NANOTR-12) Konferansı’nda” poster olarak sunulmuştur.

GİRİŞ

Tipik olarak 3 boyutlu geçiş metali olan ferromanyetik elementlerden Fe, Co, Ni ve bunların alaşımlarından (NiFe ve CoFe) üretilen manyetik olarak yumuşak ince filmler, düşük manyeto kristal anizotropi ve zorlayıcı alan yanında, yüksek doyumluk manyetizasyonu ve manyetik geçirgenliği nedeniyle spintronik alanında büyük ilgi görmektedir (Jiao ve ark., 2017; Choi ve ark., 2010; Wang ve ark., 2012; Kateb ve ark., 2018; Aldimassive ark., 2020). Çünkü yumuşak manyetik ince filmlerin bu özellikleri bilgi okuma ve depolama teknolojisinde algılayıcı tabaka olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca indüktör, gürültü bastırıcı ve spin tork osilatörü içindeki alan oluşturma katmanı gibi yüksek frekanslı cihaz uygulamalarında kullanılmasından dolayı, bu ince filmlerin manyetik anizotropilerinin kontrol edilmesi büyük önem arz etmektedir (Jiao ve ark., 2017; Ariake ve ark., 2018). Neyse ki, bu filmler düşük anizotropi terimleri içerdiğinden, manyetik özelliklerinde şekil anizotropisi güçlü olarak hakimdir (Thomson, 2014). Bu durum sürekli olarak büyütüldüğünde film düzleminde bir manyetizasyon ile sonuçlanır. Hatta boyut olarak yeterince küçük bir sütun yapısı oluşturulursa, o zaman sütunların şekli anizotropiyi belirler ve düzleme dik bir manyetizasyon da elde edilebilir (Hawkeye ve Brett, 2007). Söz konusu anizotropilerin belirlediği moment dağılımları ve makroskopik özellikler, ince film formunda manyetik domain yapısını güçlü bir şekilde etkilemektedir. Domain yapısı ise bu malzemelerin teknolojideki pratik uygulamalarını belirlemede önemli bir kriterdir (Jiao ve ark., 2017).

Öte yandan Ni ve Fe alaşımlarından oluşan Permalloy (Py, NiFe) ince filmi kolay yönelim ve düşük zorlayıcı alan gibi özellikler sunduğundan dolayı yumuşak manyetik katman olarak en çok tercih edilen alaşımlardan biridir. Bu nedenle anizotropik manyeto direnç (AMR) (Demirci, 2020), devmanyeto direnç (GMR) (Kocaman ve Akdoğan 2018) ve tünelleme-manyeto direnç (TMR) (Mazumdar ve ark. 2008) etkilerine dayanan manyetik okuyucu kafalar ve düzlemsel Hall etkisi (PHE) (Jen ve ark. 2009) tabanlı manyetik sensörler gibi birçok uygulama alanında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Permalloy ince filminin manyetik momentleri, belirli kalınlık seviyesinde nispeten güçlü demanyetizasyon enerjisi nedeniyle baskın olarak ince film düzleminde bulunur. Düzlem içindeki bu manyetik anizotropinin belirli bir yöne yönlendirilmesi (tek eksenli olması) ile o yönde manyetik alan duyarlılığının yüksek olması sağlanır. Dolayısıyla sensör cihazlarının algılama gücünün artmasında ve gürültü seviyesinin azalmasında önemli rol oynar. Bunların dışında Py düşük sönümlenme (low damping) özelliğinden dolayı spin pompalama sistemlerinde spin enjektör tabakası olarak da kullanılmaktadır (Suraj ve ark., 2020). Bu sebeplerden ötürü manyetik olarak yumuşak özellik gösteren permalloy filmlerinde anizotropi yönelimleri ve büyüklüklerinin ayarlanması teknolojik uygulamalar ve temel çalışmalar açısından önemlidir (Wang ve ark., 2012; Aldimassive ark., 2020; Telepinsky ve ark. 2016). Ancak bu özelliklerin kontrol edilmesi ve ayarlanması, büyüme sıcaklığı ve hızı, vakum koşulları, alan altında ve oblige (eğimli) olarak kaplama gibi büyütme şartlarının yanında film kalınlığı ve tampon ve kapak tabaka varlığı gibi birçok parametreye bağlıdır (Youssef ve ark., 2004; Kateb ve Ingvarsson, 2017; Kumar ve ark., 2009). Bu yöntemlerin her birinin manyetik anizotropiyi manipüle etmede kendine özgü özellikleri vardır. Mesela tampon ve kapak tabaka varlığı ve boşluklar, katkıları ve tane boyutu (grain size) gibi kusurlar, tek eksenli anizotropinin ortaya çıkmasına katkıda bulunabilir (Aldimassive ark., 2020; Kumar ve ark., 2009). Benzer olarak DC manyetik alan altında büyütme ile veya çeşitli litografi işlemleri ile oluşturulan şekiller ile de tek eksenli manyetik anizotropi indüklenebilir (Telepinsky ve ark. 2016). Ama bunlar içinde eğik açı ile biriktirme, normal ince filmlerde eğiklik açısını değiştirerek anizotropi alanının büyüklüğünü ayarlamaya olanak sağlayan en etkili ve basit yöntemlerden biridir (Krohling ve ark., 2020; Bertelli ve ark., 2017; Fukuma ve ark., 2009).

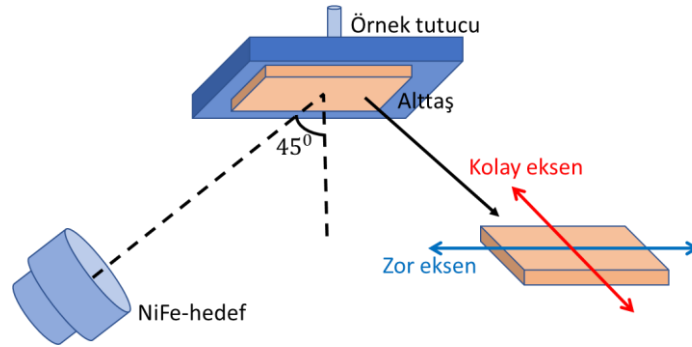
Eğik (oblique) açı ile diğer adıyla eksensel büyütme, ince filmlerde bireysel her tabakanın film düzlemindeki manyetik anizotropi doğrultusunu ayarlamada basit ve şaşırtıcı derecede etkili bir yöntemdir (Kocaman ve ark., 2021; Krohling ve ark., 2020; Bertelli ve ark., 2017; Barranco ve ark., 2016). Film düzlemindeki anizotropi yönünün yanında gölgeleme etkisiyle büyüklüğünün de kontrol edilmesini sağlar. Ayrıca eğik açılı birikim, spin-vana yapılarındaki ferromanyetik katmanlar arasındaki eş doğrusal olmayan veya eş doğrusal mıknatıslanmaları kontrol etmek için uygun bir prosedür olarak da kullanılabilir (Krohling ve ark., 2020; Bueno ve ark., 2014). Tipik bir eğik açı ile büyüme senaryosunda; argon iyonları ile hedeften koparılıp saçtırılan manyetik atomlar, eğer eğik açıda saçtırılır ise, alttaş üzerine, yüzeyinde belli bir yönelimde nano-sütunlar olacak şekilde birikir. Her bir nano-sütunun yüzeylerindeki manyetik momentler şekil anizotropisinden dolayı nano-sütunun kendi uzun eksenine doğrultusunda yönelmek isteyeceklerdir. O nedenle oluşan bu nano sütunların hepsinin ortalama olarak aynı yönde olması ile film tek eksenli (uniaxial) bir manyetik anizotropi etkisi sergileyecektir (Bertelli ve ark., 2017; Ali ve ark., 2019). Dolayısıyla eğik açı ile büyütmeden kaynaklanan tek eksenli anizotropi dolaylı olarak şekil anizotropisinden kaynaklanmaktadır. Ama bu anizotropik davranışın kaynağı büyütme esnasında hedeften kopan atomların, alttaş üzerine dik değil de eğik açı ile gelmesidir.

Bu çalışmada farklı kalınlıklarda permalloy filmi tek-katman olarak radyo frekans (rf) saçtırma tekniği kullanılarak yüksek vakum odasında eksensel (oblique) geometride büyütüldü. Böylece film düzleminde bulunan manyetik momentlerin belirli bir ekseninde (tek eksenli) olması sağlandı. X-ışınları yansımaları (XRR), X-ışınları kırınımı (XRD), ve X-ışınları foto-elektron spektroskopisi (XPS) teknikleri kullanılarak yapısal ve yüzeysel özellikler hassas bir şekilde araştırıldı. Filmlerin oda sıcaklığında ferromanyetik rezonans (FMR) ölçümleri yapıldı. Ölçüm sonuçları aşağıda detaylı olarak verilen bir modele fit edilerek kalınlığa bağlı düzlem içi tek eksenli anizotropi sabitleri belirlendi. Ayrıca film kalınlığına bağlı olarak örneklerin oda sıcaklığındaki hacim mıknatıslanması, zorlayıcı alanları FMR ölçümlerinden belirlenen hem kolay hem de zor eksen yönünde titreşimli örnek manyetometresi (VSM) tekniği ile belirlendi. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak tartışıldı.

MATERYAL ve METOT

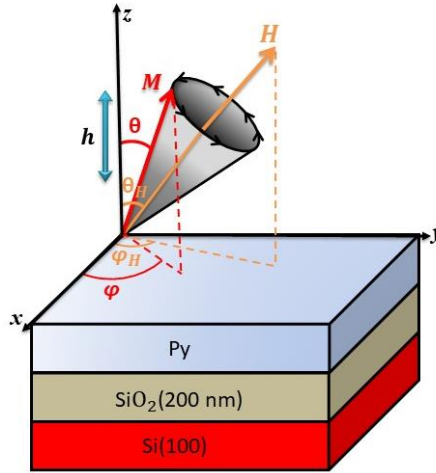
Örnek hazırlama işlemi iki aşamada gerçekleştirildi. İlk olarak üzerine film büyütülecek tek kristal $Si(100)/SiO_2$ (~200 nm) alttaşlar sırasıyla aseton, isopropanol, ve saf su kullanılarak ultrasonik temizleyicide temizlendi. Daha sonra temizlenen alttaşların üzerine 1×10^{-9} mbar taban basınçlı ultra-yüksek vakum odacıklarında manyetik saçtırma tekniği ile farklı kalınlıklarda (4, 6, 10 ve 20 nm) permalloy filmleri hiçbir tampon ve kapak tabaka kullanılmadan oda sıcaklığında büyütüldü. Kullanılan permalloy ($Ni_{80}Fe_{20}$) hedefi %99,5 saflık oranına sahiptir. Büyütme esnasında yüksek saflıktaki Argon gaz basıncı 5×10^{-3} mbar seviyesine ayarlandı. Permalloy katmanı için 40W rf güç değeri kullanıldı. Şekil 1'de şematik olarak gösterilen manyetik saçtırma sisteminin tasarımından dolayı NiFe hedefi, alttaş düzlemine 45° 'lik bir açıyla bakmaktadır. Bu eğik açı, alttaş üzerine büyütülen malzemelerde gölgeleme etkisi yaparak düzlem içinde tek eksenli anizotropi oluşmasına neden olur. Bu çalışmadaki tek eksenli anizotropi bu yöntemle elde edilmiştir.

Kristal yapı analizi Rigaku Smartlab X-ışını Kırınım (XRD) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Ölçüm cihazında X-ışını kaynağı olarak 0.154 nm dalga boyuna sahip Cu (bakır) $K\alpha$ ışınması kullanıldı. Ayrıca aynı cihaz ile X-ışını yansımaları (XRR) ölçümleri yapıldı. XRR ölçümünden elde edilen deneysel sonuçlar Rigaku GlobalFit programı kullanılarak teorik modele fit edildi (Yasaka, 2010). Bu fit sonuçlarından filmlerin kalınlıkları, yoğunlukları, yüzey arayüzey pürüzlülükleri ve yüzdeki oksitlenme kalınlığı belirlendi.



Şekil 1. Bu çalışmada kullanılan manyetik saçtırma sisteminin ve eğik biriktirme düzeninin ve şematik çizimi

Permalloy alaşımının elektronik yapısı ve kimyasal kompozisyon oranı, örnek atmosfere açılmadan önce in-situ olarak X-ışını foto-elektron spektroskopisi (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) tekniği ile incelendi. Örneklerin manyetik özellikleri iki farklı teknik kullanılarak belirlenmiştir. İlk olarak filmlerin düzlem içi manyetik anizotropileri ferromanyetik rezonans (FMR) tekniği kullanılarak Bruker EMX model x-band ESR spektrometresi (9.5 GHz) yardımıyla incelendi. Bu sayede düzlem içindeki kolay ve zor eksen tayin edildi. Ayrıca FMR ölçüm sonuçları aşağıda daha ayrıntılı bir şekilde açıklanacak olan teorik bir modele fit edilerek film düzlemindeki tek eksenli (uniaxial) anizotropi sabitleri her film için belirlendi. İkinci olarak DC mıknatıslanma ölçümleri, Quantum Design PPMS 9T sisteminde titreşimli örnek manyetometresi (vibrating sample magnetometer, VSM) cihazı kullanılarak yapıldı. VSM ölçümleri oda sıcaklığında alınmış ve manyetik alan film düzlemine paralel uygulanmıştır.



Şekil 2. Si(100)/SiO₂(200 nm) alttaş üzerine büyütülen permalloy filmler miknatislanma vektörü (M) manyetik alan vektörü (H), mikrodalganın manyetik alan bileşeni (h) ve FMR ölçüm sonuçlarını teorik bir modele fit etmek için kullanılan koordinat sisteminin temsili gösterimi

Bu çalışmada film düzlemi geometrisinde yapılan FMR ölçüm sonuçları bir model ile analiz edilerek Si/SiO₂/Py(t_{Py}) ($t_{Py} = 4, 6, 10$ ve 20 nm) filmlerinin düzlem içi tek eksenli anizotropi alanları hesaplanmıştır. Bu model de ele alınan ince filmin mıknatıslanma ve ona uygulanan manyetik alan vektörlerinin kutupsal (θ) ve azimütal (φ) açıları Şekil 2’de gösterilen bir küresel koordinat sistemi ile temsil edilmektedir. Böyle bir sistem için (Farle, 1998) referansından uyarlanan toplam serbest enerji ifadesi

$$E_T = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{H} + (2\pi M_0^2 - K_p) \cos^2(\theta) + K_u \cos^2(\varphi) \quad (1)$$

şeklinde dir. Eşitlikteki ilk terim manyetik alan ile mıknatıslanmanın etkileşmesinden kaynaklanan Zeeman enerjisi, ikinci terim düzleme dik anizotropiyi de içeren demanyetisasyon enerjisi ve son terim ise sistemin film düzlemindeki tek eksenli anizotropi enerjisidir. Denklemdaki M , H ve M_0 sembolleri

sırasıyla mıknatıslanma vektörünü, harici DC manyetik alanı ve VSM ölçümlerinden elde edilen örneğin doyum mıknatıslanmasını ifade etmektedir. Ayrıca, K_p ve K_u sabitleri film düzlemine dik ve film düzlemindeki tek eksenli anizotropi sabitlerini temsil etmektedir. Referans eksenlerinin göreceli oryantasyonu, filmlerin temsili taslağı, harici DC manyetik alan \mathbf{H} , mıknatıslanma vektörü \mathbf{M} ve mikrodalga AC manyetik alan bileşeni \mathbf{h} şekil 2'de verilen temsili resimde detaylı olarak gösterilmektedir.

FMR ölçümünde, harici DC manyetik alana (\mathbf{H}) dik olarak uygulanan zayıf AC manyetik alan (\mathbf{h}) varlığında, ferromanyetik ince filmin mıknatıslanması etkin DC manyetik alan etrafında presesyon hareketi yapar. Mıknatıslanmanın presesyon frekansı mikrodalga frekansına eşit olduğu zaman rezonans olayı gerçekleşir ve bu durum mikrodalga güç kaybına neden olur. Mıknatıslanmanın presesyon frekansı, malzemenin yönüne, manyetik alanın büyüklüğüne ve ayrıca numunenin makroskobik manyetizasyonuna (kolay eksenine) bağlıdır. Bu nedenle manyetik alanın uygulandığı açıya göre farklı alan değerlerinde rezonans olayı gerçekleşir. Böylece 3 boyutlu olarak mıknatıslanmanın bulunmak istediği yön (kolay eksen) belirlenebilir. Rezonans frekansını veya ona eşdeğer rezonans olayının gerçekleştiği manyetik alan değerini hesaplamak için, Smit ve Suhl tarafından bağımsız olarak geliştirilen en iyi yöntem, mıknatıslanma yönüne göre toplam serbest enerji minimizasyonudur. Bu çalışmada rezonans koşulu, Smit-Suhl yöntemi ile aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilmiştir (Suhl, 1955; Smit ve Beljers, 1955).

$$\frac{\omega}{\gamma} = \frac{1}{M_0 \sin \theta} (E_{\theta\theta} E_{\varphi\varphi} - E_{\theta\varphi}^2)^{1/2} \quad (2)$$

Eşitlik 2.'deki ω , rezonans durumundaki presesyon frekansını (x-band spektrometresinin (9.5 GHz) çalışma frekansı tarafından belirlenir), γ jiromanyetik oranı, $E_{\theta\theta}$ ve $E_{\varphi\varphi}$ mıknatıslanma vektörü \mathbf{M} 'nin polar θ ve azimut φ açılara göre E 'nin ikinci türevlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada FMR deneyleri düzlem içi geometride gerçekleştirildiği için (dc manyetik alanın film düzleminde olduğu durum için), Eşitlik 1. ve 2.'de dc manyetik alan ve mıknatıslanma vektörünün kutup açıları θ ve $\theta_H = \pi/2$ olarak sabitlenmiştir. Enerjinin polar θ ve azimut φ açılara göre ikinci türevleri de ($E_{\theta\theta}$ ve $E_{\varphi\varphi}$) alınır ise Eşitlik 2. aşağıdaki gibi genişletilebilir.

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = [H_0 \cos(\varphi - \varphi_H) + 4\pi M_{eff}] \times [H_0 \cos(\varphi - \varphi_H) - H_u \cos 2\varphi]. \quad (3)$$

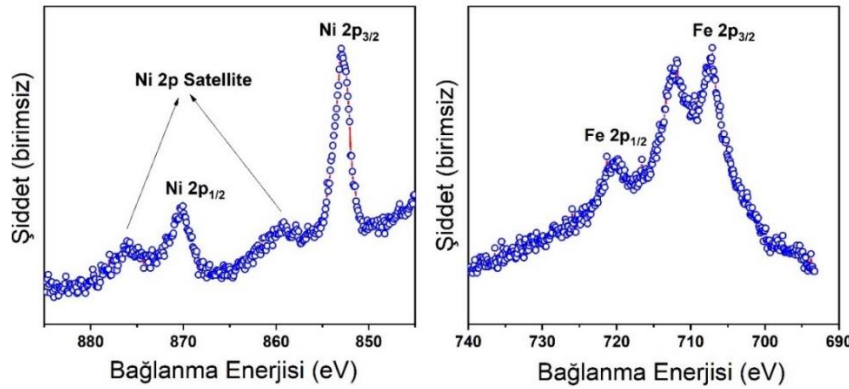
Burada etkin mıknatıslanma olarak bilinen M_{eff} terimi, $4\pi M_{eff} = 4\pi M_0 - 2K_p/M_0$ film düzlemine dik manyetik anizotropi terimini (K_p) ve doyum mıknatıslanmasını (M_0) içerir. Düzlem içi manyetik anizotropi alanı (H_u), $H_u = 2K_u/M_0$ şeklinde tanımlanır. Harici manyetik alanın (\mathbf{H}) film düzleminde uygulandığı herhangi bir φ_H açısı için mıknatıslanma vektörünün (\mathbf{M}) azimütal açısı φ , statik denge koşulundan elde edilir. Film düzlemi geometrisinde FMR spektrası 0'dan 2π ye değişen farklı değerlerde φ_H açısı için hesaplanabilir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapısal Özelliklerin Analizi

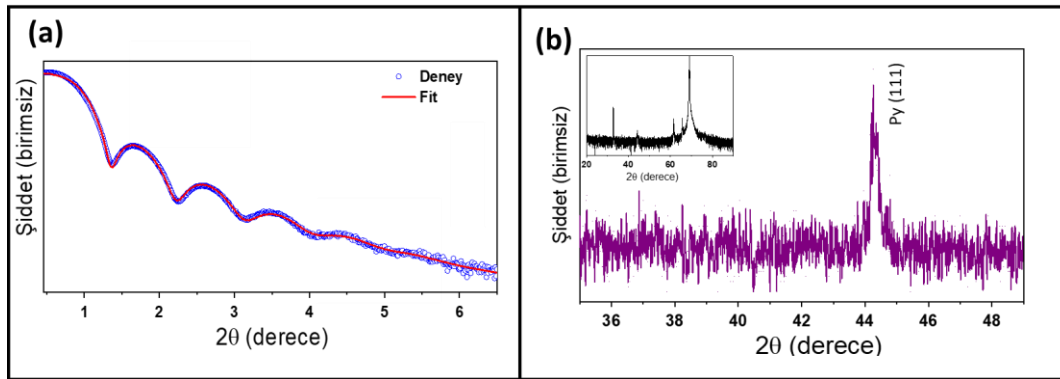
Ultra yüksek vakum ortamında büyütülen 10 nm kalınlığındaki Py alaşımının Ni ve Fe kimyasal kompozisyonları ve elektronik yapılarını belirlemek için X-ışını foto-elektron spektroskopisi (XPS) ölçümü yapılmıştır. Ölçüm büyütme işleminden hemen sonra, örnek vakum ortamından çıkartılmadan gerçekleştirildi. Bu sayede piklerin pozisyon ve şekillerinde oksitlenmeden kaynaklanan değişimler

engellendi. Bu ölçümde X-ışını kaynağı olarak Al katot kullanıldı ve Ni ve Fe pikleri 0,1 eV'lik adımlarla detaylı olarak tarandı. Şekil 3.'de Si(100)/SiO₂/Py(10 nm) filmi için Ni 2P (soldaki grafik) ve Fe 2P (sağdaki grafik) bölgesi spektrumu verilmiştir. Soldaki grafikte Ni 2p_{1/2} ve Ni 2p_{3/2} ile ilgili sırasıyla 852.96 eV ve 870.06 eV enerjilerinde olan iki foto-elektron pikinin ve onların uydu piklerinin olduğu açıkça görülmektedir. Bu piklerin saf nikelden geldiği literatürle uyumludur (Salou ve ark. 2008). Bu durum nikel iyonlarının metalik Ni ve 2+ durum değerlerinde bir arada bulunduğunu gösterir. Öte yandan, sağdaki grafikte Fe 2p fotoelektron piklerinin, kimyasal durumların belirlenmesi için önemli olan Fe 2p_{1/2} ve Fe 2p_{3/2} ile ilgili sırasıyla 720.97 ve 707.09 eV'de olan iki fotoelektron piki gözlenmiştir. Bu pikler de 10 nm permalloy film için Fe'nin hem Fe 2+ hem de Fe³⁺ durumlarında birlikte var olduğunu gösterir [32]. Yapılan XPS ölçümleri sonucunda, Fe ve Ni piklerinin altında kalan alanlar hesaplanıp, karşılaştırılarak, bu iki element arasındaki oran %21 Fe ve %79 Ni olarak bulundu (Mattera ve ark., 2015; Pollak ve Bajorek, 1975). Literatürde %20 Fe ve %80 Ni oranındaki permalloy alaşımı, yüksek geçirgenlik, düşük zorlayıcılık ve sıfıra yakın manyetostriksiyon gibi cihaz uygulamaları açısından istenen özelliklere sahip olan kalıcı alaşım olarak bilinmektedir (Thomson, 2014). XPS tekniğinin %1 oranında hata payı göz önüne alındığında Py film için Ni ve Fe oranı istenilen özellikler açısından yeterince uygundur.



Şekil 3. Si(100)/SiO₂(200nm)/Py(10 nm) filminin X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ölçüm verileri. Ni ve Fe için soğurma pikleri gösterilmiştir

Şekil 4. (a)'da Si(111)/SiO₂ (200nm) alttaş üzerine büyütülen 10 nm kalınlığındaki Py filmine ait X-ışını yansıması (XRR) ölçüm ve XRR analizi için Integrated Thin Film Analysis Software paketindeki GlobalFit programı kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir (Yasaka, 2010). Görüldüğü üzere her iki eğri açılı ile genel olarak azalırken bu ortalama değişim eğrisinin etrafında küçük genlikli ve periyodik olarak değişen bileşen de vardır. Bu periyodik değişim filmin üst ve alt katmanlarından yansıyan X-ışını dalgalarının girişimlerinden kaynaklanmaktadır. GlobalFit programı ile yapılan simülasyonlardan elde edilen kalınlık, yoğunluk ve yüzey arayüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Tek katman permalloyun üstünde oksitten koruyucu kapak bir tabaka olmadığı için atmosfer ortamına çıkarılınca filmin yüzeyi birkaç nm oksitlenmesi muhtemeldir. Dolayısıyla XRR deneysel eğrisini fit ederken bu etki göz önüne alınmış ve üst tabakaya literatürden de yararlanarak Çizelge 1'de görüldüğü gibi 1.4 nm oksitlenmiş Py tabakası dahil edilmiştir (Salou ve ark.,2008; Fitzsimmons ve ark., 2006). Bu sayede deneysel sonuçlarla mükemmel derecede uyumlu fit grafiği elde edilmiştir. Öte yandan Çizelge 1'de verilen XRR fit sonuçlarından filmlerin yüzey ve arayüzey pürüzlülüğü 1 nm'nin altında elde edilmiştir. Bu değer filmlerin kalitesi açısından oldukça iyidir. Ayrıca fit ederken kullanılan yoğunluk değerleri bulk halindeki değerleri olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Si(100)/SiO₂(200nm)/Py(10 nm) filminin (a) X-ışınları yansımaları (XRR) ölçüm ve fit sonucu, (b) X-ışını kırınımı (XRD) ölçüm sonucu (iç grafikte açığa bağlı tüm ölçüm gösterilmektedir)

Kristal yapı analizi X-ışını kaynağı olarak 0.154 nm dalga boyuna sahip Cu (bakır) $K\alpha$ ışınması kullanılan X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ile yapıldı. Şekil 4. (b)'deki sağdaki grafikte Si(100)/SiO₂(200nm) alttaş üzerine büyütülen 10 nm kalınlığındaki NiFe filmine ait XRD ölçüm sonucu verilmiştir. İç grafikte açığa bağlı tüm ölçüm gösterilmektedir. Alttaştan gelen kısımları ihmal ederek sadece permalloydan gelen pike odaklanmak için ana grafik 38° ile 52° açı değerleri arasında kırılmıştır. Grafikte görüldüğü üzere 44.2° açısında Py (111) yönelimine ait XRD piki gözlenmiştir (Kateb ve Ingvarsson, 2017; Svalov ve ark., 2010). Permalloy filmi Si(100)/SiO₂ alttaş üzerine (111) fcc kristal yapısında büyümüştür. Çünkü permalloy alaşımında Ni oranı %30 un üzerinde olduğunda fcc kristal yapısında bulunmaktadır. Ayrıca permalloy fcc (111) yapısı, film düzlemine dik eksende anizotropi (perpendicular magnetic anisotropy, PMA) oluşumuna yardımcı olur çünkü bu alaşımların fcc kristalinde (111) yön, kolay mıknatıslanma yönüdür (Kateb ve ark., 2018; Bozorth ve Walker, 1953). Ama bu özellikler bu çalışmadaki filmlerden daha kalın filmlerde meydana gelmektedir (Svalov ve ark., 2010).

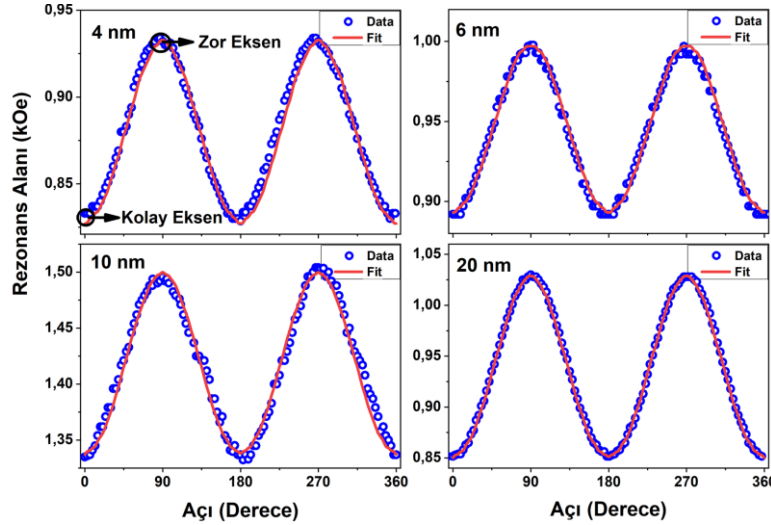
Çizelge 1. Si(100)/SiO₂(200nm)/Py(10 nm) filminin X-ışını yansımaları (XRR) fit sonuçları

No	Tabaka adı	Kalınlık (nm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Pürüzlülük (nm)
3	NiFeO	1.4	7	0.36
2	NiFe	7.6	8.34808	0.5
1	SiO ₂	200	2.2	0.79
Alttaş	Si	0	2.33	0.50

Manyetik Özelliklerin Analizi

Ferromanyetik rezonans (FMR), ince filmlerde manyetik anizotropilerin ve özelliklerin belirlenmesinde, katman duyarlı, güçlü ve bilgilendirici bir tekniktir (Farle, 1998). Bu çalışmada FMR ölçümleri oda sıcaklığında x-band (9.5 GHz) Bruker model ESR spektrometresi ile yapılmıştır. Ölçüm sırasında örnekler bir gonyometre ile döndürülerek uygulanan manyetik alanın örneğe göre istenen herhangi bir doğrultuya yönelimi sağlanmıştır. Eğik açı ile büyütülerek oluşturulan tek eksenli anizotropiyi analiz etmek için Py filmlerin FMR ölçümleri düzlem içi geometride (manyetik alan düzleme paralel ve herhangi bir yönde) yapılmıştır.

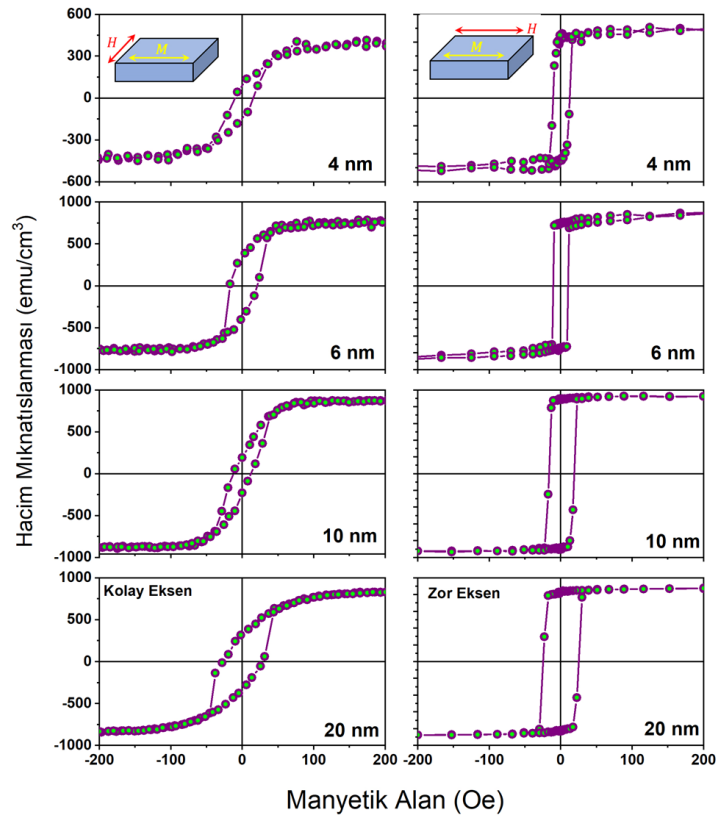
Şekil 5'te Si/SiO₂/Py(t_{Py}) ($t_{Py} = 4, 6, 10$ ve 20 nm) filmleri için manyetik alanın film düzleminde olduğu durumda rezonans alanının açığa bağlı değişimi, hem deneysel (mavi boş çember) hem de teorik olarak (kırmızı çizgi) verilmiştir. Bu ölçüm işleminde manyetik alan film düzleminde olmak şartıyla, 0'dan 360 dereceye kadar uygulanarak her açı için rezonans alan değerleri belirlendi. Şekilden de görüleceği gibi, rezonans alanı film düzleminde açığa sıkıca bağlıdır. Bu açığa bağımlılık tüm filmler için, tek-eksenli anizotropiye karşılık gelen film düzleminde 180 derecelik bir periyod göstermektedir.



Şekil 5. Si/SiO₂(200 nm) /Py(t_{py}) (t_{py}=4, 6, 10 ve 20 nm) filmleri için düzlem için geometride FMR rezonans alanının açısal bağımlılığı. Kırmızı düz çizgiler simülasyon sonucunu ve mavi boş çemberler deneysel rezonans alanı değerlerini temsil eder

Şekildeki çukurlar (en düşük rezonans alanları) film düzlemindeki kolay eksene karşılık gelirken, tepeler (en yüksek rezonans alanları) zor eksene karşılık gelmektedir. Bunun anlamı film düzleminde yatan manyetik momentler rasgele her yönde değil de belirli bir eksen (kolay eksen) durma eğilimindedir. Buradaki tek eksenli anizotropinin kaynağı, filmlerin tek kristal alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyümesi ile ilgili olmadığı açıktır. Çünkü örnekler (100) doğrultusunda yönelmiş tek kristal Si alttaş üzerinde ısıl olarak oksitlenmiş ve yaklaşık 200 nm kalınlığındaki amorf SiO₂ üzerinde büyütülmüştür. Genellikle film düzlemindeki tek eksenli anizotropi, manyeto-kristal anizotropi, arayüz (interface) anizotropisi veya büyümeye bağlı (eğik) anizotropiye atfedilebilir (Bertelli ve ark., 2017; Zhan ve ark., 2007). Bu çalışmadaki tek eksenli anizotropinin kaynağı, oblige (oblique) diye bilinen hedef iyonlarının eğimli bir geliş açısı etkisine bağlı olarak büyütme tabanlı bir anizotropidir (Chi ve ark., 2012). Yani hedeften koparılıp alttaş üzerine saçırılan plazma içindeki manyetik atomlar -yağmur damlacıklarının rüzgâr etkisinde yere düşey değil de eğik bir açı ile düşmesi gibi- yüzeye eğik gelerek filmlerin büyürken eğik nano-sütunlar gibi kümelenerek büyümesine neden olmaktadır. Dolayısıyla bu sütunların hepsinin de ortalama olarak film yüzeyine göre hep aynı yönde büyümesi ve manyetik açıdan yönelmesi bu anizotropinin kaynağını oluşturmaktadır. Çünkü şekil anizotropisi denen ve her bir manyetik sütunun yüzeylerinde oluşan yerel manyetik kutuplar mıknatıslanma vektörünün yönüne göre sütunun içinde farklı büyüklükte iç alan üretmekte ve bu alan nano sütunun kendi uzun eksenine doğrultusunda kolay mıknatıslanma etkisi oluşturmaktadır. O nedenle tüm film düzgün olmayan şekillere sahip bu sütunlara paralel yönde tek eksenli (uniaxial) ortalama bir manyetik anizotropi etkisi sergilemektedir. Bu anizotropi alanının film düzlemi içindeki izdüşümü de gene tek eksenli (doğrultulu) bir simetri etkisine neden olmaktadır. Gözlemlenen bu anizotropinin eğik açı ile büyütülmesinden kaynaklandığına emin olmak için, büyütme sırasında alttaş film normaline etrafında sürekli olarak döndürülerek 10 nm kalınlığında başka bir film büyütüldü (burada gösterilmemiştir) ve herhangi bir düzlem içi anizotropi gözlemlenmemiştir. Dolayısıyla düzlem içindeki yüksek anizotropik davranışın asıl kaynağının oblige anizotropi olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır.

FMR rezonans alanının düzlem içi açısal bağımlılıklarının materyal ve yöntem başlığı altında verilen teorik model ile fit edilmesiyle numunelerin film düzlemindeki tek eksenli anizotropi sabitleri hesaplanmıştır.

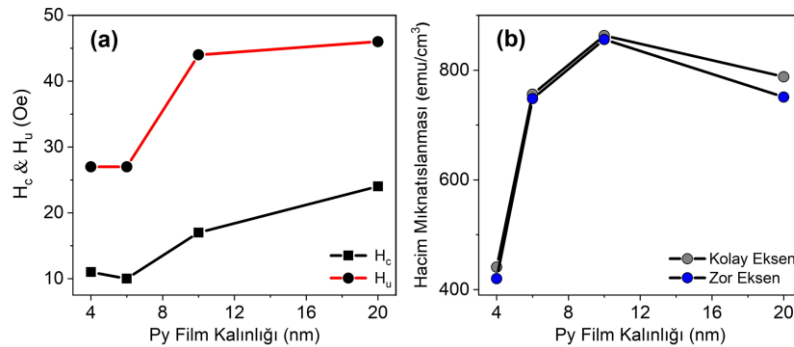


Şekil 6. Permalloy filmler için oda sıcaklığında VSM ölçüm sonuçları. Manyetik alan film düzleminde zor (soldaki grafikler) ve kolay (sağdaki grafikler) eksenlere paralel uygulanarak kaydedilen manyetik histeri eğrileri

Hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen açığa bağlı rezonans alanı değerleri arasında şekil 5'te görüldüğü gibi iyi bir uyum vardır. Hesaplamalardaki doyum miknatislanması (M_0) değerleri için VSM ölçümlerinden elde edilen hacim miknatislanma değerleri kullanılmıştır. Ayrıca (ω/γ) değeri her film için 3200 Oe olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değerden $h\gamma = g\beta H$ bağlantısı kullanılarak g -faktörü değeri yaklaşık 2.2 olarak elde edilir (Topkaya, 2017). Literatürde de permalloy'un g değerinin, sıcaklık sıvı nitrojen sıcaklığından oda sıcaklığına yükseltildiğinde ~ 2.07 'den ~ 2.18 'e yükseldiği bulunmuştur (Kittel, 1949). Dolayısıyla bu çalışmada oda sıcaklığında yapılan ölçümler için elde edilen g değeri literatür ile uyumludur. Ayrıca filmlerin tek-eksenli anizotropi alanları (H_u), $t_{py} = 4, 6, 10$ ve 20 nm kalınlıktaki filmler için sırasıyla, şekil 7. (a)'daki grafikte de gösterildiği gibi 27, 27, 44 ve 46 Oe olarak hesaplanmıştır. Başka bir deyişle, tek eksenli anizotropi film kalınlığı ile artmaktadır. Bu davranış, ultra ince filmlerde manyetik anizotropilerin kalınlık ile çok hızlı değişmesinden kaynaklanır. Şöyle ki ultra ince kalınlıklarda toplam manyetik anizotropiye yüzey ve arayüzey anizotropilerinin katkısı çok yüksek iken, düzlem içi anizotropinin katkısı daha azdır (Wulffekel ve ark., 1996). Film kalınlığının artmasıyla hacim özelliği artar ve düzlem içi manyetik anizotropi katkısı daha baskın olmaya başlar. Aynı zamanda düzlem içinde eğik açı ile büyütme kaynaklı oluşan nanosütunların da hacim kazanmasına ve tek eksenli anizotropi alanının artmasına neden olur (Wulffekel ve ark., 1996). Ama film kalınlığı 100 nm üzerinde ise, tek eksenli anizotropi alanı kalınlık ile azalma eğilimine geçtiği literatürde gözlenmiştir (Gul ve ark., 2018). Bunun nedeni ise, anizotropinin kaynağı film yüzeyinde oluşan nanosütunlar olduğu için kalınlığın artmasıyla yüzey etkilerinin azalması olarak açıklanmıştır.

Büyütülen filmlerin DC miknatislanma ölçümleri titreşimli örnek manyetometresi (VSM) tekniği ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 6'da Si/SiO₂/Py(t_{py}) ($t_{py} = 4, 6, 10$ ve 20 nm) filmleri için oda sıcaklığında manyetik alana bağlı miknatislanma (manyetik histeri) eğrileri gösterilmektedir. VSM

ölçümlerinde manyetik alan, FMR ölçümlerinden belirlenen film düzlemindeki kolay (sağdaki grafik) ve zor (soldaki grafik) mıknatıslanma eksenlerine karşılık gelen ve aralarında 90 derece olan iki farklı yönde uygulanmıştır. Görüldüğü üzere manyetik histeresis döngülerinin şekli manyetik alanın uygulandığı yöne güçlü bir şekilde bağlıdır. Bunun sebebi filmlerin eğik açı ile büyütülerek düzlem içinde oluşturulan tek eksenli anizotropiden kaynaklanmaktadır. Ölçümlerde, manyetik alan kolay (easy) eksene paralel uygulandığında (sağdaki grafik), manyetik histeresis eğrileri çok keskin ve dikdörtgen benzeri bir histerik davranış sergilemektedir. Bu davranış, mıknatıslanma dinamiği manyetik domen duvar hareketi süreciyle gerçekleştiğinden dolayı sıfır alanda kolay doğrultuda yönelmiş manyetik domendeki mıknatıslanma vektörleri yönünde manyetik alan uygulanmasından kaynaklanır (Li ve ark., 2015). Öte yandan, zor (hard) doğrultuda alan uygulandığında (soldaki grafik), manyetik domendeki mıknatıslanma vektörleri bu kez, uygulanan alan sıfırdan başlayarak artarken Zeeman etkisiyle yavaş yavaş dönerek, uygulanan alan anizotropi alanını iyice yenene kadar dış alan yönüne dönmeye devam eder ve mıknatıslanmanın dış alan üzerindeki iz düşümleri ile orantılı bir sinyal verir. O nedenle histeri eğrisinin alanla değişimi çok keskin olmayıp eğik bir hal alır ve soldaki şekilde görüldüğü gibi s şeklinde olur (Li ve ark., 2015). Manyetik histeresis döngülerinin açığa bağlı bu şekilleri, permalloy filmlerin iyi tanımlanmış düzlem içi tek eksenli manyetik anizotropiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Aldimassi ve ark., 2020).



Şekil 7. (a) Zorlayıcı alan (H_c) ve tek eksenli anizotropi alanının (H_u) Py film kalınlığına bağlı değişimi. (b) kolay ve zor eksen doğrultusunda yapılan VMS ölçümlerinden hesaplanmış hacim mıknatıslanmasının Py film kalınlığına göre değişimi

Diğer taraftan permalloy gibi manyetik açıdan çok yumuşak olan manyetik malzemeler için kolay yöne ait histeri eğrisinde gözlenen zorlayıcı alan (H_c) değeri mıknatıslanma vektörünün işaret değiştirdiği dış alan değerinden ölçülür ve ölçülen bu değer yaklaşık olarak tek eksenli manyetik anizotropi alanına karşı gelir (Li ve ark., 2015; Phuoc ve ark., 2009). Kolay eksen doğrultusunda ölçülen manyetik histeresis eğrilerinden elde edilen film kalınlığına bağlı zorlayıcı alan (H_c) değeri Şekil 7. (a)'daki grafikte gösterilmektedir. Ayrıca kıyaslanması açısından FMR ölçüm sonuçlarının fit edilmesiyle elde edilen kalınlığa bağlı uniaxial anizotropi alanı (H_u) değerleri de verilmiştir. İki farklı ölçüm tekniği ile elde edilen ve filmler için tek eksenli anizotropinin büyüklüğünün göstergesi olan H_c ve H_u değerleri tam olarak birbirinin aynısı olmasa da film kalınlığına bağlı davranışı birbirine çok benzerdir. Öte yandan VSM ölçümlerinden hem kolay hem de zor eksen için hesaplanan hacim mıknatıslanması permalloy film kalınlığının fonksiyonu olarak Şekil 7. (b)'de verilmiştir. Film kalınlığının artmasıyla hacim mıknatıslanmasının artarak doyuma gittiği görülmektedir. Bunun sebebi film kalınlığı ultra ince yapıda iken yüzey ve arayüzey etkilerinin mukayese edilebilir büyüklükte olmasından dolayı etkin manyetik kalınlığın mıknatıslanmasını azaltıcı yönde etkilemektedir. Kalınlık arttıkça yüzeylerden gelen bu katkıların etkisi daha önemsiz hale gelmektedir (Snigirev ve ark., 1997).

SONUÇ

Manyetik ince filmlerde mıknatıslanmasının dış manyetik alana bağlı değişimi (diğer bir ifade ile manyetik anahtarlama davranışı) bu tür yapıların, manyetik sensör uygulamalarında algılayıcı katman olarak kullanılmasına imkân sunmaktadır. Özellikle manyetik anahtarlamanın çok dar bir alan aralığında aniden hızlı bir şekilde değişmesi, bu yapıların zayıf alanları ölçmesine imkân verebilir. Örneğin, üretilen her yapı için mıknatıslanmanın en keskin olarak değiştiği bölge bulunarak kalibrasyon yapılır ve bu alan değerinde bir bias (ön) alan uygulanarak dış alanlar ölçülmeye çalışılırsa, duyarlılığı çok yüksek sensörler yapılabilir. Çünkü manyeto-direnç eğrileri oldukça gürültüsüzdür ve bu olgu sinyal-gürültü oranı çok yüksek cihaz elde etmeye imkân sunar. Permalloy ince filmler bu manyetik özellikleri sunması açısından veri depolama cihazları için manyetik okuyucu kafalarda kullanılan ana malzemelerden birisidir. Ancak bu özelliklerin ince film formlarında kontrol edilmesi ve ayarlanması, yukarıda da bahsedildiği gibi birçok parametreye bağlıdır.

Sonuç olarak bu çalışmada manyetik saçırma tekniği ile ultra-yüksek vakum şartlarında farklı kalınlıklarda tek tabaka permalloy filmler üretilmiştir. Yapısal ve manyetik özellikleri oda sıcaklığında araştırılmıştır. Permalloy Si/SiO₂ alttaş üzerine (111) yöneliminde büyümüştür. Aynı zamanda alaşım kompozisyon oranı %21 Fe ve %79 Ni olarak ölçülmüştür. Manyetik ölçümler büyütme sırasında indüklenen oblique anizotropiden dolayı filmlerin düzlem içinde tek eksenli anizotropiye sahip olduğu ve film kalınlığı ile bu anizotropinin arttığı göstermiştir. Bu anizotropinin yönelimi çok katmanlı manyetik ince film yapılarında her katman için farklı yönde tayin edilebilmektedir. Bu nedenle, eğik açıda büyütülmüş manyetik katmanlar, gelecekteki yüksek yoğunluklu, yüksek frekanslı cihaz uygulamaları için kullanışlı NiFe filmleri elde etmek fırsat sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kısmi olarak TÜBİTAK 114F359 nolu projeden desteklenmiştir. Çalışmada değerli katkılarından dolayı AC Başaran, B Aktaş ve KY Aktaş'a ve laboratuvar desteğinden dolayı Gebze Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Aldimassi AM, Chevalier A, Youssef JB, Laur V, Rouvellou B, 2020. Magnetic anisotropies in oblique columnar growth of FeCoB films. *AIP Advances*, 10: 065218.
- Ali Z, Basaula D, Zhou W, Brock J, Khan M, Eid KF, 2019. Controlling the charge transport mode in permalloy films using oblique angle deposition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 484: 430-436.
- Ariake Y, Wu S, Kanada I, Mewes T, Tanaka Y, Mankey G, Mewes C, Suzuki T, 2018. The growth temperature and measurement temperature dependences of soft magnetic properties and effective damping parameter of (FeCo)-Al alloy thin films. *AIP Advances*, 8: 056119.
- Barranco A, Borrás A, Gonzalez-Elipe AR, Palmero A, 2016. Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices. *Progress in Materials Science*, 76: 59-153.
- Bertelli TP, Bueno TEP, Krohling AC, Silva BC, Rodríguez-Suárez RL, Nascimento VP, Paniago R, Krambrock K, Larica C, Passamani EC, 2017. Magnetic anisotropy of Co thin films: Playing with the shadowing effect, magnetic field and substrate spinning. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 426: 636-640.
- Bozorth RM, Walker JG, 1953. Magnetic Crystal Anisotropy and Magnetostriction of Iron-Nickel Alloys. *Physical Review*, 89: 624-628.

- Bueno TEP, Parreiras DE, Gomes GFM, Michea S, Rodríguez-Suárez RL, Filho MSA, Macedo WAA, Krambrock K, Paniago R, 2014. Noncollinear ferromagnetic easy axes in Py/Ru/FeCo/IrMn spin valves induced by oblique deposition. *Applied Physics Letters*, 104: 242404.
- Chi CS, Wang BY, Pong WF, Ho TY, Tsai CJ, Lo FY, Chern MY, Lin WC, 2012. Uniaxial magnetic anisotropy in Pd/Fe bilayers on Al_2O_3 (0001) induced by oblique deposition. *Journal of Applied Physics*, 111: 123918.
- Choi JG, Hwang DG, Rhee JR, Lee SS, 2010. Comparison of the soft magnetic properties of permalloy and conetic thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322: 2191-2194.
- Demirci E, 2020. Magnetic and Magnetotransport Properties of Memory Sensors Based on Anisotropic Magnetoresistance. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 33: 3835-3840.
- Farle M, 1998. Ferromagnetic resonance of ultrathin metallic layers. *Reports on Progress in Physics*, 61:755-826.
- Fitzsimmons MR, Silva TJ, Crawford TM, 2006. Surface oxidation of Permalloy thin films. *Physical Review B*, 73: 014420.
- Fukuma Y, Lu Z, Fujiwara H, Mankey G.J, Butler WH, Matsunuma S, 2009. Strong uniaxial magnetic anisotropy in CoFe films on obliquely sputtered Ru underlayer. *Journal of Applied Physics*, 106: 076101.
- Gul Q, He W, Li Y, Sun R, Li N, Yang X, Li Y, Gong ZZ, Xie Z, Zhang XQ, 2018. Thickness dependent manipulation of uniaxial magnetic anisotropy in Fe-thin films by oblique deposition. *Chinese Physics B*, 27: 097504.
- Hawkeye MM, Brett MJ, 2007. Glancing angle deposition: Fabrication, properties, and applications of micro- and nanostructured thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 25: 1317-1335.
- Jen SU, Wang PJ, Tseng YC, Chiang HP, 2009. Planar Hall effect of Permalloy films on Si(111), Si(100), and glass substrates. *Journal of Applied Physics*, 105: 07E903.
- Jiao J, Wang T, Ma T, Wang Y, Li F, 2017. Achievement of Diverse Domain Structures in Soft Magnetic Thin Film through Adjusting Intrinsic Magnetocrystalline Anisotropy. *Nanoscale Research Letters*, 12: 21.
- Kateb M, Hajihoseini H, Gudmundsson JT, Ingvarsson S, 2018. Comparison of magnetic and structural properties of permalloy $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ grown by dc and high power impulse magnetron sputtering. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51: 285005.
- Kateb M, Ingvarsson S, 2017. Thickness-dependent magnetic and magnetoresistance properties of permalloy prepared by field assisted tilt sputtering. *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 13-15 Mart 2017, Amerika.
- Kittel C, 1949. On the Gyromagnetic Ratio and Spectroscopic Splitting Factor of Ferromagnetic Substances. *Physical Review*, 76: 743-748.
- Kocaman B, Akdoğan N, 2018. Reduction of shunt current in buffer-free IrMn based spin-valve structures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 456: 17-21.
- Kocaman B, Aktaş KY, Basaran AC, 2021. Dependence of exchange bias and coercive field on Cu spacer thickness in oblique deposited Co/Cu/CoO multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 530: 167926.
- Krohling AC, Verbeno CH, Bueno TEP, Nascimento VP, Krambrock K, Litterst FJ, Passamani EC, 2020. The influence of Cu spacer morphology in Cu/Py/Cu/Co/IrMn spin valves with induced non-collinear spin structures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 512: 166985.

- Kumar P, Krishna MG, Bhattacharya AK, 2009. Effect of microstructural evolution on magnetic properties of Ni thin films. *Bulletin of Materials Science*, 32: 263-270.
- Li C, Chai G, Yang C, Wang W, Xue D, 2015. Tunable zero-field ferromagnetic resonance frequency from S to X band in oblique deposited CoFeB thin films. *Scientific Reports*, 5: 17023.
- Mattera M, Torres-Cavanillas RN, Prieto-Ruiz JP, Prima-García H, Tatay S, Forment-Aliaga A, Coronado E, 2015. Self-Assembled monolayers on a ferromagnetic permalloy surface. *Langmuir*, 31: 5311-5318.
- Mazumdar D, Shen W, Liu X, Schrag BD, Carter M, Xiao G, 2008. Field sensing characteristics of magnetic tunnel junctions with (001) MgO tunnel barrier. *Journal of Applied Physics*, 103: 113911.
- Phuoc NN, Xu F, Ong CK, 2009. Tuning magnetization dynamic properties of Fe-SiO₂ multilayers by oblique deposition. *Journal of Applied Physics*, 105: 113926.
- Pollak RA, Bajorek CH, 1975. Surface composition and chemistry of evaporated Permalloy films observed by x-ray photoemission spectroscopy and by Auger electron spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 46: 1382-1388.
- Salou M, Lescop B, Rioual S, Lebon A, Youssef JB, Rouvellou B, 2008. Initial oxidation of polycrystalline Permalloy surface. *Surface Science*, 602: 2901-2906.
- Smit J, Beljers H, 1955. Ferromagnetic resonance absorption in BaFe₁₂O₁₉ a highly anisotropic crystal. *Philips Res. Rep.* 10: 113.
- Snigirev OV, Andreev KE, Tishin AM, Gudoshnikov SA, Bohr J, 1997. Magnetic properties of thin Ni films measured by a dc SQUID-based magnetic microscope. *Physical Review B*, 55: 14429-14433.
- Suhl H, 1955. Ferromagnetic Resonance in Nickel Ferrite Between One and Two Kilomegacycles. *Physical Review*, 97: 555-557.
- Suraj TS, Müller M, Gelder S, Geprägs S, Opel M, Weiler M, Sethupathi K, Huebl H, Gross R, Ramachandra Rao MS, Althammer M, 2020. Effect of interfacial oxidation layer in spin pumping experiments on Ni₈₀Fe₂₀/SrIrO₃ heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 128: 083903.
- Svalov A, Aseginolaza I, Garcia-Arribas A, Orue I, Barandiaran J, Alonso J, Fernández-Gubieda M, Kurlyandskaya G, 2010. Structure and magnetic properties of thin permalloy films near the “transcritical” state. *IEEE transactions on magnetics*, 46: 333-336.
- Telepinsky Y, Mor V, Schultz M, Hung YM, Kent AD, Klein L, 2016. Towards a six-state magnetic memory element. *Applied Physics Letters*, 108: 182401.
- Thomson T, 2014. Magnetic properties of metallic thin films. *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. Woodhead Publishing, pp 454-546.
- Topkaya R, 2017. Ferromagnetic Resonance Study of Fe/Cu Multilayer Thin Film. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 30: 1275-1280.
- Wang G, Dong C, Wang W, Wang Z, Chai G, Jiang C, Xue D, 2012. Observation of rotatable stripe domain in permalloy films with oblique sputtering. *Journal of Applied Physics*, 112: 093907.
- Wulfhekel W, Knappmann S, Oepen HP, 1996. Magnetic anisotropy of Co on Cu(1 1 1). *Journal of Applied Physics*, 79: 988-992.
- Yasaka M, 2010. X-ray thin-film measurement techniques, *The Rigaku Journal*, 26: 1-9.
- Youssef JB, Vukadinovic N, Billet D, Labrune M, 2004. Thickness-dependent magnetic excitations in Permalloy films with nonuniform magnetization. *Physical Review B*, 69: 174402.
- Zhan Q.F, Vandezande S, Haesendonck CV, Temst K, 2007. Manipulation of in-plane uniaxial anisotropy in FeMgO(001) films by ion sputtering. *Applied Physics Letters*, 91: 122510.