

DINÁMICA DE PLASMAS PRODUCIDOS POR ABLACIÓN LÁSER EN PRESENCIA DE CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO.

Dynamics of Plasma Produced by Laser Ablation in Presence of Magnetic Extern Field

RESUMEN

Se presenta una revisión del plasma producido por láser, y el confinamiento y dinámica de la pluma al expandirse dentro un campo magnético externo; resaltando el método de Espectroscopia de Emisión Óptica (EEO), como una técnica de diagnóstico de los plasmas producidos en el crecimiento de películas delgadas por ablación láser. Se expone una breve descripción de los algunos estudios realizados sobre el comportamiento de la pluma con un campo magnético en diversos laboratorios.

LILIANA P. VERA LONDOÑO

Estudiante

Ingeniería Física

Universidad Tecnológica de Pereira

lilianavera07@hotmail.com

PALABRAS CLAVES: Confinamiento del plasma, espectroscopia de emisión óptica, láser pulsado, crecimiento de películas delgadas.

ABSTRACT

This is a review of laser-produced plasma, the confinement and dynamics of plume, to expand into an external magnetic field; the method Optical Emission Spectroscopy is a technical of diagnostic in the produced plasma for the growth thin films by laser ablation. Also is show a brief description of some studies on the behavior pluma with a field magnetic in different laboratories.

KEYWORDS: *Plasma confinement, optical emission spectroscopy, pulsed laser, growth thin films.*

1. INTRODUCCIÓN

El plasma es un estado de la materia, que contiene iones y electrones libres, pero en conjunto es eléctricamente neutro. Se ha llamado cuarto estado pues es de muy alta energía, en el cual el gas está ionizado, es decir, los átomos debido a una gran agitación se mueven con mayor rapidez, chocando con otros y originando desprendimiento de algunos electrones orbitales [1].

Aproximadamente el 99% de la materia del Universo se encuentra en estado de plasma, aunque en los medios densos y fríos donde se desarrolla la vida, el estado de plasma es poco frecuente, pues en estas condiciones hay recombinación de las cargas libres [2,3]. Sin embargo en la Tierra el estado de plasma se da en la ionosfera, donde la radiación electromagnética libera electrones y ocurre fotoionización.

Otros tipos de plasmas naturales que se pueden presenciar en la tierra suceden en, las tormentas eléctricas, cuando un relámpago cruza la atmósfera y ioniza momentáneamente el aire, y en las auroras boreales. Plasmas espaciales y astrofísicos como en el Sol, los vientos solares, en el espacio interplanetario, y los que están en el medio interestelar e intergaláctico. Y artificialmente podemos observar plasmas producidos en, los tubos fluorescentes y de neón, en la materia expulsada

por la propulsión de cohetes, en el interior de los reactores de fusión y en las descargas eléctricas de uso industrial [4].

Como el plasma tiene partículas cargadas, su movimiento puede controlarse con altos campos magnéticos; uno de los problemas tecnológicos planteados por la fusión es, que las inestabilidades generadas por aumento de la presión del plasma a un valor de campo magnético dado, representan un desafío económico para un futuro reactor, por lo que entender los procesos que se dan en el confinamiento de la pluma es de gran importancia para las nuevas tecnologías basadas en plasma [5].

Estudiar la dinámica de plasmas producidos por ablación láser es de gran importancia para entender y controlar el crecimiento de películas delgadas (tabla 1), por técnicas como la Deposición de Láser Pulsado (PLD) [6]. Los parámetros de crecimiento de las películas delgadas, están correlacionados con las propiedades del plasma generado durante la ablación del blanco, especialmente la calidad de la película y su adherencia al substrato depende mucho de la energía con que las partículas arrancadas desde el blanco, chocan con la superficie del substrato, de ahí la importancia de estudiar la dinámica del plasma en presencia o no de un campo magnético externo [7].

2. CONTENIDO

El efecto de la fuerza eléctrica en el plasma, es de largo alcance logrando que las partículas estén acopladas y respondan colectivamente a cualquier alteración [8]. Las partículas cargadas presentan alta conductividad eléctrica, la cual interactúa con los campos magnéticos aplicados y con los campos propios generados.

El estudio del plasma constituye pues una de las áreas de mayor dificultad en la física, debido a las fuertes reacciones electromagnéticas que presentan gran complejidad en su comportamiento [9]. Por un dispositivo de descarga eléctrica, Irving Langmuir bautizó a los plasmas con este nombre, en 1929, por la aparente similitud de los movimientos oscilatorios de los electrones suspendidos en un mar de iones, con el de los cuerpos transportados por el plasma sanguíneo [10]. En 1936 Landau desarrolla la teoría estadística que describe el plasma y en 1942 Alfvén desarrolla las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido eléctrico en presencia de campo magnético [11]. En las últimas décadas ha venido desarrollándose con mayor interés el estudio de plasmas, debido a sus aplicaciones en el campo de la fusión controlada y a la exploración espacial, al procesamiento de materiales por plasma y a la tecnología de las telecomunicaciones, entre otras [12,13].

Áreas de la tecnología en las que se usan recubrimientos delgados de manera generalizada :	Novedades en la aplicación de películas delgadas y temas de investigación
Óptica: espejos, divisores de haz, filtros, etc.	Superficies Reflectoras para óptica láser.
Eléctrica y electrónica: capas aislantes, conductores laminares, semiconductoras, celdas solares, dispositivos electrónicos, etc.	Herramientas de corte sofisticado, superficies resistentes al desgaste, que funcionan a altas temperaturas, recubrimientos en reactores termonucleares, cerámicas fuertes y duras para uso estructural.
Mecánica: películas lubricantes, capas resistentes al desgaste, barreras de difusión, recubrimientos duros para herramientas de corte,	Polvos Ultrafinos en lámina delgada, Materiales catalíticos, dispositivos fotovoltaicos.

etc.	
Química: recubrimientos contra corrosión química, cataiíticos. etc.	Recubrimientos transparentes y conductoras para dispositivos optoelectronicos, fotodetectores.
Biomédica: recubrimientos biocompatibles para implantes.	Películas con propiedades no lineales, dispositivos biómédicos, nanoestructuras, super-redes.

Tabla 1. Áreas de uso de recubrimientos duros y aplicación de la película delgada [14].

2.1. CONSIDERACIONES EN EL PLASMA

A) Longitud de Debye: El efecto de apantallamiento que limita el alcance real de las fuerzas de atracción o repulsión de las cargas, se denomina longitud de Debye, y es el radio de la esfera de influencia de cada carga dentro del plasma. La distancia crece al aumentar la temperatura, por lo tanto el apantallamiento es menos efectivo, y disminuye al aumentar la densidad de cargas, en este caso el apantallamiento es mayor. El plasma entonces responde colectivamente porque la esfera de Debye de cada partícula se puede traslapar con el resto de esferas [15]. Para que un plasma exista es necesario que las dimensiones del espacio que ocupa, sean mucho mayores que la longitud de Debye.

B) Frecuencia y temperatura del plasma: Al ser los iones mucho más pesados que los electrones, se asume que estos no se mueven, o que los electrones se mueven más rápido y están en equilibrio termodinámico [16], entonces la frecuencia de oscilación será la de los electrones y es denominada frecuencia del plasma, pero cuando el plasma es atravesado por un campo magnético pueden aparecer otro tipo de oscilaciones. Debido a la diferencia de masas, la temperatura iónica generalmente es mucho más baja que la temperatura electrónica; basados en la temperatura relativa de los electrones, iones y partículas neutras, los plasmas son clasificados como térmicos y no térmicos. La temperatura controla el grado de ionización, que es la proporción de átomos que ha perdido o ganado electrones. Un plasma parcialmente ionizado (1% de partículas ionizadas), responde a campos magnéticos y puede tener alta conductividad eléctrica [17].

C) Inestabilidades e interacciones electromagnéticas: Precisamente como en el plasma se generan diversos tipos de inestabilidades, gran parte de la investigación en física de los plasmas consiste en entender mejor estas

inestabilidades y poderlas controlar con ayuda de campos magnéticos. El plasma interactúa con los campos electromagnéticos externos y propios, por lo que si el plasma es muy denso o se mueve con gran velocidad, puede causar deformaciones al campo aplicado. Con esta interacción es que se logra controlar ciertas inestabilidades y guiar el plasma por medio de campos magnéticos intensos, lo que es usado con propósitos tecnológicos en la experimentación con gases de los laboratorios. La generación por láser de plasmas densos de alta temperatura, expandiéndose a través de un campo magnético, permite la investigación de inestabilidades [18].

D) Comportamientos del plasma con el campo aplicado: En presencia del campo magnético, la distribución de energía cinética de las especies neutrales es disminuida y ensanchada. En principio el campo no afecta las especies neutrales, sin embargo, los efectos colectivos en la pluma como la expansión a través del campo, dirigen colisionalmente el ensanchamiento, lo cual puede ser causa de la disminución de las especies atómicas [19]. Los electrones del plasma producido por láser pueden escapar a lo largo del campo magnético pues sus posiciones de carga serán ocupadas por electrones de fondo [20]. Mientras la presión cinética del plasma es más grande que la presión magnética, el plasma penetra a través de la región ocupada por el campo magnético. Como la pluma se expande, la presión decrece y la resistencia ofrecida por el campo magnético incrementa. Hay un confinamiento y detenimiento del plasma que toma lugar cuando estas presiones son balanceadas [21].

También hay que tener en cuenta que cuando un plasma se expande en un campo magnético, diversas fuerzas interactúan y surgen derivas que pueden aumentar situaciones de inestabilidad [22].

2.2. ESTUDIO ESPECTRAL

Por medio de la espectroscopía de emisión óptica, se realiza el diagnóstico de la pluma, pues a través de ésta técnica puede obtenerse información muy valiosa sobre la composición del plasma y otras propiedades como temperatura y densidad electrónica. El cambio en la emisión de especies y en el tamaño de las líneas espectrales, permitirá inferir o hacer una correlación con los cálculos teóricos de los mecanismos de propagación [23].

Cuando se obtienen los espectros de emisión de los plasmas estudiados, se identifican las líneas espectrales con sus respectivas transiciones electrónicas y las especies presentes en estos plasmas, usando la base de datos del NITS [24]. Así mismo se realizan los estudios correspondientes al ensanchamiento, y la medida de los principales parámetros de estos plasmas [25] en presencia

del campo, necesarios para investigar la dinámica de expansión.

La espectroscopia permite entonces obtener datos experimentales relativos al conocimiento de la estructura atómica y de los procesos relacionados con ella [26].

2.3. ABLACIÓN DE LÁSER PULSADO Y FORMACIÓN DEL PLASMA

Con la creación del primer láser en los años sesenta, se hacen las primeras publicaciones sobre estudios de la interacción láser-materia y la evaporación del material; sin embargo la técnica de *ablación láser*, solo toma importancia a finales de los ochenta, y desde entonces se ha despertado un gran interés en ella [27, 28]. En los últimos años la Ablación Láser ha sido utilizada para numerosas aplicaciones, destacándose como una técnica versátil para el crecimiento de películas delgadas, producción de nanopartículas y clusters [29, 30].

En ablación láser, la energía del pulso del láser es absorbida dentro de un pequeño volumen de la capa superficial de un sólido, denominado blanco, que se encuentra en una cámara de vacío; esta energía es convertida en calor casi instantáneamente. En el caso de la ablación usando láser con pulsos de nanosegundos, el tipo de ablación que se da, es térmica (conducción del calor, por calentamiento). Las especies que se desprenden de la superficie del blanco son principalmente átomos e iones [31]. En el material se da ebullición y expansión en fase de gas; la pluma que se genera, será irradiada por la parte final del pulso del láser, por lo tanto la intensidad de la luz incidente sobre el blanco es atenuada y consecuentemente los procesos de ionización y excitación de las especies en la pluma. Los primeros en utilizar esta técnica fueron Smith y Turner en 1965 mediante un láser de rubí en una cámara de vacío [32].

La formación de cluster y el crecimiento toma lugar a través de la nucleación y condensación de la pluma en los alrededores. El crecimiento cristalino de la película depende de factores como la densidad, energía, grado de ionización y el tipo de material condensado, así como de las propiedades físico-químicas del sustrato, que es un material que se encuentra a una distancia determinada del blanco. El principal parámetro de control es la presión del ambiente [33], ya que influye en el confinamiento de la pluma y por lo tanto en su depósito. La nube de plasma que se expande perpendicularmente desde la superficie del blanco reacciona con el gas circundante, esto da lugar a la formación y deposición de compuestos sobre un sustrato [34,35]. Si la ablación esta por encima del umbral, puede arrancar líquido que se empieza a condensar pero no se funde en sólido, este llega al sustrato formando droplets. Es por esto que las variaciones en la pluma, cuando la intensidad de la emisión espacial no es uniforme, da transiciones de fase

estructural, que conlleva modificaciones en el blanco (grietas, escamas, conos) [36].

En los plasmas producidos por láser, los efectos de autoabsorción [37], causan un ensanchamiento en las líneas [38,39]. Por esta estrecha relación entre la técnica y el plasma creado, es que realizar investigación con campo magnético aplicado, es de gran importancia, pues se han reportado trabajos donde ciertas propiedades de las películas han sido obtenidas con la manipulación de campos magnéticos externos. Suzuki *et al.* [40], reportaron la producción de películas de Óxido de Estaño dopado con Indio ITO, con baja resistividad y superficie plana morfológicamente, usando un campo magnético aplicado perpendicular a la pluma producida por PLD. El campo magnético actúa sobre las partículas cargadas en la pluma producida por láser y afecta la ionización de las especies tales como átomos y moléculas, incrementando así la densidad del plasma [41].

La absorción de la radiación láser por el gas ambiente en la pluma de plasma juega un papel sustancial en el proceso de evaporación del blanco y las características de emisión de las líneas espectrales [42].

3. PLASMAS PRODUCIDOS EN PRESENCIA DE CAMPO MAGNÉTICO

Los siguientes trabajos han sido realizados en diversos laboratorios y están relacionados con el diagnóstico de plasmas, producidos en presencia de campo magnético externo a diferentes intensidades y con distintos métodos de análisis:

Harilal *et al* en su publicación “**Confinement and dynamics of laser-produced plasma expanding across a transverse magnetic field**” [43], utilizaron un láser Nd:YAG de 1.06 μm y 8 ns de pulso para producir un plasma de aluminio, bajo un campo magnético de 0.64 T. Con espectroscopía de emisión analizaron cambios en la estructura y dinámica de la pluma, observando una mayor emisión y ionización en presencia del campo.

En el trabajo “**Optical emission in magnetically confined laser-induced breakdown spectroscopy**” [44] Shenet *al*, estudiaron la emisión óptica de plasmas de Al, Cu y Co expandiéndose en presencia de un campo de 0.8 T, utilizando un láser excímer KrF a una longitud de onda de 248 nm. La mejora en la emisión óptica para el Al y el Cu lo atribuyen a un incremento en la densidad efectiva del plasma como resultado del confinamiento magnético, mientras que en el plasma de Co la intensidad de la emisión decrece por una disminución en la densidad efectiva del plasma debido a la fuerza magnética.

Haverkamp *et al* en “**Plasma plume dynamics in magnetically assisted pulsed laser deposition**” [45], estudian la expansión del plasma producido por láser perpendicular a un campo magnético con una Sonda de

Langmuir, y encuentran que en las regiones donde el beta cinético es menor que 1, la pluma desacelera y hay un débil desplazamiento del campo magnético. También encuentran que la temperatura electrónica es más grande con la presencia de campo debido a un calentamiento óhmico.

En “**Dynamics expansion of laser produced plasma with different materials in magnetic field**” [46], Qindeel *et al* investigaron la expansión del plasma de diferentes materiales producidos por láser, variando la intensidad de campo y a una fluencia del láser de 125 mJ; la expansión de la pluma va aumentando gradualmente en la dirección del campo ha medida que este se va incrementando.

M. Khaleeq-ur-Rahman *et al*, “**Magnetic field effect on electron emission from plasma**” [47], publican los resultados obtenidos con una Sonda de Langmuir, para los plasmas producidos por un laser Q-switched Nd:YAG de 1064 nm para blancos de plata, donde se encuentra que la temperatura y densidad electrónica disminuyen con la presencia de campo magnético externo.

Rai en “**Effect of External Magnetic Field on the Optical Emission from Laser-produced Plasma**” [48], reporta medidas de ensanchamiento Stark en emisión H alfa confirmando el confinamiento magnético del plasma; la mejora en la intensidad de la emisión se correlaciona con la densidad como resultado del confinamiento magnético y del beta del plasma.

En “**Effects of an external magnetic field in pulsed laser deposition**” [49], García *et al* con un láser excímer KrF a 248 nm y una duración de pulso de 20 ns, crecen películas delgadas por PLD y estudian los efectos de un campo magnético de 0.4T producido por imanes permanentes de NdFeB; el substrato es ubicado en la superficie del imán (método Aurora). Se presenta un incremento en la emisión óptica, y se sugiere que puede ser debido principalmente a confinamiento de electrones en lugar del confinamiento de las especies iónicas, ya que no se observan cambios en la composición o incrementos en el espesor de la película.

La importancia de medir el campo eléctrico E inducido, en los bordes del plasma, desempeña un papel esencial en el confinamiento y procesamiento por plasma que esta siendo ampliamente reconocido [50]. Las fluctuaciones en la frontera de un plasma, causan transporte radial y con ello una pérdida de plasma y energía [51]. La interacción del rayo láser con el plasma después que se ha formado la pluma interviene en la energía del plasma después de su primera aparición [52].

Hay que tener un control sobre la presión de la energía cinética de las especies en el plasma, que se materializa en profundos cambios en la morfología de las películas

crecidas por la recolección del material ablacionado en el sustrato [53].

El efecto del plasma en el átomo es descrito por las perturbaciones, electrones, iones, pero también colectivos, poniendo el énfasis en los campos [54]. El uso de un campo magnético con una pluma creada por láser es especialmente interesante, ya que el campo magnético se pueden utilizar para ayudar a un mejor control de las propiedades dinámicas de estos plasmas transientes y energéticos [55].

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Milantiev, "Física del Plasma", Edit. Mir Moscú, 1987.
- [2] About Plasmas, from the coalition for plasma science, available: <http://www.plasmacoalition.org>
- [3] Focuslab, Laboratorio Plasma Focus, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires
- [4] W. Pietsch, "A study of laser produced cooper plasma at reduced pressure for spectroscopic applications", *Appl. Phys. B* 61, pp. 267-275, 1995.
- [5] L. Guazzotto, "Magnetic field profiles in fusion plasmas in the presence of equilibrium flow" *Plasma Phys. Control Fusion* 51, pp. 15, 2009.
- [6] M. Capitelli, "Laser-induced plasma expansion: theoretical and experimental aspects", *Science Direct, Spectrochimica Acta Part B* 59, pp. 271-289, 2004.
- [7] A. F. Semerok, "Features of laser spectroscopy and diagnostics of plasma ions in high magnetic fields", *J. Phys. B Opt Phys.* 36, pp. 4495-4509, 2003.
- [8] V. P. Gavrilenko, "Laser-spectroscopic methods for diagnostics of electric fields in plasma", *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 49, pp. 145-156, 2006.
- [9] V. Rai, "High speed plasma diagnostics for laser plasma interaction and fusion studies", *Laser Programme, Centre for Advanced Technology, India*, pp. 513-549, 1998.
- [10] J. Martinell, "Los Prometeos modernos o el esfuerzo para controlar la Fusión Nuclear", *La ciencia para todos*, México, 1995.
- [11] S. Bravo, *Plasmas en todas partes*, La ciencia para todos, México, 1997.
- [12] F. F. Chen, "Industrial applications of low-temperature plasma physics", *Phys. Plasmas*, vol. 2, No. 6, pp. 2164-2175, June 1995.
- [13] J. R. Roth, *Industrial Plasma Engineering*, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Tennessee, vol. 2, 2001, p. 124.
- [14] R. Diamant, "Déposito de Capas Delgadas por Ablación con láser pulsado", M. Sc. Disertación, Div. Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Izapatalapa, 1998.
- [15] R. O. Dendy, *Plasma Dynamics*, Oxford New York, 2002.
- [16] F. Gordillo, J. Albella, *Descargas Eléctricas en gases: plasmas*, Depto Física e ingeniería de superficies, cap 2, pp. 1-28.
- [17] L. Franco, *Estudio espectroscópico de plasmas del aire, cobre y aluminio producidos por láser*, Universidad Tecnológica de Pereira, Tesis profesional, 2008.
- [18] A. Neogi, R. K. Thareja, *Instabilities in laser-produced carbon plasma expanding in a nonuniform magnetic field*, *Appl. Phys. B* 72, pp. 231- 235, 2001.
- [19] S. Harilal, B.O'Shay, M. S. Tillack, "Debris mitigation in a laser-produced tin plume using a magnetic field", *J. Appl. Phys.* 98, 036102, 2005.
- [20] K. Kemel, "Study of magnetic diffusion in the LaPD", *Erasmus Mundus Master on Nuclear Fusion Science and Engineering Physics*, Tesis Maestría 2008.
- [21] M. Tillack, S. Harilal, F. Najmabadi, and J. O'Shay, "Magnetic Confinement of an Expanding Laser-Produced Plasma", *UC San Diego, Center for Energy Research Fpo5.45*, 2005.
- [22] S. Alexiou, "Overview of plasma line broadening", *High Energy Density Physics*, vol 5, pp. 225-233, 2009.
- [23] A. Bogaerts, "Effect of laser parameters on laser ablation and laser - induced plasma formation: A numerical modeling investigation", *Spectrochimica Acta Part B* 60, pp. 1280-1307, 2005.
- [24] Online, Available: http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
- [25] A. Devia, *Introducción a la Física del Plasma*, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2002.
- [26] B. Martinez, "Estudio y evolución temporal en plasmas generados por láser aplicaciones en muestras metálicas de Indio y Estaño", Ph. D. Disertación, Fac. Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 1994.
- [27] J. C. Miller, *Laser Ablation and Desorption*, New York Academic, 1998.
- [28] M.V. Allmen and A. Blatter, *Laser Beam Interactions with Materials: Physical Principles and Applications*, Berlin. Springer, 1995.
- [29] Chrisey, B., Hubler, G.K. *Pulsed Laser Deposition of Thin Films*. Wiley, New York, 1994.
- [30] Amoruso, S. *Diagnostics of laser ablated plasma Plumes*. *Thin Solid Films*, pp. 562-572, 2004.
- [31] L. Torrisi, "Application Possibilities of plasmas generated by high power laser ablation", *Accademia Peloritana dei Pericolanti*, pp. 1-10, 2006.
- [32] Smith, H. M. and Turner, A. F. "Vacuum deposited films thin using a ruby laser", *Applied Optics*. No. 4, p. 147, 1965.
- [33] X. Y. Chen, "Interaction between laser beam and target in pulsed laser deposition: laser fluence and ambient gas effects", *Appl. Phys. A* 69, Department of Materials Science and Engineering, China, 1999.

- [34] S. Amoruso, "Features of plasma plume evolution and material removal efficiency during femtosecond laser ablation of nickel in high vacuum", *Appl. Phys. A* 89, pp. 1017-1024, 2007.
- [35] X. Wang, "Diagnostics of laser ablated plasma, Thin solid films, pp. 453-454, 2004.
- [36] R. Eason, *Pulsed Laser Deposition of Thin Films, Applications-led growth of functional materials*, Wiley, 2007.
- [37] M. Autin, A. Briand, P. Mauchien and J.M. Mermet, *Spectrochim. Acta Part B*, 48, 851, 1993.
- [38] W. Sdorra and K. Niemax, *Mikrochim Acta Vienna*, vol 107, p 318, 1992.
- [39] K. Fredriksson and S. Svanberg, "Stark Interaction for Excited States in Alkali Atoms, Investigated by laser Spectroscopy", Springer Verlag, pp. 189-197, 1997.
- [40] A. Suzuki, T. Mastsushita, T. Aoki, Y. Yoneyama, and M. Okuda, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, L401, 2001.
- [41] M. Tachiki, and T. Kobayashi, *Manipulation of Laser Ablation Plume by Magnetic Field Application*, *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, pp. 3642-3645 1999.
- [42] B. Német, "Time-resolved optical emission spectrometry of Q-switched Nd:YAG laser-induced plasma from copper targets in air at atmospheric pressure", *Spectrochimica Acta Part B* 50, pp. 1869-1888, 1995.
- [43] S. Harilal, M. S. Tillack, B. O'Shay, C. V. Bindhu, and F. Najmabad, "Confinement and dynamics of laser-produced plasma expanding across a transverse magnet", *Phys. Rev. E* 69, 026413, 2004.
- [44] X. K. Shen, Y. F. Lu, T. Gebre, H. Ling, and Y. X. Han, "Optical emission in magnetically confined laser-induced breakdown spectroscopy", *J. Appl. Phys.* 100, 053303, 2006.
- [45] J. D. Haverkamp, M. A. Bourham, S. Du, and J. Narayan, "Plasma plume dynamics in magnetically assisted pulsed laser deposition", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, 02520, 2009.
- [46] R. Qindeel, N. Bidin, and Y. Mat, *Dynamics expansion of laser produced plasma with different materials in magnetic field*, *J. Phys. Conference Series* 142, 012069, 2008.
- [47] M. Khaleeq-ur-Rahman, K. A. Bhatti, M. S. Rafique, A. Latif, K. T. Chaudhary, "Magnetic field effect on electron emission from plasma", *Vacuum* 83, pp. 936-941, 2009.
- [48] N. Rai, "Effect of External Magnetic Field on the Optical Emission from Laser-produced Plasma", *Scope and Challenge in Plasma*, pp. 5-11, 2005.
- [49] T. García, E. Posada, M. Villagran, J. Sanchez, P. Bartolo-Perez, J. Peña, "Effects of an external magnetic field in pulsed laser deposition", *Appl. Surf. Sci.* 255, pp. 2200-2204, 2008.
- [50] K. Takiyama, S. Furukawa, et al, "Effect of Collisional Disalignment on LIF Polarization Spectroscopy for Measuring Electric Field in Plasmas" in *Proc. 2007, 28 th ICPIG, Prague, Czech Republic Conf.*, pp. 1562-1565.
- [51] C. Ionita, P. C. Balan, et al, "Emissive probes for edge plasma measurements in magnetized plasmas " in *Proc. 2007, 28 th ICPIG, Prague, Czech Republic Conf.*, pp. 1683-1686.
- [52] G. Bekefi, *Principles of Laser Plasmas*, New York: Wiley: 1976.
- [53] T. Szorényi and Z. Geretovszky, "Ultrashort pulse PLD: A Technique for nanofilm fabrication", *Functionalized Nanoscale Materials*, pp. 121-143, 2008.
- [54] S. Alexiou, " Overview of plasma line broadening", *High Energy Density Physics*, vol 5, pp. 225-233, 2009.
- [55] B. O'Shay, "Confinement and dynamics of laser-produced plasma expanding across a transverse magnetic field", *Physical Review*, E 69, pp. 023413-026413-10, 2004.
- [56] M. Martin, "Formación de nanoclusters en la ablación láser de materiales: procesos iniciales en la deposición de nanoestructuras", *Opt. Pur. y Apl.*, Vol. 37, Núm. 2, 2004.
- [57] X. Zhu, "Using OES to determine electron temperature and density in low-pressure nitrogen and argon plasmas", *Plasma Sources Sci. Technol.* 17, pp. 6, 2008.
- [58] S. M. Cameron, "Electron Density and Temperature Contour Plots from a Laser-Produced Plasma Using Collective Ultraviolet Thomson Scattering", *IEEE Trans. On Plasma Science*, vol. 24, 1996.