

New organic platform to integrated photonic device fabrication.

Nueva plataforma orgánica para la fabricación de dispositivos en fotónica integrada

G.A Torchia¹, C. E. Hoppe², C. A. T. Laia,³ A. J. Parola³ and G. Lifante-Pedrola⁴

¹Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET-CICBA-UNLP)
Camino Centenario y 506, s/n, M.B. Gonnet (1897), Pcia. de Buenos Aires, Argentina

²Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), Av. Colón 10850, Mar del Plata, Pcia. de Buenos Aires, Argentina

³Departamento de Química, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT-NOVA), 2829-516 Caparica, Portugal

⁴Departamento de Física de Materiales, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 28049, Cantoblanco, Madrid, España

© E-mail: gustavot@ciop.unlp.edu.ar

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received: 07/05/2023

Accepted: 14/05/2023

DOI: 10.7149/OPA.56.2.51148

ABSTRACT: This paper presents a new technological platform for the development of integrated optical circuits for applications in photonics. It is based on supramolecular polymeric materials whose behaviour resembles that of those known as vitrimers. These were synthesized by reaction between diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) and different *n*-alkylamines. The photonic characteristics of thin films made from these polymeric systems using the spin coating technique on commercial glass substrates are presented. The reflectivity curves of coupled laser light in the films through a high refractive index prism are also shown and analysed. From these results, thin films show guided modes in both polarizations (TE-TM) for electromagnetic radiation in the UV-visible range. Likewise, from the experimental data, the refractive index and thickness of the explored films are determined.

Key words: organic thin films, waveguides, epoxy, amines

RESUMEN: En este trabajo se presenta una nueva plataforma tecnológica para el desarrollo de circuitos ópticos integrados para aplicaciones en fotónica. La misma se basa en materiales poliméricos supramoleculares cuyo comportamiento se asemeja al de los conocidos como vitrímeros. Éstos fueron sintetizados por reacción entre diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), y distintas *n*-alquilaminas. Se presentan las características fotónicas de películas delgadas fabricadas a partir de estos sistemas poliméricos mediante la técnica de *spin coating* sobre sustratos de vidrio comerciales. Se muestran y analizan, también, las curvas de reflectividad de luz láser acoplada en las películas mediante un prisma de alto índice de refracción. A partir de estos resultados, las películas delgadas muestran modos guiados en ambas polarizaciones (TE-TM) para radiación electromagnética en el rango UV-visible. Asimismo, a partir de los datos experimentales, se determinan el índice de refracción y espesor de las películas exploradas.

Only for Spanish speaking authors.

Palabras clave: películas delgadas orgánicas, guías de onda, epoxy, aminas

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

[1] F.I. Altuna, U. Casado, I. E. dell'Erba, L. Luna, C. E. Hoppe. and R. J. J. Williams, Epoxy vitrimers incorporating physical crosslinks produced by self-association of alkyl chains, *Polym. Chem.*,11, 1337-1347(2020).



- [2] J. Puig, I. A. Zucchi*, C. E. Hoppe, C. J. Pérez, M. J. Galante, R. J. J. Williams, and C. Rodríguez-Abreu Epoxy Networks with Physical Cross-Links Produced by Tail-to-Tail Associations of Alkyl Chains, *Macromolecules* 2009, 42, 23, 9344–9350, (2009).
- [3] Yong Sheng Zhao (eds.), Series: Nano-Optics and Nanophotonics Publisher: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2015), ISBN: 978-3-662-45081-9, 978-3-662-45082-6.
- [4] Clark, J., Lanzani, G. Organic photonics for communications. *Nature Photon* 4, 438–446 (2010).
- [5] M.C. Estevez, M. Alvarez, L.M. Lechuga, Integrated optical devices for lab-on-a-chip biosensing applications, Special Issue: Integrated Optics: New Material Platforms, Devices and Applications Pages: 463-487, (2011).
- [6] I. Rodríguez-Ruiz, T. N. Ackermann, X. Muñoz-Berbel, and A. Llobera, Photonic Lab-on-a-Chip: Integration of Optical Spectroscopy in Microfluidic Systems *Anal. Chem.* 2016, 88, 13, 6630–6637 (2016).
- [7] G. Ruiz-Vega, M. Soler and L.M. Lechuga, Nanophotonic biosensors for point-of-care COVID-19 diagnostics and coronavirus surveillance, *J. Phys. Photonics* 3 011002 (2021).
- [8] D. Presti, J. Bergier, L. Ripoll, C. Borio, G.A. Torchia, and M. Bilen, "Point-of-care real-time DNA detection device for SARS-CoV-2 from clinical samples," *J. Opt. Soc. Am. A* 40, C1-C7 (2023).
- [9] R. Soref, "The Past, Present, and Future of Silicon Photonics," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, 6, 1678-1687, (2006), doi: 10.1109/JSTQE.2006.883151.
- [10] G. Poberaj, H. Hu, W. Sohler, P. Günter, Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-photonics devices, G. Poberaj, H. Hu, W. Sohler, P. Günter, *Laser Photonics Review* 6, 488-503, (2012)
- [11] G. Lifante, *Integrated Photonics: Fundamentals*. John Wiley & Sons (2003).
- [12] J. Yao, G. López-Peña, J. Lifante, M. C. Iglesias-de la Cruz, R. Marin, E. Martín Rodríguez, D. Jaque, D.H. Ortigies, Adjustable near-infrared fluorescence lifetime emission of biocompatible rare-earth-doped nanoparticles for in vivo multiplexing, *Optical Materials: X*, 17, (2023).
- [13] D.A. Biasetti, G. A. Torchia and E. Cantelar, Luminescent features in double-track type II waveguides made in Er/Yb:LiNbO₃ by Ultrafast Laser Inscription, *Optical Materials*, 88, 680-688 (2019).
- [14] A. Uzun et al., "Integration of Edge-Emitting Quantum Dot Lasers with Different Waveguide Platforms using Micro-Transfer Printing," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 29, 1500210 (2023).
- [15] Jean-Pierre Pascault (Editor), Roberto J. J. Williams (Editor), *Epoxy Polymers: New Materials and Innovations* 1st Edition, Wiley-VCH (2010).
- [16] Clayton May (Editor), *Epoxy Resins: Chemistry and Technology*, Second Edition, 2nd Edition, Routledge; (1987).
- [17] N. van Zee, R. Nicolaj. Vitrimers: Permanently crosslinked polymers with dynamic network topology. *Progress in Polymer Science*, 104, 101233 (2020).
- [18] W. Alabiso, and S Schlögl, The Impact of Vitrimers on the Industry of the Future: Chemistry, Properties and Sustainable Forward-Looking Applications. *Polymers*, 12, 1660, (2020).
- [19] D. Montarnal, M. Capelot, F. Tournilhac and L. Leibler. Silica-like malleable materials from permanent organic networks. *Science*, 18;334(6058):965-8 (2011).
- [20] I. A. Zucchi, C. E. Hoppe, M. J. Galante, R. J. J. Williams, M. A. López-Quintela, L. Matějka, M. Slouf, and J. Pleštil Self-Assembly of Gold Nanoparticles as Colloidal Crystals Induced by Polymerization of Amphiphilic Monomers, *Macromolecules*, 41, 13, 4895–4903 (2008).
- [21] A. Ledo-Suárez, J. Puig, I. Zucchi, Ileana, C.E. Hoppe, and M.L. Gómez, R. Zysler, C. Ramos, M.C. Marchi, S. Bilmes, M. Lazzari, Massimo, M. A. López-Quintela, and R. Williams, J. J. "Functional nanocomposites based on the infusion or in situ generation of nanoparticles into amphiphilic epoxy gels", *J. Mater. Chem.*, 20, 10135-10145 (2010).
- [22] *Handbook of Silicon Photonics (Series in Optics and Optoelectronics)* Edited by Laurent Vivien and Lorenzo Pavesi, CRC Press, Boca Raton (2013).
- [23] Chen, F., and de Aldana, J.R.V., "Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtoseconds-laser micromachining", *Laser & Photonics Reviews*, 8(2), 251-275. (2013).

1. Introducción

En los últimos años los materiales orgánicos han ganado un espacio de relevancia en las aplicaciones tecnológicas en fotónica. Ejemplo de trascendencia son las pantallas de OLED que garantizan muy alta definición y, además, requieren poco consumo energético para su funcionamiento. Esta última característica, junto a la posibilidad de trabajar con materiales capaces de ser reprocesados, reutilizados y reciclados, potencia la preferencia de los polímeros y otros materiales orgánicos a la hora de diseñar nuevos

esquemas tecnológicos en distintos campos de la óptica y la fotónica. La versatilidad de los materiales orgánicos en general y de los poliméricos en particular [1,2], así como el control de sus propiedades a través del diseño racional de su química, hace aún más interesante el estudio de estos sistemas [3,4].

La fotónica integrada ha generado, en los últimos años, numerosos avances tecnológicos a los que accedemos en nuestra vida cotidiana, que abarcan desde las video- llamadas y plataformas de *streaming* a través de internet basada en fibras ópticas (FTTH) y todos sus componentes asociados, hasta el surgimiento de sistemas innovadores, precisos y de bajo costo como sensores biológicos para diagnóstico médico en el formato *lab-on-a-chip* [5, 6]. El desarrollo de estos sistemas ha sido traccionado fuertemente por la pandemia de SARS-CoV-2 [7, 8], así como también por la demanda constante de mejorar la calidad de vida. Esto último tiene un ejemplo concreto en los nuevos y sofisticados sistemas capaces de monitorear el medio ambiente o la salud estructural de distintas obras civiles. Asimismo, los desarrollos aeroespaciales han dado un fuerte impulso para que la fotónica integrada crezca sustancialmente y se coloque en la vanguardia tecnológica en este campo. En este sentido, el avance en los desarrollos de los denominados CubeSat va en esa línea, ya que estos mini-satélites están compuestos por numerosos dispositivos de pequeño tamaño y, se encuentran limitados en el consumo eléctrico, desafíos y demandas que la fotónica integrada puede enfrentar y abastecer satisfactoriamente.

Por otro lado, la fotónica integrada, en la búsqueda de nuevas plataformas para desarrollar dispositivos de forma masiva para diversas aplicaciones, ensaya constantemente nuevos materiales [9, 10]. En este sentido, los materiales orgánicos y poliméricos resultan candidatos ideales para el diseño de nuevos dispositivos por su versatilidad y por la posibilidad de ajustar sus propiedades a partir del diseño racional de su química de síntesis. Particularmente, la fotónica integrada requiere de un sistema que pueda ser fácilmente depositado en sustratos planos para generar películas con un índice de refracción mayor a dicho sustrato y una rugosidad por debajo de la longitud de onda de trabajo [11]. Estos materiales también deben ser aptos para implementar las técnicas y métodos asociados a la litografía UV, para así definir distintos circuitos ópticos sobre estas películas. Por otro lado, estos materiales deben admitir dopajes de distintos tipos, tanto de estructuras orgánicas como inorgánicas (*quantum dots*, tierras raras, metales de transición o moléculas orgánicas) capaces de conferir propiedades luminiscentes específicas a estas matrices [12-14].

Las redes poliméricas de tipo epoxi han sido utilizadas ampliamente en la fabricación de recubrimientos, adhesivos, medios de encapsulación y materiales compuestos de alto desempeño durante décadas. Entre sus propiedades de interés se pueden mencionar su resistencia química y a los solventes, su baja contracción durante el curado, sus excelentes propiedades como adhesivos de diferentes sustratos y su alto módulo Young y rigidez. [15, 16].

Uno de los principales problemas de estas redes, así como de cualquier material polimérico entrecruzado, era su imposibilidad de reprocesamiento y reciclado. Este escenario se modificó a partir del surgimiento de los vitrímeros, redes covalentes adaptables basadas en enlaces dinámicos que tienen la capacidad de ser reprocesadas, autorreparadas y recicladas por encima de una cierta temperatura característica [17-19]. El interés e importancia de este tipo de materiales, en particular en cuanto a su impacto medioambiental y su relación con la economía circular, se ha visto reflejado en el impresionante número de publicaciones que discuten su síntesis, propiedades, procesamiento y reciclabilidad. En paralelo con el desarrollo de este tipo de vitrímeros, el grupo de Williams y colaboradores ha trabajado también en la síntesis y caracterización de redes epoxi autorreparables no covalentes, basadas en enlaces supramoleculares generados a partir del recocido térmico de polímeros lineales epoxi-amina alquílica [1, 2, 20, 21]. Estos sistemas no son vitrímeros, ya que las redes que forman no son covalentes, pero pueden comportarse de manera análoga para ciertas formulaciones, en particular en cuanto a su capacidad de relajación de tensiones y autorreparación. Esto se debe a la naturaleza dinámica de los enlaces supramoleculares que forman la red y que permite, para ciertos sistemas, la reestructuración en ausencia de fluencia o depolimerización. De esta forma, estos materiales comparten dos muy atractivas características para el diseño de dispositivos fotónicos integrados: pueden procesarse en forma de película como si se tratara de un polímero lineal termoplástico convencional (en fundido o en solución usando técnicas convencionales de *drop casting*, *dip coating* o *spin coating*) y convertirse en redes entrecruzadas insolubles de buena adherencia al sustrato y con capacidad de autorreparación a través de un tratamiento térmico moderado.

En este trabajo se presenta una nueva plataforma para el desarrollo de elementos de fotónica integrada basada en la utilización de polímeros lineales epoxi-amina capaces de formar redes supramoleculares autorreparables cuando se someten a un recocido térmico. A partir del depósito mediante *spin coating* de películas delgadas de estos materiales sobre sustratos de vidrio comerciales, se muestran las características más relevantes de este sistema como guías de onda óptica. Se determina y analiza, además, el índice de refracción y el espesor de cada película, a partir del acoplamiento de luz láser

para distintas longitudes de onda y estado de polarización de las películas fabricadas. Con este fin, se realizan simulaciones numéricas basadas en el método de multicapas para ajustar los parámetros mencionados.

2. Materiales y métodos

Los sistemas poliméricos se obtuvieron por reacción de diglicidiléter de bisfenol A (DGEBA), y distintas n-alkilaminas (octilamina, OA, dodecilamina, DA y hexadecilamina, HA). Todos los componentes se adquirieron de la firma alemana Sigma Aldrich y se usaron sin posterior purificación. Las películas fabricadas fueron depositadas por *spin coating* a partir de soluciones en THF al 5% m/V de cada uno de los sistemas analizados. Bajo las condiciones de procesamiento utilizadas no se espera una alineación preferencial de las cadenas ni ningún efecto de anisotropía en las películas obtenidas.

Las películas delgadas fueron depositadas mediante la técnica de *spin-coating* sobre sustratos de vidrio soda-lime comerciales rectangulares de 25 mm x 75 mm de lado. Para controlar la homogeneidad del proceso de depósito se utilizó una velocidad de 2000 rpm para depositar cada capa. Las muestras analizadas en este trabajo fueron fabricadas con 3 y 5 capas. La película se distribuyó sobre todo el porta-objetos mostrando una muy buena uniformidad en la parte central de la misma.

Para entrecruzar las películas obtenidas del polímero lineal y obtener redes supramoleculares, las muestras fueron sometidas a un recocido térmico en un horno de mufla a 100 °C durante 24 horas siguiendo el método descrito por Puig et al. [2].

Mediante un perfilómetro mecánico de la firma SLOAN DEKTAK II se analizó la homogeneidad y rugosidad de las películas depositadas a partir de barridos a lo largo de sus superficies en distintas regiones de las muestras.

Para llevar a cabo la determinación de espesores e índices de refracción de las películas se utilizó el método de modos oscuros mediante un sistema de acoplamiento de luz a través de un prisma de alto índice de refracción. El prisma utilizado es de aproximadamente 10x10 mm en la base. Este se coloca sobre la película-sustrato a estudiar, de tal forma que al presionarlo no exista capa de aire entre la base del prisma y la película. Utilizando un láser polarizado y un expansor de haz a la entrada de una de las caras del prisma, se observa sobre una pantalla la luz emergente a través de una segunda cara del prisma (figura 1, arriba). Los modos guiados de la estructura óptica (lámina+sustrato de vidrio) aparecen sobre la pantalla como líneas oscuras verticales sobre un fondo brillante.

Para la determinación de las posiciones angulares precisas de los modos guiados se utilizó un sistema similar, pero donde ahora el haz de entrada está colimado, y la intensidad reflejada se registra en un detector en función del ángulo de incidencia θ (figura 1, abajo). El conjunto prisma-película-sustrato se sitúa sobre una plataforma giratoria de alta precisión (0.001°), donde se sitúa además un espejo para el seguimiento angular de la detección al girar la plataforma.

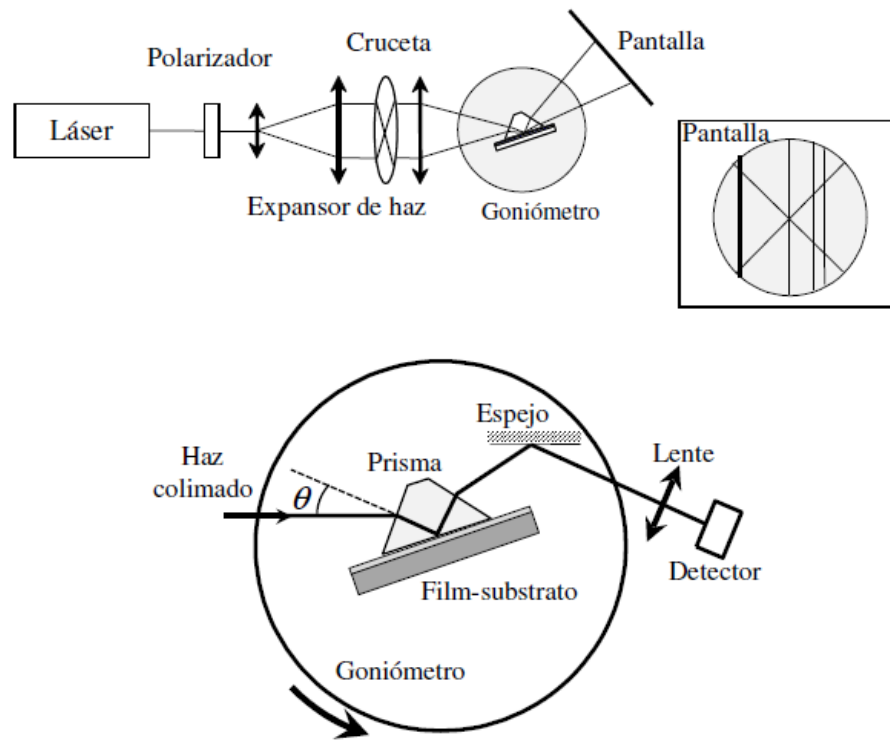


Figura 1.- Sistema experimental utilizado para caracterizar películas delgadas mediante el método de modos oscuros utilizando acoplamiento con prisma. Arriba: observación de los modos oscuros en una pantalla utilizando un expansor de haz a la entrada del prisma, donde los modos guiados se visualizan en la pantalla como líneas oscuras verticales. Abajo: registrando la intensidad reflejada en la base del prisma-lámina en función del ángulo de incidencia sobre una cara del prisma, se determinan con precisión las posiciones angulares de los modos guiados, así como el correspondiente al índice de refracción del substrato.

Con este arreglo experimental fue posible medir las curvas de reflectividad versus ángulo de incidencia utilizando distintas longitudes de onda proveniente de tres láseres emitiendo a 446, 532 y 633 nm. Las medidas se realizaron para polarizaciones TE y TM, controlando el estado de polarización de la luz acoplada en el prisma utilizando un polarizador de calcita. Mediante un detector de silicio y un sistema de amplificación se obtiene una señal que es procesada y digitalizada en una placa conectada a una PC. Asimismo, se aparea cada valor de intensidad medida con la posición angular que se registra, también con esa misma placa adquisidora. Para determinar los índices de refracción efectivos de los modos guiados es preciso conocer los ángulos del prisma, así como los índices de refracción del substrato de vidrio y del prisma para las longitudes de onda utilizadas en este trabajo (ver Tabla 1).

Tabla 1.- Índices de refracción correspondientes al sustrato (soda-lime) y del prisma para distintas longitudes de onda.

Longitud de onda (nm)	Índice de refracción del sustrato (soda-lime)	Índice de refracción del prisma
446	1.5263	1.8651
532	1.5195	1.8447
633	1.5151	1.8309

La relación entre el ángulo de incidencia θ y el índice efectivo N_{eff} de los modos guiados viene dado por:

$$N_{eff} = n_p \sin \varphi \quad (1);$$

donde:

$$\varphi = \alpha_p + \sin^{-1} \left(\frac{n_1 \sin \theta}{n_p} \right) \quad (2).$$

La expresión (2) se deduce a partir de conceptos de óptica geométrica y relaciones entre ángulos. En estas fórmulas n_p denota el índice de refracción del prisma, α_p el ángulo del prisma, y n_1 es el índice de refracción del aire. Los índices efectivos de los modos deben ser mayores que el índice de refracción del sustrato para que puedan corresponder a modos guiados, y menores que el índice de refracción de la lámina. El número de modos guiados depende no sólo de los índices del sustrato y de la lámina, sino también de la relación entre su espesor y la longitud de onda de trabajo. Además, las posiciones angulares para modos TE y TM son en general distintas.

Simulando la propagación de luz en medios inhomogéneos (prisma-lámina-sustrato) mediante un modelo de multicapas es posible ajustar las curvas de reflectividad experimentales y obtener así de forma precisa el espesor de la lámina y su índice de refracción [11].

3. Resultados y discusión

Debido al tipo de soporte sobre el que fueron depositadas las películas, esto es, vidrios comerciales de baja planitud, resultó compleja la determinación de los espesores mediante el uso del perfilómetro. Sin embargo, se logró establecer un rango de espesores típicos que presentan las películas, en particular sobre la parte central del sustrato de vidrio. Estos se ubican entre 350-500 nm para películas con 3 capas y de 600-800 nm para aquellas fabricadas con 5 capas. A partir de estas mediciones también se comprobó que la parte central de las películas presentan una buena uniformidad en el espesor, como es característico del método de depósito utilizado. Por otro lado, este mismo equipo resultó útil para estimar la rugosidad de las películas. Los resultados obtenidos fueron: para el caso de los sistemas obtenidos con DGEBA-OA la rugosidad fue < 25 nm, para las películas con DGEBA-DA el valor de la rugosidad fue de < 55 nm, y finalmente para el caso de las películas obtenidas con DGEBA-HA se determinó un valor superior a 100 nm de rugosidad.

Para la determinación de espesores e índices de refracción de las láminas depositadas se utilizó el método de modos oscuros, donde se registra la reflectividad del sistema prisma-lámina-sustrato en función del ángulo de incidencia, tanto en incidencia TE como TM (Figura 1, abajo). Estas medidas de reflectividad permiten determinar el espesor e índice de refracción de las películas para distintas longitudes de onda y para ambas polarizaciones. Esta técnica experimental posee la precisión requerida para aplicaciones en fotónica integrada de las películas fabricadas, ya que permite calcular con gran precisión el valor de los modos guiados en estas estructuras. En la Figura 2 se presenta una curva típica del experimento de reflectividad, donde se registra 1 menos la intensidad de luz láser reflejada normalizada, en función del ángulo de incidencia para el sistema de acople de películas delgadas con el prisma de alto índice de refracción.

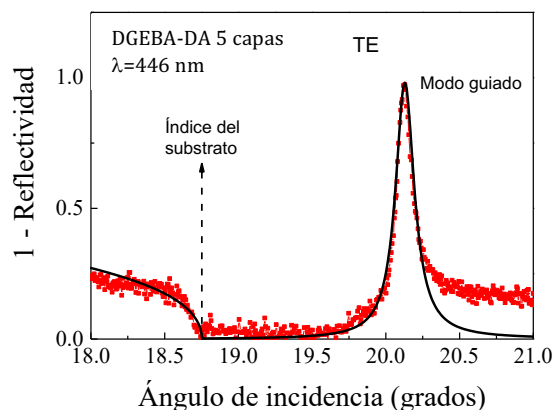


Figura 2.- 1-Reflectividad versus ángulo de incidencia para una lámina de DGEBA-DA de 5 capas utilizando luz de 446 nm e incidencia TE (círculos). La línea continua es el ajuste teórico mediante el método de multicapas. En la gráfica se observa un pico estrecho correspondiente a un modo guiado a 20.13° , y la discontinuidad que denota el valor del índice de refracción del sustrato a 18.74° .

En el eje abscisas de la figura se detallan los ángulos barridos en cada experimento realizado. El cero de ángulos corresponde a incidencia normal del haz láser sobre la cara de entrada del prisma. Como puede observarse y detallamos en esta figura, para el caso particular mostrado en este ejemplo vemos que el ángulo crítico para la película de DGEBA-DA sobre vidrio soda-lime, utilizando luz láser de 446 nm, se ubica en torno de los 18.74° , lo que resulta en un índice de refracción del sustrato cercano a 1.5263, que se corresponde con los valores mostrados en la Tabla 1. Además, se observa un pico estrecho (caída brusca de la reflectividad), que denota la posición de un modo guiado a 20.13° , que corresponde a un índice de refracción efectivo de 1.5395. Por medio de un algoritmo de multicapas, que simula el comportamiento de la luz en la estructura óptica prisma-lámina-sustrato, es posible ajustar los datos experimentales obtenidos en el espectro de reflectividad. La curva continua es el resultado del ajuste, que como puede observarse reproduce muy bien los datos experimentales. No obstante, para determinar unívocamente el valor del espesor de la lámina y su índice de refracción es preciso que la guía de onda soporte al menos dos modos. Para guías monomodo, como es el caso de las láminas aquí fabricadas, esto puede solventarse midiendo el espectro modal tanto para incidencia TE como para polarización TM, de tal forma que se dispone así de dos valores para las posiciones modales. De esta manera se determina unívocamente los valores del espesor de la lámina y de su índice de refracción. Además, la utilización de varias longitudes de onda para obtener el espectro de reflectividad y los modos guiados que soporta la estructura lámina-sustrato permite reforzar los datos obtenidos, pues aunque el índice de refracción de la lámina será en general distinto, el espesor obtenido debe coincidir independientemente de la longitud de onda utilizada.

Como ejemplo, la Figura 3 (izquierda) muestra los espectros de reflectividad a 446 nm para la lámina de DGEBA-DA con cinco capas, obtenidos para incidencias TE y TM. Se observa que dicha guía de onda soporta un modo para polarización TE y un modo para polarización TM. Teniendo en cuenta las posiciones de los modos guiados a ambas polarizaciones, se obtiene un valor para el índice de refracción de la lámina de 1.5502, y un espesor de $0.50 \mu\text{m}$. En la Figura 13 (derecha) se representan las curvas experimentales de reflectividad para la lámina DGEBA-OA de cinco capas, obtenidas a una longitud de onda de 532 nm. De nuevo, esta lámina muestra un comportamiento monomodo a esta longitud de onda, pero un análisis de las posiciones de los modos para polarización TE y polarización TM permite obtener sus parámetros ópticos y su espesor, arrojando un valor de $0.39 \mu\text{m}$ de espesor y un índice para la lámina de 1.5710.

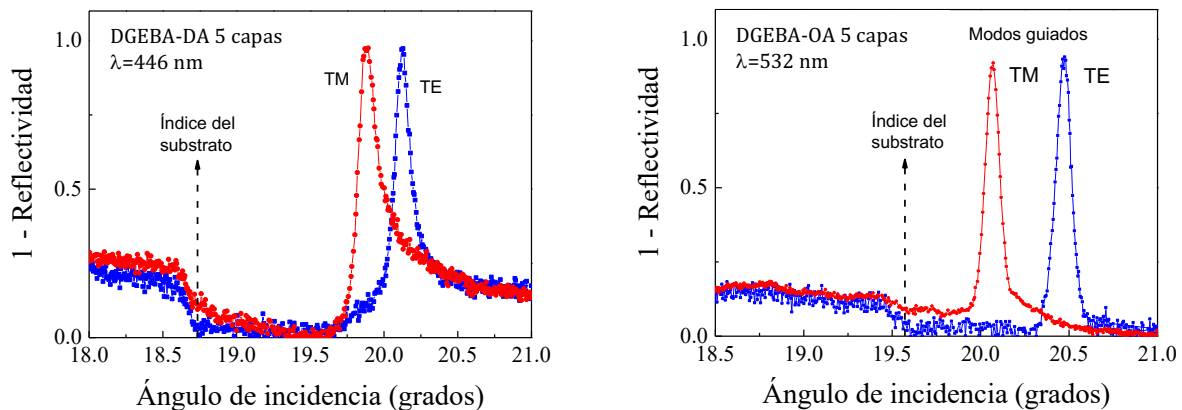


Figura 3.- Izquierda: 1- Reflectividad versus ángulo de incidencia para una lámina de DGEBA-DA de 5 capas utilizando luz de 446 nm para incidencia TM (círculos rojos) e incidencia TE (círculos azules). Derecha: curvas de reflectividad versus ángulo de incidencia para una lámina de DGEBA-OA de 5 capas utilizando luz de 532 nm para incidencia TM (círculos rojos) e incidencia TE (círculos azules). Los picos indican que ambas estructuras se comportan como guías ópticas monomodo a esas longitudes de onda para ambas polarizaciones.

Obsérvese en los gráficos de la Figura 3 que, aunque los modos guiados aparecen en posiciones angulares distintas para las polarizaciones ortogonales (TE y TM), la posición angular para el índice del sustrato es independiente de la polarización utilizada. Obviamente el índice del sustrato sí es distinto según la longitud de onda de trabajo (ver Tabla I).

Podemos apreciar también en la Figura 3 que los modos con polarización TM se localizan más cerca del ángulo crítico que los correspondientes a incidencia TE. Este resultado es general, ya que el valor del índice efectivo de un determinado modo para polarización TM es siempre inferior respecto al modo TE, por lo que aparece más cercano al índice de refracción del sustrato.

En la Figura 4 se muestra la imagen proyectada sobre una pantalla del patrón de modos oscuros obtenido para la muestra DGEBA-OA, excitada a 532 nm sin polarizador en el haz de entrada. Esta imagen se obtiene luego de proyectar sobre una pantalla la excitación a través del prisma utilizando el haz láser enfocado, que entra en forma de cono de luz, en la mancha de contacto óptico entre el prisma y la muestra (Figura 1, arriba). En la imagen se observan dos líneas oscuras verticales, correspondientes al modo TM y al modo TE: cuando un cierto ángulo del cono de luz coincide con el ángulo de excitación de un modo, la luz se acopla a la guía de onda, y aparece como una línea oscura en la pantalla de observación.

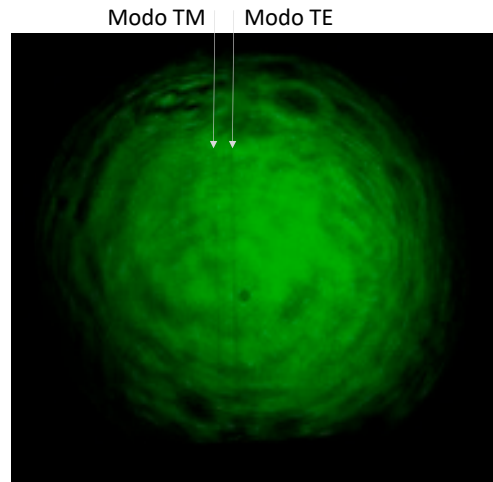


Figura 4.- Imagen proyectada sobre una pantalla de un cono de luz no polarizado a 532 nm que incide sobre la base del prisma acoplado a una lámina de DGEBA-OA con cinco capas depositada sobre un substrato de vidrio soda-lime. Se observan dos líneas oscuras verticales correspondientes a un modo TM (línea a la izquierda) y un modo TE (línea a la derecha).

Para proporcionar un ajuste más preciso de los índices de refracción y espesores de cada uno de estos sistemas poliméricos, como se indicó anteriormente, se obtuvieron espectros de reflectividad para dos longitudes de onda distintas: 466 y 532 nm (para ambas polarizaciones). En todos los casos, las láminas depositadas mostraron un comportamiento monomodo. En la Tabla 2 se muestra los resultados del análisis de las curvas de reflectividad y de las posiciones de los modos de propagación en las guías de onda fabricadas en cada uno de los tres polímeros.

En la Tabla 2 se observa que el índice de refracción mayor lo posee la lámina sintetizada con el polímero DGEBA-OA (1.5710 a 532 nm), y el de menor índice de refracción lo presenta el compuesto DGEBA-HA (1.5421, 532 nm). Además, se observa que el espesor de la lámina sintetizada (con cinco capas) es mayor conforme su índice de refracción disminuye, desde un espesor de 0.39 μm para el compuesto DGEBA-OA, hasta un espesor de lámina de 0.61 μm para el compuesto DGEBA-HA.

Tabla 2. Espesores e índices de refracción de las películas estudiadas en este trabajo. Valores obtenidos mediante ajuste de las curvas de reflectividad y las posiciones de los modos guiados.

Lámina, #capas	Espesor (μm)	Índice de refracción (longitud de onda)
DGEBA-OA #5	0.39	1.5710 (532 nm)
DGEBA-OA #5, entrecruzada	0.42	1.5794 (446 nm)
DGEBA-DA #5	0.45	1.5554 (532 nm)
DGEBA-DA #5, entrecruzada	0.50	1.5643 (446 nm)
DGEBA-HA #5	0.61	1.5421 (532 nm)
DGEBA-HA #5, entrecruzada	0.58	1.5550 (446 nm)

Para completar el estudio de las películas fabricadas, algunas de las muestras se sometieron a un recocido térmico a una temperatura de 100 °C durante 24 h con el propósito de generar el entrecruzamiento de las cadenas lineales de estos polímeros y obtener así redes supramoleculares de las películas fabricadas en base a DGEBA y las distintas aminas: DA, OA y HA.

Pudo observarse, de los análisis de datos realizados, que el recocido térmico no ocasiona un cambio perceptible en la constitución de las películas, es decir, no se ha observado un cambio apreciable ni del índice de refracción, teniendo en cuenta la longitud de onda que se usó en cada caso, ni del espesor de estas. Este hecho evidencia de forma clara que las muestras entrecruzadas para las concentraciones utilizadas en este trabajo (5% masa en volumen en THF) no ven alteradas apreciablemente sus propiedades ópticas tras ser sometidas a un tratamiento térmico a 100 °C durante 24 h.

4. Conclusiones

En este artículo se presenta la aplicación de una nueva familia de polímeros basados en la reacción de un monómero epoxi comercial con aminas alquílicas de cadena larga para aplicaciones en fotónica integrada. En este trabajo se demuestra que es posible, a partir del procesamiento de estos polímeros por *spin coating*, fabricar películas ópticas apropiadas con índice de refracción en el rango de 1.54-1.57 (a 532 nm). Dichas películas obtenidas sobre un sustrato de vidrio de soda-lime, por depósito de 3 y 5 capas, generan sistemas homogéneos. A partir de la medida de la reflectividad versus el ángulo de incidencia se lograron determinar los índices efectivos de los modos acoplados, como así también el índice de refracción de cada película. A partir de estos datos fue posible calcular los índices de refracción de cada material depositado en forma de película delgada, encontrándose que el mismo no varía significativamente con la longitud de cadena alquílica y que el valor de estos se encuentra en el rango de 1,54-1,57. Asimismo, mediante los cálculos computacionales basados en el método de propagación en multi-capas se determinaron los espesores de cada sistema fabricado, encontrándose que aproximadamente se establece una película de alrededor de 100 nm por capa del proceso de *spin coating*.

Por otro lado, a través de un recocido térmico a 100 °C durante 24 h se entrecruzaron las películas por activación de la formación de enlaces supramoleculares. Las características fotónicas después del recocido muestran que los cambios producidos desde el punto de vista óptico no son significativos y que se preservan las propiedades mencionadas.

Finalmente es importante resaltar que este tipo de películas pueden ser reprocesadas y auto-reparadas lo que resulta de interés en el diseño de sistemas fotónicos para aplicaciones de larga duración en distintas áreas tales como comunicaciones ópticas mediante la fabricación de circuitos ópticos integrados con técnicas basadas en litografía UV [22] o escritura láser con pulsos ultracortos [23]. Adicionalmente, con estas técnicas es posible implementar en estas películas nuevos diseños de sensores para aplicaciones en distintas áreas tecnológicas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos PICT-2016-4086 , PICT-2017-0017 y PICT-2018-2309 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. Además, este trabajo fue financiado también por los proyectos PUNQ and PPROF de la Universidad Nacional de Quilmes, Ambas instituciones públicas de la República Argentina. Fue también financiado por el proyecto PID2019-110632RB-I00 del Ministerio de Ciencia e Innovación (España), por la European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 101008237 (proyecto VIT) y por FCT/MCTES, (Fundação para a Ciência e Tecnologia and Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, Portugal) proyectos UIDB/50006/2020 y UIDP/50006/2020.