

## Mejora de las características de los sensores magnéticos de piezoeléctrico y material ferromagnético

J.L.PRIETO<sup>1</sup>, P.SÁNCHEZ<sup>1</sup>, C. AROCA<sup>1</sup>, E. LÓPEZ<sup>2</sup>, M.C.SÁNCHEZ<sup>2</sup>, O.DE ABRIL<sup>2</sup>,L.PÉREZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dep. Física Aplicada. E.T.S.Ing. Telecomunicación.-U.P.M. 28040. Madrid. España

<sup>2</sup>Dep. Física de Materiales. Fac. CC.Físicas- U.C.M. 28040. Madrid. España

En este trabajo se describen varias mejoras al método de fabricación de sensores magnéticos de piezoeléctrico y material ferromagnético. Se ha mejorado el acoplo mecánico entre los dos materiales con un método combinado: deposición electrolítica de una capa de cobre que actuará de adaptador para eliminar la rugosidad superficial del piezoeléctrico; pulido mecánico y electrolítico de la superficie de cobre y, por último, una deposición posterior de material ferromagnético de alta magnetostricción por Sputtering. Con este método se elimina el pegamento viscoso que une los dos materiales y por tanto, se mejora considerablemente el acoplo mecánico y con él la sensibilidad del sensor, la estabilidad con el tiempo y la repetibilidad en el proceso de fabricación. Se abre así una puerta a una futura integración de estos sensores y a una posible fabricación en serie.

*Palabras clave:* Sensor magnético, Proceso de fabricación, Sensibilidad

### Improvements in magnetostrictive-piezoelectric sensors

In this work we describe a new fabrication method for magnetostrictive-piezoelectric sensors that improve several characteristics. The mechanical coupling between the ferromagnetic and the piezoelectric has been optimised by means of a mixed method: electrolytic deposition of a copper layer, playing the role of polished interface, and sputtering deposition of a highly magnetostrictive material on the interface. This method allows to remove the viscous fluid, improving the sensitivity, time stability and opening the possibility to industrial fabrication. The fabrication method opens also the possibility of miniaturisation or even integration of the sensor.

*Keywords:* Magnetic sensor, fabrication process, Sensitivity.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sensores magnéticos híbridos de material piezoeléctrico y ferromagnético podrían constituir en los próximos años un importante avance dentro de la detección y caracterización de campos magnéticos débiles. Este tipo de sensores se ha dado a conocer en el entorno científico en los últimos años, tras los trabajos publicados a finales de la década de los 80 (1-3). Basan su funcionamiento en la superposición de un material ferromagnético y uno piezoeléctrico que, acoplados mecánicamente de forma adecuada, intercambian sus propiedades electro y magnetomecánicas para conseguir, entre otras aplicaciones (4,5), la detección de un campo magnético débil (6).

Este híbrido, funcionando como sensor magnético, puede operar en dos modos diferentes: cuando el piezoeléctrico es el elemento sensor y cuando es el excitador. El más utilizado es el segundo por cuestiones de tamaño y otros factores que están fuera del interés de este artículo (7). Cuando el piezoeléctrico es el elemento excitador, se le excita con una tensión alterna a su frecuencia fundamental de resonancia y sus cambios relativos de tamaño, mediante un pegamento viscoso, se transmiten al ferromagnético que cambia así su configuración magnética (figura 1). Este sistema responderá a la presencia de un campo magnético externo induciendo en un secundario arrollado a su alrededor, una señal de igual frecuencia a la de resonancia fundamental del piezoeléctrico y cuya amplitud es proporcional a la amplitud del campo magnético externo.

Este tipo de sensores presenta importantes ventajas respecto

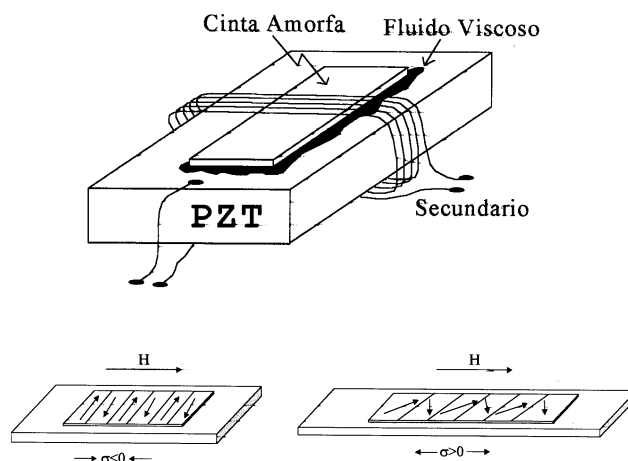


Figura 1. En la parte superior se representa de forma esquemática una de las posibles configuraciones del sensor magnético híbrido de material piezoeléctrico y ferromagnético magnetostrictivo. En la parte inferior se visualiza la estructura magnética cuando el piezoeléctrico se está contrayendo y dilatando, dejando patente que se inducirá en un secundario una f.e.m. a la frecuencia de vibración del piezoeléctrico.

a los sensores magnéticos más utilizados actualmente en el mercado, como son su gran sensibilidad, amplio rango de respuesta en frecuencia, facilidad de construcción, bajo coste, tamaño reducido, etc. En los últimos años se ha investigado también sobre varios problemas que entorpecen el correcto funcionamiento de este tipo de sensores, como son la histéresis y la pérdida de la condición de cero (7), para los cuales ya se han aportado diversos estudios y soluciones (8,9).

Posiblemente el último problema importante que queda por resolver en este tipo de sensores, y uno de los más importantes, es la presencia del pegamento viscoso. Esta interfaz es necesaria para la correcta transmisión de la vibración del soporte piezoeléctrico al material ferromagnético a frecuencias del orden de las decenas de kilohercios, sin embargo, también atenúa esta vibración. La situación ideal sería aquella en la que el material ferromagnético estuviese depositado directamente sobre el piezoeléctrico de manera que el acoplamiento mecánico fuera perfecto.

Para depositar un material ferromagnético de una composición determinada (la adecuada para conseguir la máxima magnetostricción) sobre el piezoeléctrico, sin dañar éste, se pueden utilizar los métodos de electrodeposición y deposición catódica (Sputtering). El primero de ellos permite la deposición de cualquier cantidad de material, pero no todas las composiciones son posibles. Este método también plantea el problema de que el campo coercitivo de las muestras obtenidas suele ser muy alto, lo que repercute en la histéresis del sensor. Para depositar la composición deseada (en nuestro caso  $Fe_{80}B_{20}$ ) sobre el piezoeléctrico, el método idóneo es la deposición catódica.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El sputtering es un sistema experimental de crecimiento lento, desde el punto de vista de la aplicación que se le quiere dar en este trabajo. Los espesores máximos que se suelen depositar son de unidades de micra con velocidades de crecimiento que no suelen superar las unidades de Armstrong por segundo. Como consecuencia del pequeño espesor de material ferromagnético que se va a depositar sobre el piezoeléctrico, la rugosidad de la superficie de éste, adquiere una importancia trascendental. La superficie de una cerámica piezoeléctrica tiene una rugosidad del orden de decenas de micra, debido a su constitución granular. Con esa morfología superficial, una película de material ferromagnético de una o dos micras depositada sobre ella, tendrá un proceso de imanación muy difícil, incluso cuando esta sea debida a rotaciones de la imanación, a causa del gran factor desimanador que se produce en cada salto abrupto de la rugosidad superficial.

Como se ha visto, se hace necesario que la superficie que presenta el piezoeléctrico a la deposición catódica sea lo menos rugosa posible (rugosidad menor de la décima de micra). Un pulido mecánico de la superficie no es suficiente debido a que siempre quedan huecos de granos que se desprenden del material (figura 2). También se ha probado a rellenar la superficie con un pegamento epoxi, cuya superficie se puede pulir posteriormente. En este caso el problema viene porque la adherencia del metal sobre el epoxi pulido no es buena y porque dentro de la campana de vacío el pegamento desgasifica, generando así impurezas que alteran las propiedades del ferromagnético depositado.

La solución que aportamos para depositar el material ferromagnético sobre una superficie especular, se basa en depositar

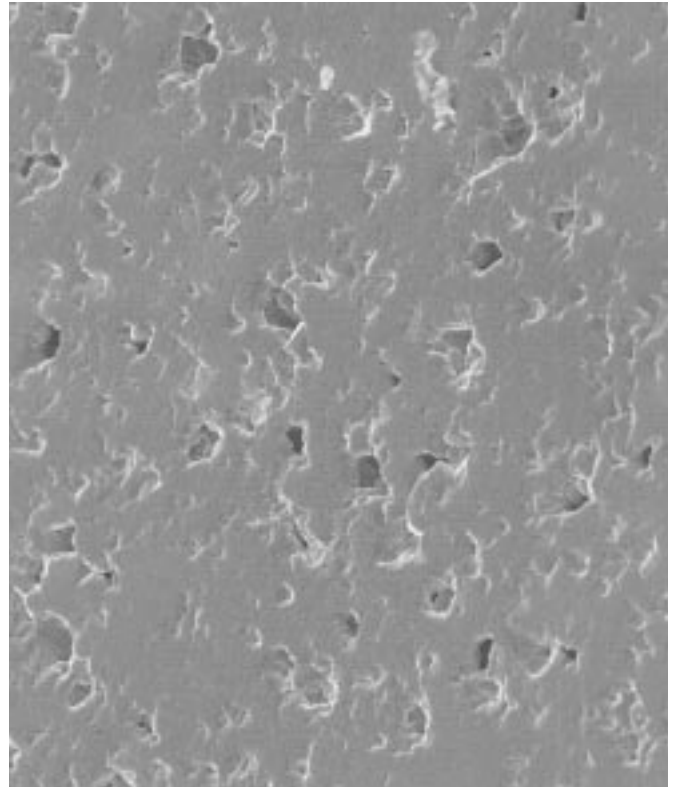


Figura 2. Imágen de microscopio de barrido de la superficie de una cerámica piezoeléctrica pulida mecánicamente. La fotografía demuestra que persiste una gran porosidad que perjudicará seriamente el proceso de imanación de una lámina delgada de ferromagnético que se depositase por sputtering.



Figura 3. Fotografía de la superficie pulida del cobre electrolítico que previamente se ha depositado sobre el piezoeléctrico.

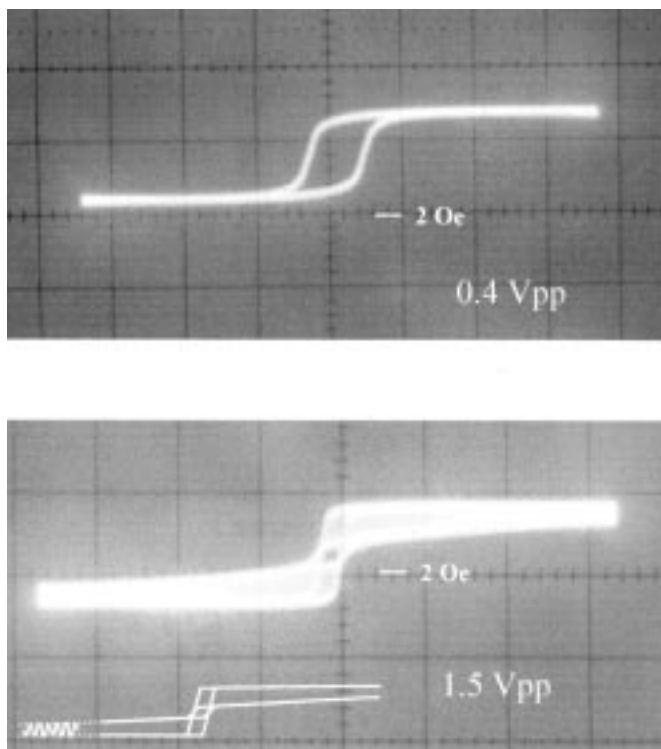


Figura 4. Ciclo de histéresis del material ferromagnético para distintas excitaciones del piezoeléctrico. Se puede apreciar cómo se reduce el campo coercitivo al aumentar la excitación.

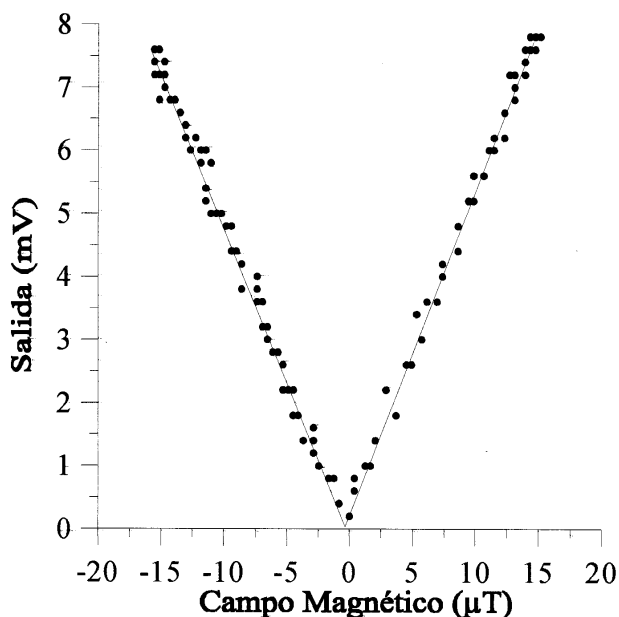


Figura 5. Curva de respuesta del sensor piezoeléctrico magnetostrictivo en el cual se ha depositado el ferromagnético por sputtering.

un metal sobre la superficie del piezoeléctrico y pulirla posteriormente. Se puede realizar un depósito con plata sinterizable, pero el metal obtenido es demasiado poroso y se hace imposible un pulido especular. El método que más ventajas presenta es la deposición electrolítica.

El metal elegido para la electrodeposición es el cobre, por dos razones principalmente: las buenas características de adherencia con otros metales depositados por sputtering y porque la electrólisis del cobre, está muy bien caracterizada y existe multitud de información sobre ella.

Tras la deposición del cobre sobre el piezoeléctrico, se procede a un pulido mecánico y, si éste no es suficiente, se puede realizar un pulido electrolítico que deje una superficie especular. El resultado puede verse en la figura 3 donde la superficie del piezoeléctrico con cobre electrolítico pulido refleja especularmente un texto.

El piezoeléctrico utilizado es un paralelepípedo de PZT-4 de dimensiones  $50 \times 3 \times 0.5$  mm<sup>3</sup>. Sobre una de sus superficies mayores, una de las que llevan una fina capa de plata que hace de electrodo, se ha depositado electrolíticamente una capa de cobre de aproximadamente  $400 \mu\text{m}$  que, después del pulido mecánico y electrolítico, se quedará reducido a unas  $50 \mu\text{m}$ . Sobre esta superficie se ha depositado por sputtering  $1.5 \mu\text{m}$  de  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$  de magnetostricción  $\lambda_s = 30 \cdot 10^{-6}$ .

### 3.RESULTADOS

Gracias a las buenas propiedades de adherencia del cobre a cualquier metal, el acoplo mecánico entre el ferromagnético y el piezoeléctrico se ha optimizado. Una buena prueba de ello se encuentra en la figura 4, donde se representan los ciclos de histéresis del sensor mientras el piezoeléctrico está vibrando en su resonancia longitudinal, para diferentes tensiones de excitación. En la segunda fotografía de la figura 4 se aprecia un ciclo de histéresis en el que se ve la transición que se produce de un ciclo de rotaciones de imanación a otro debido a desplazamiento de paredes, transición clave para el funcionamiento del sensor y que se produce a la frecuencia de excitación. Para mayor claridad se ha representado en la parte inferior izquierda las envolventes de estos dos tipos de ciclo a los que hacemos alusión en la fotografía (el interior se aprecia difuminado porque las transiciones de un ciclo a otro se producen a decenas de kilohercios, frecuencia mucho mayor que la frecuencia a la que se está recogiendo el ciclo). También se puede apreciar, comparando las dos fotografías, cómo se reduce el campo coercitivo de una a otra. Éste efecto es debido a que la vibración provocada por el piezoeléctrico facilita el movimiento de las paredes magnéticas y por tanto se reduce el campo coercitivo. Esta reducción es fundamental para un correcto funcionamiento del sensor (8).

Basta aplicar un pequeño campo desimanador para reducir a cero el efecto del campo coercitivo. La figura 5 muestra una curva de calibrado obtenida aplicando un campo de 10 mHz con la amplitud indicada en la figura y cuya señal de salida es el módulo al cuadrado de la respuesta del sensor ('R' en el amplificador Lock-in). En esta figura se aprecia una sensibilidad aproximada de  $0.5 \text{ mV}/\mu\text{T}$  que, en comparación con la sensibilidad de los sensores que utilizan pegamento viscoso como interfaz, que variaba en el rango de las decenas de  $\mu\text{V}/\mu\text{T}$ , constituye una mejora de varios órdenes de magnitud. Además, conviene tener en cuenta que, dado que la sensibilidad depende directamente de la cantidad de material ferromagnético depositado sobre el piezoeléctrico, depositando

cantidades mayores se conseguirían sensibilidades mayores.

El rango dinámico en este dispositivo está en torno a 500  $\mu$ T.

Adicionalmente a este incremento en la sensibilidad se consiguen mejorar otros aspectos de considerable interés:

- La estabilidad con el tiempo crece debido a que el sistema se hace robusto y no depende de la viscosidad de ningún material.

- Muy relacionado con el punto anterior, también se mejora en estabilidad con la temperatura. Dado que la viscosidad depende de la temperatura, las fluctuaciones apreciables de ésta provocan cambios muy significativos en la respuesta del sensor, limitando así el rango de funcionamiento.

- Con el modo de implementación tradicional de estos sensores se hacía casi imposible la posibilidad de fabricación en serie, debido principalmente a que resulta muy complicado conseguir sensores de características similares cuando influye en el resultado final un proceso de adherencia con pegamento viscoso.

- Este método de fabricación puede permitir la integración de sensores piezoeléctrico-magnetostrictivos en modos de operación alternativos en los que no se utilicen bobinas para la detección (9), como por ejemplo el modo que utiliza como excitación una corriente que alterna que circule por el ferromagnético.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito un nuevo proceso de fabricación que permite eliminar gran parte de los problemas de los sensores híbridos de material piezoeléctrico y ferromagnético.

Se ha mejorado la sensibilidad, la estabilidad con el tiempo y la temperatura y se abre la posibilidad de integración y/o fabricación en serie de estos sensores.

Se han presentado los resultados para el primer prototipo obtenido con este método, con lo cual, previsiblemente, se pueda mejorar de forma considerable las características que en este se han destacado.

#### BIBLIOGRAFÍA

- 1.A. Pantinakis, D.A. Jackson, "High-sensitivity low-frequency magnetometer using magnetostrictive primary sensing and piezoelectric signal recovery", *Electron. Lett.*, **22**, 14, 737-8, (1986).
- 2.M.D. Mermelstein, "Magnetoelastic amorphous metal flux-gate magnetometer", *Electron. Lett.*, **22**, 10, 525-6, (1986).
- 3.M.D.Mermelstein, "A magnetoelastic metallic glass low-frequency magnetometer", *IEEE Trans. Mag.*, **28**, 1, 36-56, (1992).
- 4.Y.D.Shin, Y.H.Lee, J.R. Rhee, "Observation of thin film magnetostiction using a piezoelectric sensor", *IEEE Trans. Mag.*, **29**, 6, 3025-7, (1993).
- 5.D.J.Newcombe, X.G.Jiang, W.B. Taylor, F.P.Ottensmeyer, "A small sensitive magnetometer for measurement of fringing fields near magnetic sectors", *Meas. Sci. Technol.* **5**, 1355-8, (1994).
- 6.J.L.Prieto, C.Aroca, E.López, M.C.Sánchez, P.Sánchez "Sensor magnético de dos ejes usando un soporte piezoeléctrico". *Bol.Soc. Esp. Cerám. Vidrio* **34** (5-6), 479-481, (1995).
- 7.J.L.Prieto, C.Aroca, E.López, M.C.Sánchez, P.Sánchez "Efectos de los procesos de imanación en los sensores magnéticos con soporte piezoeléctrico". *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio*, **34** (5-6), 482-485, (1995).
- 8.J.L. Prieto, C.Aroca, E.López, M.C. Sánchez, P.Sánchez, "Magnetization processes and optimal performance of magnetostrictive piezoelectric sensors" *J.Appl. Phys.* **79**, 9, 7099-7105, (1996).
- 9.J.L. Prieto, C.Aroca, E.López, M.C. Sánchez, P.Sánchez, "Current effect in magnetostrictive piezoelectric sensors" *J.Mag. Mag. Materials.* **174**, 289-294. (1997)