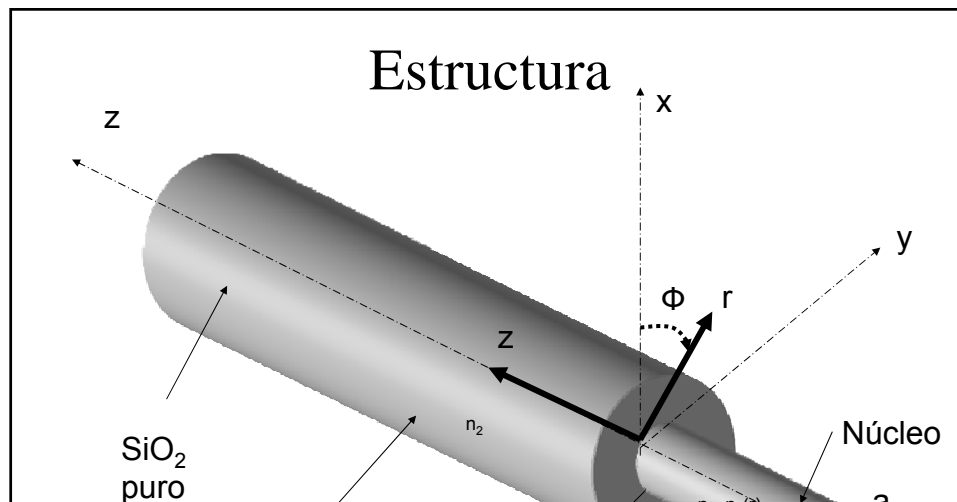


FIBRAS ÓPTICAS

FIBRA ÓPTICA



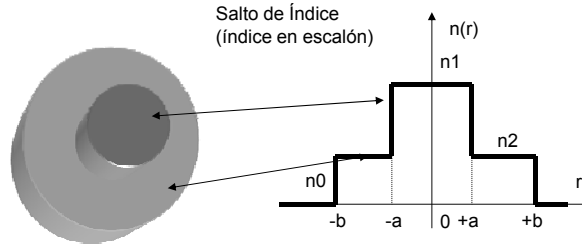
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Clasificación

Clasificación por el Perfil del Índice de refracción del núcleo

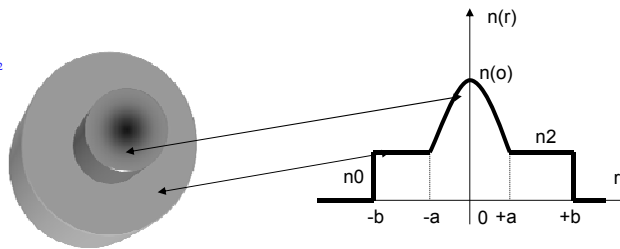


Índice gradual

$$n(r) = n(0) \cdot \left[1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2}$$

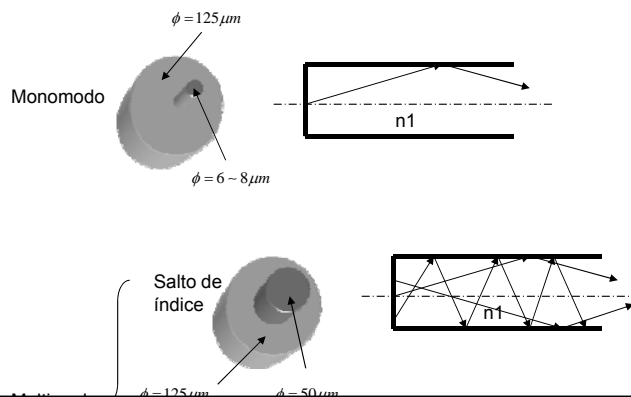
$$\Delta \doteq \frac{n(0)^2 - n_2^2}{2 \cdot n(0)^2} \approx \frac{n(0) - n_2}{n(0)}$$

$$\alpha = \begin{cases} 2 \rightarrow \text{perfil_parabolico} \\ 1 \rightarrow \text{perfil_triangular} \\ \infty \rightarrow \text{salto_de_indice} \end{cases}$$



Clasificación

Clasificación por el Número de Modos propagados.

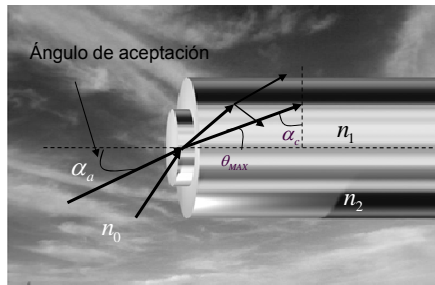


**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

Apertura Numérica (NA)

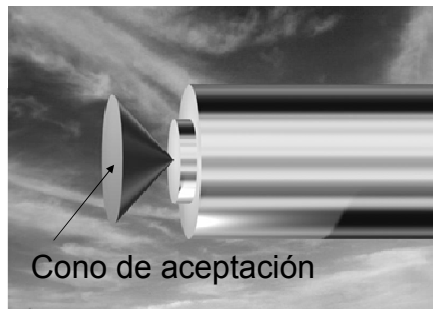


Fibra de salto de índice

$$n_0 \cdot \text{sen}(\alpha_a) = n_1 \cdot \text{sen}(\theta_{MAX}) = n_1 \cdot \cos(\alpha_c) =$$

$$n_1 \cdot \sqrt{1 - \text{sen}^2(\alpha_c)} = n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\Rightarrow NA \triangleq n_0 \cdot \text{sen}(\alpha_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



Apertura Numérica (NA)

Fibra de salto de índice

Cono de Aceptación



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Apertura Numérica (NA)

Fibra de índice gradual

$$n(r) = \begin{cases} n(0) \cdot \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} & 0 \leq r \leq a \\ n(0) \cdot (1 - 2\Delta)^{1/2} \approx n(0) \cdot (1 - \Delta) = n_2 & r \geq a \end{cases}$$

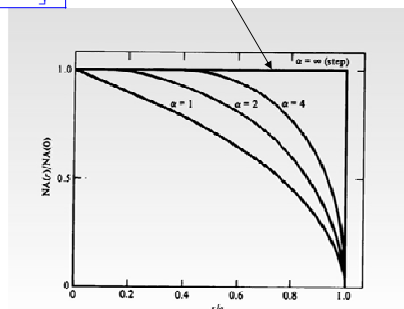
$$\Delta = \frac{n(0)^2 - n_2^2}{2 \cdot n(0)^2} \approx \frac{n(0) - n_2}{n(0)}$$

□ Apertura Numérica Local

$$AN_{LG}(r) \doteq \sqrt{n(r)^2 - n_2^2} = \sqrt{n(0)^2 \cdot \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right] - n_2^2} =$$

$$\sqrt{2 \cdot n(0)^2 \cdot \Delta - 2 \cdot n(0)^2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha} = n(0) \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha} = AN_{sl} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2}$$

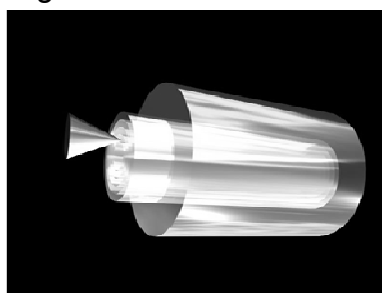
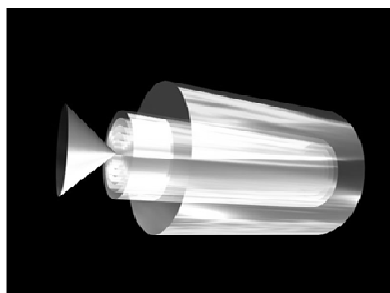
Salto Índice



Δ típicos = 0,001...0,01

Apertura Numérica (NA)

Fibra de índice gradual



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Ecuación de onda

Componentes longitudinales de los campos

$$\begin{aligned} (\nabla_t^2 + k_{ci}^2) e_{zi} &= 0 & i=1 \quad r \leq a & \text{ Núcleo} \\ (\nabla_t^2 + k_{ci}^2) h_{zi} &= 0 & i=2 \quad r \geq a & \text{ Revestimiento} \end{aligned}$$

$$k_{ci}^2 = k^2 n_i^2 - \beta^2 \Rightarrow \begin{cases} u^2 = k_{c1}^2 = k^2 n_1^2 - \beta^2 \\ w^2 = -k_{c2}^2 = \beta^2 - k^2 n_2^2 \end{cases}$$

La solución es una onda propagándose en la dirección z:

$$e_{zi}(r, \phi) = F_{ei}(r, \phi)$$

$$h_{zi}(r, \phi) = F_{hi}(r, \phi)$$

Ecuación de onda

Para resolver las ecuaciones diferenciales para las componentes longitudinales de los campos eléctrico y magnético, se utiliza el método de separación de variables

En coordenadas cilíndricas se obtiene:

$$F_i(r, \phi) = R_i(r) \Phi_i(\phi)$$

Sustituyendo en la ecuación diferencial:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r R_i' \Phi_i \right) + \frac{1}{r^2} R_i \Phi_i'' + k_{ci}^2 R_i \Phi_i = 0$$

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70**

Cartagena99

Ecuación de onda

Como la fibra óptica tiene simetría de revolución, la función Φ debe ser idéntica en $\phi = 0$ y $\phi = 2\pi$

$$\Phi_i(\phi) = e^{jm\phi} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Con lo que se obtiene:

$$\frac{d^2 R_i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_i}{dr} + \left(k_{ci}^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R_i = 0$$

Núcleo:
$$\frac{d^2 R_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_1}{dr} + \left(u^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R_1 = 0$$

Revestimiento:
$$\frac{d^2 R_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_2}{dr} + \left(-w^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R_2 = 0$$

Ecuación de onda

De todas las soluciones, únicamente interesan aquellas que corresponden a ondas que se propagan en la dirección de z y que están confinadas en su mayor parte en el núcleo de la fibra

Para ello: $u^2 \geq 0$ $w^2 \geq 0$

Además las soluciones deben cumplir:

Los campos deben ser finitos en $r = 0$

Los campos deben decaer cuando $r \rightarrow \infty$

Con estas condiciones:

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

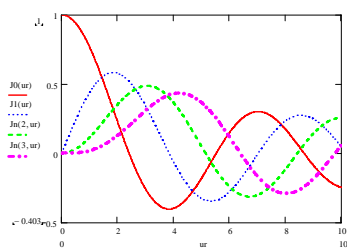
Ecuación de onda

Núcleo

$$e_{z1} = A_1 J_m(ur) e^{jm\phi}$$

$$h_{z1} = B_1 J_m(ur) e^{jm\phi}$$

J_m es la función de Bessel de 1ª especie

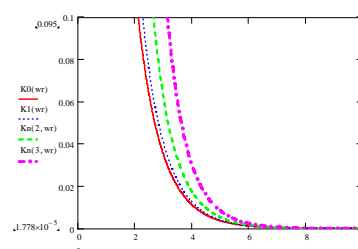


Revestimiento

$$e_{z2} = A_2 K_m(wr) e^{jm\phi}$$

$$h_{z2} = B_2 K_m(wr) e^{jm\phi}$$

K_m es la función de Bessel de 3ª especie



Ecuación de onda

A partir de las componentes longitudinales, se pueden obtener las componentes transversales de los campos

Núcleo

$$e_{\phi 1} = -\frac{1}{u^2} \left[-\frac{m\beta}{r} A_1 J_m(ur) - j\omega\mu_0 u B_1 J_m'(ur) \right] e^{jm\phi}$$

$$h_{\phi 1} = -\frac{1}{u^2} \left[-\frac{m\beta}{r} B_1 J_m(ur) + j\omega\varepsilon_1 u A_1 J_m'(ur) \right] e^{jm\phi}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Ecuación de onda

A partir de las componentes longitudinales, se pueden obtener las componentes transversales de los campos

Revestimiento

$$e_{\phi 2} = \frac{1}{w^2} \left[-\frac{m\beta}{r} A_2 K_m(wr) - j\omega\mu_0 w B_2 K_m'(wr) \right] e^{jm\phi}$$

$$h_{\phi 2} = \frac{1}{w^2} \left[-\frac{m\beta}{r} B_2 K_m(wr) + j\omega\varepsilon_2 w A_2 K_m'(wr) \right] e^{jm\phi}$$

$$e_{r 2} = \frac{1}{w^2} \left[j\beta w A_2 K_m'(wr) - \frac{\omega\mu_0 m}{r} B_2 K_m(wr) \right] e^{jm\phi}$$

$$h_{r 2} = \frac{1}{w^2} \left[j\beta w B_2 K_m'(wr) + \frac{\omega\varepsilon_1 m}{r} A_2 K_m(wr) \right] e^{jm\phi}$$

Ecuación de onda

Condiciones de contorno: las componentes tangenciales de los campos deben ser continuas

$$\left. \begin{aligned} e_{z1} &= e_{z2} \\ h_{z1} &= h_{z2} \\ e_{\phi 1} &= e_{\phi 2} \\ h_{\phi 1} &= h_{\phi 2} \end{aligned} \right|_{r=a}$$

Se obtiene la ecuación de dispersión:

$$\left(\frac{K_m'}{wK_m} + \frac{J_m'}{uJ_m} \right) \cdot \left(n_1^2 \frac{J_m'}{uJ_m} + n_2^2 \frac{K_m'}{wK_m} \right) - \frac{m^2 k^2 \beta^2 (n_1^2 - n_2^2)}{a^2 u^4 w^4} = 0$$

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

Ecuación de onda

Teniendo en cuenta que la frecuencia normalizada V se define de la siguiente manera:

$$V = (u^2 a^2 + w^2 a^2)^{1/2} = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = ak (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = ak (NA)$$

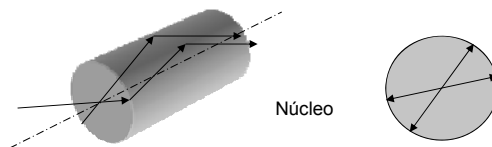
La ecuación de dispersión queda de la siguiente manera:

$$(ua)^4 (wa)^4 \left(\frac{K'_m}{waK_m} + \frac{J'_m}{uaJ_m} \right) \cdot \left(n_1^2 \frac{J'_m}{uaJ_m} + n_2^2 \frac{K'_m}{waK_m} \right) - \frac{m^2 \beta^2 V^4}{k^2} = 0$$

Modos

Modos con $m = 0$:

los campos no dependen de la componente acimutal: rayos meridionales



Si $H_z = 0$ $E_z \neq 0 \rightarrow$ Modos TM_{0n}

Si $E_z = 0$ $H_z \neq 0 \rightarrow$ Modos TE_{0n}

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

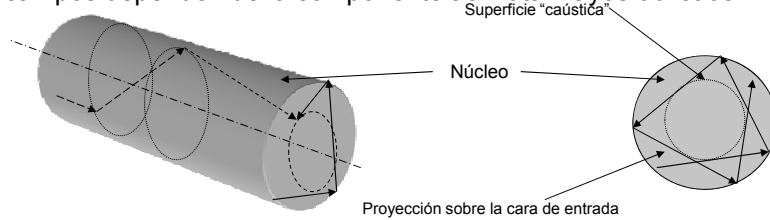
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

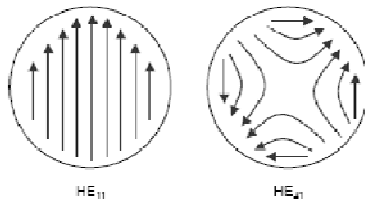
Modos

Modos con $m \neq 0$:

los campos dependen de la componente acimutal: rayos oblicuos



Campos con $H_z \neq 0$ $E_z \neq 0 \rightarrow$ Modos HE_{mn} y EH_{mn} (Híbridos)



Modos

Modo	u.a de corte	u.a límite superior
HE ₁₁	0	2.405
HE ₂₁ TE ₀₁ TM ₀₁	2.405	3.832
HE ₃₁ EH ₁₁	3.832	5.136
HE ₁₂	3.832	5.520
HE ₄₁ EH ₂₁	5.136	6.380
HE ₂₂ TE ₀₂ TM ₀₂	5.520	7.016
HE ₅₁ EH ₁₂	6.380	7.588
HE ₃₂ EH ₁₂	7.016	8.417
HE ₁₃	7.016	8.654
HE ₆₁ EH ₃₁	7.588	8.771
HE ₄₂ EH ₂₂	8.417	9.761
HE ₂₃ TE ₀₃ TM ₀₃	8.654	10.173
HE ₇₁ EH ₅₁	8.771	9.936
HE ₅₂ EH ₁₂	9.761	11.065
HE ₈₁ EH ₆₁	9.936	11.086

Modo fundamental: HE₁₁
El modo fundamental en una fibra óptica no tiene frecuencia de corte

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Modos. Guiado débil

Fibra de guiado débil: $n_1 \approx n_2$



Los modos con constantes de propagación muy parecidas se pueden agrupar en ondas LINEALMENTE POLARIZADAS.



El campo eléctrico transversal sigue una trayectoria LINEAL. Dirección de Polarización en el eje x o en el eje y



Los campos se pueden representar utilizando coordenadas rectangulares en lugar de coordenadas cilíndricas



- Degeneración de modos.
- Cambio de denominación de modos (modos LP)

Modos. Guiado débil

$n_1 \approx n_2$ La ecuación de dispersión se puede poner de la siguiente forma:

$$\left(\frac{K'_m}{waK_m} + \frac{J'_m}{uaJ_m} \right)^2 - \frac{m^2 \beta^2 V^4}{\epsilon_1 k_0^2 (ua)^4 (wa)^4} = 0$$

Que también puede escribirse como:

$$\frac{K'_m}{waK_m} + \frac{J'_m}{uaJ_m} = +m \left(\frac{1}{ua} + \frac{1}{wa} \right)$$

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

Modos. Guiado débil

Utilizando las fórmulas de recurrencia de las funciones de Bessel, se obtienen las siguientes expresiones:

$$\frac{J_{m+1}(ua)}{uJ_m(ua)} + \frac{K_{m+1}(wa)}{wK_m(wa)} = 0 \quad \text{Modos } EH_{mn}$$

$$\frac{J_{m-1}(ua)}{uJ_m(ua)} - \frac{K_{m-1}(wa)}{wK_m(wa)} = 0 \quad \text{Modos } HE_{mn}$$

Modos. Guiado débil

Empleando otra relación de recurrencia para las funciones de Bessel, las ecuaciones anteriores pueden escribirse como:

$$\frac{J_{m+2}(ua)}{J_m(ua)} + \frac{K_{m+2}(wa)}{K_m(wa)} = 0 \quad \text{Modos } EH_{mn}$$

$$\frac{J_{m-2}(ua)}{J_m(ua)} + \frac{K_{m-2}(wa)}{K_m(wa)} = 0 \quad \text{Modos } HE_{mn}$$

De estas expresiones se deduce que:

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

Modos. Guiado débil

Para calcular la frecuencia de corte, se debe imponer en las ecuaciones de dispersión: $w \rightarrow 0$

Como: $\lim_{w \rightarrow 0} \frac{K_m(wa)}{K_{m+2}(wa)} = 0$ Las frecuencias de corte de los diferentes modos pueden obtenerse conociendo los ceros de las funciones de Bessel

Modos LP _{lm}	Modos exactos	Ecuación característica	Frecuencia normalizada de corte
LP ₀₁	HE ₁₁	$V = 0$	$V_0 = 0$
LP _{0,m+1}	HE _{1,m+1}	$J_1(V) = 0$	$V_0 = \chi_{1m} \quad m \geq 1$
LP _{1m}	TE _{0m} TM _{0m} HE _{2m}	$J_0(V) = 0$	$V_0 = \chi_{0m} \quad m \geq 1$
LP _{lm}	EH _{l-1,m} HE _{l+1,m}	$J_{l-1}(V) = 0$	$V_0 = \chi_{l-1,m} \quad l \geq 2 \quad m \geq 1$

Los modos LP son modos con la misma ecuación característica y, por tanto, tienen la misma frecuencia de corte

Modos LP. Guiado débil

Nomenclatura de los modos LP

Modos HE_{1m} ↔ Modos LP_{0m}

Modos TE_{0m} + TM_{0m} + HE_{2m} ↔ Modos LP_{1m}

Modos HE_{(l+1)m} y EH_{(l-1)m} ↔ Modos LP_{lm} (con $l \geq 2$)

Ejemplo

HE₁₁ → LP₀₁

TE₀₁ + TM₀₁ + HE₂₁ → LP₁₁

HE₁₂ → LP₀₂

Se obtiene que al combinar diferentes modos híbridos, las componentes transversales del campo eléctrico de los modos LP están polarizadas a lo largo del eje x o del eje y



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Modos LP. Guiado débil

Expresión matemática de los modos LP

Si se emplea la combinación: $[EH_{m-1,n}] + [HE_{m+1,n}]$

El campo eléctrico transversal tiene la siguiente expresión:

Núcleo:
$$\vec{e} = \frac{A}{u} J_m(ur) e^{jm\phi} \hat{x}$$

Revestimiento:
$$\vec{e} = \frac{A}{w} K_m(wr) e^{jm\phi} \hat{x}$$

Análogamente, si se emplea la combinación: $[EH_{m-1,n}] - [HE_{m+1,n}]$

El campo eléctrico transversal estaría polarizado en la dirección y

Modos LP. Guiado débil

Interpretación de los Modos LP

Linealmente Polarizado

LP

Autovalor azimutal (En una vuelta completa al núcleo,
Número de cambios de (zonas con luz – zonas oscuras) / 4

Autovalor radial (En un radio número de regiones
Con luz)

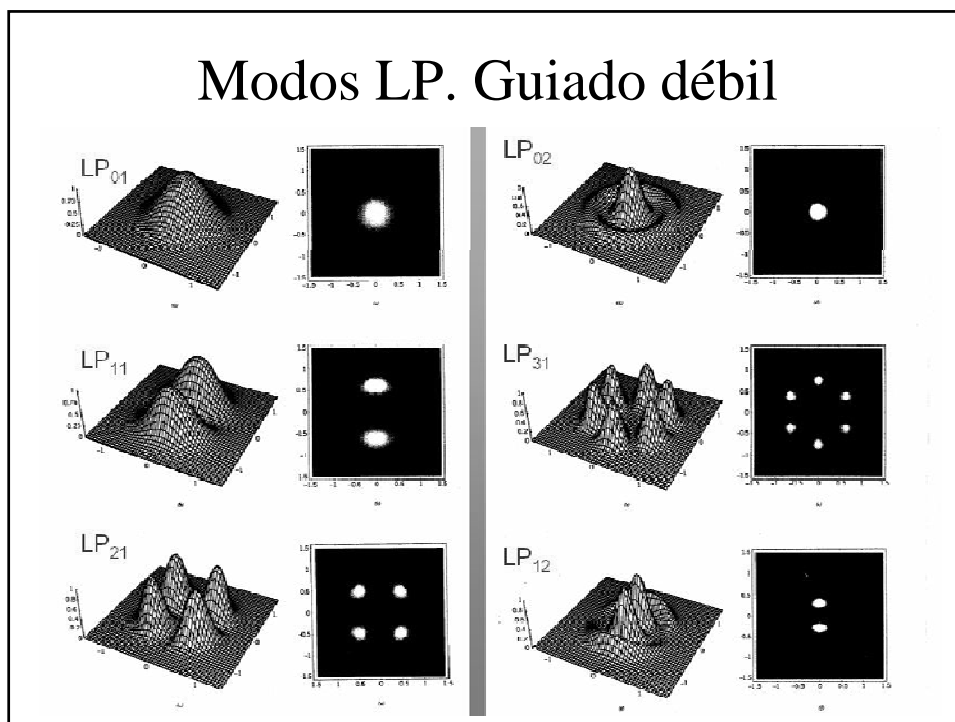


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

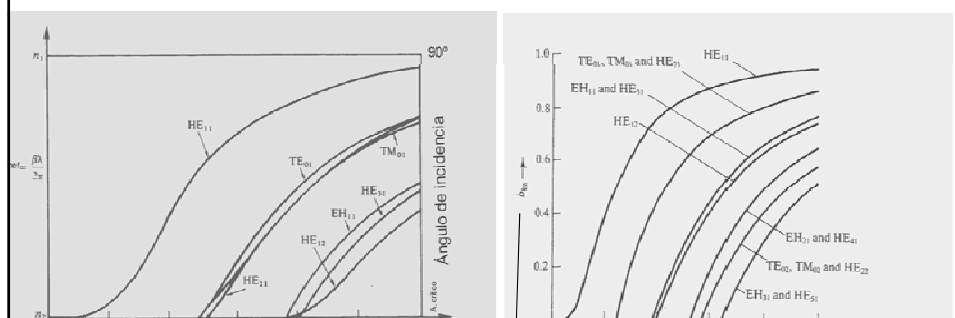
Cartagena99

Modos LP. Guiado débil



Modos LP. Guiado débil

Carta modal universal Fibra de Salto de Índice



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99