



## Investigation of Structural and Magnetic Properties of Ni(x):YIG (x=1, 3 and 5%) Thin Films

Kutluhan Utku Tümen<sup>1</sup>, Onur İloğlu<sup>1</sup>, Nazan Demiryürek<sup>2</sup>, Mustafa Akyol<sup>1,\*</sup> , Faruk Karadağ<sup>2</sup>, Ahmet Ekicibil<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Materials Engineering, Adana, TURKEY

<sup>2</sup> Çukurova University, Department of Physics, Adana, TURKEY

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 06/03/2020

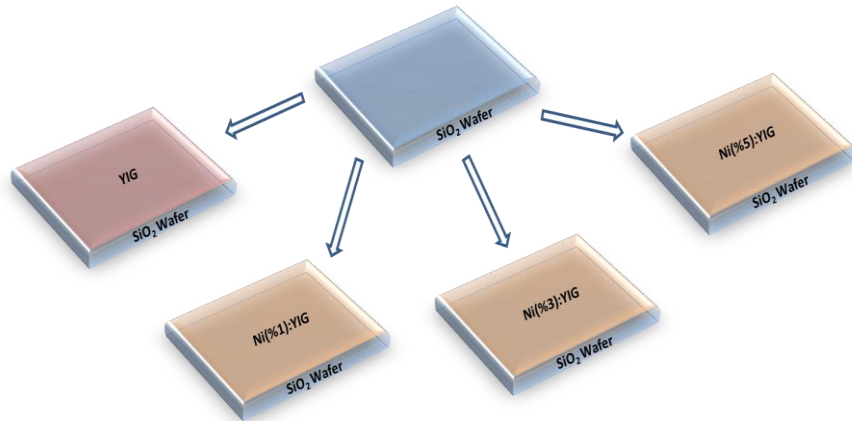
Revision 17/04/2020

Accepted: 08/05/2020

In this study,  $Y_3Fe_5O_{12}$  shortly named YIG thin film and various concentration of Ni doped YIG thin films have been grown on quartz substrate using vacuum free spin-coating methods. Structural and magnetic properties of YIG and Ni(x):YIG (x=1, 3 and 5%) thin films grown on quartz substrates were investigated by performing X-ray diffraction and vibrating sample magnetometer experiments, respectively.

#### Highlights

- YIG film has been successfully grown on quartz substrate by vacuum free technique.
- Magnetic and structural properties of nickel on YIG were investigated.



**Figure A.** Schematic representation of YIG and Ni(1, 3 and 5 %):YIG thin films on quartz substrate

#### Keywords

YIG  
Thin Film  
Spin Coating  
Magnetic Anisotropy

**Purpose:** In this study, the following items are intended: Using quartz substrates instead of highly cost GGG (Gallium-Gadolinium-Garnet) substrates and minimizing production costs, low-cost YIG thin film production by using vacuum-free spin coating system and low Ni contribution to improve magnetic properties of YIG thin films.



**Theory and Methods:** YIG and Ni:YIG were grown on quartz substrates by vacuum-free spin coating in various recipes. The structural and magnetic properties of these thin films were characterized by X-Ray Diffraction and Vibrating Sample Magnetometer.

**Results:** In this study, YIG and Ni doped YIG coated quartz substrates are discussed in various aspects. Crystallographic results show that YIG crystallizes in a single phase cubic garnet structure and also Ni patterns are observed in various Ni samples. In addition, nickel addition of ferrimagnetic YIG deteriorated magnetic anisotropy.

**Conclusion:** YIG and Ni:YIG samples were produced successfully by using vacuum-free spin coating method. In addition, the targets (sub-cost, production cost) were successfully realized. Structural features are successful for YIG. However, with the addition of nickel, the structure was thoroughly disrupted. In addition, due to the ferrimagnetic nature of Ni, disrupting YIG's magnetic anisotropy while it is expected to increase the magnetic properties of YIG.



## Ni(x):YIG (x=% 1, 3 ve 5 ) İnce Filmlerin Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

Kutluhan Utku Tümen<sup>1</sup>, Onur İloğlu<sup>1</sup>, Nazan Demiryürek<sup>2</sup>, Mustafa Akyol<sup>1,\*</sup> , Faruk Karadağ<sup>2</sup>, Ahmet Ekicibil<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Malzeme Mühendisliği Bölümü, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana 01250, Türkiye

<sup>2</sup> Fizik Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana 01330, Türkiye

### Öz

İtriyum Demir Garnet ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) kısa ismiyle YIG, ince filmlerin mikrodalga haberleşme sistemleri ve manyeto-optik cihazlarda umut veren uygulamalarından dolayı son yıllarda yoğun olarak çalışılan malzemelerden biridir. Günümüzde YIG ince filmler GGG ile isimlendirilen Galyum-Gadolinium-Garnet alttaş üzerine büyütülmektedir. Ancak GGG alttaşın maliyetinin yüksek olması YIG filmlerin üretilmesini ekonomik açıdan kısıtlamaktadır. Yaptığımız ön çalışmalar, kuvars üzerine YIG ince film büyütmenin mümkün olabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada GGG alttaş yerine daha düşük maliyetli ve beklenen performansı karşılayan kuvars alttaş kullanıldı. YIG ince filmler kuvars alttaş üzerine spin-kaplama yöntemiyle büyütüldü. Uygun üretim koşulları altında üretilen YIG ince film kaplı numunelerin yüzey homojenliği sağlandı. Kuvars altlık üzerinde büyütülen YIG filmlerinin tek fazlı kübik bir garnet yapısında kristalize olduğu bulundu. Ayrıca Ni katkılı YIG filmleri benzer yöntemle büyütüldü. -5000 Oe ile +5000 Oe arasında uygulanan manyetik alan ile manyetizasyon değerleri ölçüldü ve histerezis eğrileri elde edildi.

### Investigation of Structural and Magnetic Properties of Ni(x):YIG (x=1, 3 and 5%) Thin Films

#### Abstract

YIG with its short name of Yttrium Iron Garnet ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) is one of the materials that have been working intensively in recent years due to its promising applications in microwave communication systems and magneto-optical devices. Today, YIG thin films are grown on the Gallium- Gadolinium-Garnet substrates with the short name of GGG. However, because the cost of GGG substrate is very high which restricts the production of YIG films economically. Our preliminary studies have shown that it is possible to grow YIG thin film on the quartz substrate. In this study, quartz substrate was used instead of GGG substrate which meets lower cost and expected performance. YIG thin films were grown on quartz substrate by spin-coating method. The surface homogeneity of YIG thin film coated samples produced under suitable production conditions was provided. YIG films grown on quartz substrate were found to be crystallized in a single-phase cubic garnet structure. In addition, Ni doped YIG films were grown similar technique. The magnetic field applied between -5000 Oe and +5000 Oe, magnetization values were measured and hysteresis curves were obtained.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 06/03/2020  
Düzeltilme: 17/04/2020  
Kabul: 08/05/2020

#### Anahtar Kelimeler

YIG  
İnce Film  
Döndürerek Kaplama  
Manyetik Anizotropi

#### Keywords

YIG  
Thin Film  
Spin Coating  
Magnetic Anisotropy

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

YIG'in dar ferromanyetik rezonans genişliğe, düşük manyetik kayıp ve yeterince güçlü doyum mıknatıslanma değerlerine sahip olmasından ötürü manyetik sensörlerde ve veri depolama aygıtlarında kullanılma potansiyeli yüksek bir malzemedir. Dolayısıyla, nano ölçekli YIG filmlerin üretimi ve karakterizasyonu gelecek nesil nanoteknolojik aygıtların geliştirilmesi açısından önemli hale gelmiştir. Garnetler sahip oldukları yüksek faraday etkileri ve görünür bölgedeki saydamlık özellikleri ile birçok manyeto-optik uygulama alanında, 1-10 GHz bandında kullanıma en uygun mikrodalga elemanı olmasından dolayı mikrodalga alanında rezonatör ve filtre olarak [6, 8], optik sistemlerinde faraday

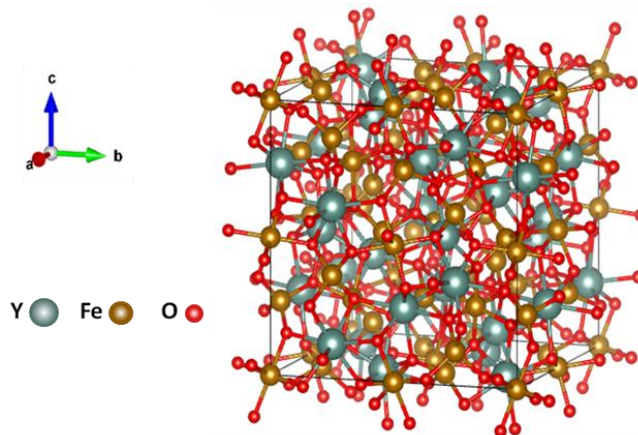
döndürücü olarak, dijital radyolar için sentezazır (synthesizer) olarak, manyetik alan ile elde edilen akım sensörlerinin geliştirilmesinde [2], bilgi iletişim hatlarına entegre edilmiş optik modülatörde, optik izolatörlerde, yayıcılar ve dielektrik dalga kılavuzlarında olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadırlar. Garnetlerin termal olmayan optik yöntemlerle manyetik özelliklerin değiştirilebileceği bulunmuş [2] ve bu bulgular ile garnetlerin ultra hızlı anahtarlama ve manyetik kayıt ortamları için kullanışlı olabileceği saptanmıştır [7]. Aşağıdaki tabloda YIG'in bant aralığı (1-10 GHz) kapsamında çalışan aygıtların uygulama alanları verilmiştir.

**Tablo 1.** Farklı bant (GHz) aralıkları ve kullanım alanları.

Bant Adı	Frekans Aralığı (GHz)	Dalga Boyu Aralığı (cm)	Kullanım Alanı
L-Bant	1-2	15-30	Askeri telemetri istihbaratı sistemleri, GPS, GSM.
S-Bant	2-4	7.5-15	Gemi radarları, haberleşme uyduları, mikrodalga cihazlar ve kablosuz iletişim araçları.
C-Bant	4-8	3.75-7.5	Uzun mesafe telekomünikasyon uygulamaları.
X-Bant	8-12	2.5-3.75	Haberleşme uydu radarları, uzay iletişim araçları.

YIG ince filmler ferromanyetik bir malzemedir. YIG, 3 alt kafese (sublatice) sahiptir. Bunlardan 2 tanesi demir iyonları 1 tanesi ise itriyum iyonları tarafından işgal edilmiştir. YIG'in manyetik özelliği, kafes yapısında oktohedral ve tetrahedral konumlarındaki manyetik demir iyonlarından kaynaklanmaktadır. Bu manyetik momentler ters yönde olup net manyetik momentleri sıfırdan farklıdır. Bir alt kafes %60 demir iyonu içerirken diğer kafes %40 içerdiğinden dolayı net manyetizasyon oluşur. YIG yapısındaki itriyum iyonları diyamanyetik özellik gösterir ve manyetik özelliklere etkileri azdır [5]. YIG'in manyetik geçiş sıcaklığı (Curie sıcaklığı) 282°C olması oda sıcaklığındaki manyeto-optik aygıtlardaki uygulamaları daha aktif hale getirmektedir.

YIG yapısında geniş ölçüde izin verilen izomorfik yer değiştirmeler sayesinde, iyi bir mikro-yapı kontrolüne koşullandırılmış yeni elementlerin dahil edilmesiyle farklı özellikler elde edilebilir. İtiryum demir garnet içindeki demir (Fe) yerine nikel (Ni) eklenmesiyle yeni özellikler ve uygulamalar elde edilebilir. Nikel iyonlarının YIG yapısına katılması, yük dengesi olmayan bir materyal örneğidir. Dahil edilen  $Ni^{2+}$  iyonlarının,  $Fe^{4+}$  veya  $Fe^{2+}$  oluşumu ile dengelenebileceği varsayılabilir. Bununla birlikte, Ni diğer oksidasyon durumlarında da tanımlanır. Yük dengeleme için ek mekanizma, kafesler içindeki oksijen boşluğundaki bir artışın Fe'nin Ni tarafından değiştirilmesine eşlik eden oksijen boşluğu oluşumu olabilir. Oksijen boşluğu bir veya iki yakalanmış elektrona sahip olabilir veya boş kalabilir ve YIG'daki bazı önemli özellikleri değiştirebilir [9].



**Şekil 1.** İtiryum Demir Garnet (YIG) ferritinin kristalografik yapısı: uzay grubu Ia3d.

YIG ince filmlerin potansiyel uygulamalarda kullanılmasını kısıtlayan önemli problemlerden bazıları; *i*) oldukça pahalı olan GGG alttaşlar üzerine büyütülüyor olmaları, *ii*) vakum gerektiren üretim sistemlerinin kullanılıyor olmasıdır.

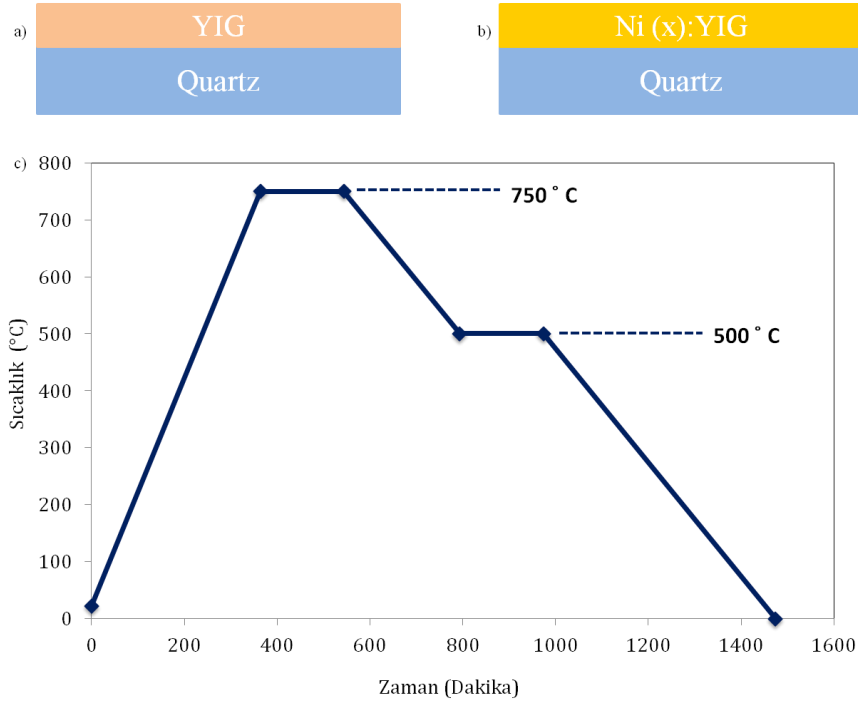
Bu çalışmada, YIG filmlerinin oluşturulmasında ve potansiyel uygulamalarda kullanılmasına engel teşkil edecek üretim maliyeti ve manyetik özelliklerinin yetersiz olması gibi problemlere aşağıda verilen çözüm önerileri çalışmanın ana amaçlarını oluşturmaktadır.

- i*) *Alttaş*: Alttaş olarak kullanılan ve oldukça yüksek maliyetli GGG alttaşlar yerine kuvars alttaşlar kullanılarak üretim maliyeti en aza indirgenmiş ve kuvars alttaş üzerinde üretilen YIG filminin kalitesi iyileştirilmiştir. Bunlara ek olarak, kuvars alttaşların ışığı geçirmesi, optik çalışmalar için uygun olması ve yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi gibi avantajları da bulunmaktadır.
- ii*) *Üretim*: Vakum gerektirmeyen spin-kaplama sistemi kullanılarak düşük maliyetli YIG ince film üretimi gerçekleştirilmiştir.
- iii*) *Yapısal ve Manyetik Özellikler*: YIG filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri araştırılmıştır. Düşük oranda Ni katkılması gerçekleştirilerek manyetik ve morfolojinin nasıl etkileneceği incelenmiştir.

YIG filmini büyütme için çeşitli biriktirme yöntemleri kullanılabilir. Bunlardan bazıları; mikrodalga sinterleme, sıvı faz epitaksi (LPE), radyo frekansı magnetron püskürtme, atımlı lazer biriktirme (PLD), plazma püskürtme ve sol-jel yöntemidir [3-4, 10-13]. Bunlar arasında, sol-jel yöntemi, düşük maliyetli olmasından dolayı avantajlıdır[1]. Maliyetin yanı sıra, daha düşük sentez sıcaklığında yüksek saflıkta ve homojenlikte filmler üretmek bu yöntemle mümkün olabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, çalışmada sol-jel yöntemi kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

İtriyum Demir Garnet (YIG) ve Ni(x):YIG filmleri, spin-kaplama yöntemi kullanılarak kuvars üzerine kaplandı. YIG'in kimyasal çözeltisi %99.99 saflıkta İtriyum (III) Nitrat Tetrahidrat ( $N_2O_6Y \cdot 4H_2O$ ) ile % 98,0 saflıkta Demir (III) Nitrat Nanohidrat ( $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ) uygun stokiometrik oranlarda 2-metoksietanol içinde ayrı ayrı çözünerek hazırlandı. Daha sonra, her iki çözelti karıştırıldı ve 2 gün boyunca karışması sağlandı. Şekil 2a-b'de önceden temizlenmiş kuvars alttaşlar üzerine büyütülmüş YIG ve Ni(x):YIG yapıları gösterilmektedir. YIG ve Ni (% 1, 3, 5):YIG filmler, 500 ve 3000 rpm'de döndürülerek toplamda 45 sn'lik iki aşamalı spin-kaplama yöntemi kullanılarak büyütülmüştür. Daha sonra üretilen filmler, organik çözücüleri yakmak için ortam atmosferinde 100° C'de 10 dakika boyunca kurutuldu. Daha sonra filmlerin kristal yapılarının oluşumu için ısıl işlem uygulandı. Şekil 2c, uygulanan ısıl işlemin temsili bir grafiğini göstermektedir. Filmler, 2°C/dak, ısıtma oranında 750°C'ye ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 3 saat tutuldu. Daha sonra 1°C/dak soğutma hızında 500°C'ye soğutuldu ve bu sıcaklıkta 3 saat tutuldu. Son olarak, 1°C/dak soğutma hızıyla oda sıcaklığına soğutuldu.



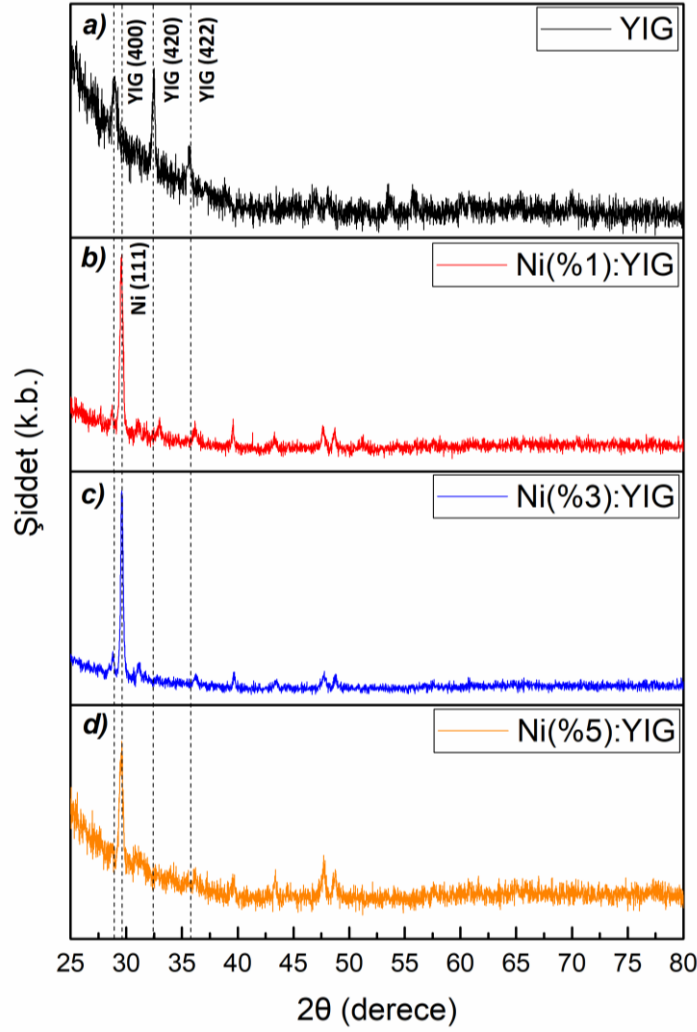
**Şekil 2.** a) Kuvars alttaş üzerine büyütülen YIG ince filmi b) farklı konsantrasyonlardaki Ni(x):YIG ince filmler (x:% 1, 3, 5) c) filmlere uygulanan ısı işlem aşamaları.

Filmlerin faz oluşumunu ve yapısal özelliklerini belirlemek için Cu-K $\alpha$  radyasyonu ile X-Işını Kırınımı (XRD) kullanılmıştır. Örneklerin oda sıcaklığında manyetik özelliklerini karakterize etmek için Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM) kullanılmıştır. Manyetik ölçümler, YIG ve Ni katkılı YIG numuneleri için oda sıcaklığında manyetik alanın film düzlemine dik (OOP) uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Manyetik alana karşı mıknatıslanma ölçümleri oda sıcaklığında  $\pm 5$ kOe manyetik alan aralığında gerçekleştirilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### Mikroyapısal Analiz

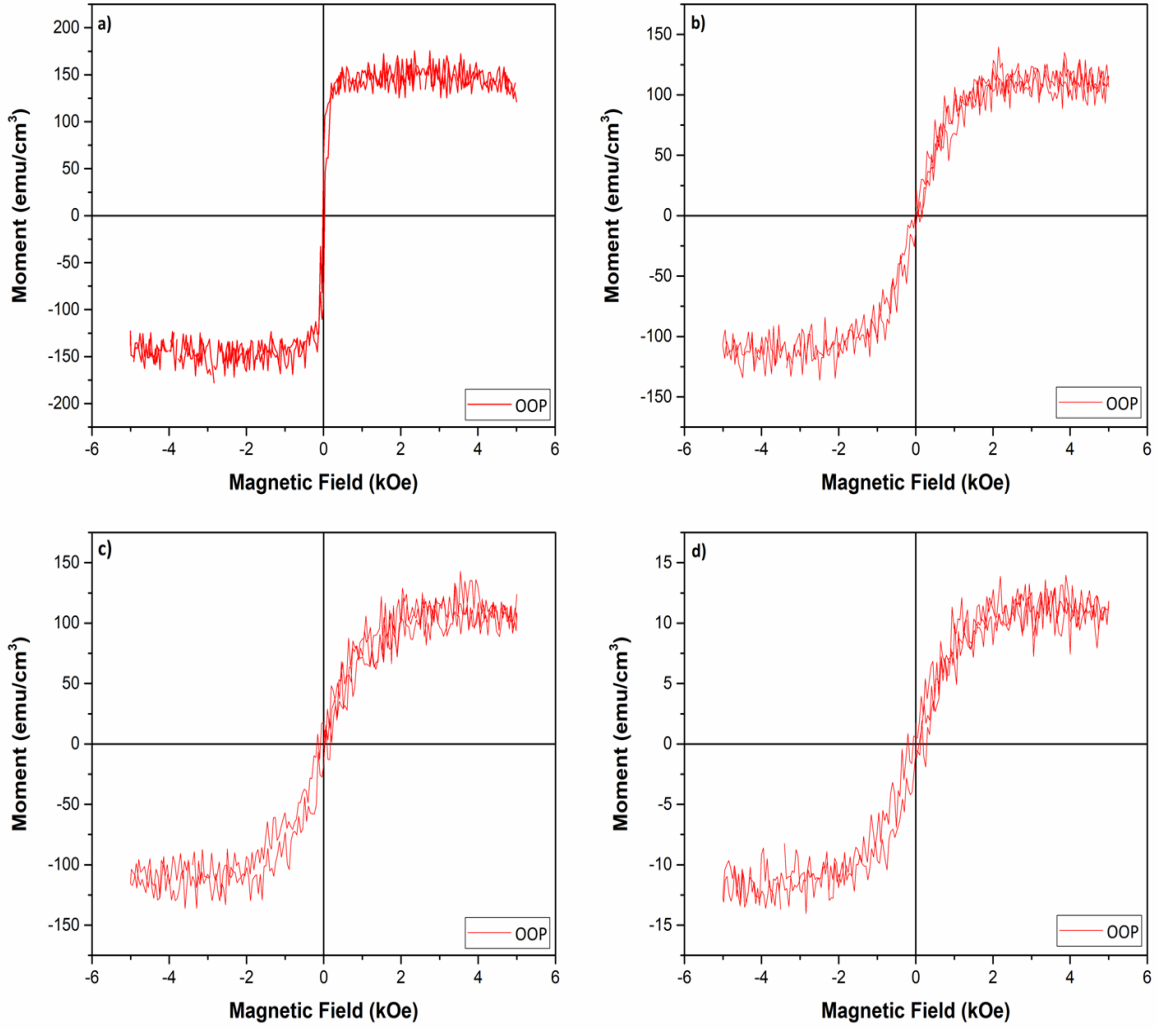
Şekil 3a-d, YIG ince film yapısındaki farklı Ni kombinasyonlarındaki filmlerin XRD profillerini göstermektedir. Şekil 3a'da gösterilen YIG filminin XRD desenleri, sırasıyla  $2\theta = 28.96^\circ$ ,  $32.50^\circ$  ve  $35.61^\circ$  'de bulunan (400), (420) ve (422) garnet yapısına sahip olan karakteristik YIG kırınım piklerini göstermektedir. Kuvars altlık üzerine büyütülen YIG filmlerinin, X-Pert High-Score Plus yazılımı kullanılarak doğrulanan tek fazlı kübik bir garnet yapısında kristalize olduğunu göstermektedir. Karakteristik YIG piklerine ek olarak, Ni-içeren YIG numuneleri (Şekil 3 b, c ve d), en güçlü (111) metalik Ni pikine sahiptir. Ayrıca Ni oranının artması ile YIG'in kristal yapısının bozulduğu ve %5 Ni katkılı örnekte YIG'in kristal yapısının tamamen ortadan kaybolduğu gözlenmiştir. Bu durum Ni(111) pikinin şiddetindeki değişim ile uyumludur.



Şekil 3. a) YIG, b) Ni(%1):YIG c) Ni(%3):YIG ve d) Ni(%5):YIG ince filmlerin XRD desenleri

### Manyetik Analiz

YIG ve farklı konsantrasyonlarda Ni katkılı Ni:YIG filmlerinin manyetik özellikleri, titreşimli örnek manyetometresi (VSM) kullanılarak incelenmiştir. Manyetik ölçümler, YIG ve Ni katkılı YIG numuneleri için oda sıcaklığında manyetik alanın film düzlemine dik (OOP) uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Manyetik alana karşı mıknatıslanma ölçümleri oda sıcaklığında  $\pm 5$  kOe manyetik alan aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4a-d, sırasıyla YIG, Ni(%1):YIG, Ni(%3):YIG ve Ni(%5):YIG örneklerinin manyetik OOP histerezis eğrilerini göstermektedir. Kuvars altlıkların diyamanyetik katkısının ham histerezis eğrilerinden çıkarılmıştır. Ni katkılanması ile manyetik anizotropide bozulma gerçekleştiği görülmüştür. Katkisız YIG örneğindeki OOP manyetik yönelim, Ni katkılanması ile film düzlemine paralel yöneldiği Şekil 4'den görülmektedir. Ni katkılı YIG örneklerinin yüzeye dik manyetik histerezis ölçümleri mıknatıslanmanın daha çok yüzeye dik bileşene sahip olduğunu göstermektedir. Tüm histerezis eğrileri birbirine benzer olsa da, doyum mıknatıslanması ( $M_s$ ) ve anizotropi alanı ( $H_a$ ) gibi manyetik parametreler farklıdır. Fakat YIG'in manyetik yapısının Nikel (ferrimanyetik) eklenmesi ile daha da güçlenmesi beklenirken bunun aksine bir davranış göstermiştir. %5 katkılı numunenin doyum mıknatıslanmasındaki ani düşüş YIG'in kristal yapısının bozulduğunun bir diğer deneysel göstergesidir. Bunlara ek olarak, Şekil 4'teki histerezis eğrilerinden çıkarılan  $M_s$  değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. YIG numunesi örnekler arasında en yüksek  $M_s$  değerine ( $147 \text{ emu/cm}^3$ ) sahiptir.



**Şekil 4.** a) YIG, b) Ni (% 1):YIG, c) Ni(%3):YIG ve d) Ni (% 5):YIG yapılarının düzleme dik manyetik histerezis eğrileri verilmiştir. Tüm manyetik histerezis ölçümleri oda sıcaklığında yapılmıştır.

**Tablo 2.** Farklı Ni kombinasyonlarındaki ince filmlerin doyum mıknatıslanması ( $M_s$ ), zorlayıcı alan ( $H_a$ ) ve anizotropi enerji değerleri ( $K$ ).

Örnekler	$H_a$ (Oe)	$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$K$ (erg/cm <sup>3</sup> )
YIG	1280	147	$9.40 \times 10^4$
Ni(%1):YIG	1920	112	$10.6 \times 10^4$
Ni(%3):YIG	1840	109	$10.3 \times 10^4$
Ni(%5):YIG	1870	11	$1.3 \times 10^4$



Manyetik anizotropi enerji değerleri ( $K$ ),  $K = M_s H_a / 2$  ilişkisi kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir. Hesaplanan  $K$  değerlerine göre, Ni oranının artmasıyla birlikte Ni(%1):YIG ve Ni(%3):YIG numunelerinin anizotropi enerjileri YIG numunesine göre artış gösterdiği görülmektedir. Ancak burada manyetik yönelimin değiştiği unutulmamalıdır. Manyetik anizotropi değerinin artması aslında manyetik anizotropi yöneliminin OOP (out of plane)'den IP (in plane)'e geçmesinden dolayıdır. %1 katkılı örnekte IP manyetik anizotropi enerji değeri artmıştır, ki bu beklendik bir durumdur. Daha sonra manyetik anizotropinin azalışa geçmesinin nedeni ise YIG'in yapısının bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat Ni(%5):YIG örneğinde manyetik anizotropi değeri diğer numunelere kıyasla en düşük olarak görülmüştür. Ayrıca, Şekil 4 b, c ve d'de görüldüğü üzere manyetik anizotropi alanı Ni katkı miktarı ile bozulmuştur.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Spin kaplama yöntemi ile kuvars altlık üzerine YIG, Ni(%1):YIG, Ni(%3):YIG ve Ni(%5):YIG ince film yığınları başarılı bir şekilde büyütülmüştür. Hedeflenen maliyet adımları, GGG alttaş yerine kuvars kullanılarak ve vakum gerektirmeyen spin kaplayıcı sistem ile azaltılmıştır. YIG tabakasının yığınlarda kristalize edilmesi ve filmlerin yüzeyinde çatlakların önlenmesi için iki aşamalı tavlama işlemi kullanılmıştır. Elde edilen XRD desenleri, filmlerin referans YIG desenlerinden oluşan kübik kristal yapı içinde kristalize olduğunu gösterir. YIG desenlerine ek olarak metalik Ni kristal pikleri de gözlenmiştir. YIG tabakasının doyum miktatsızlanması, Ni eklenmesi ile 147 emu/cm<sup>3</sup>'ten 11 emu/cm<sup>3</sup>'e düşmüştür.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, FAY-2018-10491 numaralı proje kapsamında Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Konseyi tarafından desteklenmektedir. 2209-A Lisans Araştırma Projeleri Destek programı kapsamında Yazarlar (O. İloğlu ve K. U. Tümen) tarafından Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 'a teşekkürler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Aldbea, F.W.,N.I. Ahmad,N.B. Ibrahim.M. Yahya. (2014). Effect of increasing pH value on the structural, optical and magnetic properties of yttrium iron garnet films prepared by a sol–gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 71(1), 31-37.
- [2] Atoneche, F.,A.M. Kalashnikova,A.V. Kimel,A. Stupakiewicz,A. Maziewski,A. Kirilyuk.T. Rasing. (2010). Large ultrafast photoinduced magnetic anisotropy in a cobalt-substituted yttrium iron garnet. *Physical Review B*, 81(21), 214440.
- [3] Boudiar, T.,B. Payet-Gervy,M.F. Blanc-Mignon,J.J. Rousseau,M. Le Berre.H. Joisten. (2004). Magneto-optical properties of yttrium iron garnet (YIG) thin films elaborated by radio frequency sputtering. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 284, 77-85.
- [4] Euler, C.,P. Hořuj,T. Langner,A. Kehlberger,V.I. Vasyuchka,M. Kläui.G. Jakob. (2015). Thermal conductance of thin film YIG determined using Bayesian statistics. *Physical Review B*, 92(9), 094406.
- [5] Geller, S. and M.A. Gilleo. (1957). Structure and ferrimagnetism of yttrium and rare-earth-iron garnets. *Acta Crystallographica*, 10(3), 239.
- [6] Harris, V.G.,A. Geiler,Y. Chen,S.D. Yoon,M. Wu,A. Yang,Z. Chen,P. He,P.V. Parimi,X. Zuo,C.E. Patton,M. Abe,O. Acher.C. Vittoria. (2009). Recent advances in processing and applications of microwave ferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(14), 2035-2047.
- [7] Kirilyuk, A.,A.V. Kimel.T. Rasing. (2010). Ultrafast optical manipulation of magnetic order. *Reviews of Modern Physics*, 82(3), 2731-2784.
- [8] Pardavi-Horvath, M. (2000). Microwave applications of soft ferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, 171-183.
- [9] Peña-Garcia, R.,Y. Guerra,F.E.P. Santos,L.C. Almeida.E. Padrón-Hernández. (2019). Structural and magnetic properties of Ni-doped yttrium iron garnet nanopowders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 492, 165650.



- [10] Ravi, B.G.,A.S. Gandhi,X.Z. Guo,J. Margolies.S. Sampath. (2008). Liquid Precursor Plasma Spraying of Functional Materials: A Case Study for Yttrium Aluminum Garnet (YAG). *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(1), 82-90.
- [11] Shaiboub, R.,N.B.y. Ibrahim,M. Abdullah.F. Abdalhade. (2012). The physical properties of erbium-doped yttrium iron garnet films prepared by sol-gel method. *J. Nanomaterials*, 2012, 1-5.
- [12] Uchida, K.-i.,T. Kikkawa,A. Miura,J. Shiomi.E. Saitoh. (2014). Quantitative Temperature Dependence of Longitudinal Spin Seebeck Effect at High Temperatures. *Physical Review X*, 4(4), 041023.
- [13] Yang, Q.,H. Zhang,Y. Liu,Q. Wen.L. Jia. (2008). The magnetic and dielectric properties of microwave sintered yttrium iron garnet (YIG). *Materials Letters*, 62(17), 2647-2650.