

CARACTERIZACIÓN DE LÁSERS DE BAJA POTENCIA PARA UN SISTEMA DE GRABADO

Fabian Espinoza Maldonado

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología
al114123@alumnos.uacj.mx

Abimael Jiménez Pérez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología
abimael.jimenez@uacj.mx

José Rurik Farías Mancilla

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología
rurik.farias@uacj.mx

Ángel Saucedo Carbajal

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología
angel.sauceda@uacj.mx

J. Antonio Muñoz Gómez

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur, Departamento de Ingenierías
jose.munoz@cucsur.udg.mx

Resumen

En este trabajo se realiza la caracterización de un diodo láser que emite en la longitud de onda de 405 nm con potencias de emisión de 150 y 200 mW. El láser es integrado en una máquina CNC de dos grados de libertad, diseñada para analizar el grabado en diferentes materiales. Se obtienen los principales parámetros del diodo láser tales como: corriente de polarización, potencia óptica, corriente de umbral, espectro de emisión y punto focal. Al integrar el diodo láser en el sistema de posición *xy*, se caracteriza la velocidad y el ancho de la línea de grabado sobre diferentes materiales obteniendo resultados satisfactorios.

Palabra(s) Clave(s): Arduino, GRBL, Láser, Espectrografía, Óptica.

1. Introducción

La palabra “LASER” es un acrónimo que significa “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”. Los láseres se utilizan en una gran gama de aplicaciones desde reproductores de CD, corte industrial hasta tratamientos médicos. La luz generada por láser tiene dos características particulares, ser coherente y monocromática. La coherencia de la luz hace referencia a todas las ondas que conforman el haz de luz, éstas se encuentran relacionadas en fase una con otra, tanto en tiempo como en espacio. La monocromía de la luz se describe como un ancho de banda espectral excepcionalmente estrecho, cercano a 10 nm - 0.01 nm para láseres de aplicación específica [1].

La emisión de luz a nivel atómico se puede explicar a través del modelo atómico de Bohr. El electrón solo puede tomar valores de energía correspondientes a las órbitas fuera del núcleo, en ellas el electrón no emite energía. Únicamente cuando los electrones cambian de orbita, se produce la emisión de partículas subatómicas conocidas como fotones. La luz puede ser considerada como un fenómeno ondulatorio o como un flujo de fotones (naturaleza dual).

Los fotones se pueden caracterizar por su frecuencia y su energía a través de las ecuaciones (1) y (2).

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Donde λ es la longitud de onda, ν es la frecuencia, c es la velocidad de la luz y h es la constante de Planck [2]. La λ del fotón dentro del espectro electromagnético visible se mide en nanómetros (nm) y se encuentra en el rango de 390 a 750 nm [3].

Absorción, emisión espontánea y estimulada

En el modelo atómico, los electrones sólo pueden girar en ciertas órbitas alrededor del núcleo llamadas niveles de energía. La energía cinética del electrón equilibra exactamente la atracción electrostática entre las cargas opuestas del

núcleo (+) y los electrones (-) [4]. Los saltos de los electrones entre niveles de energía dan como resultado la absorción o la emisión de un fotón. La absorción de un fotón se presenta cuando un electrón pasa de un estado de energía inferior E_v (banda de valencia) a un nivel más alto E_c (banda de conducción), tal como se ilustra en la figura 1A. La emisión espontánea ocurre de forma contraria, cuando un electrón cambia su energía de E_c a E_v , emitiendo un fotón como se observa en la figura 1B. La emisión estimulada se presenta cuando el átomo se encuentra en su estado excitado y un fotón incide sobre él, como resultado de esta interacción su energía disminuye, emitiendo un segundo fotón que tiene las mismas características de dirección y fase que el fotón inicial. Una descripción gráfica de este proceso se muestra en la figura 1C.

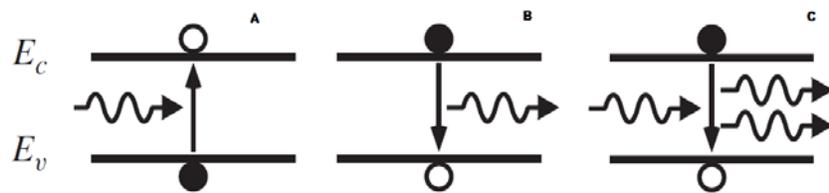


Figura 1 Absorción, emisión espontánea y estimulada en un láser.

Principio de funcionamiento del diodo láser

Un láser de semiconductor o diodo láser, se compone de tres elementos básicos que son: la región activa, la cavidad de resonancia y el método de bombeo; es necesario el funcionamiento de los tres elementos en conjunto para lograr la emisión láser. En la figura 2 se muestra la estructura típica de un diodo láser.

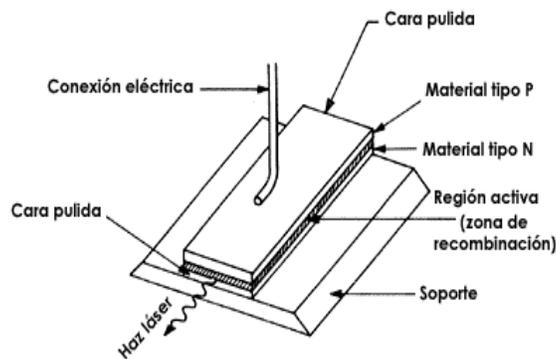


Figura 2 Estructura típica de un diodo láser. [3]

Los diodos láser utilizan uniones P-N de Arsenuro de Galio u otros semiconductores para generar acción láser. La luz emitida se caracteriza por ser coherente y monocromática [5]. El método de bombeo se obtiene al polarizar la unión, aplicando una corriente mayor en el material P con respecto al material N. Esto genera una diferencia de energía entre los niveles E_c y E_v del ancho de banda del semiconductor (E_g), que es capaz de separar espacialmente electrones y huecos [6]. Dado que los huecos son la ausencia de electrones en los enlaces atómicos, los electrones tienden a recombinarse con los huecos en la región activa del semiconductor. La recombinación tiene como resultado la emisión de fotones [4].

Para alcanzar la amplificación de la luz se utiliza la cavidad resonante, confinando la región activa entre ambas caras de la unión P-N. Éstas se encuentran altamente pulidas, con el fin de reflejar la luz emitida. Como resultado, los fotones se multiplican y alcanzan mayores intensidades de emisión. La inversión de población en el medio activo es una precondition para que se efectúe la acción del láser, lo cual permite que exista una mayor concentración de electrones en E_c que en E_v .

Interacción de la luz con la materia

La absorción óptica a nivel macroscópico es el fenómeno en el cual los materiales atenúan cualquier onda electromagnética que pasa por ellos. A nivel atómico el material contiene más electrones en E_v que en E_c , por tal motivo predomina la absorción [8]. Este fenómeno solo ocurrirá cuando la energía del fotón, coincida con el E_g del material. De tal manera que, la energía de los fotones incidentes pueda elevar el nivel energético de los átomos. En un material no transparente la energía lumínica (flujo de fotones) se transforma en energía térmica, llevando a los átomos que la conforman a un estado de mayor vibración. A nivel macroscópico este fenómeno se traduce en un aumento de la temperatura del material donde está incidiendo la luz. La alta concentración de la luz en un punto puede causar la incineración del material.

Sistema de grabado

Para mecanizar una pieza con el fin de marcarla; normalmente, se utiliza un sistema de coordenadas rectangulares de dos dimensiones xy , las cuales especifican el movimiento de la herramienta de grabado (el diodo láser). En el mercado estos sistemas utilizan mayoritariamente láseres de CO_2 pues poseen altas potencias de emisión; sin embargo, el costo es muy elevado y dichos sistemas son viables solo para procesos industriales [7].

Si se utilizan diodos láser con menores potencias (150 – 300 mW) es posible obtener sistemas de grabado a bajo costo [8]. El sistema de grabado con diodos láser permite realizar diferentes grabados y cortes en diferentes materiales, los cuales pueden ser utilizados en trabajos artesanales con las ventajas del bajo costo, menor tiempo de maquinado y mayor precisión [9].

Los movimientos en el plano xy están controlados por dos motores a pasos, con un tornillo sin fin montado en el eje motriz de cada motor. La pieza a mecanizar se sujeta al eje y , mientras que en el eje x se coloca el láser. De esta manera, el movimiento coordinado de ambos ejes logra el trabajo deseado en la pieza. Los desplazamientos de los ejes se realizan indicando las coordenadas de la posición a alcanzar en el plano xy ; además, permite controlar la velocidad de avance hasta la posición deseada y al mismo tiempo controlar el encendido y apagado del láser. El sistema es controlado con la plataforma de Arduino y el control numérico computarizado (CNC) a través de una tarjeta CNC shield compatible con Arduino. El lenguaje de programación estándar para el maquinado por CNC es el código G. El Firmware GRBL es el encargado de procesar cada línea de código de un programa de maquinado, para que el sistema ejecute los movimientos necesarios al realizar una rutina de trazado, haciendo posible el grabado de diferentes figuras con velocidades, determinadas en mm/seg. La velocidad de trabajo para el grabado, estará en función de las características del material a trabajar, siendo fundamental la composición del material.

En la sección de desarrollo se describe el procedimiento realizado para caracterizar los diferentes parámetros del láser y el sistema de grabado. Posteriormente, en la sección de resultados se exhibe la información obtenida de

las diferentes etapas de caracterización y, finalmente, en la sección de discusión se analizan los principales resultados.

2. Desarrollo

Para caracterizar el diodo láser fueron necesarias diferentes técnicas de medición y equipo de laboratorio pero también fue necesario integrar los sistemas mecánicos, electrónicos y ópticos en el sistema de posicionamiento xy .

Sistema de posicionamiento

El componente mecánico principal para un sistema de posición xy recae en el diseño mecánico de los ejes. Para tal efecto, se diseñó y construyó un sistema de posicionamiento lineal basado en el movimiento angular de un motor a pasos, el cual se caracteriza por tener una elevada capacidad de posicionamiento. Este motor es capaz de avanzar una cantidad de grados conocidos como pasos, dependiendo de sus entradas de control. El eje diseñado para el sistema de grabado se muestra en la figura 3. Como se aprecia, las piezas que soportan a los ejes y la cama de desplazamiento lineal fueron diseñadas e impresas en 3D con un polímero de tipo ABS. Al final del eje se cuenta con un sensor óptico que actúa como un cero físico que permite posicionar de manera automática el eje al inicio de cada movimiento. Este sistema de posicionamiento conforman tanto al eje- x como al eje- y . Sobre el primer eje se ajustó un diodo láser, obteniendo así, una máquina CNC con dos grados de libertad.

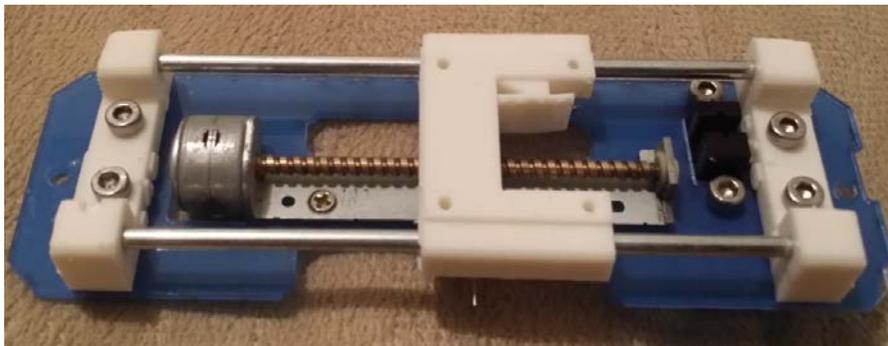


Figura 3 Eje motriz con motores a pasos.

Para utilizar los motores a pasos, se requiere un circuito de control y comunicación que permita enviar datos referentes a su posición y velocidad. En el sistema de grabado se utilizó la tarjeta controladora de código abierto CNC Shield. Ésta suministra los voltajes de alimentación a los motores (12-36 V) de corriente directa; además, cuenta con espacio para el control numérico individual de los dos ejes. El control de micro-pasos para los motores a pasos es realizado por medio del controlador A4988. Este controlador de motor a pasos es frecuentemente empleado en máquinas de impresión 3D.

El diagrama del sistema de grabado completo se muestra en la figura 4. Dentro de este sistema, es posible distinguir cinco circuitos principales; dos circuitos de control para motores a pasos (A4988), la etapa de potencia (tarjeta CNC Shield), el circuito de comunicación (Arduino) y el controlador de corriente del diodo láser. Cabe señalar que el sistema completo conforma una máquina CNC llamada LaserBot^{MR} que estará disponible en el mercado el próximo año.

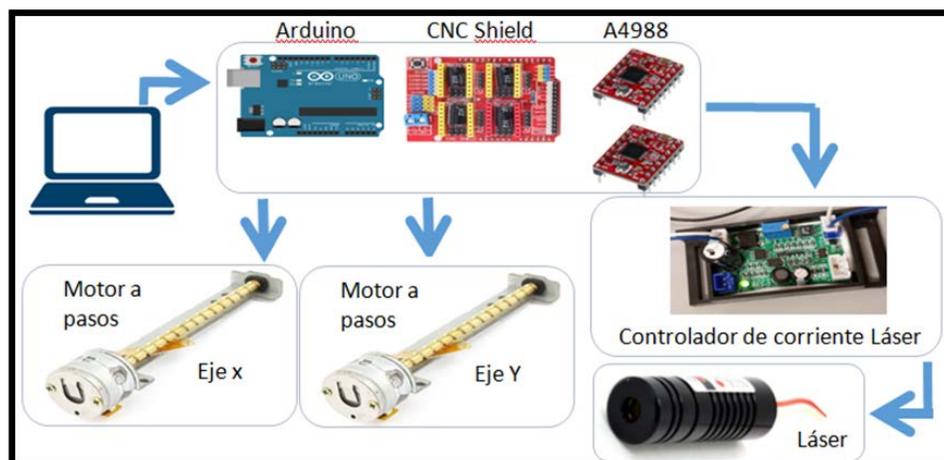


Figura 4 Elementos principales del sistema de grabado láser.

Controlador de corriente y modulo láser

Este controlador gestiona la corriente de entrada (la fuente de electrones) y, de esta manera, se controla la potencia óptica (P) de salida del diodo láser. El circuito de control debe cumplir con la especificación de la corriente de polarización del láser recomendada por el fabricante. La corriente de polarización máxima de los diodos láser utilizados debe ser menor a 300 mA. Las especificaciones del

controlador que se muestran en la tabla 1, indican que el circuito se puede utilizar en diodos láser con potencia óptica en el rango de 50 a 200 mW. El ajuste del nivel de corriente se realiza a través de un potenciómetro. Este circuito también tiene la opción de interrumpir o habilitar la acción del láser a través de una señal de control TTL (0 - 5V).

Tabla 1 Especificaciones del controlador de corriente para el diodo láser.

Especificaciones del controlador de corriente
Alimentación 12 V, CD
Indicador LED ON-OFF
Entrada de control TTL
Ajuste de corriente con potenciómetro
Salida de alimentación láser 3-5 V
Salida de alimentación ventilador 12 V

El fabricante establece las siguientes especificaciones del diodo láser: radiación de la luz en el rango del color azul ($\lambda = 405 \text{ nm}$), voltaje de alimentación de 3 a 5 V, corriente de polarización ($<300 \text{ mA}$) y potencias ópticas de 150 mW y 200 mW. El módulo de los diodos láser se muestra en la figura 5, el cual tiene las siguientes dimensiones: 44.12 mm de largo y 15.13 mm de diámetro. El módulo funciona como soporte y disipador de temperatura del diodo láser. También posee un sistema de ajuste con una lente para enfocar el haz de luz y concentrar toda la energía en un punto.

Figura 5 Módulo láser de 405 nm con lente para ajuste de enfoque.

Caracterización del láser

Si un conjunto de rayos paralelos atraviesan una lente, en una determinada distancia focal, los rayos convergerán en un punto. La distancia entre el centro de la lente y el punto focal se conoce como la distancia focal de la lente, tal y como se muestra en la figura 6. El diámetro mínimo de concentración está determinado por λ , la divergencia del haz y las características de la lente [3].

La estructura típica del diodo láser es rectangular (ver figura 1). Por ende, la abertura de la unión tiene esa forma y el rayo de emisión tiene un perfil espacial rectangular [10]. Con el fin de cambiar el perfil espacial para que éste sea circular y, de esta manera, enfocar toda la luz emitida en un punto, se utiliza un lente astigmático y biconvexo. Las propiedades de este tipo de lentes, aproximan el perfil espacial a un óvalo; por lo tanto, se logra enfocar la luz en un punto redondo. Con el uso de este tipo de lentes surge otra problemática; el lente refracta la luz que incide en él desviándola de su curso. La luz refractada sigue su curso en línea recta y converge en el punto focal, a una distancia determinada, figura 6.

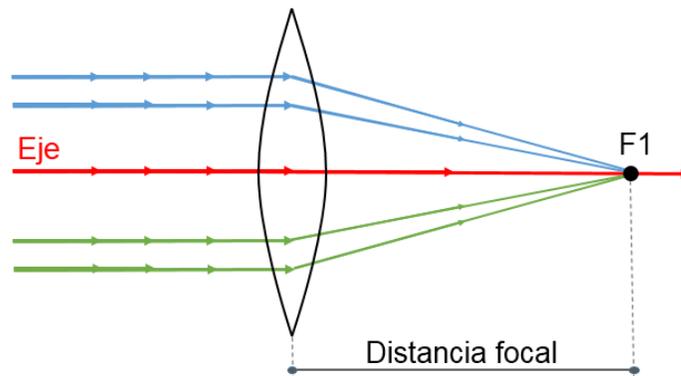


Figura 6 Descripción del funcionamiento de un lente astigmático y biconvexo.

En el primer prototipo del sistema LaserBot^{MR} fue complicado enfocar el haz de luz a una distancia de 7 cm, altura que originalmente había entre la lente del módulo láser y la superficie de trabajo. Por lo que fue necesario realizar pruebas de enfoque sobre una base de altura variable hasta encontrar la distancia focal de la lente en 9 cm. Una vez enfocado el haz de luz se hizo incidir sobre la superficie de algún material para grabarlo. El efecto del haz sobre el material puede ser incineración, vaporización o reacción fotoquímica [11].

Para realizar el estudio del parámetro P en función de la corriente de polarización se utilizó la configuración mostrada en la figura 7. El medidor ThorLabs PM320E es un equipo que mide la potencia y energía óptica [12]. Este equipo utiliza un sensor Thorlabs S130C basado en un fotodiodo que capta el haz de luz láser con potencias entre 5 mW y 500 mW. Para realizar la medición hay que hacer incidir el haz de luz láser sobre la abertura del sensor. Se midió la potencia de emisión de dos diodos láser de 150 mW y 200 mW, respectivamente. Como resultado, se obtuvo la gráfica de P en función de la corriente de polarización del diodo láser.

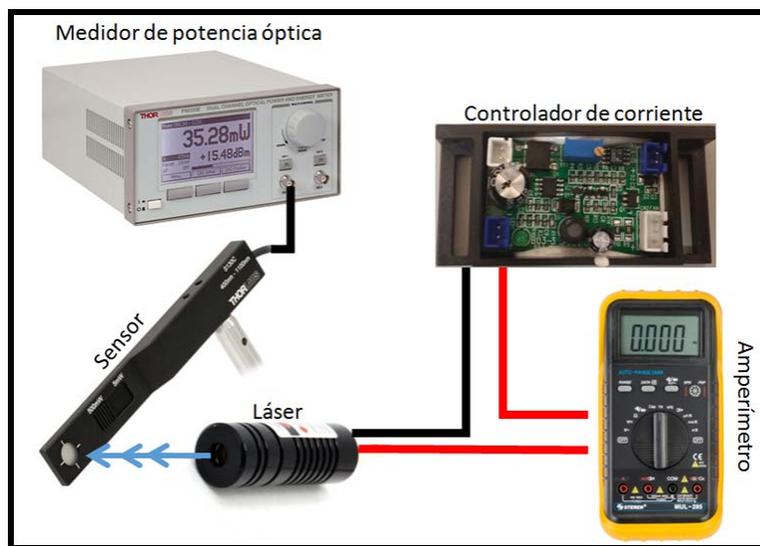


Figura 7 Configuración para medir la potencia óptica del láser.

El espectro de emisión del láser, es la medida de la distribución espacial de la energía. Este análisis nos permite obtener parámetros importantes del haz como la longitud de onda media, la distribución espectral y la intensidad pico. Para realizar esta caracterización se utilizó la configuración mostrada en la en la figura 8. Primero el haz del diodo láser se incidió sobre un divisor de haz con el fin de atenuar la potencia óptica que recibe el sensor. Después, el rayo reflejado se apuntó hacia una lente que se conectó por fibra óptica al espectrómetro ThorLabs CCS200 [13]. Como resultado se obtuvo la gráfica de λ en función de la intensidad de la luz.

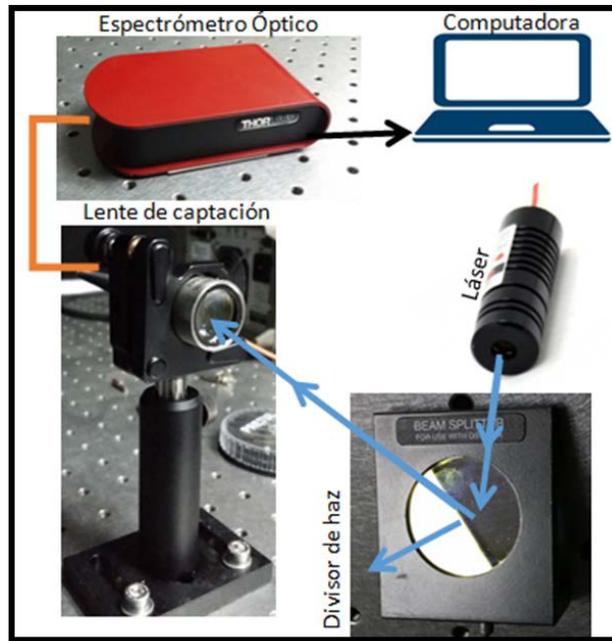


Figura 8 Configuración para medir el espectro de emisión del láser.

Caracterización del sistema de grabado

El sistema se caracterizó grabando diversos materiales con potencias de 150 y 200 mW, utilizando diferentes velocidades de desplazamiento en mm/seg. Un material blanco refleja más la luz debido a su bajo espectro de absorción pero un objeto con color definido muestra una mejor absorción óptica, porque solo es capaz de reflejar una porción del espectro de la luz que incidió en él. Por otro lado, materiales con color negro absorben todas las longitudes de onda del espectro visible; por lo que, incidir el haz de luz sobre un material oscuro se tiene mayor eficiencia con la desventaja de que la marca del grabado con láser es oscura.

3. Resultados

Se determinó que tanto el diodo láser de 150 mW como el de 200 mW tienen una corriente de umbral (i_{th}) de 25 mA, con un punto no focalizado, apenas perceptible para el ojo humano. La aparición de un punto focalizado con tonalidades azules fue a partir de 100 mA donde se observó una ligera ablación en la mayoría de los materiales caracterizados.

La gráfica de P en función de la corriente de polarización para el láser de 200 mW se muestra en la figura 9, donde se observa una característica lineal de la emisión del diodo. Es decir, el aumento o reducción de la corriente de polarización generará un incremento o disminución de P . Un aspecto importante es que la concentración de la luz en un solo punto no aumenta el valor de P , solo crea una concentración mayor de energía.

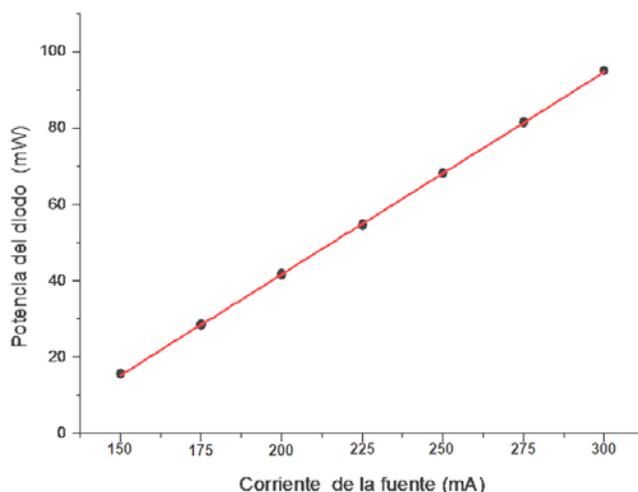


Figura 9 Potencia en función de la corriente para un diodo láser de 200 mW.

Los resultados de la medición del espectro de emisión nos ayudaron a determinar la λ de emisión láser en función de la intensidad. La medición realizada utiliza un sistema capaz de detectar longitudes de onda en el rango de 350 a 700 nm con una precisión cercana a 0.5 nm. En la figura 10 se observa que el diodo láser de 200 mW, presenta una λ media de 408 nm con un ancho de banda espectral que cambia de acuerdo a la corriente de polarización del diodo láser. En el punto de máxima corriente (300 mA) el ancho de banda espectral abarcó desde los 403 hasta los 412 nm (ancho de 9 nm). Los resultados de la medición del espectro fueron muy similares para el caso del láser de 150 mW.

La caracterización del grabado se realizó trazando cuadrados y utilizando diferentes materiales. La figura 11 muestra los resultados con madera, en la cual se utilizaron tres diferentes corrientes de polarización del láser (200, 250 y 300 mA) y seis diferentes velocidades de trazado (20, 40, 60, 80, 100 y 120 mm/s). En

todos los materiales se observó la misma tendencia, a mayor velocidad de trazado menor efecto de grabado y/o corte.

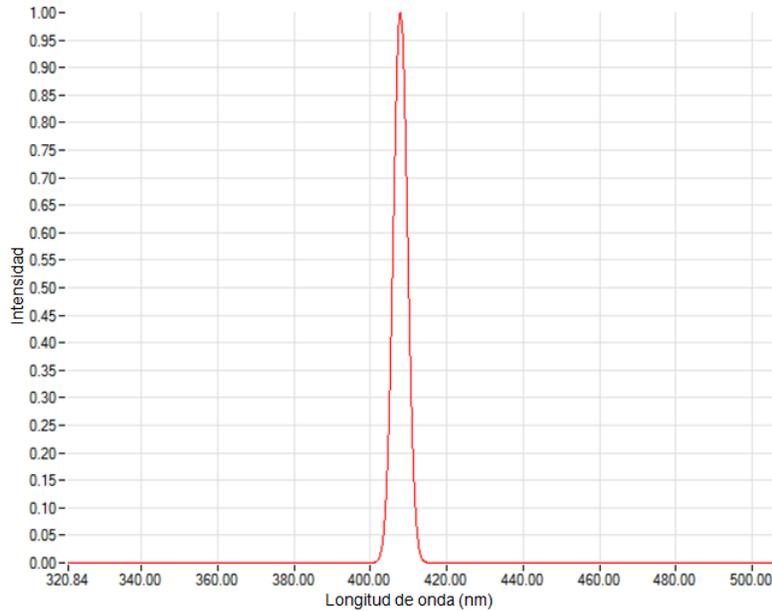


Figura 10 Medición espectral de emisión láser para láser de 200 mW.

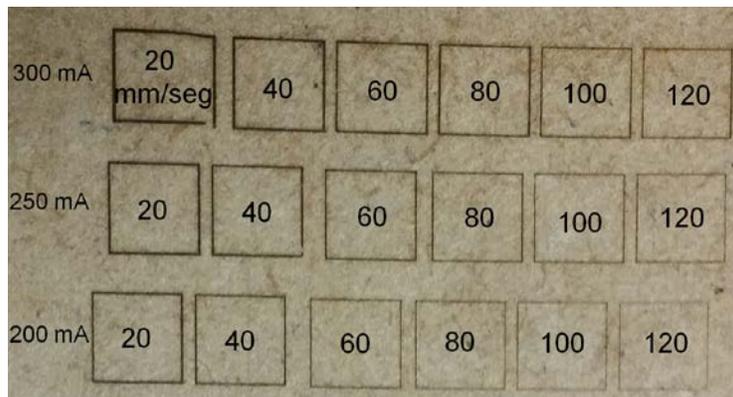


Figura 11 Grabado en madera láser de 200 mW diferentes corrientes de polarización.

El procedimiento de la figura 11 se realizó sobre diversos materiales, en las tablas 2 y 3 se muestran los resultados utilizando el diodo láser de 150 mW y 200 mW, respectivamente. Fue posible observar que en algunos materiales; además del grabado es posible realizar cortes finos. Sin embargo, para cada material la velocidad y la corriente de polarización del diodo láser, produce resultados

diferentes. El objetivo de este estudio fue determinar la corriente de polarización y la velocidad de trazado ideales para cada material.

Tabla 2 Relación de materiales grabados y cortados con el láser 150 mW.

Material	Grabado	Corte	Velocidad de corte mm/min
Cartón corrugado	✓		
Cartón corrugado naranja	✓	✓	20, 40
Madera	✓		
Madera de aserrín	✓		
Etilvinilacetato blanco (foamy)			
Etilvinilacetato azul (foamy)	✓	✓	20
Cartulina azul	✓		
Fieltro blanco			
Fieltro naranja	✓	✓	20
Papel Amarillo	✓	✓	20
Papel Blanco			
Chocolate	✓		
Cobre			

Tabla 3 Relación de materiales grabados y cortados con el láser 200 mW.

Material	Grabado	Corte	Velocidad de corte mm/min
Cartón corrugado	✓		
Cartón corrugado naranja	✓	✓	20, 40, 60
Madera	✓		
Madera de aserrín	✓		
Etilvinilacetato blanco (foamy)			
Etilvinilacetato azul (foamy)	✓	✓	20, 40, 60
Cartulina azul	✓		
Fieltro blanco	✓		
Fieltro naranja	✓	✓	20, 40, 60, 80
Papel Amarillo	✓	✓	20, 40, 60, 80, 100
Papel Blanco	✓	✓	20, 40, 60, 80, 100

Finalmente, con ayuda de un microscopio digital se realizó la medición del espesor de la línea de grabado del diodo láser, para ello se utilizaron algunas de las muestras obtenidas en las tablas 2 y 3. En la figura 12 se observa cómo se utilizó un software que aproxima la distancia entre un punto y otro para determinar el espesor promedio de 0.006 pulgadas = 152µm para el caso específico de una velocidad de grabado de 20 mm/seg sobre madera.

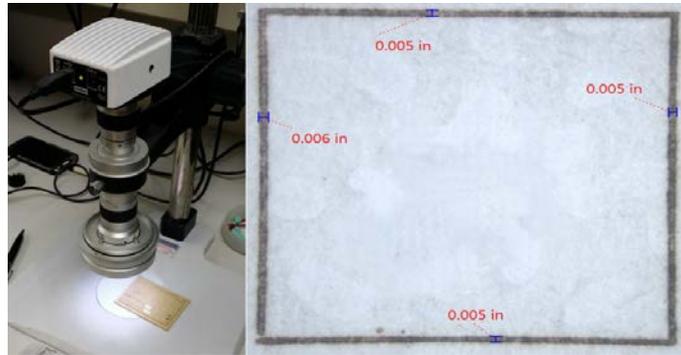


Figura 12 Medición del ancho de la línea de grabado.

4. Discusión

Los valores experimentales de la potencia óptica del láser difieren de manera importante con las especificaciones del fabricante. Los diodos láser no alcanzaron las potencias de emisión especificadas por el fabricante (150 y 200 mW); solo se logró obtener las potencias máximas de 83 y 95 mW con la corriente de polarización más alta de 300 mA. Esto es entendible considerando que los diodos láser son de bajo costo y manufacturados en China. Si en el sistema de grabado se utilizan diodos láser con especificaciones más controladas o con mayores potencias de emisión, se aumentaría el costo del sistema y el peso del diodo láser, ya que, para potencias mayores a 300 mW es inherentemente necesario un sistema de disipación de temperatura.

Sin embargo, la λ de emisión láser en función de la intensidad demuestra que para ambos diodos láser, la λ media fue de 408 nm (muy cercana a los 405 nm) con un ancho de banda espectral de 9 nm.

Es importante observar que la velocidad con la que los portadores se inyectan en un diodo láser se determina por la corriente de polarización y no por el potencial. Por lo tanto, existe una fuerte relación entre la corriente que fluye por el diodo y el valor de P emitido. Ambos diodos láser, esencialmente, no generaron potencia óptica cuando la corriente de polarización fue menor a $i_{th} = 25$ mA y, para valores mayores a i_{th} , P se incrementó proporcionalmente con el valor de la corriente. Implementar el sistema con un punto focal de 7 cm no fue posible debido a las

limitantes del sistema de enfoque del diodo láser (Resorte y lente). Por lo tanto, el punto focal óptimo se encontró en 9 cm.

5. Conclusiones

En este trabajo se analizaron los parámetros de corriente de polarización, potencia óptica, corriente de umbral, espectro de emisión y punto focal de un diodo láser de 405 nm con potencias de 150 y 200 mW. Para el análisis de la velocidad y ancho de la línea de grabado se planteó integrar estos dispositivos de emisión azul en una máquina CNC de dos grados de libertad. Los valores experimentales del parámetro de la potencia óptica difieren de manera importante con las especificaciones del fabricante en ambos diodos. Sin embargo, la longitud de onda de emisión fue muy cercana al valor especificado de 405 nm, el punto focal óptimo se encontró en 9 cm, la corriente de umbral fue de 25 mA. Finalmente, al caracterizar el sistema de grabado se encontró que la velocidad ideal de grabado fue de 20 mm/seg con un espesor de la línea de 152 μm .

6. Referencias

- [1] M. Gutiérrez Hernández, "Diseño, construcción y puesta a punto de un circuito de alimentación de láseres de diodo de alta potencia y amplificadores ópticos de semiconductor", Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- [2] H. Zimmermann, Integrated Silicon Optoelectronics, 2da Ed. 2010. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Pág. 386.
- [3] R. M. Marston, Circuitos de Optoelectrónica, 2da Ed. 2004, Ediciones Ceac, Barcelona, España. Pág. 280.
- [4] D. Vázquez, J. Carballido, M. De Falla, "Fundamentos del láser y su aplicación en urología" Archivos Españoles de Urología, Barcelona, España, vol. 61, n. 9, 2008 pág. 965-970.
- [5] L. Coldren, S. Corzine, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, 2nd Ed. 2012, Wiley, New Jersey, USA, 744.
- [6] M. Dorronsoro Mendiguren, La tecnología láser: fundamentos, aplicaciones y tendencias. 1ra Ed. 1995. McGraw-Hill, Madrid, España. Pág. 262.

- [7] Sistema de grabado láser LS100Ex. <http://www.gravograph.com/mexico/data/l100ex.pdf>. Jun-2016.
- [8] S. López Acosta, K. Olivares Arce, M. Tavira Días. "Diseño y construcción de un sistema de grabado para PCB utilizando láser de diodo azul". Instituto Politécnico Nacional. 2013.
- [9] P. Castro Martín, D. F. Guzmán Lozada, "Diseño y construcción de una máquina CNC para el corte y grabado en madera utilizando láser de CO₂, implementado con hardware y software libre como sistema de control", Universidad de las Fuerzas Armadas, 2015.
- [10] B. A. Fernández, I. A. Tobalina, R. B. Varillas, A. C. Salazar, El láser, la luz de nuestro tiempo, 1ra Ed. 2010. Globalia. Lluçmajor, España. Pág. 185.
- [11] J. L. Molpeceres Criado, "Fundamentos físicos de la tecnología láser". 2013. Grup. Español Conserv. España.
- [12] Optical Power and Energy Meter, Dual-Channel Benchtop Console. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2748. Junio 2016.
- [13] Compact CCD Spectrometers. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3482. Junio 2016

7. Autores

Fabian Espinoza Maldonado, es alumno activo de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en el Instituto de Ingeniería y Tecnología, se encuentra próximo a obtener su grado como Ingeniero en Sistemas Digitales y Comunicaciones con orientación al Diseño de Sistemas Digitales. Ha participado en diferentes proyectos de diseño y control de maquinaria CNC, óptica y síntesis de circuitos digitales.

Abimael Jiménez Pérez, obtuvo su grado de Doctor en Ciencias en Electrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 2008. Se desempeñó como profesor investigador en el Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara de 2008 a 2009. De 2010 a la fecha se desempeña como profesor Investigador en el Instituto de Ingeniería y Tecnología de la

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ha participado en diferentes proyectos de investigación en el área de modelado y simulación de dispositivos semiconductores y diseño de circuitos integrados digitales y FPGAs.

J. Antonio Muñoz Gómez, obtuvo su grado de Doctor en Ciencias de la computación por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en febrero del 2008. Actualmente es investigador en la Universidad de Guadalajara, Jalisco. Ha trabajado en áreas tales como computación de alto rendimiento, ecuaciones diferenciales parciales y funciones de base radial. Sus intereses incluyen el desarrollo tecnológico con fundamentos en sistemas mecatrónicos.

Ángel Saucedo Carvajal, obtuvo su grado de Doctor en Óptica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México, en 1999, desde agosto del 2012 trabaja en la síntesis de elementos ópticos difractivos para extender la profundidad focal de sistemas ópticos, ha trabajado en la caracterización y pruebas de interferometría óptica aplicada a MEMS de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Actualmente es miembro del programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP) y miembro del sistema nacional de investigadores.

José Farías Rurik Mancilla, obtuvo su grado de Doctor en Ciencias de Materiales en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) campus Chihuahua en 2003. De 2009 a la fecha se desempeña como profesor de física y ciencia de los materiales en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ha desarrollado investigación de las propiedades multiferróicas de los materiales y su acoplamiento en nanopartículas cerámicas ferroeléctricas. También está interesado en el desarrollo de sensores usando nanotecnología y la síntesis de materiales inteligentes.