

## PELÍCULAS DELGADAS DE $Zn_{1-x}Mn_xO$

### $Zn_{1-x}Mn_xO$ Thin Films

#### RESUMEN

A continuación se realiza una revisión bibliográfica de trabajos de investigación efectuados sobre películas delgadas de óxido de zinc dopadas con manganeso ( $Zn_{1-x}Mn_xO$ ). Las propiedades, especialmente las magnéticas, dependen de las técnicas de crecimiento. Realizamos en este trabajo una revisión de las técnicas de síntesis de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  más comunes, principalmente del método de Deposición por láser pulsado. Así mismo esbozaremos las propiedades más relevantes de estas películas y finalmente mencionaremos las técnicas para la medición de estas propiedades.

**PALABRAS CLAVES:** Deposición por Láser Pulsado, Semiconductor Magnético Diluido,  $Zn_{1-x}Mn_xO$ .

#### ABSTRACT

*We review research papers on ZnO doped with Mn thin films ( $Zn_{1-x}Mn_xO$ ). It is properties; magnetic properties specially, slightly depend on growth technique. Here we review on growth technique at  $Zn_{1-x}Mn_xO$  thin films, specially pulsed laser deposition method and the most important properties and finally we will mention some technique for measurement its properties.*

**KEYWORDS:** Dilute Magnetic Semiconductor,  $Zn_{1-x}Mn_xO$ , Pulse Laser Deposition.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor tipo *n* de la familia II-IV con una banda de energía de 3.37eV a temperatura ambiente y una estructura cristalina hexagonal tipo wurtzita con parámetros de red  $a = 0.325$  nm y  $c = 0.521$  nm [1]. Este material ha tenido gran interés debido a sus propiedades multifuncionales incluyendo ópticas, semiconductoras, piezoeléctricas, electroópticas y optoelectrónicas [2]. Las películas de ZnO tienen muchas aplicaciones para diferentes dispositivos electrónicos, incluyendo sensores, transductores, diodos [3], dispositivos emisores de campo [4], sensores de gas [5,6] y electrodos transparentes [7,8].

Las propiedades magnéticas, ópticas, electromecánicas y semiconductoras de películas delgadas de ZnO son mejoradas cuando este material es dopado con diferentes elementos [9,10], especialmente con metales de transición tales como Cr, Mn, Fe, Co y Ni [11,12].

Por ejemplo, se ha observado un comportamiento ferromagnético a temperatura ambiente al dopar ZnO con Mn [13-16], de esta manera, el comportamiento de este material es conocido como Semiconductores Magnéticos Diluidos (DMS)[17-19], los cuales tienen el potencial de combinar propiedades magnéticas y semiconductoras [20-22], cuyo desarrollo tecnológico es conocido como Espintrónica (Dispositivos electrónicos basados en el espín) [23-24]. Esto se ha logrado manipulando los grados de libertad de la carga y del

espín[25-27], lo que sugiere nuevas funcionalidades y aplicaciones tales como detectores de memoria, fuentes emisoras de luz, diodos de espín emisores de luz, transistores de espín, dispositivos de microondas, memorias semiconductoras no volátiles [28-30].

La síntesis de películas delgadas de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  se ha obtenido mediante diferentes técnicas, tales como haz molecular epitaxial, depósito por vapor químico, depósito por láser pulsado, entre otras, y a su vez se ha variado las condiciones de síntesis, así como también la concentración de Mn en las muestras. El estudio de sus respectivas propiedades se ha realizado empleando diferentes métodos de caracterización.

#### 2. TÉCNICAS DE CRECIMIENTO.

Las películas delgadas de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  han mostrado diferentes propiedades dependiendo del método de crecimiento. Entre los métodos de deposición más comunes se encuentran, haz molecular epitaxial (MBE) [31] deposición por vapor químico (CVD) [32], sol-gel [33], deposición por vapor químico metal orgánico (MOCVD) [34], chemical spray perolysis[35], magnetron sputtering RF [36] y deposición por láser pulsado (PLD)[37]. Siendo esta última de gran importancia debido a que permite una buena solubilidad de Mn en el ZnO de aproximadamente 35% [38] además de otras ventajas que serán tratadas en el siguiente numeral.

#### DEISY RAMÍREZ VINASCO

Estudiante de Ingeniería Física.  
deisydo@hotmail.com

#### LILIANA PATRICIA VERA L.

Estudiante de Ingeniería Física.  
lilianavera07@hotmail.com

#### HENRY RIASCOS LANDÁZURI

Profesor Física  
Universidad Tecnológica de Pereira  
hriascos@utp.edu.co

## 2.1 SÍNTESIS DE $Zn_{1-x}Mn_xO$ POR ABLACIÓN LÁSER

La técnica de Deposición por Láser Pulsado (PLD) ha resultado de gran interés en el crecimiento de películas delgadas debido a que es efectiva y adecuada para el desarrollo epitaxial de películas, permite el crecimiento bajo un ambiente de gas reactivo en un amplio rango de presiones, además permite la fabricación de multicapas, hetero estructuras y superredes [2,39], la figura 1 muestra un esquema de esta técnica.

Esta técnica permite el control de diferentes parámetros, entre ellos, la fluencia del láser, la distancia blanco sustrato, la presión del gas ambiente, la temperatura del sustrato, entre otros. Una descripción completa de la técnica puede ser observada en la referencia [40].

Karamat et al [41], utilizando concentraciones de Mn de 0.03 y 0.05 at %, sustratos de silicio (Si) y un láser Nd:YAG con longitud onda  $\lambda$  de 532 nm, frecuencia de 10 Hz y energía de 75 mJ, reportó un aumento en la banda de energía con el incremento de la concentración del contenido de Mn, estas películas delgadas a temperatura ambiente tienen propiedades Ferromagnéticas con un momento magnético en el rango de  $0.9 u_B$  a  $1.4 u_B$ , para ambas concentraciones. Por otro lado, Kyung Ah Jeon et al[10], creció ZnMnO sobre zafiro a dos diferentes presiones del gas ambiente (oxígeno)  $1.0 \times 10^{-1}$  Torr y  $1.0 \times 10^{-3}$  Torr, y a una temperatura del sustrato de  $700^\circ C$ . La estructura de estas películas se analizó usando difracción de rayos X (XRD), se encontró que los parámetros de red aumentan al decrecer la presión de oxígeno. Los espectros de fotoluminiscencia indican una expansión de la banda de energía y un cambio en la banda de absorción hacia el azul, esto indica que los iones de Mn se incorporaron en la red del ZnO. Las medidas magnéticas indican que ambas muestras son Ferromagnéticas. En medidas de voltaje realizadas a películas delgadas de  $Zn_{0.95}Mn_{0.05}O$  se manifestaron propiedades eléctricas de un semiconductor tipo *n* y una concentración de carga alrededor de  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Además esta película es Ferromagnéticas a 15 K. Esto se obtuvo creciendo películas en sustratos de zafiro a  $450^\circ C$  y  $1 \times 10^{-6}$  Torr, utilizando un laser Nd:YAG operando a 266 nm usando el cuarto armónico, posteriormente se realizó un recocido a  $900^\circ C$  en un ambiente rico en oxígeno [42]. Para películas compuestas por  $Zn_{0.94}Mn_{0.06}O$  se encontró, que la calidad de las películas mejora con el incremento de la temperatura del sustrato pero el ferromagnetismo disminuye, los patrones de difracción indican que la estructura tipo wurtzita del ZnO se conserva [43]. Películas con alta calidad cristalina en un rango de concentración de  $(0.01 \leq x \leq 0.25)$  fueron reportadas por Mandal et al [44], además de un crecimiento epitaxial en sustratos de zafiro con orientación (0001) a una temperatura de  $610^\circ C$  y atmósfera de oxígeno de 6.7 mPa. En este caso se uso un laser Excimer con  $\lambda = 248$

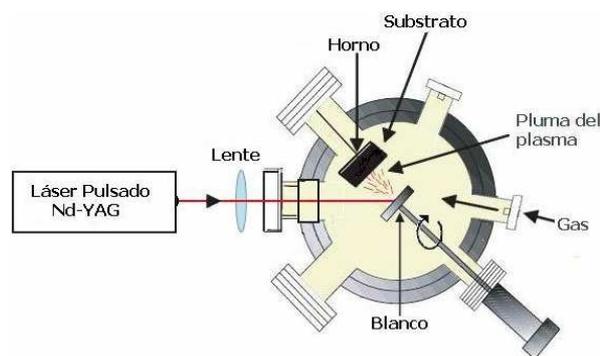


Figura 1: Esquema experimental de Deposición por láser pulsado para películas delgadas [2].

nm. También reportaron un aumento de la banda de energía dependiente de la concentración de Mn en las películas.

En la tabla 1 se muestra otros reportes de Películas de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  crecidas por Ablación Láser, el contenido de Mn está representado como *x*. Los datos fueron tomados del libro Pulser Láser Deposition of ZnO [45].

Composición del blanco y temperatura de sinterización	Sustrato, temperatura y presión de crecimiento.	Propiedades
$Zn_{1-x}Mn_xO$ $x = 0$ a $0.35$ $900^\circ C$	Zafiro (0001) $600^\circ C$ , $5 \times 10^{-5}$ Torr	Las películas tienen localizados un espín de 5/2 de Mn. Los parámetros de red incrementan en longitud con <i>x</i> . Las películas muestran una gran magnetoresistencia. No hay evidencia de ferromagnetismo [38].
$Zn_{1-x}Mn_xO$ $x=0.36$ $900^\circ C$	Zafiro (0001) $600^\circ C$ , $5 \times 10^{-5}$ Torr	Compartimiento de vidrio de espín [46].
$Zn_{1-x}Mn_xO$ $x = 0$ a $0.30$	Zafiro (0001) $600^\circ C$ , $10^{-9}$ Torr	Parámetro de red, <i>c</i> incrementa con <i>x</i> (0 a 0.30). La Banda energía incrementa de 3.27 a 4.2 eV con <i>x</i> . Las películas muestran ferromagnetismo con <i>x</i> = 0.1 y 0.3 [14].
$Zn_{1-x}Mn_xO$ $x = 0$ a $0.35$	Zafiro (0001) $610^\circ C$ , $5 \times 10^{-5}$ Torr	Solubilidad de Mn en ZnO hasta 35 at%. Parámetro de red <i>c</i> , se incrementa con <i>x</i> . Banda gap se incrementa con la fracción atómica del Mn. No hay evidencia de ferromagnetismo en las películas [47].
$Zn_{0.9}Mn_{0.1}O$ $500^\circ C$	Cuarzo $400^\circ C$ 0.3 mbar	El contenido de Mn en las películas fue de ~ 2.21 % con distribución homogénea. Ferromagnetismo en la película $Zn_{0.978}Mn_{0.022}O$ [48-49].

Continuación tabla 1:

$Zn_{0.87}Mn_{0.13}O$ 900 °C	Zafiro (0001) 400 °C, 0.3 a 0.4 mbar	El contenido de Mn en las películas fue de 13%. Recocido durante 20 minutos mejora la cristalinidad. Fuerte decrecimiento de la intensidad de la fluorescencia en la banda de emisión en el azul se observo en el espectro de Fotoluminiscencia con el dopaje de Mn [50].
$Zn_{1-x}Mn_xO$ $x = 0$ a 0.36 1100 °C	Zafiro (0001) 350 °C a 600 °C  $10^{-6}$ a $10^{-3}$ Torr 600 °C $5 \times 10^{-4}$ Torr	La magnetización es constante a 200 K para las muestras no conductoras. El crecimiento epitaxial mejora con el dopaje de Mn con $x=0.05$ y se deteriora con $x > 0.05$ . Los parámetros de red $a$ y $c$ se incrementan y la rugosidad decrece con $x$ . Todas las películas están en estado paramagnético [51].
$Zn_{1-x}Mn_xO$ $x = 0$ a 0.22 500 °C, 900 °C	Zafiro (0001) 500 °C > 0.2 mBar	El contenido de Mn en las películas fue el mismo que en el blanco. Los blancos sinterizados a 500 °C permitieron en las películas Ferromagnetismo [52].
$Zn_{1-x}Mn_xO$ $x = 0.06$ 500 °C	Zafiro (0001) 500 °C a 650 °C 1 mTorr	Las películas crecidas a 500 °C muestran ferromagnetismo. Antiferromagnetismo/paramagnetismo a 600 °C debido a los clouster [53].

Tabla 1: Parámetros de crecimiento y resultados obtenidos para películas de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  por PLD.

## 2.2 SÍNTESIS POR OTRAS TÉCNICAS.

En la tabla 2 se resume las propiedades y parámetros de crecimiento de películas delgadas de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  obtenidas por otras técnicas de crecimiento diferentes a PLD.

Técnica	Contenido de Mn.	Sustrato	Propiedades
MOCVD	$0 < x < 0.3$	Silicio y Zafiro (0001)  $T_s=450$ °C	Variación en los parámetros de red. Decrecimiento en la movilidad de cargas con el aumento de $x$ , concentración de cargas del orden de $1 \times 10^8$ $cm^{-3}$ para todas las muestras [34].
MBE	$0.02 \leq x \leq 0.30$	Zafiro	Las películas son paramagnéticas [26].

Continuación tabla 2:

RF	$x = 0.00, 0.05, 0.10$ y $0.15$ .	Silicio y Zafiro.  $T_s=450$ °C. P=0.02 Mbar	Las películas crecidas en silicio son paramagnéticas y tienen estructura policristalinas, las crecidas en zafiro son ferromagnéticas y cristalinas [54].
Chemical Spray Pyrolysis	$0.0 \leq x \leq 0.25$	Vidrio $T_s=400$ °C	La calidad cristalina de las películas decrece mientras la banda de energía incrementa linealmente con el aumento de $x$ [55].
MOCVD	$0 < x < 0.22$	Zafiro (0001)	Estructura wurtzita fue preservada al incorporar el Mn [25].
RF	$x = 0.04$ .	Vidrio	Propiedades típicas de un semiconductor tipo $n$ . Las películas presentaron ferromagnetismo después de realizarles un recocimiento a una presión de $3 \times 10^{-5}$ Pa durante 5 minutos, antes de esto eran paramagnéticas [56].
CVD	$x = 0$ y $0.05$ .		Para la muestra con $x=0.05$ tiene comportamiento Ferromagnético.El tamaño de grano para $x=0$ , fue de (15 a 20) nm y para $x=0.05$ entre (20a 25) nm [32].
MBE	$0.02 \leq x \leq 0.30$	Zafiro	Las películas son paramagnéticas [26].
RF	$x = 0, 0.05, 0.10$ y $0.15$ .	Zafiro	El tamaño de grano decrece con $x$ . Las películas son ferromagnéticas [57].
sol-gel	$x=0.1$		A temperatura ambiente la película es paramagnética y a bajas temperaturas es antiferromagnética. El contenido de Mn no afecta la estructura wurtzita del ZnO [27].
RF	$x = 0.05$ Atmosfera de gases ( $O_2$ y Ar)	(0001) $Al_2O_3$	Concentración de electrones decrece con el incremento de la presión parcial de oxígeno ( $PO_2$ ) hasta una razón 1:1 de Ar- $O_2$ . El cálculo de la concentración y movilidad de cargas fue de $\sim 10^{15}$ $cm^{-3}$ y $\sim 15$ $cm^2/Vs$ respectivamente [58].

Continuación tabla 2:

MOCVD	$x=0.006;$ $0.04; 0.12;$ $0.22. y 0.28$	Zafiro	Las películas son paramagnéticas cuando $x < 0.02$ y antiferromagnéticas para muestras con mayor contenido. Influencia de $x$ en la estructura de la banda de energía y los parámetros de red. La concentración de cargas a temperatura ambiente es independiente de $x$ [59].
MBE	$0 < x < 0.5.$	Zafiro 550°C	El parámetro de red $c$ , incrementa linealmente con $x$ y tiende a saturarse para muestras con $x \geq 0.2$ . La banda de absorción cambia a energías mayores con $x$ [31].

Tabla 2: Parámetros de crecimiento y propiedades obtenidos para películas de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  por diferentes técnicas de sinterización.

### 3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.

Las propiedades estructurales de las películas se determinan utilizando difracción de rayos X (XRD) [60], las propiedades morfológicas a través de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) [43] y Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) [61], la composición química se ha determinado con Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) [62]. El estudio de las propiedades ópticas se ha llevado a cabo utilizando Fotoluminiscencia [59] y Absorción óptica [55] mientras que para sus propiedades magnéticas, SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) [50] y Magnetómetro de muestra vibrante (VSM) [63], efecto Hall para las propiedades eléctricas [57].

Reportaremos investigaciones llevadas a cabo por diferentes grupos de investigación sobre las propiedades estructurales y ópticas de estas películas.

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL.

Los principales rasgos de películas delgadas de  $Zn_{1-x}Mn_xO$ , es que los iones  $Mn^{+2}$  sustituyen los sitios del  $Zn^{+2}$  sin cambiar la estructura cristalina [17,58, 60]. La figura 2 muestra un difractograma de rayos X de las películas de crecidas sobre zafiro en donde se observan los picos característicos de la estructura de wurtzita del ZnO y del sustrato [10], evidenciando que la estructura cristalina de las películas no ha cambiado a pesar de la presencia de los iones de  $Mn^{+2}$ .

Igualmente se ha podido establecer que de acuerdo al porcentaje de Mn presente en la estructura, los parámetros de red aumentan [10, 31-33,60] (figura 3), ya

que el radio iónico del Mn (0.083 nm) es mayor que el del Zn (0.074 nm) [60].

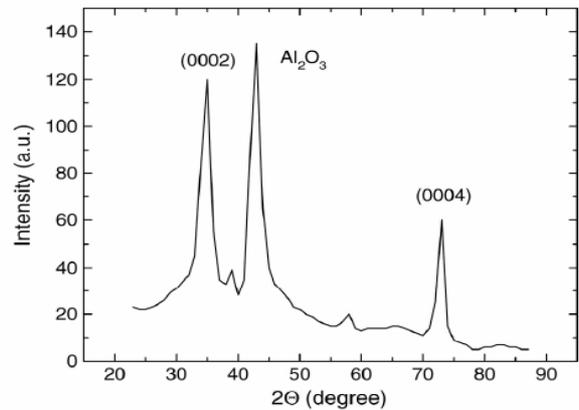


Figura 2: Difractograma de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  crecidas por PLD [64].

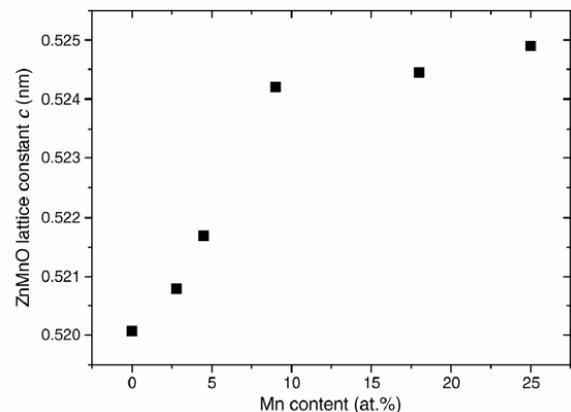


Figura 3: Dependencia del parámetro de red,  $c$  para películas de  $Zn_{1-x}Mn_xO$  con el incremento de la concentración de Mn [26].

#### 3.2 CARACTERIZACIÓN ÓPTICA.

El espectro de fotoluminiscencia del ZnO típicamente exhibe dos bandas. Una banda de emisión en la región ultravioleta (UV) que, corresponde a la banda cercana al borde de emisión (NBE), y la otra a la región visible debido a los defectos estructurales y a las impurezas [65].

En la figura 4 se muestra el espectro de fotoluminiscencia de películas delgadas de  $Zn_{0.85}Mn_{0.15}O$  crecidas a diferentes temperaturas de sustrato, donde se observa que a medida que aumenta la temperatura, las intensidades de los picos correspondientes a las regiones de UV y visible aumentan [35]. Otros estudios han reportado este resultado, pero lo atribuyen al aumento en contenido de Mn en las películas [33]. En otros casos, se ha observado un corrimiento en el pico de luminiscencia hacia el azul del espectro [33,55].

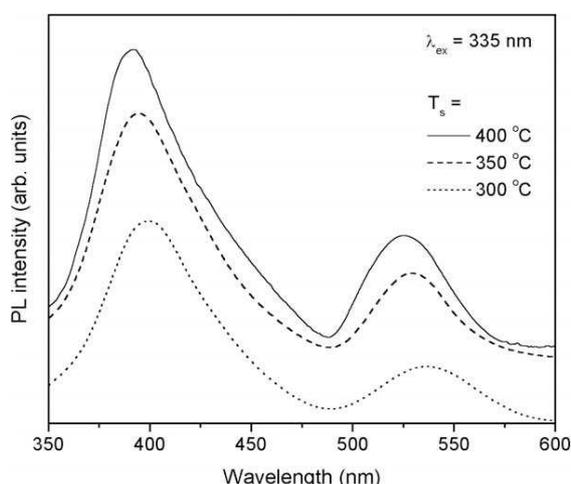


Figura 4: Espectro de Fotoluminiscencia de películas de  $Zn_{0.85}Mn_{0.15}O$  [35].

### 3. 3 CARACTERIZACIÓN MAGNÉTICA.

Utilizando magnetómetro SQUID o VSM se obtiene el ciclo de histéresis, donde se identifican la magnetización remanente, el campo coercitivo y se calcula el momento magnético, lo que permite establecer el comportamiento magnético de las películas.

Como se observo en las tablas 1 y 2, el comportamiento magnético es divergente, aún no se han establecido los parámetros exactos que inducen ferromagnetismos en las películas con el fin de aplicaciones en Espintrónica. Este es uno de los retos en la investigación de este tipo de películas.

## 4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lide, D. R. (1991), Handbook of Chemistry and Physics, 71st ed., CRC, Boca Raton, FL.
- [2] Vinay Gupta, K. Sreenivas. (2006), Pulsed Laser Deposition of Zinc Oxide (ZnO).
- [3] F.S. Hickernell, Intl. J. of High Speed Electronics and Systems, 10 (2000) 603.
- [4] T. Makino et al., Appl. Phys. Lett. 77, 1632 (2000).
- [5] K.L. Chopra, S. Major, D.K. Pandya, Thin Solid Films 102 (1983) 1.
- [6] K.S. Weissenrieder, J. Muller, Thin Solid Films 300 (1997) 30.
- [7] J.B. Webb, D.F. Williams, M.Buchanan, Appl. Phys. Lett. 39 (1981) 640.
- [8] H. Sato, T. Minami, Y. Tamura, S. Takata, T. Mori, N. Ogawa, Thin Solid Films 246 (1994) 86.
- [9] Rubi Diego, (2006), Nuevos óxidos metálicos ferromagnéticos,
- [10] Kyung Ah Jeon, Jong Hoon Kim, W.Y. Shim, et al, Journal of Crystal Growth 287 (2006) 66–69.
- [11] Sejoon Lee, Tae Won Kang, Deuk Young Kim, Journal of Crystal Growth 284 (2005) 6–14.
- [12] K. Sato, H. Katayama-Yoshida, Japan. J. Appl. Phys. Part 2 39 (2000) L555.
- [13] Sejoon Lee, Yoon Shon, Deuk Young Kim, Thin Solid Films 516 (2008) 4889–4893.
- [14] S.W. Jung, S.J. An, G.C. Yi, C.U. Jung, S.L. Lee, S. Cho, Appl. Phys.Lett. 80 (2002) 4561.
- [15] H.Y. Xu, Y.C. Liu, C.S. Xu, Y.X. Liu, C.L. Shao, R. Mu, J. Chem. Phys. 124 (2006) 074707.
- [16] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand, Science 287 (2000) 1019.
- [17] J. Pellicer-Porres, A. Segura, J.F. Sánchez-Royo, et al, Superlattices and Microstructures 42 (2007) 251–254.
- [18] J.H. Yang, L.Y. Zhao, Y.J. Zhang, et al, J.Alloys Compd. (2008), doi:10.1016/j.jallcom.2008.06.030.
- [19] J.S. Wang, C.S.Yang, M.J.Liou, et al, Journal of Crystal Growth 310 (2008) 4503–4506.
- [20] R.R. Galazka, S. Nagata, P.H. Keesom, Phys. Rev. B 22 (1980) 3344.
- [21] J.A. Gaj, J. Ginter, R.R. Galazka, Phys. Stat. Sol. B 89 (1978) 655.
- [22] J.A. Gaj, R. Planel, G. Fishman, Solid State Commun. 29 (1979) 435.
- [23] N.T. Khoi, J.A. Gaj, Phys. Stat. Sol. B 83 (1977) K133.
- [24] H. Ohno, Science 281 (1998) 951.
- [25] J. Gleize, E. Chikoidze, Y. Dumont, E. Rzepka, O. Gorochoy, Superlattices and Microstructures 42 (2007) 242–245.
- [26] A. Che Mofor, A. El-Shaer, A. Bakin, et al, Superlattices and Microstructures 39 (2006) 381–386.
- [27] J.H. Li, D.Z. Shen, J.Y. Zhang, et al, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 302 (2006) 118–121.
- [28] W. Prellier, A. Fouchet, B. Mercy, J. Phys. Cond. Matter 15 (2003) R1583.
- [29] S.A. Wolf, D.D. Awschalom, R.A. Buhrman, et al, Science 294 (2001) 1488.
- [30] K. Takamura, F. Matsukura, D. Chiba, H. Hono, Appl. Phys. Lett. 81 (2002).
- [31] V. Avrutin, N. Izyumskaya, Ü. Özgür, et al, Superlattices and Microstructures 39 (2006) 291–298.
- [32] Vijay Kumar Sharma, Venkata Srinu Bhadrani, Ghanshyam Das Varma, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 47, No. 10, 2008, pp. 7831–7835.
- [33] J.H. Li, D.Z. Shen, J.Y. Zhang, et al, Journal of Luminescence 122–123 (2007) 352–354.
- [34] E. Chikoidze, Y. Dumont, H.J. von Bardeleben, et al, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 316 (2007) e181–e184.
- [35] L. Raja Mohan Reddy et al, Current Applied Physics. (2008), doi:10.1016/j.cap.2008.06.016 Chemical.
- [36] Sejoon Lee, H.S. Lee, S.J. Hwang, et al, Materials Science and Engineering B 126 (2006) 300–305.

- [37] Mariana Diaconu, Heidemarie Schmidt, Andreas Pöpl, et al, Superlattices and Microstructures 38 (2005) 413–420.
- [38] T. Fukumura, Z. Jin, A. Ohtomo, H. Koinuma, and M. Kawasaki, Appl. Phys. Lett. **75**, 3366 (1999).
- [39] Robert Eason, Pulsed Laser Deposition of Thin Films, university of southampton, uk, wiley-interscience a john wiley & sons, inc., publication, 261-266.
- [40] H. Riascos, “Síntesis de películas delgadas de nitruro de carbono por ablación Láser”, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira (2007)
- [41] S. Karamat, S. Mahmood, J.J. Lin, et al, Applied Surface Science 254 (2008) 7285–7289.
- [42] Jae-Hoon Kim, Hooyoung Song, Eun Kyu Kim, Microelectron. J (2008), doi:10.1016/j.mejo.2008.07.050.
- [43] A.K. Pradhan, D. Hunter, Kai Zhang, J.B. Dadson, S. Mohanty, et al, Applied Surface Science 252 (2005) 1628–1633.
- [44] S.K. Mandal, T.K. Nath, Thin Solid Films 515 (2006) 2535–2541.
- [45] Vinay Gupta, K. Sreenivas. (2006), Pulsed Laser Deposition of Zinc Oxide (ZnO), 134-139.
- [46] T. Fukumura, Z. Jin, M. Kawasaki, T. Shono, T. Hasegawa, S. Koshihara and H. Koinuma, Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 958.
- [47] A. Tiwari, C. Jin, A. Kvit, D. Kumar, J.F. Muth and J. Narayan, Solid State Commun. 121 (2002) 371.
- [48] P. Sharma, A. Gupta, K.V. Rao, et al, Nature Material 2 (2003) 673.
- [49] P. Sharma, A. Gupta, F.J. Owens, et al, J. Magnetism and Magnetic Mater. 282 (2004) 115.
- [50] E.D. Posada, G. Tobin, E. McGlynn and J.G. Lunney, Appl. Surf. Sci. 208–209 (2003) 589.
- [51] S.S. Kim, J.H. Moon, B.T. Lee, O.S. Song and J.H. Je, J. Appl. Phys. 95 (2004) 454.
- [52] M. Diaconu, H. Schmidt, H. Hochmuth, et al, Thin Solid Films 486 (2005) 117.
- [53] A.K. Pradhan, K. Zhang, S. Mohanty, et al, Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 152511.
- [54] J. Elanchezhiyan, K.P. Bhuvana, N. Gopalakrishnan, et al, Journal of Alloys and Compounds 463 (2008) 84–88.
- [55] L. Rajamohan Reddy, P. Prathap, Y.P. Venkata Subbaiah, et al, Solid State Sciences 9 (2007) 718e721.
- [56] Deng-Lu Hou, Xiao-Juan Ye, Huai-Juan Meng, et al, Materials Science and Engineering B 138 (2007) 184–188.
- [57] J. Elanchezhiyan, K.P. Bhuvana, N. Gopalakrishnan, T. Balasubramanian, Materials Letters 62 (2008) 3379–3381.
- [58] Sejoon Lee, Hye Sung Lee, Sun Jae Hwang, et al, Journal of Crystal Growth 286 (2006) 223–227.
- [59] E. Chikoidze, Y. Dumont, F. Jomard, O. Gorochov, Thin Solid Films 515 (2007) 8519–8523.
- [60] N.O. Dantas, L. Damigo, et al, Journal of Non-Crystalline Solids 354 (2008) 4827–4829.
- [61] K. Masuko, A. Ashida, T. Yoshimura, N. Fujimura, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 310 (2007) e711–e713.
- [62] M. Diaconu, H. Schmidt, H. Hochmuth, et al, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 307 (2006) 212–221.
- [63] Wei Xu, Yingxue Zhou, Xinyi Zhang, et al, Solid State Communications 141 (2007) 374–377.
- [64] A.I. Savchuka, V.I. Fediv, S.A. Savchuk, et al, Superlattices and Microstructures 38 (2005) 421–427.
- [65] J.A. Pérez, J.L. Gallego, H. Riascos, et al, “Películas Nanoestructuradas de óxido de zinc (ZnO)”, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira (2008).