

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERS DE TELECOMUNICACIÓ (UPC)**

**PROPAGACION DE ONDAS
MONOCROMATICAS EN GUIAONDAS
DIELECTRICAS PLANAS FORMADAS POR
MEDIOS NO LINEALES TIPO KERR:
APLICACION AL DISEÑO DE
DISPOSITIVOS LOGICOS**

Autor: V. Federico Dios Otín
Director: Fernando Canal Bienzobas

Barcelona, enero 1992

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERS DE TELECOMUNICACIÓ (UPC)**

**PROPAGACION DE ONDAS
MONOCROMATICAS EN GUIAONDAS
DIELECTRICAS PLANAS FORMADAS POR
MEDIOS NO LINEALES TIPO KERR:
APLICACION AL DISEÑO DE
DISPOSITIVOS LOGICOS**

Autor: V. Federico Dios Otín
Director: Fernando Canal Bienzobas

Barcelona, enero 1992

INTRODUCCION	6
CAPITULO 1: ELECTROMAGNETISMO EN MEDIOS DIELECTRICOS NO LINEALES.	14
1.1 Caracterización de los medios dieléctricos	14
1.1.1 Modelo microscópico	14
1.1.2 Modelo macroscópico	15
1.2 Relaciones entre el vector polarización y el campo eléctrico local	16
1.3 Desarrollo del vector polarización. Efectos no lineales	18
1.3.1 Término lineal de la polarización	19
1.3.2 Términos no lineales	20
1.4 Efectos no lineales relacionados con $\chi^{(3)}$	22
1.5 Ecuación de onda no lineal	23
1.6 Mecanismos físicos asociados a $\chi^{(3)}$	24
1.6.1 Semiconductores	25
1.6.2 Cristales fotorrefractivos	26
1.6.3 Cristales líquidos	26
1.6.4 Materiales orgánicos	27
CAPITULO 2 : PROPAGACION LUMINOSA EN GUIAS DIELECTRICAS NO LINEALES	31
2.1 Introducción	31
2.2 Método de propagación del haz	34
2.2.1 Propagación en medios dieléctricos inhomogéneos	34
2.2.2 Extensión del BPM a medios no lineales	39
2.3 Aplicabilidad del método de propagación del haz	40
2.3.1 Condiciones de aplicabilidad	41
2.3.2 Aplicabilidad en problemas no lineales	42
2.4 Aplicaciones del método de propagación del haz a dispositivos no lineales	47

CAPITULO 3: MODOS PROPIOS EN GUIAS DELECTRICAS NO LINEALES	50
3.1 Permitividad dieléctrica no lineal	50
3.1.1 Modos TE	53
3.1.2 Modos TM	53
3.2 Modos propios en guías dieléctricas lineales	56
3.3 Modos propios no lineales	58
3.3.1 Modos guiados	58
3.3.2 Modos de radiación	66
3.4 Método autoconsistente de búsqueda de los modos propios	67
3.4.1 Justificación del método numérico de autoconsistencia	67
3.4.2 Descripción del procedimiento iterativo	68
3.4.3 Convergencia del método	72
3.5 Ejemplo de aplicación del método de búsqueda autoconsistente. Tiempos de cálculo.	77
CAPITULO 4: INTERACCION MODAL EN GUIAS DIELECTRICAS NO LINEALES.	
ESTUDIO DEL ACOPLADOR DIRECCIONAL NO LINEAL	84
4.1 Introducción	84
4.2 Acoplo de dos modos	85
4.2.1 Planteamiento del método	85
4.2.2 Comportamiento del acoplador	89
4.2.3 Potencia crítica	92
4.3 Validez del modelo de dos modos	95
4.3.1 Modos propios no lineales. Re-elaboración del modelo	96
4.3.2 Valoración del modelo de modos no lineales	100
4.3.3 Límites de aplicabilidad. Comportamiento anómalo del acoplador	104
4.4 Parámetros característicos del acoplador	108
4.4.1 Periodo de acoplo	108
4.4.2 Tasa de intercambio	109
4.4.3 Potencia media en cada rama	110
4.5 Conclusiones	112

CAPITULO 5 : APLICACION AL DISEÑO DE DISPOSITIVOS LOGICOS	116
5.1 Introducción	116
5.2 Consideraciones acerca de los sistemas de procesado óptico digital	117
5.3 Puertas lógicas ópticas	118
5.3.1 Características generales de las puertas	118
5.3.2 Condiciones de trabajo de la puerta lógica	121
5.3.3 Módulo de interconexión óptico	124
5.4 Utilización del acoplador direccional no lineal como puerta lógica	128
5.4.1 Esquemas de operación	128
5.4.2 Tipos de excitación en el NLDC	131
5.4.3 Evaluación de las características de la puerta	138
5.5 Consideraciones finales	139
5.6 Conclusiones	140
CAPITULO 6: CONCLUSIONES	144
ANEXO A: Resolución de la ecuación característica del NLDC	153
ANEXO B: Potencia en cada rama del NLDC	157

INTRODUCCION

La posibilidad de aplicar los efectos ópticos no lineales al procesado de información y a las comunicaciones ha atraído, en los últimos años, a un gran número de investigadores. Son numerosas las constataciones experimentales de algunas de las nuevas aplicaciones que podrían ser realidad en un futuro próximo, y que se basan en la utilización de los efectos asociados a los tensores de susceptibilidad χ^2 y χ^3 en los medios no lineales, tales como la generación del segundo armónico (amplificación y oscilación paramétrica) asociado a χ^2 , o el efecto Kerr, generación del tercer armónico, conjugación de fase, procesos de mezclado de ondas y radiaciones Raman o Brillouin, asociados a χ^3 [1].

Las áreas tecnológicas en las que se ha previsto que los dispositivos no lineales podrían tener un fuerte impacto son básicamente tres [2]:

- i) la computación óptica digital
- ii) las redes neuronales ópticas
- iii) la conmutación óptica

La primera de ellas persigue la obtención de sistemas capaces de tratar la información óptica en forma digital, a través de elementos lógicos ultra-rápidos susceptibles de actuar consecutivamente (cascadibilidad), y que normalmente adoptarían una configuración en tubería (*pipe-line*); el procesado óptico por redes neuronales es fundamentalmente una super-computación, analógica o digital, con la que se busca el tratamiento de elevadas cantidades de información merced a un alto grado de paralelismo, y que podría encontrar una de sus mejores aplicaciones en el terreno de la inteligencia artificial. La conmutación óptica se inscribe en el área de las comunicaciones, donde los dispositivos ópticos realizarían funciones de encaminamiento y multiplexación de las señales de información. Esta no es una clasificación cerrada y admite matizaciones, pero proporciona un marco de referencia adecuado para seguir las investigaciones actuales en esta materia [3].

Las prestaciones que, idealmente, podrían derivarse de los futuros sistemas ópticos, se resumen básicamente en la elevada velocidad de operación, en la importante cantidad de información que podría manejarse y en su flexibilidad a la hora de establecer interconexiones entre los diferentes elementos, características todas ellas en las que la micro-electrónica parece haber llegado muy cerca de sus límites tecnológicos. Es cierto que, a pesar de las dificultades que existen, derivadas de la complejidad intrínseca de los mismos fenómenos ópticos no lineales, se han realizado avances importantes en los últimos años. Hasta la fecha las limitaciones prácticas provienen de la falta de materiales con el suficiente grado de no linealidad, y, a la vez, con las necesarias propiedades de transparencia e insensibilidad térmica [4]. Muchas de las aplicaciones de interés se han experimentado con fuentes laser de alta potencia, en régimen pulsado, y también en fibras ópticas, donde se dispone de largas longitudes de interacción con el medio no lineal, y de materiales con interesantes propiedades, en especial por su muy baja absorción [5].

Existen dos posibles estrategias en el diseño de los sistemas ópticos:

a) La primera de ellas emplea las señales luminosas propagándose en el espacio libre, y el tratamiento de las mismas se realiza mediante espejos, lentes y elementos holográficos bidimensionales de propósito especial. El formato característico de los dispositivos no lineales en esta configuración es el de una lámina delgada crecida sobre un substrato que los haces luminosos atraviesan perpendicularmente. Los problemas más importantes de esta opción radican en el elevado consumo de potencia que se precisa para estimular adecuadamente la respuesta no lineal. Además la miniaturización de los dispositivos tiene un límite cercano, debido a los problemas de focalización de los haces luminosos [6].

b) La solución alternativa es utilizar elementos ópticos en forma de guías de onda. Pueden conseguirse entonces elevadas intensidades con cantidades de potencia moderadas, puesto que se concentra la señal en secciones extraordinariamente reducidas. El precio que deberá pagarse es, sin duda, la pérdida, o cuando menos la disminución, del paralelismo en la transmisión y en el procesado de las señales. Aquí, el efecto no lineal que más extensamente ha sido investigado es el efecto Kerr, de variación de la permitividad con la densidad de potencia.

Los dispositivos ópticos no lineales basados en guíaondas dieléctricas pueden clasificarse en dos grandes grupos, de acuerdo con el modo de operación. Por un lado se han ensayado geometrías en las que la propagación es unidireccional, y donde los efectos no lineales se ponen de manifiesto a través de la conversión de potencia entre diferentes modos de propagación en la guía, o entre diferentes polarizaciones. Por otro lado es posible incluir efectos de realimentación situando el medio no lineal en una cavidad resonante, o mediante una geometría de realimentación distribuida. De esta forma se obtiene histéresis óptica (biestabilidad).

Hasta la fecha los dispositivos ópticos biestables han mostrado que pueden proporcionar curvas de transmisión adecuadas para realizar ópticamente las diferentes funciones lógicas [7,8]. El principal inconveniente radica en que el tiempo necesario para obtener el comportamiento biestable es elevado. Por otra parte los márgenes de tolerancia que permiten - y este es un problema general de casi todos los dispositivos ópticos - suelen ser muy estrechos.

Todavía se puede hablar de un tercer modo de operación, en el que se hace uso de la generación y emisión de solitones a través del medio no lineal, para realizar la conmutación óptica, o como portadores de información mediante fibras, donde se han descubierto interesantes propiedades [9,10].

Entre los dispositivos integrados no biestables deben mencionarse el acoplador direccional no lineal (NLDC), el interferómetro Mach-Zehnder no lineal, el conversor modal por red de difracción (*grating*), y las uniones ópticas no lineales [11]. A pesar de que existe ya un apreciable volumen de bibliografía acerca de estos dispositivos, y de los estudios que se siguen realizando para evaluar sus prestaciones y optimizarlas, es cierto que en muchos casos no se tiene todavía una visión razonablemente cerrada de su comportamiento. El motivo es obviamente la misma no linealidad, que, a la vez que los convierte en especialmente atractivos, dificulta de forma considerable el tratamiento matemático. Gran parte de los estudios realizados no son sino constataciones numéricas de algunas de sus propiedades.

En este trabajo se han puesto a punto varias herramientas para proceder al análisis de dispositivos ópticos no lineales (no biestables), realizados sobre guías de onda. La complejidad del estudio de tales dispositivos fuerza a disponer de un método

numérico de simulación, que permita contrastar los resultados que se obtengan con otros modelos analíticos, y estimar así su margen de validez. La elección del método de propagación del haz (BPM) es casi forzada en nuestro caso, debido a que es un método sumamente versátil, rápido, y que se ha venido utilizando ampliamente en estos últimos años con buenos resultados.

Se ha realizado un estudio acerca de los modos propios en guías no lineales. A pesar de que el principio de superposición no es aplicable se demuestra que un conocimiento previo de las características de los modos propios en este tipo de guías puede ser imprescindible a la hora de interpretar correctamente el comportamiento del dispositivo en situaciones más complicadas.

El estudio se ha centrado en el acoplador direccional no lineal. Se perseguía un doble objetivo: por un lado conseguir una visión completa del comportamiento del dispositivo en función de las condiciones de excitación, y, por otro, definir una aplicación realista de dicho dispositivo en el terreno de la conmutación óptica.

El acoplador direccional no lineal fue propuesto por S.M.Jensen [12]: consiste en dos guías paralelas inmersas en un medio no lineal (tipo Kerr), de modo que el intercambio de potencia entre ambas pasa a ser una función de la potencia total inyectada. El propio Jensen realizó un primer estudio analítico mediante la teoría de modos acoplados, y sugirió una posible aplicación del dispositivo como puerta lógica. Posteriormente se han realizado otros análisis: se aplicó el método de propagación del haz para el estudio de un NLDC donde las dos ramas tienen diferente signo en su no linealidad [13]; se constató la aparición de inestabilidades en función del tipo de excitación inicial, en guías planas [14], y también en fibras, donde intervienen diferentes polarizaciones [15,16]; se analizaron las variaciones en la respuesta del dispositivo como consecuencia de emplear medios materiales reales, los cuales presentan efectos de saturación de la no linealidad [17], pérdidas [18], o tienen una respuesta no completamente local [19], o no instantánea [20]. Otros estudios han buscado mejorar la aplicabilidad de la teoría de modos acoplados, en especial cuando las ramas del acoplador están próximas en términos de longitudes de onda [21,22]. Como se ha comentado el objetivo que se propuso aquí fue el de investigar el comportamiento general del acoplador en función de las condiciones de excitación. Ello debe proporcionar las herramientas necesarias para proceder al diseño de un conmutador óptico, o al menos para plantear la estrategia de trabajo más adecuada. Sólo muy recientemente han aparecido en la literatura intentos de sistematizar el

comportamiento del acoplador en las condiciones más generales: el trabajo de Pham y Binh se centra en los posibles modos de operación con el NLDC, excitando de forma adecuada ambas ramas [23]; Snyder et al. analizan con más detalle los tipos de comportamiento que pueden obtenerse alterando la simetría del dispositivo [24]. Ambos proponen un método gráfico de representación de las características del dispositivo.

Paralelamente se han propuesto en los últimos años esquemas para el funcionamiento del NLDC como puerta lógica [25,26]. Se echa de menos sin embargo una definición más rigurosa de las especificaciones que tal dispositivo debería cumplir. En este trabajo se propone la utilización del NLDC como puerta lógica elemental para la realización de un módulo de interconexión óptico 2×2 .

Esta memoria comienza con tres capítulos de carácter más general, en los que se presentan los efectos no lineales en la formulación clásica de Campos y donde se desarrollan los métodos de simulación numérica y de cálculo de modos propios que se emplearán. Los capítulos siguientes se dedican al análisis del acoplador y a la descripción de la aplicación propuesta. Las referencias bibliográficas se han distribuido al final de los diferentes capítulos. Debido a la variedad de temas que aparecen, y a que son susceptibles de ser tratados con muy variados enfoques, no es posible dar una lista completa de referencias. Se ha procurado al menos recoger las más representativas en cada caso.

Quiero expresar mi agradecimiento a todos cuantos han hecho posible este trabajo: a Sergi Benlloch y a Xavier Nogúes, por su inestimable ayuda en la puesta a punto de los programas de simulación; a Lluís Torner, por las largas y sugerentes conversaciones que hemos mantenido sobre algunos de los temas aquí recogidos, y a Fernando Canal, por su constante estímulo durante la realización de esta Tesis.

REFERENCIAS

- [1] A.Yariv. "Quantum Electronics" (3ª ed.). John Wiley & sons. New York 1988. Algunas aplicaciones de dichos efectos aparecen en G.I.Stegeman, C.T.Seaton. *J. Appl. Phys.* **58** (1985) R57.
- [2] H.M.Gibbs, G. Khitrova, N.Peyghambarian (eds). "Nonlinear photonics" Springer-Verlag, Berlin 1989.
- [3] Bastantes de los artículos más representativos sobre las dos primeras áreas citadas aparecen recogidos por H.J.Caulfield, G.Ghenn en "Selected papers on Optical Computing". SPIE Milestone series vol. 1142. Washington 1989. Para una visión más general, en las que se incluyen otras modernas aplicaciones cfr. I.Andonovic, D.Uttamchandani, "Principles of modern optical systems". Artech House, Norwood (MA) 1989.
- [4] Consúltese por ejemplo M.H.Lyons (ed.) "Materials for Non-Linear and Electro-Optics". Institute of Physics Conference series nº 103. Institute of Physics, Bristol - New York 1989.
- [5] S.R.Friberg, P.W.Smith. *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-23** (1987) 2089.
- [6] J.L.Jewell, A.Scherer, S.L.McCall, A.C.Gossard, J.H.English. *Appl. Phys. Lett.* **51** (1987) 94.
- [7] H.M.Gibbs "Optical Bistability: controlling light with light". Academic Press, Orlando 1985.
- [8] Cfr. C.Flytanis, J.L.Oudar (eds.) "Nonlinear optics: materials and devices". Springer-Verlag, Berlin 1985 (Sección 4ª).
- [9] M.Lakshmanan (ed.) "Solitons, introduction and applications". Springer-Verlag, Berlín 1987.

- [10] J.V.Moloney, A.C.Newell. *Physica D* **44** (1990) 1.
- [11] G.I.Stegeman, E.M.Wright, N.Finlayson, R.Zanoni, C.T.Seaton. *J. Lightwave Technol.* **6** (1988) 953.
- [12] S.M.Jensen. *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-18** (1982) 1580.
- [13] L.Thylen, E.M.Wright, G.I.Stegeman, C.T.Seaton, J.V.Moloney. *Opt. Lett.* **11** (1986) 739.
- [14] S.Wabnitz, E.M.Wright, C.T.Seaton, G.I.Stegeman. *Appl. Phys. Lett.* **49** (1986) 739.
- [15] S.Trillo, S.Wabnitz. *J. Opt. Soc. Am. B* **5** (1988) 483.
- [16] Y.Chen, A.W.Snyder. *Opt. Lett.* **14** (1989) 1237.
- [17] E.Caglioti, S.Trillo, S.Wabnitz, B.Daino, G.I.Stegeman. *Appl. Phys. Lett.* **51** (1987) 293.
- [18] G.I.Stegeman, C.T.Seaton, C.N.Ironside, T.Cullen, A.C.Walker. *Appl. Phys. Lett.* **50** (1987) 1035.
- [19] E.M.Wright, D.R.Heatley, G.I.Stegeman. *Optics Commun.* **73** (1989) 385.
- [20] N.Finlayson, W.C.Banyai, E.M.Wright, C.T.Seaton, G.I.Stegeman, T.J.Cullen, C.N.Ironside. *Appl. Phys. Lett.* **53** (1988) 1144.
- [21] Y.Chen. *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-25** (1989) 2149.
- [22] X.J.Meng, N.Okamoto. *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-27** (1991) 1175.
- [23] A.T.Pham, L.Nguyen Binh. *J. Opt. Soc. Am. B* **8** (1991) 1914.

[24] A.W.Snyder, D.J.Mitchell, L.Poladian, D.R.Rowland, Y.Chen. *J. Opt. Soc. Am. B* **8** (1991) 2102.

[25] D.R.Rowland. *J. Lightwave Technol.* **9** (1991) 1074.

[26] C.C.Yang. *Opt. Lett.* **16** (1991) 1641.