

Investigación en almacenamiento holográfico de información

M. Ortuño*, S. Gallego**, C. Neipp**,
A. Márquez**, M. Álvarez**, C. García*,
R. Fuentes*, A. Beléndez**, I. Pascual*

*Departamento I. de Óptica

**Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal

Universidad de Alicante

Estudio teórico y experimental del comportamiento holográfico de un fotopolímero basado en polivinilalcohol/acrilamida y optimización de su composición con el fin de aplicarlo a la obtención de memorias holográficas.

Theoretical and experimental holographic study of the behaviour of a polyvinylalcohol/acrylamide based photopolymer and optimization of the composition in order to obtain holographic memories.

Introducción

Una de las líneas de investigación clásicas en la Universidad de Alicante dentro del área de óptica ha sido y sigue siendo la holografía. La actividad investigadora desarrollada en la Universidad de Alicante, por nuestro grupo de investigación, está orientada al estudio y caracterización de materiales de registro holográficos y se realiza desde dos departamentos, el Departamento Interuniversitario de Óptica y el Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Los materiales de registro holográficos destacan actualmente por las amplias perspectivas que presentan en aplicaciones como el almacenamiento de datos lo que se conoce como memorias holográficas. La posibilidad de consumir y generar grandes cantidades de información ha creado a su vez un problema acuciante: la necesidad de dispositivos capaces de almacenar grandes cantidades de datos. Son muchos los científicos, entre otros, que desean almacenar información relativa a sus

campos de trabajo, físicos, informáticos, biólogos, etc., el papel impreso, la fotografía, las cintas magnéticas, los discos compactos (CDs y DVDs) son soportes en los cuales se puede almacenar información pero no resultan suficientes.

Al igual que en las telecomunicaciones la sustitución del cableado eléctrico por el cableado óptico ha supuesto un avance revolucionario, en el almacenamiento de información, las limitaciones de velocidad y capacidad de los dispositivos de almacenamiento que hemos mencionado han sugerido dar un nuevo paso basado en aplicar tecnologías ópticas utilizando la holografía como técnica para conseguir nuevos sistemas de almacenamiento. En particular en las tecnologías convencionales como CDs y DVDs, la información está guardada en forma binaria sobre la superficie del medio de registro de forma que para aumentar la capacidad de almacenamiento hay que aumentar la superficie de registro o disminuir la longitud de onda del láser utilizado. Al almacenar datos de forma holográfica se utiliza todo el volumen del material no sólo la

superficie, con lo cual la capacidad teórica de *almacenamiento de datos*¹ es unas mil veces superior a la del CD-ROM. Aunque este elevado límite teórico nunca llegue a alcanzarse en la práctica, una fracción del mismo ya resultaría competitiva con los últimos desarrollos de DVD que se encuentran disponibles en el mercado.

Por todo lo expuesto anteriormente nuestro grupo de investigación trabaja estudiando y caracterizando un material de registro holográfico como es el fotopolímero para su posible aplicación en el almacenamiento de datos y en la fabricación de memorias holográficas. Nuestra investigación se centra en dos aspectos uno relativo al análisis teórico del comportamiento del fotopolímero proponiendo modelos para caracterizar, describir y predecir el funcionamiento de este tipo de materiales y otro relativo al análisis experimental de la capacidad de multiplexado del fotopolímero trabajando con espesores grandes del orden de 1 mm y optimizando la composición del fotopolímero con el fin de obtener con él una memoria holográfica.

Análisis teórico del comportamiento del fotopolímero

Los fotopolímeros son uno de los muchos tipos de materiales de registro utilizables en holografía debido a sus buenas cualidades: alcanzan un elevado rendimiento en difracción con una sensibilidad energética aceptable, son relativamente fáciles de preparar y tienen un coste reducido. Nuestro grupo de investigación desarrolla materiales basados en fotopolímeros utilizables como medio de registro en holografía. Recientemente hemos desarrollado un material de registro basado en alcohol polivinílico/acrilamida (PVA/AA) con el que se obtiene un alto rendimiento en difracción (70-80%), con una buena sensibilidad energética para este tipo de materiales (50-90 mJ/cm²) y bajas pérdidas por absorción y dispersión de luz². Este fotopolímero consta de una matriz de alcohol polivinílico y agua junto a acrilamida como monómero polimerizable y un sistema iniciador de la fotopolimerización compuesto por el colorante rojo eosina amarillenta (sensible a la línea de 514 nm del láser de argón) y el generador de radicales libres trietanolamina.

El mecanismo principal que ocurre durante el registro del holograma es la otopolimerización de la acrilamida presente

en el material. La estructura de franjas alternas de luz y oscuridad que constituye el patrón interferencial generado por los haces de registro queda reproducida en el fotopolímero en forma de franjas alternas de acrilamida polimerizada y sin polimerizar, respectivamente. Esto logra una modulación de índice de refracción que permite recuperar la información almacenada mediante el haz de reconstrucción.

La caracterización de los materiales de registro holográfico se ha realizado históricamente mediante el almacenamiento de redes de difracción en dichos materiales, pues el problema fundamental en la teoría de hologramas de volumen consiste en explicar las propiedades de una red de difracción sinusoidal. Este es el tipo de holograma que se puede obtener mediante la interferencia de dos ondas planas y constituye la estructura periódica más sencilla que se puede almacenar en un medio fotosensible. El almacenamiento de redes de difracción en diferentes materiales de registro permite evaluar las características de los mismos. Así, por ejemplo, se puede establecer la sensibilidad energética del material, la resolución, la capacidad de almacenamiento, etc. Para llevar a cabo el estudio del almacenamiento en fotopolímeros es necesario contar con una teoría electromagnética eficaz que explique el comportamiento de la luz al atravesar la estructura almacenada en nuestro material.

En los últimos años se han propuesto numerosos modelos para explicar el comportamiento de los fotopolímeros como materiales holográficos³⁻⁹ y nuestro grupo de investigación a realizado su propuesta de modelo teniendo en cuenta la composición y el espesor del fotopolímero empleado¹⁰⁻¹¹ en particular es de destacar la atenuación del perfil de la red almacenada en este material con la profundidad, esta particularidad ha hecho que se haya desarrollado un nuevo algoritmo para estudiar el campo electromagnético al atravesar una red almacenada en fotopolímeros¹². En estos momentos se está evaluando la importancia de dicha atenuación en la fabricación de una memoria holográfica donde el espesor del material es grande y en consecuencia también es grande la atenuación.

Otro aspecto que podemos destacar es la influencia real de todos los parámetros que intervienen en la formación del holograma en fotopolímeros como: la difusividad del monómero en el material (D), la velocidad de la polimerización, la frecuencia espacial, la

intensidad de registro, la visibilidad de las franjas, los índices de refracción de las distintas sustancias...

El tiempo de difusión depende de la difusividad del monómero en el material y de la frecuencia espacial de la red almacenada (K).

$$\tau_D = \frac{1}{DK^2} \quad [1]$$

En la figura 1 se puede observar la importancia del tiempo de difusión (τ_D) en la evolución del rendimiento en difracción (RD) de la red almacenada en función del tiempo. Se observa cómo únicamente para tiempos de difusión medios, comprendidos entre 1 y 400 s se produce un cambio en la forma de la curva de rendimiento en difracción, para tiempos superiores a ese intervalo las curvas son todas iguales y lo mismo sucede para tiempos inferiores, por tanto un cambio en este parámetro afecta al comportamiento del fotorpolímero.

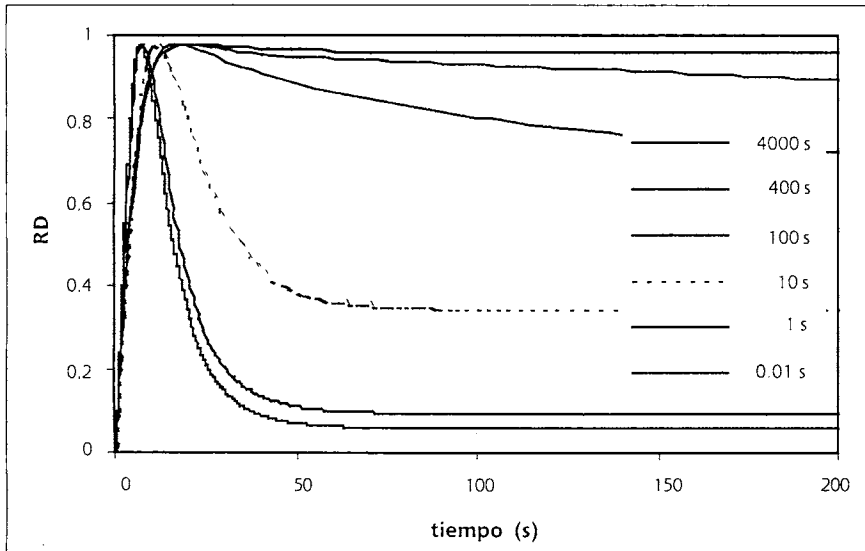


Fig. 1. Rendimiento en difracción (%) para distintos valores de τ_D (4000 s, 400 s, 100 s, 10 s, 1 s y 0,01 s) en función del tiempo.

En la figura 2 se observa la dependencia del rendimiento en difracción de la red almacenada en función del índice de refracción de la denominada matriz soporte (o *binder*) en la cual se encuentran disueltas las sustancias reactivas que componen el fotorpolímero. Se observa como con índices de refracción menores se obtienen mayores modulaciones del índice de refracción lo que genera una caída del rendimiento en difracción más rápida después de haber superado el valor máximo.

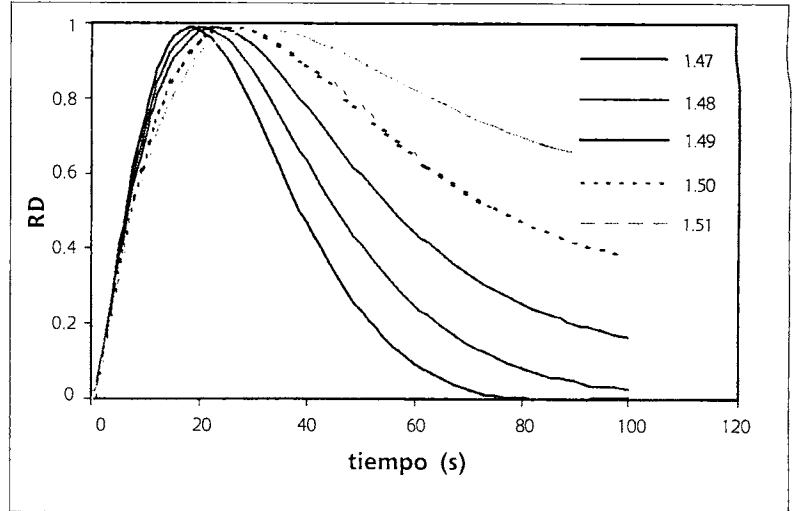


Fig. 2. Rendimiento en difracción (%) en función del tiempo para distintos valores del índice de refracción del "binder" (1.47, 1.48, 1.49, 1.50, 1.51).

Todos los estudios teóricos se están contrastando con resultados experimentales extraídos de la utilización de un fotorpolímero basado en PVA/AA. Con la ayuda de dichos modelos se han podido explicar fenómenos como el efecto de añadir un monómero entrecruzante al material¹³, se ha cuantificado la difusión existente dentro del material¹¹, se ha demostrado la existencia de monómero residual después del registro de las redes¹⁴, se han propuesto técnicas para la conservación de hologramas con altos rendimientos en difracción¹⁵, se ha observado la existencia y se han cuantificado los armónicos superiores en la modulación de índice en el material¹⁶...

Predecir con exactitud el comportamiento del material permite utilizar el fotorpolímero en distintas aplicaciones como el multiplexado de información,

aspecto determinante en el almacenamiento holográfico de información, o para realizar un realce de bordes en procesado Bragg¹⁷.

Aplicación del fotorpolímero a la obtención de memorias holográficas

Mediante diferentes técnicas y métodos de preparación del material se consiguen capas

de fotopolímero en un amplio intervalo de espesores (40-1000 μm)¹⁸, que pueden ser interesantes para su utilización en la fabricación de multitud de componentes, como elementos ópticos holográficos (lentes, divisores de haz, sistemas de procesamiento de imágenes, etc.) o incluso en memorias holográficas aplicación en la que estamos interesados. Para la utilización del material en esta última aplicación resulta imprescindible contar con un espesor elevado que permita el registro de múltiples hologramas en un determinado volumen mediante el empleo de técnicas de multiplexado¹⁹.

En la figura 3 se observa el rendimiento en difracción obtenido en la reconstrucción de un holograma almacenado en una capa de 820 μm de espesor.

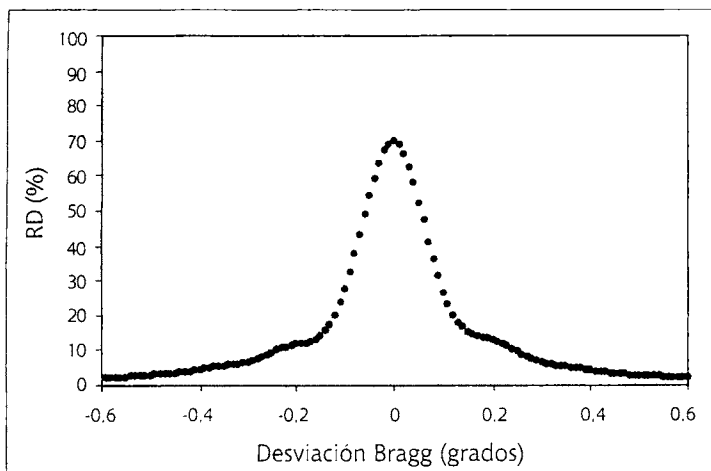


Fig. 3. Rendimiento en difracción en función del ángulo de reconstrucción

Las capas de fotopolímero en torno a 1mm, presentan inconvenientes y problemas a solucionar derivados precisamente de su elevado espesor. El hecho de que la matriz que forma el fotopolímero sea hidrófila facilita un intercambio de agua con la atmósfera, situación poco recomendable para mantener la integridad dimensional y la forma original de las capas de fotopolímero. Las deformaciones y cambios de espesor en el holograma debidos a los cambios en la humedad ambiental constituyen un serio inconveniente de este tipo de fotopolímeros.

En una capa de fotopolímero de 700 μm de espesor se han registrado hasta siete hologramas mediante multiplexado peristrófico, girando la capa de material de registro en torno a un eje paralelo a la misma, con el fin de aprovechar la alta selectividad angular que presentan los espesores de capa elevados²⁰. De esta forma

se obtiene un rendimiento en difracción individual para cada holograma del 8-20%, pudiendo reconstruirse de forma individual sin solapamiento, como se aprecia en la figura 4.

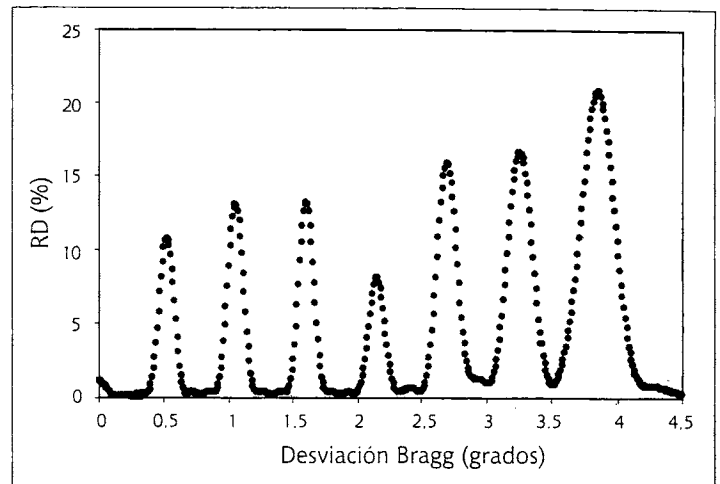


Fig. 4. Rendimiento en difracción en función del ángulo de reconstrucción.

En este caso el haz objeto y el haz de referencia almacenados durante el registro son idénticos, modulando de forma adecuada el haz objeto cada uno de los hologramas puede contener una página de datos con distinta información. Se observa en la figura 4 como la separación angular entre cada holograma se puede reducir algo más, permitiendo introducir al menos un nuevo holograma, con el consiguiente aumento en la cantidad de información almacenada en una misma memoria holográfica, evitando siempre el solapamiento entre hologramas para no impedir la recuperación de la información almacenada en cada uno de ellos²¹.

Por otra parte, este ejemplo puede mejorarse ya que existe una considerable variación entre los máximos rendimientos en difracción de cada uno de los hologramas. Un sistema de lectura de una memoria holográfica debe recibir un mínimo de luz difractado necesario para reconstruir el holograma. Si un holograma supera ese RD mínimo puede no ser un inconveniente para el sistema de lectura pero hemos utilizado parte del rango dinámico del fotopolímero en ese "exceso" de rendimiento en difracción que podría haberse utilizado en el registro de otro holograma. Así por ejemplo, en la figura 4 se observa que el último de los hologramas, con RD_{max} en torno al 20% podría haberse registrado con un menor rendimiento en difracción y así el rango dinámico disponible en el fotopolímero habría permitido que el cuarto holograma (el de

menor RDmax) alcanzara un mayor rendimiento en difracción¹⁹. Es por tanto este aspecto el que tenemos que continuar analizando tanto experimental como teóricamente.

El trabajo presentado en este artículo se ha realizado en el marco de dos proyectos de investigación uno del Ministerio de Ciencia y Tecnología, MAT2000-1361-C04-04 y otro de la Oficina de Ciencia y Tecnología de la Generalitat Valenciana, GV01-130.

Bibliografía

1. Haw M. The light fantastic. *Nature* 2003;422:556-558.
2. Lessard RA, Manivannan G. Selected Papers on Photopolymers: Physics, Chemistry and Applications 1995:SPIEMS 114.
3. Zhao G, Mourolis P. Diffusion model of hologram formation in dry photopolymers materials. *J Mod Opt* 1994;41:1929-1939.
4. Colvin VL, Larson RG, Harris AL, Schilling ML. *J Appl Physics* 1997;81:5913.
5. Lougnot DJ, Jost P, Lavielle L. Polymers for holographic recording: VI. Some Basic ideas for modelling the Kinetics of the recording process. *Pure Appl Opt* 1997;6:225-245.
6. Piazzola S, Jenkins BJ. First-harmonic diffusion model for holographic grating formation in photopolymers. *J Opt Soc Am B* 2000;17:1147-1157.
7. Miler AM, Koudela I. Recording of holographic diffraction gratings in photopolymers: theoretical modelling and real-time monitoring of grating growth. *J Mod Opt* 1998;45:1465-1477.
8. Sheridan JT, Downey M, O'Neill FT. Diffusion based model of holographic grating formation in photopolymers: generalized non-local material responses. *J Opt A*. 2001;3:477-488.
9. Blaya S, Carretero L, Madrigal RF, Ulibarrena M, Acebal F, Fimia A. Photopolymerization model for holographic gratings formation in photopolymers. *Appl Physics B* 2003;77:639-662.
10. Neipp C, Gallego S, Ortuño M, Márquez A, Álvarez M, Beléndez A, Pascual I. First harmonic diffusion based model applied to a PVA/Acrylamida based photopolymer. *J Opt Soc Am B* 2003;20:2052-2060.
11. Neipp C, Beléndez A, Sheridan JT, Kelly JV, O'Neill FT, Gallego S, Ortuño M, Pascual I. Non-local polymerization driven diffusion based model: general dependence of the polymerization rate to the exposure intensity. *Opt Express* 2003;11:1876-1886.
12. Neipp C, Sheridan JT, Gallego S, Ortuño M, Pascual I, Beléndez A. Effect of a depth attenuated refractive index profile in the angular responses of the efficiency of higher orders in volume gratings recorded in a PVA/Acrylamide photopolymer. *Opt Comm* 2004;233:311-322.
13. Neipp C, Gallego S, Ortuño M, Márquez A, Beléndez A, Pascual I. Characterization of a PVA/acrylamide photopolymer. Influence of a cross-linking monomer in the final characteristics of the hologram. *Opt Comm* 2003;224:27-34.
14. Gallego S, Neipp C, Ortuño M, Márquez A, Beléndez A, Pascual I. Diffusion based model to predict the conservation of holographic gratings recorded in PVA/Acrylamide photopolymer. *Appl Opt* 2003;42:5839-5845.
15. Gallego S, Neipp C, Ortuño M, Beléndez A, Pascual I. Stabilization of volume gratings recorded in PVA/acrylamide photopolymers with diffraction efficiencies higher than 90%. *J Mod Optics* 2004;51:491-503.
16. Neipp C, Beléndez A, Gallego S, Ortuño M, Pascual I, Sheridan JT. Angular responses of the first and second diffracted orders in transmission diffraction grating recorded on photopolymer material. *Opt Express* 2003;11:1835-1843.
17. Márquez A, Neipp C, Beléndez A, Gallego S, Ortuño M, Pascual I. Edge-enhanced imaging with polyvinyl alcohol/acrylamide photopolymer gratings. *Opt Lett* 2003;28:1510-1512.
18. Ortuño M, Gallego S, García C, Neipp C, Beléndez A, Pascual I. Optimization of a 1 mm thick PVA/acrylamide recording material to obtain holographic memories: method of preparation and holographic properties. *Appl Physics B* 2003;76:851-857.
19. Coufal HJ, Psaltis D. *Holographic Data Storage*. Sincorbox GT. Springer-Verlag, New York, 2000.
20. Ortuño M, Gallego S, García C, Neipp C, Pascual I. Holographic characteristics of a 1 mm thick photopolymer to be used in holographic memories. *Appl Opt* 2003;42:7008-7012.
21. Kogelnik H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings. *Bell Systems Technology J* 1969;48:2909.

SUMARIO

ESPECIAL ESCUELA UNIVERSITARIA DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA DE LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE

SPECIAL UNIVERSITY SCHOOL OF OPTICS AND OPTOMETRY OF THE UNIVERSITY OF ALICANTE

- 530** ACERCA DE LA ESCUELA UNIVERSITARIA DE ÓPTICA Y
OPTOMETRÍA DE LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE
*ABOUT THE UNIVERSITY SCHOOL OF OPTICS AND OPTOMETRY OF THE
UNIVERSITY OF ALICANTE*

Valentín Viqueira Pérez
*Director de la Escuela Universitaria de Óptica
Universidad de Alicante*

- 534** INVESTIGACIÓN EN ALMACENAMIENTO HOLOGRÁFICO DE
INFORMACIÓN
INVESTIGATION INTO HOLOGRAPHIC INFORMATION STORAGE

M. Ortuño et al.
*Departamento Interuniversitario de Óptica
Universidad de Alicante*

- 539** ALTERACIONES VISUALES EN LA ENFERMEDAD DE PARKINSON
VISUAL ALTERATIONS IN PARKINSON'S DISEASE

A. Angulo Jerez et al.
*Departamento Interuniversitario de Óptica
Universidad de Alicante*

- 548** CARACTERIZACIÓN PERSONALIZADA DEL OJO HUMANO POR MEDIO
DE UN MÉTODO HÍBRIDO
*PERSONALISED CHARACTERISATION OF THE HUMAN EYE USING A HYBRID
METHOD*

C. Illueca et al.
*Grupo de Óptica y Ciencias de la Visión
Departamento Interuniversitario de Óptica
Universidad de Alicante*

- 558** POLÍMEROS ORGÁNICOS PARA APLICACIONES EN
OPTOELECTRÓNICA
ORGANIC POLYMERS FOR APPLICATIONS IN OPTOELECTRONICS

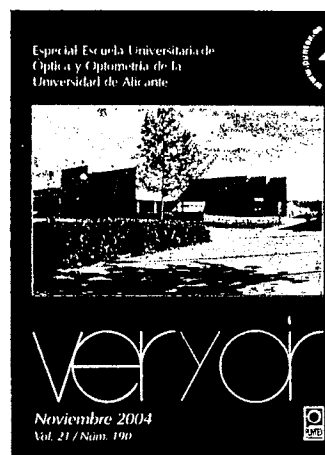
P. G. Boj et al.
*Escuela de Óptica
Universidad de Alicante*

- 566** GCV: GRUPO DE VISIÓN Y COLOR DE LA UA
GCV: GROUP OF VISION AND COLOR OF THE UA

D. de Fez Saíz et al.
*Departamento de Óptica
Universidad de Alicante*

- 571** MIRADA SOLIDARIA A CUBA: DEL ASISTENCIALISMO A LA
COOPERACIÓN
SOLIDARITY LOOK AT CUBA: FROM ASSISTANCE TO CO-OPERATION

M^a Pilar Cacho Martínez et al.
*Escuela Universitaria de Óptica
Universidad de Alicante*



*Exterior de la Escuela de Óptica y
Optometría de la Universidad de Alicante*

- 575** ENTREVISTA A CARLOS ILLUECA CONTRI,
DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO
INTERUNIVERSITARIO DE ÓPTICA DE LA
UA

*INTERVIEW WITH CARLOS ILLUECA CONTRI,
DIRECTOR OF THE INTER-UNIVERSITY
DEPARTMENT OF OPTICS OF THE UA*

- 579** PERSONALIZACIÓN DE LENTES
PROGRESIVAS: UNA NUEVA PROPUESTA
*PERSONALISATION OF PROGRESSIVE LENSES: A
NEW PROPOSAL*

Dr. Juan Carlos Dürsteler
*Director de Investigación, Desarrollo e
Investigación
Área de Lentes
INDO*

- 586** HABLA LA EMPRESA: CONÓPTICA
THE COMPANY SPEAKS: CONÓPTICA

Raúl Sanahuja