

LAS PELICULAS DELGADAS Y SUS APLICACIONES EN OPTICA*

Luis Efraín Regalado

Centro de Investigación en Física
(CIF-US)

Apdo. Postal A-088

83190 Hermosillo, Sonora México

RESUMEN

En este trabajo se presenta un programa sobre las aplicaciones en óptica de las películas delgadas en diversas partes del mundo y las dificultades que existen para el desarrollo de esta tecnología en México. Se presentan también los problemas más recientes que han aparecido en física básica en conexión con los últimos avances de la tecnología óptica. Finalmente se comenta sobre las posibilidades que existen para que nuestra comunidad de físicos se incorpore al desarrollo de este tipo de tecnología.

* Trabajo patrocinado por DGICSA-SEP y CONACyT

ABSTRACT

In this work it is presented an overall picture of the optical applications of thin films in different parts of the world and the problems found in Mexico for the development of this technology. It is also presented the most recent problems in basic physics which have appeared in connection with latest advances in optical technology. Finally a comment on the possibilities that our community of physicists has in order to contribute to the development of this type of technology is given.

1. INTRODUCCION

El tema de películas delgadas en la actualidad está en rápido desarrollo; hablar de sus aplicaciones es una enorme labor, en este trabajo sólo se mencionarán sus aplicaciones a la óptica.

La fabricación de películas delgadas está íntimamente ligada a la producción del vacío, se pudiera decir que nació con ella en 1640, cuando Otto Van Guericke hizo su célebre demostración de las esferas de Magdeburgo. Desde entonces las condiciones estaban dadas para la evaporación de materiales con bajo grado de contaminación.

Hasta principios del siglo XX la fabricación de películas delgadas representaba una técnica industrial o auxiliar en algunos laboratorios de investigación, pero con los nuevos avances científicos de la época, relacionados con el conocimiento de la estructura y propiedades de la materia, comenzó a ser un tema más de investigación, principalmente en lo relacionado con el mejoramiento de las técnicas de vacío y la medición de presiones bajas, así como en el estudio de las propiedades eléctricas, mecánicas y ópticas de materiales presentando baja dimensionalidad en su espesor.

A finales de los 60's, el planteamiento de la importancia de las superficies como entes físicos atrajo la atención de los científicos y se desarrollaron nuevas técnicas de fabricación y de caracterización de muestras en películas delgadas.

La investigación actual en el área de películas delgadas se puede resumir en cinco puntos principales:

- a) Materiales
- b) Diseño de dispositivos

- c) Técnicas de fabricación de películas delgadas
- d) Técnicas de caracterización de las muestras
- e) Aplicaciones

En los próximos capítulos se darán indicaciones sobre los avances logrados en estos puntos; primero el estado actual de la investigación a nivel mundial y luego comparativamente lo que se hace en México.

La conclusión nos indicará que es ésta un área todavía virgen en nuestro país, debiendo fomentarse la investigación y la formación de recursos humanos en esta rama de la ciencia, así como también impulsar el desarrollo tecnológico en el aspecto de producción de dispositivos ópticos adquiridos hasta hoy sólo en el extranjero.

2. LAS PELICULAS DELGADAS EN EL MUNDO

Los países desarrollados industrialmente cuentan con una enorme infraestructura que permite el avance en la investigación y el desarrollo tecnológico.

En el área de películas delgadas, llaman especialmente la atención países como:

- Francia, donde existe un Centro de Estudios de Películas Delgadas, en Marsella, que ha conjuntado un número considerable de investigadores en el área y cuyo máximo logro ha sido la automatización del proceso de monitoreo óptico de muestras durante su fabricación⁽¹⁾.
- Liechtestim, donde la industria Balzers, sinónimo de calidad en infraestructura, apoya fuertemente la investigación.
- China, en este país el desarrollo científico y tecnológico en el área de películas delgadas data de los años cincuentas, época de nulas relaciones con el Occidente, ellos diseñaron y fabricaron su propia infraestructura y cuentan ya con una considerable industria óptica⁽²⁾.
- Estados Unidos, logró también conjuntar a sus especialistas en un laboratorio-industria en Santa Rosa, Ca. (Optical Coating Laboratory Inc.), donde no sólo se desarrolla la investigación sino que se introducen al mercado las innovaciones tecnológicas y ofrecen los productos convencio

nales como filtros, espejos, divisores de haz, polarizadores, etc.

También en Estados Unidos se ha formado una Cooperativa de Circuitería Óptica, en el Optical Sciences Center de la Universidad de Arizona, quienes buscan la sustitución de la microelectrónica por la óptica integrada, y tratan de acortar el lapso de la aplicación industrial de los resultados de la investigación.

Estos ejemplos no son únicos, ni tampoco los centros de investigación mencionados tienen la exclusividad en el área de sus respectivos países, la investigación y el desarrollo tecnológico se da también en las universidades y en industrias especializadas. Existen otros países donde la investigación y el desarrollo tecnológico de las películas delgadas están ya consolidadas, se puede mencionar a Alemania Federal, Australia, Checoslovaquia, Italia, Japón, Reino Unido, Suecia y la Unión Soviética, entre los principales.

En lo referente a información bibliográfica se han escrito algunos libros, entre los que destaca la serie *Physics of Thin Films*, editado por Academic Press desde 1963, cuenta con 12 volúmenes actualmente y ahí se encuentran los temas más relevantes en el área; también hay que anotar el *Handbook de Tecnología de Películas Delgadas* de McGraw-Hill y algunos libros más especializados⁽³⁾.

La información más actualizada se encuentra en las publicaciones periódicas y en las reuniones internacionales sobre el tema de películas delgadas; entre las primeras sobresalen *Applied Optics*, *J. Opt. Soc. Am. A*, *Thin Solid Films*, *J. Vac. Sci & Technol.*, *Optics and Spectroscopy*, *Le Vide*, *les couches minces*, *Sov. J. of Optical Technology*, *Appl. Phys.*, entre otras; y entre los congresos se pueden mencionar las reuniones anuales de Society of Photo-optical Engineers (SPIE) y la Optical Society of America (OSA), así como las reuniones especializadas de esta última asociación, cuyo tema es tratamientos ópticos interferenciales; también deben mencionarse las reuniones sobre daños por radiación láser de la ASTM.

En lo referente al desarrollo actual de los diferentes puntos señalados en la introducción hay que precisar lo siguiente:

- 1) Materiales.- La producción de materiales de alta pureza es algo cotidiano y existen compañías en todo el mundo dedicadas a ello; en cambio al investigador de películas delgadas le interesa combinar estos mate-

riales ya sea en capas alternadas o con mezcla de materiales para producir nuevas propiedades ópticas y eléctricas no encontradas en la naturaleza. En general, se busca modificar las propiedades de los materiales usados como sustratos y se controlan parámetros como el espesor, temperatura, régimen de vacío (presión) así como las condiciones de fabricación y modificación de propiedades como la reflectividad, transmitividad en función de la longitud de onda. La caracterización de materiales dieléctricos, metálicos, semiconductores, aleaciones, polímeros, no lineales, inhomogéneos o cualquier otra manifestación de la materia es también tema de trabajo en esta especialidad. Igualmente la relación que guardan estas propiedades en función de la microestructura y composición química de los materiales o sus combinaciones.

- 2) Diseño.- La combinación de materiales en capas alternadas o evaporadas simultáneamente sobre un sustrato han dado origen a nuevas propiedades ópticas y eléctricas de los materiales, permitiendo así el diseño de dispositivos ópticos o electroópticos. Los avances en la investigación en este aspecto están todos dirigidos hacia la automatización de procesos de fabricación y hacia el diseño por computadora. Interesa mucho la estabilidad de sistemas multicapas.
- 3) Técnicas de fabricación.- Las técnicas tradicionales que permiten el control de la evaporación de capas delgadas son el efecto Joule (evaporación térmica), el cañón de electrones, diferentes métodos de pulverización (catódica, radio frecuencia, reactiva, diodo, triodo, etc.), depósito de vapor químico, evaporación por radiación láser (CO_2 o KBr) y más recientemente se han desarrollado nuevas técnicas como depósito de capas moleculares, asistencia de iones, evaporación por plasma, evaporación de capas atómicas, etc.
Puntos muy importantes son la búsqueda de mayor densidad y estabilidad en las películas depositadas y el control y monitoreo in situ de las muestras; actualmente se ha llegado a la etapa de automatización total del proceso de fabricación de determinados dispositivos ópticos⁽⁴⁾.
- 4) Técnicas de caracterización.- Aparte de las técnicas no ópticas requeridas para el estudio y caracterización de superficies y películas como SEM, TEM, LEED, HEED, XPS, RBS, Auger, etc. Se han desarrollado nue

vas técnicas en base a fenómenos ópticos, tales como dispersión de Brillouin, efecto Raman, excitación de plasmones de superficies por ATR. Algunas de estas técnicas deben su existencia precisamente a la necesidad de explicar algunos fenómenos intrínsecos de las características dimensionales de las películas delgadas y la microestructura y composición química de las mismas. También las técnicas clásicas como elipsometría, interferometría y espectrofotometría han sido mejoradas y adaptadas al estudio de las propiedades ópticas de las películas y sistemas multicapas.

- 5) Aplicaciones.- La aplicación clásica de los sistemas multicapas ha sido la producción de tratamientos interferenciales antirreflejantes, la fabricación de dispositivos ópticos (filtros, espejos, absorbedores, polarizadores, divisores de amplitud luminosa, desfases, etc.). En la actualidad se ha extendido la gama de aplicaciones al aprovechamiento de energía solar por conversión fototérmica o fotovoltaica (superficies selectivas, celdas solares) y a la detección de la luz (detectores picosegundo); de gran utilidad son los tratamientos de películas transparentes conductoras y al estudio de tratamientos interferenciales para disminuir el daño por radiación intensa (radiación láser). La óptica integrada abre un nuevo campo en el proceso tecnológico de las telecomunicaciones y la miniaturización de dispositivos optoelectrónicos, que por sus características de transportar información en dos dimensiones a una velocidad mayor que la de los electrones llegará un día a sustituir a la microelectrónica⁽⁵⁾. Se han desarrollado ya las fibras ópticas, las guías de onda y las válvulas ópticas en base a sistemas de películas delgadas y filamentos.

Por último, se puede mencionar el auge que ha tenido en la investigación básica la posibilidad de crear nuevos mecanismos de formación de imágenes y de efectos no lineales, las películas delgadas proveen un método nuevo de amplificación del campo EM que permite la generación del segundo armónico en un cristal no lineal y doblar la frecuencia de la luz incidente requiriendo menos de potencia de la misma⁽⁶⁾.

Se abre pues, una gran perspectiva para el desarrollo científico y tecnológico de las películas delgadas y estamos a tiempo para adentrarnos

en esta problemática.

3. APLICACIONES A LA OPTICA DE LAS PELICULAS DELGADAS EN MEXICO

En nuestro país existen sólo tres centros de investigación dedicados a la óptica: el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), en Tonantzintla, Pue.; el Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE); y el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO), en León, Guanajuato.

En ellos existen departamentos donde se desarrolla el tema investigación que nos ocupa y se ofrecen estudios de posgrado en óptica, desde 1972 en el INAOE, 1976 en el CICESE y 1980 en el CIO.

En el aspecto de enseñanza, en el INAOE se ofrece un curso de capas delgadas en cuyo programa de estudios se llega al diseño de filtros por computadoras y a la realización de superficies AR, filtros de banda angosta y altamente reflectoras, medición de espores y perfiles espectrales; en el CICESE se ofrece también un medio curso dentro del programa de la maestría con énfasis en la síntesis en el diseño de multicapas, materiales y propiedades de aplilamientos dieléctricos; en el CIO esta materia se ofrece como optativa.

Dentro de sus áreas de investigación los tres centros consideran este tema de películas delgadas. A continuación se da una síntesis⁽⁷⁾ de las actividades relacionadas con él dentro de estos tres centros.

CIO: Las películas delgadas representan una de las seis áreas de investigación: se consideran los principios físicos, los métodos de diseño y las aplicaciones de las películas delgadas de interferencia. Para la realización experimental se cuenta con programas de computación para el cálculo de las características de los diseños con películas delgadas y un laboratorio dedicado al crecimiento de películas delgadas. El método empleado es el de evaporación al alto vacío.

CICESE: Entre las tres áreas de investigación en óptica el desarrollo de las películas delgadas está estructurado así:

a) Análisis y síntesis de multicapas, con aplicación en la óptica.

Se usan diferentes modelos del comportamiento del material y de los procedimientos para obtener las estratificaciones necesarias.

- b) Desarrollo de métodos de evaporación en sistemas de vacío y sistemas controladores de espesor durante el crecimiento de la película.
- c) Caracterización de las propiedades ópticas en los materiales utilizados en los recubrimientos.

Cabe mencionar que en el CICESE se ha elaborado instrumentación como interferómetros para medir espesores de películas, reflectómetro para la obtención del valor absoluto de propiedades ópticas y un sistema monitor para el control in situ de la evaporación de la muestra requerida.

La línea trazada de investigación busca integrar el proceso de elaboración de multicapas, el establecimiento de un modelo numérico para predecir el comportamiento del sistema, así como de sus características microestructurales y ópticas.

INAOE: También siendo una de las tres áreas de investigación en óptica en este instituto, el laboratorio de películas delgadas se dedica a investigar y diseñar diferentes tipos de superposición de capas para el mejoramiento de los diversos dispositivos ópticos (filtros de interferencia, filtros espaciales, antireflectoras (AR), divisores de haz (DH)). También se da asistencia en el proyecto industrial de microscopios, cuyas superficies ópticas son recubiertas con capas AR.

Recientemente ha habido modificaciones en los temas de investigación de cada uno de estos centros, pero el área de películas delgadas en todos ellos se ha estancado o tiende a desaparecer, a menos que muy pronto reciban un impulso importante.

Existe otro caso de aplicación de las películas delgadas a la óptica en México, en el Centro de Investigación en Física de la Universidad de Sonora, se inició en 1983 la creación de un laboratorio de películas delgadas, proyecto patrocinado por la DGICSA-SEP (1983) y CONACYT (1984) con la intención de desarrollar dispositivos ópticos y mejorar la caracte-

rización óptica de las muestras. El plan de trabajo de este laboratorio está estructurado en tres fases: diseño, fabricación y caracterización; en la primera parte se han realizado programas de análisis de apilamientos multicapas: dados los espesores y constantes dieléctricas de cada capa se calculan la reflectividad y transmitividad del sistema en un cierto rango espectral y para varios ángulos de incidencia, el método utilizado es un método recursivo⁽⁸⁾, también se cuenta con programas de síntesis donde se calculan los índices de refracción y de extinción de los materiales en películas delgadas en base a datos experimentales de reflexión y de transmisión. Dentro de esta misma fase de diseño se cuenta con un programa de estabilidad⁽⁹⁾ de sistemas multicapas donde se pueden manejar compensaciones de espesor en los depósitos subsecuentes a una película cuyo espesor real fue diferente del proyectado, este programa es útil para el diseño en sí del dispositivo óptico porque puede prever la dificultad de realizar ciertas combinaciones de materiales.

En el aspecto de fabricación se cuenta con un sistema de evaporación de alto vacío ($\sim 10^{-6}$ mbar) equipado con un sistema monitor de espesores por balanza de cuarzo, manejado con un microprocesador, un monitor óptico y un motor interior que permite girar las muestras y homogeneizar los depósitos, en bombardeo de plasma para limpieza de sustratos y los métodos de evaporación utilizada con el efecto Joule (evaporación térmica) y cañón de electrones de 6 KeV. Los materiales trabajados hasta ahora han sido metales y dieléctricos. Todo este equipo se ha reunido entre 1983 y 1984. La producción de películas delgadas se hace pues, bajo control óptico y mecánico en buenas condiciones de reproducción.

La tercera fase, de caracterización, ha dado pie a la implementación de nuevas técnicas de caracterización (ATR, microscopía interferencial (MI), rayos X en incidencia rasante, espectrofotometría) y a utilizar otras existentes en el IFUNAM-Ensenada (Auger, TEM, etc.).

Con respecto a los canales de difusión de las actividades de investigación y desarrollo de películas delgadas en el país solo existen los congresos de la Sociedad Mexicana de Física y los talleres de física de superficies, así como las Revistas Mexicanas de Física y Kinam.

4. ALGUNAS OBSERVACIONES

En nuestro país existe un índice muy bajo de formación de recursos humanos en esta área de películas delgadas. El número de especialistas en la actualidad se puede contar con los dedos de una mano y todos trabajan aisladamente en diferentes instituciones.

Los programas de investigación de las diferentes instituciones, son repetitivos y en algunos casos se duplican esfuerzos ya realizados. Sin embargo, la infraestructura física, en su conjunto, es aceptable y permitiría, bajo un programa común ampliar los campos de trabajo.

Además, estamos a tiempo para prepararnos a la era de la circuitería óptica, con la cual se busca reemplazar a la microelectrónica. En este campo se requieren nuevos materiales con propiedades no lineales y más compactos para mayor durabilidad, esto va aunado a la búsqueda de nuevos procesos de depósito de películas delgadas como la técnica de evaporación de capas atómicas o la asistencia de iones, también se requiere la combinación de varias técnicas de caracterización óptica y el diseño de nuevos dispositivos que permitan transportar información en dos dimensiones (varios canales simultáneamente) y a la velocidad de la luz, lo cual requiere de detectores subpicosegundo. Este campo de la circuitería óptica representa un abanico de posibilidades en temas de investigación básica y de desarrollo tecnológico, pero requiere de la concurrencia de muchos expertos en óptica y diseño de computadoras.

Un paso importante sería que los especialistas del país en películas delgadas se organizaran para plantear un proyecto a nivel nacional que buscara por un lado la superación académica y consolidación de los participantes y además que contara con:

- Un programa de formación de recursos humanos a nivel técnico y de posgrado.
- Un programa de diseño y fabricación de prototipos de dispositivos ópticos convencionales.
- Un programa de investigación con varios temas específicos, propuestos por cada uno de los participantes responsables según intereses de la Institución de donde provienen, pero contando con la colaboración de los restantes.

Todo esto se vería beneficiado si al mismo tiempo se da impulso a la construcción de sistemas de vacío y evaporadoras (diferentes técnicas de evaporación y medición de bajas presiones), así como a la purificación de materiales de los cuales somos grandes productores y fabricación de substratos de vidrio de calidad óptica, transparente y desarrollo; todo lo anterior existe ya incipientemente en el país.

REFERENCIAS

1. -J.P. Borgogno, *et al.*, *Appl. Opt.*, 20 (1981) 90.
-E. Pelletier, *et al.*, *Appl. Opt.*, 21 (1982) 4020.
2. J.F. Tang, *et al.*, *Applied Optics*, 23 (1984) 3602.
3. -*Physics of Thin Films*, Vol. 1-12 Ed. G. Hass y R.E. Thun. Academic Press, N.Y. (1963 ... 1982).
-*Handbook of Thin Films Technology*, Ed. L.I. Massell y R.G. Lang. McGraw Hill, N.Y. (1970).
-O.S. Heavens "Optical Properties of Thin Solid Films". Dover N.Y. (1965) (Butterworths, London 1955).
-*Optical Properties and Electronic Structure of Metals and Alloys*, Ed. F. Abeles. North Holland Publ. Amsterdam (1966).
-S. Tolansky "Multiple beam interferometry of Surfaces of Thin Films", Dover N.Y. (1970).
-J.R. Hollahan and R.S. Rosler, *Thin Film Processes*, (Ed. J.L. Vossen). Academic Press N.Y. (1978).
-A. Vasicek, *Optics of Thin Films*, North Holland, Amsterdam (1960).
-*Basic Problems in Thin Films Physics*, Ed. R. Niedermayer + H. Mayer Vanderhoeck & Ruprecht, Gottingen (1966).
-*Structure and Properties in Thin Films*, Ed. C.A. Neugebauer, J.B. Newkirk, D.A. Vermilyea. Wiley N.Y. (1959).
-*Thin Film Phenomena* K.L. Chopra, McGraw Hill, N.Y. (1969).
-*The use of Thin Films in Physical Investigation*, Ed. J.C. Anderson. Academic Press N.Y. (1966).
-*Ellipsometry in the Measurements of Surfaces and Thin Films*. Eds. E. Passaglia, R.R. Stromberg, J. Kruger, N.B.S. Misc. Publ. Wash. D.C. (1964).
-L. Holland, *Vacuum Deposition of Thin Films*, Wiley N.Y. (1958).
-*Single crystal films*, Ed. M. Francombe + S.H. Sato Pergamon Press, Oxford (1964).
-*Condensation and evaporation of Solids*, Ed. E. Rutner *et al.*, Gordon & Breach N.Y. (1964).
-H.M. Liddell, *Computer aided Techniques for the design of multilayer Filters*, Adam Hilger Ltd., Bristol (1981).
-Z. Knittl, *Optics of Thin Films*, Wiley Interscience Publ., Praga, Checoslovaquia (1976).
-H.A. MaLeod, *Thin Film Optical Filters*, Adam Hilger Ltd., Bristol (1969).
4. -R. Herrman *et al.*, *Proceedings of the Topical Meeting on Optical Coatings*, Monterey, Ca. (1984).

5. -J.N. Lee, *Devices for Optical Signal Processing Optics News*, 11 (1985) 22.
6. -D. Sarid, *Phys. Rev. Lett.*, 47 (1981) 1927.
-J.C. Quail, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 30 (1983) 1987.
-G.S. Agarwal, *Phys. Rev.*, B 31, (1985) 3534.
7. -Folleto del INAOE, CICESE y CIO.
8. -H. Dupoisot, J. Morizet, *Appl. Opt.*, 18 (1979) 2701; J. Mouchart, *Appl. Opt.*, 16 (1977) 2486.
9. -L.E. Regalado, A. Posada, *Memorias del XXVIII Congreso de la Soc. Mexicana de Física*, Hermosillo, Son. (1985).