

POLARIZADOR OPTICO INTEGRADO SOBRE SUSTRATO DE SILICIO

Susana Cayuela Luria, Jordi Hernández Marco
Grupo de Optica Integrada
Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones (U.P.C.)
08034 Barcelona

ABSTRACT

The mode propagation in multilayer metal-clad optical waveguides has been analysed in this work. We have shown that a TM guided mode presents an absorption peak as a function of the thickness of the low-index buffer layer.

I. INTRODUCCION

Las guías ópticas, a diferencia de las líneas de transmisión de radiofrecuencia o de las guías en microondas, se fabrican con materiales que pueden ser considerados como dieléctricos perfectos en el espectro visible e infrarrojo. La razón de esta diferencia radica en la dificultad de aproximar un material a un conductor perfecto a frecuencias ópticas debido a la resonancia de plasma electrónico en las proximidades del ultravioleta.

Sin embargo, guías ópticas cubiertas de metal (metal-clad waveguides) son de interés para ciertos dispositivos electroópticos (por ejemplo moduladores), en los cuales es necesario aplicar señales de radiofrecuencia para tratar la onda óptica guiada. También se emplea este tipo de guías para implementar polarizadores y filtros de modos, dispositivos ambos que requieren una alta relación de extinción entre los modos TM y TE [1,2].

En este trabajo se realiza el estudio de un polarizador óptico integrado sobre un sustrato de silicio. La estructura básica está formada por una película de SiO_2 - TiO_2 encargada de guiar la luz, el sustrato de silicio y el metal, con sendas capas de SiO_2 que permiten proteger a la luz de las pérdidas provocadas por el metal y el sustrato. La capa de SiO_2 que separa la guía del metal (buffer) deberá tener una anchura de

algunas décimas de micra para poder tener la alta relación de extinción entre los modos TM y TE, mientras que la capa de SiO₂ que separa la guía del sustrato deberá tener una anchura de varias micras. Por ello, la estructura puede considerarse formada únicamente por cuatro capas (metal/SiO₂/SiO₂:TiO₂/SiO₂).

II. OPTICA DE LOS METALES

Un metal es un agregado de pequeños cristales orientados aleatoriamente, lo que permite considerarlo como un medio homogéneo e isótropo. La elevada conductividad que lo caracteriza provoca la atenuación de las ondas electromagnéticas que incidan sobre él (la conductividad comporta la transformación de la energía electromagnética en calor, por efecto Joule).

La conductividad σ y la permitividad ϵ de un metal pueden expresarse en forma aproximada a partir del modelo cinético teórico de los electrones libres del metal en la forma:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \quad (1) \quad \begin{array}{l} n_e: \text{densidad de electrones libres} \\ q: \text{carga del electrón} \\ m_e: \text{masa del electrón} \end{array}$$

$$\sigma = \frac{\gamma \omega_p^2 \epsilon_0}{\omega^2 + \gamma^2} \quad (2) \quad \begin{array}{l} \omega: \text{frecuencia angular del campo} \\ \omega_p: \text{frecuencia angular del plasma} \\ \gamma: \text{frec. angular efectiva de colisión} \\ \lambda: \text{longitud de onda del vacío} \\ \epsilon_0: \text{permitividad del vacío} \end{array}$$

$$\omega_p^2 = \frac{n_e q^2}{\epsilon_0 m_e}$$

La figura 1 muestra la dependencia de ϵ/ϵ_0 y σ con λ , y en la tabla I se resumen las constantes ópticas de diversos metales para 0.6328 μm ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon - j\sigma/\omega$).

Tabla I

Constantes ópticas		
Material	ϵ'	ϵ''
Al	-47.56	16.8
Au	-10.22	0.96
Ni	-10.44	15.2
Ag	-16.00	0.52

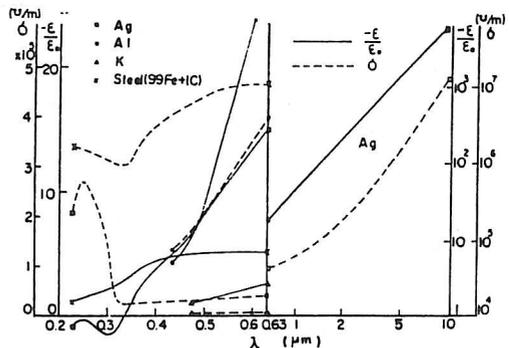


fig.1. Dependencia con λ de $-\epsilon'/\epsilon_0$ y σ de los metales

III. PROPAGACION DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS DE SUPERFICIE EN LA SEPARACION ENTRE DOS MEDIOS

Supongamos dos medios isótropos no magnéticos semi-infinitos con constantes dieléctricas complejas $\epsilon_1 = \epsilon_1' + j\epsilon_1''$ y $\epsilon_2 = \epsilon_2' + j\epsilon_2''$. Elijamos los ejes coordenados de tal forma que el eje x sea perpendicular a la superficie de separación entre los medios y el eje z sea la dirección de propagación de la onda electromagnética de superficie (figura 2). La intensidad del campo de dicha onda, que será máxima en la superficie de separación y decaerá exponencialmente a ambos lados de la superficie, adoptará la forma:

$$\begin{aligned} H &= H_1 \exp(-jk_z z + k_1 x) & x < 0 & \quad (3) \\ H &= H_2 \exp(-jk_z z - k_2 x) & x > 0 & \end{aligned}$$

donde k_z es la componente del vector de onda en la dirección de propagación y k_1, k_2 cumplen la relación:

$$k_i = (k_z^2 - k_0^2 \epsilon_i)^{\frac{1}{2}} \quad (i=1, 2) \quad (4)$$

siendo k_0 el número de onda en el vacío y eligiendo para k_1 el signo de tal forma que $\text{Re}(k_1) > 0$.

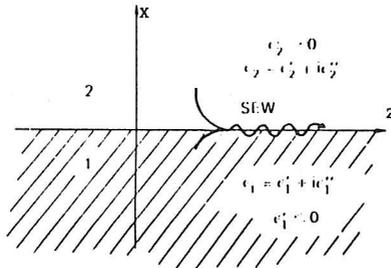


Figura 2. Onda electromagnética de superficie

Estos campos satisfacen las ecuaciones de Maxwell junto a las condiciones de contorno para las ondas TM, no existiendo ninguna posible solución para el caso de ondas TE.

Aplicando las condiciones de contorno a las expresiones de los campos dados en la ecuación 3, se obtiene:

$$\begin{aligned} H_1 &= H_2 & (5) \\ -\frac{k_1}{\epsilon_1} &= \frac{k_2}{\epsilon_2} \end{aligned}$$

Estas relaciones permiten concluir que las ondas de superficie sólo existirán en la separación entre medios con constante dieléctrica ϵ' de signos opuestos.

A partir de estos resultados y de lo visto en el apartado

anterior, podemos concluir que a frecuencias ópticas existirán ondas de superficie con polarización TM en la superficie de separación metal-dieléctrico.

IV. CARACTERISTICAS DE LOS MODOS GUIADOS OPTICOS EN UNA ESTRUCTURA MULTICAPA PLANA CON CUBIERTA DE METAL

Consideramos que los modos guiados de la estructura multicapa de la figura 3 se propagan en la dirección z, con un término de fase $\exp [j(\omega t - k_z z)]$, donde k_z es la constante de propagación compleja. Las características del modo se determinan aplicando las condiciones de contorno habituales, y k_z se puede expresar como la solución de la ecuación de valores propios [3]:

$$ak_{x3} = mm + \tan^{-1}(\gamma_{34} \frac{k_{x4}}{-jk_{x3}}) + \tan^{-1}[\gamma_{32} \frac{k_{x2}}{k_{x3}} \tan(\tan^{-1}(\gamma_{21} \frac{k_{x1}}{-jk_{x2}}) - k_{x2}b)] \quad (6)$$

donde

$$k_{xl} = k_0 (n_l^2 - n^2)^{\frac{1}{2}}, \quad l=1..4$$

$$n = \frac{k_z}{k_0} = \frac{\beta - j\alpha}{k_0}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\gamma_{pq} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \quad TE \\ \left(\frac{n_p}{n_q}\right)^2 \quad TM \end{array} \right\}$$

La constante de fase β y la constante de atenuación α de cada modo se obtienen a partir del análisis numérico de la ecuación trascendente precedente, donde la parte imaginaria de k_1 es negativa y la parte real de las \tan^{-1} está comprendida entre 0 y π .

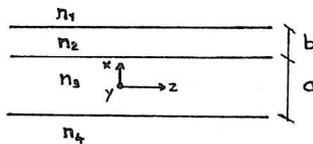


Fig.3. Estructura multicapa analizada en este trabajo

La constante de propagación de varios modos en función del grosor de la capa guiante para un buffer de 0.1 y 1 μm , así como la constante de atenuación en función del grosor del buffer para una anchura de la guía de 5 μm , pueden verse en la figura 4.

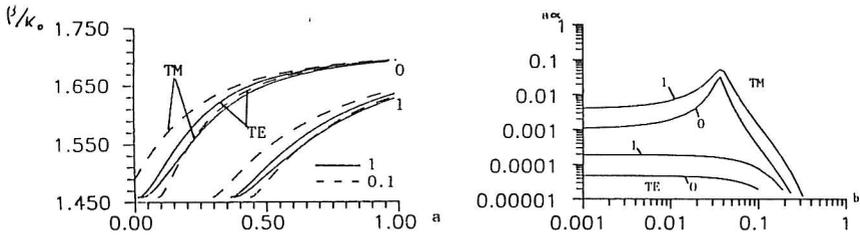


Fig.4. Características de propagación en una guía con $n_1=1.2-j7$ (Al), $n_2=1.458$ (SiO_2), $n_3=1.715$ ($\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$), $n_4=1.458$ (SiO_2) para $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$. (a) Constante de propagación en función de la anchura de la guía para $b=0.1$ y $1 \mu\text{m}$. (b) Constante de atenuación en función de la anchura del buffer para $a=5 \mu\text{m}$.

En la figura 4.b puede observarse la existencia de un pico de absorción en los modos TM, pico que se produce para un grosor determinado del buffer, el cual depende de la diferencia entre los índices de la capa guiante y el buffer, así como del metal utilizado (figura 5).

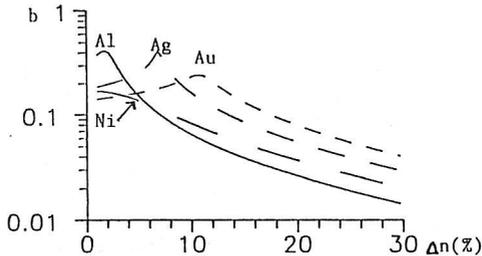


Figura 5. Dependencia de la b de pico con $\Delta=(n_3-n_2)/n_3$ para guías cubiertas con Al, Au, Ni y Ag.

V. CONCLUSIONES

Tras realizar un breve análisis del comportamiento de los metales a frecuencias ópticas, se ha estudiado el problema de la propagación en guías multicapa cubiertas con metal, observándose la existencia de un pico de absorción en el modo TM_0 .

VI. REFERENCIAS

- [1] T.Takano, J.Hamasaki, "Propagating modes of a metal-clad-dielectric-slab waveguide for integrated optics", IEEE J.Q.E., vol QE-8, nº2, Feb.1972.
- [2] V.M.Agranovich, A.A.Maradudin, "Surface Polaritons", Modern problems in condensed matter sciences, vol.1, 1982.
- [3] Y.Yamamoto et al., "Characteristics of optical guided modes in multilayer metal-clad-planar optical guide with low-index dielectric buffer layer", IEEE J.Q.E., vol QE-11, nº9, Sep.1975.