

Caracterización de los efectos Faraday y Kerr en películas finas de Co para el diseño de un sensor magneto-óptico.

G. Robles^a, J.R. Sendra^b, J.L. Costa^c, F. Briones^d, A. Cebollada^e, R. Giannetti^f

^{a,f} Universidad Pontificia Comillas. Alberto Aguilera 23. 28015 Madrid.

Tel: +34 91 5422800 Fax: +34 91 5411132.

^b Universidad de Las Palmas de Gran Canaria Tel: +34-928452875 Fax : +34-928451243

^{c,d,e} Instituto de Microelectrónica de Madrid, CSIC-CNM Isaac Newton, 8 28760 Tres Cantos, Madrid

Tel: +34 91 8060700 Fax: +34 91 8060701

^a grobles@upco.es ^b jrsendra@cma.ulpgc.es ^c kramer@imm.cnm.csic.es ^d briones@imm.cnm.csic.es

^e alfonso@imm.cnm.csic.es ^f romano@upco.es

Resumen

A la hora de diseñar un sensor de corriente magneto-óptico, es básico caracterizar qué efecto, Faraday o Kerr, produce un mayor giro del plano de polarización de la luz. Se han tomado medidas experimentalmente bajo las mismas condiciones de excitación magnética que dan una primera idea de qué efecto puede ser el más conveniente.

Introducción

En general un sensor óptico de corriente es un dispositivo que mide la integral sobre una línea del campo magnético creado por una corriente.

Desde que en 1973, el británico Rogers propusiera hacer medidas de intensidad con métodos ópticos, se han desarrollado multitud de técnicas que se pueden englobar en cuatro grandes grupos [1,2]:

1. Sensores de corriente con fibra óptica [3]. Se hace pasar una luz polarizada por una fibra óptica enrollada al conductor. Cuanto mayor sea el número de vueltas mayor será el camino recorrido por la luz y el ángulo de desviación respecto del plano de polarización será mayor. El problema más importante que tiene este método es la birrefringencia de la fibra es dinámica y descalibra la medida.
2. Sensores de corriente con cristales de alta constante de Verdet [4]. El camino recorrido por la luz influenciada por el campo magnético, es menor. Sin embargo se utilizan cristales con una constante de Verdet elevada de tal modo que el efecto Faraday sea grande. El inconveniente de este método son las reflexiones de la luz dentro del material al rodear al conductor; se conoce como la 'diferencia de fase inducida por la

reflexión' (*reflection-induced phase difference*), y en definitiva es un desplazamiento del ángulo de polarización al reflejarse la luz con un ángulo de incidencia por encima del crítico.

3. Sensores de corriente híbridos. No es un sensor óptico por sí mismo, utiliza transformadores de corriente, sin embargo, el aislamiento entre la etapa de alta tensión y la medida se hace mediante la modulación-demodulación de luz.

4. Sensores de campo magnético utilizados como sensores de corriente. Se basan principalmente en el efecto magnetoscrítico.

En los dos primeros métodos, lo que se pretende es girar el plano de polarización de la luz, mientras que en los dos siguientes los efectos medidos son distintos.

Los estudios realizados para aprovechar las propiedades ópticas de algunos materiales van encaminados a solucionar las limitaciones de métodos más tradicionales de medida como los transformadores de corriente. Las principales ventajas de los sensores ópticos son:

1. Aislamiento total entre las líneas de alta tensión y el aparato de medida ya que la unión entre ellos es óptica.
2. Es mucho más difícil que haya saturación ya que el campo magnético cae rápidamente con la distancia. En el caso de sensores utilizando fibra óptica o cristales con alta constante de Verdet la saturación es difícilmente alcanzable.
3. Es inmune a las interferencias electromagnéticas.
4. Respuesta lineal en un amplio espectro de frecuencias, pudiendo llegar hasta los GHz.

5. En comparación con los transformadores de corriente, son sensores mucho más ligeros, pequeños y potencialmente más baratos.

Efecto Faraday

Cuando una luz polarizada en un plano, atraviesa un material imanado en la misma dirección que lleva la luz, el plano de polarización es alterado y rota un ángulo θ . La rotación es proporcional al camino seguido por la luz, a la intensidad de campo magnético aplicado y a una constante dependiente del material llamada constante de Verdet [1,2,4]:

$$\theta = \int_l V \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

Como el rotacional del vector \mathbf{H} es proporcional a la intensidad eléctrica, el ángulo de giro del plano de polarización θ es también proporcional a la intensidad. El efecto Faraday es en transmisión porque la luz atraviesa el material.

Efecto Kerr

El efecto Kerr es, asimismo, la variación del plano de polarización que sufre la luz polarizada al ser reflejada por un material sometido a un campo magnético [5,6]. Hay tres tipos de efectos atendiendo a la dirección del campo magnético y al plano de incidencia de la luz [7]:

1. El vector \mathbf{M} de magnetización es paralelo al plano del material y al plano de incidencia de la luz. Es el Kerr longitudinal.
2. \mathbf{M} es paralelo al plano del material y perpendicular al plano de incidencia de la luz y se llama Kerr transversal.
3. Por último, cuando \mathbf{M} es perpendicular al plano del material se denomina Kerr polar.

Esquemas y procedimientos de medida

El material que se utiliza para el efecto magneto-óptico es cobalto depositado sobre vidrio mediante pulverización catódica (*sputtering*). La presión base de la cámara de vacío fue de 10^{-6} milibares y la deposición se realizó a 10^{-2} introduciendo gas argón. Se había sometido a un proceso de precalentamiento para eliminar el agua que pudiera haber dentro.

Lo que se pretende es caracterizar nuestras muestras de cobalto y determinar qué efecto, Faraday o Kerr es más fuerte. De momento sólo se considerará la configuración polar.

Como el efecto Faraday es en transmisión, las películas de cobalto deben ser finas para dejar pasar la luz. El inconveniente es que cuanto más delgadas, se obtiene menos rotación del plano de polarización. En la ecuación, el

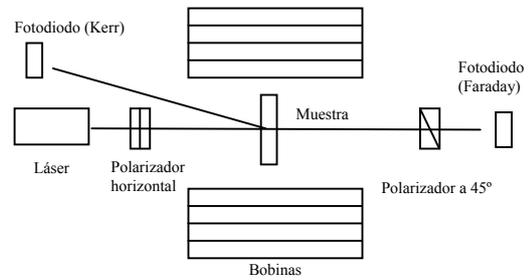


Figura 1. Esquema del montaje experimental para la medición de los efectos Kerr y Faraday.

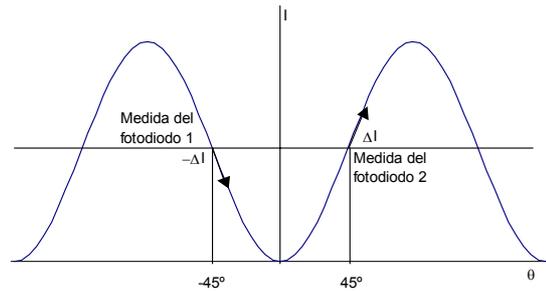


Figura 2. Posición de los puntos de trabajo de los dos haces de luz desfasados entre sí 90° por un prisma de Wollaston.

término importante es la constante de Verdet, V , porque I es del orden de Å .

Cuando se quiere medir el Kerr polar, las películas han de ser gruesas para que haya una gran reflexión. El grosor tiene un límite porque la luz no atravesará siempre toda la película.

Para las medidas realizadas se depositó Co sobre vidrio en 8 espesores diferentes. Para el efecto Faraday se tomaron muestras de 50, 100, 150 y 200 Å y para el Kerr polar, de 200, 1000, 1500, 2000 y 2500 Å .

El emisor de luz (Figura 1) es un láser de 0,1 mW con una longitud de onda entre 620 y 690nm. Las bobinas que crean el campo magnético son capaces de proporcionar 70 Oe/A y en las pruebas realizadas el pico de intensidad fueron 5A; son alimentadas con una fuente Kepco bipolar a una frecuencia de 2Hz. Como la luz del láser está parcialmente polarizada se colocó un polarizador fijo antes de la muestra, el otro se regula con un goniómetro para ajustar su posición a 45° de la luz de entrada. En cuanto al elemento sensor de luz, se utilizó un solo fotodiodo PIN.

El uso de los polarizadores en el montaje es imprescindible y además deben estar desfasados 45°. Este es el punto en que la variación de la intensidad luminosa con el ángulo de polarización es máxima.

Al trabajar con los polarizadores a 45°, se obtiene una componente continua que es la mitad de la máxima intensidad luminosa, pero la pendiente también es máxima, ya que es un punto de inflexión, y las variaciones son muy lineales.

Por otra parte, tener los polarizadores a 45° puede dar una ventaja adicional si se divide la luz reflejada o transmitida en dos haces que estén polarizados entre ellos 90°. Para ello se utiliza un prisma de Wollaston. Se hacen incidir sobre

dos fotodiodos colocados con los ánodos enfrentados y entonces se obtienen dos puntos de trabajo según la curva de la figura 2. Las componentes continuas de intensidad se anulan entre ellas y las componentes debidas a la excitación magnética se doblan. De esta manera se disminuye de una manera muy notable la molesta componente continua y se dobla la señal que interesa. El mayor inconveniente de este montaje es el coste del cristal de Wollaston que puede hacer prohibitivo su uso.

Se podría evitar la componente continua si el ángulo que forman fuera 90° porque sin excitación, la señal recibida sería nula. Al aplicar una excitación magnética el giro de polarización de la luz cambia ligeramente este punto de trabajo obteniéndose una medida. El problema es que la variación es mínima y no lineal. La curva que relaciona intensidad luminosa con ángulo de giro o ángulo relativo de los polarizadores es un coseno al cuadrado, por lo que alrededor de los 90° la pendiente es muy pequeña y el comportamiento poco lineal.

Se puede conseguir el mismo efecto si se utiliza un fotodiodo de cuadrante conectado según la figura 3. El que se utilice un fotodiodo de cuadrante y no uno doble es para compensar cuando la luz incide de manera desigual en cada una de las zonas. En el caso del fotodiodo doble, si el haz está desplazado hacia la derecha o la izquierda, una de las zonas recibirá más señal que la otra. Si se utiliza uno de cuadrante, la desviación en cualquiera de los ejes implica que un par de fotodiodos recibirán más señal mientras que los opuestos por el vértice tendrán menos, compensando así la excentricidad.

En cada uno de los fotodiodos se interponen unas láminas polarizadoras cruzadas a 90° y se hace incidir la luz láser a la zona sensible. De esta manera habrá sin duda un error mayor y más ruido, pero es mucho más barato.

En el circuito electrónico (fig. 4) se pueden destacar cuatro

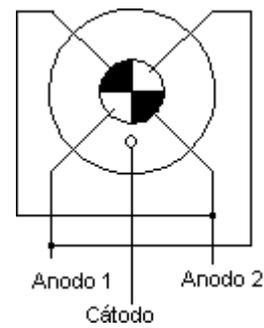


Figura 3. Esquema de conexión del fotodiodo de cuadrante. Las zonas sombreadas corresponden a los cuadrantes polarizados a 90° respecto a las zonas sin sombrear.

bloques principales. En primer lugar, un par de amplificadores de intensidad que reciben la señal directamente del fotodiodo de cuadrante. Este está polarizado inversamente para que trabaje como elemento fotoconductor ya que su comportamiento es mucho más lineal. El segundo bloque lo forma un amplificador diferencial de ganancia unidad encargado de restar las dos señales anteriores. La tercera parte es un filtro paso bajo de Chebyshev con una frecuencia de corte de 0,1 Hz que permite eliminar por completo la señal continua residual que puede quedar por la inexactitud de las resistencias utilizadas en los amplificadores anteriores. El último bloque es un amplificador de instrumentación que resta la señal amplificada directamente del fotodiodo de su componente continua y da una medida proporcional al ángulo de giro θ .

El mayor problema que se plantea a la hora de realizar la medida es que las variaciones de señal respecto a su componente continua son muy pequeñas. La parte de la intensidad total del fotodiodo debida al efecto magneto-óptico es del orden de pA, mientras que su componente continua es del orden de uA.

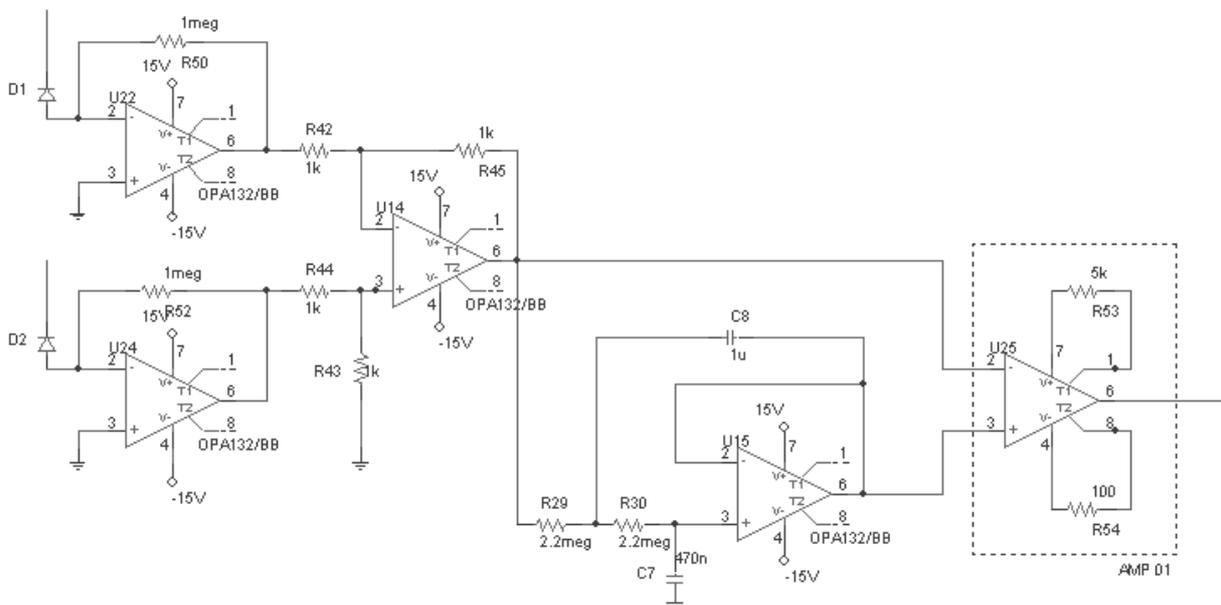


Figura 4. Circuito electrónico del sensor magneto-óptico

Las medidas obtenidas son filtradas con Matlab. Se elimina el ruido que introduce el sistema obteniéndose la señal correspondiente a la frecuencia del campo magnético. La señal, como la excitación, es una senoidal. Se normaliza respecto al valor de continua que ha sido eliminado para que las variaciones sean sobre un coseno al cuadrado de amplitud 1. La amplitud de la señal será proporcional a la máxima variación de θ sobre un coseno cuadrado y a partir de un punto de trabajo situado a 45° . En la tabla 1 se muestran los resultados en cada uno de los efectos, θ está en radianes.

	Efecto Faraday	Efecto Kerr polar
50 Å	177×10^{-6}	
100 Å	198×10^{-6}	
150 Å	344×10^{-6}	
200 Å	410×10^{-6}	38.7×10^{-6}
1000 Å		74.5×10^{-6}
1500 Å		134×10^{-6}
2000 Å		116×10^{-6}
2500 Å		93×10^{-6}

Tabla 1.

Como se puede observar, el efecto Faraday es notablemente más fuerte que el Kerr polar.

El máximo giro en las medidas anteriores es cuando utilizamos un cristal de 200 Å en el efecto Faraday. El inconveniente es que con ese grosor la luz transmitida es muy poca y la señal recibida por el fotodiodo es muy pequeña.

Conclusiones

A la luz de estas primeras medidas, parece evidente que el efecto Faraday es el más indicado para medir intensidades de corriente eléctrica. No obstante conviene primero centrar los esfuerzos en las dos siguientes cuestiones para obtener una idea más precisa y tomar una decisión más acertada.

Por un lado se tratará de que las muestras de cobalto proporcionen un giro mayor. Para ello se está pensando en aprovechar los efectos interferenciales que se producen al depositar o crecer distintos materiales en capas. Existen diferentes artículos [8,9,10] en los que se estudia la mejora de los efectos magneto-ópticos al alternar capas magnéticas con no magnéticas.

Por otro lado, se está mejorando la parte electrónica del sensor para tratar de eliminar el ruido en señales tan pequeñas. Se han escogido operacionales de bajo ruido, OPA132 con $8 \text{ nV}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ y se ha introducido la tarjeta del sensor dentro de una caja metálica. La señal es adquirida a través de un cable coaxial. El fotodiodo era exterior en un primer esquema, pero posteriormente su conexión con el sensor también se incluyó dentro de la caja. Es muy posible que en montajes futuros se integre dentro de la placa para evitar en la mayor medida posible el que haya conexiones largas entre el fotodiodo y la propia placa. Asimismo se están considerando distintas configuraciones que permitan una máxima amplificación en la primera etapa para que la relación señal-ruido sea lo menor posible.

Referencias

- [1] Z.P. Wang, S.Q. Zhang, L.B. Zhang. Recent advances in optical current-sensing techniques. *Sensors and actuators A* 50 (1995) 169-175
- [2] Y.N. Ning, Z.P. Wang, A.W. Palmer, K.T.V. Grattan. Recent progress in optical sensing techniques. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol 66, N°5 (1995) 3097-3111
- [3] T.W. MacDougall, D.R. Lutz, R.A. Wandmacher. Development of a fiber optic current sensor for power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 7, N°2 (1992). 848-852
- [4] Y.N. Ning, Z.P. Wang, A.W. Palmer, K.T.V. Grattan. A Faraday current sensor using a novel multi-optical-loop sensing element. *Meas. Sci. Technol.* 6 (1995) 1339-1342.
- [5] S.A. Oliver, C.A. DiMarzio, S.C. Lindberg, S.W. McKnight, A.B. Kale. Measurement of magnetic fields using the magneto-optic Kerr effect. *Appl. Phys. Lett.* 63 (3), (1993). 415-417
- [6] D.Weller, G.R. Harp, R.F.C. Farrow, A. Cebollada, J.Sticht. Orientation Dependence of the Polar Kerr Effect in fcc and hcp Co. *Physical Review Letters* Vol 72, N° 13,(1994).2097-2100
- [7] F. Briones. *Las constantes magneto-ópticas de los materiales ferromagnéticos y su dependencia con la frecuencia y con la temperatura.* Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Madrid 1972.
- [8] B. Rellinghaus, S. Fernández DeÁvila, G. Armelles, R. Beyers, A.Kellock, D.Weller. Natural oxide formation on cobalt investigated with the Magneto-Optical Kerr Effect. *IEEE Trans. on Magn.* vol. 33 N° 5 (1997) p. 3238
- [9] R. Atkinson. Design of magneto-optic phase optimised tri-layer systems for the enhancement of the polar Kerr effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 124 (1993) 178-184.
- [10] K.R. Heim, M.R. Scheinfein. An alternative approach for magneto-optic calculations involving layered media. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 154 (1996) 141-152.