

LASER SEMICONDUCTOR GUIADO POR EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ENCERRAR LA LUZ

•FORMACIÓN DE UNA GUÍA DE ONDA

•POR UN MÉTODO SIMILAR AL USADO PARA FORMAR LA GUÍA DE ONDA EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL EN EL DISEÑO DE HETEROESTRUCTURA.

•SE LOGRA: INTRODUCIENDO EN LA DIRECCIÓN LATERAL UN PASO DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN “ Δn_L ”.

•CLASIFICACIÓN DE LOS LASERS DEPENDIENDO DE LA MAGNITUD DE “ Δn_L ”.

•LASER SEMICODUCTOR GUIADO DÉBILMENTE POR EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN.

•LASER SEMICODUCTOR GUIADO FUÉRTEMENTE POR EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN.

LASER CON GUÍA DE ONDA DE CRESTA GUIADO DÉBILMENTE

•UNA CRESTA SE FORMA GRABANDO FOTOLITOGRAFICAMENTE PARTES DE LA CAPA “P”.

•UNA CAPA DE “ SiO_2 ” SE DEPOSITA PARA BLOQUEAR EL FLUJO DE CORRIENTE Y PARA INDUCIR UN ÍNDICE DE REFRACCIÓN DÉBILMENTE GUÍADO:

•EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL “ SiO_2 ” ES CONSIDERÁBLEMENTE MÁS BAJO QUE EN LA REGIÓN CENTRAL “P”.

•EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EFECTIVO DEL MODO TRANSVERSAL, ES DIFERENTE EN LAS DOS REGIONES.

•RESULTANDO UN ÍNDICE ESCALONADO CON UN PASO:

•“ $\Delta n_L = 0,01$ ”

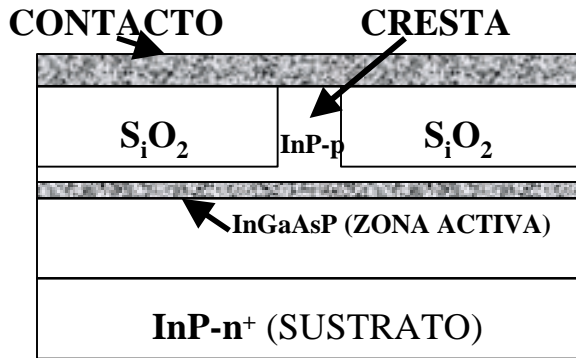
•ANTE LA PRESENCIA DE ESTE PASO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN ESCALONADO:

•LA LUZ GENERADA SE MANTIENE ENCERRADA EN LA REGIÓN DE LA CRESTA TIPO “P”.

•LA MAGNITUD DE LA VARIACIÓN DEL PASO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN ES SENSIBLE A VARIOS DETALLES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

- COMO LA ANCHURA DE LA CRESTA
- Y DE LA CERCANÍA DE LA CAPA DE SiO_2 A LA CAPA ACTIVA.

LASER CON GUÍA DE ONDA DE CRESTA



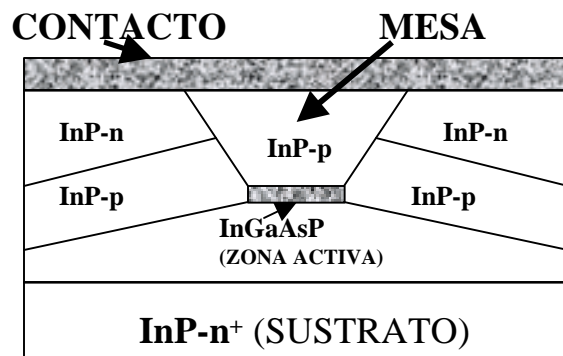
- LASER SEMICONDUCTOR GUIADO POR EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN. LASER SEMICONDUCTOR DÉBILMENTE GUIADO
- ENCUENTRA APLICACIÓN POR SU SIMPLICIDAD Y BAJO COSTO.

LASER CON HETEROESTRUCTURA ENCUBIERTA FUÉRTEMENTE GUIADOS (BH)

• LA REGIÓN ACTIVA DE DIMENSIÓN APROX. DE $0,1 \times 1 \mu\text{m}^2$. ESTÁ ENCUBIERTA POR TODOS LOS LADOS POR VARIAS CAPAS DE BAJO ÍNDICE DE REFRACCIÓN.

• TIPOS:

- DE GRABADO FOTOLITOGRAFICO.
- PLANO
- PLANO DE DOBLE CANAL
- ENCUBIERTO EN “V”.
- DE SUSTRATO ENCANALADO.
 - ESTOS LASERS “BH” PRESENTAN UNA VARIACIÓN DEL PASO ESCALONADO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN GRANDE EN LA DIRECCIÓN LATERAL.
 - PERMITEN UN MODO FUERTE DE ENCIERRO PARA LA LUZ.
- LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LUZ EMITIDA:
 - DEBIDO A LA ALTA VARIACIÓN EN EL PASO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN OBTENIDO EN LA FABRICACIÓN:
 - ESTE LASER SE DISEÑA PARA SOPORTAR UN MODO ÚNICO ESPACIAL.



- LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LUZ ES ESTABLE.
- MUCHOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS EMPLEAN LASERS SEMICONDUCTORES DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN FUÉRTEMENTE GUIADOS.

LOS MODOS ESPACIALES DE UN LASER CON HETEROESTRUCTURAS ENCUBIERTAS (BH)

CONDICIÓN:

- **EL LASER “BH” SOPORTA UN MODO ESPACIAL ÚNICO**
- **EN LAS DIRECCIONES LATERALES Y TRANSVERSALES SE MUESTRA:**
 - **UN FOCO DE LUZ CON ÁNGULO DE DIVERGENCIA.**
- **LA CARACTERÍSTICA ESPACIAL DE LA LUZ EMITIDA:**
 - **ES INDEPENDIENTE DE LA CORRIENTE INYECTADA AL LASER BH.**
 - **PROPIEDAD QUE LOS HACE ATRACTIVO PARA APLICACIONES EN SISTEMAS ÓPTICOS.**

LA ECUACIÓN DE ONDA ES EL PUNTO DE PARTIDA:

$$\nabla^2 \vec{E} + n^2 k_0^2 \vec{E} = 0 \text{ con } k_0 = \frac{\omega}{C} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \begin{array}{l} n = \text{ÍNDICE DE REFRACCIÓN} \\ n = n_1 \text{ EN LA ZONA ACTIVA} \\ n = n_2 \text{ FUERA DE LA ZONA ACTIVA} \end{array}$$

DIFERENCIA PRINCIPAL CON LOS MODOS DE LA FIBRA ÓPTICA:

- **LO REPRESENTA LAS CONDICIONES DE FRONTERA.**
 - **LA REGIÓN ACTIVA PRESENTA UN ÁREA TRANSVERSAL RECTANGULAR.**
 - **SE NECESITA RESOLVER UN PROBLEMA DE GUÍA DE ONDA BIDIMENSIONAL.**
 - **SE SIMPLIFICA LA GEOMETRÍA CILÍNDRICA.**

SIMPLIFICACIÓN DEL PROBLEMA

- **CONSIDERANDO UNA APROXIMACIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EFECTIVO**
 - **ES EQUIVALENTE A RESOLVER: DOS PROBLEMAS DE GUÍA DE ONDA UNIDIMENSIONALES.**
 - **ESTA APROXIMACIÓN SE JUSTIFICA EN LASERS BH CON LAS SIGUIENTES DIMENSIONES TÍPICAS:**
 - **<0,2 μm EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL “y”.**
 - **>1 μm EN LA DIRECCIÓN LATERAL “x”.**
- **EL PROBLEMA DE GUÍA DE ONDA SE RESUELVE PRIMERO EN PARA CADA “x” CONSTANTE.**
- **LUEGO SE RESUELVE EN “x” PARA “y” CONSTANTE**

- SE ASUME EL CAMPO ELÉCTRICO EN LA FORMA:

$$\vec{E} = \vec{e} \phi(y, x) \psi(x) e^{j\beta z} \quad \begin{array}{l} \vec{e} = \text{VECTOR UNITARIO DE POLARIZACIÓN} \\ \beta = \text{CONSTANTE DE PROPAGACIÓN} \end{array}$$

- LOS MODOS LASERS PARA LA LUZ POLARIZADA A LO LARGO DEL:

- EJE X ES EL MODO TE

- EJE Y ES EL MODO TM

- SUSTITUYENDO LA RELACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO ANTERIOR EN LA ECUACIÓN DE ONDA Y HACIENDO USO DEL MÉTODO DE SEPARACIÓN DE VARIABLES, SE OBTIENE:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + [n^2(x, y) k_0^2 - \beta_{\text{eff}}^2(x)] \phi = 0$$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + [\beta_{\text{eff}}^2(x) - \beta^2] \psi = 0$$

$$n_{\text{eff}}(x) = \frac{\beta_{\text{eff}}(x)}{k_0} \quad \text{ÍNDICE DE REFRACCIÓN EFECTIVO DEPENDIENTE DE "x"}$$

PARA EL CASO DEL LASER "BH"

- CON UNA REGIÓN ACTIVA DE:

- ANCHURA "W"

- ESPESOR "d"

- EL PROBLEMA SE CONVIERTE EN UN PROBLEMA PLANO DE GUÍA DE ONDA:

$$\text{para } |x| \leq \frac{w}{2} \text{ donde } n = n_1$$

$$\text{y para } |y| \leq \frac{d}{2} \text{ donde } n = n_2$$

LA SOLUCIÓN GENERAL SE OBTIENE CON:

$$\phi(y, x) = A_1 \cos(\kappa y) + B_1 \sin(\kappa y) \text{ para } |y| \leq \frac{d}{2}$$

$$\phi(y, x) = A_2 e^{-\gamma(|y| - \frac{d}{2})} \text{ para } |y| > \frac{d}{2}$$

- EN FORMA ANÁLOGA AL CASO DE LA FIBRA ÓPTICA, TENEMOS:

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta_{\text{eff}}^2 \quad \text{y} \quad \gamma^2 = \beta_{\text{eff}}^2 - n_2^2 k_0^2$$

- SE PUEDE CONSIDERAR EN FORMA SEPARADA:

- MODOS PARES: SI $\phi(y, x)$ ES UNA FUNCIÓN PAR DE "y"

- MODOS IMPARES: SI $\phi(y, x)$ ES UNA FUNCIÓN IMPAR DE "y"

- $B_1 = 0$ PARA MODOS PARES.

- $A_1 = 0$ PARA MODOS IMPARES.

PARA EL CASO DE MODOS PARES “TE”

- CONSIDERANDO LA EXIGENCIA DE CONTINUIDAD DE LA COMPONENTE TANGENCIAL DE \vec{E} Y \vec{H} EN LA SUPERFICIE $|y| = d/2$
 - LO QUE SIGNIFICA HACER $\phi_y \propto \frac{\partial \phi}{\partial y}$ CONTINUA A LO LARGO DE LA SUPERFICIE: $|y| = d/2$
 - SE OBTIENE UN SISTEMA DE DOS ECUACIONES HOMOGÉNEAS PARA A_1 Y A_2 .
 - SE DETERMINA SOLUCIONES PARA ESTE SISTEMA PARA VALORES β_{eff} DETERMINADOS POR LA ECUACIÓN DE VALORES EIGEN.

$$\gamma = \kappa \tan\left(\frac{\kappa d}{2}\right)$$
 - EL PROCEDIMIENTO ES SIMILAR AL CASO DE LA FIBRA ÓPTICA, PERO MÁS SIMPLE.

PARA EL CASO DE MODOS IMPARES TE

- SE TRATA DE FORMA SIMILAR AL MODO PAR.
- LOS MODOS IMPARES “TE” ESTÁN GOBERNADOS POR LA ECUACIÓN DE VALORES EIGEN

$$\gamma = -\kappa \cot\left(\frac{\kappa d}{2}\right)$$
- SOLUCIONES MÚLTIPLES DE LAS ECUACIONES DE VALORES EIGEN ANTERIORES:
 - CORRESPONDEN A MODOS “TE” DIFERENTES.
- UN PROCEDIMIENTO SIMILAR SE APLICA A LOS MODOS “TM”.

CONDICIÓN BAJO LA CUAL LA GUÍA DE ONDA SOPORTA UN MODO ÚNICO

- SE DEFINE “D” EQUIVALENTE AL PARÁMETRO “V” DE LA FIBRA:

$$D = k_0 d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < \pi$$
- VALORES TÍPICOS:
 - $n_1=3,55$, $n_2=3,2$, $d=0,1\mu\text{m}$ Y $D<\pi$ SE SATISFACE CON FACILIDAD EN EL RANGO DE LONGITUDES DE ONDA ENTRE 0,8 A 1,6 μm .

DETERMINACIÓN DE LOS MODOS LATERALES

- SE OBTIENE EN FORMA SIMILAR. RESOLVIENDO:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + [\beta_{\text{eff}}(x) - \beta^2] \psi = 0 \quad \text{DONDE}$$

$$\beta_{\text{eff}}(x) = n_{\text{eff}} k_0 \quad \text{para } |x| \leq \frac{w}{2}$$

$$\beta_{\text{eff}}(x) = n_2 k_0 \quad \text{para } |x| > \frac{w}{2}$$

- LA SOLUCIÓN TOMA UNA FORMA IDÉNTICA HACIENDO:

- $n_1 = n_{\text{eff}}$ y $\beta_{\text{eff}} = \beta$ EN LAS ECUACIONES SIGUIENTES:

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta_{\text{eff}}^2 \quad \text{y} \quad \gamma^2 = \beta_{\text{eff}}^2 - n_2^2 k_0^2$$

CONDICIÓN PARA SOPORTAR UN MODO ÚNICO

- SIMILAR A “D”:

$$W = k_0 w (n_{\text{eff}}^2 - n_2^2)^{1/2} < \pi$$

- W=ES LA ANCHURA NORMADA

- EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EFECTIVO n_{eff} SE OBTIENE DE:

$$\kappa^2 = n_{\text{eff}}^2 k_0^2 - \beta^2 \quad \text{y} \quad \gamma = \kappa \tan\left(\frac{\kappa d}{2}\right) \quad \text{con} \quad \gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2$$

- n_{eff} DEPENDE DEL ESPESOR “d”.

- VALORES TÍPICOS: $n_{\text{eff}} = 3,4$ $n_2 = 3,2$ $w < 2\mu\text{m}$

- OPERACIÓN EN ALTAS FRECUENCIAS:

- EN ESTE CASO LOS MODOS LATERALES NO SATISFACEN LA CONDICIÓN MONOMODO.

- ALGUNOS LASERS “BH” PUEDEN EMITIR LUZ EN MODOS LATERALES DE ÓRDENES SUPERIORES.

EL FACTOR DE CONFINAMIENTO DEL MODO

- LOS PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES DEL LASER SE PUEDE EXPRESAR EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS SIN DIMENSIONES “D” y “W”

- EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN MODAL: $\hat{n} = \beta / k_0$ SE PUEDE APROXIMAR:

$$\hat{n}^2 = n_2^2 + \Gamma_L (n_{\text{eff}}^2 - n_2^2); \quad n_{\text{eff}}^2 = n_2^2 + \Gamma_T (n_1^2 - n_2^2)$$

- Γ_L =FACTOR DE CONFINAMIENTO DEL MODO EN LA DIRECCIÓN LATERAL

- Γ_T =FACTOR DE CONFINAMIENTO DEL MODO EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL

- EXPRESIONES APROXIMADAS: $\Gamma_L = \frac{W^2}{(2 + W^2)}$ $\Gamma_T = \frac{D^2}{(2 + D^2)}$

- EL FACTOR TOTAL DE CONFINAMIENTO: $\Gamma = \Gamma_L \Gamma_T$
• REPRESENTA EL PORCENTAJE DE LA ENERGÍA DEL MODO CONTENIDA DENTRO DE LA REGIÓN ACTIVA.

- VALORES TÍPICOS: $W \approx 3$ $D \approx 1$ y $\Gamma \approx 0,2$ a $0,3$