MAGNETRÓN DESBALANCEADO: CONFIGURACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO Y SU CORRELACIÓN CON EL CAMPO DE 2 ESPIRAS CONCÉNTRICAS

Ulises Piratoba Morales[1], Álvaro Mariño Camargo[2], Jhon Jairo Olaya Flórez[3]

RESUMEN

Piratoba Morales, U.; A. Mariño Camargo; J.J. Olaya Flórez: Magnetrón Desbalanceado: Configuración del campo magnético y su correlación con el campo de 2 espiras concéntricas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (138): 37-44, 2012. ISSN 0370-3908.

Los magnetrones desbalanceados son cada vez más usados en investigación, tecnología y aplicaciones industriales, particularmente aquellas relacionadas con procesos de deposición física de vapor (*PVD)* usados en el crecimiento de películas delgadas (**Marulanda** *et al.,* 2011; **Olaya** *et al.,* 2011) Estas películas tienen amplias aplicaciones como recubrimientos duros, ópticos, decorativos y electrónicos. El empleo de dichos magnetrones, permite incrementar significativamente las velocidades de crecimiento de las películas y la eficiencia de los procesos, mejorándose ostensiblemente la calidad de las películas obtenidas. En éste trabajo se midieron las componentes axial y radial de campos magnéticos generados por magnetrones desbalanceados con simetría axial; se encontró que el campo magnético de un magnetrón construido con un imán cilíndrico y otro anular, concéntricos, se correlaciona muy bien con el campo magnético generado por 2 espiras coplanares y concéntricas, cuyas corrientes circulan en sentidos opuestos. El campo magnético teórico fue calculado aplicando la ley de Biot – Savart, y evaluado numéricamente con el programa MatLab.

Palabras clave: magnetrón desbalanceado, UBMS, campo magnético

ABSTRACT

Unbalanced magnetrons are increasingly used in research, technological and industrial applications, particularly those related with physical vapor deposition processes (PVD) used for the growth of thin films (**Marulanda** *et al,.* 2011; **Olaya** *et al.,* 2011). These films have many applications as hard, optical, decorative and electronic coatings. The use of such magnetrons can significantly increase the growth rates of the films and the process efficiency, which also improves significantly the quality of

1 Departamento de Física, U. Nacional de Colombia, Bogotá y UPTC, Tunja, Colombia. Email: upiratobam@unal.edu.co - ulisesp3@hotmail.com

2 Departamento de Física, U. Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Email: amarinoca@unal.edu.co

3 Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, U. Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Email: cjjolaya@unal.edu.co

the films obtained. In this work, measurements of the axial and radial components of the magnetic fields generated by an unbalanced magnetron with axial symmetry were carried out; it was found that the magnetic field of a magnetron built with a cylindrical and a concentric ring magnets with opposite polarities, correlated well with the magnetic field generated by two concentric coplanar loops, whose currents flow in opposite directions. The theoretical magnetic field was calculated applying the Biot - Savart law, and evaluated numerically using MatLab program.

Key words: unbalanced magnetron, UBMS, magnetic field.

Introducción

El empleo de campos magnéticos ha permitido potenciar los procesos tecnológicos e investigativos que hacen uso de plasmas. Los campos magnéticos actúan sobre el plasma al afectar las trayectorias de iones y electrones (**Mattox,** 1998; **Bunshah,** 2001), permitiendo confinarlo o intensificarlo. Al aumentarse la trayectoria de las partículas cargadas, se incrementan las colisiones y con esto los procesos de ionización, la intensidad del plasma y en general, la eficiencia de los eventos allí presentes. En los procesos de obtención de películas delgadas asistidos por plasma, sus propiedades así como la eficiencia del proceso, dependen en gran medida de la configuración de campo magnético. En una excelente revisión **Svadkovski** *et al.*, 2003 presentan y clasifican las diversas configuraciones que pueden tener uno o varios magnetrones y definen coeficientes para cuantificar el desbalance de cada magnetrón.

Para un magnetrón de simetría axial, que se obtiene con imán cilíndrico interno y otro anular externo (o un ensamble de varios imanes planos), podría darse que: a) los 2 imanes tengan intensidades similares, se le ha denominado magnetrón balanceado; b) el imán externo tenga una mayor intensidad que el interno, denominado magnetrón des balanceado, o que c) el imán interno tenga una mayor intensidad que el externo. Ésta última configuración no es muy usada, pero ha sido reportada para obtener recubrimientos porosos (**Kelly** y **Arnell,** 1998; **Kelly** y **Arnell,** 2000). En magnetrones des balanceados, la mayor intensidad del imán externo, permite que no todas las líneas de campo magnético se cierren frente al blanco; algunas de éstas se prolongan hasta el sustrato, permitiendo que muchos electrones sean extraídos del plasma, siguiendo trayectorias helicoidales y atrayendo iones hacia el sustrato, incrementando la relación J_I/J_A (densidad de flujo de iones J_I sobre densidad de flujo de átomos J_A). El efecto neto es un incremento en la corriente iónica entre 2 y 10 veces la obtenida con magnetrones convencionales. Investigadores como **Kelly** y **Arnell,** 1998 y 2000, consideran que de la relación J_I/J_A, dependen importantes características de las películas. Niveles altos de bombardeo iónico, son beneficiosos para mejorar la adhesión, pero de ser sostenidos o muy elevados, inducen la aparición de defectos en detrimento de la calidad de la película, o elevados niveles de esfuerzos compresivos que le disminuyen su adhesión al sustrato (**Komath** *et al.,* 1999). Con magnetrones des balanceados, es posible generar y mantener plasmas a muy bajas presiones, lo que permite mejorar la pureza química de las películas obtenidas (**Ikuta** *et al.,* 2009).

Estudios sobre las configuraciones de campo magnético en magnetrones convencionales o des balanceados, han sido reportados por **Biederman** *et al.,* 1999 quienes presentaron, en un esquema tridimensional, la intensidad del flujo magnético en diferentes puntos del plano ZR, igual que lo han hecho **Rodil** *et al.* 2007; **Klevets,** 2006 presenta criterios teóricos para optimizar los sistemas magnéticos, mientras que **Han** *et al.,* 2009, mediante la aplicación de series de polinomios, obtienen una distribución de la intensidad del campo magnético y hacen una representación en 3 dimensiones *3D*, de la componente axial en el plano *ZR*.

En este trabajo se presentan las intensidades de campo magnético *B*, (sus componentes axial B_Z y radial $B_{R)}$, medidas para un magnetrón Gencoa VT 100, y las un magnetrón formado por los 2 imanes de ferrita que se muestran en la Figura 1. Las medidas se tomaron con un Teslámetro de laboratorio *PHIWE*, usando un montaje mecánico que permite fijar con facilidad y precisión la sonda de efecto Hall, elementos también mostrados en la figura 1. Igualmente se calculan éstas componentes del campo magnético generado por 2 espiras de 1 y 2.5 cm de radio respectivamente, concéntricas y coplanares, cuyas corrientes circulan en sentidos opuestos, a efectos de hacer una comparación con las distribuciones de campo magnético obtenidas experimentalmente.

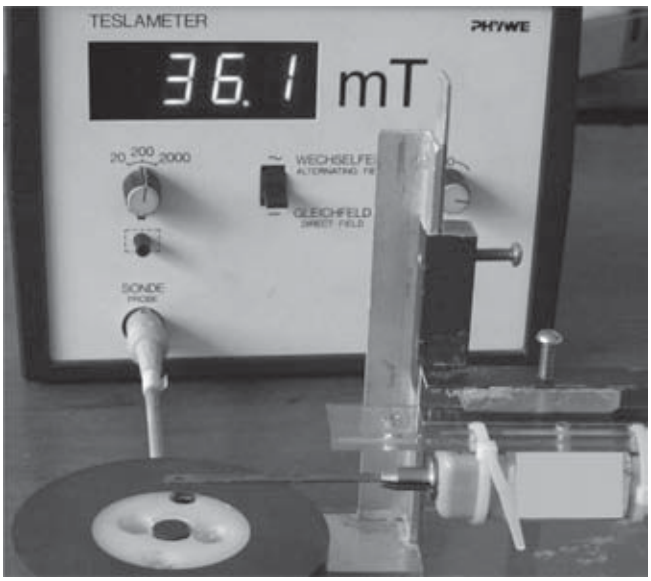


Figura 1. Teslámetro, magnetrón, sonda y montaje para ubicarla y medir B_Z o B_R.

Resultados: discusión y análisis

En las figuras 2A y 3A, se representan en *3D* los valores de la componente axial B_Z del vector intensidad de campo magnético como función de las distancias axial *z* y radial *r*. Se tomó como origen de éste sistema coordenado, el centro de la superficie de un blanco, (disco de cromo de 5 mm de espesor para el magnetrón Gencoa VT 100), y el centro de la cara anterior del imán central para el magnetrón de ferritas. Puede verse que B_Z toma su máximo valor negativo en el origen del sistema coordenado y tiende a anularse rápidamente a medida que se aleja del magnetrón. Además, presenta 2 máximos positivos en el borde interno del magnetrón anular, que igualmente decaen rápidamente al alejarse de los imanes. Esta configuración prácticamente coincide con la calculada por **Han** *et al.,* 2009. Adicionalmente puede apreciarse que el campo magnético axial, es casi constante y de baja intensidad a distancias superiores a unos 4 cm. En las figuras 2B y 3B se presenta la componentes radiales B_R para los magnetrones citados, que ahora se anulan a lo largo del eje *z*; presentan 2 máximos negativos en la posición del borde del imán cilíndrico interno y 2 máximos positivos en la posición del borde interno del imán anular exterior. Estos máximos, igualmente decaen rápidamente al alejarse de la superficie del magnetrón.

Las anteriores configuraciones de campo magnético, igualmente pueden ser generadas por la corriente que transportan espiras circulares, como se mostrará a continuación: la ley de Biot - Savart especifica que la contribución al campo magnético aportada por un elemento infinitesimal de corriente $\vec{idl}$, en un punto cuya posición respecto al elemento de corriente la especifica el vector $\vec{\rho}$ viene dada por

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{idl} \otimes \vec{\rho}}{\rho^3} \qquad (1)$$

Con base en la figura 4

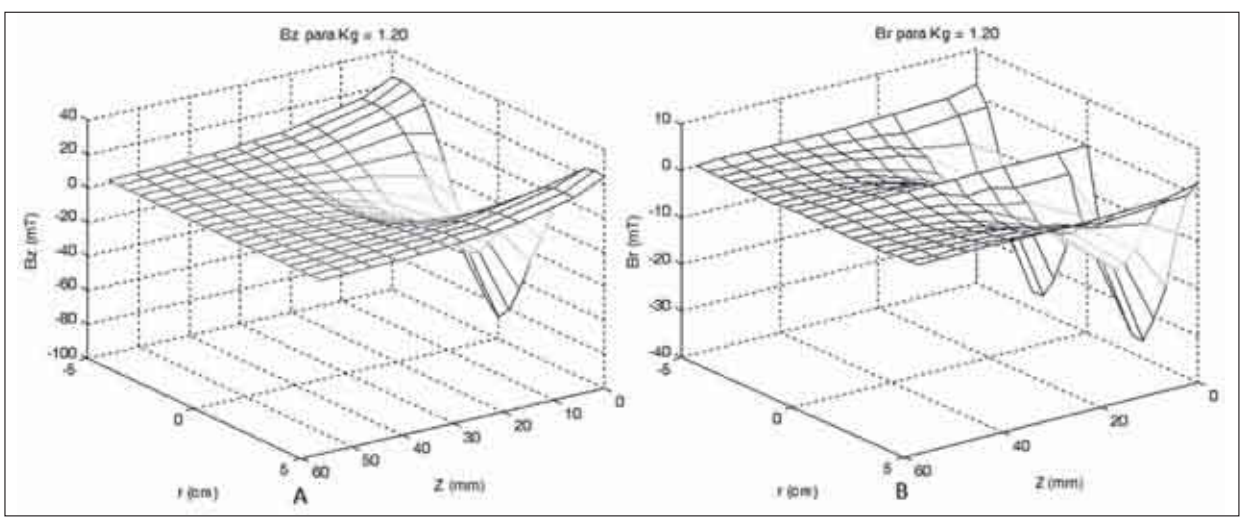


Figura 2. Intensidades de las componentes axial B_Z (figura A), y radial B_R, (figura B) del campo magnético generado por un magnetrón Gencoa VT 100.

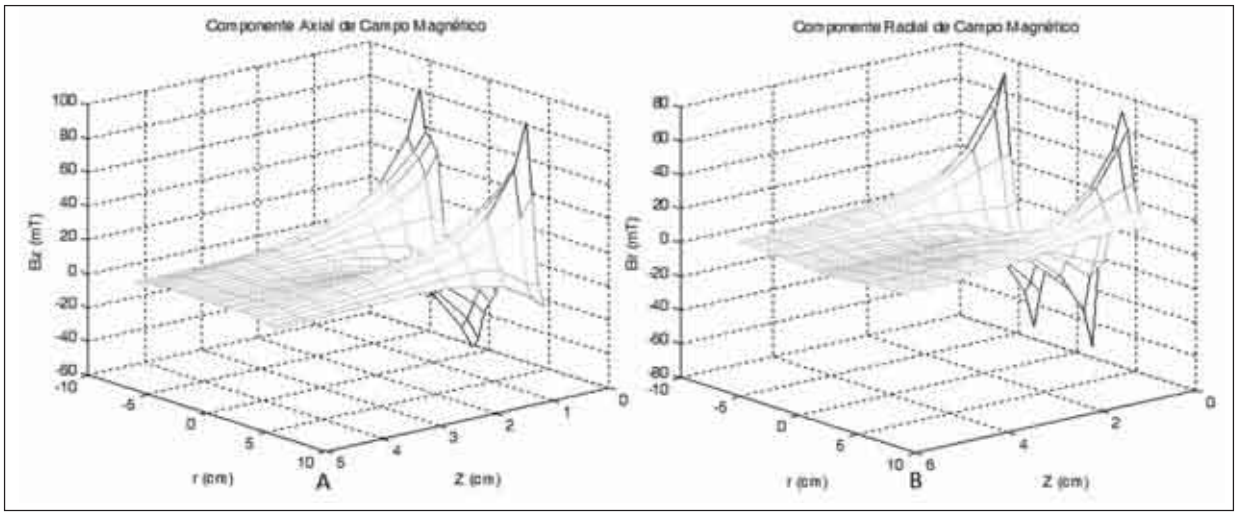


Figura 3. Intensidades de las componentes B_z y B_R del campo magnético generado por los imanes de figura 1.

$$\vec{\rho} = \vec{z} + \vec{r} - \vec{R} \tag{2}$$

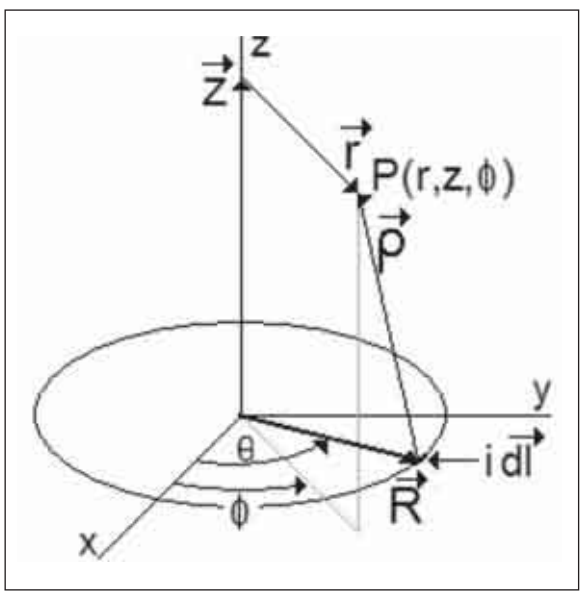


Figura 4. Espira de radio R por la cual circula una corriente i en sentido positivo y coordenadas para el cálculo del campo magnético en el punto P.

Haciendo uso de los vectores unitarios polares $(\hat{R},\hat{\theta})$, cilíndricos $(\hat{r},\hat{z},\hat{\phi})$ y rectangulares $(\hat{x},\hat{y},\hat{z})$, y para facilitar los cálculos, ubicando el punto P en el plano xz, ($\phi = 0$) se obtiene

$$\begin{aligned} \vec{R} &= R\hat{R} = RCos\theta\hat{x} + RSen\theta\hat{y}; \vec{r} = r\hat{x} \\ i\vec{dl} &= iRd\theta\hat{\theta} = -iRSen\theta\hat{x} + iRCos\theta\hat{y} \end{aligned} \tag{3}$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} \vec{\rho} &= \left(r - RCos\theta\right)\hat{x} - RSen\theta\hat{y} + z\hat{z} \\ i\vec{dl} \otimes \vec{\rho} &= \left(iRzCos\theta\right)\hat{x} - \left(iRzSen\theta\right)\hat{y} + \left(iR^2 - iRrCos\right. \\ \rho^3 &= \left(R^2 + r^2 + z^2 - 2rRCos\theta\right)^{3/2} \end{aligned} \tag{4}$$

Ecuaciones que al incluirlas en la ecuación (1), permiten deducir las expresiones siguientes para las componentes rectangulares del campo magnético:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0 i}{4\pi}\int_0^{2\pi} \frac{RzCos\theta d\theta}{R^2 + r^2 + z^2 - 2rR\cos\theta^{3/2}} = B_r \\ B_y &= -\frac{\mu_0 i}{4\pi}\int_0^{2\pi} \frac{RzSen\theta d\theta}{R^2 + r^2 + z^2 - 2rR\cos\theta^{3/2}} = 0 \\ B_z &= \frac{\mu_0 i}{4\pi}\int_0^{2\pi} \frac{R^2 - rRCos\theta}{R^2 + r^2 + z^2 - 2rR\cos\theta^{3/2}} d\theta \end{aligned} \tag{5}$$

La integral para B_y es elemental y da cero, valor que igualmente puede deducirse de la simetría de la espi-

ra. Las integrales de las otras 2 componentes, axial B_z y radial B_R, no tienen soluciones analíticas sencillas; se evaluaron numéricamente usando MatLab y se han representado en la figura 5, para 2 espiras de 2.0 y 5.0 cm de diámetro. Las intensidades de campo magnético pueden ser obtenidas multiplicando los valores de las integrales por las cantidades $\frac{\mu_0 i}{4\pi}$, con una intensidad de corriente negativa para la espira interna y positiva para la espira externa, y sumando luego los valores obtenidos. Los valores de las corrientes y los radios de las espiras, pueden ser ajustados para lograr la mejor coincidencia entre las figuras, pero no se hizo tal ajuste.

Puede observarse una gran coincidencia entre las figuras: 2 y 3 con la figura 5, lo que permite afirmar que los campos magnéticos de magnetrones que tengan una simetría axial, pueden simularse con los campos generados por espiras con corrientes, siendo los radios y las intensidades de las corrientes, los parámetros que

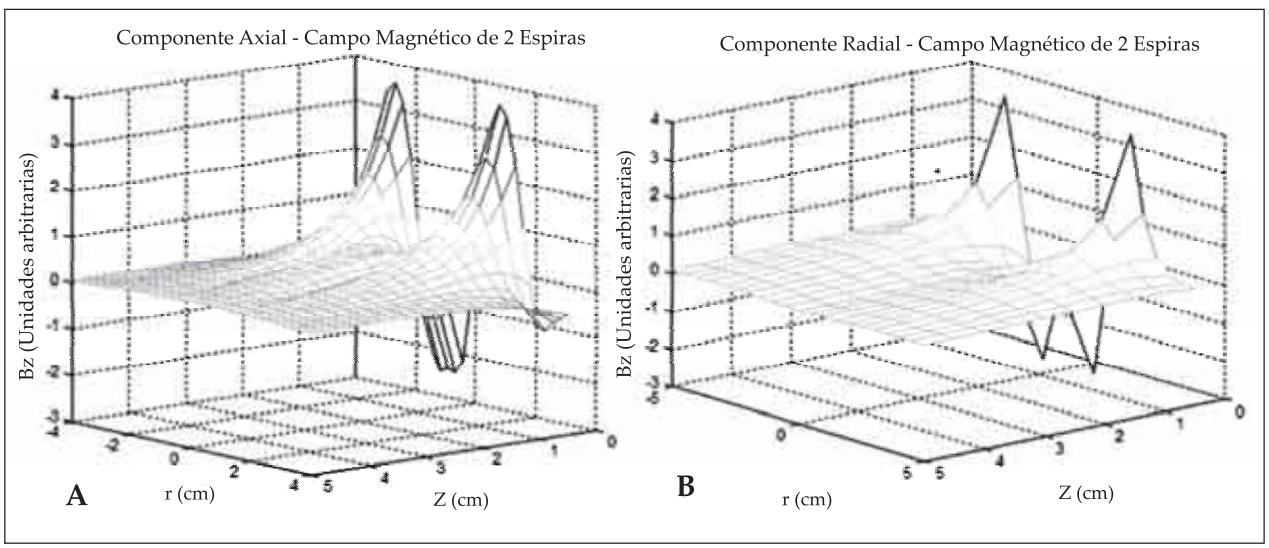


Figura 5. Resta entre las integrales correspondientes a las componentes axiales, (figura A) y radiales (figura B), de los campos magnéticos generados por 2 espiras.

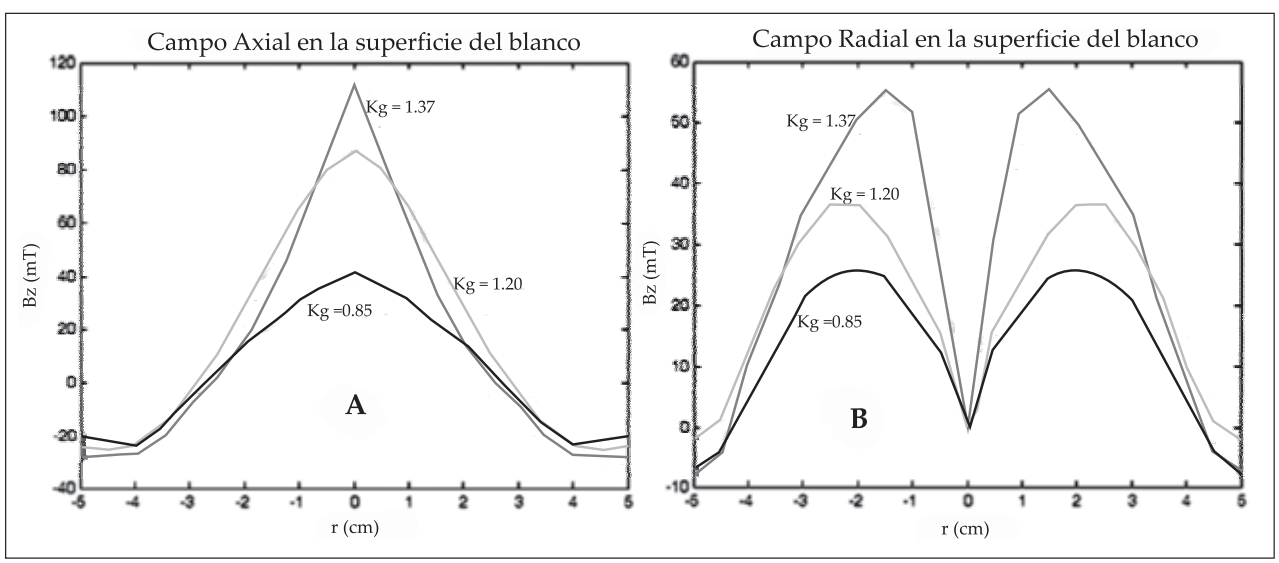


Figura 6. Componentes axial A y radial B en la superficie del blanco con 3 grados de desbalance K_G

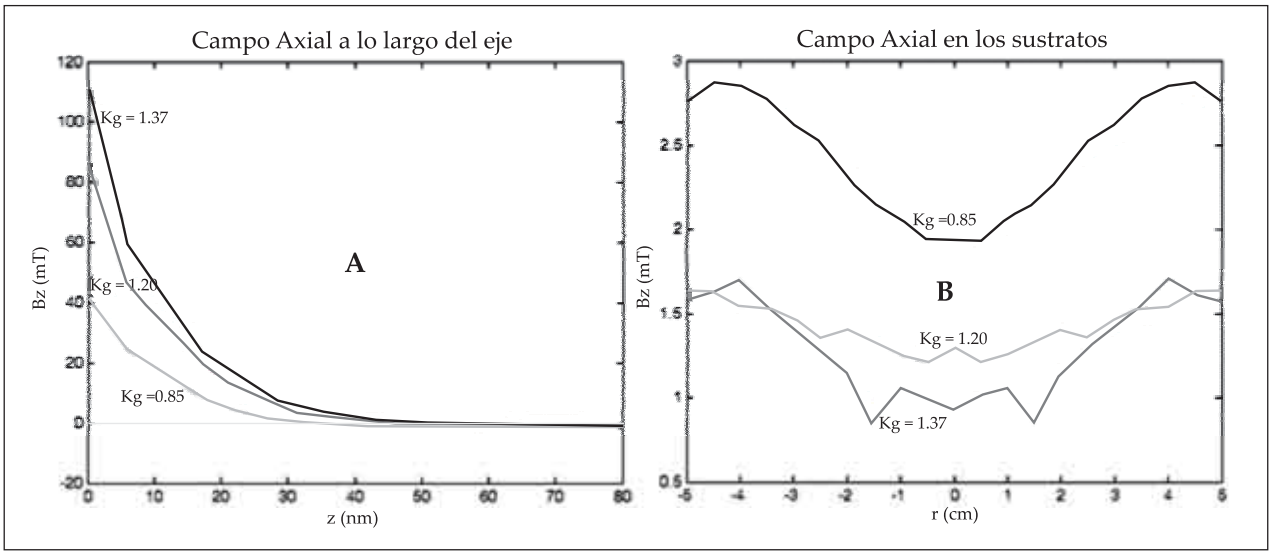


Figura 7. Componente axial a lo largo del eje A y en la posición del sustrato B con 3 grados de desbalance K_G

pueden ajustarse para lograr coincidencia entre los mismos. Tanto la componente axial como la radial son prácticamente constantes y de baja intensidad para distancias superiores a unos 4 cm.

El grado de desbalance del campo magnético se cuantifica mediante su coeficiente geométrico K_G, (**Marulanda** *et al.,* 2011; **Svadkovski** *et al.*, 2003) y el efecto de su variación puede verse en las figuras 6 y 7 (K_G = 0.85 para máximo desbalance y K_G = 1.37 para mínimo desbalance del magnetrón Gencoa VT 100). Aunque las componentes axial y radial disminuyen en la superficie del blanco con el incremento en el desbalance, (figura 6) en el sustrato la componente axial se ve incrementada, (figura 7B) aumentando la densidad de iones que llegan a la película en crecimiento. En la figura 7A puede verse un rápido decrecimiento de la componente axial a lo largo del eje del magnetrón, a medida que se aleja del sustrato.

Conclusiones

Se midieron las componentes axial y radial de los campos magnéticos generados por magnetrones con simetría axial: un Gencoa VT 100 y otro formado por un imán cilíndrico en el centro de un iman anular; se representaron en 3D en las figuras 2 y 3. Se demostró que estos campos magnéticos pueden ser simulados y practimente coinciden, con el campo generado por 2 espiras coplanares y concéntricas, por las que circulan corrientes en sentidos opuestos. La componente axial presenta un máximo negativo en el centro y 2 máximos positivos simétricos que decaen rápidamente a medida que se aleja del magnetrón, llegando a ser practicamente constante y de baja intensidad para distancias superiores a unos 4 cm. La componente radial tiene 2 máximos negativos simétricos y 2 máximos positivos, que igualmente decaen rápidamente al alejarse del magnetrón. Con el aumento en el desbalance del campo magnético se disminuye la intensidad del campo magnético en la superficie del blanco, pero se incrementa la componente axial del mismo en la posición de los sustratos.

Bibliografía

Biederman H. et al. 1999, Characterization of un unbalanced magnetron for composite film (metal/C:H), Vacuum 52: 415-420.

Bunshah Rointan F. 2001, HANDBOOK OF HARD COATINGS Deposition Technologies, Properties and Applications, Noyes Publications, New Jersey USA.

Han L., Zhao Y. Q., Wang Y. W., 2009, A new semi-analytical method analyzing the magnetic field in unbalanced magnetron sputtering system, Vacuum 83: 1317-1320.

Ikuta H.et al. 2009, Development of a magnetron sputtering system with an extraordinary strong magnetic field near the target, Vacuum 83: 475–478.

Kelly P.J., Arnell R.D. 1998, The influence of magnetron configuration on ion current density and deposition rate in a dual unbalanced magnetron sputtering system, Surface and Coatings Technology **108–109**: 317–322.

Kelly P.J., Arnell R.D. 2000, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, Vacuum **56**: 159-172.

Klevets N. I. 2006 Optimal design of magnetic systems, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **306**: 281–291.

Komath M., Mohan G. R., Mohan S.1999, Studies on the optimization of unbalanced magnetron sputtering, Vacuum 52: 307- 311.

Marulanda D. M., Olaya J. J., Piratoba U., Mariño A. Camps E. 2011, The effect of bilayer period and degree of unbalancing on magnetron sputtered Cr/CrN nano-multilayer wear and corrosion Thin Solid Films **519,** 1886-1893.

Mattox Donald M. 1998 HANDBOOK OF PHYSICAL VAPOR DEPOSITION (PVD) PROCESSING, Noyes Publications, New Jersey USA.

Olaya J. J. *et al.* 2007, The influence of the magnetic field configuration on plasma parameters and microstructure of niobium nitride films, Surface & Coatings Technology **201**: 6117-6121.

Olaya J. J., Piratoba U. and Rodil S. E., 2011, Resistencia a la corrosión de recubrimientos de CrN depositados por PVD con UBM: Tecnología eficiente y ambientalmente limpia, Rev. Lat. de Met. y Mat. **31** (1): 44-51.

Svadkovski, I.V Golosov D.A., Zavatskiy S.M., 2003 Characterization parameters for unbalanced magnetron sputtering systems, Vacuum **68**: 283–290.

Recibido: Enero 19 de 2012.

Aceptado para su publicación: Marzo 2 de 2012.