

Nanomateriales fabricados con luz: el poder de la energía láser

Nicolás Enrique Vázquez-Barragán^{1*} y José Guadalupe Quiñones-Galván¹

¹ Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara

* Dirección para correspondencia: nevb92@gmail.com

En los últimos años, la investigación científica de los materiales a escala diminuta ha crecido de manera significativa, impulsada principalmente por la demanda de dispositivos electrónicos cada vez más compactos. Pero ¿qué se entiende por “lo diminuto”? Los nanomateriales son estructuras sólidas cuyas dimensiones alcanzan apenas unos pocos nanómetros, típicamente entre 1 y 100 nanómetros, es decir, la millonésima parte de un milímetro. Para ponerlo en perspectiva, un cabello humano tiene un grosor de aproximadamente 70,000 nanómetros y podemos verlo sin dificultad, mientras que un nanomaterial resultaría casi invisible a simple vista (Figura 1).

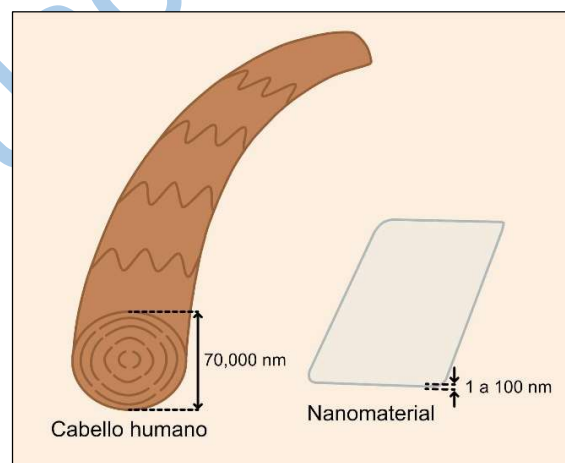


Figura 1. Comparativa esquemática entre el espesor de un cabello humano y un nanomaterial.

Los nanomateriales resultan fascinantes porque, al encontrarse en dimensiones cercanas a la escala atómica, pueden comportarse de manera muy distinta a los materiales macroscópicos. Su tamaño reducido les confiere propiedades ópticas, eléctricas o químicas únicas. Una forma de aprovechar estas características es utilizarlos en forma de películas delgadas.

En años recientes, uno de los métodos que más ha llamado la atención para la fabricación de películas delgadas ha sido el depósito por láser pulsado (PLD, por sus siglas en inglés). Esta técnica ha ganado relevancia por su versatilidad, ya que permite obtener películas delgadas de casi cualquier material, incluidos aquellos que son muy resistentes al calor o que requieren conservar composiciones químicas complejas. Gracias a su capacidad de replicar fielmente la composición del material original, el PLD ofrece una ventaja significativa frente a otros métodos.

En este artículo se presenta el fundamento físico de la técnica de PLD, la interacción del láser con la materia, y el proceso mediante el cual se forma una película delgada. Además, se mencionan las principales aplicaciones de los nanomateriales obtenidos por PLD en diversos ámbitos de la ciencia y la tecnología, y se describen en detalle las limitaciones inherentes a esta técnica.

Depósito por láser pulsado: un cincel de luz

La técnica de PLD es, en esencia, bastante sencilla de entender. Consiste en disparar pulsos de luz láser que impactan sobre la superficie de un material

denominado blanco. Con cada pulso, se desprende una pequeña cantidad de material que viaja en dirección al sustrato. Tras algunos minutos y miles de pulsos, el material expulsado se acumula gradualmente hasta formar una película delgada. La Figura 2 muestra ilustrativamente este proceso, así como los elementos de un sistema PLD.

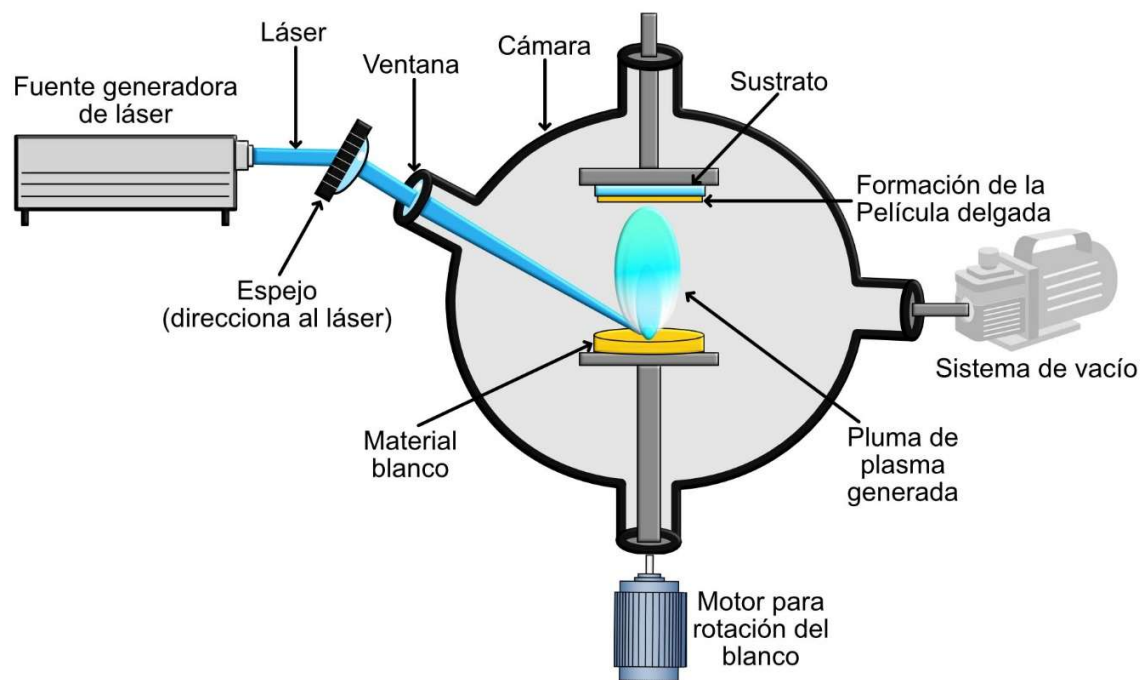


Figura 2. Esquema ilustrativo de un sistema PLD, la pluma de plasma generada y la formación de una película delgada.

En términos más simples, imagine que usted es un arqueólogo y quiere estudiar fragmentos de una roca interesante. Para ello, usa un mazo y un cincel. Cada golpe sobre la roca representa un pulso del láser en el material blanco. De esta manera, piezas pequeñas de la roca son expulsadas en todas las direcciones

en forma de polvo, astillas y fragmentos de distintos tamaños. Ahora bien, si usted coloca una superficie frente a su zona de trabajo, los fragmentos eyectados por el golpeteo terminarán acumulándose poco a poco hasta cubrirla por completo, dando lugar a una capa delgada.

La fuente de un sistema PLD

El corazón de un sistema PLD es el láser. Pero, ¿en qué se diferencia de la luz convencional? La luz de una lámpara se dispersa en todas las direcciones, ya que su función es iluminar un espacio determinado. En cambio, la luz láser posee tres características únicas: es coherente, direccional e intensa (Banús Gassol, 2008). Esto significa que los fotones, partículas que componen la luz, viajan alineados y con la misma energía, formando un haz capaz de concentrar una gran cantidad de energía en un punto específico. Debido a estas propiedades, un láser en un sistema PLD puede erosionar un material de manera controlada, capaz de trabajar con precisión casi milimétrica sobre el material blanco.

Interacción luz-materia: formación del plasma

Cuando la superficie del blanco absorbe la energía del láser, provoca la expulsión de una gran variedad de partículas: átomos, electrones, moléculas, iones (átomos con electrones faltantes) e incluso fragmentos más grandes, como se muestra en la

Figura 3. Esto puede ocurrir por dos mecanismos distintos. En uno de ellos, el material se calienta de forma muy rápida, por lo que la superficie atraviesa los estados sólido, líquido y gaseoso en tiempos extremadamente cortos (régimen térmico). En cambio, cuando los pulsos son mucho más breves o intensos, el material no llega a calentarse, sino que la energía absorbida es suficiente para romper enlaces químicos directamente, sin pasar por los estados anteriores (régimen no térmico). En ambos casos, estos mecanismos provocan la eyección de partículas del material (Salas *et al.*, 2010).

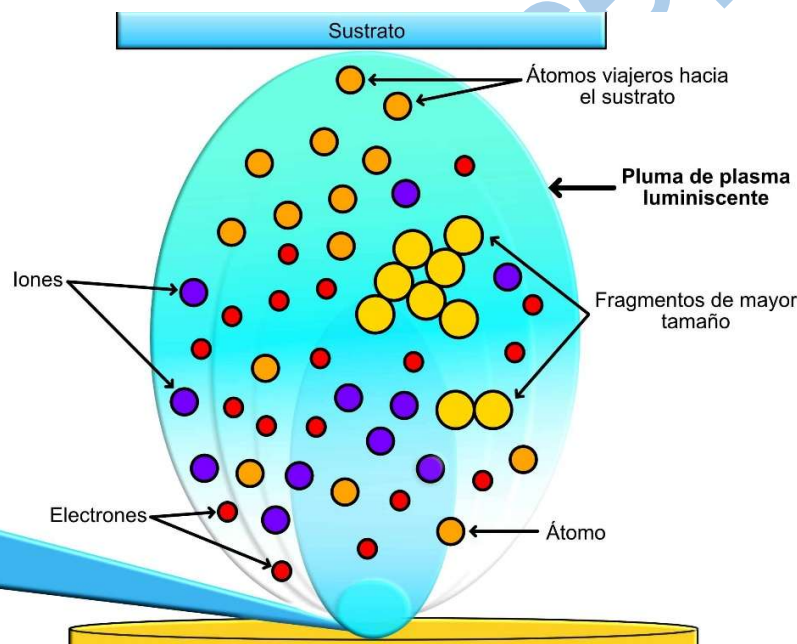


Figura 3. Imagen representativa del plasma formado.

Estas partículas expulsadas pueden colisionar entre sí, casi como si se tratara de una partida de billar, pero a energías muchísimo más altas. Durante estas colisiones, parte de la energía se transfiere entre átomos y electrones, lo que hace

que algunas de estas partículas adquirieran momentáneamente más energía. Cuando regresan a su estado inicial, liberan ese excedente en forma de luz. Este proceso ocurre de manera continua mientras el láser siga impactando en el blanco, lo que mantiene visible la pluma de plasma luminiscente durante toda la formación de la película (Figura 3) (Shepelin *et al.*, 2023).

El viaje hacia el sustrato

Antes del crecimiento de la película delgada, el aire ambiental debe ser extraído de la cámara donde se encuentran el blanco y el sustrato mediante un sistema de vacío, como se observa en la Figura 2. Esto tiene como finalidad extraer moléculas ambientales que podrían alterar la energía y trayectoria de las especies eyectadas, así como evitar la formación de compuestos no deseados (comúnmente óxidos). De esta manera, las partículas tienen un camino más despejado. Así, se garantiza que las especies viajeras sean únicamente aquellas correspondientes al blanco y, además, arriben de manera más controlada al sustrato, normalmente colocado en dirección perpendicular al plasma.

¿Cómo se organiza la película delgada?

Las partículas provenientes del plasma se adhieren al sustrato mediante un proceso denominado adsorción. Como si se tratara de bolitas de plastilina que se van

pegando a una pared, una tras otra acumulándose sobre la superficie hasta formar una capa uniforme. Dicho así suena bastante simple, pero a nivel microscópico sucede un fenómeno muy interesante: los átomos entrantes, llamados adátomos, se desplazan sobre la superficie debido a su elevada energía cinética, buscando sitios en donde requieran gastar la menor cantidad de energía posible. La naturaleza siempre “opta” por el mínimo esfuerzo. Una vez que encuentran un lugar favorable, otros adátomos recién llegados tenderán a alojarse cerca de ellos, uniéndose químicamente (formación de enlaces). Este proceso puede ocurrir de manera aleatoria sobre la superficie del sustrato, dando lugar a pequeños conjuntos de adátomos en distintos puntos. Estos grupos, denominados centros de nucleación, representan la etapa inicial del proceso.

Conforme arriban más adátomos, los centros de nucleación continúan creciendo hasta convertirse en “islas” o clústeres, los cuales pueden tener formas y tamaños diferentes. Con el tiempo, los adátomos que siguen llegando se desplazan por la superficie y se incorporan preferentemente a las islas más grandes, ya que esto reduce su energía total. A medida que las islas crecen, comienzan a acercarse entre sí y, cuando finalmente se tocan, se fusionan para formar estructuras de mayor tamaño. Este proceso, denominado coalescencia, es el mecanismo mediante el cual el material evoluciona hacia una capa continua que recubre todo el sustrato (Greene, 2010). Las etapas descritas anteriormente se representan gráficamente en la Figura 4.

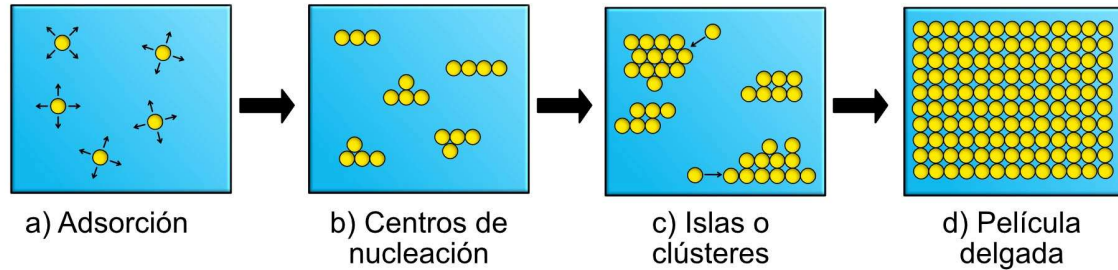


Figura 4. Proceso de formación de una película delgada.

En vez de pensar en átomos, moléculas y demás partículas microscópicas, imagine que son gotitas de lluvia cayendo sobre un vidrio. Al inicio, las gotas caerán separadas (centros de nucleación), pero conforme caen más gotas, estas se harán más grandes (islas o clústeres). Tras algunos minutos, las gotas terminarán juntándose para formar un charco de agua que cubre toda la superficie del vidrio (película).

Aplicaciones de nanomateriales obtenidos por PLD

La técnica de PLD ha sido ampliamente utilizada en la investigación científica debido a su capacidad para depositar materiales complejos con alta calidad. Esta especial característica la ha convertido en una herramienta crucial en diversas áreas tecnológicas. En el campo de la energía solar, se ha empleado para fabricar semiconductores, como selenuro de cobre, indio y galio (CIGS) o sulfuro de cobre, zinc y estaño (CZTS) e incluso materiales de estructura perovskita (Lu *et al.*, 2024). Estos compuestos, en forma de película delgada, se han integrado en celdas

solares logrando excelentes eficiencias de conversión y, en algunos casos, eficiencias equiparables a las de los dispositivos fotovoltaicos de silicio.

También se han obtenido materiales superconductores como el óxido de bario, cobre e itrio (YBCO) y el óxido de bismuto, estroncio, calcio y cobre (BSCCO), fundamentales para diseñar dispositivos capaces de transportar energía casi sin pérdidas. Asimismo, se ha usado para desarrollar materiales termoeléctricos muy prometedores, como el telururo de bismuto (Bi_2Te_3) o el telururo de antimonio (Sb_2Te_3), capaces de aprovechar el calor residual y convertirlo en electricidad, con resultados bastante optimistas.

En el área de la medicina, se han sintetizado capas de óxido de zinc (ZnO) y dióxido de titanio (TiO_2) para uso en biosensores, capaces de detectar moléculas anómalas incluso a bajas concentraciones. Además, se ha utilizado para recubrir prótesis e implantes óseos con fosfato de calcio (CaP) debido a su biocompatibilidad con el tejido óseo.

Por último, en el ámbito del almacenamiento de energía, se han desarrollado películas delgadas de un compuesto que combina litio, vanadio, silicio y oxígeno, empleado en la fabricación de baterías recargables en estado sólido. Este tipo de baterías resulta particularmente atractivo debido a la creciente demanda de fuentes de energía más compactas y, a su vez, son más seguras que la tecnología convencional (Duta y Popescu, 2021). Estas aplicaciones demuestran que esta técnica tiene gran relevancia en la fabricación de nanomateriales y seguirá siendo esencial en el futuro.

Desafíos del PLD en la fabricación de nanomateriales

Si bien la técnica de PLD posee ventajas excepcionales para la estructuración de nanomateriales, también presenta algunos desafíos que limitan su uso a gran escala. Uno de ellos es la dificultad de producir películas delgadas homogéneas sobre áreas relativamente grandes, es decir, superficies del orden de algunos centímetros cuadrados. En estos casos, el espesor puede variar sustancialmente a lo largo del sustrato. Esto sucede porque la pluma del plasma concentra una mayor cantidad de material en la región central que en sus extremos. Como consecuencia, la película delgada suele tener un mayor espesor en el centro que en los bordes, lo que puede afectar sus propiedades físicas. Además, el crecimiento suele ser relativamente lento, ya que se eyecta una cantidad limitada de material del blanco tras cada pulso, lo que se traduce en tiempos más largos cuando se requieren películas de mayor espesor.

Otro desafío importante es la contribución de fragmentos superficiales, conocidos como “droplets”, que pueden ser expulsados del blanco durante el proceso. Estos agregados modifican las características morfológicas de la película y, con ello, sus propiedades ópticas, lo que afecta su desempeño en algunas de las aplicaciones mencionadas anteriormente. La Figura 5 muestra una imagen obtenida con un microscopio electrónico de barrido, en la que se observan estos cúmulos

superficiales de material. En conjunto, estas limitaciones explican por qué el PLD aún no ha podido emplearse masivamente a nivel industrial.

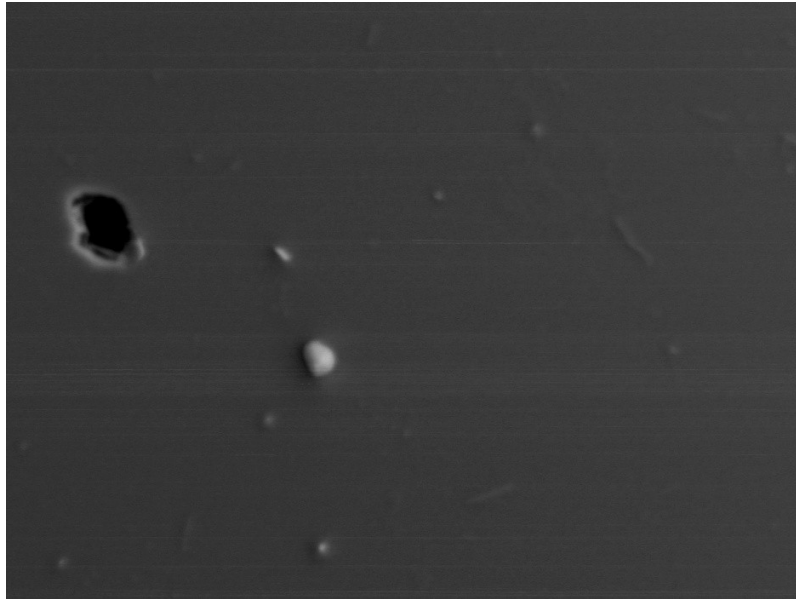


Figura 5. Presencia de “droplets” en la superficie de una película delgada obtenida por PLD.

Conclusiones

La técnica de depósito por láser pulsado se ha consolidado como una herramienta sumamente importante para la fabricación de películas delgadas, gracias a su simplicidad, precisión y adaptabilidad. En este artículo se describieron los principios físicos del PLD, la interacción entre la luz láser y la materia, la organización atómica durante el crecimiento de la película, así como sus aplicaciones en áreas clave como la energía solar, superconductividad, termoelectrónica, medicina y almacenamiento de energía.

En la actualidad, ante la necesidad de diseñar nanomateriales con estructuras cada vez más complejas y funcionales, el PLD resulta ser crucial. Su alta capacidad para estructurar composiciones químicas avanzadas de alta calidad lo distingue de otros métodos convencionales, particularmente en un panorama donde los materiales avanzados son prioritarios en la agenda tecnológica global.

A pesar de los retos que enfrenta el PLD relacionados con la producción en áreas extensas, su baja tasa de crecimiento y la contribución de agregados superficiales que limitan su uso pleno a gran escala, continúa siendo un pilar competitivo para la fabricación de nanomateriales. Más allá de su función como técnica de depósito, el PLD seguirá abriendo posibilidades para el estudio y desarrollo de nuevos nanomateriales, contribuyendo al avance de diversas áreas de la ciencia y la tecnología en los años venideros.

Referencias

Banús Gassol JM (2008). Física del láser. *Archivos Españoles de Urología* 61:961–964.

Greene JE (2010). Thin Film Nucleation, Growth, and Microstructural Evolution: An Atomic Scale View. En Martin Peter M (Ed.), *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings* (pp. 554-558). William Andrew. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2031-3.00012-0>.

Duta L and Popescu AC (2021). Current research in pulsed laser deposition. *Coatings* 11(3):274. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11030274>.

Lu X, Fan X, Zhang H *et al.* (2024). Review on Preparation of Perovskite Solar Cells by Pulsed Laser Deposition. *Inorganics* 12(5):1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/inorganics12050128>.

Salas P, Keyffer J, Garica VJ *et al.* (2010). Regímenes de ablación láser en la elaboración de películas delgadas. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela* 25(4):121–126. Recuperado de: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652010000400012.

Shepelin NA, Tehrani ZP, Ohannessian N *et al.* (2023). A practical guide to pulsed laser deposition. *Chemical Society Reviews* 52(7):2294–2321. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2cs00938b>.

Manuscrito aceptado