

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**GARNET ESASLI MANYETİK SIVI ÜRETİLMESİ,
MANYETO-OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

İsmail YARIÇI

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Yavuz ÖZTÜRK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu:609.01.00

Sunuş Tarihi:27.01.2015

Bornova-İZMİR

2015

İsmail YARIÇI tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Garnet Esaslı Manyetik Sıvı Üretilmesi, Manyeto-Optik Özelliklerinin İncelenmesi ” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 27.01.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı :

.....

Raportör Üye :

.....

Üye :

.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “GARNET ESASLI MANYETİK SIVI ÜRETİLMESİ, MANYETO-OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

26 /01 / 2015

İmzası

Adı-Soyadı

ÖZET

GARNET ESASLI MANYETİK SIVI ÜRETİLMESİ, MANYETO-OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YARICI, İsmail

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Yavuz ÖZTÜRK

Ocak 2015, 54 sayfa

Bu tez çalışmasında, manyetik sıvı üretiminde kullanılacak olan nadir toprak elementlerinden Seryum ve Bizmut ile katkılanırılmış İtiryum-Demir-Garnet (YIG, $Y_3Fe_5O_{12}$) nano parçacıkları sol-jel ve ortak çöktürme metodu kullanılarak farklı sıcaklıklarda ve pH değerlerinde üretildi ve karakterizasyonu gerçekleştirildi. Hazırlanan çözeltiler 800–1400°C sıcaklık aralığında tavlama ile garnet faz oluşumları gözlendi.

Nano tozların üretim aşamasındaki ve sonrasında mikroyapısal ve manyetik özellikleri XRD, VSM, SEM cihazlarıyla incelendi. Üretilen manyetik sıvıların manyeto-optik özellikleri kurulan 0.5° hassasiyetle Faraday açısı ölçebilen, polarizasyon değişimine dayalı manyeto-optik (MO) ölçüm sistemi ile incelendi. Faraday açısı için teorik hesaplamalar yapıldı ve deneysel sonuçlarla kıyaslandı.

Anahtar sözcükler: YIG, Manyeto-Optik, Faraday etkisi.

ABSTRACT**PRODUCTION OF GARNET BASED MAGNETIC FLUID,
INVESTIGATION OF THE MAGNETO-OPTIC PROPERTIES**

YARIÇI, İsmail

MSc in Electric Electronic Eng.

Supervisor: Assist.Prof.Dr. Yavuz ÖZTÜRK

January 2015, 54 pages

In this study, YIG (Yttrium-Iron-Garnet, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) doped with rare earth elements Cerium and Bismuth were produced by using sol-gel and co-precipitation methods for different pH values and temperatures. The prepared solutions were annealed in the temperature range of 800–1400°C and forming garnet phases was observed.

Microstructural and magnetic properties of nano powders during and after the fabrication process characterized by using XRD, VSM and SEM. The magneto-optic properties of the obtained magnetic fluid were observed via designed magneto-optical (MO) measurement system, which measure Faraday rotations with 0.5° sensitivity. Faraday rotations were calculated theoretically and compared with the experimental MO results.

Keywords: YIG, Magneto-optic, Faraday Effect.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı gerçekleştirmemizde bizden bilgi, deneyim ve ilgilerini eksik etmeyen hocalarımız Yrd. Doç. Dr. Yavuz ÖZTÜRK ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL'a, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum Arş. Gör. Sertaç YAMAN'a ve bölüm arkadaşlarıma, maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme ve her zaman desteğini esirgemeyen nişanlım Evrim AKSAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL BİLGİLER	5
2.1.Manyetizma Temel Kavramlar.....	5
2.1.1.Manyetizmanın temelleri.....	5
2.1.2. Manyetizma, manyetik domainler ve histeresiz eğrisi	6
2.2. Manyetik Sıvılar.....	7
2.2.1. Yüzeysel (surfacted) manyetik sıvı	8
2.2.2. İyonik manyetik sıvı.....	8
2.3. Polarizasyon	9
2.3.1. Lineer polarizasyon	10
2.3.2. Dairesel polarizasyon	11
2.3.3. Eliptik polarizasyon.....	13
2.4.Manyeto-Optik Faraday Etkisi	15

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.5. Manyeto-Optik Malzemeler	19
2.5.1. Garnetler	19
2.5.2. Garnetlerin katkılandırılması ve etkileri.....	21
2.6. Üretim Yöntemleri.....	25
2.6.1. Sol-jel yöntemi	25
2.6.2. Ortal çöktürme yöntemi.....	26
3.YÖNTEM VE GEREÇ.....	27
3.1.Garnet Tozlarının ve Manyeto-optik Sıvının Üretimi	27
3.1.1.Malzemeler	27
3.1.2. Üretim işlemi	28
3.2. Malzeme Karakterizasyonu	30
3.2.1. X-Işınlari kırınımı (XRD).....	30
3.2.2.Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	32
3.2.3.Titreşimli örnek manyetometresi (VSM)	32
3.3. Manteto-Optik Ölçüm Sistemi.....	33
3.3.1. Ölçüm sistemi	33
3.3.2. Teorik hesaplamalar	36
4.DENEYSEL SONUÇLAR.....	38

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.XRD Faz Analizleri.....	38
4.2. SEM Mikroyapı Analizleri.....	41
4.3. VSM Manyetik Özelliklerin Analizi	43
4.3. Manyeto-Optik Özelliklerin Analizi	46
5.SONUÇLAR	48
KAYNAKLAR DİZİNİ	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1.Ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi (histeresiz eğrisi) (Akdoğan, 2004).....	7
2.2 Manyetik sıvıyı oluşturan bileşenler.....	8
2.3 Yüzeysel manyetik sıvı (Scherer C. a., 2005).	8
2.4 İyonik manyetik sıvı: (a) Asidik yüzeysel tabaka ve (b) Bazik yüzeysel tabaka (Scherer C. a., 2005)....	9
2.5 Lineer Işık (Wikipedia, 2014)	11
2.6 Sağ dairesel ışık (Wikipedia, 2014).....	12
2.7 Eliptik ışık.....	14
2.8 Belirli Φ değerlerine karşılık gelen polarizasyon şekilleri (Bursa, 1994). ..	14
2.9 ER ve EL durumlarının süperpozisyonu olarak eliptik ışık (Bursa, 1994). ..	15
2.10 RCP ve LCP dalgalar ile polarizasyon açısı değişimi (Kahl, 2004).	18
2.11 RCP ve LCP dalgalar ile eliptik polarizasyon elde edilmesi (Kahl, 2004). .	18
2.12 YIG Kristal Yapısı.....	20
2.13 Y _{3-x} Ce _x Fe ₅ O ₁₂ için Faraday dönmesi (a) Y _{3-x} Ce _x Fe ₅ O ₁₂ (x = 0, 0.06, 0.15, 0.24) için Faraday dönmesi. (b) $\lambda = 1300$ nm ve 1550 nm için Faraday dönmesi. (S. Higuchi, (1999))	22
2.14 Oda sıcaklığında Y _{3-x} Ce _x Fe ₅ O ₁₂ filmleri için FR tayfı. (M. Gomi, 1991)	23

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.15 Y ₃ -xBi _x Fe ₅ O ₁₂ (x = 0.04, 0.1, 0.15, 0.2, and 0.23) için Faraday değişimi tayfı (Simsa Z., 1984).....	24
2.16 Y ₃ -xBi _x Fe ₅ O ₁₂ (x = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.3 ve 3) için Faraday değişim tayfı (M.-Y. Chern, 1999).....	24
2.17 Çeşitli sol-jel türevli ürünlerin şematik gösterimi (Brinker, 1990).....	26
3.1 Üretim akış şeması	27
3.2 Üretim akım şeması: (a)->Sol-jel yöntemi; (b)->Ortak çöktürme yöntemi..	29
3.3 Kristal malzeme içerisindeki atom katmanları tarafından kırılan X-ışınları (Diken, 2013).	31
3.4 GI-XRD ölçümünün şematik gösterimi (Diken, 2013).	32
3.5 Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)'in şematik diyagramı (Kockar H., 1998).....	33
3.6 Sağ ve sol polarize ışığın faz ve genlik değişimi sonucunda eliptik polarize olması (Öztürk, 2010)... ..	33
3.7. Manyeto-optik Faraday ölçüm sistemi.	35
4.1 800°C den 1400°C ye kadar farklı sıcaklıklar için XRD patterni (2.45 pH)38	
4.2 Farklı pH değerlerine sahip başlangıç çözeltilerinden elde edilen garnet tozlarının XRD sonuçları	39
4.3 Kristalit boyutu ve manyetizasyon değerlerinin pH değerlerine göre değişimi40	
4.4 BiYIG örnekleri için XRD desenleri.....	41
4.5 Farklı sıcaklık değerleri için SEM fotoğrafları (a) 800°C, (b) 1100°C ve (c) 1400°C.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.6 800-1400°C sıcaklıkları için üretilen örneklerin VSM sonuçları: Histeresiz eğrileri.....	43
4.7 Koersif alan ve doyma manyetizasyonu değerlerinin üretim sıcaklığına bağlı değişimi.....	44
4.8 Farklı iki yöntem ile üretilmiş tozların VSM sonuçları.	45
4.9 890 nm dalgaboyunda ticari BiYIG garnetin histeresiz eğrisi	46
4.10 543 nm dalgaboyunda MO camın histeresiz eğreisi.....	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 YIG'in Fiziksel Özellikleri (EROL, 2009)	21
3.1 Hammaddeler ve özellikleri	28
3.2 Çözeltilerin hazırlanılmasında kullanılan maddelerin miktarları	29
4.1 Ce:YIG için manyetik özellikler	44

1. GİRİŞ

Manyetik seramikler dikkate değer manyetik özelliklerinden ve kullanıldıkları birçok endüstriyel uygulamalarından dolayı hem teorik hem de deneysel olarak yoğun bir çalışma alanına sahiptirler (E.J.J. Mallman, 2013). Genellikle ferrit olarak bilinen manyetik oksitler, ana malzemeleri seramik malzemeler ve demir(III)oksit olan kimyasal bileşiklerdir (Carter C. Barry, 2007). Bu bileşikler 1930 yılında Tokyo Teknoloji Enstitüsünden Yogoro Kato ve Takeshi Takei tarafından keşfedilmiştir (Okamoto, 2009). En yaygın olanları çok geniş uygulama alanları mevcut olan spineller, garnetler ve hexaferritlerdir.

Manyetik seramikler, elektronik cihazlar, radar sistemleri , haberleşme ve RF ölçüm sistemleri, mikrodalga cihazları, yayıcılar(circulator) (S. Geller, 1957; B. Huang R. R., 2013), izolatörler, faz kaydırıcılar, ayarlanabilir filtreler ve lineer olmayan cihazlar (V. Priye, 1998; Sekijima, 1999; Standley, 1972) gibi birçok uygulamada geniş yer bulmuşlardır.

Garnetler ferrit malzemelerin başında gelir. Hızla gelişmekte olan teknoloji, haberleşme ve optik sistemlerden dolayı garnet yapıları her geçen gün dikkatleri daha çok üzerine çekmektedir (E.J.J. Mallman, 2013). Geciktirme üniteleri, ayarlanabilir filtreler, osilatörler ve kayıt sistemleri gibi yeni nesil cihazlar garnet malzemeler üzerine temellendirilmektedir (Garskaite, 2006). Bunların yanı sıra garnetler kalıcı magnet, magnet kayıt sistemi, bilgisayar, radyo, televizyon, mikrodalga cihazları gibi haberleşme ve manyeto-optik mühendisliği alanlarında da birçok uygulamaya uygundur.

İtriyum demir garnet (YIG), demir garnetler arasında en çok bilinen ve çalışılan garnetlerdendir. YIG'in yapısında özel manyetik ve manyeto-optik özelliklere sahip olan bir manyetik oksit grubu (garnet) mevcuttur. YIG, belli başlı uygulamalarda kullanılmak için gerekli olan düşük dielektrikliğe sahip olması, mikrodalga bölgesinde dar girişim çizgi genişliğine ve doyma manyetizasyonu değerinin yüksek, baskın olması gibi birçok çekici özelliğe sahiptir (E. Garskaite, 2006).

Yttrium iron garnet (YIG) malzemeler mikrodalga cihazlarındaki uygulamalarda sahip oldukları potansiyelden dolayı ilgi odağı olmayı başarmış ferrimanyetik malzemelerdendir. Mikrodalga uygulamaları için malzemenin düşük koersiviteye, yüksek artık mıknatıslanmaya, kare şeklinde histeresis eğrisine sahip olması ve soft manyetik malzeme olması gerekmektedir (Lax, 1962). Ferromanyetik garnetler mikrodalga cihaz malzemeleri, manyeto-optik kayıt ortamı olarak kullanılması gibi birçok alandaki eşsiz manyetik ve manyeto-optik özelliklerinden dolayı oldukça dikkat çekmektedir.

Manyetik oksitlerin en önemli özelliklerinden biri de farklı yönlerine birçok kation yerleştirebilmeleri ve farklı manyetik özellik gösterebilmeleridir (E.J.J. Mallman, 2013). Belirgin yapısı ve sadece üç bağlı metal iyonlarından yapılan YIG özellikle manyetik çalışmalar için çok uygundur. 8 formül birimi vardır , $Y_3Fe_2(FeO_4)_3$, ve her bir birim hücrenin lattis sabiti $a=(1.2376 \pm 0.0004)$ nm'dir. Manyetik özelliklerinin daha çok geliştirilmesi adına bazı bilim adamları YIG'i farklı kationlarla katkılandırmaya çalışmışlardır, bu kationlardan bazıları bizmut, lantanyum, seryum, titanyum, gadalinyum ve bazı diğer nadir toprak elementleridir (Sugano, 1999; Rastogi, 2002).

Serium ile katkılanırılmış YIG'in (Ce:YIG), geniş manyeto-optik etkiler ve düşük propagasyon kayıplar gösterdiği bulunmuştur. Öte yandan Bizmut ile katkılanırılmak Curie sıcaklığını, Faraday sapmasını, vb. özelliklerini arttırır. Bu özellikler garnetin yüksek kalitede cihaz üretimi için çok iyi bir aday malzeme olduğunu gösterir (M. Huang and S.-Y. Zhang, 2002).

Itrium demir garnetler farklı yöntemlerle üretilebilirler. YIG tozları üretiminde kullanılan bazı ıslak kimyasal yöntemler sol-gel, ortak çöktürme, darbeli lazer biriktirme, plazma püskürtme, sitrat-jel yöntemi vb (Wei, 2011; Xu H. Yang, 2007). Bu teknikler arasından sol-jel ve ortak çöktürme teknikleri seçilmiştir. Sol-jel tekniği; yüksek homojenlikte, nano boyutlarda kaliteli parçacık üretimini mümkün kıldığı için, yüksek saflıkta dopant malzemelerin katılabilmesi ve ekonomik olması gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra ortak çöktürme yöntemi oldukça basit, ucuz ve bol miktarda malzeme üretimi için avantajlı bir yöntemdir (Rehspringer J.L., 2000).

Manyetik sıvılar başka bir deyişle ferrosıvılar, manyetik nanoparçacıkların kolloidal süspansiyonlarıdır. Manyetik sıvılar, sıvının akışkanlığı ve katı manyetik malzemelerin manyetizma özelliklerine sahip hibrit bir yapıdır. Optik güçlendirici, ışık modülatörü, optik anahtar vb. gibi optik cihazlar manyetik sıvıların manyetik-optik özellikleri kullanılarak üretilebilir (Shengli Pu, 2010).

Manyetik sıvılar; boyutları 1–500 nm arasında değişen manyetik parçacıkların taşıyıcı bir sıvı içerisinde dağıldığı yapılardır. Manyetik sıvı manyetik parçacıklar, sıvı taşıyıcı ve yüzey aktif maddeden oluşmaktadır. 1960'lerde sentezlenmeye başlandığından beri, manyetik sıvıların teknolojik alanlardaki uygulamaları sürekli artış göstermiştir (Ge J. H. Y., 2007b; Ge J. H. Y., 2007a). Manyetik sıvılar izotropik olmalarına rağmen; uygulanan harici manyetik alanla anizotropik özellik göstererek Faraday dönmesi, çift kırınım (birefringence) vb. manyeto-optik etkiler gösterirler.

Güçlü bir manyetik sıvı üretmek güçlü bir manyetik katı eritmek gibi basit bir olgu değildir, çünkü manyetik katılar Curie sıcaklığı olarak bilinen değeri aştıktan sonra birçok manyetik özelliklerini kaybederler. Bunun sebebi termal

enerjinin elektronların manyetik domainde sıralanma eğilimine baskın gelmesidir. Bilinen manyetik katılar için Curie sıcaklığı erime noktalarının altındadırlar. Ferrofluidler dışardan gelen manyetik alana cevap veren sıvılardır. Bunun anlamı dışardan uygulanan manyetik alanla birlikte sıvının konumunun istenilen şekilde değiştirilebilmesidir (Mehta, 2013).

Manyetik sıvılarda süperparamanyetik parçacıkların kullanıldığı birçok ilginç uygulama mevcuttur. Manyetik sıvı içindeki yüzey aktif malzemenin temel amacı parçacıkların birbirlerine yapışmasını engellemektir. Bir manyetik sıvı hacim olarak değerlendirildiğinde yaklaşık olarak 5% manyetik parçacıklardan, 10% yüzey aktif malzeme ve 85% taşıyıcı sıvıdan” oluşmaktadır (O. Ayala-Valenzuela, 2005)

Manyetik sıvılara manyetik alan uygulanması sonucunda, çift kırınım (birefringence), Faraday dönmesi, dikroizm, Faraday eliptikliği gibi manyeto-optik etkiler ortaya çıkar. Manyetik olarak pasif olan sıvıların içindeki ferromanyetik parçacıklardan oluşan kolloidal yapıdaki manyetik sıvıda, sıcaklığa, parçacık derişimine, parçacık çapına ve uygulanan manyetik alana bağlı olarak farklı kümeleşme durumları gözlenir. Manyetik sıvıdaki çoğu manyeto-optik etkilerin oluşmasında ana sebep kümeleşme ve zincir oluşumudur (Abu-Safia H., 1990; Bacri J.C., 1987).

Manyetik sıvılarda Faraday dönmesi, Faraday eliptikliği ve ışığın geçirgenliği ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Swapna. S. Naira, 2006; Nihad A. Yusuf, 2002). Ancak literatürde çeşitli uygulamalardaki büyük potansiyeline rağmen garnet bazlı manyetik sıvı üretimine rastlanmamıştır. Bundan dolayı bu çalışmada YIG ve katkılandırılması halinde özellikle kızılötesi ve görünür ışık bölgesinde manyeto-optik özellikleri arttırmada gelecek vaad eden nadir toprak elementlerinden Ce,Bi katkılandırılmış demir garnet parçacıklarından oluşan manyetik sıvıların ilk defa üretilmesi ve manyeto-optik karakterizasyonlarının yapılması özgün değer olarak ortaya çıkmaktadır. (Öztürk, 2010; Huang M. and Zhang S.Y. , 2002).

Bu tez çalışmasında manyetik sıvı üretiminde kullanılacak olan nano parçacıkların üretimi farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve üretilen parçacıkların üretim esnasında ve sonrasında yapısal, mikroyapısal, manyetik özellikleri XRD (X Işınları Kırınımı), VSM (Titreşimli Örnek Manyetometresi), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazları ile, üretilen sıvıların manyeto-

optik özellikleri (ışığın polarizasyonu üzerine etkileri, Faraday dönmesine ve elipsliğine etkileri) kurulan deney düzeneği ile incelenmiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1 Manyetizma Temel Kavramlar

2.1.1 Manyetizmanın temelleri

1825'teki elektromıknatısın keşfine dek mıknatıslanmanın yalnızca sürtünme yolu ile yapılabildiği biliniyordu. 1820'de Hans Christian Oersted (1775-1851) muhteşem bir buluş yaparak elektrik akımının da aynı zamanda bir manyetik alan kaynağı olabileceğini göstermiştir. O zamandan günümüze kadar manyetizma ve manyetik malzemeler üzerine yapılan bilimsel çalışmalar dünyanın pek çok yerinde farklı laboratuvarlarda, farklı disiplinlerde büyük bir ivme ile sürdürülmektedir (Cullity, 2009) Manyetik malzemeler çekirdek tipi transformatörlerden bilgisayar belleklerine kadar oldukça geniş teknik uygulama alanlarına sahiptir (Omar, 1993)

Manyetizma kavramı genellikle malzeme içerisindeki elektrik yüklerinin hareketi ile ilgilidir. Bilindiği gibi maddenin yapıtaşı olan atomun çekirdeğinde proton ve nötronlar, çekirdeğin etrafında ise hareket halindeki elektronlar bulunur. Maddeye manyetik özellikleri kazandıran etkenler temel olarak atomun yapısındaki elektronların spin ve orbital hareketlerine dayanır. Elektronlar negatif elektrik yükü taşır ve hareketine devam ettikçe manyetik alan üretir.

Bir manyetik alan (H) malzemeye etki ettiğinde malzemenin gösterdiği tepki manyetik indüksiyon (B) olarak adlandırılır. Mıknatıslanma (M), manyetik indüksiyon ve manyetik alan arasındaki bağıntılar Denklem 2.1'de gösterilmiştir.

$$B = \mu_0(H + M) \quad 2.1$$

$$B = \mu H$$

Burada μ_0 boş uzayın, μ ise malzemenin geçirgenlik sabitidir. Geçirgenlik, malzemenin uygulanan manyetik alana karşı gösterdiği mıknatıslanmanın bir ölçüsüdür. Denklem 2.1'de $\mu_0 H$ yalnızca manyetik alan tarafından $\mu_0 M$ ise malzeme tarafından üretilen manyetik indüksiyon olduğu açıkça görülmektedir (Spaldin, 2011)

Malzemelerin manyetik özellikleri yalnızca mıknatıslanma veya manyetik indüksiyon ile değil aynı zamanda bu terimlerin uygulanan manyetik alanla nasıl değiştiğine de bağlıdır. Manyetik duygunluk bize bu değişim hakkında bilgi verir. Malzemelerin manyetik özelliklerinin ayırt edilebilmesinde önemli bir yere sahip olan manyetik duygunluk (χ) mıknatıslanmanın manyetik alana oranıdır ve Denklem 2.2 ile gösterilir.

$$\chi = M / H$$

2.1.2. Manyetizma, manyetik domainler ve histeresiz eğrisi

Çiftlenmemiş elektronlara sahip, atomik boyuttaki her atomun net bir manyetik momenti vardır. Manyetik moment, elektronların spin açısal ve yörüngesel açısal momentumlarından kaynaklanır. Malzemenin manyetik davranışı hem manyetik momentin komşu atomlarının manyetik moment etkileşimine hem de dış manyetik alan altındaki tepkilerine bağlıdır.

Paramanyetik ve diamanyetik malzemelere dışardan bir manyetik kuvvet uygulanmadığında net manyetik momentleri sıfır olur. Bunun temel nedeni, bu malzemeleri oluşturan atomlardan her birinin manyetik moment yöneliminin rastgele olmasıdır. Bir manyetik alan altında bu malzemeler birbirinden farklı davranışlar gösterirler. Diamanyetik malzemeler uygulanan manyetik alana ters yönde net bir manyetik moment oluştururken, paramanyetik malzemelerde bu durumun tersi görünür. Malzemedeki net manyetik momentin büyüklüğü uygulanan manyetik alan ile ilişkilidir.

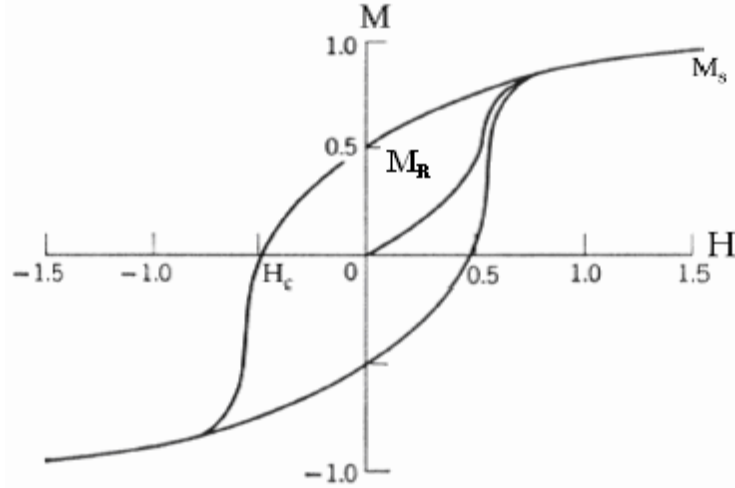
Ferromanyetik malzemelerde manyetik momentler arasında güçlü bir etkileşme vardır. Bunun sonucu olarak, küçük bir manyetik alana maruz kaldığında bile malzemedeki atomik dipol momentler birbirlerine paralel pozisyona gelirler ve bu durumu manyetik alan kaldırıldığında da korurlar. Bunun sonucunda hacimleri 10^{-12} - 10^{-8} m³ civarında olan ve her biri yaklaşık olarak 10^{17} - 10^{21} tane atom içeren aynı yöne yönelmiş atomlardan oluşan domain bölgeleri oluşur. Bu domain bölgeleri birbirinden domain duvarlarıyla ayrılmıştır (Serway, 1996; Akdoğan, 2004).

Manyetik alana maruz kalmamış ve mıknatıslanmamış bir malzemede atomların manyetik moment yönelimleri rastgele olduğundan net manyetik moment sıfırdır. Malzeme bir manyetik alana maruz bırakıldığında tüm manyetik momentler üzerine bir tork etki eder. Bu kuvvet tüm dipoller aynı yöne yönelene yani malzeme manyetik doyuma ulaşana dek manyetik alan büyüdükçe büyür. Doyum manyetisasyonuna ulaştıktan sonra manyetik alan sıfırlandığında bile, uygulanmış olan manyetik alan yönünde bir kalıcı mıknatıslanma oluşur.

Domainlerin yapıları ve davranışları, malzemelerin histeresiz eğrisi ya da diğer bir ismiyle mıknatıslanma eğrisini belirler. Histeresiz eğrisi malzemede meydana gelen mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alana bağlı değişimini gösterir. Eğer bir malzemede domain duvarlarıyla ayrılmış domain yapıları mevcut değilse, bu malzemenin manyetik yapısı dış manyetik malzemeyle orantılı olarak artar. Ancak domain yapılarına sahip ferromanyetik malzemeler için domain yapının ve duvarlarının manyetik alanla değiştirilmesi gerekir. Manyetik

alan malzemeyi iki yönde de doyuma ulaştıracak kadar arttırıp azaltıldığında histerseiz eğrisi elde edilmiş olur.

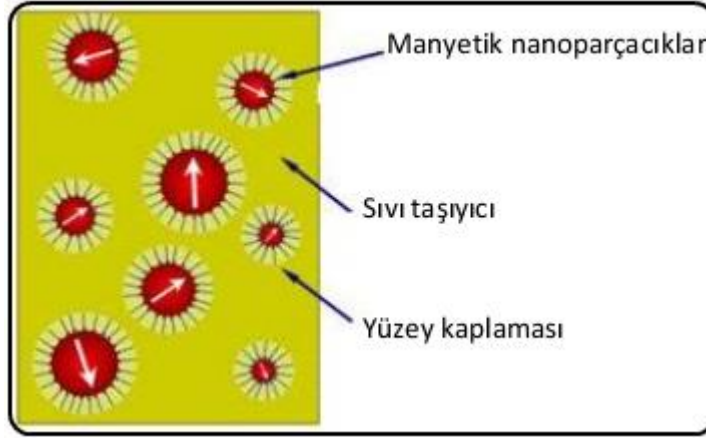
Şekil 2.1’de H manyetik alan uygulandığında, M_s doyum manyetizasyonuna, M_R kalıcı mıknatıslanmaya ve mıknatıslanmayı sıfır değerine kadar azaltmak için ters yönde uygulanması gereken H_c zorlayıcı alan değerine sahip bir malzemenin histerseiz eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.1. Ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi (histerseiz eğrisi) (Akdoğan, 2004).

2.2. Manyetik Sıvılar

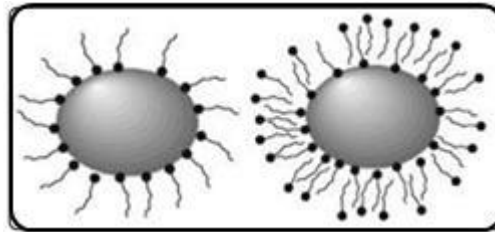
Manyetik sıvılar; taşıyıcı bir sıvı içerisinde boyutları 1–500 nm arasında değişen manyetik parçacıkların dağıldığı, hem katıların manyetik özelliklerine hem de sıvıların akışkanlık özelliklerine sahip olan kolloidal yapılardır. Temel olarak manyetik parçacıklar, taşıyıcı sıvı ve yüzey aktif maddeden oluşmaktadır. Manyetik sıvılar birçok teknolojik uygulamada kullanılmaktadır ve bu uygulama alanları sürekli artış göstermektedir (Ge J. H. Y., 2007a; Ge J. H. Y., 2007b). Manyetik sıvılar izotropik olmalarına rağmen; uygulanan harici manyetik alanla anizotropik özellik göstererek Faraday dönmesi, çift kırınım (birefringence) vb. manyeto-optik etkiler gösterirler. Manyetik parçacıklar kümeleşmeye sebep olabilmektedir. Bunları engellemek için manyetik parçacıklar uygun bir yüzey aktif malzeme ile kaplanmalıdır. Manyetik sıvılar bu kaplama işlemine göre iki gruba ayrılır. Bunlar; yüzeysel ve iyonik manyetik sıvılardır (KÜÇÜKDERMENCİ, 2012).



Şekil 2.2 Manyetik sıvıyı oluşturan bileşenler.

2.2.1. Yüzeysel (surfacted) manyetik sıvı

Kimyasal yüzey ajanı (surfactant) molekülleri kaplama için kullanılır. Yüzeysel manyetik sıvı, manyetik parçacıkların kimyasal yüzey ajanı ile kaplanmasıyla oluşturulur. Yüzey ajanı moleküllerinin bir enerji bariyeri oluşturması ile nötr atomlarda ve moleküllerde meydana gelen çekici kuvvetlerinin önüne geçilerek kararlılık sağlanır. Parçacıklar polar ya da polar olmayan bir sıvı içerisinde dağılabilir. Eğer parçacık polar olmayan bir sıvı (ör. yağ) içerisinde dağılmışsa harici “hidrofobik” bir katman oluşması için yüzey ajanının tek bir katmanına ihtiyaç vardır. Yüzey ajanının polar başı parçacığın yüzeyine bağlanır ve artık taşıyıcı sıvı ile aralarında karbonik bir zincir yapısı vardır. Diğer taraftan parçacık polar bir ortamda dağıldığında “hidrofilik” bir katman oluşması için kimyasal yüzey ajanının çift katmanına ihtiyaç vardır. Yüzey ajanının polar başı “katyonik”, “anyonik” olabilir ya da “iyonik” olmayabilir (Scherer C. a., 2005).



(a)

(b)

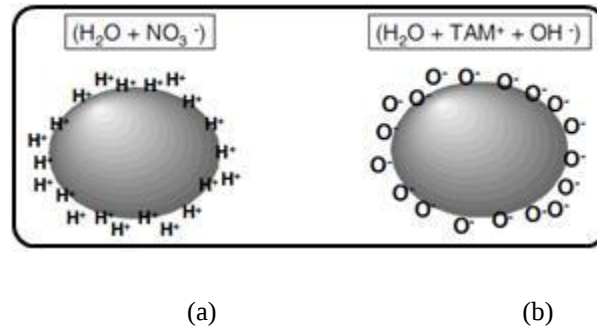
Şekil 2.3 Yüzeysel manyetik sıvı (Scherer C. a., 2005).

(a) Tek katmanlı tabaka ve (b) Çift katmanlı tabaka

2.2.2. İyonik manyetik sıvı

Kaplama elektriksel yüklü bir kabuktur. Kolloidal sistemin kararlılığının korunması için iyonik manyetik sıvıdaki nano parçacıklar elektriksel olarak

yüklüdürler. Manyetik parçacıklar çöktürme yönteminde asit ya da alkalın reaksiyonu kullanılarak yüzeyleri elektriksel yüklü olarak elde edilir. Taşıyıcı sıvı olarak genelde su kullanılır ve çözeltinin pH değeri parçacığın yüzey yük işaretine göre 2–12 arasında değişir. 7’den küçük pH değerine sahip asidik uyarılmış manyetik sıvı pozitif yüklü parçacıklara sahipken, pH değeri 7’den büyük bazik uyarılmış manyetik sıvı negatif yüklü parçacıklara sahiptirler. Yüzey yük yoğunluğu tipik olarak $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ civarındadır. Şekil 2.4’de iyonik manyetik sıvıya örnek olarak asidik (a) ve bazik (b) gösterimleri verilmiştir.



Şekil 2.4 İyonik manyetik sıvı: (a) Asidik yüzey tabaka ve (b) Bazik yüzey tabaka (Scherer C. a., 2005)

2.3. Polarizasyon

Girişim ve kırınım olayları hem enine hem de boyuna dalgalarda görüldüğü halde polarizasyon olayı sadece enine dalgalarda görülmektedir. Bilindiği gibi ışık bir elektromanyetik dalgadır. Bu yapısını ortaya koyan en önemli özelliği ise polarize olmasıdır. Işığın polarizasyonu, BARTOLINI (1670), HUYGENS (1690) ve MALU’S (1808) tarafından yapılan çalışmalarla birçok kez gözlenmiştir fakat önemi tam olarak anlaşılamamıştır. Işık dalgasının enine olduğu ise YOUNG (1817) tarafından FRESNEL ve ARAGO’nun yaptığı çalışmalar esas alınarak incelenmiştir. Son olarak MAXWEL’in elektromanyetik dalga teorisiyle kesinleşmiştir (Bursa, 1994)

Elektromanyetik dalgalarda elektrik ve manyetik alan vektörleri birbirlerine ve dalga yayılma doğrultusuna dik olarak titreşirler. Manyetik alan bileşeninin etkisi elektrik alan bileşeninin etkisine göre $1/c$ defa zayıf olduğundan polarizasyonu incelerken yalnız elektrik alan elektrik alan etkisiyle ilgileneceğiz. (c: ışık hızı) doğrusal olarak polarize olmuş ışığın elektrik alan vektörünün yönelimi sabit olmasına rağmen büyüklüğü ve işareti zamanla değişmektedir. Bu yüzden elektrik alan vektörü titreşim düzlemi olarak bilinen bir düzlem içinde kalır. Bu düzlem elektrik alan vektörü E ile birlikte hareket doğrultusundaki k yayılma vektörünü de kapsar.

Işık dalgaları elektriksel olarak, elektronların titreşimiyle oluşur. Işık kaynağından gelişigüzel yönelmiş olan birçok elektron olduğu için ışık kaynaktan gelişigüzel doğrultuda çıkar. Bu ışığı beklentilere uygun olarak istenilen doğrultuda elde etmek yani polarize etmek için çeşitli metotlar kullanılır. Mesela uygun bir düzenek ile ışık düzlemsel, dairesel ya da eliptik olarak kullanılabilir.

2.3.1. Lineer polarizasyon

Işığın elektrik alan vektörü uzayda bir düzlemin her noktasında belli bir doğrultu boyunca titreşirse, böyle bir dalgaya lineer polarize olmuş dalga denir. Lineer polarizasyonu anlamak için, birbirine dik ve z doğrultusunda ilerleyen, iki ışık dalgasının elektrik alan bileşenlerini ele alalım.

$$\begin{aligned} E_x &= E_{0x} \cos(kz - \omega t) \\ E_y &= E_{0y} \cos(kz - \omega t + \phi) \end{aligned} \quad 2.3$$

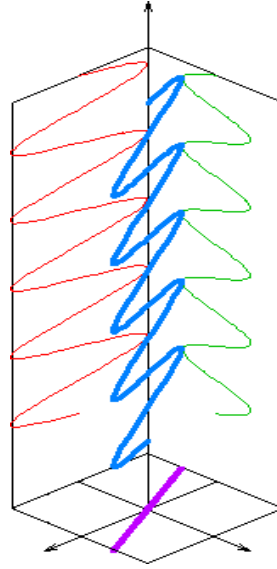
Burada E_{0x} ve E_{0y} elektrik alanların maksimum genlikleri ve Φ de dalgalar arasındaki faz farkıdır. Bu iki ayrı doğrusal dalganın bir E dalgasını oluşturduğunu düşünürsek, sonuç dalga ifadesi şu şekilde yazılır.

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t) \quad 2.4$$

$\Phi=0$ ya da $\pm 2\pi$ 'nin katları ise dalgaların aynı fazda olduğu söylenir. Bu özel durumda yukarıdaki eşitlik şöyle olur.

$$\vec{E}(z, t) = (\vec{i}E_{0x} + \vec{j}E_{0y}) \cos(kz - \omega t) \quad 2.5$$

Böylece elde edilen elektrik alan vektörü, $(\vec{i}E_{0x} + \vec{j}E_{0y})$ ifadesi ile verilen ve şiddeti sabit olan bir genliğe sahip olur. Bu şekil xx de gösterildiği gibi lineer polarize olmuş bir dalgayı temsil eder. O halde iki lineer polarize olmuş dalganın süperpozisyonu yine lineer polarize olmuş bir dalgadır. Bunun tersi olarak herhangi bir düzlem polarize olmuş dalga da, iki ortogonal lineer polarize dalgaya ayrılabilir.



Şekil 0.5 :Lineer Işık (Wikipedia, 2014)

$\Phi = \pm\pi$ 'nin tek katları ise, iki dalga arasında 180° faz farkı vardır. Bu durumda

$$\vec{E}(z,t) = (\vec{i}E_{0x} + \vec{j}E_{0y}) \cos(kz - \omega t) \quad 2.6$$

ifadesi şu şekilde yazılır,

$$\vec{E}(z,t) = (\vec{i}E_{0x} - \vec{j}E_{0y}) \cos(kz - \omega t) \quad 2.7$$

Bu dalga da yine lineer polarizedir. Fakat titreşim düzlemi önceki duruma göre döndürülmüştür.

2.3.2. Dairesel polarizasyon

Dairesel polarizasyonda yukarıdaki dalga bileşenlerinin her biri eşit genliktedir.

$$E_{0x} = E_{0y} = E_0 \quad 2.8$$

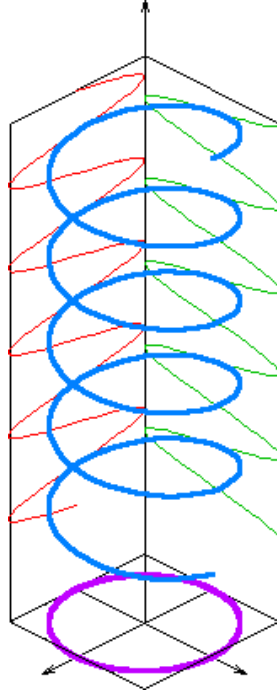
Bu iki bileşen arasında aşağıdaki gibi ifade edilen bir faz farkı var ise,

$$\Phi = -\pi/2 + 2m\pi, m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3...$$

yani $E_y(z,t)$, $E_x(z,t)$ 'den bu faz farkı kadar geride ise, bu durumda dalgalar şu şekli alır.

$$\vec{E}_x(z,t) = \hat{i}E_0 \cos(kz - \omega t) \quad 2.9$$

$$\vec{E}_y(z,t) = \vec{j}E_0 \sin(kz - \omega t) \quad 2.10$$



Şekil 2.6 Sağ dairesel ışık (Wikipedia, 2014)

Sonuç dalga ise aşağıdaki gibi yazılır.

$$\vec{E} = E_0[\vec{i} \cos(kz - \omega t) + \vec{j} \sin(kz - \omega t)] \quad 2.11$$

Burada E_0 , E 'nin skaler genliğidir ve sabittir. E 'nin yönü zamanla değişir ve önceki gibi tek bir doğrultu ile sınırlı değildir.

Şayet $E_y(z,t)$, $E_x(z,t)$ 'den $\Phi = -\pi/2 + 2m\pi$, $m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ faz farkı kadar önde ise, $\vec{E}$ vektörü aşağıdaki gibi yazılır.

$$\vec{E} = E_0[\vec{i} \cos(kz - \omega t) - \vec{j} \sin(kz - \omega t)] \quad 2.12$$

Burada E_0 genliği değişmemiştir fakat $\vec{E}$ vektörü saat yönünün tersine döner. Böyle bir dalga ise sol dairesel polarize olmuş dalga olarak adlandırılır.

Eşit genlikli, zıt polarize olmuş iki dalgadan, lineer polarize olmuş bir dalga elde edilebilir. Buradan hareketle, Denklem 2.11'de ifade edilen sağ dairesel polarize olmuş dalga ile Denklem 2.12'de ifade edilen sol dairesel polarize olmuş dalga toplanırsa,

$$\vec{E} = \vec{i} 2E_0 \cos(kz - \omega t) \quad 2.13$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade bize $2E_0$ sabit genliğe sahip lineer polarize olmuş bir dalgayı anlatır.

2.3.3. Eliptik polarizasyon

Lineer ve dairesel polarizasyonun her biri ile ilgili olan matematiksel tanımlamalar, eliptik polarize ışığın özel durumları olarak düşünülebilir. Bu yüzden sonuç elektrik alan vektörü, hem dönecek hem de büyüklüğü değişecektir. Böyle durumlarda E vektörünün ucu, k'ya dik olarak yerleştirilmiş bir düzlem içinde elips çizecektir.

$$E_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad 2.14$$

$$E_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \phi) \quad 2.15$$

E_y ifadesi açılırsa,

$$\frac{E_y}{E_{0y}} = \cos(kz - \omega t) \cos \phi - \sin(kz - \omega t) \sin \phi$$

elde edilir. bu E_x / E_{0x} ile birleştirilirse,

$$\frac{E_y}{E_{0y}} - \frac{E_x}{E_{0x}} \cos \phi = -\sin(kz - \omega t) \sin \phi \quad 2.16$$

ifadesine ulaşılır.

Denklem 2.16 'dan

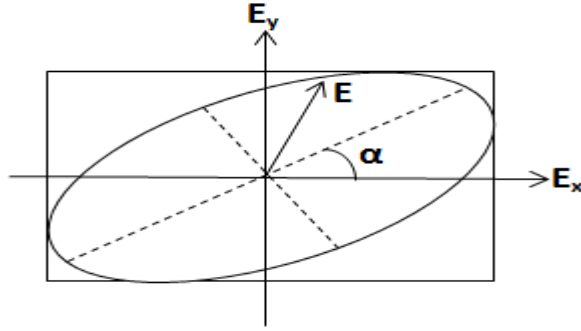
$$\sin(kz - \omega t) = [1 - (E_x / E_{0x})^2]^{1/2}$$

Elde edilir. Bunu da kullanarak

$$\begin{aligned} \left[\frac{E_y}{E_{0y}} - \frac{E_x}{E_{0x}} \cos \phi \right]^2 &= [1 - (E_x / E_{0x})^2] \sin^2 \phi \\ \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right) \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right) \cos \phi &= \sin^2 \phi \end{aligned} \quad 2.17$$

ifadesine ulaşılır. Bu x-y koordinat sistemi ile α açısı yapan bir elips denklemdir. Şöyle ki;

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \phi}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad 2.18$$



Şekil 2.7 Eliptik ışık

Şayet elipsin temel eksenleri, koordinat eksenleri boyunca uzanmışsa, Denklem 2.17 daha iyi tanınabilir. Yani $\alpha=0$ ya da $\Phi=\pm\pi/2, \pm3\pi/2, \pm5\pi/2 \dots$ ise aşağıdaki bilinen forma sahip oluruz.

$$\frac{E_y^2}{E_{0y}^2} + \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} = 1 \quad 2.19$$

Bundan başka $E_{0y} = E_{0x} = E_0$ ise Denklem 2.19 aşağıdaki şekli alır ki bu da bir daire denklemdir.

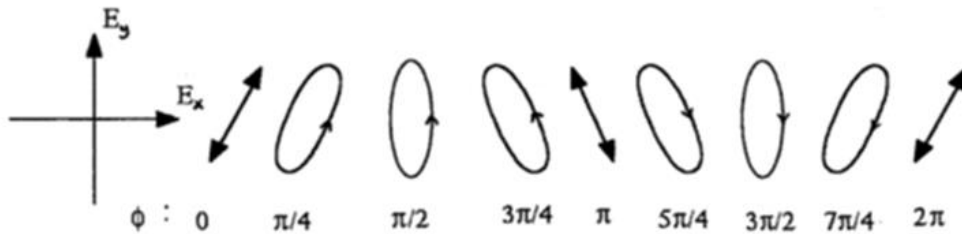
$$E_y^2 + E_x^2 = E_0^2$$

Şayet Φ, π 'nin çift katları ise Denklem 2.17' den aşağıdaki ifade bulunur.

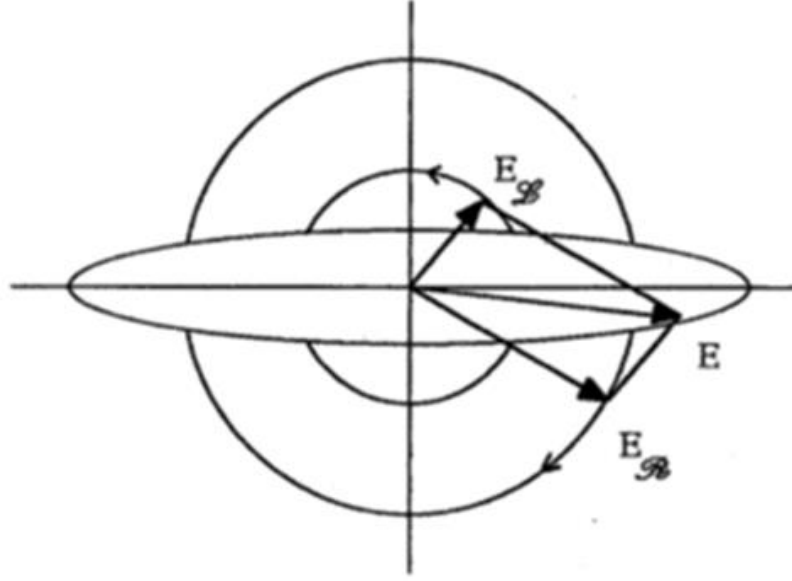
$$E_y = \frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x$$

Benzer olarak π 'nin tek katları için de şu elde edilir.

$$E_y = -\frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x$$

Şekil 2.8: Belirli Φ değerlerine karşılık gelen polarizasyon şekilleri (Bursa, 1994).

Şekil 2.8 Belirli Φ değerlerine karşılık gelen polarizasyon şekillerinin hepsini diyagram halinde özetlemektedir. Anlattığımız özel polarizasyon durumlarına dayanarak, ışık dalgasına belirli isimler vereceğiz. Buradan hareketle, lineer ya da düzlem polarize olmuş ışığı P durumunda, sağ ya da sol dairesel polarize olmuş ışığı sırasıyla ER ve EL durumunda olarak ifade edeceğiz. Benzer olarak eliptik polarizasyonu da E durumu olarak ifade edeceğiz. Biz her zaman P durumunun ER ve EL durumlarının bir süperpozisyonunu temsil edebileceğini kabul ederiz. İfade E durumu için de geçerlidir. Şekil 2.9’da gösterilen bu olayda, iki dairesel dalganın genlikleri farklıdır. (Bursa, 1994)



Şekil 2.9 E_R ve E_L durumlarının süperpozisyonu olarak eliptik ışık (Bursa, 1994).

2.4.Manyeto-Optik Faraday Etkisi

Michael Faraday 1845’de optiksel olarak aktif olmayan metallerde, polarize ışığın yayılma doğrultusunda uygulanmış güçlü bir manyetik alanın varlığında polarizasyon düzleminin döndüğünü keşfetmiştir. Polarizasyon düzleminin dönüş açısı, yayılma doğrultusundaki manyetik alan şiddeti, materyalin boyu ve Verdet sabiti olarak adlandırılan sabit bir çarpan ile orantılıdır. Bu olay ilk defa Faraday tarafından incelendiği için Faraday etkisi ya da Faraday rotasyonu olarak bilinir. Böylece, incelenen Faraday rotasyonunun büyüklüğü,

$$\theta = v \int_0^l B dl \quad 2.20$$

şeklinde yazılır. B, genellikle gauss olarak manyetik akı yoğunluğu, I ise ışığın içinden geçtiği materyelin uzunluğudur. İntegral I boyu üzerinden alınır. Verdet sabiti ile kırılma indisleri arasında aşağıdaki gibi bir ilişki yazılabilir.

$$n_r - n_l = \frac{\lambda_0}{\pi} \nabla \vec{B} n \quad 2.21$$

Burada n , ışık dalgalarının yayılma doğrultusundaki birim vektörüdür. Manyetik alan ışığın gelme doğrultusuna dik olduğu zaman kırılma indisi farkları Cotton-Motton etkisi olarak adlandırılır. Bu manyetik alanın ikinci mertebeden etkisidir ve bu yüzden faraday etkisinden daha küçüktür (Pascher, 2005).

Manyeto-optik faraday etkisi Maxwell denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Dielektrik kayıplı ortam için Maxwell denklemleri Denklem 2.22’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \nabla D &= \rho, \nabla \times E = -\dot{B} \\ \nabla B &= 0, \nabla \times H = j + \dot{D} \end{aligned} \quad 2.22$$

Denklemlerde D yerdeğiştirme, E elektrik alan, H manyetik alan ve B manyetik indüksiyon ρ yük yoğunluğu ve j akım yoğunluğudur. Denklemlerde malzeme ile olan etkileşimler Denklem 2.23, 2.24 ve 2.25 ile ifade edilebilir. Bu denklemde ε_r bağıl permittivity, μ_r bağıl permabilite (duygunluk), ε_0 vakum permittivity, μ_0 vakum permabilitedir.

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad 2.23$$

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad 2.24$$

$$j = \sigma E \quad 2.25$$

Denklem 2.22’nin tekrar rotasyoneli alınarak, Denklem 2.23 ve 2.24 kullanılarak Denklem 2.26 dalga denklemi elde edilebilir.

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\nabla \times \dot{B} = -\mu \left(\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) \quad 2.26$$

Optik frekanslarda, μ_r yaklaşık olarak 1 alınabilir. Çünkü manyetizasyon terahertz mertebesindeki ışığın manyetik alanını takip edemez. Düzlemsel dalga denklemi $E = E_0 \exp[i(kr - \omega t + \delta)]$ Denklem 2.16’da yerine konularak takip eden eşitlik elde edilebilir. Bu eşitlikten malzemeye bağlı elektromanyetik dalga çözümleri elde edilebilir.

$$(\omega^2 \mu_0 \varepsilon_c + (kk) - k^2 I) E = 0, \quad \varepsilon_c = \varepsilon + \frac{i\sigma}{\omega} \quad 2.27$$

Denklem 2.27’de (kk) diyadik (dyadic: $(kk)_{ij} = k_i k_j$), I birim matris, ε_c karmaşık sayı içeren tensördür. Burada anahtar eleman malzemenin manyetik

alana bağılı ifadesini de içeren ε_c tensörüdür. Bu tensörün manyetik alana bağımlılığı Denklem 2.28 ile ifade edilebilir. Bu denklemde K ve G doğrusal ve karesel manyeto-optik tensörlerdir. G değeri demir garnetlerde küçük olduğu için ihmal edilebilir.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon(M), \quad \Delta\varepsilon(M)_{ij} = \sum_{k=1}^3 K_{ijk} M_k + \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 G_{ijkl} M_k M_l + \dots \quad 2.28$$

Manyetizasyonu z yönünde alırsak manyetik alan ile dielektik tensörü arasındaki ilişkisi sadeleştirilebilir (Denklem 2.29). Bu denklemde dik bileşenler ε_{xx} ile karmaşık sayı kırılma indisi $\tilde{n}$ arasındaki ilişki $\tilde{n} = n - ik = \sqrt{\varepsilon_{xx}/\varepsilon_0}$ olarak kullanılmıştır. Burada n kırılma indisi k ise yok olma (extinction) katsayısıdır. Optik soğurma katsayısı ise $\alpha = 4\pi k/\lambda$ olarak ifade edilir. z yönünde yayılan elektromanyetik alanın ifadesi artık Denklem 2.30'a dönüşmektedir.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & KM & 0 \\ -KM & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad 2.29$$

$$\left(w^2 \mu_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_z k_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_z^2 & 0 & 0 \\ 0 & k_z^2 & 0 \\ 0 & 0 & k_z^2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0 \quad 2.30$$

Normal bir düzlemsel dalga için E_z değeri 0'dır. Bu durumda $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 \varepsilon'_{ij}$ (i ve j, x ve y eksenleridir) kullanılarak ve Denklem 2.30 sadeleşerek Denklem 2.31 halini alır. Bu denklemde $v^2 = k_z^2 / (w^2 \mu_0 \varepsilon_0)$ kullanılarak ve dairesel koordinat eksenini dönüşümü kullanılarak sol dairesel polarize (LCP: E_L) ve sağ polarize dalgalara (RCP: E_R) bağılı Denklem 2.32 elde edilir.

$$\left(w^2 \mu_0 \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon'_{xx} & \varepsilon'_{xy} \\ -\varepsilon'_{xy} & \varepsilon'_{xx} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_z^2 & 0 \\ 0 & k_z^2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = 0 \quad 2.31$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon'_{xx} + i\varepsilon'_{xy} - v^2 & 0 \\ 0 & \varepsilon'_{xx} - i\varepsilon'_{xy} - v^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_L \\ E_R \end{bmatrix} = 0 \quad 2.32$$

Denklem 2.32 kullanılarak dairesel polarize dalgalara bağılı öz modları kolayca çözülebilir. Bu durumda iki farklı kırılma indisi elde edilebilir. Artı işareti LCP eksi işareti ise RCP dalganın karmaşık sayı kırılma indisi. Kırılma

indisinin RCP ve LCP dalgalar için farklı olması manyeto-optik etkilerin temelini oluşturmaktadır.

$$\tilde{n}_{\pm} = \sqrt{\varepsilon'_{xx} \pm i\varepsilon'_{xy}} \quad 2.33$$

Bu sonuçlardan faydalanarak doğrusal polarize dalganın malzeme etkileşimi ile polarizasyon değişimi elde edilebilir. Lineer polarize dalga iki dairesel dalganın toplamı ile elde edilebilir. Bu durumda iki dairesel polarize dalganın farklı kırılma indislerinden etkilenmesi faz ve genlik değişimlerinin farklı olacağı anlamına gelmektedir. Bu durumda ortaya çıkan dalga eliptik olacaktır. Ancak soğrulma olmayan durumda (gerçel $\tilde{n}$) yani gerçel ε'_{xx} ve tamamen sanal ε'_{xy} olması durumunda sadece iki dairesel polarize dalga arasında faz farkı oluşacaktır. Bu faz farkı da polarizasyon açısının farklı olmasına sebep olacaktır. İki ışık farklı optik yollar izleyecektir. Bu sebeple aralarında oluşacak faz farkı $\delta = (2\pi / \lambda)d(n_+ - n_-)$ ve polarizasyon açısı farkı $\Delta\theta = \Delta\delta / 2$ olacaktır.



Şekil 2.10 RCP ve LCP dalgalar ile polarizasyon açısı değişimi (Kahl, 2004).



Şekil 2.11 RCP ve LCP dalgalar ile eliptik polarizasyon elde edilmesi (Kahl, 2004).

Genel olarak malzemelerde ε'_{xx} , ε'_{xy} ve dolayısıyla $\tilde{n}_{\pm}$ karmaşık sayılardır. $\tilde{n}_{\pm}$ için sanal kısım farklı soğrulmalara (magnetic circular dichroism: manyetik dairesel çiftkırınım) dolayısıyla eliptik polarizasyona sebep olacaktır. Bu durumda oluşacak faraday açısı θ_F ve faraday elipsliği ψ_F Denklem 2.34'de gösterilmiştir.

$$\theta_F + i\psi_F = \frac{\pi}{\lambda} (n_+ - n_-) \quad 2.34$$

Karmaşık sayı olan dielektrik tensörün elemanları $\varepsilon'_{ij} = \varepsilon_{ij}^g + i\varepsilon_{ij}^s$ sanal ve gerçel bileşenleri ile yazılabilir. Denklem 2.35'de dielektrik tensörde dik olmayan elemanların küçük olması durumunda ($|\varepsilon_{xy}^g| \ll |\varepsilon_{xx}^g|$, $|\varepsilon_{xy}^s| \ll |\varepsilon_{xx}^s|$) hesaplanan θ_F faraday açısı:

$$\theta_F \approx -\frac{\pi\varepsilon_{xy}^s}{\lambda\sqrt{\varepsilon_{xx}^g}} \quad 2.35$$

ε_r gelen ışığın dalga boyuna oldukça bağımlı olabilmektedir. Böylece faraday açısı değişimi ve faraday elipsliği de aynı dalga boyuna bağımlılığı gösterecektir. Dielektrik tensörün dik elemanı ε_{xy} manyetik alana bağlı olduğu için faraday açısı da manyetizasyonla orantılı olacaktır. Böylece polarizasyon değişimleri ile manyetik alan arasındaki ilişki gösterilmiş olmaktadır (Scott, 1975).

2.5. Manyeto-Optik Malzemeler

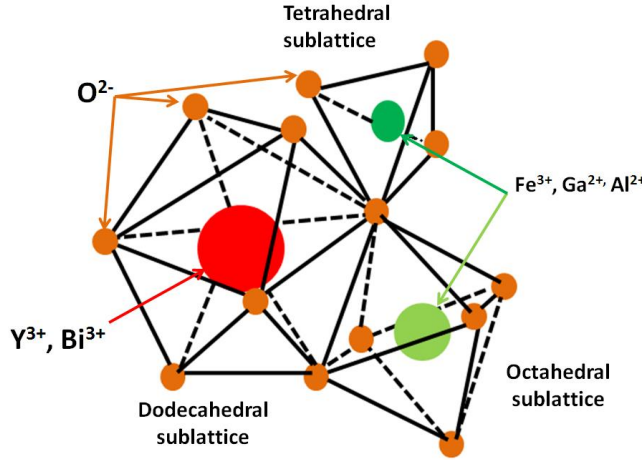
Teknolojik manyetik sensörler, optic dalga kılavuzları, manyeto-optik modülatörler ve integrated manyeto-optik cihazlar daha hassas, ufak boyutlu ve elektronik sistemlerle uyumlu olmayı gerektirmektedir. Bu tür uygulamalar için, kullanılacak malzemenin manyeto-optik özelliği dikkat edilmesi gereken temel konudur. Birçok manyeto-optik malzeme mevcuttur, bunların bazıları; sert cam (SF_6), BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_2$), BGO ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) ve garnetlerdir. Manyetik alana verdiği cevabın oldukça büyük olması sebebiyle, bunlar arasından garnetler daha çok ilgi görmektedirler. İttriyum demir garnet ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$: YIG) gösterdiği manyetik ve manyeto-optik özellikleriyle bu tür uygulamalara en uygun malzemedir (DiBiccari, 2002).

2.5.1. Garnetler

Manyetik seramikler dikkate değer manyetik özelliklerinden ve kullanıldıkları birçok endüstriyel uygulamalarından dolayı hem teorik hem de deneysel olarak yoğun bir çalışma alanına sahiptirler. Hızla gelişmekte olan teknoloji, haberleşme ve optik sistemlerindeki geniş kullanım alanlarından dolayı garnet yapıları manyetik seramikler arasından en çok dikkat çekenlerdendir. (E.J.J. Mallman, 2013; B. Huang R. R., 2013).

İttriyum demir garnet(YIG), demir garnetler arasında en çok bilinen ve çalışılan garnetlerdendir. YIG yapısında özel manyetik ve manyeto-optik özelliklere sahip olan bir manyetik oksit grubu barındırır. Kimyasal bileşimi $\text{Y}_3\text{Fe}_2(\text{FeO}_4)_3$ veya $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ şeklindedir ve yapay bir garnettir. Ferrimanyetik

özellik gösteren YIG, sekiz $\text{Fe}_2\text{Fe}_3\text{Y}_3\text{O}_{12}$ molekülünden oluşmakta ve 12,376 Å uzunluktaki bir kenara sahip kübik hücresinde 160 atom yer almaktadır.



Şekil 2.12 :YIG Kristal Yapısı

YIG 3 tane alt kafese (sublattice) sahip karmaşık kübik bir yapıdır. Bu alt kafeslerin 2 tanesi demir iyonları 1 tanesi ise itriyum iyonları tarafından işgal edilmiştir. Nanmanyetik Y³⁺ iyonları 8 oksijen iyonuyla çevrelenmiş dodekahedral pozisyonuna yerleşirken, Fe³⁺ iyonları 6 oksijen iyonuyla çevrelenmiş oktahedral ve 4 oksijen iyonuyla çevrelenmiş tetrahedral pozisyonda yer alırlar. Oktahedral pozisyonunda 16 tane demir iyonu bulunurken tetrahedral pozisyonunda 24 demir iyonu bulunmaktadır. Yapısının bu derece karmaşık olması sebebi ile YIG elektronik yapısı konusunda günümüze kadar tam bir model oluşturulamamıştır (Visnovsky, 2001).

Manyetik özellikleri yapısındaki demir iyonlarının anti-paralel eşleşmesi ile dodekahedral pozisyonundaki iyonların tetrahedral pozisyonundaki Fe³⁺ iyonlarına antiparalel yerleşiminden kaynaklanmaktadır. Birim kafes başına YIG'in net manyetik momenti 40 Bohr magnetronudur. (L.L. Hench, 1990)

Garnetlerin en önemli özelliklerinden biri de farklı yönlerine birçok katyon yerleştirebilmeleri ve farklı manyetik özellik gösterebilmeleridir (E.J.J. Mallman, 2013). Farklı çaplardaki kristalografik pozisyonların varlığı YIG içinde, farklı iyonik yarıçaplara ve değerlik seviyelerine sahip çok çeşitli iyonların yer almasını olanaklı kılar. Genel olarak, Ca, Bi, Pb, Y, Ho, Dy, Gd, Eu, Sm, Na, Pr ve La gibi daha büyük iyon çaplarına sahip metal iyonları dodekahedral pozisyonlarını, Al, Ga gibi daha küçük olanlar ise tetrahedral ve oktahedral pozisyonlarına yerleşmeyi tercih eder (Mou D., 1998). Manyetik özelliklerinin daha çok geliştirilebilmesi adına YIG'in farklı katyonlarla katkılandırılabilir olması çok büyük bir avantajdır (Sugano, 1999; Rastogi, 2002).

Dodekahedral pozisyonuna yerleşen bizmut ve seryum gibi nadir toprak elementleri garnetdeki manyetik ve manyeto-optik etkiyi, diamanyetik özellikleri

sayesinde güçlendirmektedirler (K.A. Wickersheim, 1967). YIG yapısındaki itriyum iyonları diyamanyetik özellik gösterir ve manyetik veya optik özelliklere etkileri azdır (Ma, 2000).

25° C Sıcaklıktaki Özellikler	Saf YIG
Deneysel Formül	$Y_3Fe_5O_{12}$
Moleküler Ağırlık (gram)	737.95
Kristal Yapısı	Kübik
Yoğunluk ($g\text{-cm}^3$)	5.17
Erime Noktası ($^{\circ}C$)	1555
Sertlik (moh)	6.5-7
Lattis Sabiti ($\text{\AA}$)	12.376
Doyma Manyetizasyonu (Gauss)	1780
Manyetik Anizotropisi (erg/cm^3)	-6.20×10^{-3}
Elektriksel Direnci (Ω/cm)	1×10^{14}
Young's Modülü	2×10^{12}
Poisson's Oranı	0.29
Dielektrik Sabiti	15.0
Curie Sıcaklığı (K)	553
Termal İletkenlik ($W/cm^{\circ}C^{-1}$)	0.074
Termal Genişleme Sabiti ($^{\circ}C^{-1}$)	1.04×10^{-5}
Kırılma İndisi, 1310 nm	2.20
Faraday Dönmesi, 1310 nm ($^{\circ}mm^{-1}$)	21.4
Geçirgenlik1 (%)	≥ 95
Manyeto-optik Hassasiyeti ($^{\circ}A^{-1}$)	0.14

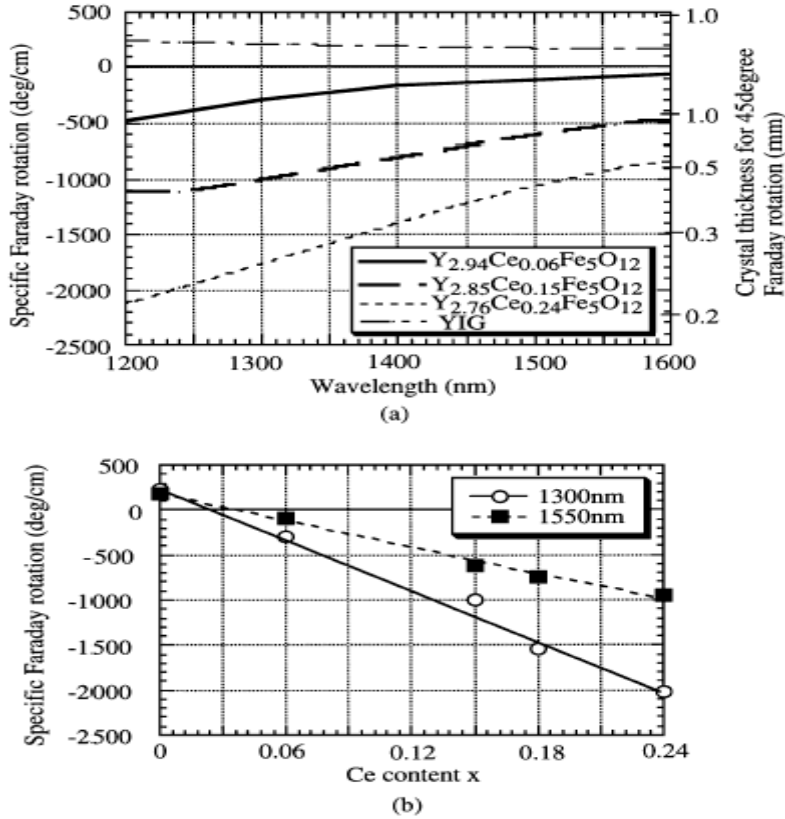
Tablo 2.1 YIG'in Fiziksel Özellikleri (EROL, 2009)

2.5.2. Garnetlerin katkılandırılması ve etkileri

YIG sahip olduğu eşsiz manyetik ve manyeto-optik özelliklerinden, özellikle gösterdiği çok yüksek Faraday dönmesinden dolayı araştırmacıların dikkatini çekmiştir. (B. Huang R. R., 2013). Ancak bu güçlü etkiyi sadece yakın infrared bölgelerde gözlemleyebilmekteyiz. (Dzibrou, 2006)

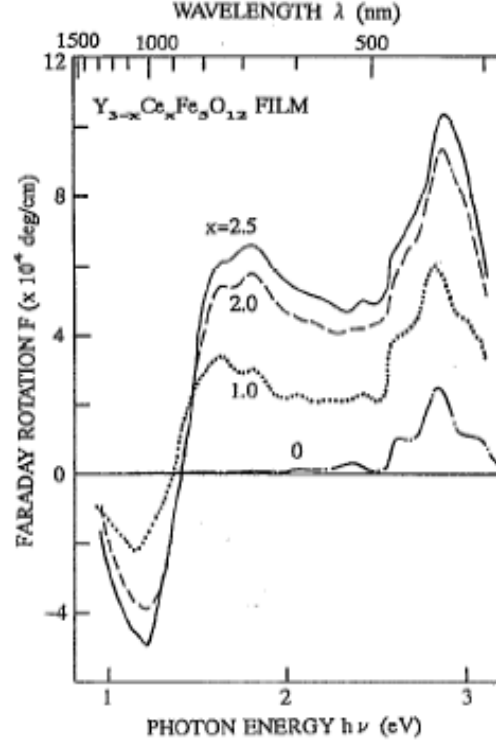
YIG'in özel yapısı yapıya bazı iyonlar katabilmemize ve yapıyı zenginleştirebilmemize imkân tanır. Dodekahedral pozisyonuna yerleştirdiğimiz nadir dünya elementleri ile Faraday dönmesini, optiksel soğrulmayı, manyetik özellikleri ve kırılma indisleri gibi bazı özellikleri değiştirebilmekteyiz. (Dzibrou, 2006)

Şekil 2.13 YIG'e farklı miktarlarda Ce ilave edilmesi durumunda Faraday tayfindaki değişimi göstermektedir. $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ ($x = 0, 0.06, 0.15, 0.24$). Grafikte katılan Ce miktarının lineer bir FR değişimine sebep olduğu görülmektedir. Faraday değişimi artan Ce miktarıyla birlikte pozitif değerlerden negatif değerlere geçiş yapmış ve $Y_{2.76}Ce_{0.24}Fe_5O_{12}$ için 1600 Oe manyetik alan altında Faraday açısı 1300 ve 1550 nm dalga boylarında sırasıyla -2030 deg/cm , -950 deg/cm olarak ölçülmüştür. (S. Higuchi, (1999))



Şekil 2.13: $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ için Faraday dönmesi (a) $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ ($x = 0, 0.06, 0.15, 0.24$) için Faraday dönmesi. (b) $\lambda = 1300$ nm ve 1550 nm için Faraday dönmesi. (S. Higuchi, (1999))

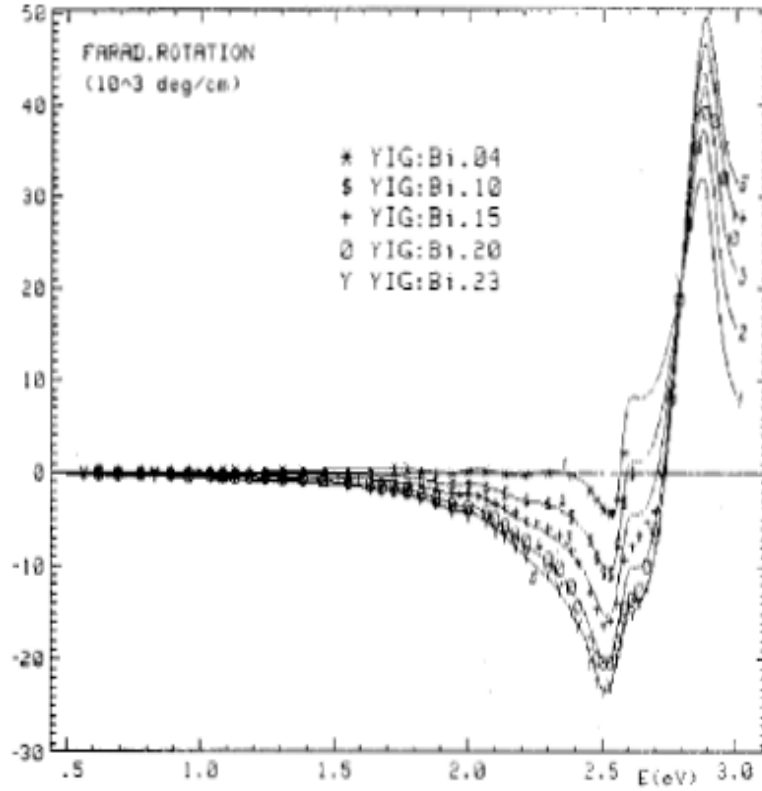
Şekil 2.14 ince filmlerle yapılan bir çalışmada YIG'e farklı miktarlarda Ce ilave edilmesi durumunda Faraday tayfındaki değişimi göstermektedir $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ ($x = 0, 1.0, 2.0, 2.5$). Şekilde açıkça görüldüğü gibi tüm tayf artan Ce miktarı ile orantılı olarak hafifçe yükselmiştir. 633 nm dalga boyunda yapılan ölçümde $x = 2.5$ değeri için Faraday açısının değeri $5.6 \cdot 10^4$ deg/cm'ye yükselmiştir. (M. Gomi, 1991)



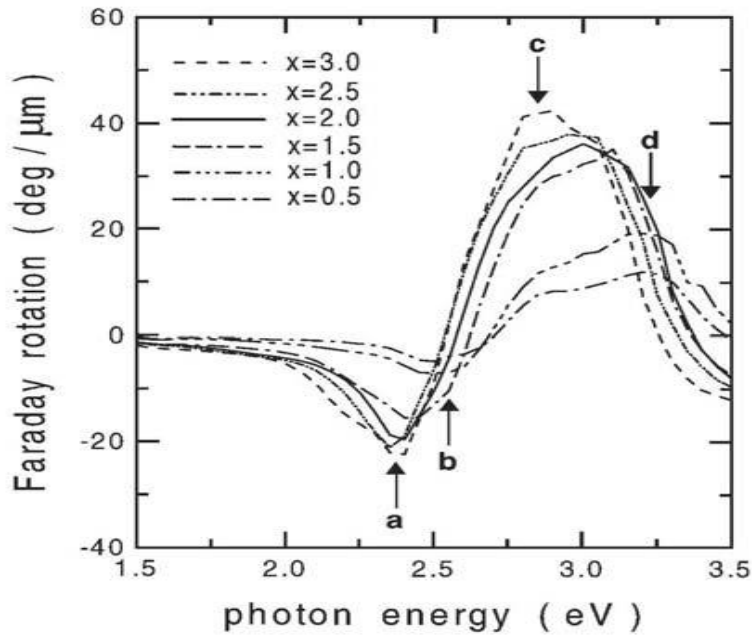
Şekil 2.14: Oda sıcaklığında $Y_{3-x}Ce_xFe_5O_{12}$ filmleri için FR tayfı. (M. Gomi, 1991)

Ce ilavesi ile paramanyetik Ce^{+3} iyonu manyetik olmayan Y^{+3} iyonları ile yer değiştirir (Mou D., 1998). Seryum ile katkılanmış YIG'in (Ce:YIG), kesinlikle, geniş manyeto-optik etkiler ve düşük propagasyon kayıplar gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca genel olarak yapıdaki Ce miktarıyla FR miktarının arttığı da bilinmektedir. Bu özellikler garnetin yüksek kalitede cihaz üretimi için çok iyi bir aday malzeme olduğunu gösterir (M. Huang and S.-Y. Zhang, 2002).

Dodekahedral pozisyonlarındaki Y iyonları ile yer değiştiren Bi, Curie sıcaklığını, Faraday sapmasını, vb. özelliklerini artırır. Yıllar önce yapılan çalışmalarda Bi ilavesinin FR miktarına ciddi bir etkisi olduğu buna karşın büyük miktarda soğurulmaya sebep olduğu görülmüştür. FR değişiminin sebebi halen tam olarak açıklanamamaktadır. Bizmut katkısının FR üzerindeki etkisi aşağıdaki şekillerden görülebilmektedir.



Şekil 2.15: $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x = 0.04, 0.1, 0.15, 0.2$, and 0.23) için Faraday değişimi tayfı (Simsa Z., 1984)



Şekil 2.16: $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x = 0.5, 1, 1.5, 2.2.3$ ve 3) için Faraday değişim tayfı (M.-Y. Chern, 1999)

2.6.Üretim Yöntemleri

2.6.1. Sol-gel yöntemi

Sol-jel yöntemi bir sol ya da jelin ara basamak olarak kullanılmasının ardından ürün elde edilmesidir. Bu yöntem diğer sıradan yöntemlere kıyasla daha düşük sıcaklıkta katı ürün eldesi sağlar.

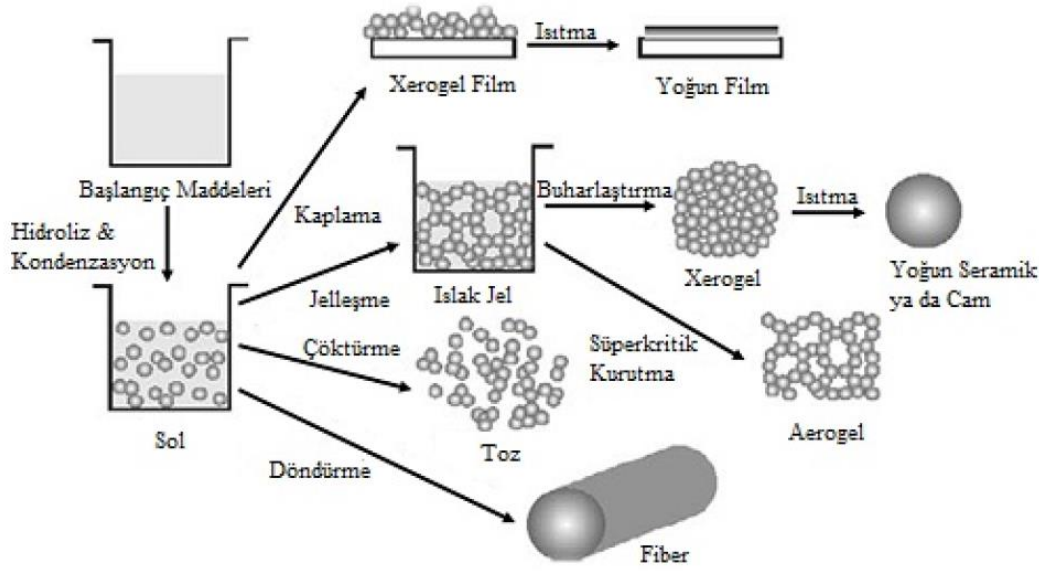
Sol-jel yöntemi birçok bilimsel alanda ve mühendislik uygulamasında kendine yer bulmuştur. Bunda sol-jel yönteminin oda sıcaklığında gerçekleşebiliyor olması ve proses sonrası ürünün farklı boyut, şekil ve formatlarda elde edilebilmesi etkili olmuştur. Sol-jel inorganik matrislerin koloidal süspansiyonun oluşumu yoluyla üretilmesi, jel üretimi için solün jelleşmesi, organik malzemelerin yapıdan uzaklaştırılması yani kutuma ve kuru jel haline gelmesi prosesidir.

Genellikle sol-jel yöntemiyle katı malzemelerin sentezlenmesi için ıslak kimya tepkimeleri gerekmektedir. Jel oluşumu, ağ yapı meydana getirmek için genişleyen polimer ağ yapılarının birleşimiyle vuku bulur. Sol-jel için başlangıç malzemeleri inorganik metal tuzları ve metal organik bileşenlerdir.

Sol- jel metodu vakum ortamı gerektirmeyen, ekonomik, çözeltinin oranlarını net bir şekilde ayarlanabilen, moleküler seviyede karışım sağlanabilen bir yöntemdir. Düşük sıcaklıkta kristallenme sağlar. Ayrıca sol-jel yöntemi yüksek saflıkta dopant malzemenin katılabilmesine ve son üründe muhteşem kimyasal homojenliğe imkan sağlar. Sol-gel yönteminin her adımda kontrol edilebilmesi son üründe saflığa ulaşmak için oldukça faydalıdır. .

Sol- jel yöntemi genel olarak şu temel basamaklardan oluşur:

- 1- Ön başlatıcının hidrolizi
- 2- Sol- jel aktif türlerinin alkol ya da su kondenzasyonu
- 3- Jelleşme
- 4- Yaşlanma
- 5- Kurutma
- 6- Yüksek sıcaklık işlemi



Şekil 2.17. Çeşitli sol-jel türevli ürünlerin şematik gösterimi (Brinker, 1990)

2.6.2. Ortak çöktürme yöntemi

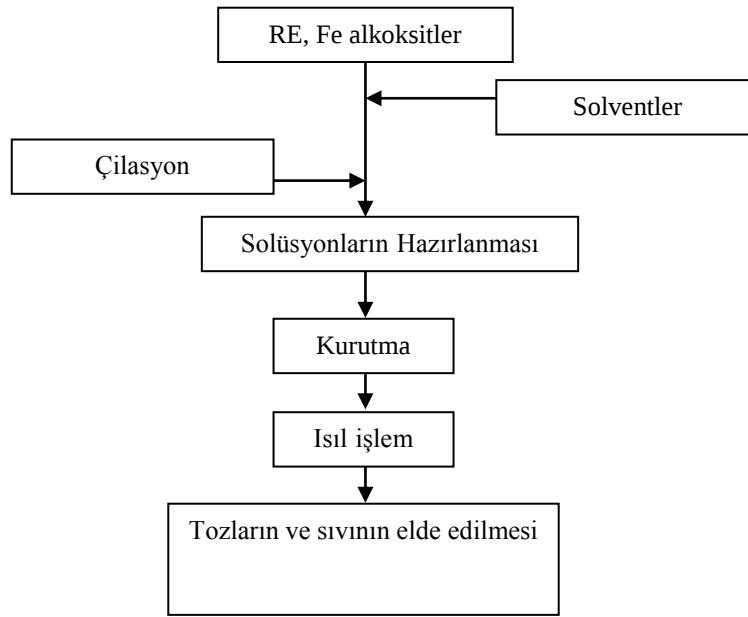
Ortak çöktürme yöntemi manyetik parçacıkları elde etmede en etkin ve en basit yöntemlerdendir. Demir oksitler genellikle sulu ortamda Fe^{+2} ve Fe^{+3} tuzlarının stokiometrik karışımlarının bazik ortamda karıştırılmasıyla hazırlanır.

Ortak çöktürme yöntemin en büyük avantajı çok miktarda nanoparçacık sentezlenebilmesidir. Bununla birlikte parçacık boyut dağılımının kontrolü sınırlıdır, çünkü yalnızca kinetik faktörler kristal gelişimini kontrol etmektedir. Ortak çöktürme işleminde iki basamak meydana gelir; birincisi türlerin derişimi kritik süper doygunluğa ulaştığında aniden çekirdeklenme oluşur, daha sonra çekirdeklerin gelişimi kristal yüzeyine iyonların difüzyonu ile yavaşça sağlanır (Schwarzer H.C., 2004). Demir oksit nanoparçacıklarını monodispers olarak üretebilmek için bu iki basamak birbirinden ayrılmalıdır. Nanoparçacıkların istenilen boyut ve şekilleri; pH, iyonik şiddet, sıcaklık, tuzların cinsi (perklorat, klorür, sülfat, nitrat) veya derişim oranı uygun şekilde ayarlanarak elde edilebilir.

3. YÖNTEM VE GEREÇ

3.1 Garnet Tozlarının ve Manyeto-optik Sıvının Üretimi

YIG ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$), Bi katkılı YIG ($\text{Bi}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) ve Ce katkılı YIG ($\text{Ce}_{0,1}\text{Y}_{2,9}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) manyeto-optik tozların üretimi iki farklı yöntem ile yapılmıştır. Sonrasında elde edilen tozlara uygun miktarlarda yüzey aktif malzeme ve taşıyıcı sıvı eklenerek manyeto-optik sıvı elde edilmiştir. Üretilen son ürünlerin karakterizasyonları sonucunda toplanan verilerden yola çıkarak katkılandırmaların etkileri incelenmiştir. Genel üretim akış şeması aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.1 Üretim akış şeması

3.1.1 Malzemeler

YIG ve nadir toprak elementleri ile katkılandırılmış türevlerinin üretiminde kullanılan toz hammaddelerin, çözücünün ve şelat ajanının; adları, kimyasal formülleri, saflık yüzdeleri ve mol ağırlıkları Tablo 3.1’de verilmiştir. Toz hammaddeleri çözmek amacıyla metil alkol kullanılmıştır. Kompleksleşme reaksiyonlarını oluşturmak ve tozların çözünmesine yardımcı olmak için glasiyel asetik asit kullanılmıştır.

Kimyasal Tipi	Kimyasal	Formül	Safılık	Mol Ağırlığı (g)
Ön Madde	Ce (III) 2,4 Pentanedionate Hydrate	$Ce[CH_3COCH=C(O-)CH_3]_3.xH_2O$	99,9%	437,44
	Fe (III) 2,4 Pentanedionate Hydrate	$Fe[CH_3COCH=C(O-)CH_3]_3.xH_2O$	99,9%	353,17
	Y (III) 2,4 Pentanedionate Hydrate	$Y[CH_3COCH=C(O-)CH_3]_3.xH_2O$	99,9%	386,24
	Bi (III) acetate	$Bi(OOCCH_3)_3$	99,9%	386,12
Çözücü	Methyl alcohol	CH_3OH	99,9%	-
	Nitric acid	HNO_3	99,9%	
Şelat Ajantı	Glacial acetic acid	$CH_3COOH,$	99,9%	-

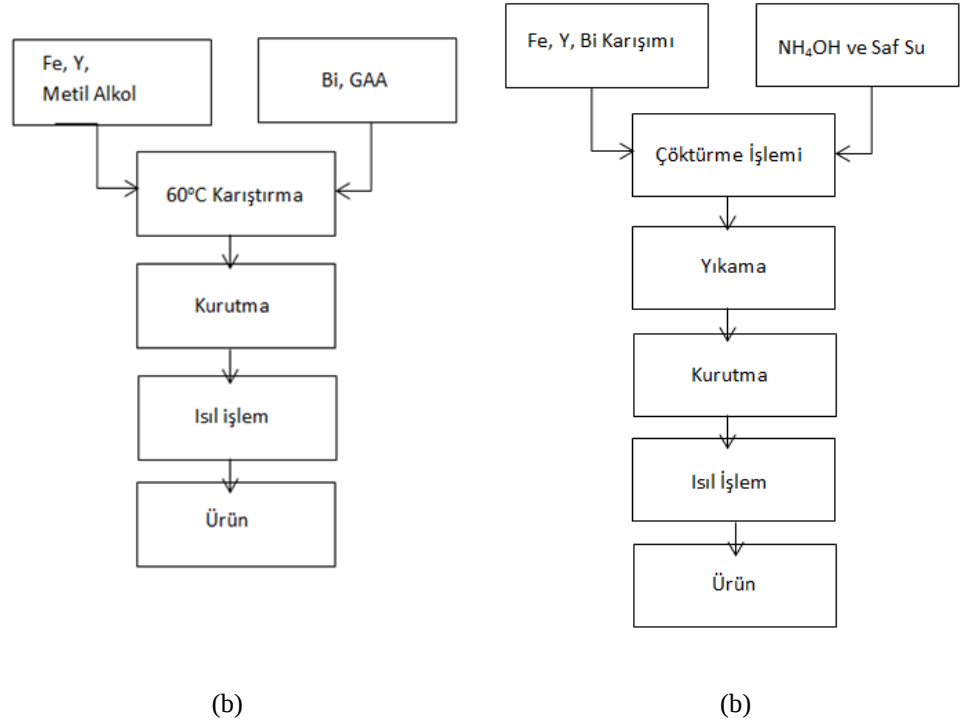
Tablo 3.1 Hammaddeler ve özellikleri

(a)

(b)

Şekil 3.23.1.2. Üretim işlemi

Şekil 3.2’de manyeto-optik garnet tozlarının üretimine ait akım şemaları verilmiştir. Akım şemasından da görüldüğü üzere, ilk aşama çözeltilerin hazırlanmasıdır. Üretilen garnetin stokiyometrilere göre, kullanılacak hammaddelerin, çözücünün ve şelat ajanının miktarları belirlenir. Tablo 3.2’de üretimi yapılan tozlar için hesaplanmış değerler verilmiştir.



Şekil 3.2: Üretim akım şeması: (a)->Sol-jel yöntemi; (b)->Ortak çöktürme yöntemi

	Fe Alkoksit	Y Alkoksit	Ce Alkoksit	Bi Asetat
YIG	0,1765g	0,1160g	-	-
BiYIG	0,2017g	0,077g	-	0,049g
CeYIG	0,1775g	0,1458g	0,022g	-

Tablo 3.2 Çözeltilerin hazırlanılmasında kullanılan maddelerin miktarları

Sol-jel: Çözeltilerin hazırlanmasında izlenen yol kısmi çözdürme şeklinde adlandırılabilir. Stokiyometrisi $Ce_{0,2}Y_{2,8}Fe_5O_{12}$ ve $Bi_1Y_{2,9}O_{12}$ olarak verilen çözeltinin hazırlanmasında izlenen yol; eklenecek olan Ce ve Bi alkoksit, 1 ml metil alkol ve 1 ml glasiyel asetik asit ile kaba koyularak toz hammadde çözünene kadar karıştırılmıştır. Ayrı bir kapta Y ve Fe alkoksit bileşikleri 3ml metil alkol ile kaba eklenmiştir ve çözünmesi beklenir. Ardından ayrı kaplarda çözünen bu malzemeler tek bir kapta toplanır ve 24 saat boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaya bırakılır.

Ortak çöktürme: Eklenecek olan Bi alkoksit bileşiği, 1,7ml nitrik asit ve 10ml saf su ile kaba koyularak toz hammadde çözünene kadar karıştırılmıştır. Ayrı bir kapta Y ve Fe alkoksit bileşikleri 10ml saf su ile kaba eklenmiştir ve

çözünmesi beklenir. Ardından ayrı kaplarda çözünen bu malzemeler tek bir kapta yavaşça toplanır ve manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaya bırakılır. Daha sonra önceden 1:4 oranında hazırlanan NH_4OH :saf su karışımı ile çöktürme işlemi gerçekleştirilir. Son olarak saf su ile üç defa yıkanır.

Her iki yöntem ile de hazırlanan çözeltiler yapıdaki organik bileşiklerin ve uçucu bileşenlerin uzaklaştırılması için 100°C sıcaklıkta jelleştirilir. Jelleşen çözeltimizi, oksit oluşumunu ve faz dönüşümünü sağlamak için daha önce DTA/TG analizlerine göre belirlenen ısıtma işlem rejimine göre yüksek sıcaklıktaki fırında işleme tabi tutulur. Isıtma işlemi $20^\circ\text{C} \rightarrow 350^\circ\text{C}$, $20^\circ\text{C} \rightarrow 450^\circ\text{C}$, $10^\circ\text{C} \rightarrow 600^\circ\text{C}$, $35^\circ\text{C} \rightarrow 725^\circ\text{C}$, $30^\circ\text{C} \rightarrow 1000^\circ\text{C}$ ve $180^\circ\text{C} \rightarrow 1000^\circ\text{C}$ şeklindedir.

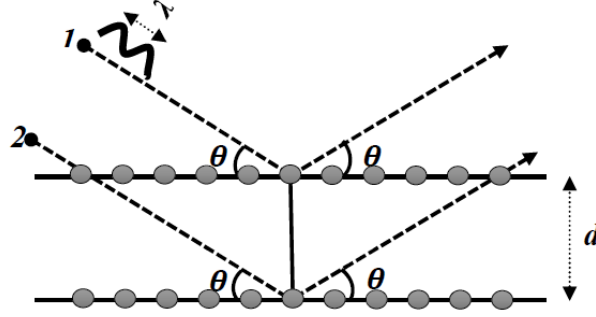
Çözeltimizi pH değerinin ürünler üzerindeki etkisini gözlemlemek için katılan GAA oranlarını değiştirerek farklı pH değerleri için hazırladık. Bunlar GAA:Metanol oranlarının 1:3, 3:5, 1:1 ve 3:1 olması durumlarına göre sırasıyla 2.95, 2.45, 2.05 ve 1.1 pH tır. Manyetik parçacıkların kümeleşmesini engellemek için manyetik parçacıklar uygun bir malzeme ile kaplanmalıdır. Elde edilen nano parçacıklara yüzey aktif malzeme olarak oleik asit ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$), taşıyıcı sıvı olarak da motor yağı kullanılarak manyetik sıvı elde edilmiştir.

3.2. Malzeme Karakterizasyonu

3.2.1. X-Işınlari kırınımı (XRD)

X-ışınları 1895 yılında Alman fizikçi Röntgen tarafından keşfedilmiş elektromanyetik dalgalara verilen isimdir. Tıp, endüstri ve astronomi alanlarında oldukça önemli bir boşluğu dolduran X-ışınları fizikte ise genellikle kristal yapıların karakterizasyonu konusunda güçlü bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bilindiği gibi kristal yapılar düzgün yinelenen periyodik yapılara sahiptir. X-ışınları Şekil 3.3’de görüldüğü gibi bu periyodik yapılar üzerine gönderildiğinde malzemenin yapısındaki atomlar tarafından kırınıma uğrar ve bir girişim deseni oluşturur. Bu kırınım desenini elde edebilmek için X-ışınlarının malzemenin atom düzlemlerine çarpma açısı (θ), atom düzlemleri arasındaki mesafe (d) ve kullanılan X ışınlarının dalga boyu (λ) arasında belirli bir bağıntının bulunması gerekir. Bragg kanunu olarak bilinen ve Denklem 3.1’de gösterilen bu bağıntı X-ışını kırınım deseninin elde edilebilmesi için gerekli şartları ifade eder.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad 3.1$$



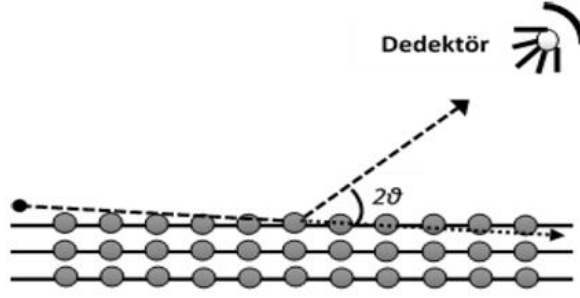
Şekil 3.3. Kristal malzeme içerisindeki atom katmanları tarafından kırılan X-ışınları (Diken, 2013).

X-ışınları kırınımı yöntemiyle kristal ve molekül yapı analizlerinde çok sayıda Bragg yansıması şiddetinin ölçülmesi gerekmektedir. Ayrıca $\sin\theta < 1$ olması gerektiği için Denklem 3.1’de görüldüğü gibi $n\lambda/2d < 1$ olacaktır. Yani kırınımında kullanılacak ışığın dalga boyunun düzlemler arası mesafeden çok daha küçük olması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı X-ışını kırınımı yönteminde görünür ışık kullanılmamaktadır. X-ışınları 0,5 - 2,5 Å aralığında dalga boyuna sahiptir.

Katıların kristal yapılarının incelenmesi söz konusu olduğunda X-ışını kırınımı tekniği en çok başvurulan tekniktir. Özellikle ince film analizlerinde malzeme yapısında herhangi bir bozulmaya yol açmaması bu tekniği çekici kılan özelliklerindendir. Nano parçacıkların ortalama büyüklüklerinin hesaplanmasında da bu teknikten oldukça faydalanılır. Denklem 3.2 ile verilen Scherrer eşitliği kullanılarak tanecik boyutu bulunabilmektedir.

$$d = (0,9\lambda) / (\beta \cos\theta) \quad 3.2$$

Denklem 3.2’de; λ kullanılan X-ışının dalga boyu, β yarı pik genişliği, θ ise Bragg açısıdır. Bilinen XRD tekniği üç boyutlu malzemelerin kristal dizilimleri ile ilgili bilgi verirken iki boyutlu sayılabilecek daha ince malzemelerin kristal dizilimleri ve yüzey analizlerinde sıyırma açısında X-ışını kırınımı (GI-XRD) tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikte X ışınları yüzeye çok küçük açılarla gönderilir ve bu sayede X-ışınlarının kat ettiği mesafe artırılmış olur. X-ışınlarının ince katmanlar içerisinde kat ettiği yol arttıkça elde edilen piklerdeki şiddet artışları daha rahat görülebilmektedir (Stoev, 1997) Bu çalışmada ölçümler Rigaku SHIMADZUX-ray marka difraktometre ile $\text{CuK}\alpha$ ışınımı ($\lambda=0.15405$ nm) kullanılarak yapılmıştır.



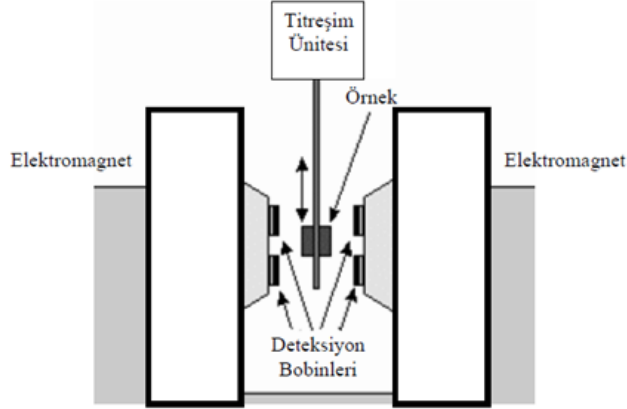
Şekil 3.4: GI-XRD ölçümünün şematik gösterimi (Diken, 2013).

3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Kaplamaların yüzey morfolojilerini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskopta görüntü elde etmek için; yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronların numune yüzeyine gönderilmiştir ve elektronlarla numunenin yüzey atomları arasında oluşan etkileşimler incelenir. Bu çalışmada Phillips XL-30S FEG marka cihaz kullanılmıştır.

3.2.3. Titreşimli örnek manyetometresi (VSM)

Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)'in çalışma prensibi elektromanyetik indüksiyon olayına dayanır. Örnek, şiddeti değişmeyen bir manyetik alan içinde titreşim yaptığı zaman, Faraday indüksiyon yasasına göre algılayıcı (pick-up) bobininde, manyetizasyonu ile orantılı olan bir voltaj indükler. Faraday indüksiyon yasası $\text{emk}'\text{nın}$ büyüklüğünün bobin içindeki manyetik akının zamanla değişim hızı ile orantılı olduğunu ifade eder ($\varepsilon = - d\phi / dt$). Burada ε , emk 'yı ve ϕ , örnekle bobini birleştiren manyetik akıyı belirtmektedir. İndüklenmiş emk ölçülebilir ve örneğin manyetizasyonu ile orantılıdır. VSM sisteminde kullanılan cihazda indüklenen voltaj, örneğin manyetik momenti ile orantılı olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu şekilde örneğin manyetizasyonunu bulmak mümkündür. VSM ile manyetik ölçümlerde ölçüme başlanmadan önce boyutları ve doyum manyetizasyonu bilinen bir standart örnek kullanılarak sistem tam manyetizasyon değerlerini verecek şekilde kalibre edilebilir (Kockar H., 1998). Bu çalışmada maksimum manyetik alanı 35000e olan Digital Systems Measurements JDM-13 marka Titreşimli örnek manyetometresi kullanılmıştır.

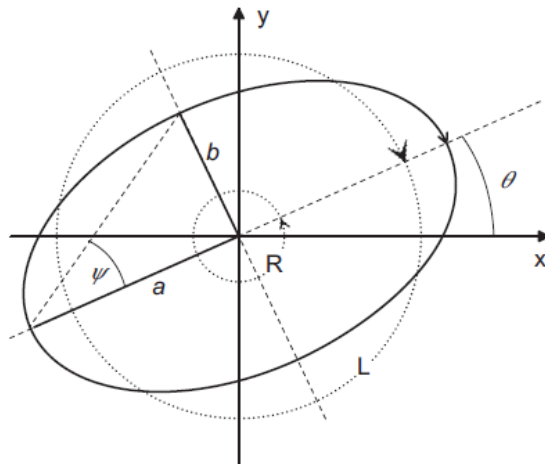


Şekil 3.5: Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)'in şematik diyagramı (Kockar H., 1998)

3.3. Manyeto-Optik Ölçüm Sistemi

3.3.1. Ölçüm sistemi

Faraday açısı ışığın malzemeden geçişi sırasında polarizasyonun değişimlerini ifade eder. Faraday dönme açısı ve elipsliği kırılma indislerinin (RCP, LCP) farkından kaynaklanmaktadır. Faraday açısı ve elipsliği $\theta_f + i\eta_f = \pi(n_+ - n_-)/\lambda_0$ denklemi ile ifade edilebilir. Bu formülde θ_f Faraday dönme açısı ve η_f ise eliptikliği belirtmektedir. Kırılma indisleri, malzemenin dielektrik tensörü ile ilgilidir. Dielektrik tensör elemanları ortam manyetizasyonun tek ve çift fonksiyonlarıdır. Baskın manyeto-optik özellikler ortam manyetizasyonuna birinci dereceden bağlı ifadelerdir ve doğrusal manyeto-optik etkiler olarak adlandırılırlar (Freiser, 1968).



Şekil 3.6. Sağ ve sol polarize ışığın faz ve genlik değişimi sonucunda eliptik polarize olması (Öztürk, 2010).

Literatürde değişik tekniklerle manyeto-optik ölçüm sistemleri kurulmaktadır. Temel olarak birbirine dik yerleştirilmiş polarizör tekniği kullanılmaktadır. En basit seçenek olan dik polarizör tekniğinde örnek yokken 0 ışık şiddeti örnek varken Malus kanununu ($I = I_0 \cos^2 \theta$) ile orantılı şiddette ışık şiddeti ölçülmektedir. Buradan θ açısı çekilerek malzemeden kaynaklanan polarizasyon açısı değişimi ölçülmektedir. Bu yöntemde hassasiyet ölçüm sisteminin hassasiyeti ve lineerliği ile orantılıdır. Ölçülecek sinyalin küçük açı değişimlerinde oldukça küçük ($90 - \theta = 0.10$ için $\cos^2 \theta = 3e - 6$) olduğu göz önüne alınırsa; sistem hassasiyetini arttırmak için modülasyon ve lock in teknikleri kullanılması gerekmektedir. Bu teknikler sayesinde nano volt seviyesindeki voltajlar gürültü içinde ölçülebilmektedir. Polarizasyon ve genlik modülasyonu kullanılabilir. Kullanılan modülasyon tekniklerinden literatürde ve uygulamada en yaygın kullanılanı PEM'dir (photo elastik modülatör). Polarizasyon modülasyon tekniği ile çalışmakta ve kurulacak ölçüm sistemini basitleştirmektedir. Diğer bir ölçüm tekniği ise dönen polarizör tekniğidir. Sabit frekansta dönen polarizör ile modülasyon yapılmaktadır (Holm, 1984; Sahrah, 2000; Öztürk, 2010). PEM kullanılarak kurulan ölçüm sistemi Şekil 0.7'deki gibidir.

Işık kaynağı olarak 543 nm dalga boyunda 0.5 mW ışık gücünde He-Ne lazer ve lazer diyot sürücüsü ile değişik dalga boylarında lazerler kullanılmıştır. Polarizör olarak da gelen ışının açılı gelmesi durumunda çalışabilmesi, sönme (extinction) oranı yüksek (1:105) olması ve dalga boyu aralığı geniş (350-2300 nm) olması sebebi ile Glan-Thompson polarizör seçilmiştir. Bunun yanısıra ışık modülasyonu amaçlı en fazla 1000 Hz döndürme frekansına sahip optik kesici kullanılmıştır. Analizör olarak Glan-Thompson tipi polarizör ve $1^\circ/800$ dönme açısına sahip step motorlu, bilgisayar kontrollü döndürme platformu kullanılmıştır.

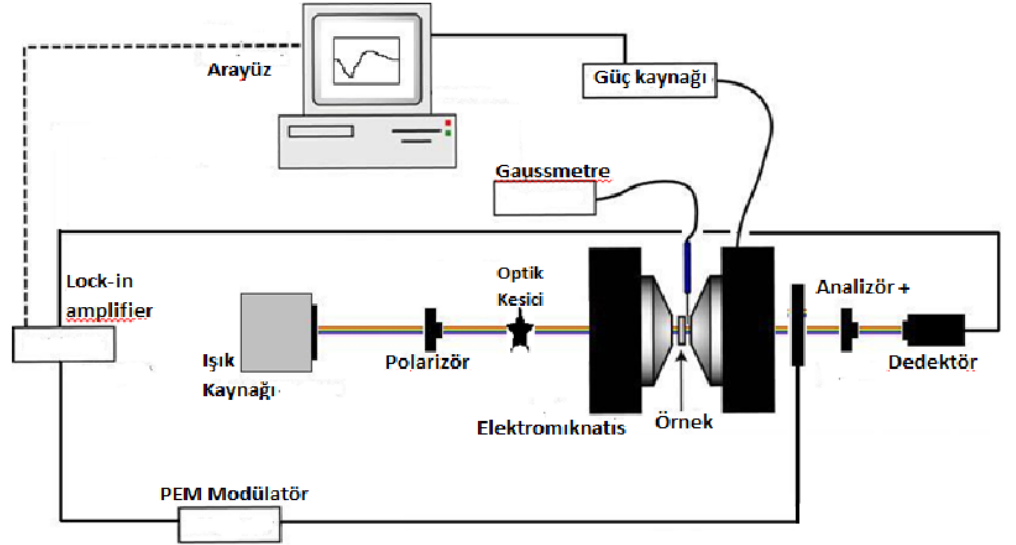
Polarizasyon durumunda polarizasyon dönmesi ve elipsliği eş zamanlı olarak ölçme olanağı tanıyan Foto-elastik modülatör (PEM) kullanılmıştır. PEM dikdörtgen optik pencere ve bu pencereye bağlı piezoelektrik transduser içermektedir. Piezoelektrik transduser 50 kHz frekansında titreşmekte ve sonuçta optik eleman olarak kullanılan silika cam briefrienge meydana gelmektedir. Optik cam gerilmemiş durumda iken elektrik alanın x ve y bileşenleri eş fazlıyken, gerilmiş veya sıkışmış durumda faz gerilimden dolayı faz farkı oluşmaktadır.

Sistemde ayrıca 20V-50A gerilim ve akım değerlerine sahip bilgisayar kontrollü güç kaynağı ve elektromıknatis kullanılmaktadır. Uygulanan akımla doğrusal değişim oluşturabilecek en fazla 800 Gauss manyetik alan değeri gözlenen manyetik alan kaynağı oluşturulmuştur. Elimizde bulunan diğer masa

tipi elektromıknastısta ise 1cm boşlukta 2200 gauss oluşturmak mümkün olmaktadır. Bu değerler garnet tipi MO malzemeleri satüre etmek için yeterlidir.

Detektör olarak 300-1070 nm aralığında 1pW-10mW ışık şiddeti ölçümü için uygun 10 dB aralıklar ile ayarlanabilen en fazla 90dB kazanca sahip 10-MHz Si foto-detektör kullanılmıştır. Modüle ışığın ölçümü için SR830 model LIA kullanılmıştır.

Cihazların bilgisayar kontrolü için USB-GPIB (IEEE488) kartı kullanılmıştır. Program olarak MATLAB ve LabVIEW programları kullanılmıştır.



Şekil 0.7. Manyeto-optik Faraday ölçüm sistemi.

Sistem elemanlarının Jones matris gösterimleri aşağıdaki gibidir:

$$Analizör(A) = Polarizör(P) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 3.3$$

Koordinat ekseninin başlangıç eksenine göre θ derece döndürülmesi için Denklem 3.4 kullanılır.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad 3.4$$

Modülatör olarak kullanılan PEM x düzlemine göre paralel olarak sisteme eklendiğinde Denklem 3.5 halinde ifade edilebilir.

$$PEM(M) = \begin{bmatrix} e^{i\delta_p} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\delta_p = A_0 \cos(\omega t) \quad 3.5$$

Burada δ_p oluşan faz farkını, A_0 retardation değerini ve w modülatörün frekansını ifade eder.

Örnek için faraday eliptikliği ve faraday dönmesi dikkate alınarak aşağıdaki matris tayin edilmiştir.

$$S = \exp\left(-\frac{\alpha d}{2}\right) \begin{bmatrix} \exp(-i\theta_F d + \psi_F) & 0 \\ 0 & \exp(i\theta_F d - \psi_F) \end{bmatrix} \quad 3.6$$

Burada θ_F dönme miktarını, ψ_F eliptisiteyi, α kayıp (attenuation) katsayısını ve d örneğin kalınlığını ifade eder

3.3.2. Teorik hesaplamalar

$$\begin{bmatrix} E_x^{(i)} \\ E_y^{(i)} \end{bmatrix} \text{ şeklinde ifade edilen lazer ışını optik malzeme boyunca hareketinin sonunda } \begin{bmatrix} E_x^{(t)} \\ E_y^{(t)} \end{bmatrix}$$

halini alır. Bu dönüşümü sağlayan matrise transfer matrisi denir.

$$\begin{bmatrix} E_x^{(t)} \\ E_y^{(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^{(i)} \\ E_y^{(i)} \end{bmatrix} \quad 3.7$$

Denklem 3.8’de gösterildiği gibi sisteme eklenen her optik malzeme transfer matrisinin bir parçası olarak yer alır. Transfer matris oluşturulurken ışının ilk temas ettiği malzeme en sona, en son temas ettiği malzeme de en başa yazılacak şekilde sıralanır ve sonuç transfer matrisi oluşturulur.

$$E^{(t)} = t_n \dots t_2 t_1 E^{(i)} \quad 3.8$$

Sistem matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir;

$$E^{(t)} = A \cdot M \cdot S \cdot T \cdot P \cdot E^{(i)}$$

Sistem elemanlarının matris gösterimleri bir önceki bölümde tanımlanmıştır. Bu işlemin sonucunda ışık şiddetini bulabilmek gerekli formül Denklem 3.9’da tanımlanmıştır.

$$I = E_x^{(t)*} E_x^{(t)} + E_y^{(t)*} E_y^{(t)} \quad 3.9$$

$$I = \frac{1}{2} \exp(\alpha d) [\cosh(2\psi_F) + \sinh(2\psi_F) \sin(\delta_p) + \sin(2\theta_F d - 2\theta) \cos(\delta_p)]$$

$\delta_p = A_0 \cos(\omega t)$ şeklinde tanımlandığından sistem Bessel fonksiyonları cinsinden genişletilebilir. Bu durumda denklem şu hali alır.

$$I = \frac{1}{2} \exp(\alpha d) \left[\cosh(2\psi_F) + \sinh(2\psi_F) \{2J_1(A_0) \sin \omega t + \dots\} \right. \\ \left. + \sin(2\theta_F d - 2\theta) \{J_0(A_0) + 2J_0(A_0) \cos 2\omega t + \dots\} \right] \quad 3.10$$

Frekans bileşenleri dikkate alındığında $2f$ frekansından sonraki frekans bileşenleri ihmal edilebilir. Ayrıca işlem kolaylığı alması adına kalınlığı ve kaybı ihmal edebiliriz. İlk üç frekans terimi de sırasıyla dc, $1f$ ve $2f$ terimleridirler.

$$I_{dc} = \frac{1}{2} \left[\cosh(2\psi_F) + \sin(2\theta_F - 2\theta) \{J_0(A_0)\} \right] \\ I_{1f} = \frac{1}{2} \left[\sinh(2\psi_F) \{2J_1(A_0)\} \right] \\ I_{2f} = \frac{1}{2} \left[\sin(2\theta_F - 2\theta) \{2J_0(A_0)\} \right] \quad 3.11$$

Faraday açısı analizör açısı bilindiği takdirde I_{2f} formülünden kolaylıkla çekilebilir. Faraday eliptikliği için de I_{1f} formülü kullanılır.

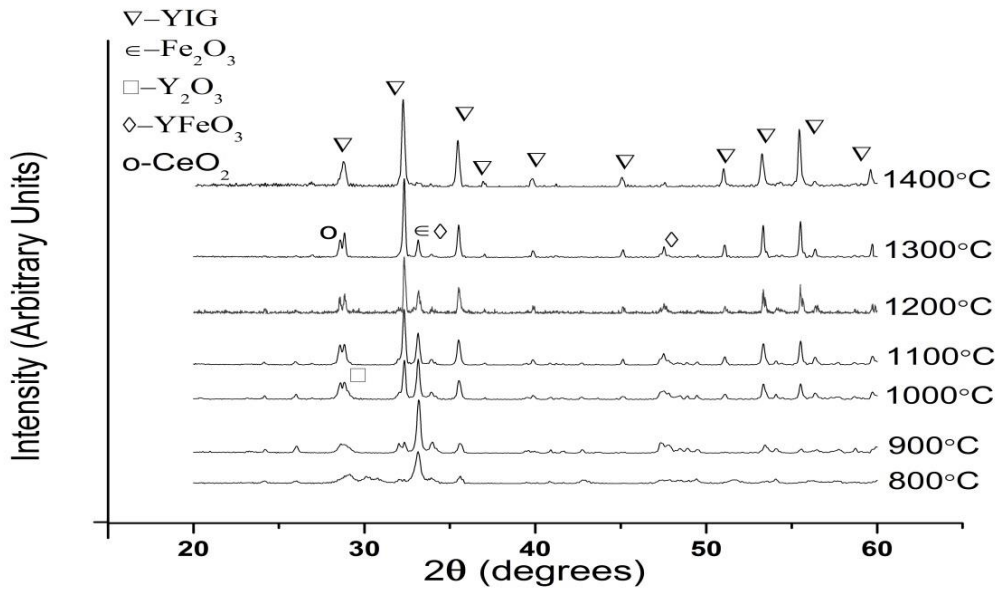
$$\psi_F = \frac{1}{2} \sinh^{-1} \left[\frac{I_{1f} J_2(A_0)}{|I_{2f}| J_1(A_0)} \right] \quad 3.12$$

Bu denklem sonrasında elde ettiğimiz sonuç radyan cinsinden olacaktır. Derece cinsine çevirmek için basitçe $180/\pi$ ile çarpmamız yeterlidir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1.XRD Faz Analizleri

Sol-jel yöntemi ile hazırladığımız çözeltiler saf garnet fazı elde edebilmek ve sıcaklığın faz oluşumu üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek adına farklı sıcaklıklar için ısıtılma işlemi yapıldı. Bu sıcaklıklar sırasıyla 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300 ve 1400°C'dir. Faz analizleri cihazın kütüphanesinde bulunan referans değerler göz önüne alınarak yapılmıştır.

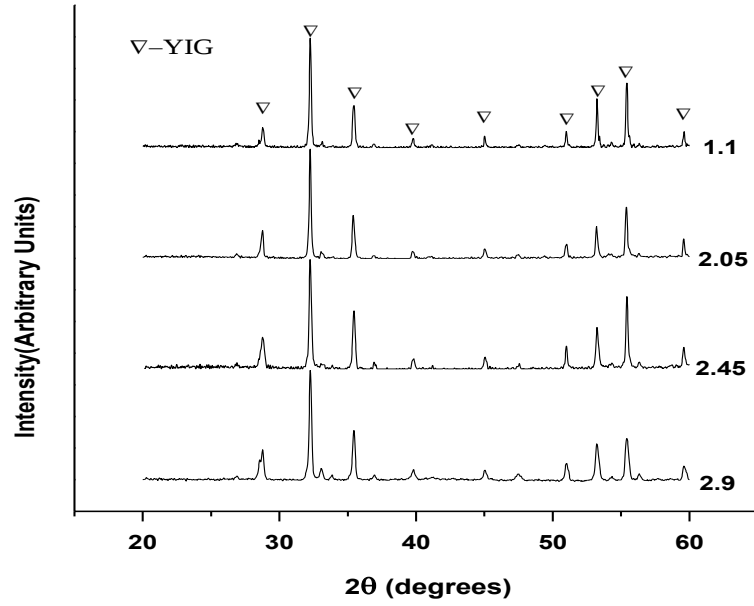


Şekil 4.1: 800°C den 1400°C ye kadar farklı sıcaklıklar için XRD patterni (2.45 pH)

Şekil 4.1’de 800-1400 derece aralığında 100°C aralıklarla 3 saat boyunca ısıtılma işlemi uygulanması sonucu üretilen Ce katkılı YIG tozlarının XRD sonuçları gösterilmiştir. Üretilen CeYIG garnetlerinin başlangıç çözeltilerinin pH değerleri 2.45’tir. Figürden açıkça görüldüğü gibi 900°C sıcaklıktan sonraki ürünlerde kübik garnet yapısı oluşmaya başlamıştır. 1000°C ‘nin altında yapılan üretimlerin XRD sonuçları bize garnet yapısının yanısıra YFeO₃, CeO₂, α-Fe₂O₃, Y₂O₃ gibi ikinci dereceden fazların da oluştuğunu göstermektedir. Üretim sıcaklığını arttırdığımızda ortamdaki fazlar arası etkileşimlerin arttığı ve bunun sonucunda kübik garnet fazının ve YFeO₃ gibi bazı ikinci dereceden fazların oluşmaya başladığı görülmektedir. 1000°C üzerinde yapılan üretimlerde kübik garnet fazı

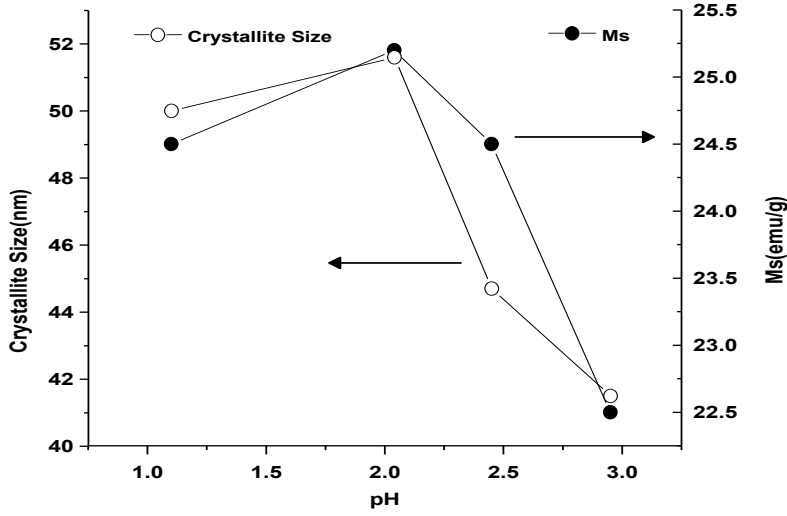
baskın faz olarak gözlenmektedir. Nihayet 1400°C’de yapılan üretimde saf garnet fazı elde edilmiş, ikinci dereceden fazların kaybolduğu gözlemlenmiştir.

Bunun yanı sıra kristallenme ile başlangıç çözeltisinin pH arasındaki ilişkiyi gözlemleyebilmek için farklı pH değerleri (1.1, 2.05, 2.45 ve 2.9 pH) için yapılan üretimlerin XRD sonuçlarından faz analizleri yapıldı.



Şekil 4.2: Farklı pH değerlerine sahip başlangıç çözeltilerinden elde edilen garnet tozlarının XRD sonuçları

Şekil 4.2 bize farklı pH değerlerine sahip başlangıç çözeltilerinden elde edilen garnet tozlarının XRD sonuçlarını göstermektedir. Çözeltiler 1.1, 2.05, 2.45 ve 2.9 pH değerleri için üretilmiş ve 1400°C ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Grafikten gözlemlenebildiği üzere 2.9 pH değerindeki çözeltiden üretilen son üründe ikinci dereceden fazlar oluşmaya başlamıştır. Oysaki daha düşük pH değerlerinde ikinci dereceden fazlar görülmemektedir. Literatürde bizim çalışmamızı destekleyecek nitelikte olup artan pH değerinin garnet fazı üzerinde negatif bir etkisi olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur (S. Hosseini Vajargah, 2006) (Haitao Xu, 2008). pH etkisinin tam etkisi açıklanamasa da temel sorun olarak başlangıç kimyasallarının çözünürlüğünün azaldığı söylenebilir. Grafikten de gözlemlendiği gibi düşük pH değerine sahip olan çözeltilerden üretilen ürünlerde saf kübik garnet faz mevcut olup istenen sonuca ulaşılmıştır.



Şekil 4.3: Kristalit boyutu ve manyetizasyon değerlerinin pH değerlerine göre değişimi.

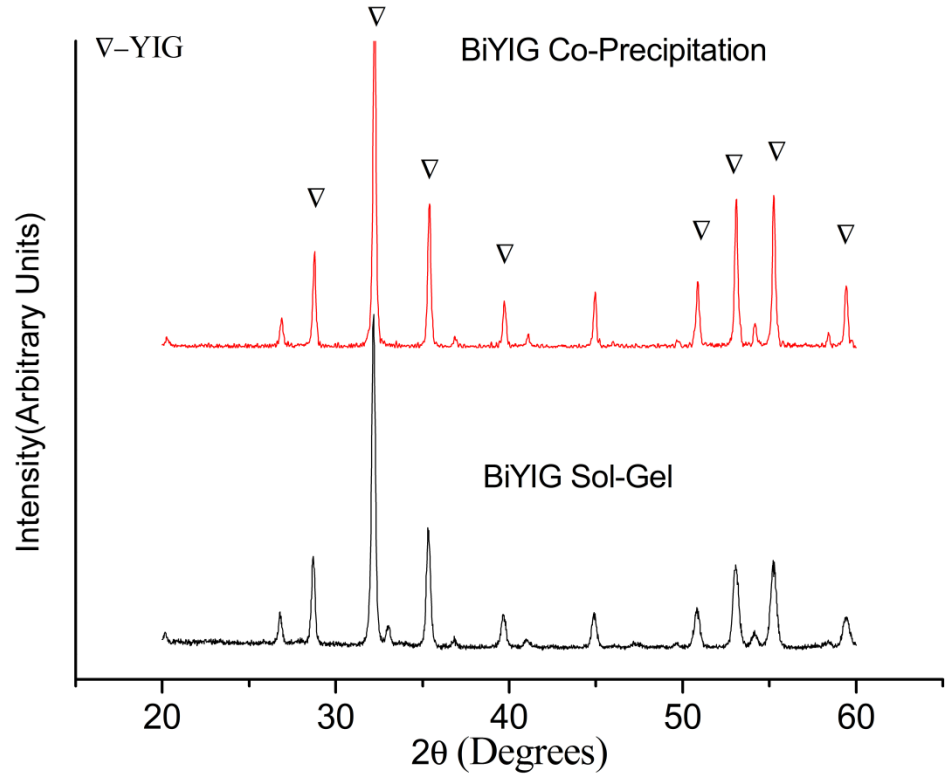
Elde ettiğimiz CeYIG tozlarının doyma manyetizasyonu ve kristalit boyutunun pH değerlerine göre değişimini gösteren grafik Şekil 4.3’de verilmiştir. Garnetin kristalit boyutu XRD sonuçlarından yola çıkılarak hesaplanmıştır. Hesaplamamızda sıkça kullanılan Scherrer's denklemi kullanılmıştır.

$$D = k\lambda / B \cos\theta$$

Burada; ‘D’ parçacığın nm cinsinden ortalama boyutunu temsil ederken, ‘k’ (0.9) Scherrer katsayısını (shape factor); ‘λ’ (lambda), X radyasyonunun dalga boyunu; ‘θ’ (theta), difraksiyon(bragg) açısını, ‘B’ ise XRD peaklerinin radyan cinsinden orta yükseklik genişliğini ifade eder. Görüldüğü gibi kristalit boyutu pH arttıkça artar. Literatürde Hosseini Vajargah ve çalışma arkadaşları sol-jel kombusyon metodu için kristalit boyutu ve başlangıç çözeltisinin pH’ı arasındaki ilişkiyi daha önce incelemişlerdir. Her ne kadar onların üretim yöntemi ile bizim üretim yöntemimiz tam anlamıyla aynı değilse de elde ettiğimiz sonuçlar uyum göstermektedir (S. Hosseini Vajargah, 2006).

Şekilden de anlaşıldığı üzere başlangıç çözeltisinin pH değeri ürünün manyetik dinamikleri ve kristalit büyüklüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kristalit boyutu maksimum değer olan 51nm ye 2.45 pH değerinde ulaşır. Maksimum kristalit değerindeki doyma manyetizasyonu değeri 25.2 emu/gr olarak ölçülmüştür. Bu değer literatürde bilinen bulk YIG değerinin doyma manyetizasyonu değerine oldukça yakın bir değerdir. (26.8 emu/g).

Farklı üretim yöntemlerinin faz oluşumuna etkisinin incelenebilmesi ve ideal yöntemin bulunabilmesi için sol-jel yöntemi ile ortak çöktürme yöntemi ile üretilen tozların faz analizleri incelendi.

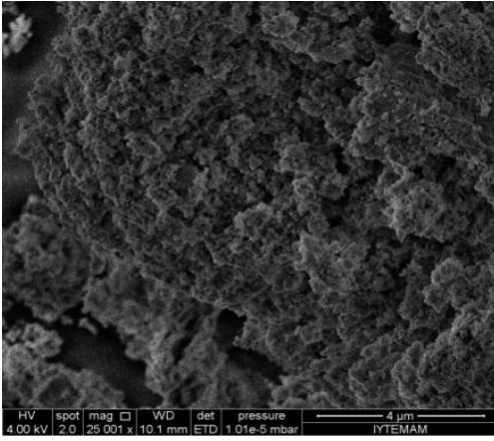


Şekil 4.4 BiYIG örnekleri için XRD desenleri

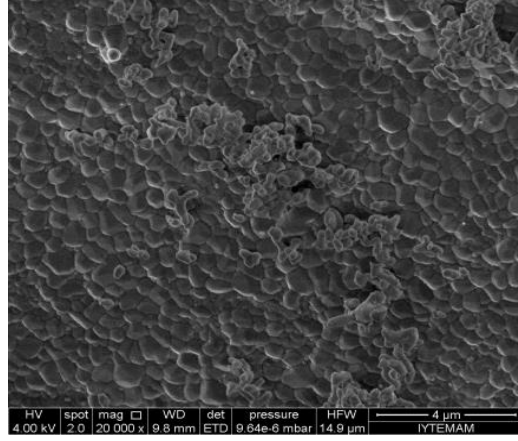
Şekil 4.4’de iki farklı üretim yöntemi için nitrate-gel ve çökertme yöntemleri için elde ettiğimiz BiYIG garnetlerin XRD sonuçları görülmektedir. Görüldüğü gibi sol-jel yöntemi sonrasında yapıda farklı fazlar görünürken çökertme yöntemi ile 800°C’de saf YIG fazı elde etmeyi başardık. Ama çökertme yönteminde Bi’un yapıya ne oranda girdiğini bilememiz, yıkama esnasında kayıpların meydana gelmesi ve üretim esnasında çıkan zehirli gazlar bu yöntemin dezavantajlardandır. Bunun yanı sıra sol-jel yöntemi ile üretilen tozların parçacık boyutları XRD sonuçlarından görüldüğü gibi ortak çöktürme yöntemine kıyasla daha küçüktür.

4.2. SEM Mikroyapı Analizleri

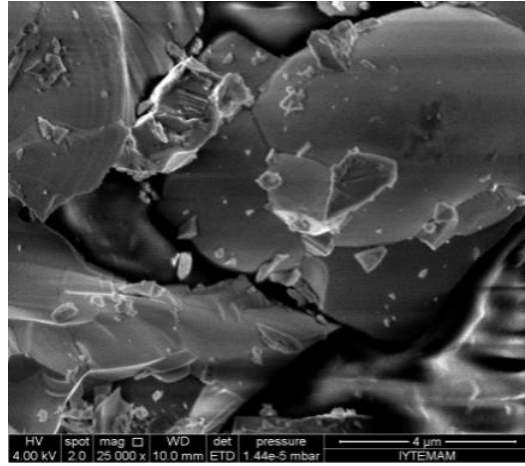
Elde ettiğimiz nihai ürünlerin yapısal, morfolojik ve faz özelliklerinin tartışılabilmesi için SEM sonuçları oldukça önemlidir.



(a) 800 °C



(b) 1100 °C



(c) 1400 °C

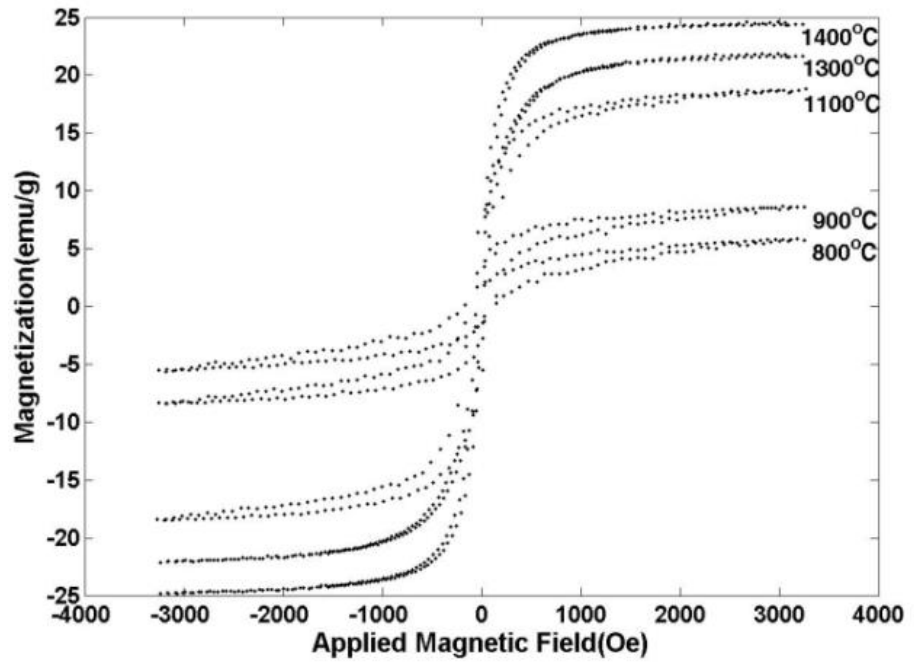
Şekil 4.5 Farklı sıcaklık değerleri için SEM fotoğrafları (a) 800°C, (b) 1100°C ve (c) 1400°C.

Şekil 4.5 bize farklı sıcaklıklar için elde etmiş olduğumuz garnet tozlarının SEM görüntülerini göstermektedir. Sırasıyla Şekil 4.5 a-800°C, b-1100°C ve c-1400°C sıcaklıkta 3 saat boyunca hava ortamında ısıtılma işlemi sonunda elde ettiğimiz sonuçların görüntüleridirler. SEM sonuçlarından görüldüğü gibi oluşan parçacıklar düzenli şekillere sahip değildir. Parçacık dağılımları düzensiz olup büyükleri nano-mikro boyutlardadırlar. Görüntülerden anlaşıldığı gibi çözeltiye uygulanan sıcaklık arttıkça hem kristalit büyüklüğü hem de zincir yapının büyüklüğü artmaktadır. Ayrıca zincir yapılar artan sıcaklıkla birlikte erimekte ve birbirlerine yapışmaktadır. Bunun sonucunda yığma/aglomere yapılar oluşmaktadır. Bunun yanı sıra sıcaklık arttıkça parçacık yüzeylerinin daha pürüzsüz ve yuvarlak bir hal almaya başladığı da görülmektedir. Şekil 4.5-a'da

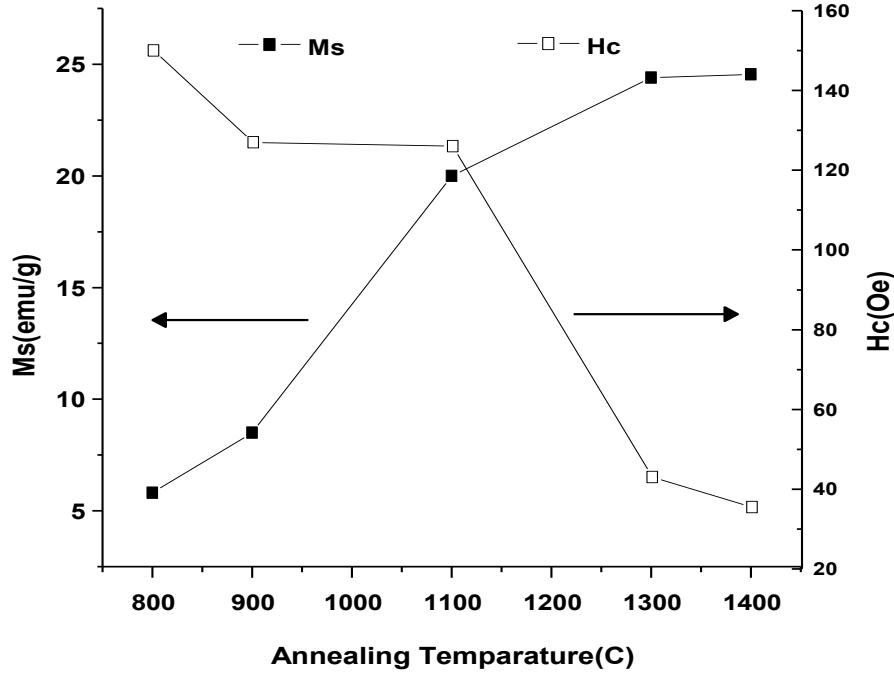
görülen 800°C de üretilmiş ürünlerin gözenekli bir yapıda olduğu gözlenmektedir. Artan sıcaklık ürünlerin gözenekli yapıdan zincir kristalit yapıya geçmesini sağlamıştır Şekil 4.5-b. 1400°C sıcaklıkta elde ettiğimiz ürünlerin boyutlarını diğer yöntemlerle kıyasladığımızda ürünlerin proteik sol-jel yöntemi ile elde edilen ürünlere kıyasla daha küçük, auto-combusyon, nitrat-jel ve sonochemical üretim yöntemlerine kıyasla daha büyük olduğu görülmektedir (Jiri Pinkas, 2010)

4.3. VSM Manyetik Özelliklerin Analizi

Manyetizasyon (emu/g) ve uygulanan manyetik alan (Oe) eğrileri VSM cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.6: 800-1400°C sıcaklıkları için üretilen örneklerin VSM sonuçları: Histeresiz eğrileri.



Şekil 4.7: Koersif alan ve doyma manyetizasyonu değerlerinin üretim sıcaklığına bağlı değişimi.

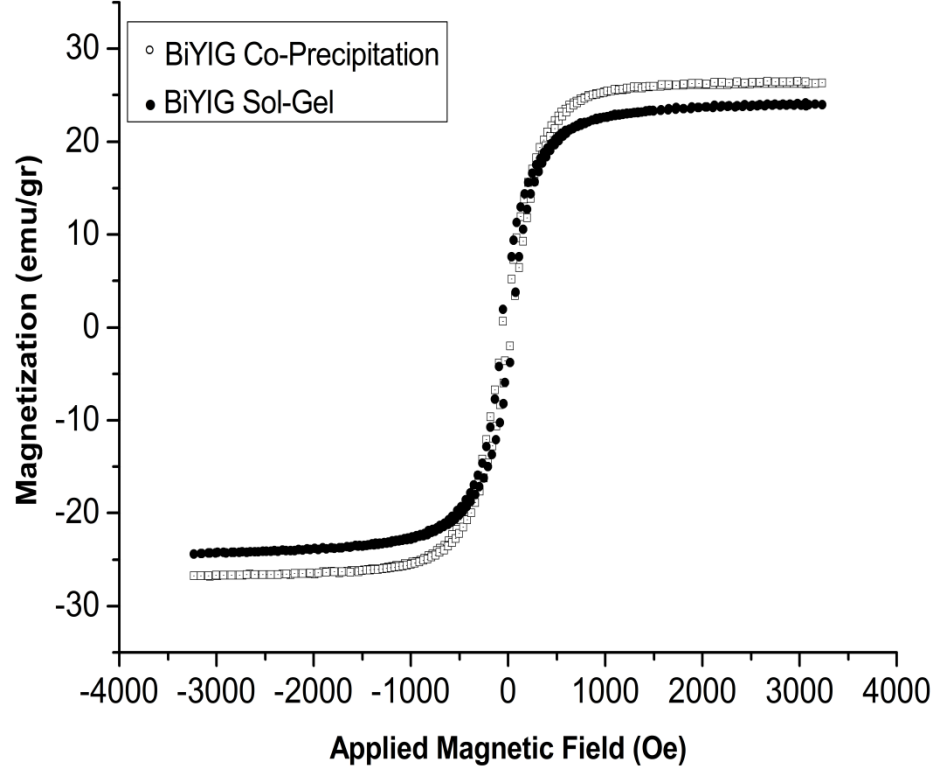
Elde edilen ürünlerin manyetik özelliklerini açıklamamızı sağlayan doyma manyetizasyonu, koersif alan gibi temel özellikleri ile sıcaklık arasında ilişki kurabilmemiz için farklı sıcaklıklarda elde ettiğimiz ürünleri titreşimli örnek manyetometresi (VSM) ile ölçtük. Elde edilen histeresiz eğrileri Şekil 4.6'da detaylı olarak gösterilmektedir. Şekil 4.6'de üretilmiş garnet tozlarının koersif field ve doyma manyetizasyonu değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça ürünlerin doyma manyetizasyon değerleri artmakta iken koersif field değerleri azalmaktadır. 1400°C de ürettiğimiz tozun doyma manyetizasyon değeri $M_s=24.5$ emu/g olarak ölçülmüştür. Bu değer bulk YIG değerine oldukça yakın bir değerdir. ($M_{bulk}=26$ emu/g)

Ce:YIG Üretim Sıcaklığı (°C)	800	900	1100	1300	1400
Hc-Zorlayıcı Alan (Oe)	150	130	126	43	35.5
Ms-Doyma Manyetizasyonu (emu/g)	5.8	8.5	20	24.4	24.54

Tablo 4.1 Ce:YIG için manyetik özellikler

Garnet tozlarının can alıcı özelliklerinden biri de parçacık boyutunun manyetik özelliklerini etkilemesidir. Parçacık boyutlarının manyetik özellikleri üzerindeki etkiyi gözlemleyebilmek için XRD sonuçlarından yararlanarak parçacık boyutlarını hesapladık. Parçacık boyutlarının 38nm ile 55 nm arasında

değiştirdiği görülmektedir. Daha önce Şekil 4.5’de görüldüğü ve açıklandığı gibi parçacık büyüklüğü artan sıcaklık ile birlikte örneklerin çekirdeklenmesi ve kristallenmesi sonucu büyümektedirler. Nihayet 1400°C de üretilen ve en büyük parçacık boyutuna sahip olan örnek örnekler arasındaki en küçük koersif field değerine sahiptir. 1400°C de üretilen garnetin koersif fieldi $H_c=35.5$ Oe olarak ölçülmüştür.

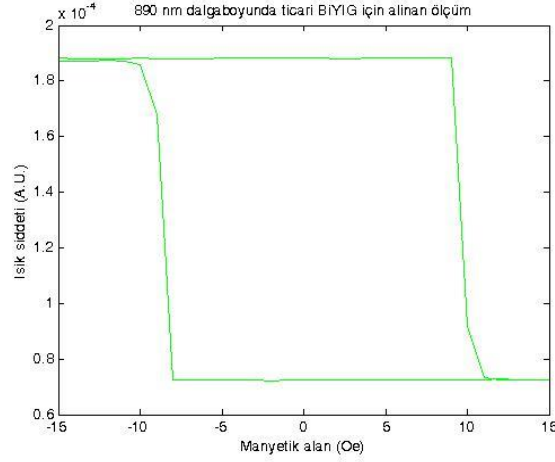


Şekil 4.8 Farklı iki yöntem ile üretilmiş tozların VSM sonuçları.

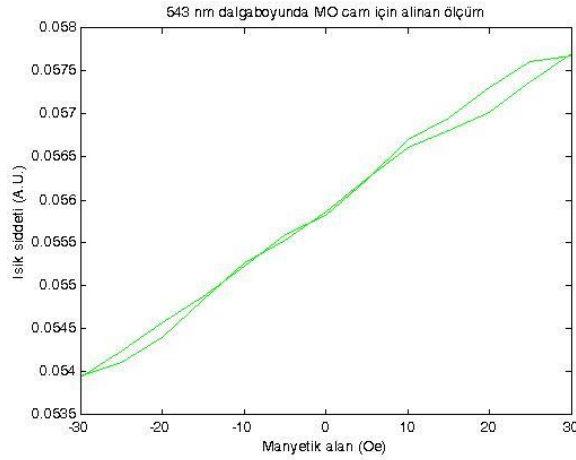
Şekil 4.8 farklı üretim yöntemi için sol-jel ve ortak çöktürme yöntemleri için elde ettiğimiz BiYIG garnetlerin VSM sonuçları görülmektedir. Görüldüğü gibi ortak çöktürme yöntemiyle ürettiğimiz garnetin doyma manyetizasyonu sol-jel’e oranla daha yüksektir.

4.4. Manyeto-Optik Özelliklerin Analizi

Kurmuş olduğumuz ölçüm sisteminin denenmesi ve kalibrasyonu için elimizde bulunan manyeto-optik cam ve ticari BiYIG garnet kullanılmıştır. Garnetin ölçümleri 890nm dalga boyunda lazer diod controller kullanılarak, camın ölçümleri ise 543 nm dalga boyundaki He-Ne lazer kullanılarak alınmıştır. Elde edilen histeresiz şekilleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'deki gibidir.



Şekil 4.9 890 nm dalgaboyunda ticari BiYIG garnetin Histeresiz eğrisi



Şekil 4.10. 543 nm dalgaboyunda MO camın Histeresiz eğrisi

Üretilen YIG ve CeYIG bazlı manyetik sıvıların Faraday dönme açılarını CeYIG için düşük emilme ve yüksek manyeto-optik özellik gösterdiği literatür araştırmalarımızdan bildiğimiz 1550nm dalgaboyundaki lazer ile ölçtük.

± 100 Oe manyetik alan altındaki 0.25mm kalınlığındaki örneklerimizle gerçekleştirdiğimiz ölçüm sonrasında YIG bazlı manyetik sıvı için FR değeri 0.8° olarak ölçülürken, CeYIG için bu değer -2.5° olarak ölçülmüştür (YARİÇİ İ., 2014). Bu sonuç bize Ce^{+3} 'ün yapıya katıldığını ve

malzemenin manyeto-optik faraday özelliğini beklenildiği gibi arttırdığını göstermektedir.

Yapıya katılan Ce diamanyetik özelliğinden dolayı FR pozitif değerlerden negatif değerlere geçiş yapmış ve YIG'e oranla manyeto-optik özelliklerini arttırmıştır. Bulduğumuz sonuçlar literatüre uygun çıkmıştır. (S. Higuchi, (1999))

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında sıcaklık, pH, üretim yöntemi ve katkı maddesinin etkisi gibi parametreleri gözlemlenebilecek şekilde YIG, BiYIG ve CeYIG tozlarının üretimini gerçekleştirildi. Değiştirilen parametrelerin etkileri XRD, VSM ve SEM cihazlarıyla incelenmeye çalışıldı. Sonrasında YIG ve CeYIG bazlı manyetik sıvı üretilip kurulan MO sistemde yapıya katılan Ce'um etkileri Faraday Dönmesi yöntemiyle incelendi. Yapılan bu çalışmalar ışığında genel olarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- 800-1400 derece aralığında farklı sıcaklıklarda üretimi gerçekleştirilen Ce katkılı garnetler incelendiğinde 900°C sıcaklıktan sonraki ürünlerde kübik garnet yapısının oluşmaya başladığı, oluşan bu fazın 1000°C 'nin üstündeki üretimlerde baskın hale geldiği ve nihayet 1400°C'de ikinci dereceden fazlar olan $YFeO_3$, CeO_2 , $\alpha-Fe_2O_3$, Y_2O_3 fazlarından kurtularak saf garnet fazına ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık gerektiren ve saf YIG fazı istenilen bazı uygulamalar için oldukça faydalı olacağına inanmaktayım.
- Farklı pH değerlerine sahip başlangıç çözeltilerinden elde edilen garnet tozları incelendiğinde düşük pH değerlerine sahip çözeltilerden elde edilen ürünler saf YIG fazına sahipken 2.9 pH değerinde ikinci dereceden fazların oluşumu gözlenmeye başlanmıştır. Bu durumun muhtemel sebebi olarak artan pH ile başlangıç kimyasallarının çözünürlüğünün azaldığı söylenebilir. Gözlemlenen bu sonuçlar literatüre uygunluk göstermektedir (S. Hosseini Vajargah, 2006) (Haitao Xu, 2008)
- pH değişiminin ürünün manyetik dinamikleri ve kristalit büyüklüğü üzerindeki etkileri incelenmiş ve artan pH ile son ürünün hem kristalit büyüklüğünde hem de doyma manyetizasyonu değerinde azalma gözlemlenmiştir. Maksimum kristalit değerindeki doyma manyetizasyonu değeri 25.2 emu/gr olarak ölçülmüştür. Bu değer literatürde bilinen bulk YIG değerinin doyma manyetizasyonu değerine oldukça yakın bir değerdir. (26.8 emu/g).
- Farklı iki yöntem ile üretilen ürünler kıyaslandığında ortak çöktürme yöntemi ile daha düşük sıcaklıkta saf YIG fazına ulaşılabilirdiği gözlenmiştir. Ancak sol-jel yöntemi ile üretilen tozların parçacık boyutlarının ortak çöktürme yöntemine kıyasla daha küçük olduğu ve ortak çöktürme yöntemiyle üretilen garnetin doyma manyetizasyonu değerlerinin sol-jele oranla daha yüksek olduğu görülmüştür.
- SEM sonuçları analiz edildiğinde parçacıkların düzensiz şekillere sahip olduğu artan sıcaklıkla tozların hem kristalit büyüklüklerinin hem de zincir yapılarının büyüklüğünün arttığı gözlemlenmiştir.

- Sıcaklık değişiminin manyetik özellikler üzerindeki etkileri incelendiğinde artan sıcaklıkla ürünlerin doyma manyetizasyon değerlerinin arttığı, koersif field değerlerinin azaldığı gözlenmiştir.
- Üretilen YIG ve CeYIG bazlı manyetik sıvılarının ± 100 Oe manyetik alan altında 0.25mm kalınlığındaki örnekleri için 1550nm dalga boyundaki lazer ile Faraday dönme açıları ölçüldüğünde. YIG bazlı manyetik sıvı için FR değeri 0.8° , CeYIG için -2.5° olarak ölçülmüştür.
- MO ölçümler sonrasında Ce^{+3} 'ün yapıya katıldığı ve malzemenin manyeto-optik özelliğini beklenildiği gibi negatif yönde arttırdığı görülmüştür.
- Üretilen manyetik sıvıda parçacıkların bir süre sonra batmaya başlaması problemi ile karşılaşıldı, farklı taşıyıcı sıvı, farklı yüzey aktif malzeme kullanılarak problem çözülmeye çalışıldı. Ancak parçacıkların öğütülmesiyle kısmi bir çözüme ulaşıldı.

Sonuç olarak sol-jel ve ortak çökertme yöntemleri kullanılarak saf YIG fazlarına sahip YIG, Bi katkılı BiYIG ve Ce katkılı CeYIG tozları başarılı bir şekilde üretilmiştir. Sıcaklık, pH, üretim yöntemi ve kristalit boyutu gibi parametrelerin tozların mikroyapısal, yapısal ve manyetik özellikleri üzerindeki etkileri gözlemlenerek literatüre uyumlu veriler elde edilmiştir. YIG ve CeYIG tozlarından motor yağı ve oleik asit kullanılarak literatürde daha önce karşılaşılmamış olan garnet esaslı manyetik sıvı üretildi. Laboratuvarında $0.5^\circ C$ hassasiyette Faraday dönmesini ölçebilen MO sistem kurulup elde ettiğimiz garnet esaslı manyetik sıvıların manyeto-optik özellikleri (Faraday Dönmesi) incelendi.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abu-Safia H., A.-A. I.**,1990,Temperature dependence of birefringence and dichroism in magnetic fluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 87 (3), 333–338p.
- Akdoğan, N.**,2004, *İnce Filmlerde Manyeto-Optik Ölçümler*, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E. Fizik Anabilim Dalı Fizik Programı, İstanbul
- Akgün, E.**,2007,*Nadir Toprak Elementli Bileşiklerin Manyetik, Yapısal ve Termal Karakterizasyonu*. Ankara: Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı.
- Auzans, E. Z.**,1999, Synthesis and properties of Mn-Zn ferrite ferrofluids. *Journal of Materials Science* 34, 1253-1260p.
- B. Huang, R. R.**,2013,The improvement of dispersibility of YIG precursor prepared via chemical coprecipitation. *Journal of Alloys and Compounds*, 558 , 56-61p.
- Bacri J.C. ve C. V.**,1987, Ionic ferrofluid: Optical properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 65 (2–3), 285–288p.
- Brinker, J. C.**,1990, Sol-Gel science, the physics and chemistry of Sol-Gel processing. *Academic Press Inc. Elsevier*.
- Bursa, N.**,1994, *Optiksel olarak aktif bazı maddelerin verdet sbitlerinin deneysel ölçümü: faraday olayı*. Bursa: Uuludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Carter, C. B. ve Norton, M. G.**,2007, Ceramic Materials: Science and Engineering. *Springer.*, 212–15 p.
- Cullity, B. D.**,2009, *Introduction to Magnetic Materials (2nd Ed.)*. United States of America., John Wiley & Sons.
- DiBiccari, A.**,2002, *Sol-gel processing of $R_xY_3-xAl_yFe_5-yO_{12}$ magneto-optical films*. Blacksburg, Virginia: , Virginia Polytechnic Institute and State University Material Science and En gineering Departmant Departmant, Master of Science Thesis.
- Diken, S.**,2013, *Co₉₀Fe₁₀ İNCE FİLMLERİN MANYETİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNE ALTIN ALT TABAKA ETKİSİ*. Kilis: KİLİS 7 ARALIK ÜNİVERSİTESİ.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dzibrou, D.**,2006, *Optical and Magneto-Optical Properties of Rare Earth Substituted Iron Garnets*. Stockholm: KTH,.
- E. Garskaite ve K. G.-J.**,2006,On the synthesis and characterization of iron-containing garnets (Y₃Fe₅O₁₂, YIG and Fe₃Al₅O₁₂, IAG). *Chemical Physics* 323 , 204–210p.
- E.J.J. Mallman ve A. S.**,2013, Yttrium IronGarnet: Properties and Applications Review. *Solid State Phenomena (Volume 202)*, 65-96p.
- Erol, M.**,2009, *Synthesis of Garnet Based Films by Sol-Gel Technique and Investigation of Their Magneto-optic Properties*. İzmir: Dkuz Eylül University,Graduate School of Natural and Apllied Sciences,.
- Ersoy, F. Ö.**,2011,*Magnetic and Structural Properties of Fe-Ni-Al Alloys*. İstanbul: Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Freiser, M.**,1968, A Survey of Magneto optic Effects . *Ieee Transactions On Magnetics*, Mag-4.
- Garskaite, E. G.-J.**,2006, On the synthesis and characterization of iron-containing garnets (Y₃Fe₅O₁₂, YIG and Fe₃Al₅O₁₂, IAG). *Chemical Physics*, 323: 204–210p.
- Ge J. ve H. Y.** 2007a, Superparamagnetic magnetite colloidal nanocrystal clusters. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 46 (23), 4342–4345p.
- Ge J. ve H. Y.**,2007b, Highly tunable superparamagnetic colloidal photonic crystals. *Angew. Chem. Int. Ed.* 46 , 7428 –7431p.
- Gözüak, F.**,2008, *Synthesis and Magnetic Characterization of CoxZn1-xFe2O4 Nanoparticles*. İstanbul: Yüksek Lisans Tezi, Fatih Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı.
- Haitao Xu, H. Y.** ,2008, Magnetic properties of Ce,Gd-substituted yttrium iron garnet ferrite powders fabricated using a sol–gel method,. *Journal of Materials Processing Technology*, 197, 296-300p.
- Holm, U. S.**,1984, Measurement system for magneto-optic sensor materials. *J. Phys. E: Sci. Instrum*, 17p.
- Huang M. ve Zhang S.Y.**,2002, Growth and characterization of cerium-substituted yttrium iron garnet single crysrals for magneto optical applications. *Applied Physics A*, 74, 177-180p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jiri Pinkas, V. R.**,2010, Sonochemical Synthesis of Amorphous Yttrium Iron Oxides Embedded in Acetate Matrix and their Controlled Thermal Crystallization toward Garnet ($Y_3Fe_5O_{12}$) and Perovskite($YFeO_3$) Nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry*,114(32), 13557-13564p.
- K.A. Wickersheim, R. B.**,1967, Optical Studies of Exchange in Substituted Garnets. *J. Appl. Phys.* 38, 1048p.
- Kahl, S.**,2004,*Bismuth iron garnet films for magneto-optical photonic crystals*. Stockholm: Royal Technical Institute.
- Kockar H.**,1998, *Magnetic Material Production Using A Novel Rotating Crystot and Their Magnetic And Structural Analysis*. 'University of Wales Cardif.
- Küçükdermenci, S.**,2012,*Manyetik Alana Duyarlı Koloidal Nanoparçacıkların Sentezlenmesi ve Yapısal, Manyetik, Manyeto-optik, Manyeto-kalorik Karakterizasyonu*. İzmir: Ege Üniversitesi.
- L.L. Hench, J. W.** ,1990,*Principles of Electronic Ceramics*. New York: Wiley.
- Lax, B. a.**,962,*Microwave Ferrites and Ferrimagnetics*. NY: , McGraw-Hill.
- M. Gomi, H. F.** ,1991,*J. Appl. Phys.* 70, 7065.
- M. Huang, S.-Y. Z.** ,2002,Growth and characterization of cerium-substituted yttrium iron garnet single crystals for magneto-optical applications. *Appl. Phys. A* 74, 177–180p..
- M.-Y. Chern, F.-Y. L.-R.-S.**,1999, Red shift of Faraday rotation in thin films of completely bismuth-substituted iron garnet $Bi_3Fe_5O_{12}$. *Jpn. J. Appl. Phys.*,, 38:6687.
- Ma, X.**,2000, Comparison on the crystallization characteristics of sol-gel derived $(BiDy)_3Fe_5O_{12}$ garnet film and powder. *Materials Letters*, 170-173p.
- Mathew, D. S.-S.**,2007,An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions. *Chemical Engineering Journal* 129, 51-65p.
- Mehta, R.**,2013,Polarization dependent extinction coefficients of superparamagnetic colloids in transverse and longitudinal configurations of magnetic field. *Optical Materials*, 1436–1442p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mou D.**,1998, *Complex oxide films for memory and detector Applications*. Stockholm: Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology Department of Electronics Solid State Electronics.
- Moulson, A. J.** ,2003, *Electroceramics*. West Sussex : John Wiley & Sons Ltd.
- Nihad A. Yusuf, A. A.-G.**,2002,Determination of Faraday rotation in a ferrofluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 282-284p.
- O. Ayala-Valenzuela, J. M.-A.-G.-C.**,2005, Magnetite-cobalt ferrite nanoparticles for kerosene-based magnetic fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , 37-41p.
- Okamoto, A.** ,2009,The Invention of Ferrites and Their Contribution to the Miniaturization of Radios . *IEEE Globecom Workshops.*, 1–42p.
- Omar, M. A.**,1993,Elementary Solid State Physics: Principles and Applications. United States of America. : Addison-Wesley Publishing Company.
- Özdemir, A.**,2012, R3Co29Si4B10 *Bileşiklerinin Manyetik Özellikleri*. Nevşehir: Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı.
- Öztürk, Y.**,2010,Garnet Esaslı Nano Filmlerin Üretilmesi ve Manyeto-Optik Özelliklerinin İncelenmesi. İzmir: Doktora tezi, Ege Üniversitesi.
- Pascher, H.**,2005,MAGNETO-OPTICS | Faraday Rotation, CARS, ODMR, ODSR, Optical Pumping. *Encyclopedia of Modern Optics*, 1-9p.
- Rastogi, A. a.**,2002,Magnetic properties of multilayers of nano thin Co,Ce-doped and undoped yttrium iron garnet films for magneto-optic applications. *Materials Science and Engineering*, B95, 131-136p .
- S. Geller, M. A.**,1957, Structure and ferrimanyetizm of yttrium and rare-earth-iron garnets, . *Acta Cryst*, 10, 239p.
- S. Higuchi, Y. F.**,1999,Jpn. J. Appl. Phys.38. 4122p.
- S. Hosseini Vajargah, H. M.**,2006, Synthesis of nanocrystalline yttrium iron garnets by sol–gel combustion process: The influence of pH of precursor solution. *Materials Science and Engineering B* 129 , 211-215p.
- Sahsah, H. D.**,2000,,A new method of birefringence measurements using a Faraday modulator. Application to measurements of stress-optical coefficients. *Meas. Sci. Technol.*, 11, 46–50p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Scherer, C. a.**,2005,Ferrofluids: properties and application. *Brazilian Journal of Physics*, 35 (3A), September.
- Scherer, J. L.**,1970,Model of the polar ion-exosphere. *Planetary and Space Science*, 103-120p.
- Schwarzer H.C., P. W.**,2004,Tailoring particle size through nanoparticle precipitation. ,*Chem. Eng. Commun.*,191,, 580p.
- Scott, G. L.**,1975,The Optical Absorption and Magneto-Optical Spectra of YIG, . *Phys. Rev. B* 12,, 2562 p.
- Sekijima, T. T.**,1999,Optical faraday rotator using Ce-substituted fibrous YIG Single crystal grown by floating-zone method with YAG laser heating. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 47: 12, 2294-2298p.
- Serway, R.**,1996, *Physics (IV. Kısım)*, . Ankara: Çev. Editörü: Çolakoğlu, K., Palme Yayıncılık.
- Shengli Pu, M. D.**,2010,Longitudinal field-induced polarized light transmittance of magnetic fluids. *Optics Communications*, 4012–4016p.
- Simsa Z., L. G.-M.** ,1984, *IEEE Trans. Magn.* 20, 1001p.
- Spaldin, N. A.**,2011, *Magnetic Materials: Fundamentals and Applications*. United States of America.: Cambridge University Press.
- Standley, K.** ,1972, Oxide Magnetic Materials. 2 Edn. Clarendon Press, Oxford .
- Stoev, K. A.** ,1997, Recent Theoretical Models in Grazing Incidence XRay Reflectometry. . *The Rigaku Journal* 14,, 22-37p.
- Sugano, S. a.**,1999,Magneto-optics, 137- 173, Faraday and Kerr Effects in Ferromagnets, Shinagawa K. (Eds.). Berlin: Springer, 328p.
- Swapna. S. Naira, S. R.**,2006,Magnetic field-induced cluster formation and variation of magneto-optical signals in zinc-substituted ferrofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 28-34p.
- V. Priye, B. P.**,1998,Analysis and Design of a Novel Leaky YIG Film Guided Wave Optical Isolator. *J. Lightwave Technol.*, 16: 2, 246-250p.
- Visnovsky, S. P.**,2001,Magneto-optic polar Kerr and Faraday effects in periodic multilayers. *Optics Express*, 158-162p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wei, Z. G.**,2011,Low-temperature synthesis and microstructure-property study of single-phase yttrium iron garnet (YIG) nanocrystals via a rapid chemical coprecipitation. Materials Chemistry and Physics, 646–651p.
- Wikipedia.**,2014,Polarization. Haziran 10, 2014 tarihinde <http://en.wikipedia.org/wiki/Polarization> adresinden alındı
- Xu H. Yang, H. X.**,2007,Magnetic properties of Ce, Gd-substituted yttrium iron garnet ferrite powders fabricated using a sol-gel method. Journal of Materials Processing Technology, 296-300p.
- Xu, H. a.**,2008,Magnetic properties of YIG doped with cerium and gadolinium ions. J Mater Sci: Mater Electron 19, 589–593p.
- Yarıçı İ., Y. S.** 2014. Investigation of Magnetic and Magneto-Optical Properties of Garnet Based Magnetic Fluid. International Conference on Semiconductor Material (ICSM 2014). Antalya.