

Akım Algılayıcı Uygulaması için Manyeto-Optik Ölçüm Düzenneği

Magneto-Optical Measurement System for Current Sensor Application

Özer Öneren¹, Yavuz Öztürk¹

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ege Üniversitesi
yavuz.ozturk@ege.edu.tr, ozeroneren@gmail.com

Özet

Bu çalışmada, 632.8 nm dalga boyunda çalışan manyeto-optik Faraday etkisi ölçüm sistemi tasarımı lazer modülasyon tekniği ile gerçekleştirildi. Manyetik alan ölçüm hassasiyeti için önemli olan 0.05 derece küçüklükte Faraday açısı ölçülebilmektedir. Sistemde bulunan cihazlar LabVIEW programı ile kontrol edildi ve elde edilen veriler, teorik sonuçlar ile karşılaştırıldı. Sistemde sırasıyla 0-40A ve 0-2A doğru akım aralığında çalışan iki farklı manyetik alan kaynağı kullanıldı. BK7 tipi cam ve MR3-2 tipi manyeto-optik malzemenin, akım algılayıcı olarak kullanımları tartışıldı.

Abstract

In this study, magneto-optical Faraday Effect measurement system works at 632.8 nm wavelength was designed with laser modulation technique. System is capable of measuring 0.05 degree Faraday angle which is important for magnetic field measurement sensitivity. Devices were controlled with LabVIEW program and obtained data compared with theoretical results. System operated with two different magnetic field source with 0-40A and 0-2A direct current source. The usage of BK7 type glass and MR3-2 type magneto-optical material in current sensor were discussed.

1. Giriş

1845 yılında Michael Faraday tarafından ışık doğrultusunda uygulanan manyetik alanın malzeme içinden geçerken ışık polarizasyonunun değiştirdiği keşfedilmiştir. Manyeto-optik (MO) Faraday etkisi olarak adlandırılan bu keşif birçok çalışmanın ve teknolojik gelişmenin ilk adımını atmış oldu. Bu etkinin uygulama alanlarını optik izolatör, akım ve manyetik alan sensörü, metal yüzeylerde çatlakların belirlenmesi, MO kayıt ortamları olarak sayabiliriz [1-5]. Bu çalışmada kullanılan BK7 ve MR3-2 tipi cam ticari olarak bulunmaktadır ve uygulanan manyetik alanla Faraday açısı değişimi doğrusaldır. Bu sebeplerle çok daha yüksek MO özelliğe sahip fakat histerisiz özelliği gösteren garnet [6] tipi materyallere karşılaştırıldığında doğrusal özellik göstermeleri açısından sensör uygulamaları açısından avantajlıdır.

Manyetik alana bağlı polarizasyon değişimi küçük olan malzemelerde ve düşük manyetik alan altında yapılan ölçüm çalışmalarında hassasiyeti yüksek bir sistem tasarımı

gerektirmektedir. Sistem hassasiyeti bu sebeple modülasyon tekniği kullanılarak tasarlanmış ve Lock in Amplifier kullanılarak modüle sinyal rms değeri okunmuş ve okunan değerler bilgisayara aktarılmıştır. Cihaz kontrolleri LabVIEW (v8.00) programı ile bilgisayar arayüzü olarak GPIB kart, USB seri port kullanılarak kontrol edildi. Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi MATLAB(v7.0) programında gerçekleştirildi. Bu çalışma, sistemin tanıtımı, teorik hesapların açıklanması, deney sonuçları ve elde edilen sonuçların kullanılan MO camların akım sensörü olarak kullanılmalarının tartışılması bölümlerini içermektedir.

2. Manyeto-optik Ölçüm Sistemi

Değişik tekniklerle manyeto-optik ölçüm sistemleri kurmak mümkündür. Bu tekniklerin temelinde birbirine dik yerleştirilmiş iki polarizör kullanılmaktadır. İdealde en basit seçenek olan dik polarizör tekniğinde örnek yokken 0 ışık şiddeti örnek varken malus kanununa göre $I = I_0 \cdot (\cos \theta)^2$ ile orantılı şiddette ışık şiddeti ölçülmesi

beklenmektedir. Buradan θ açısı çekilerek malzemeden kaynaklanan polarizasyon açısı değişimi ölçülmektedir. Ancak sistem elemanlarının ideal olmaması ve gürültüler ölçüm hassasiyetini azaltmaktadır. Ölçülecek sinyalin küçük açı değişimlerinde oldukça küçük olduğu göz önüne alınırsa; sistem hassasiyetini arttırmak için modülasyon ve lock in teknikleri kullanılması gerekmektedir.

2.1. Sistem Tanıtımı

Sistem şeması Şekil 1.'de gösterilmiştir. Tasarlanan sistemde ışık kaynağı olarak ilk aşamada 632.8 nm dalga boyunda 0.5 mW ışık gücünde He-Ne lazer kullanılmıştır. Polarizör olarak, ışının açılı gelmesi durumunda çalışabilmesi, sönme (extinction) oranı yüksek (1:105) olması ve dalga boyu aralığının geniş (350-2300 nm) olması avantajları dikkate alınarak Glan-Thompson polarizör seçildi. Analizör olarak Glan-Thompson tipi polarizör ve 1o/800 dönme açısına sahip step motorlu, bilgisayar kontrollü döndürme platformu kullanılmıştır. Işık modülasyonu için optik kesici ve fotodedektörden elde edilen modüle sinyali okunması için SR830 Lock in Amplifier kullanılmıştır. Fotodedektör 60 dB kazançta ve 10kHz alçak geçiren filtre olarak çalıştırılmıştır. 20V-50A anma gerilim ve akım değerlerine sahip bilgisayar

kontrollü güç kaynağı ve elektromıknatis kullanılmaktadır. Ancak Faraday etkisi ölçümlerinde uygulanan manyetik alan ile ışık şiddetinin aynı yönde olması gerekliliğinden dolayı elektromıknatis kutuplarındaki nüveler çıkarılarak sargıları kullanılmıştır. Bu sayede uygulanan akımla doğrusal değişim oluşturabilecek en fazla 800 Gauss manyetik alan değeri gözlenen manyetik alan kaynağı oluşturulmuştur. Diğer manyetik alan kaynağı olarak 300 sargılı bobin kullanılmıştır. Arayüz olarak GPIB (IEEE488) kartı kullanılmıştır. Program olarak MATLAB ve LabVIEW programları kullanılmıştır. Labview'de yazılan program ile analizör açısı polarizör açısına göre 90° olacak şekilde otomatik ayarlanmaktadır. Labview den elde edilen veriler MATLAB programında veri eşleştirilmesi yapılarak ölçüm değerleri ile teorik sonuçlar arasındaki uyum görülmüştür.

2.2. Teorik Hesaplamalar

Sistemde kullanılan optik elemanları Jones matrisleri ile ifade etmek mümkündür.

Koordinat eksenini döndürme:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Polarizör ve Analizör:

$$A = P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\beta_F = V \int B^* dl, \quad M = \begin{bmatrix} \cos \beta_F & \sin \beta_F \\ -\sin \beta_F & \cos \beta_F \end{bmatrix} \quad (3)$$

Yukarda verilen matrislerde: β_F Faraday açısı, θ Koordinat ekseninin seçilen başlangıç eksenine göre dönme açısı, V malzemenin Verdet sabiti, B Uygulanan manyetik alan, l Malzemenin uzunluğu olarak kullanılmıştır. İşlemleri basitleştirmek için polarizör sonucu oluşan doğrusal polarize ışığın polarizasyon eksenini x eksenini kabul edilmiş ve ışık şiddetini $I = I_0$ olarak alınmıştır. Foto-detektörde oluşacak ışık elektrik alan bileşenleri 1, 2, 3 denklemleri kullanılarak elde edilir.

$$E = ATME$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_F & \sin \beta_F \\ -\sin \beta_F & \cos \beta_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

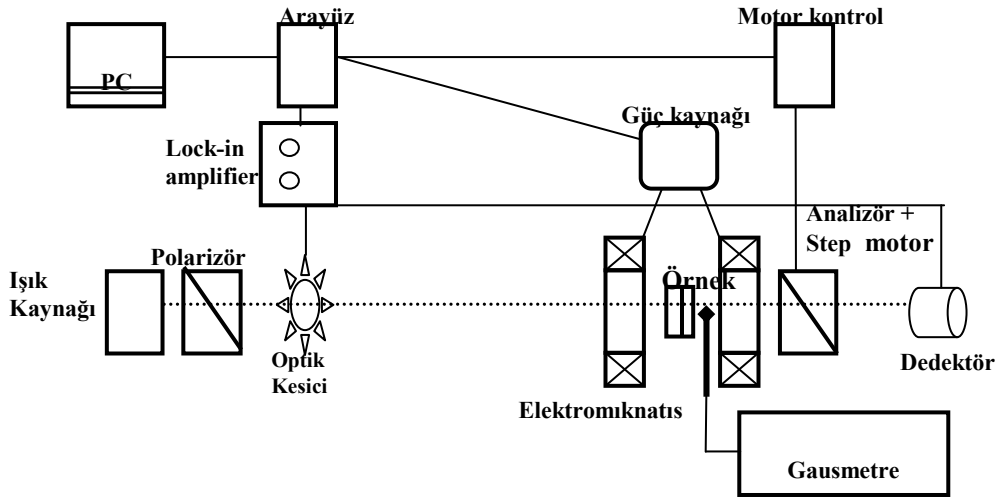
$$= \begin{bmatrix} \cos A \cos \beta_F - \sin A \sin \beta_F \\ 0 \end{bmatrix}$$

A açısı x eksenine (seçilen polarizör açısı) göre analizör açısı olacak şekilde hesaplanabilir. Bu elektrik alan bileşenleri kullanılarak bizim için asıl önemli olan ışık şiddeti elde edilebilir.

$$I = E^* E = I_0 \cos^2 (A + \beta_F) \quad (5)$$

2.3. Sistemin Çalışması

Sistemin blok şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. Lazer demeti 1. polarizörden geçirilerek polarize ışık elde edilir. Polarize



Şekil 1. Manyeto-optik ölçüm sistemi

MO cam:

ışık optik kesiciden (chopper) geçirilerek modüle edilir. MO camlar bobin ve elektromıknatis sargıları arasında olacak şekilde iki ayrı yapılandırmada yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. Manyetik alan kaynakları DC akım kaynağı (Kepco

marka) kullanılarak sürülmüştür. Oluşturulan manyetik alan gaussmetre cihazı ile ölçülmüştür. Örnek malzemede oluşturulan ışık ile aynı doğrultuda oluşturulan manyetik alan

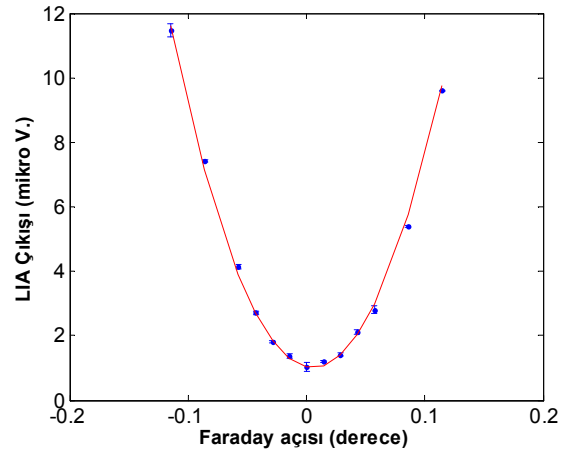
sebebiyle geçen ışığın polarizasyonunda β_F açısında sapma olur. En son olarak analizörden geçen ışık foto-diyota ulaşır. Optik kesiciden dolayı dedektör çıkışından elde edilen sinyal kare dalga şeklinde olacaktır. Foto-diyot üzerinde oluşan bu gerilim lock-in amplifier (LIA) yardımıyla ölçülür. LIA tek frekansta dar bir bantta ölçüm almak için kullanılan cihazdır. LIA giriş sinyali ile optik kesiciden elde edilen referans sinyali çarpmakta ve çıkışını alçak geçiren filtreden geçirerek, kare dalga sinyalin 1. harmoniğinin rms değerini ölçmektedir. Bilgisayar ile analizördeki step motor kontrolünün sağlanması ve foto-diyot çıkışında ölçülen değerlerin bilgisayara aktarılması Labview programıyla oluşturulmuş bir arayüz ile sağlanmıştır. Labview'de yazılan program ile analizör açısı polarizör açısına göre 90° olacak şekilde otomatik ayarlanmaktadır. Bu işlem LIA'da okunan en küçük değer elde edilene kadar step motor düzeneği ile analizörün döndürülmesi şeklinde yapılmaktadır. Denklem 6'da ışık şiddetinin açıya bağlı teriminin değişiminde görüldüğü gibi, sistemin açı değişimlerine en hassas olduğu açı 45° iken en az değişim 0° ve 90° de gözlenmektedir. Bu sebepten sistemde analizör açısının 90° 'ye tam ayarlanmasında zorluğa sebep olmaktadır. Sistemdeki gürültüden ve optik kesici ile LIA arasındaki faz farkının sürekli değişiminden dolayı sistemin 90° 'ye ayarlanmasında sapma gözlenmektedir. Sistemi daha hassas hale getirmek için manyetik alan her iki yönde aynı şiddette uygulanarak ve okunan değerlerin ortalaması eşitlenene kadar tekrar analizör açısı değiştirilerek okunan değerlerde simetri elde edilmektedir.

$$\frac{d(\cos^2(\varphi))}{d\varphi} = 2 \sin \varphi \cos \varphi = \sin 2\varphi \quad (6)$$

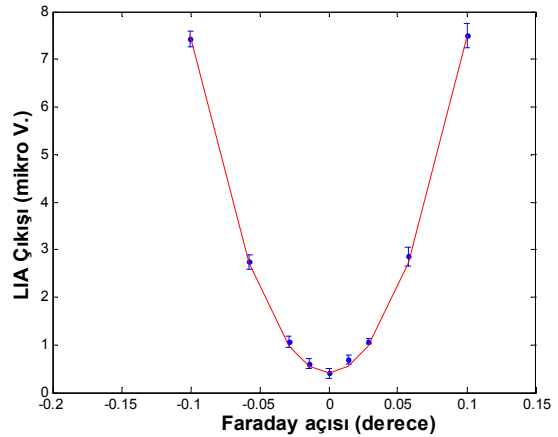
3. Deneyel Sonuçlar

BK7 tipi ve MR3-2 tipi camların Verdet sabitleri 632.8 nm dalga boyu için sırasıyla $2.3^\circ/\text{T.cm}$ [7] ve $55^\circ/\text{T.cm}$. [8] olduğu bilinmektedir. Sistemde ilk olarak BK7 tipi cam için ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümlerde analizör açısı step motor kontrolü ile polarizör açısına göre dik konuma getirilerek foto-diyot çıkışı LIA ile ölçülebilen en küçük değere çekilmiştir. Ancak dik açı durumunda sinyal LIA ile ölçülen gürültü seviyesinin altında kalmakta ve açı değişimlerine karşı gösterdiği değişim azalmaktadır. Bu yöntemle açı dik olarak ayarlandıktan sonra, $\pm 0.08 \text{ T}$ manyetik alan aralığında yapılan ölçüm Şekil 1'de gösterilmiştir. Ancak oluşan şeklin y eksenine göre simetrik olmadığı görülmektedir. Teorik olarak hesaplama yapıldığında ve deneysel veri ile eşleştirildiğinde 0.006° kayma olduğu gözlenmiştir. Kurulan sistemde analizör ve polarizör açısı dik olarak ayarlanmasına rağmen daima 0.3 ila $1.1 \mu\text{V}$ arasında değişen seviyede sinyal değeri okunmuştur. Değerin tam olarak sıfırlanamaması sebebi olarak sistem elemanlarının ideal olmaması, sistemdeki hizalama hataları ve elektriksel gürültüler görülmektedir. Ölçümlerde LIA çıkışındaki değişim (hata) miktarı $0.41 \mu\text{V}$ olarak ölçülmüştür. Şekil 3.'te ise açı ayarlaması $+0.06 \text{ T}$ ve -0.06 T

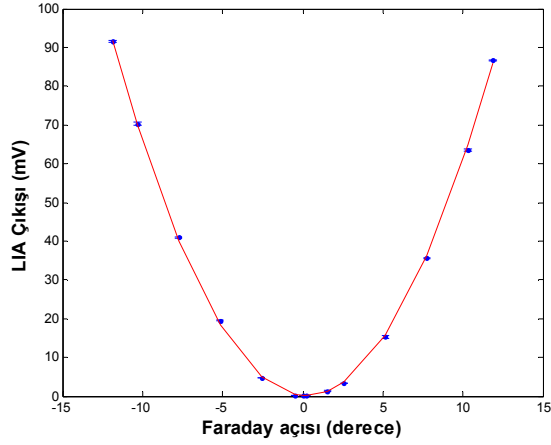
için okunan LIA değerleri eşitlenerek yapılmıştır. Aradaki fark $0.1 \mu\text{V}$ olana kadar step motor açısı değiştirilmiştir. Böylece teorik olan değerle uyum, kayma miktarı azaltılarak elde edilmiştir. Şekil 4.'te ise MR3-2 tipi malzeme için manyetik alan uygulanması sonucunda ölçülen açı değişimine karşılık LIA sinyal değişimi gösterilmiştir. Teorik hesaplama ile uyum elde edilmiştir. Malzeme uzunluğunun ve Verdet sabitinin yüksek olmasından dolayı 12° gibi yüksek faraday açısı değişimi gözlenebilmiştir.



Şekil 2. Değişen manyetik alan altında BK7 camda oluşan Faraday açısının ışık şiddetine bağlı çiziminin teorik ve deneysel sonuçları. (hata çubuğu ile gösterilen noktalar deneysel, sürekli çizim ise teorik hesaplama sonucu çizdirilmiştir)



Şekil 3. Değişen manyetik alan altında BK7 camda oluşan Faraday açısının ışık şiddetine bağlı çiziminin teorik ve deneysel sonuçları. (o ile gösterilen noktalar deneysel, sürekli çizim ise teorik hesaplama sonucu çizilmiştir)



Şekil 4. Değişen manyetik alan altında MR3-2 camda oluşan Faraday açısının ışık şiddetine bağlı çiziminin teorik ve deneysel sonuçları.(hata çubuğu ile gösterilen noktalar deneysel, sürekli çizim ise teorik hesaplama sonucu çizilmiştir)

Şekiller manyetik alan altında dönen polarizasyon durumuna bağlı olarak ölçülen ışık şiddeti değerini göstermekte ve Denklem 5 ile gösterilen teorik değerlerle örtüşmektedir. Bu durum ölçüm sisteminin çalışırlığını göstermektedir.

4. Sonuçlar

İki tip malzeme içinde teorik hesaplamalar ile deneysel verilerin uyumu gösterilmiştir. İki tip malzemenin de akım algılayıcı olarak kullanımı mümkündür. BK7 tipi malzemenin Verdet sabiti düşük olmasına rağmen sistem hassasiyeti basit modülasyon tekniği ile artırılırken aynı zamanda yeterli derecede manyetik alan oluşturacak kaynağa bağlı olarak akım algılayıcı olarak kullanılabilir. Benzer şekilde MR3-2 çok daha küçük akım değerlerinde kullanılabilir. Ayrıca bu iki sistem akım değişimlerinin büyük olduğu sistemlerde melez olarak kullanılabilir.

5. Kaynaklar

- [1] Sayıcı, A. "Magneto-Optik Faraday Etkisi ile Manyetik Alan Ölçümü", *Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2004.
- [2] Dubowski, J. J., Lebecki, K. ve Buchanan, M., "Fiber Optic CdMnTe Magnetic Field Sensor Made by the Laser Ablation Deposition Technique", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* Vol.42 No.2, 322-325, 1994.
- [3] Hansen, R. W., Helseth, L. E., Solovyev, A., Il'Yashenko, E. ve Johansen, T. H., "Growth and Characterization of (100) Garnets for Imaging", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 272-276, 2247-2249, 2004.
- [4] Sahrah, H., Djendli, S. ve Monin, J., "A New Method of Birefringence Measurements Using a Faraday Modulator-

Application to Stress Measurements.", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 386-389, 3 May 1999.

- [5] Deng, Y., Liu, X., Fan, Y., Zeng, Z., Udpal, L. ve Shih, W., "Characterization of Magneto-Optic Imaging Data for Aircraft Inspection", *IEEE Transactions on Magnetic*,s Vol.42.No.10, 3228-3230, 2006.
- [6] Higuchi, S., Ueda, K., Yahiro, F., Nakata, Y., Uetsuhara, H. ve Okada, T., Maeda, M. "Fabrications of Cerium-Substituted YIG Thin Films for Magnetic Field Sensor by Pulsed-Laser Deposition", *IEEE Trans. On Magn.*, 37, 2451-2453, 2001.
- [7] Jain A., Kumar J., Zhou F., and Li L. ve Sukant, T., "A simple experiment for determining Verdet constants using alternating current magnetic fields", *Am. J. Phys.* 67(8), 1999
- [8] <http://www.xaot.com/sdp/173803/4/pd-1017034/351350-1498519.html>