

Control System for the Synthesis of Thin Films by Pulsed Laser Deposition

J. Conde, C. Kuo, and J. Silveyra

Abstract—The pulsed laser ablation process is a widely used technique for thin films deposition. In this method, a pulsed laser beam focuses onto a target ablating the impact site, called spot. Since preparing the target is a highly time consuming and expensive task, the spot is generally scanned across the target's surface. A typical pulsed laser deposition configuration has a moving mirror that scans the laser beam across a rotating target. We propose ablating the target with a spiral pattern to ensure a uniform ablation and maximizing the target's efficiency. This requires moving the mirror and target in sync with variable speeds. To this end, we designed and built robust electromechanical actuators driven by stepper motors, which are electronically controlled by an Arduino-based system. The core of the firmware is a precalculated lookup table with the time intervals between the motors' steps. Thus, motor control following computationally expensive positioning functions -as the spiral pattern- are not a problem. Users may operate the control system through a user-friendly interface. The modular firmware architecture facilitates future extensions as, for example, adding other motor positioning functions to enable different ablation patterns for research purposes. This development aims to be a valuable tool for the synthesis of thin films by pulsed laser deposition.

Index Terms—PLD, Pulsed laser deposition, Ablation, Thin films, Arduino, Embedded systems.

This work was supported in part by the Universidad de Buenos Aires, CONICET and the Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica under Grants UBACyT 20020170200095BA, UBACyT 20020170200094BA, PIP-2015-2017-GI-11220150100775CO, and PICT 2015-1238.

Juan M. Conde Garrido is with the Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Sólidos Amorfos/Laboratorio de Ablación Láser and CONICET - Universidad de Buenos Aires, Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN); Av. Paseo Colón 850, CP: 1063, Buenos Aires, Argentina (e-mail: jmcondegarrido@fi.uba.ar).

Cristina Kuo is with the Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Sólidos Amorfos/Laboratorio de Ablación Láser; Av. Paseo Colón 850, CP: 1063, Buenos Aires, Argentina (e-mail: cristinaa.kuo@gmail.com).

Josefina M. Silveyra is with the Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Sólidos Amorfos/Laboratorio de Ablación Láser and CONICET - Universidad de Buenos Aires, Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN); Av. Paseo Colón 850, CP: 1063, Buenos Aires, Argentina (e-mail: jsilveyra@fi.uba.ar).

I. INTRODUCCIÓN

Las películas delgadas (i.e. películas de espesor menor a $1 \mu\text{m}$) se encuentran actualmente en una gran cantidad de aplicaciones tecnológicas, tal como en el área de sensores y de microelectrónica [2, 3]. La deposición de películas delgadas por ablación láser pulsada (PLD, *pulsed laser deposition*) es una técnica que ofrece una gran versatilidad experimental [4]. El proceso ocurre dentro de una cámara de ablación (con atmósfera controlada) y consiste en focalizar un haz de láser pulsado sobre un blanco (el lugar donde el láser impacta el blanco se denomina *spot*), produciendo un plasma denso compuesto por átomos, moléculas, iones y electrones de alta energía que se dirigen hacia el sustrato y se depositan formando una película delgada. Los elementos del blanco se evaporan congruentemente, lo que permite la fabricación de películas homogéneas de áreas pequeñas y con la misma estequiometría que el blanco [5]. Las propiedades físicas (ópticas, eléctricas, microestructura, morfología, adhesión, etc.) de las películas fabricadas por PLD resultan, en muchos casos, superiores a las obtenidas por otras técnicas de deposición como evaporación estándar o evaporación con haz de electrones [6]. La Fig. 1 exhibe una geometría típica de un sistema deposición de películas delgadas por PLD.

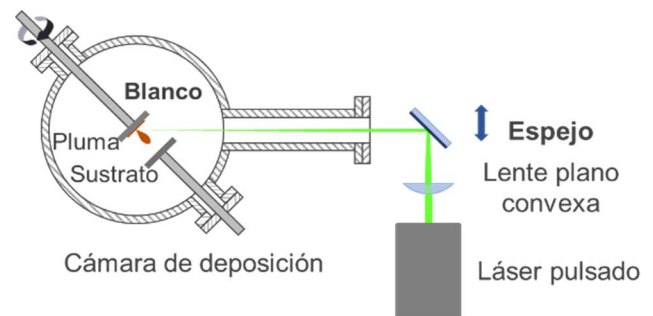


Fig. 1. Configuración del sistema de PLD del INTECIN.

Como la técnica de PLD permite focalizar el haz láser sobre una región de entre 1 y 2 mm^2 , es posible depositar películas a partir de blancos pequeños. Esto resulta ventajoso para blancos fabricados a partir de materiales costosos y/o difíciles de sintetizar, como es el caso del vidrio calcogenuro en *bulk* [2]. Para blancos de mayores dimensiones, se vuelve necesario barrer el *spot* por la mayor superficie posible y así optimizar el aprovechamiento del material. Que el haz láser incida sobre distintos puntos del blanco tiene además la ventaja de evitar el sobrecalentamiento y la formación de cráteres en el lugar de impacto. El sobrecalentamiento termina modificando la composición del blanco en el lugar ablacionado y el cráter termina modificando la dirección

angular y naturaleza del plasma eyectado [7]. Para barrer con el *spot* la superficie del blanco se pueden adoptar distintas estrategias: mover el blanco, mover el haz láser o una combinación de ambas.

La estrategia de mover el blanco, adoptada por algunos grupos de investigación [8-11], es conceptualmente simple, pero presenta un desafío experimental. Como los procesos de síntesis de películas delgadas por PLD deben realizarse en atmósfera controlada, se llevan a cabo dentro de una cámara de ablación (donde se realiza alto o ultra alto vacío, es decir 10^{-5} - 10^{-12} mbar y pueden ser luego llenadas de algún gas específico). Por lo tanto, el movimiento del blanco debe ser transmitido por motores fuera de la cámara utilizando pasantes de rotación, o bien, por motores dentro de la cámara aptos para aplicaciones en vacío [12]. La utilización de motores para vacío dentro de la cámara de ablación permite gran versatilidad en el diseño de configuraciones, aunque su costo es dos órdenes de magnitud mayor que el de los tradicionales (un motor paso a paso Nema 17 puede costar entre 10 y 20 dólares estadounidenses [13], mientras que su equivalente para vacío se consigue a partir de los 1700 dólares estadounidenses en Estados Unidos [14]). Además, el uso de motores para vacío requiere de cámaras de deposición grandes -capaces de alojarlos- y de pasantes eléctricos para vacío -para la alimentación eléctrica-, aumentando más aún el costo total del sistema de PLD.

La estrategia de mover únicamente el haz láser, adoptada por pocos grupos de investigación [15], tiene la ventaja de prescindir de accesorios especiales para vacío, ya que el control del camino óptico se realiza fuera de la cámara de ablación. Variando la dirección del haz láser, mediante el control del ángulo del espejo, es posible barrer el *spot* por toda la superficie del blanco. Simultáneamente, se debe mover la lente convergente de manera que la distancia lente-*spot* se mantenga constante [12] y no varíe el tamaño del *spot*. Estos movimientos finos del espejo y de la lente también presentan un desafío experimental, ya que requieren de montajes motorizados especiales y tornillos de alta precisión.

Con ambas estrategias es posible obtener una trayectoria de ablación en trama x-y o *raster* [12, 16], la cual es muy eficiente en el uso del blanco por ablacionar toda su superficie de manera uniforme.

Pero la estrategia más utilizada es la que combina los movimientos del blanco y del haz láser, ya que permite minimizar el costo de inversión del sistema de PLD. Teniendo en cuenta que la geometría más común de blancos para PLD es en forma de disco o pastilla (preparada a partir de polvo compactado), al blanco lo rota un motor externo a la cámara de ablación acoplado mediante un pasante de rotación para vacío. A su vez, el espejo se desplaza o se gira de manera que el haz láser realice un barrido lineal sobre el blanco rotante [6, 12, 17-19].

El procedimiento más sencillo es utilizar un haz estático mientras gira el blanco, generando una trayectoria de ablación en forma de anillo. Cuando el anillo ablacionado alcanza una cierta profundidad, se mueve al espejo en forma discreta (manualmente o con un motor) para que el haz ablacione a lo largo de un anillo de menor radio, y así sucesivamente [20]. Alternativamente, es posible generar

trayectorias de ablación en forma de segmentos realizando un barrido lineal del haz sobre un blanco estático. Estas técnicas tienen como desventaja la formación de surcos en forma de anillos o segmentos con las mismas consecuencias que la formación de cráteres (modificación de la dirección angular y naturaleza del plasma eyectado). Además, no se utiliza tan eficientemente el material del blanco, como con la trayectoria de ablación en trama o *raster* [21].

Dichos problemas se evitan moviendo al blanco y al haz láser continua y simultáneamente [6, 12, 22, 23]. La forma de la trayectoria de ablación en estos casos, que depende de la relación entre la velocidad de rotación del blanco y de desplazamiento del haz láser, ha sido raramente objeto de estudio en la literatura, habiéndolo mencionado únicamente Bonelli et al. [9] y Prentice et al. [11] al reportar trayectorias en forma de pétalos. El desplazamiento lineal del haz láser sobre un blanco rotante también puede generar una trayectoria de ablación más eficiente en forma de espiral, pero esto nunca ha sido reportado hasta la fecha. El inconveniente que sí han descrito varios autores es que, de utilizar velocidades constantes de rotación del blanco y de desplazamiento del haz láser, la tasa de ablación aumenta considerablemente con la disminución del radio del blanco [8, 9, 18]. Proponen entonces que el haz láser pulsado aumente su velocidad de barrido al desplazarse desde la periferia hacia el centro del blanco rotante.

El Laboratorio de Ablación Láser del Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería (INTECIN) de Buenos Aires, Argentina, posee un láser pulsado de Nd:YAG y tres cámaras de ablación con la geometría descrita en la Fig. 1. Este equipamiento ha jugado un rol clave en la síntesis de nuevos materiales durante los últimos años [2, 24-29] y se encuentra disponible para toda la comunidad científica de la región (desde 2016 el láser pertenece al Sistema Nacional de Láseres de la República Argentina [30]).

En el estudio y desarrollo de nuevos materiales, resulta crítica la optimización de la ablación del blanco durante la deposición, para poder sintetizar el mayor número de muestras rápidamente y a menor costo. Ablacionar solo una pequeña fracción del blanco, implica desperdiciar material con costosos elementos de alta pureza y un largo y tedioso proceso de preparación. Asimismo, es imprescindible evitar perforar el blanco, puesto que ablacionar incluso una pequeña región del portablancos obliga a descartar la película depositada.

Previamente al desarrollo presentado en este artículo, el sistema de PLD del INTECIN contaba con tres configuraciones posibles, las cuales permitían tres patrones de ablación diferentes:

1) Blanco y espejo estáticos (Fig. 2 (a)). Con esta configuración, se ablacionaba un único punto del blanco (Fig. 2 (b)).

2) Blanco estático y desplazamiento lineal del espejo (Fig. 3 (a)). El movimiento lineal del espejo, accionado por un motor dc (i.e. motor de corriente continua o por las siglas en inglés *direct current*) a velocidad constante (que no se podía modificar), permitía que el haz láser realizara un barrido a lo ancho sobre la superficie del blanco, ablacionando un segmento. El dispositivo mecánico con el que se contaba ocasionaba que se ablacionaran más los extremos del

segmento (cuando el motor revertía la carrera) (Fig. 3 (b)).

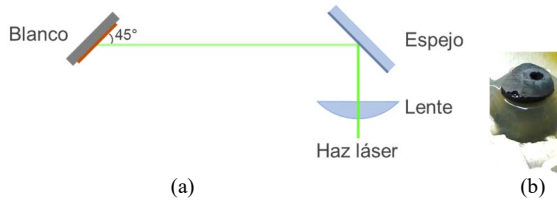


Fig. 2. Configuración 1 del anterior sistema de PLD del INTECIN: blanco y espejo estáticos. a) Camino óptico. b) Blanco ablacionado con esta configuración.

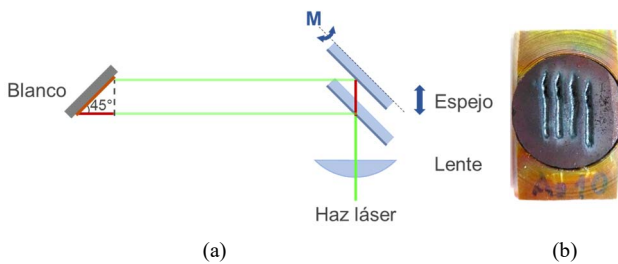


Fig. 3. Configuración 2 del anterior sistema de PLD del INTECIN: blanco estático y desplazamiento lineal del espejo. La pequeña rotación (manual) del espejo sobre el eje M, permite ablacionar segmentos paralelos sobre el blanco. a) Camino óptico; al desplazar el espejo, hay un aumento (o disminución) en la distancia lente-espejo, que es compensado con la disminución (o aumento) de la distancia espejo-blanco. b) Blanco ablacionado con esta configuración.

3) Rotación del blanco y desplazamiento lineal del espejo (Fig. 4 (a)). La rotación del blanco se lograba con un movimiento circular uniforme del portablancos, accionado por un motor dc a velocidad angular constante (que no se podía modificar). El movimiento lineal del espejo, que desplaza linealmente al haz láser, era accionado por un motor dc a velocidad constante (que no se podía modificar). La combinación de ambos movimientos permitía que el haz láser realizara un barrido por toda la superficie del blanco, aunque ablacionando con una mayor tasa de ablación cerca del centro del blanco (Fig. 4 (b)). Esto no solo era ineficiente en el aprovechamiento del material, sino que tenía alto riesgo de perforar el blanco.

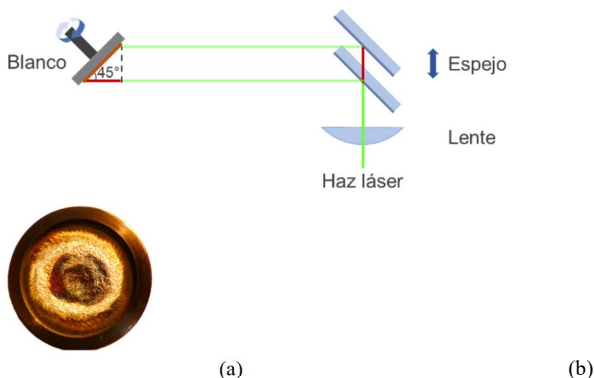


Fig. 4. Configuración 3 del anterior sistema de PLD del INTECIN: rotación del blanco y desplazamiento lineal del espejo. a) Camino óptico; al desplazar el espejo, hay un aumento (o disminución) en la distancia lente-espejo, que es compensado con la disminución (o aumento) de la distancia espejo-blanco. b) Blanco ablacionado con esta configuración.

En este trabajo presentamos un sistema de control de bajo costo para la síntesis de películas delgadas por PLD que optimiza la ablación de blancos, buscando que el haz barra uniformemente la superficie del blanco describiendo una

trayectoria con forma de espiral (Fig. 5). Es nuestro objetivo incentivar a que otros grupos de investigación dedicados a la síntesis de películas delgadas por PLD implementen el sistema desarrollado y lo modifiquen adaptándolo a sus necesidades específicas. El sistema es de bajo costo, ya que prescinde de motores de vacío y de montajes especiales para el espejo y la lente. El eje de un motor externo a la cámara de ablación se acopla al portablancos por medio de un pasante de vacío para permitir su rotación, mientras que el portaespejo se desplaza linealmente para mover al haz láser. El portablancos y el portaespejo se mueven a velocidades variables y sincronizadas entre sí, accionados por dispositivos electromecánicos diseñados *ad-hoc* y controlados por un microcontrolador.

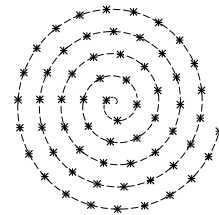


Fig. 5. Trayectoria que debe describir el haz láser pulsado sobre el blanco para lograr una ablación más eficiente. Para que los impactos sobre el blanco (indicados con asteriscos) estén equiespaciados, el haz se debe mover a una velocidad variable: más rápido en el centro y más lento en la periferia de la espiral.

Presentamos el trabajo realizado en las siguientes secciones. En la Sección II describimos el movimiento que deben seguir los motores responsables de mover el portablancos y el portaespejo. En la Sección III reportamos los dispositivos electromecánicos diseñados y fabricados para mover al blanco y al espejo. En la Sección IV detallamos el sistema desarrollado para controlar los motores. Los ensayos experimentales que validan el sistema embebido se exhiben en la Sección V, para terminar con las conclusiones y trabajo a futuro en la Sección VI.

II. MOVIMIENTO DE LOS MOTORES

El barrido uniforme del haz láser pulsado sobre el blanco se logra utilizando la configuración óptica de la Fig. 4, en la cual el portablancos rota accionado por un motor, mientras que el haz láser se desplaza longitudinalmente gracias al desplazamiento motorizado del portaespejo. En este desarrollo, ambos movimientos se realizan a velocidad variable y están sincronizados entre sí: se mueven lentamente cuando el *spot* (i.e. punto de incidencia del haz láser sobre el blanco) se encuentra en la periferia del blanco y se aceleran cuando el *spot* se acerca al centro. En el instante "1" señalado en las Fig. 6 y 7, el portaespejo se encuentra en un extremo de la carrera (i.e. posición superior en la Fig. 4) y el *spot* sobre la periferia del blanco. El portaespejo se desplaza longitudinalmente hasta alcanzar el fin de carrera (i.e. posición inferior en la Fig. 4), donde revierte su sentido (instante "5" en las Fig. 6 y 7). En el instante "6" el portaespejo ha regresado a la posición inicial del instante "1" y repite periódicamente el ciclo. La velocidad de rotación del blanco está sincronizada con la del *spot* (ej.: ambas son mínimas en el instante "1" y máximas en el instante "4"), pero no revierte su sentido de rotación en ningún momento.

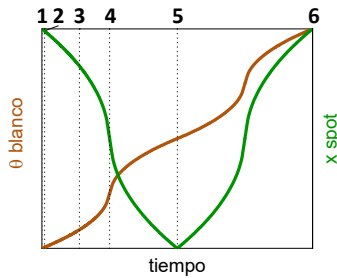


Fig. 6. Dependencia temporal de la posición del blanco y del *spot* para lograr una ablación óptima durante un período. Ambas funciones dependen del radio del blanco, de las dimensiones del *spot* y de la frecuencia del haz láser pulsado. Se señalan los instantes de tiempo 1-6, correspondientes a los esquemas de la Fig. 7.

Las funciones de posición (Fig. 6), que resultan en el patrón de ablación espiralado de la Fig. 7, deben ser parametrizadas correctamente para alcanzar una ablación uniforme. El análisis de dichas funciones y la selección óptima de sus coeficientes, los cuales dependen del radio del blanco, de las dimensiones del *spot* y de la frecuencia del haz láser pulsado, exceden el objetivo del presente trabajo y serán publicadas próximamente en otro trabajo.

III. DISPOSITIVOS ELECTROMECAÑICOS

Se seleccionaron motores paso a paso Nema 17 (45 Ncm) para accionar los dispositivos electromecánicos responsables de la rotación del blanco y del desplazamiento del espejo. Este tipo de motores son ideales para el posicionamiento y el funcionamiento a baja velocidad, ya que permiten un control de la posición preciso, confiable y simple. Poseen una larga vida útil, alto torque (para su tamaño) y son muy simples de controlar de manera digital [31], siendo todos estos requisitos fundamentales para controlar los movimientos de la Fig. 6 y lograr una ablación óptima.

El blanco se monta sobre un portablanco que cuenta con un pasante de rotación para vacío que atraviesa la cámara (Fig. 1). Fuera de la cámara, el pasante se acopla mecánicamente al motor paso a paso.

El espejo se monta en un portaespejo comercial, el cual se ubica a su vez sobre la plataforma electromecánica diseñada *ad-hoc* (Fig. 8).

Dos ejes ubicados en forma paralela a la varilla roscada evitan un desgaste asimétrico garantizando así el movimiento en una única dirección en el largo plazo.

Se diseñó y fabricó con un mecanismo *antibacklash* que evita que la ablación sea mayor durante los cambios de carrera del motor (como ocurrió en el blanco de la Fig. 3 (b)).

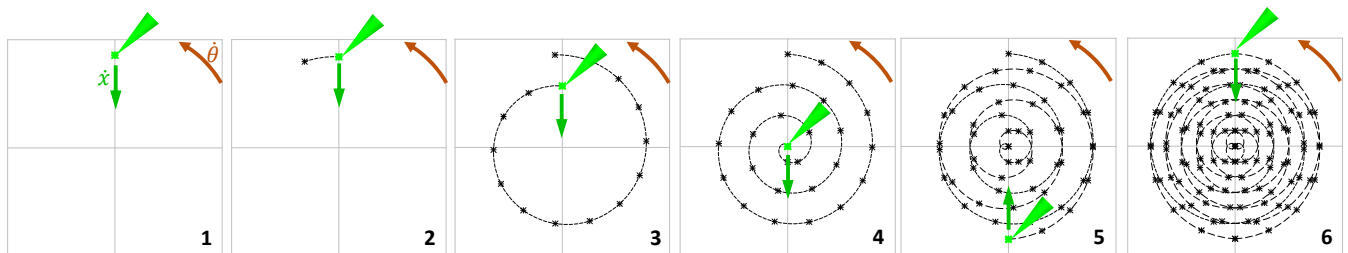


Fig. 7. Posiciones del *spot* (asterisco verde) sobre el blanco en los instantes señalados en la Fig. 6. Los asteriscos negros indican los impactos previos del haz láser pulsado. La flecha marrón indica el sentido de rotación del blanco. La flecha verde indica el sentido de desplazamiento del *spot*. Para una mayor claridad en los esquemas, se ha exagerado el paso de la espiral y la separación entre impactos sucesivos.

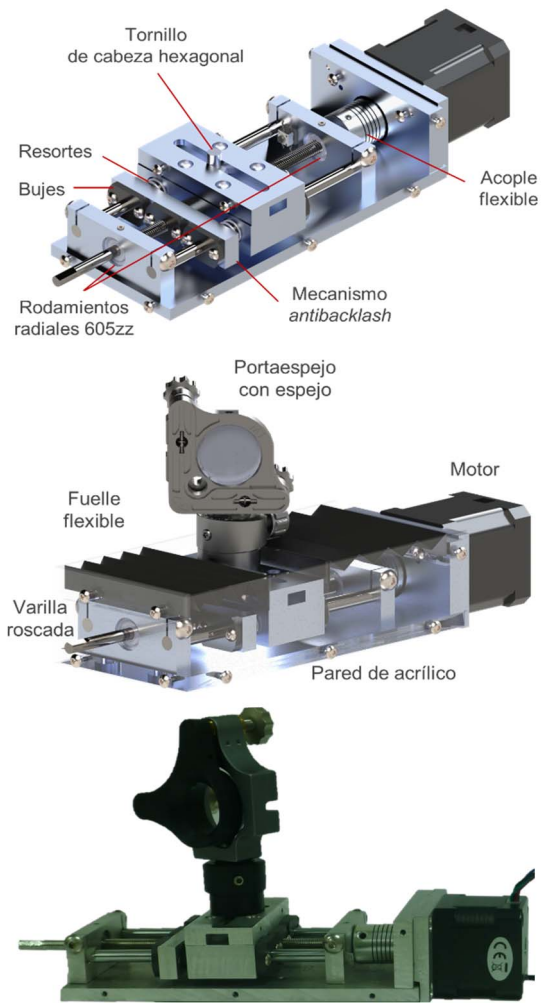


Fig. 8. Dispositivo desarrollado para desplazar el espejo. Arriba: diseño CAD de los componentes internos. Centro: diseño CAD de la vista externa. Abajo: fotografía del dispositivo fabricado con vista de los componentes internos.

El mecanismo *antibacklash* consiste en dos tuercas, cada una en un bloque de aluminio, que son empujadas contra la varilla roscada por dos resortes.

Para fabricar los bujes y la tuerca se eligió politetrafluoroetileno (PTFE) marca Teflon™ con una carga de 15 % de grafito. La carga de grafito aumenta la dureza y la resistencia al desgaste, manteniendo las propiedades autolubricantes y el bajo el coeficiente de rozamiento dinámico.

Se colocaron paredes de acrílico en los laterales y fuelles flexibles en la parte superior del dispositivo para proteger y mantener limpios los ejes y la varilla roscada.

IV. SISTEMA DE CONTROL DE LOS MOTORES

El sistema desarrollado (Fig. 9) consiste en dos motores paso a paso (17HS16-2004S1 [13]), dos *drivers* A4988 [32], una pantalla LCD 2004 con módulo I2C y un teclado 4x4, controlados por una placa Arduino Mega 2560 (con microcontrolador AVR ATmega2560).

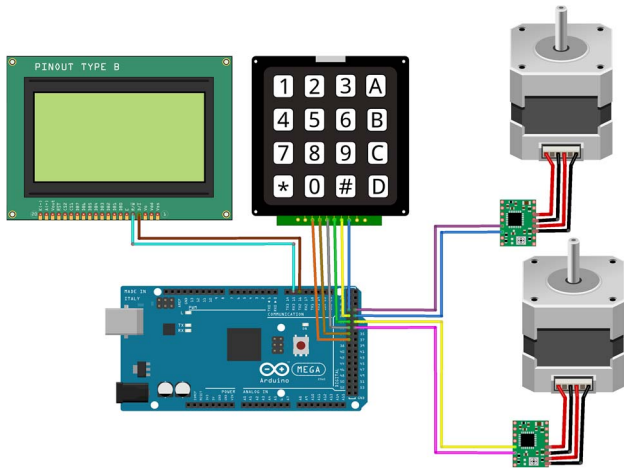


Fig. 9. Esquema del sistema de control electrónico de los motores (diseñado en Fritzing [1]).

Para facilitar la adopción del sistema por otros grupos, la implementación de mejoras y adaptaciones futuras, se optó por utilizar una placa de desarrollo Arduino [33] (Arduino Mega 2560) que cuenta con gran documentación, comunidad de usuarios y soporte. Es una placa económica y ampliamente disponible en el mercado. Además, de todas las plataformas disponibles, Arduino es la que cuenta con el entorno de programación más simple dentro de las que se programan mediante un lenguaje estructurado (es decir, dejando de lado a las que se programan mediante diagramas en bloques). Para facilitar el control de los motores, se utilizaron *drivers* A4988. Se emplearon micropasos de 1/16 para lograr el movimiento suave de los motores.

El objetivo principal del sistema de control es lograr que la rotación de cada motor paso a paso siga la función temporal de la Fig. 6. El alto costo de cómputo de dicha función (involucra el cálculo de una raíz cuadrada) impide que el microcontrolador ATmega2560 pueda evaluarla lo suficientemente rápido durante la ejecución del barrido. Por lo tanto, la estrategia elegida fue precalcular una *lookup table* (LUT) con la lista de intervalos de tiempo entre pasos del motor. Así, una vez superado el tiempo correspondiente a un intervalo, se da la orden al *driver* del motor para que avance un paso. Notar que el ángulo que avanzan los motores al dar cada paso es constante, mientras que el tiempo transcurrido entre pasos es variable, ya que la función de la Fig. 6 no es lineal. Notar también que, para este barrido particular en forma de espiral, ambos motores se deben mover sincronizadamente y pueden utilizar la misma LUT. La diferencia es que el motor que controla al portaespejo deberá invertir su sentido de rotación en los instantes “5” y “6” de las Fig. 6 y 7, mientras que el que rota al portablancos, no.

La lista de intervalos de máxima resolución debería tener un número de elementos equivalente al número de pasos que debe dar cada motor en el primer cuarto de período (desde la posición “1” hasta la posición “4” de la Fig. 7), ya que el resto

del recorrido puede ser reconstruido a partir de ese tramo (ver Fig. 6). Este número queda determinado por: 1) el número de vueltas que debe dar el motor en el primer cuarto de período, 2) los *full steps* (pasos completos) que el motor da en una vuelta (200 *full steps*/revolución), y 3) la cantidad de *microsteps* (micropasos) que el motor da en un *full step* (16 *microsteps/full step*). Como cada uno de los elementos de la LUT emplea 4 bytes (tipo de formato *unsigned long*), la LUT de máxima resolución emplearía ~128 kB y saturaría la SRAM del ATmega2560 (la cual tiene 8 kB), por lo que se debe armar una LUT de menor resolución.

Dividiendo al recorrido entre las posiciones “1” y “4” de la Fig. 6 en N_i tramos iguales, resultan N_i intervalos de tiempo distintos. Luego, subdividimos a cada uno de dichos intervalos de tiempo en N_p subintervalos de tiempo iguales. La LUT será entonces una lista de N_i elementos donde cada elemento tendrá el valor de un subintervalo de tiempo correspondiente a dicho intervalo (es decir, los $\Delta t_{np,ni}$). Estos indican el tiempo que debe transcurrir antes de que el motor avance un paso $\Delta\theta$ (ver Fig. 10 donde representamos una curva simplificada). En la siguiente Sección mostraremos que la LUT utilizada de 200 elementos fue suficiente para lograr los movimientos deseados sin saturar la SRAM del microcontrolador. La Fig. 11 exhibe el diagrama de flujo de control de los motores basada en la LUT.

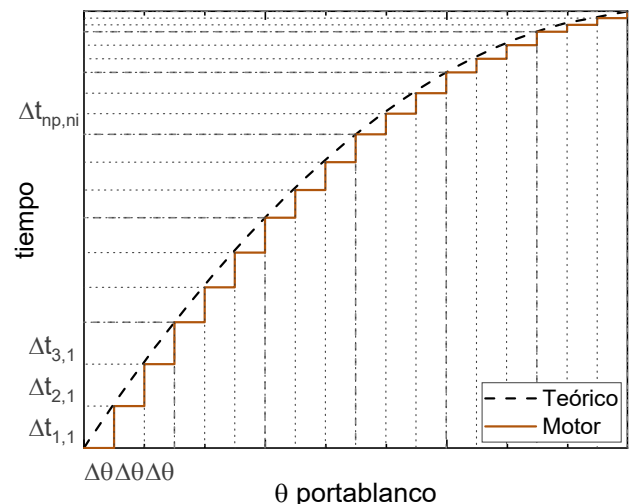


Fig. 10. Tiempo al que el motor debe dar cada paso. La curva punteada representa el tiempo teórico al que el motor debería encontrarse en cada posición (ver Fig. 6 entre los instantes “1” y “4”). La función escalonada indica el movimiento real del motor paso a paso. Los pasos que da el motor son constantes ($\Delta\theta$). Como la función es no lineal, el intervalo de tiempo entre pasos varía de un intervalo al siguiente ($\Delta t_{np,ni}$). El tiempo de recorrido completo (entre los instantes “1” y “4” de la Fig. 6), está comprendido por N_i intervalos de tiempo diferentes entre sí. A su vez, estos están comprendidos por N_p subintervalos de tiempo iguales entre sí dentro de cada intervalo. En la figura se adoptó $N_i = 6$ y $N_p = 3$ para mayor claridad, pero en el sistema real se utilizó $N_i = 200$ y $N_p \sim 160$.

La pantalla LCD y el teclado permiten contar con una interfaz de usuario para ingresar los parámetros del barrido en forma de espiral, así como también controlar el movimiento de los motores en forma manual (indicando que uno u otro motor gire n pasos en sentido horario o antihorario). Para ello se implementó una máquina de estados finitos que resuelve de manera eficiente la navegación del menú. Además, no realiza operaciones bloqueantes, evitando que el módulo de la interfaz se apropie del microcontrolador.

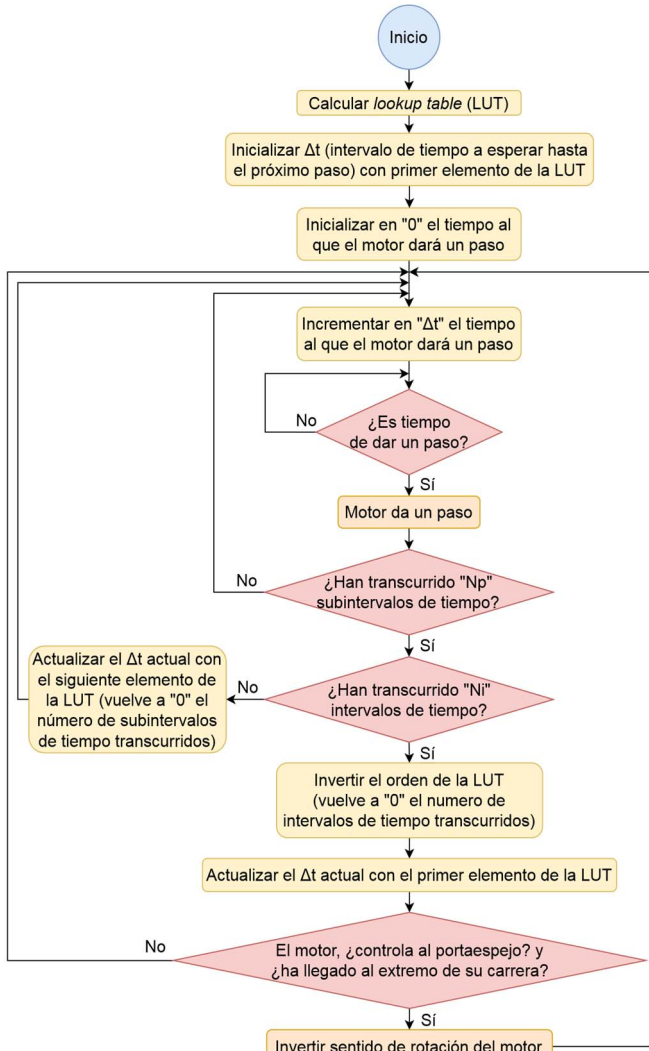


Fig. 11. Diagrama de flujo del control de motores.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se montó un sistema de sensado de posición para verificar el correcto movimiento de los motores con el sistema de control desarrollado (Fig. 12). Para el caso del motor del portaespejo, se acopló un disco comercial de 20 ranuras a la varilla roscada, mientras que para el motor del portablancos, se acopló el disco al eje del motor por medio de un acople flexible. Un sensor óptico de velocidad, basado en el comparador LM393, envía una señal cada vez que detecta el paso de una ranura. Se agregó un filtro pasa bajo a la salida del sensor, con un capacitor de 100 nF y una resistencia de 10 kΩ, para eliminar las señales espurias.

Para ambos motores, los tiempos de desplazamiento medidos con el sistema de sensado concuerdan con los teóricos, incluso luego de varios períodos, demostrando el correcto movimiento del portaespejo y del portablancos (Fig. 13). En los gráficos de la Fig. 13 no se pueden apreciar los escalones de la función (como en la Fig. 10) debido a la fina discretización de intervalos, dando cuenta de que el número de intervalos N_i fue suficientemente grande. Las mediciones presentaron un error del orden de 10 ms –no acumulativo a lo largo de todo el ensayo– que tampoco se alcanza a apreciar en los gráficos.

Las coordenadas de la trayectoria espiralada de la ablación descrita por los movimientos de la Fig. 13 del portaespejo y del portablancos (x_{blanco}, y_{blanco}), se pueden calcular como:

$$x_{blanco} = x_{spot} \cdot \cos(\theta_{blanco}) \tag{1}$$

$$y_{blanco} = x_{spot} \cdot \sen(\theta_{blanco}) \tag{2}$$

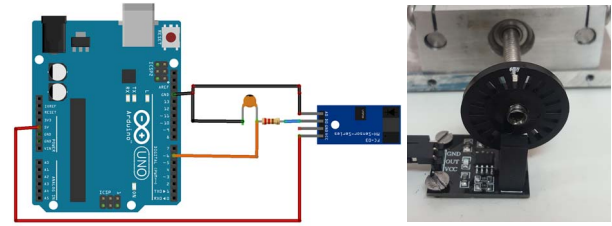


Fig. 12. Sistema de sensado de posición de los motores. Izquierda: esquema de conexiones (diseñado en Fritzing [1]). Derecha: fotografía del sistema acoplado al eje del motor del portaespejo.

Dicha trayectoria fue verificada experimentalmente ablacionando un blanco de papel durante un cuarto de período (Fig. 14).

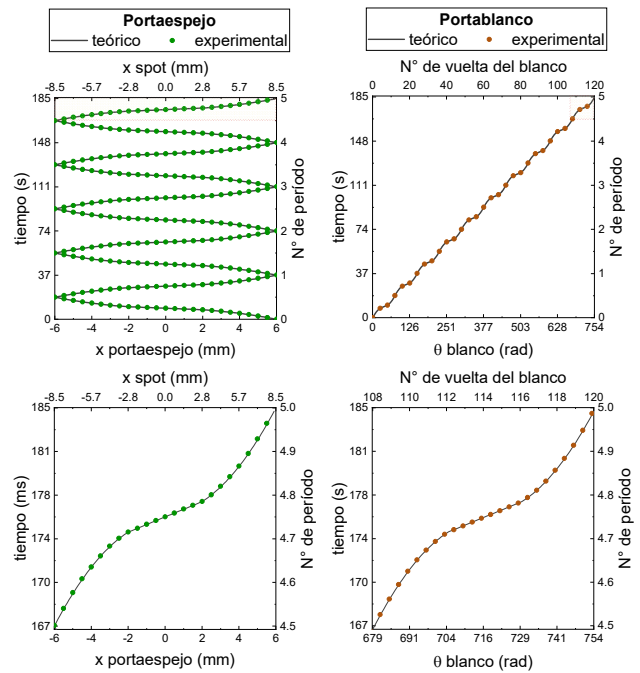


Fig. 13. Validación del movimiento de los motores del portaespejo (izquierda) y del portablancos (derecha) durante 5 períodos. Notar que, de acuerdo con la Fig. 4, $x_{spot} = x_{portaespejo} / \sen(45^\circ)$. Las curvas continuas indican el instante de tiempo teórico para cada posición del motor. Los puntos indican el tiempo medido por el sistema de la Fig. 12, al detectar el paso de una ranura. Para mayor claridad en la figura se han representado menos puntos que los medidos. Las regiones rectangulares de los gráficos superiores (último medio período validado) se hayan amplificadas en las figuras de abajo.

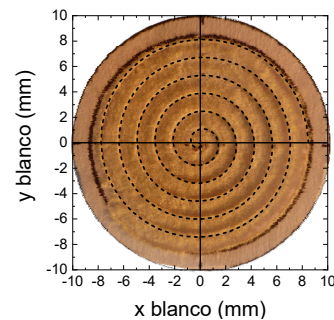


Fig. 14. Trayectoria de ablación con forma de espiral descrita durante el primer cuarto de período de la Fig. 13 (se ha utilizado un paso de espiral grande para una mayor claridad de la figura). La imagen superpuesta corresponde a un blanco de papel ablacionado durante dicho cuarto de período.

Finalmente, la Fig. 15 exhibe un blanco ablacionado con el sistema de control desarrollado en este trabajo. Allí se puede apreciar la ablación uniforme del blanco (el anillo liso exterior corresponde a material del blanco que no fue ablacionado por el láser).



Fig. 15. Blanco ablacionado uniformemente con el sistema desarrollado.

VI. CONCLUSIONES

El sistema de control propuesto para el portablancos y el haz láser (por medio del portaespejo) permite ablacionar blancos uniformemente con una trayectoria en forma de espiral, mejorando la eficiencia del proceso de síntesis de películas delgadas por PLD.

Los dispositivos electromecánicos para mover al portablancos y portaespejo, diseñados y fabricados *ad hoc*, son robustos y corrigen el problema del *backlash*, presente en el anterior dispositivo del INTECIN.

El sistema electrónico es capaz de controlar, de manera precisa y confiable, el movimiento de los motores a velocidades variables en el tiempo. El *firmware* fue desarrollado con una estructura modular y fácilmente escalable. Como trabajo futuro, se implementarán nuevas funciones de posición (que describan otros patrones de ablación) con el fin de realizar distintas investigaciones sobre la deposición de películas delgadas por ablación láser de luz pulsada. En suma, este desarrollo será una valiosa herramienta para la síntesis de películas delgadas por ablación láser pulsada, tanto para nuestro laboratorio como para otros laboratorios de Latinoamérica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a José Lamparte y Rodrigo Cancilieri del Taller de Prototipos del Departamento de Física de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires por su apoyo técnico en el diseño y fabricación de piezas mecánicas. Agradecen también a los evaluadores por las observaciones realizadas que permitieron mejorar sustancialmente este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] A. Knörig, R. Wettach, and J. Cohen, "Fritzing—A tool for advancing electronic prototyping for designers," *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, pp. 351-358, 2009. DOI: 10.1145/1517664.1517735
- [2] J. Conde Garrido, J. M. Silveyra, and M. A. Ureña, "Multi-ion and pH sensitivity of AgGeSe ion selective electrodes," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 89, pp. 115-119, 2016. DOI: 10.1016/j.jpcs.2015.10.015
- [3] M. Villafuerte, G. Juárez, S. Duhalde, F. Golmar, C. Degreef, and S. Heluani, "Resistance switching induced by electric fields in manganese thin films," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, p. 483. DOI: 10.1088/1742-6596/59/1/104
- [4] M. N. Ashfold, F. Claeysens, G. M. Fuge, and S. J. Henley, "Pulsed laser ablation and deposition of thin films," *Chemical Society Reviews*, vol. 33, pp. 23-31, 2004. DOI: 10.1039/B207644F
- [5] J. Schou, "Physical aspects of the pulsed laser deposition technique: The stoichiometric transfer of material from target to film," *Applied Surface Science*, vol. 255, pp. 5191-5198, 2009. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.10.101
- [6] E. Morintale, C. Constantinescu, and M. Dinescu, "Thin films development by pulsed laser-assisted deposition," *Physics AUC*, vol. 20, pp. 43-56, 2010. Available: http://cis01.central.ucv.ro/pauc/vol/2010_20_part1/2010_part1_43_56.pdf. Accessed on: January 6, 2020.
- [7] A. S. Kuzanyan, A. Kuzanyan, V. Petrosyan, S. K. Pilosyan, and A. Z. Grasiuk, "A simple solution to the problem of effective utilisation of the target material for pulsed laser deposition of thin films," *Quantum Electronics*, vol. 43, p. 1170, 2013. DOI: 10.1070/QE2013v043n12ABEH015194
- [8] N. Arnold and D. Bäuerle, "Uniform target ablation in pulsed-laser deposition," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 68, 1999. DOI: 10.1007/s003390050905
- [9] M. Bonelli, C. Cestari, and A. Miotello, "Pulsed laser deposition apparatus for applied research," *Measurement Science and Technology*, vol. 10, p. 27, 1999. DOI: 10.1088/0957-0233/10/3/024
- [10] K. Ujimoto, T. Yoshimura, A. Ashida, and N. Fujimura, "Effect of target surface microstructure on morphological and electrical properties of pulsed-laser-deposited BiFeO₃ epitaxial thin films," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, p. 045803, 2013. DOI: 10.7567/JJAP.52.045803
- [11] J. J. Prentice, J. A. Grant-Jacob, S. V. Kurilchik, J. I. Mackenzie, and R. W. Eason, "Particulate reduction in PLD-grown crystalline films via bi-directional target irradiation," *Applied Physics A*, vol. 125, p. 152, 2019. DOI: 10.1007/s00339-019-2456-5
- [12] J. Greer, "Large-area commercial pulsed laser deposition," in *Pulsed laser deposition of thin films: applications-led growth of functional materials*, R. Eason, Ed., ed: John Wiley & Sons, 2007, pp. 191-213. DOI: 10.1002/9780470052129.ch9
- [13] StepperOnline. *Nema 17 stepper motor*. Available: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-bipolar-45ncm-64oz-in-2a-42x42x40mm-4-wires-w-1m-cable-and-connector.html>. Accessed on: January 6, 2020.
- [14] MDC Vacuum Products, LLC. *665911 - High Torque High Vacuum Stepper Motor*. Available: <https://www.mdcvacuum.com/Parts/US/HighTorqueHVStepperMotor/HighTorqueHVStepperMotor>. Accessed on: January 6, 2020.
- [15] W.-K. Lee, H.-Y. Wong, K.-Y. Chan, T.-K. Yong, S.-S. Yap, and T.-Y. Tou, "Effects of laser fluence on the structural properties of pulsed laser deposited ruthenium thin films," *Applied Physics A*, vol. 100, pp. 561-568, 2010. DOI: 10.1007/s00339-010-5875-x
- [16] S. Sakai, M. Takahashi, K. Motohashi, Y. Yamaguchi, N. Yui, and T. Kobayashi, "Large-area pulsed-laser deposition of dielectric and ferroelectric thin films," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 25, pp. 903-907, 2007. DOI: 10.1116/1.2748808
- [17] J. A. Greer, "Comparison of large-area pulsed-laser deposition approaches," in *Excimer Lasers: Applications, Beam Delivery Systems, and Laser Design*, 1993, pp. 21-30. DOI: 10.1117/12.143047
- [18] A. Jacquot, B. Lenoir, M. Boffoué, and A. Dauscher, "Influence of target morphology on droplet emission and thickness profiles with pulsed laser deposited bismuth films," *Applied Physics A*, vol. 69, pp. S195-S199, 1999. DOI: 10.1007/s003399900285
- [19] A. Cazzaniga, A. Crovetto, C. Yan, K. Sun, X. Hao, J. R. Estelrich, et al., "Ultra-thin Cu₂ZnSnS₄ solar cell by pulsed laser deposition," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 166, pp. 91-99, 2017. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.03.002
- [20] M. Fukutomi, K. Komori, K. Kawagishi, and K. Togano, "A new laser plume scanning technique for uniform large area YBa₂Cu₃O_{7-x} deposition," *Physica C: Superconductivity*, vol. 357, pp. 1342-1345, 2001. DOI: 10.1016/S0921-4534(01)00511-1
- [21] L. Cultrera, M. Zeifman, and A. Perrone, "Investigation of liquid droplets, plume deflection, and a columnar structure in laser ablation of silicon," *Physical Review B*, vol. 73, p. 075304, 2006. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.075304
- [22] J. A. Greer and M. Tabat, "Large-area pulsed laser deposition: Techniques and applications," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 13, pp. 1175-1181, 1995. DOI: 10.1116/1.579857
- [23] C. Doughty, A. Findikoglu, and T. Venkatesan, "Steady state pulsed laser deposition target scanning for improved plume stability and

reduced particle density," *Applied physics letters*, vol. 66, pp. 1276-1278, 1995. DOI: 10.1063/1.113261

- [24] S. Duhalde, M. Vignolo, F. Golmar, C. Chilotte, C. Rodríguez Torres, L. Errico, *et al.*, "Appearance of room-temperature ferromagnetism in Cu-doped TiO 2- δ films," *Physical Review B*, vol. 72, p. 161313, 2005. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.161313
- [25] A. Ureña, A. Piarristeguy, M. Fontana, C. Vigreux-Bercovici, A. Pradel, and B. Arcondo, "Characterisation of thin films obtained by laser ablation of Ge₂₈Se₆₀Sb₁₂ glasses," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 68, pp. 993-997, 2007. DOI: 10.1016/j.jpes.2007.03.021
- [26] J. M. Conde Garrido, M. A. Ureña, and B. Arcondo, "Ion selective electrodes based on chalcogenide glasses," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 495, pp. 356-359, 2010. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.08.093
- [27] J. Conde Garrido, A. Piarristeguy, M. A. Ureña, M. Fontana, B. Arcondo, and A. Pradel, "Compositional dependence of the optical properties on amorphous Ag_x (Ge_{0.25}Se_{0.75}) 100-x thin films," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 377, pp. 186-190, 2013. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.01.007
- [28] J. Conde Garrido, A. Piarristeguy, R. Le Parc, M. Ureña, M. Fontana, B. Arcondo, *et al.*, "Raman spectroscopy of GeSe and AgGeSe thin films," *Chalcogenide Letters*, vol. 10, pp. 427-433, 2013. Available: http://www.chalcogen.ro/427_Conde.pdf. Accessed on: January 6, 2020.
- [29] J. Rocca, J. L. García, M. A. Ureña, M. Fontana, and B. Arcondo, "Temperature dependence of electrical resistance in Ge-Sb-Te thin films," *Materials Research*, vol. 22, 2019. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2018-0512
- [30] SINALA. *Sistema Nacional de Láseres del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación*. Available: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/sistemasnacionales/laseres>. Accessed on: January 6, 2020.
- [31] S. Murugesan, "An overview of electric motors for space applications," *IEEE transactions on industrial electronics and control instrumentation*, pp. 260-265, 1981. DOI: 10.1109/TIECL.1981.351050
- [32] Pololu Robotic & Electronic. *A4988 Stepper Motor Driver Carrier*. Available: <https://www.pololu.com/product/1182>. Accessed on: January 6, 2020.
- [33] M. Banzi and M. Shiloh, *Getting started with Arduino: the open source electronics prototyping platform*: Maker Media, Inc., 2014.



Josefina María Silveyra recibió el título de Ingeniera Industrial en 2007 y, en 2012, el de Doctora de la Universidad de Buenos Aires, área Ingeniería. Es Profesora del Departamento de Física de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires e investigadora del CONICET. Sus intereses científicos incluyen al estudio fundamental y tecnológico de materiales magnéticos blandos nanoestructurados, para un uso sustentable de la energía, y de vidrios calcogenuros, para aplicaciones en el área de sensores.



Juan Manuel Conde Garrido es Licenciado en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires (2007) y Doctor de la Universidad de Buenos Aires, área Ingeniería (2013). Actualmente, es Profesor de la Facultad de Ingeniería de la misma Universidad y miembro de la Carrera del Investigador Científico y Tecnológico del CONICET.

Trabaja en el INTECIN (UBA-CONICET), donde se especializa en el desarrollo de películas delgadas de vidrios calcogenuros y en su aplicación a sensores, guías de onda, y memorias no volátiles.



Cristina Kuo nació en Buenos Aires, Argentina, en 1995. Es estudiante avanzada de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Buenos Aires. Participó en este trabajo de investigación en el marco de una Beca Estímulo UBACyT.