

**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

Capítulo 6 : Conclusiones

En este trabajo se han tratado algunos tópicos relevantes relacionados con la propagación monocromática en guíasondas dieléctricas en las que intervienen medios no lineales tipo Kerr. En el capítulo primero se derivaron las expresiones habituales del vector polarización a partir de la teoría clásica de campos aplicada a los medios materiales, se presentaron algunos de los efectos no lineales de mayor interés y se hizo un resumen de los mecanismos físicos implicados en la aparición de dichos efectos en algunos de los materiales más representativos.

El capítulo segundo trató del método de propagación del haz (*Beam Propagation Method*), y de su aplicabilidad en problemas de óptica integrada. Se justificó la extensión de esta técnica a los problemas de propagación en medios no lineales. Hoy por hoy este método de simulación se ha convertido en una herramienta insustituible para el análisis de las diversas geometrías en las que intervienen medios con permitividad dependiente de la potencia luminosa, debido a su versatilidad, a su velocidad de cálculo y al grado de exactitud de los resultados que proporciona. Su misma naturaleza numérica no permite, sin embargo, proceder al diseño de dispositivos ópticos no lineales. Es posible simular el comportamiento de un dispositivo no lineal frente a una determinada excitación, pero no nos da elementos de juicio para predecir lo que ocurrirá si alteramos la excitación inicial, o alguno de las características de su estructura.

La investigación analítica de la propagación guiada en medios no lineales se comenzó con el estudio de las soluciones más sencillas (*modos propios* no lineales). Se obtuvo la forma del campo eléctrico y las ecuaciones de dispersión para la guía tricapa simétrica, en la que la capa guiante (film) está constituida por un medio no lineal tipo Kerr autofocalizante. Como no es posible resolver de forma analítica la ecuación de onda para otros casos de interés, se desarrolló un método numérico de cálculo de modos propios, basado en la simulación paso a paso del proceso de variación de la

permitividad con la densidad de potencia luminosa. Se ha comprobado que esta técnica, que se implementó mediante la aproximación multicapa y la técnica de la matriz característica, puede ser utilizada con perfiles de índice de refracción arbitrarios, y con independencia de la ley que expresa la variación no lineal de la permitividad, incluyendo por tanto posibles efectos de saturación en el medio no lineal. Este método se empleó posteriormente para la obtención de los modos propios en estructuras de cinco capas en las que algunas de ellas presentan no linealidad tipo Kerr.

En el capítulo cuarto se trató del problema del intercambio de potencia entre dos guías paralelas, en las que aparecen medios tipo Kerr (acoplador direccional no lineal). Se siguió inicialmente el desarrollo de la técnica de acoplo entre super-modos lineales, propuesta por Y. Silberberg. Un primer resultado fue la obtención de la potencia crítica del dispositivo a partir de la constante de integración de la ecuación que rige su comportamiento. El interés de esa expresión radica en que se obtiene inmediatamente, sin necesidad de resolver la ecuación diferencial, y que proporciona el resultado en función de parámetros propios de la estructura (lineal) de cinco capas, y de las condiciones de excitación. Posteriormente se comentaron las limitaciones de la técnica de acoplo entre super-modos lineales, y se propuso su re-elaboración tomando como base de la propagación los super-modos no lineales del dispositivo. La comparación de los resultados que proporcionan ambas técnicas, junto a los obtenidas por simulación numérica, muestra que los super-modos no lineales permiten una mejor aproximación. Especial relevancia tiene la determinación de los límites de comportamiento predecible del acoplador: se comprobó numéricamente que existen puntos de excitación que llevan al acoplador a un régimen irregular, y que tales puntos pueden ser obtenidos con aquella técnica de análisis. Por último se propuso un conjunto de tres parámetros característicos (dependientes de la potencia total y de las condiciones de excitación), con los que se obtiene una visión de conjunto del comportamiento del NLDC.

En el capítulo anterior se presentaron algunos de los esquemas de operación posibles con el NLDC para su utilización como dispositivo lógico. Ha quedado probado que es posible predecir el comportamiento del dispositivo a partir de las curvas de potencia crítica, que se expresan en función de las condiciones de excitación (plano de excitación).

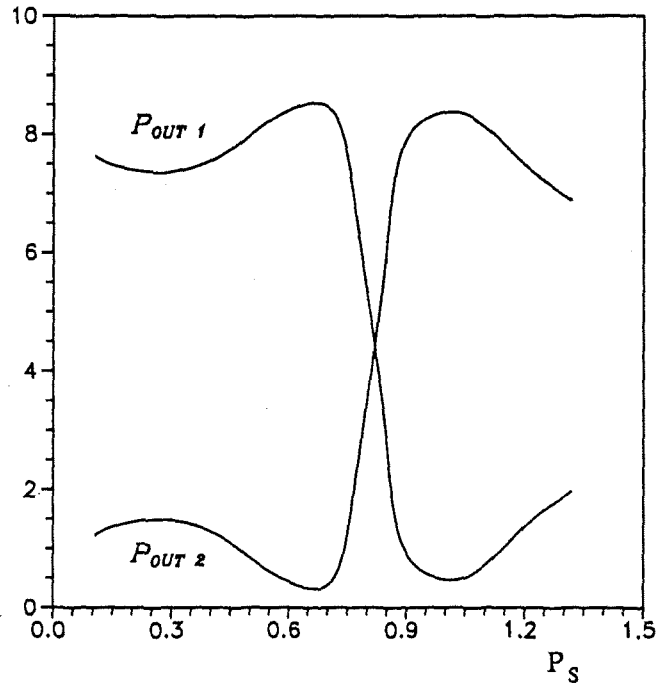
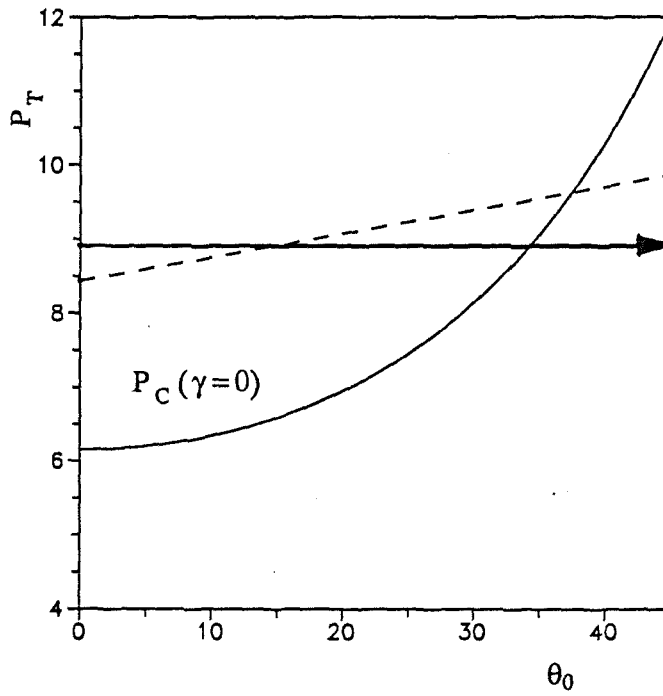
Se prestó especial atención al estudio de las características computacionales de las puertas lógicas, a fin de establecer especificaciones realistas para los dispositivos. Se tomó la propuesta de A. Huang para la realización de un módulo programable de interconexión óptico, y se mostró cómo el esquema de operación propuesto con el NLDC flexibiliza las especificaciones de las puertas y permite reducir a la mitad el número de elementos necesarios para su realización.

A fin de elaborar un proceso eficaz de diseño debe avanzarse todavía en la comprensión del fenómeno de la conversión modal en guías no lineales. Se hace necesario elaborar estrategias a diferentes niveles. Procediendo de lo más concreto a lo más general serían:

- a) Elección del esquema óptimo de operación y del punto de polarización.
- b) Elección de los parámetros de la estructura.
- c) Estudio de las limitaciones inherentes al empleo de materiales reales.
- d) Investigación en geometrías alternativas.

- a) Elección del esquema de operación y del punto de polarización

Existen, a priori, muchos esquemas posibles de utilización del NLDC. En el capítulo anterior se mostraron algunos de ellos. Para cada aplicación del acoplador debe realizarse un estudio sobre la mejor posibilidad y sobre su viabilidad práctica. Ciñéndonos a la aplicación que aquí se ha propuesto, como puerta lógica AND, el esquema de polarización en régimen supercrítico, y control con una señal de pequeña potencia desfasada en $\pi/2$ parece una buena opción. A modo de ejemplo, cabría todavía un refinamiento, para intentar conseguir una ventana de conmutación más estrecha, tal como se muestra en la figura 6.1: la línea punteada sobre el plano de excitación corresponde a la opción primera, en donde la potencia total crece con la intensidad de la señal de control ($P_T = P_{POL} + P_S$); el esquema mejorado, al menos como posibilidad teórica, consiste en realizar una excitación a potencia constante. De esta forma la



Figuras 6.1 y 6.2: Movimiento en el plano de excitación a potencia constante y curvas de transmisión para este caso.

transición del régimen supercrítico al subcrítico se hace más rápida. La simulación del proceso con el BPM confirma esa suposición (fig. 6.2).

La elección del punto óptimo de polarización, para un esquema de operación dado, puede realizarse con la ayuda de los parámetros característicos del acoplador, que se definieron en la sección 4.4 .

En la figura 6.3 se muestran la potencia media en una de las ramas y la tasa de intercambio en función de la potencia total, para distintos valores de θ_0 con $\gamma = 0$. Sobre las curvas se han representado los puntos en los que nos movemos durante el proceso de conmutación. Existe un cierto margen de libertad para la elección de P_{POL} , teniendo en cuenta que debemos partir de un punto 'suficientemente supercrítico' (P_m/P_T próximo a 1 y Ex próximo a 0), y llegar a otro 'suficientemente subcrítico' (Ex próximo a 1).

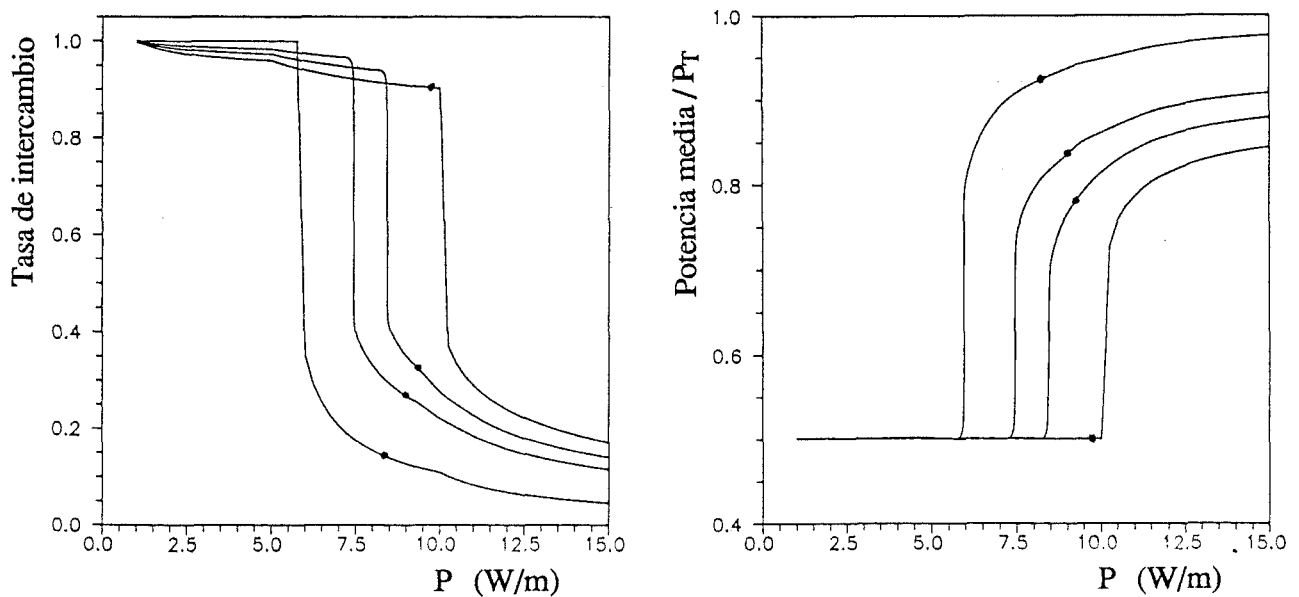


Figura 6.3: *Determinación del punto de polarización mediante los parámetros característicos que definen el comportamiento del NLDC.*

Por último la determinación de la longitud del dispositivo puede realizarse con ayuda de las curvas del periodo de acoplo: en la figura 5.15 se observa cómo la conmutación se produce en el margen de θ_0 que va de 35° a 40° ; la elección de L debe hacerse entonces de forma que se produzca la máxima conmutación de potencia entre las ramas en esa longitud, para un valor de P_S inmediatamente posterior al intervalo de conmutación. La relación entre θ_0 y P_S en este esquema de operación viene dada por:

$$\theta_0 = 2 \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{P_S}{P_{POL}}} \quad (6.1)$$

como puede probarse fácilmente. En nuestro ejemplo se tomó $L = 130 \mu\text{m}$. En la figura 6.4 se muestra que ése es un valor adecuado.

Queda abierto un campo de investigación importante en el que se exploren otras posibilidades de polarización del NLDC.

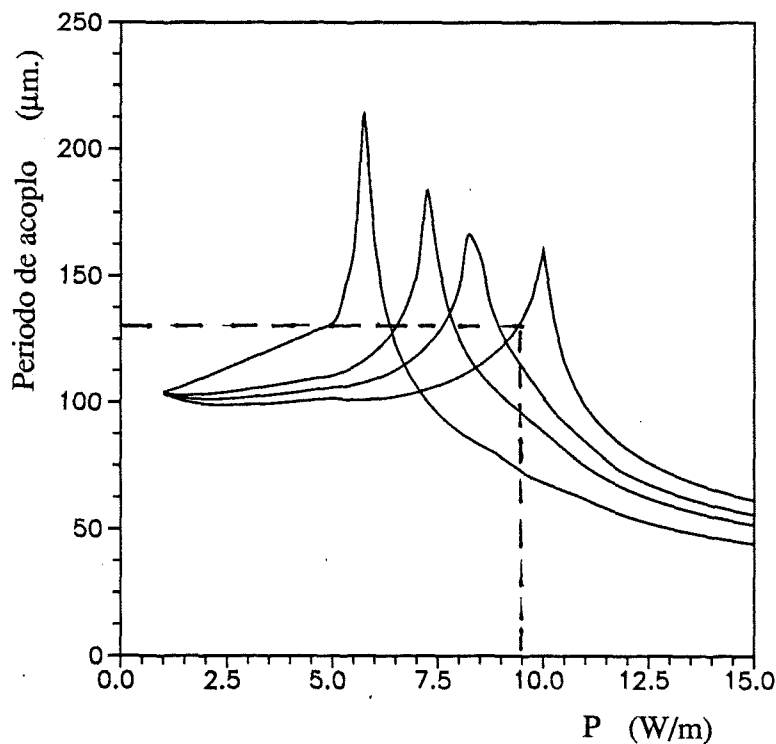


Figura 6.4: Determinación de la longitud del dispositivo mediante el periodo de acoplo.

b) Elección de los parámetros de la estructura

Los parámetros que caracterizan la propagación luminosa en una guía de cinco capas, como la que constituye el NLDC, son (ciñéndonos al caso simétrico):

aquellos que definen al dispositivo: $n_s, n_i, n_f; d, w, \lambda; n_{2s}, n_{2i}, n_{2f}$

y los que definen la excitación: P, θ_0, γ .

En el último apartado se ha mostrado una estrategia, para un acoplador dado, para la elección de los tres últimos, utilizando el plano de excitación y los tres parámetros que caracterizan su comportamiento ($P_m/P_T, Ex, L_c$).

Permanece sin embargo la cuestión de determinar los valores óptimos del primer conjunto de parámetros para cada aplicación. Este es un problema con suficiente entidad, y que deberá ser planteado con cautela. La mejor opción sería la de re-elaborar la formulación de modos acoplados mediante un conjunto mínimo de parámetros adimensionales capaces de modelar exactamente al dispositivo. (A este respecto se comprueba que la propagación luminosa a través de dos guías paralelas, dispuestas simétricamente, puede caracterizarse a través de cuatro parámetros adimensionales, a los que habría que añadir los parámetros de no linealidad). Con este planteamiento se consigue, por un lado, trabajar con el mínimo número de parámetros representativos, con los que se obtendrían curvas universales para el NLDC, y, por otro lado, definir con claridad los límites físicos de aplicabilidad, esto es, permitirá establecer cuándo unas determinadas prestaciones pueden, o no pueden ya, ser mejoradas [1].

c) Limitaciones inherentes al empleo de materiales reales.

En este trabajo no se han considerado los efectos debidos a las pérdidas por absorción de los medios reales, ni los efectos de saturación de la permitividad. Ambos factores contribuyen de hecho a una degradación de las características del NLDC [2-4].

Un objetivo de interés será el de modelar analíticamente, aún de forma aproximada, esos fenómenos. Se ha comprobado que los efectos de saturación pueden incluirse, aunque no sin dificultades, en la formulación de modos acoplados.

Por último habría que considerar también la influencia del tiempo de respuesta del medio no lineal, que supone una limitación práctica para la velocidad de operación de los dispositivos [5,6].

Debe señalarse que, en el momento de elegir un esquema de operación para un dispositivo no lineal, es importante el intentar conseguir una utilización eficiente de las variaciones del índice de refracción, esto es, que la función de conmutación se realice con la mínima variación de índice. De esta forma:

i) prevenimos degradaciones en la respuesta del dispositivo por saturación del medio;

ii) minimizamos las pérdidas no lineales, que son las que más negativamente pueden influir en el dispositivo;

iii) minimizamos el tiempo de respuesta del material, y, consecuentemente del dispositivo realizado.

d) Análisis de geometrías alternativas

A partir de los resultados de este trabajo existe la posibilidad de investigar en la utilidad de otras geometrías, basadas en el intercambio no lineal de potencia entre guías dieléctricas. Dos posibles caminos serían el análisis de estructuras formadas por tres ramas (un doble acoplador), y la introducción de asimetrías en la estructura, intentando mejorar las características que se consiguen con los acopladores simétricos.

REFERENCIAS

- [1] La normalización de parámetros en guías de cinco capas puede consultarse en: J.Recolons, L.Torner, F.Canal. "Normalized parameters for Y-branch optical waveguides". *Opt. Lett.* **16**, 9 (1991) 636. Respecto a la inclusión de los efectos no lineales en la obtención de las curvas universales que caracterizan la propagación modal véase: L.Torner, J.P.Torres, F.Dios, "Similarity rules for nonlinear Kerr-like slab optical waveguides" (próxima publicación en *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992).
- [2] E.Caglioti, S.Trillo, S.Wabnitz, B.Daino, G.I.Stegeman "Power-dependent switching in a coherent nonlinear directional coupler in the presence of saturation". *Appl. Phys. Lett.* **51**, 5 (1987) 293.
- [3] G.I.Stegeman, C.T.Seaton, C.N.Ironside, T.Cullen, A.C.Walker "Effects of saturation and loss on nonlinear directional couplers". *Appl. Phys. Lett.* **50**, 16 (1987) 1035.
- [4] E.Caglioti, S.Trillo, S.Wabnitz, G.I.Stegeman "Limitations to all-optical switching using non-linear couplers in the presence of linear and nonlinear absorption and saturation". *J. Opt. Soc. Am. B* **5**, 2 (1988) 472.
- [5] N.Finlayson, E.M.Wright, G.I.Stegeman "Nonlinear optical pulse propagation in a semiconductor medium in the transient regime - I: temporal and spectral effects". *IEEE J. Quantum Electron.* **26**, 4 (1990) 770. N.Finlayson, G.I.Stegeman "Nonlinear optical pulse propagation in a semiconductor medium in the transient regime - II: interferometric sampling". *IEEE J. Quantum Electron.* **26**, 4 (1990) 778.
- [6] R.Jin, C.L.Chuang, H.M.Gibbs, S.W.Koch, J.N.Polky. "Pico-second all-optical switching in single mode GaAs/AlGaAs strip-loaded nonlinear directional couplers". *Appl. Phys. Lett.* **53**, 19 (1988) 1791