

LA OPTICA NO LINEAL, COMO PARTE DE LA INGENIERIA  
EN LA DECADA DE LOS NOVENTA

J.A. MARTIN-PEREDA  
Dpto. de Electrónica Cuántica  
ETS. Ing. Telecomunicación. U.P.M.  
Ciudad Universitaria, MADRID.

RESUMEN

En el presente artículo se analizan, desde un punto de vista expositivo, las consecuencias más significativas que la introducción de la Óptica No-lineal puede tener sobre el desarrollo de una muy amplia serie de tecnologías que, de forma habitual, han sido desarrolladas hasta el presente, por técnicas convencionales. Se presentan algunos de los desarrollos realizados por el grupo del que el autor es el titular y que parecen confirmar las anteriores perspectivas.

## I.- INTRODUCCION

La aparición del láser, al principio de la década de los sesenta significó, aunque hoy sea ya un absoluto tópico repetirlo, un completo cambio en el desarrollo de la mayor parte de los campos de la Ciencia y la Técnica. Temas como la Holografía o la Espectroscopía Raman, que ya existían bien en concepto o como método habitual de trabajo, vieron como el láser hacía de ellos algo accesible a una comunidad que antes muy raramente se acercaban a ellos. Otros, como los fenómenos no lineales, que aparecían como posibles dentro del formalismo general de las ecuaciones de Maxwell pero que no habían podido ser llevados a la práctica por falta de la herramienta adecuada, se pusieron de manifiesto a los pocos años. Finalmente, muchos otros nuevos campos se abrieron y con ellos la posibilidad de un desarrollo más amplio en tecnologías cubiertas por otras técnicas. Uno de ellos fue el de las Comunicaciones Ópticas que, de forma intuitiva se esbozó como posible a los pocos meses de la invención del láser, pero hasta la introducción de la fibra óptica en los primeros meses de 1970 no pudo llevarse a una realidad que en nuestros días se ha comprobado cierta. Temas como el del procesado de materiales, la medida de distancias y velocidades o el reconocimiento de formas han influido directamente sobre el concepto de trabajo en una gran parte de las ingenierías.

Pero lo anterior no se ha reflejado, de forma directa, sobre el bagaje científico que la mayor parte de los estudiantes de ingeniería poseen cuando acaban sus estudios. En general, la Óptica se ha seguido considerando como una rama de importancia secundaria con respecto a las otras de la Física. Y así puede verse que todo programa de Física comienza por la Mecánica, da algunos rudimentos de Termodinámica y casi concluye con el Electromagnetismo. La Óptica, si aparece, lo es al final del curso como relleno más que como parte fundamental.

Evidentemente, no es éste el lugar adecuado para iniciar un análisis de las causas que han conducido a lo anterior. La realidad actual es una y el buscar su origen es accesorio. No lo es en cambio el intentar analizar, desde un punto de vista mas o menos pragmático, cuáles pueden ser los posibles temas que en el futuro hagan dar un giro de ciento ochenta grados a la situación precedente. Y uno de ellos, quizás desde un punto de vista un tanto partidista, es el de la Optica no-lineal y todos los fenómenos con ella relacionados. Así, en el presente artículo, se expondrán una serie de temas que, desarrollados ya algunos de ellos por el grupo del que el autor del mismo es el titular, pueden contribuir a que en el futuro, la Optica deba ser parte fundamental de curriculum de todo ingeniero.

## II.- LA OPTICA COMO MEDIO Y NO COMO FIN.

Si la Optica se desea que llegue a revestir la misma importancia que otros campos de la Física tienen en nuestro país ha de adquirir la certeza de que tiene que ser mas un medio que un fin. Este concepto, evidentemente, no es nuevo pero, a pesar de ello, debe señalarse una vez mas. Y para su justificación puede ponerse a modo de ejemplo el caso de la Física de Semiconductores. Unicamente cuando, una vez descubierto el transistor, se adquirió la certeza de que los semiconductores eran útiles para algo concreto, éstos adquirieron el desarrollo espectacular que hemos presenciado en las últimas décadas. Se podrían haber estudiado muchas propiedades de compuestos de uno y otro tipo, se podrían haber desarrollado modelos que justificaran comportamientos mas o menos anómalos; pero solo con su aplicación a la realidad concreta de su uso en el campo de la Electrónica, los semiconductores adquirieron su mayoría de edad y su entrada en el sagrado recinto de los conocimientos indispensables para todo científico. La Optica, a pesar del láser y de todo lo de él derivado, esta aun falta de ese toque mágico que la convierta en necesaria. Al menos esa era la situación hace no más de una década.

El láser, como ya se ha señalado anteriormente, supuso una serie de nuevos caminos que, de otra forma, o no se hubiesen abierto o se habría avanzado por ellos muy lentamente. A su vez, la apertura de nuevos caminos obligó al desarrollo de nuevos tipos de láseres que cubrieran mejor ciertas necesidades o de nuevos conceptos que generalizaran técnicas ya acotadas. Y todo ello evolucionó de manera por completo diferente a lo que habría sido un avance por métodos de Optica tradicional. Evolucionó merced a una simbiosis casi perfecta entre el conocimiento de materiales de un tipo u otro y el de cómo interaccionaban con la radiación óptica. No era ya necesario

saber sólo Óptica, sino que también era necesario tener conocimientos de Física del Estado Sólido . No bastaba detenerse en el fotón, sino que había, en ocasiones, que llegar al átomo. Fenómenos tan conocidos por todos como los de generación de armónicos ópticos o el de pulsos ópticos ultracortos, solo han podido ser desarrollados gracias a una perfecta unión de muy diversas ramas de la Física y que, gracias a ello, en cierta forma, pueden haber quedado ahora como partes de una nueva Óptica Generalizada que las englobaría a todas. La Óptica tradicional, la Óptica que adquirió su expresión suma en la obra magistral de Born y Wolf, no es ya sino una pequeña parte de la que se prevee para el futuro.

Faltaba, para que el nuevo edificio se construyera de nuevo, la aparición del nuevo concepto que justificara su introducción en el nuevo mundo de las realidades concretas. Y ese concepto apareció con la Biestabilidad Óptica. Sería interesante reflejar aquí las palabras del prólogo del primer libro sobre Biestabilidad Óptica, el editado por C.M. Bowden et al., que ha aparecido hasta la fecha. En él, entre otras cosas, se dice lo siguiente: "En las pasadas dos décadas hemos sido testigos de dos innovaciones fundamentales en la Ciencia que han tenido un considerable impacto sobre la Tecnología y sobre la propia Ciencia, un impacto tan enorme que, de hecho han modificado muchos aspectos de la vida cotidiana. Nos referimos, evidentemente, al transistor y al láser. Es sorprendente que, ahora, con la introducción de la biestabilidad óptica, se ha abierto la puerta a un nuevo campo que combina a los dos anteriores, al transistor y al láser, y que ofrece unas posibilidades casi sin límites para el desarrollo de nuevos y fundamentales dispositivos". El párrafo es lo suficientemente explícito como para hacer innecesaria ninguna puntualización posterior. Parece así, como conclusión de lo anterior, que el hecho básico para introducir la nueva Óptica en la vida cotidiana, como dice Bowden, ha hecho ya su aparición y no es otro que la Biestabilidad Óptica derivada de los fenómenos no lineales en materiales interaccionando con radiaciones ópticas.

### III.- BIESTABILIDAD OPTICA Y COMUNICACIONES OPTICAS

Si se toma como punto básico para el posible desarrollo de una Ciencia el de su posible utilización en un campo de aplicación práctica, pocos habrá que posean un mayor atractivo, con vistas al futuro, que el de la Comunicaciones Ópticas. Las necesidades de intercambio de información a muy altas velocidades así como el aumento exponencial de requisitos ha hecho que todos los países dediquen parte de su presupuesto de investigación a este campo. Diferentes tipos de fibras ópticas, de emisores y de receptores han hecho su introducción en el mercado, al mismo nivel que otros componentes tan convencionales como pueden ser las resistencias o los condensadores. Pero un hecho queda aun sin modificar, con respecto a la situación previa. Es el de que la filosofía que gobierna las transmisiones ópticas sigue siendo la misma que la que se tiene para el resto de las comunicaciones convencionales. De hecho, el nombre de Comunicaciones Ópticas es solo parcialmente exacto, ya que la Óptica solo ha hecho su entrada en escena a través del medio transmisor. La radiación óptica solo interviene desde el momento en que es generada por el láser o por el LED hasta que es recibida por el fotodetector. Todos los pasos anteriores y posteriores se realizan de una manera por completo convencional, esto es, de forma análoga a como se ha venido haciendo para comunicaciones por radio o por microondas, por ejemplo. La Electrónica, como tal, sigue siendo la principal fuente de imposición de condiciones. La radiación óptica es, tan solo, un mero auxiliar de aquella. En función de ello, muchas de las ventajas que posee la luz como portadora de información quedan ocultas. La velocidad, por ejemplo, la limita el circuito electrónico que recibe o genera la radiación luminosa. Algo similar podría decirse del número de canales. El nombre de Comunicaciones Ópticas es, así, inexacto. El nombre mas adecuado sería Comunicaciones Electroópticas. Pero su atractivo sería, sin duda, menor.

¿Cuál es la solución?. La solución debería ser que la mayor parte de los procesos que se desarrollasen en Comunicaciones Ópticas tuvieran como única protagonista a la luz. Que la luz, mediante interacciones con la materia fuera capaz de modularse, de regenerarse, de influir sobre otra radiación óptica. La solución es, en suma, el empleo de dispositivos biestables ópticos como elementos básicos de las Comunicaciones Ópticas. Y este empleo parece, de acuerdo con todos los pronósticos, factible.

No entra dentro de la idea del presente trabajo, la exposición detallada de cuál es el fundamento de los biestables ópticos. Existen ya en la literatura una serie de muy buenas referencias que presentan de forma sistemática cuáles son sus bases y cuáles sus diferentes configuraciones. Al final se presentan algunas de estas referencias que, en modo alguno, pretende ser exhaustivas. El repetir aquí lo expuesto allí no sería sino una forma de duplicar información y contribuir a la proliferación inútil de resultados idénticos. Solo parece necesario insistir en, a la vista de los artículos publicados, cuáles son las principales aplicaciones. De una forma sintética, éstas pueden resumirse en las siguientes:

- 1) Memorias ópticas
- 2) Conformadores de pulsos
- 3) Amplificadores diferenciales
- 4) Elementos para lógicas ópticas
- 5) Convertidores analógico-digitales
- 6) Triodos ópticos
- 7) Limitadores ópticos
- 8) Recortadores ópticos
- 9) Moduladores ultralíneales
- 10) Convertidores de radiación continua láser en pulsada (oscilaciones regenerativas).

Como puede apreciarse de esta relación, que por otra parte no queda cerrada con los apartados expuestos, la mayor parte de las funciones ofrecidas son de aplicación directa en Co-

municaciones Ópticas. Si las mismas se llevasen a cabo de forma efectiva, es seguro que su filosofía sufriese un cambio drástico. Quizás con ese fin, la mayor parte de los laboratorios de todo el mundo, tanto de universidades como de industrias privadas o públicas, están invirtiendo una gran parte de sus recursos, tanto humanos como de medios, en este campo. En el siguiente apartado se expondrá de una manera esquemática, parte de las realizaciones del Laboratorio de Electrónica Cuántica de la ETSIT de la UPM en este terreno.



#### IV.- BIESTABILIDAD OPTICA; OPTICA NO LINEAL Y CRISTALES LIQUIDOS.

La actividad principal del Laboratorio de Electrónica Cuántica de la ETSIT de la UPM se ha centrado esencialmente, en los últimos años, en intentar encontrar aplicación para los cristales líquidos dentro del campo de las Comunicaciones Ópticas. Evidentemente, los cristales líquidos no son un medio idóneo para este fin, ya que las velocidades inherentes al propio material son lo suficientemente pequeñas como para que cualquier aplicación práctica lo elimine inmediatamente. Pero en cambio, desde un punto de vista académico, los cristales líquidos ofrecen muchas más ventajas que cualquier otro material clásico. Entre éstas pueden señalarse el que son notoriamente más complejos que los materiales cristalinos, lo que permite la obtención de fenómenos más amplios. Igualmente, el número de grupos trabajando con ellos es mucho más reducido que con el resto, lo que facilita la obtención de resultados no reportados previamente.

En base a lo anterior, durante un par de años el interés se centró en la obtención de moduladores y deflectores para radiación láser y que, al menos parcialmente, tuvieran una cierta aplicación en Comunicaciones. Los resultados fueron publicados en diversas revistas pero su velocidad baja, los limitaba considerablemente. Un estudio casi exhaustivo del tema se encuentra en la Tesis Doctoral presentada por el Dr. Muriel. Esta Tesis constituye uno de los trabajos más completos que se han realizado hasta la fecha en este tema. La base del trabajo se centra en el empleo de estructuras en forma de cuña, con electrodos transparentes en sus caras internas, y que mediante campos eléctricos aplicados al cristal líquido nemático que se encuentra en su interior, es capaz de deflectar un haz láser una cantidad proporcional al ángulo de la cuña y a la anisotropía dieléctrica del cristal líquido. Los ángulos obtenidos no fueron superiores a los  $3^\circ$  y la máxima velocidad de modulación alcanzó los 25 kHz.

Los fenómenos no lineales que se encontraron dieron la base como para que se el siguiente paso fuese intentar la obten-

ción de biestabilidad óptica.

El resultado fué favorable casi desde el primer momento. La configuración empleada fué similar a las propuestas por los grupos de E. Garmire y de P. Smith para biestables ópticos híbridos. En nuestro caso, el material no lineal empleado fué una célula torsionada de cristal líquido nemático con un realimentación electrónica convencional. Los tiempos de respuesta obtenidos fueron los habituales para este tipo de materiales, esto es del orden de entre 0,1 y 1 mseg. Por el contrario, un simple láser de He-Ne, de potencia inferior a los 5 mw, fué suficiente para conseguir el fenómeno.

Pero no es solo biestabilidad óptica clásica el fenómeno que se obtuvo. Según puede verse en las referencias del tema, bajo ciertas condiciones en la situación de la célula de cristal líquido con respecto a la radiación incidente, se pueden obtener situaciones de oscilación regenerativa e incluso de cuasicaos. Estos resultados, conjuntamente con la teoría que los justifica, serán publicados próximamente por nosotros.

Quedaba un hecho básico que tratar. Era el de que hasta aquí, la electrónica todavía intervenía en el sistema. Y de acuerdo con los postulados planteados en los anteriores apartados, esta electrónica debería ser suprimida. Con este propósito se iniciaron experiencias de modulación opto-óptica por la cual una radiación láser, interaccionando con un material no lineal, en nuestro caso cristal líquido, podría modular a otro haz láser. Los resultados se encuentran en la Tesis Doctoral presentada por el Dr. López Hernández y que han sido publicados recientemente en Optics Letters. Allí puede verse que si un haz láser, modulado en intensidad mediante un troceador convencional, atraviesa un célula homeotrópica de cristal líquido nemático del tipo MBBA, la interacción entre estos dos origina

un fenómeno de automodulación que puede ser aprovechado para modular a otro haz láser continuo que atraviese la misma zona. En nuestro <sup>Caso</sup> el láser modulador fué uno de Ar , de potencia no superior a los 20 mw., y el modulado uno de He-Ne de 5 mw. La máxima velocidad de modulación reportada ha sido de alrededor de 1500 pps., aunque posteriores realizaciones han aumentado en cierta forma este valor.

## V.- CONCLUSIONES

De lo expuesto hasta aquí, y como puede inferirse fácilmente, el camino que se esbozaba el inicio del presente trabajo, parece factible. Los resultados obtenidos por nuestro grupo no son sino un muy pequeño reflejo de lo que, con otros materiales están obteniendo otros grupos de mucha mayor entidad. Las posibilidades de obtener oscilaciones a partir de un haz láser continuo, la factibilidad de regenerar una señal óptica inmersa en ruido y, sobre todo, el poder realizar de forma efectiva transistores (o triodos) ópticos hace que, en el futuro, sea necesario contar con la óptica no lineal para el desarrollo de cualquier sistema de Comunicaciones Ópticas, si se quiere que éste sea realmente óptico. Y esto, que en el presente trabajo se ha centrado en las Comunicaciones, puede extenderse, sin ningún problema al de los Ordenadores o al del Procesado de Señales y al del de Reconocimiento de Formas. Queda aun mucho camino por andar, pero los primeros pasos ya están dados.

## BIBLIOGRAFIA

### a) Artículos de revisión

- a.1) H.M.Gibbs et al., Optics News, Summer, 6-12 (1979)
- a.2) E. Garmire et Al., Opt. Eng. 18 (2), 194-7 (1979)
- a.3) P.W. Smith, Opt. Eng. 19 (4), 456-62 (1980)
- a.4) P.W. Smith et al., IEEE Spectrum, 6, 26-33 (1981)
- a.5) J.A. Martín-Pereda et al., Mundo Electrónico, 9, 139-45 (1981)
- a.6) E.Abraham et al., Rep.Prog.Phys. 45, 815-85 (1982).

### b) Artículos de biestabilidad óptica con cristales líquidos

- b.1) R.A.Athale et al., Appl. Opt., 20, 1424 (1981)
- b.2) Z.Hong-Jun et al., Opt. Comm.,38, 31 (1981)
- b.3) J.A. Martín-Pereda et al., Appl.Phys. B 28, 138 (1982)
- b.4) J.A.Martín-Pereda et al., JOSA, 71, 1640 (1981)

### c) Artículos de fenómenos no lineales con cristales líquidos (en Optica).

- c.1) J.A. Martín-Pereda et al., Opt. Lett., 5, 494 (1980)
- c.2) J.A. Martín-Pereda et al., Opt. Lett., 7, 590 (1982).