

"SATELEC 77 : SEMINARIO SOBRE COMUNICACIONES OPTICAS" 21-22 de MAYO

Coordinado por D. José Antonio Martín Pareda, Subdirector de Investigación de la E.T.S.I.T. DE MADRID

José Antonio Martín Pereda

Edita: Dpto. de Publicaciones E.T.S.I.T.

1^a Edición

IMPRESO EN ESPAÑA

MADRID 1.977

Dpto. de Publicaciones E.T.S.I.T.

Ciudad Universitaria

Madrid. -3

I.S.B.N.: 84-7402-049-2

Dep. Legal: M-32366-1977

PRESENTACION

Cuando una nueva Tecnología hace su aparición en un determinado campo, intentando sustituir a otras en uso, la pregunta inmediata que surge es a cerca de las ventajas que aquella puede reunir para hacer innecesarias a estas. De hecho, esto no es sino un planteamiento excesivamente simplista. La nueva no tiene porque sustituir por completo a las antiguas ni éstas quedar relegadas al olvido en corto plazo. Por otra parte, no son solo las ventajas inmediatas las que algunas veces dan interés al estudio de un cierto tema. Son también todos los avances paralelos que conlleva y que dan impulso a otras técnicas.

En el caso de las Comunicaciones Ópticas que es el que nos preocupa aquí, desde que surgieron como idea, las ventajas inmediatas pronto se hicieron notar, y también sus problemas. Y entre ambos, entre las ventajas y los problemas, otro hecho que en ocasiones similares no suele plantearse: el de que en el momento presente no eran realmente necesarias. Los sistemas de comunicaciones convencionales, los en uso hoy, satisfacen prácticamente al cien por cien las necesidades. Y esto, quizás, durante unos cuantos años. El problema es, entonces, porqué sustituir lo presente, si es válido. Y si es preciso sustituirlo, cuando es el momento más idóneo. No vamos a estudiar en estas charlas este tema, sino solo vamos a tratar de presentar la pequeña parcela de su tecnología.

Según veremos, las Comunicaciones Ópticas, no difieren radicalmente de la convencionales por otras técnicas. De hecho, no son sino una síntesis de tecnologías muy diversas que coinciden en el campo común de transmitir información. Campos tan dispares como la Electrónica Cuántica, la Física de los Semiconductores, la Óptica, la Teoría de la Comunicación, la Electrónica de dispositivos y circuitos, las Tecnologías de Fabricación de vidrios por citar algunos, se dan cita aquí. Y todos tienen que aunar sus esfuerzos para conseguir algo. Y todos han avanzado algo gracias al previsible empleo futuro de las Comunicaciones Ópticas. Vemos, como dijimos al empezar, que hay ocasiones en las que los avances paralelos pueden dar importancia a un tema. Aparte del que ya tenga de por sí.

En estas charlas, dadas dentro del marco de Satelec de 1977, y para las que fuimos amablemente invitados por los alumnos de 5º curso de la E.T.S.I.T.M, hemos intentado reunir algo de lo más reciente que conocemos y algo de lo que estamos trabajando en el tema. Es muy poco pero sirve, esperemos, para dar una imagen general del mismo. Una gran parte de las comunicaciones han sido realizadas gracias a una ayuda de la Comisión Asesora de la Presidencia del Gobierno, concedida a algunas Cátedras de la E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid y Barcelona, y de la Facultad de Ciencias de la U.A.M. A todos, gracias.

José A. Martín Pereda

I N D I C E

Λ-	COMUNICACIONES OPTICAS: PANORAMICA	1
	Por: D. Elías Muñoz Merino	
χ-	PERSPECTIVA GENERAL DE LAS FIBRAS OPTICAS. SITUACION ACTUAL	
	Por: D. Carlos Llanos Garcés	21
-	CARACTERISTICAS TECNICAS DE INSERCCION Y ACOPLAMIENTO DE FIBRAS OPTICAS.	
	Por: D. José Atin Balbás	39
-	SISTEMAS DE TRANSMISION NUMERICA POR FIBRA OPTICA	
	Por: D. J. Antonio Delgado Penin	51
-	PROPAGACION POR FIBRA OPTICA	
	Por: D. Angel Cardoma Aznar	65
χ-	DEGRADACION DE DISPOSITIVOS EMISORES DE LUZ	
	Por: D. Carlos López Barrio y D. Antonio García Guerra .	67
-	FOTODETECTORES DE AVALANCHA	
	Por: D. Juan Piqueras Piqueras	87
-	RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DE LOS CRISTALES LIQUIDOS NEMATICOS	
	Por: D. Fco. Javier Sansa Torres	109
-	EXPERIENCIAS DE MODULACION MAGNETOOPTICAS EN CRISTALES LIQUIDOS	
	Por: D. Fco. Javier Sansa Torres	121
χ-	TENDENCIAS Y PERSPECTIVAS EN LAS COMUNICACIONES OPTICAS	
	Por: D. José Antonio Martín Pereda	125

COMUNICACIONES OPTICAS: PANORAMICA

E. MUÑOZ MERINO
A. GARCIA GUERRA

Cátedra de Electrónica II-III. E.T.S.I.T.-U.P.M.

Como su nombre indica, un sistema de comunicaciones ópticas utiliza para transmitir información el margen óptico del espectro electromagnético (Fig. 1). Como primeros ejemplos históricos de comunicaciones ópticas quizás se pueden mencionar las señales luminosas mediante antorchas, linternas, espejos, etc., que entre personas, navios, etc. se han venido utilizando desde los orígenes de la humanidad, y en donde el ojo humano era el fotodetector.

Ya en nuestra era el motor investigador en este campo se debía a una extrapolación de nuestros sistemas de comunicaciones: según elevamos la frecuencia de nuestra portadora (ahora estamos en el rango de 10^{13} a 10^{15} Hz) aumentábamos el ancho de banda (número de canales) disponible para un cierto índice de modulación. Desde el punto de vista de la antena transmisora, la dispersión angular del haz emitido es inversamente proporcional a la frecuencia transmitida, y su densidad de potencia es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Sigue siendo por tanto muy interesante el trabajar con frecuencias lo más altas posibles. Sin embargo, el modular y crear tales anchos de banda y el manejar y alinear estos haces ópticos con anchuras angulares del orden de los microradianes presenta serios problemas.

El esquema básico y el modelo estadístico de un sistema de comunicaciones ópticas no difieren de la estructura general que conocemos (Fig. 2). Los elementos peculiares de este sistema son aquellos donde está presente la señal óptica: a) emisor óptico y modulador, b) medio de transmisión, c) fotodetector, d) circuitos electrónicos asociados al emisor óptico, e) circuitos electrónicos asociados al fotodetector.

El medio de transmisión es quien impone sus condiciones a los demás componentes ópticos y a él deben de adaptar sus características el fotoemisor y el fotodetector. Aunque inicialmente el medio de transmisión considerado fué la atmósfera, simultáneamente se hicieros estudios para conseguir el equivalente óptico al cable coaxial o a nuestras guíasondas. Así surgió la

fibra óptica, medio de transmisión en el que se centran hoy día las aplicaciones más inmediatas de las comunicaciones ópticas.

Si consideramos la atmósfera como primer medio de -- transmisión a estudiar, recordemos que su transmitancia (T) depende de muchas variables: longitud de onda, distancia, temperatura, humedad y de la composición de la atmósfera. A lo largo - del camino que recorre la señal óptica, esta se atenúa debido a procesos de absorción y de dispersión. A través de una relación $T = \exp(-\sigma R)$ se puede definir un coeficiente de atenuación, que en primera aproximación será la suma del coeficiente de absorción de los componentes de la atmósfera, del coeficiente de dispersión de Rayleigh (moléculas) y del coeficiente de dispersión de Mie (aerosoles) (Figs. 3 y 4). Las ventanas ópticas de la atmósfera determinarán las longitudes de onda en que deberán emitir los - fototransmisores a utilizar.

En relación con las fibras ópticas, como serán objeto de un estudio detallado posterior, sólo presentaremos algunas generalidades. Su funcionamiento está basado en el principio de la reflexión total. Una fibra o hilo de "vidrio", con un índice de - refracción ligeramente mayor que su envoltura, se ilumina por uno de sus extremos. La radiación óptica se propaga a través del núcleo por reflexiones internas totales (Fig. 5). Las pérdidas o - atenuación en una fibra también se pueden clasificar en: por ab-- sorción (iones metálicos, impurezas, defectos atómicos) y por dispersión (inhomogeneidades, interfase núcleo-cubierta). El esfuerzo tecnológico se ha centrado en la obtención de un material base muy puro. La experiencia de la física y tecnología de semiconductores ha sido aplicada con éxito, habiéndose conseguido, por ej. fibras de SiO_2 con atenuaciones de unos pocos db/km. La figura 6. nos va a delimitar las longitudes de onda óptimas en nuestro sistemas de comunicaciones por fibras ópticas.

EMISORES

Consideremos ahora los fundamentos y tipos de emisores ópticos. En principio podíamos considerar: lámparas (filamento,

de arco, de gas, etc.), lasers (de gas, vidrio, estado sólido, etc.); diodos electroluminiscentes (AsGa, AsGaAl, SePb, etc.) lasers de inyección (AsGa, AsGaAl, ...). El elemento emisor debe estar muy ligado con el procedimiento de modulación. Las lámparas, lasers de gas, de vidrio, etc. necesitan un elemento modulador anexo. La modulación en frecuencia es en general muy problemática o imposible en ciertos tipos de fotoemisores. Es aquí donde no ha sido posible, por ahora, el sueño inicial de conseguir anchos de banda de 10^{12} Hz en un sistema óptico de comunicaciones. Se han desarrollado, sin embargo, diversos mecanismos para la modulación de amplitud: modulación de la potencia de bombeo; modulación por absorción; modulador-acústico-óptico; moduladores electroópticos y magnetoópticos.

Los diodos electroluminiscentes, y sus derivados los lasers de inyección, ofrecen la peculiaridad de que el control de la corriente eléctrica que produce la radiación óptica permite directamente una modulación analógica ó digital. Se comprende que esta propiedad, unida a las tradicionales ventajas de los dispositivos semiconductores (tamaño reducido, bajo consumo, fiabilidad...), hagan de los diodos EL y los láseres de inyección los emisores ópticos más adecuados para nuestro sistema. Las Figs. 7, 8, 9 nos recuerdan los fundamentos físicos, materiales semiconductores y ejemplos más importantes de los diodos EL. En relación con los láseres de inyección consideraciones de fiabilidad han hecho de los basados en una doble heterounión AsGa-AsGaAl los más adecuados (fig. 10).

FOTODETECTORES

Son varios los mecanismos por los cuales los fotones incidentes pueden producir una señal eléctrica. Bajo el punto de vista físico, la energía de los fotones debe de producir pares electrón-hueco en un semiconductor, o electrones energéticos (en un fotocátodo) capaces de saltar al exterior (caso de fotomultiplicadores). En los tubos fotomultiplicadores se ha con

seguido una notable perfección tecnológica, y esto unido al hecho de poseer ganancia interna, hace que se pueda decir que, en general, son los detectores más sensibles en el VIS, UV e IR cercano. La Fig. 11 nos indica los fotodetectores de estado sólido más importantes, y sus características, para el caso del margen del IR. Para comunicaciones ópticas los candidatos más importantes son las estructuras p-i-n y de multiplicación por avalancha construídos de Ge, Si ó AsGa. (Fig. 12 y 13).

Llegados a este punto, podemos concretar bastante la situación. La clave está en el espectro de interés en comunicaciones por fibras ópticas. En el margen de longitudes de onda 0,8 a 0,9 μ m el candidato único como emisor es el diodo de doble heterounión de AsGa-AsGaAl; como fotodetector - el Si es dominante, bien como estructura p-i-n o bajo el régimen de multiplicación por avalancha. En el margen de 1 a 1,2 μ m el emisor más logrado es el laser de YAG:Nd en 1,06 μ m, y para él el Si también puede ser adecuado aunque recientemente se han desarrollado fotodiodos de avalancha de GaAsSb e InGaAs más -- adecuados para tal longitud de onda.

CIRCUITOS

Los problemas circuitales más específicos en los transmisores y receptores de los sistemas digitales por fibras ópticas residen en: a) circuito de excitación del diodo LED ó del diodo láser emisor; b) amplificador frontal al que va conectado el fotodetector receptor. En relación con el emisor la dificultad surge de tener que producir pulsos desde centenas de mA a decenas de amperios sobre una carga fuertemente capacitiva (unión p-n polarizada muy en directo) y con tiempos de subida y bajada en la región de los nanosegundos (idealmente).

En cuanto al receptor, el diseño del amplificador previo asociado al fotodetector admite dos posibilidades básicas: el amplificador presenta una impedancia muy baja al fotodetector (amplificador de corriente) ó bien una muy alta impedancia de entrada. Estudios teóricos y experimentales han demostrado la superioridad de la segunda filosofía cuando se utilizan fo-

to detectores de avalancha. La Fig. 14, indica las estructuras generales, y además se indican varios circuitos construídos prácticamente en nuestros laboratorios.

BIBLIOGRAFIA

1. S.E. Miller y otros, "Research toward optical-fiber transmission systems". Proc. IEEE, Vol.61, pp.1703-1751, Dic,73.
2. F. Sandoval, A. García, K. Atallah y E. Muñoz, "Comunicaciones por fibras ópticas", E.T.S.I.T., 1976.

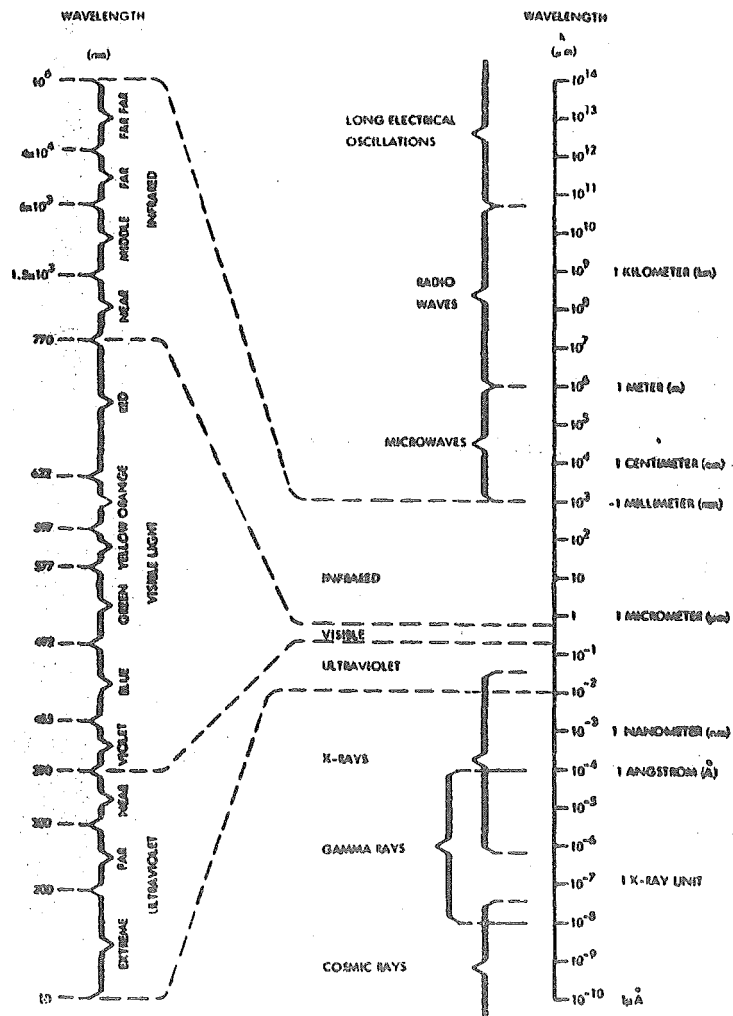


FIG.1 ESPECTRO ELECTROMAGNETICO.

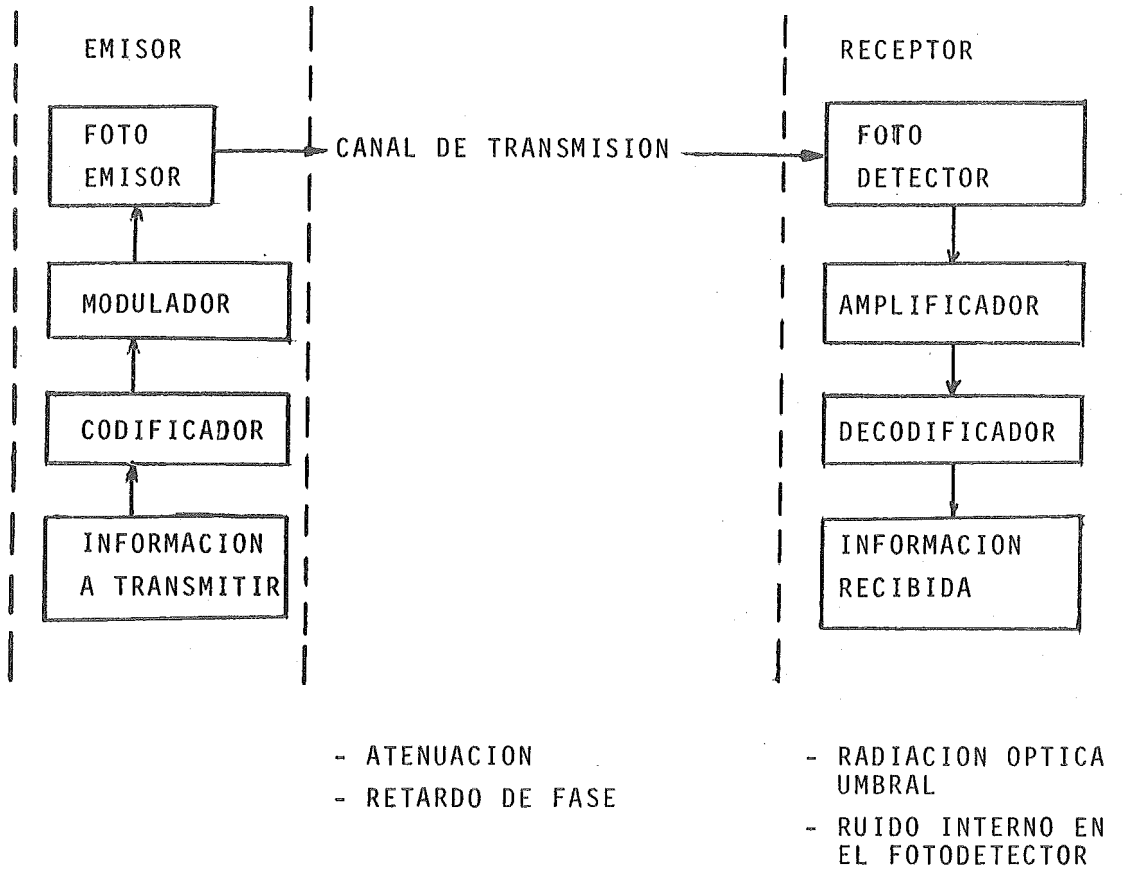


FIG.2 Diagrama básico de un sistema de comunicaciones ópticas.

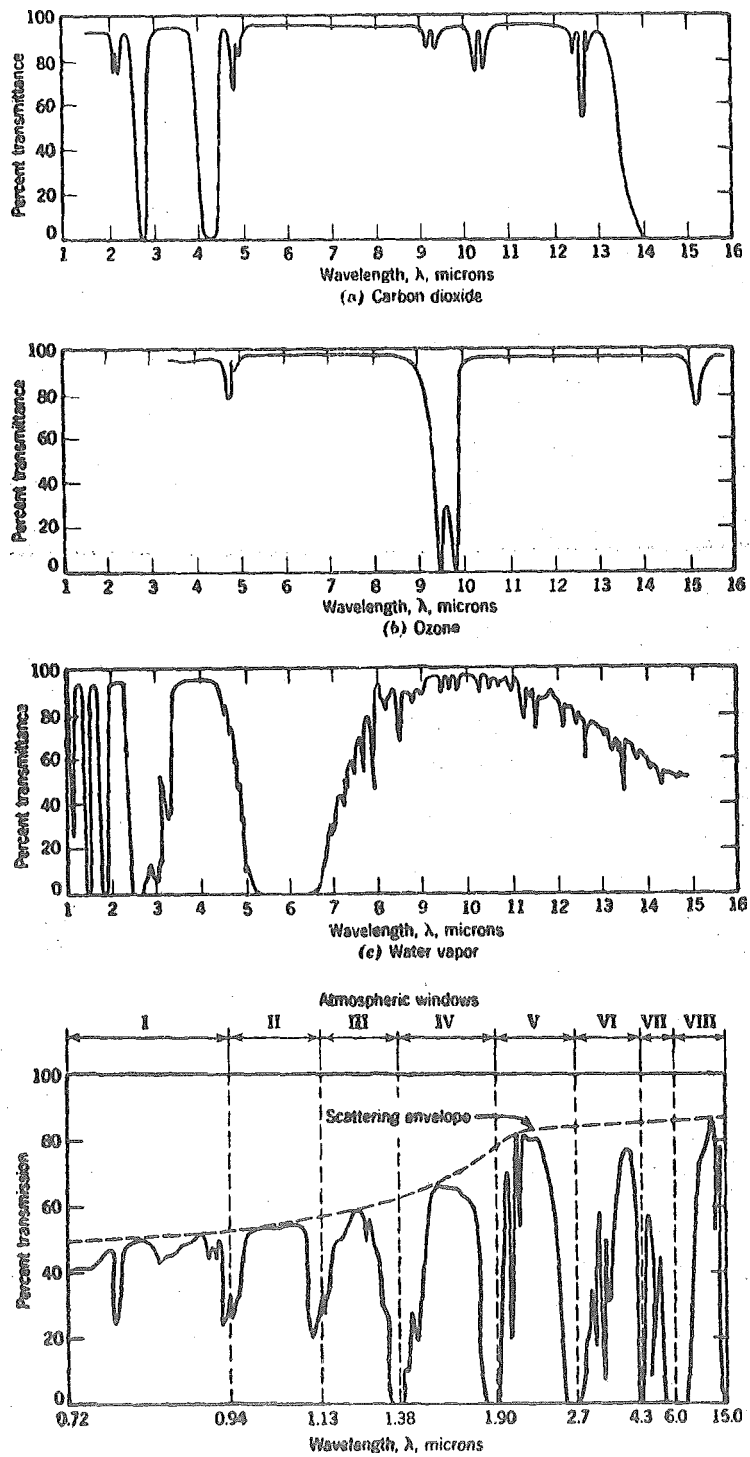


FIG. 3
PROPIEDADES DE ABSORCION Y ATENUACION
DE LA ATMOSFERA.

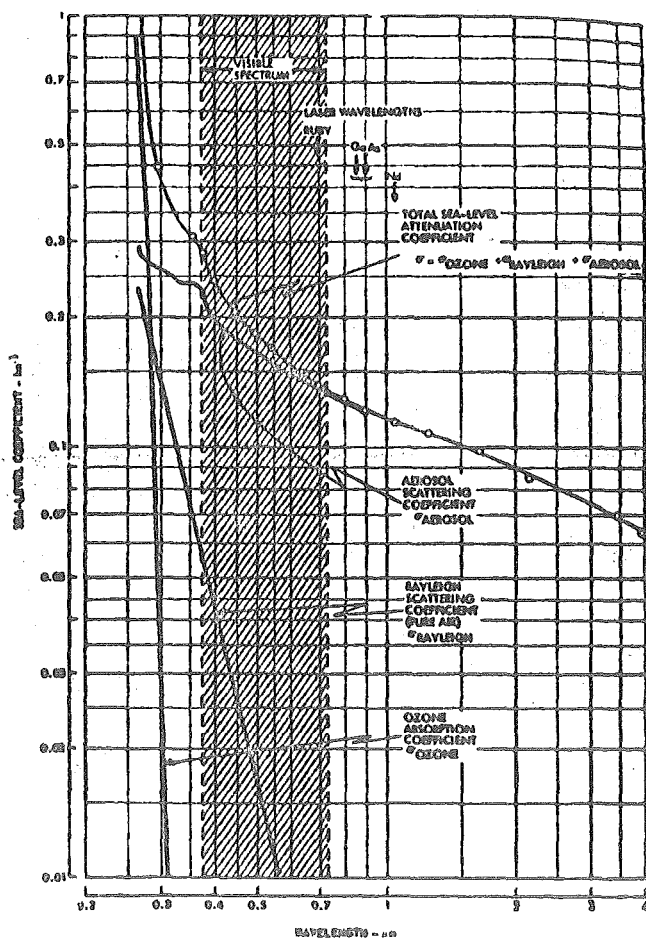


FIG.4.-COEFICIENTE DE ATENUACION EN LA ATMOSFERA AL NIVEL DEL MAR.

FIBRAS OPTICAS

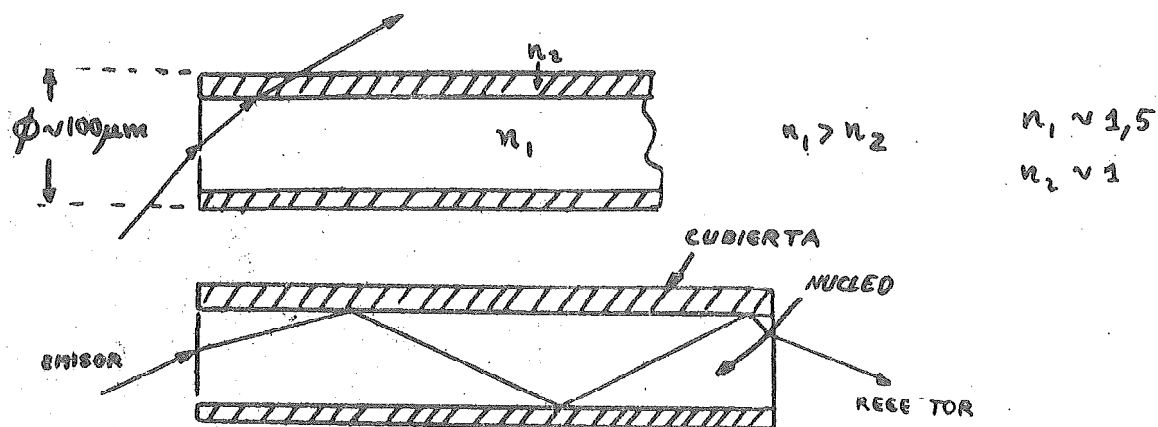


FIG.5.- Fundamento de las fibras ópticas.

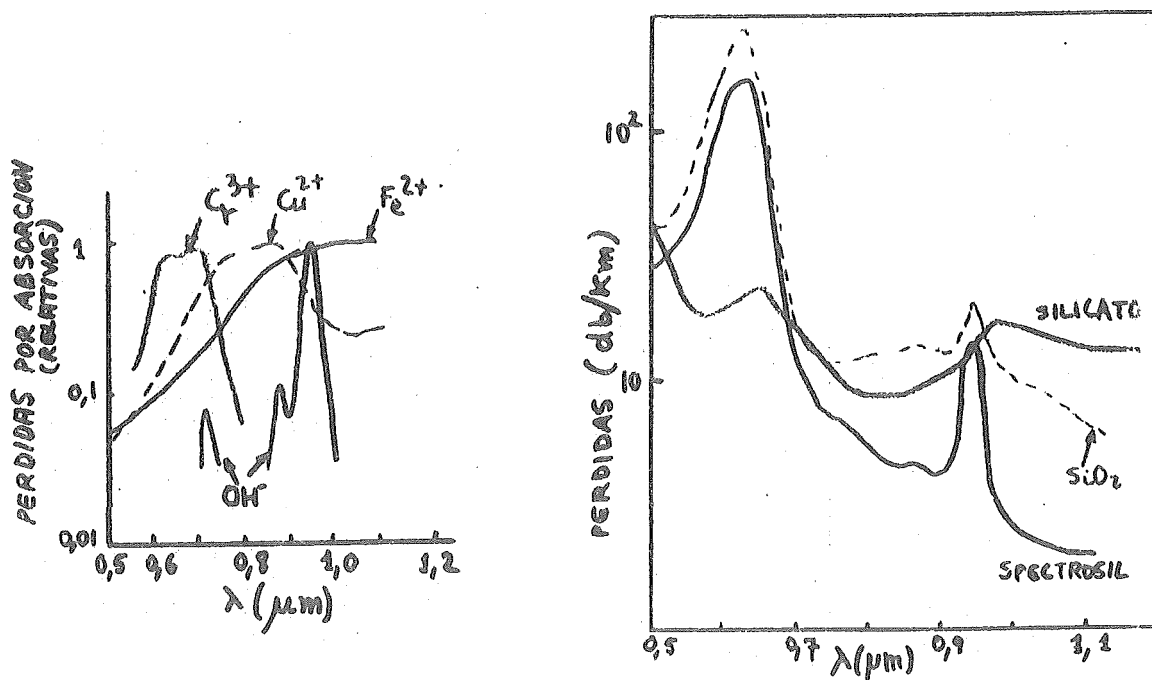


FIG.6.- Pérdidas típicas y sus orígenes en fibras de baja atenuación.

FOTODETECTORES



- CREACION PARES ELECTRON-HUECO POR LA RADIACION SI $h\nu > E_g$

- MODOS DE OPERACION DE LOS DISPOSITIVOS

- . FOTORESISTENCIA
- . FOTOVOLTAICO
- . FOTOELECTROMAGNETICO

- CARACTERIZACION

- . RESPUESTA ESPECTRAL ($R \propto \lambda^{-n_0}$)
- . SENSIBILIDAD (V/WATIO)
- . DETECTIVIDAD (D) W^{-1} ; NEP (W); ENI;
D. ESPECIFICA D^*

- DETECTORES FOTOVOLTAICOS

$$I_s = \left[\frac{1}{n_0} \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_p}} + \frac{1}{p_0} \sqrt{\frac{\mu_n}{\tau_n}} \right] n_i^2$$

- MATERIALES

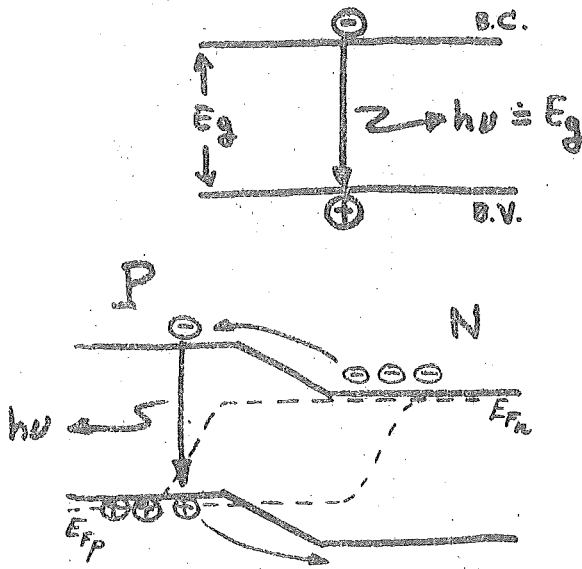
Si	(VIS)
AsGa	
SPb	
SePb	POLICRISTALINOS (I.R.)
TePb	
AsIn	(5 μ m)
SbIn	
CdHgTe	(30 μ m)
PbSnTe	
ABSORCION DE PORTADORES ($\lambda > 30\mu$ m)	

- DISPOSITIVOS PIN

- FOTODIODOS DE AVALANCHA (ganancia interna)

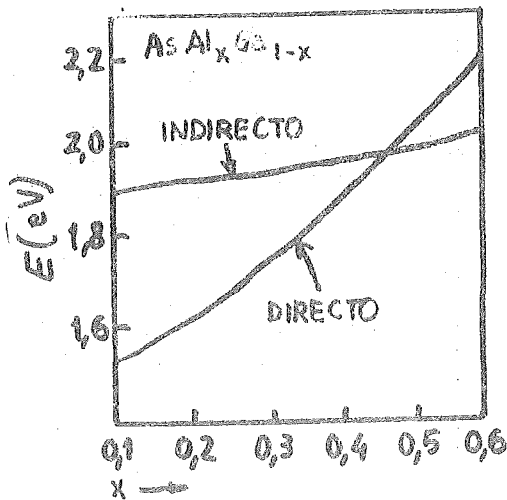
FIG.7.- Generalidades sobre fotodetectores.

Recombinación radiante : transición directa
 semiconductor con gap directo

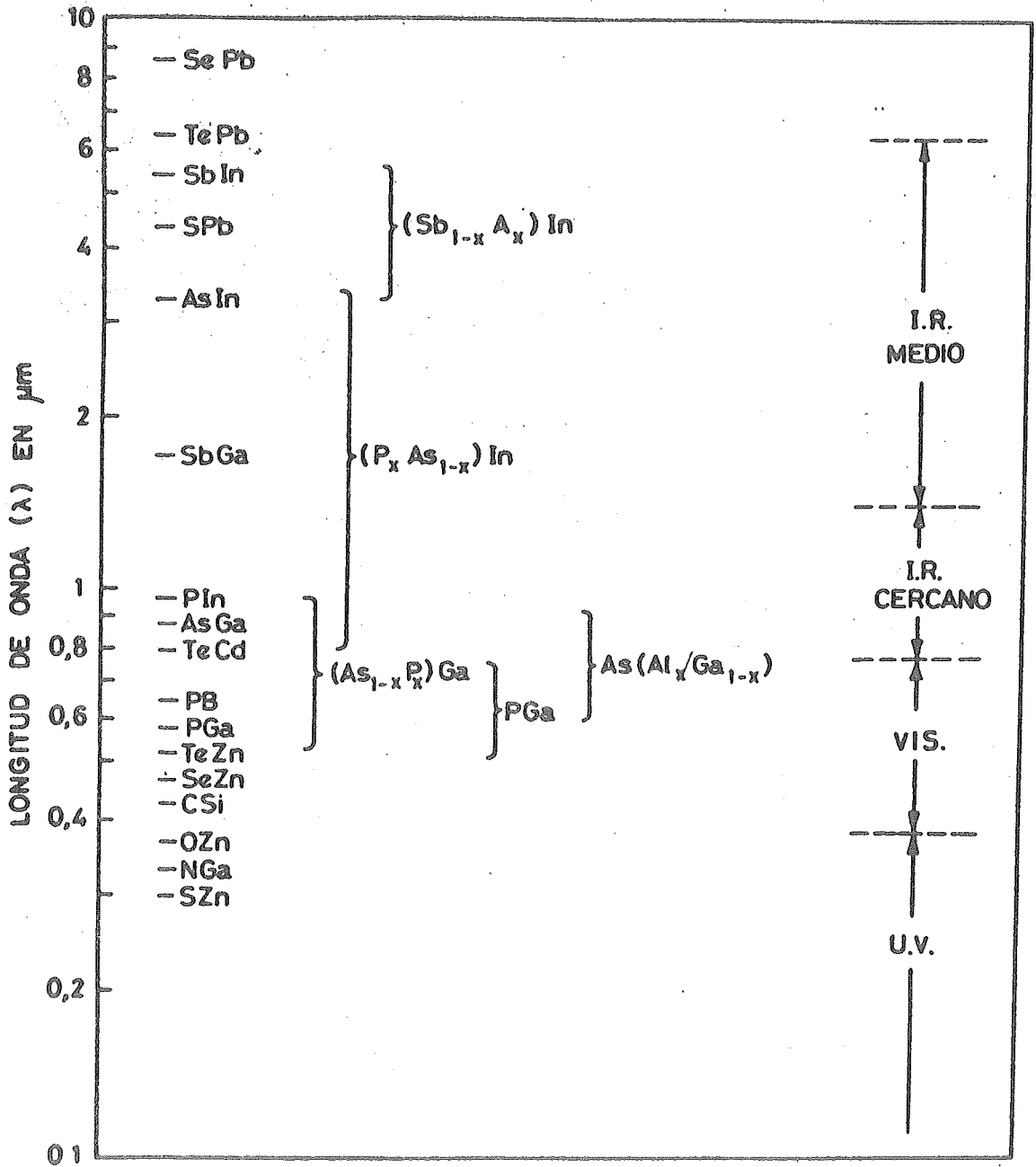


ELECTROLUMINISCENCIA
 POR INYECCION EN
 UNA UNION P-N

- Semiconductores binarios y ternarios III-V (AsGa-AsAl-PIn...)
- " " II-VI



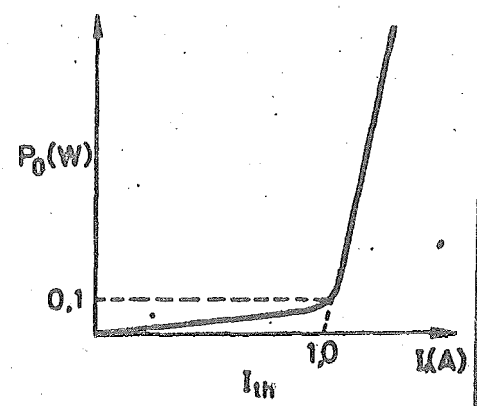
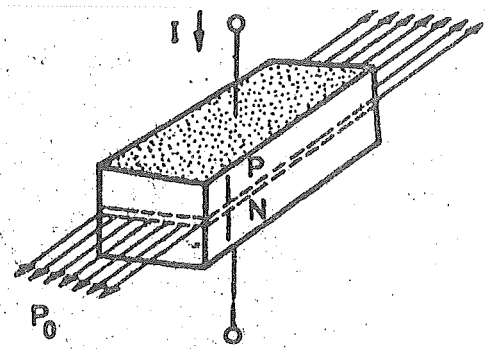
8. ELECTROLUMINISCENCIA



DISPOSITIVOS ELECTROLUMINISCENTES

FIGURA . 9

- SEMICONDUCTOR CON GAP DIRECTO
- CAVIDAD FEBRY-PEROT
- CONFINAMIENTO DE LA RADIACION Y DE LOS PORTADORES



		→ Radiación		
HOMOUNION				
UNA HETEROUNION (SH)	AsGaAl p+ AsGa p AsGa n			
DOBL HETER. (DH)	AsGaAl p+ AsGa p AsGaAl n+			
CAVIDAD OPTICA AGRANDADA ()	AsGaAl p+ AsGa p AsGaAl n+			

SePb	$\lambda = 8.5 \mu\text{m}$
SPb	4.3
AsIn	3.15
AsGaIn	0.85 → 3.15
PAsIn	0.91 → 3.15
SbGa	1.6
PIn	0.91
AsGaAl	0.9 → 0.62
PAsGa	0.55 → 0.90

FIG.10.- Láseres de semiconductores.

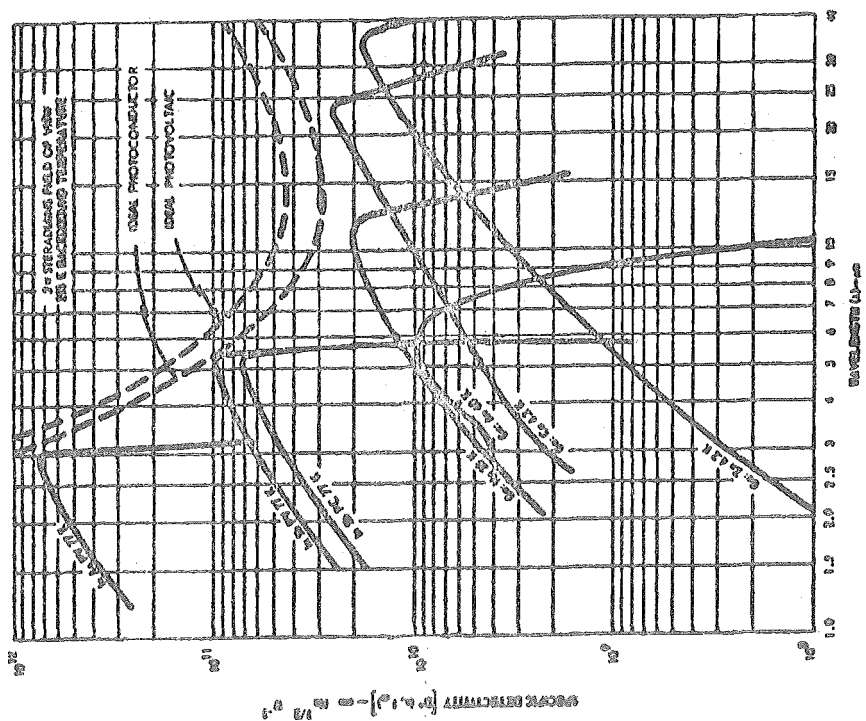
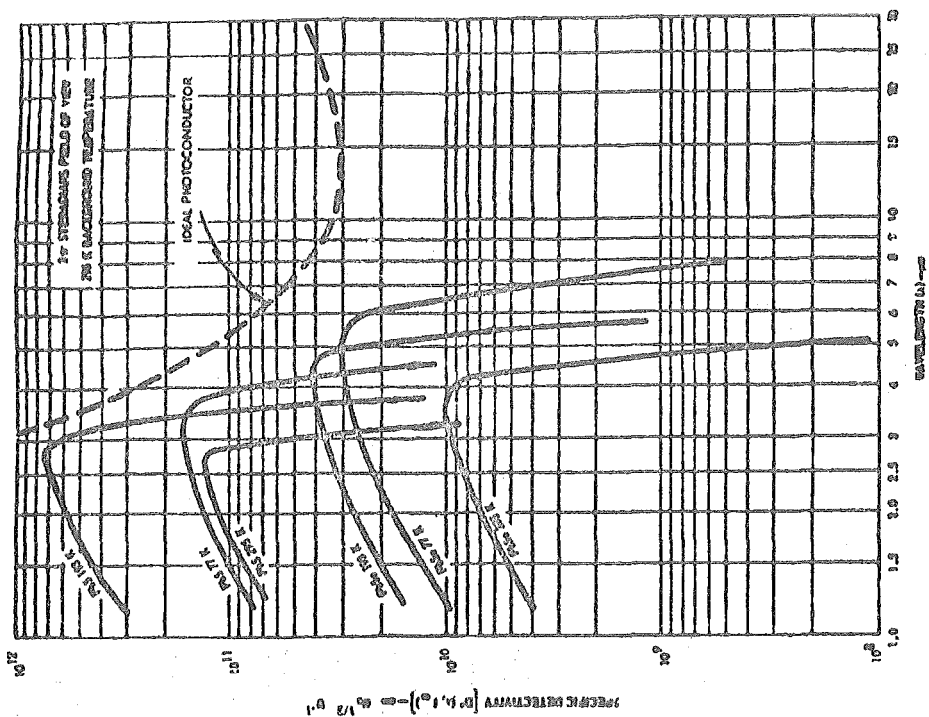
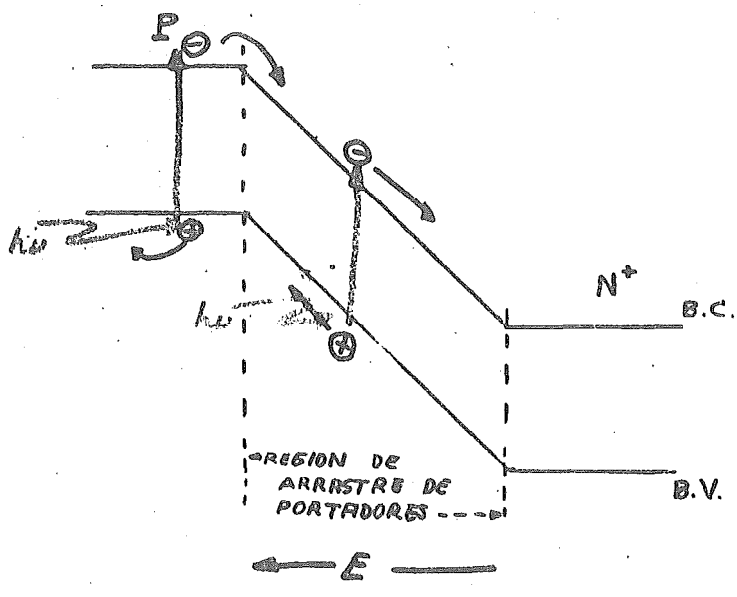
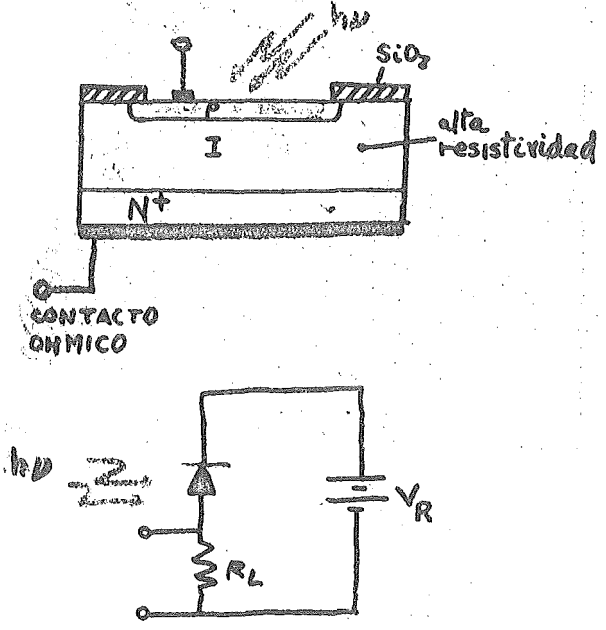
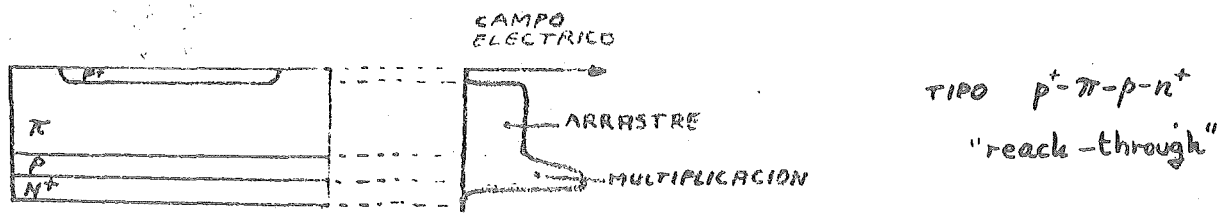
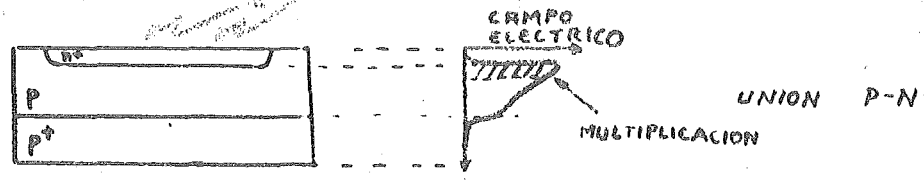


FIG. 11 CARACTERISTICAS DE FOTODETECTORES MONOCRISTALINOS Y POLICRISTALINOS RESPECTIVAMENTE.

- FOTODIODO P-I-N



- FOTODIODOS DE AVALANCHA



EFFECTO FOTOELECTRICO + GANANCIA POR AVALANCHA

FIG. 12.- Fundamentos de los fotodiodos de semiconductores y tipos principales.

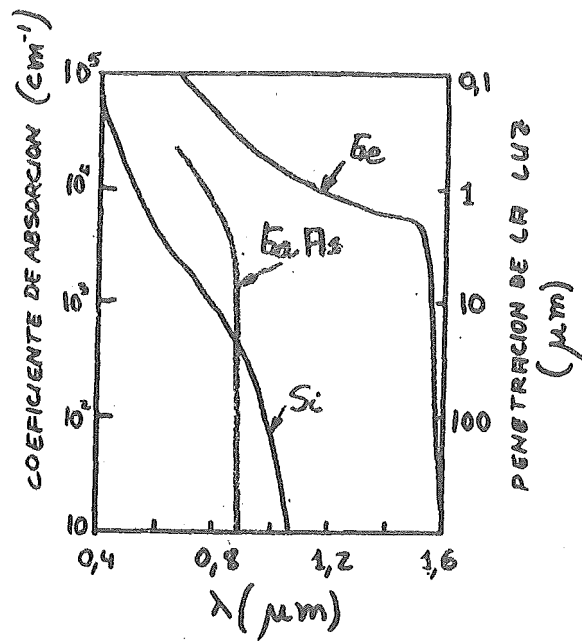


FIG.13.- Coeficientes de absorción óptica del Si, Ge y AsGa.

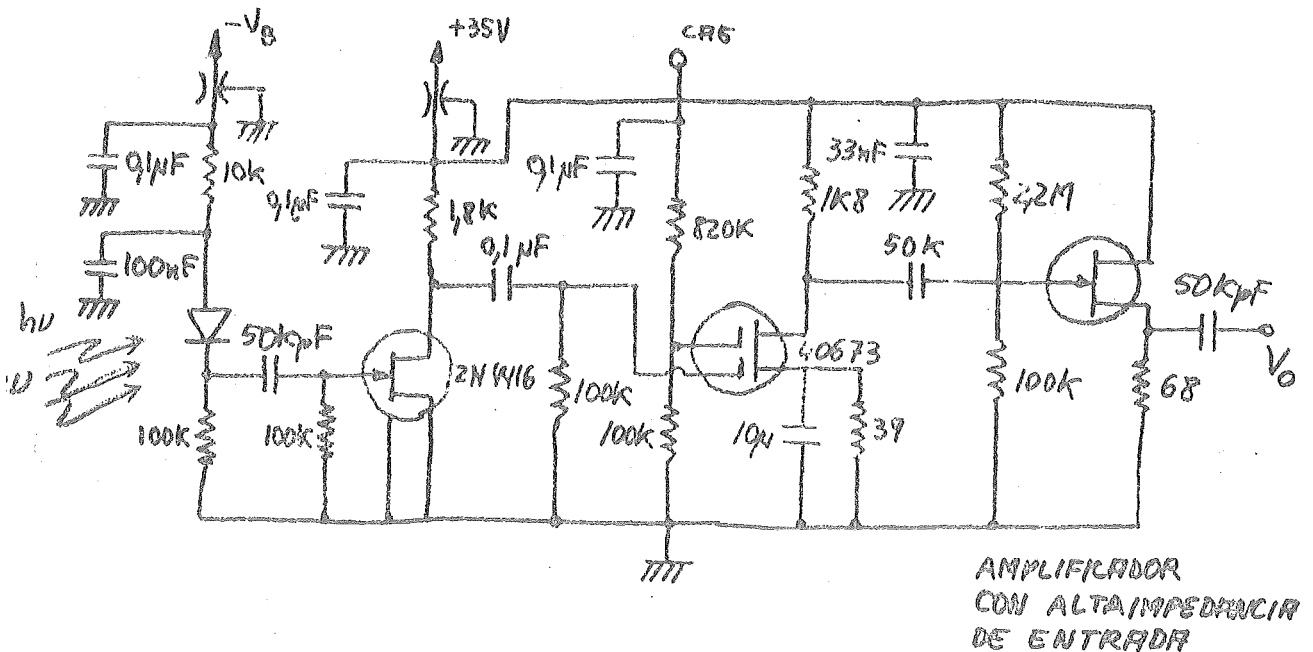
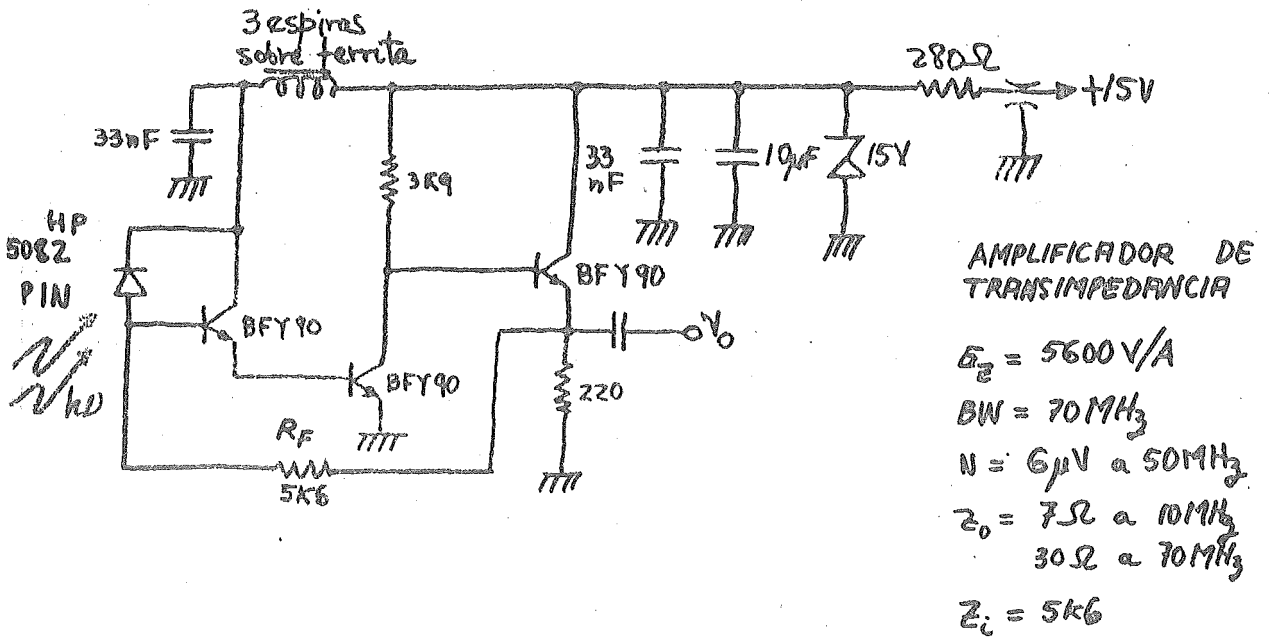
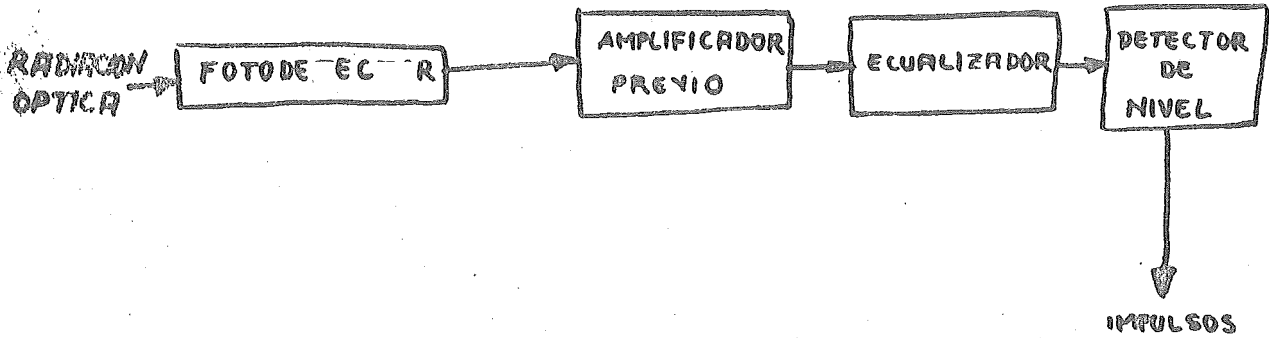


FIG.14.- Circuito receptor.

EMISOR OPTICO

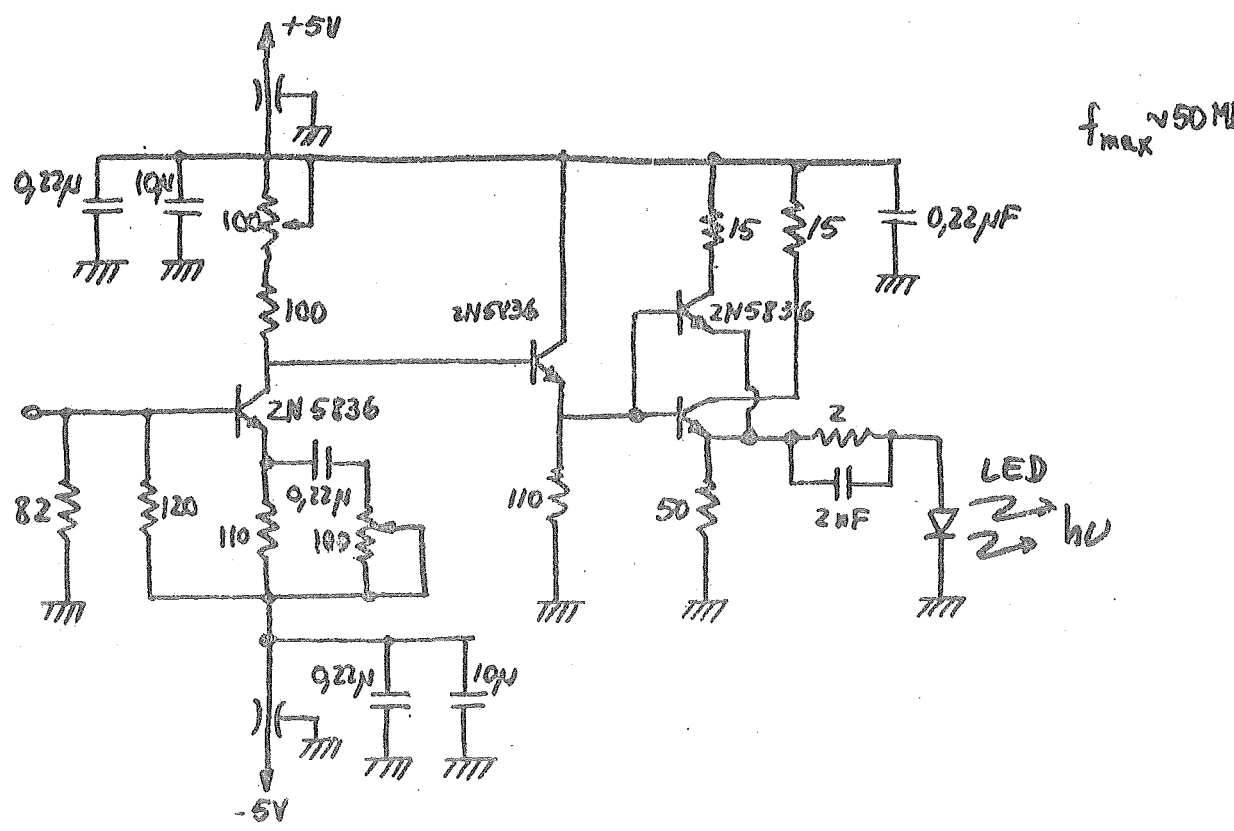
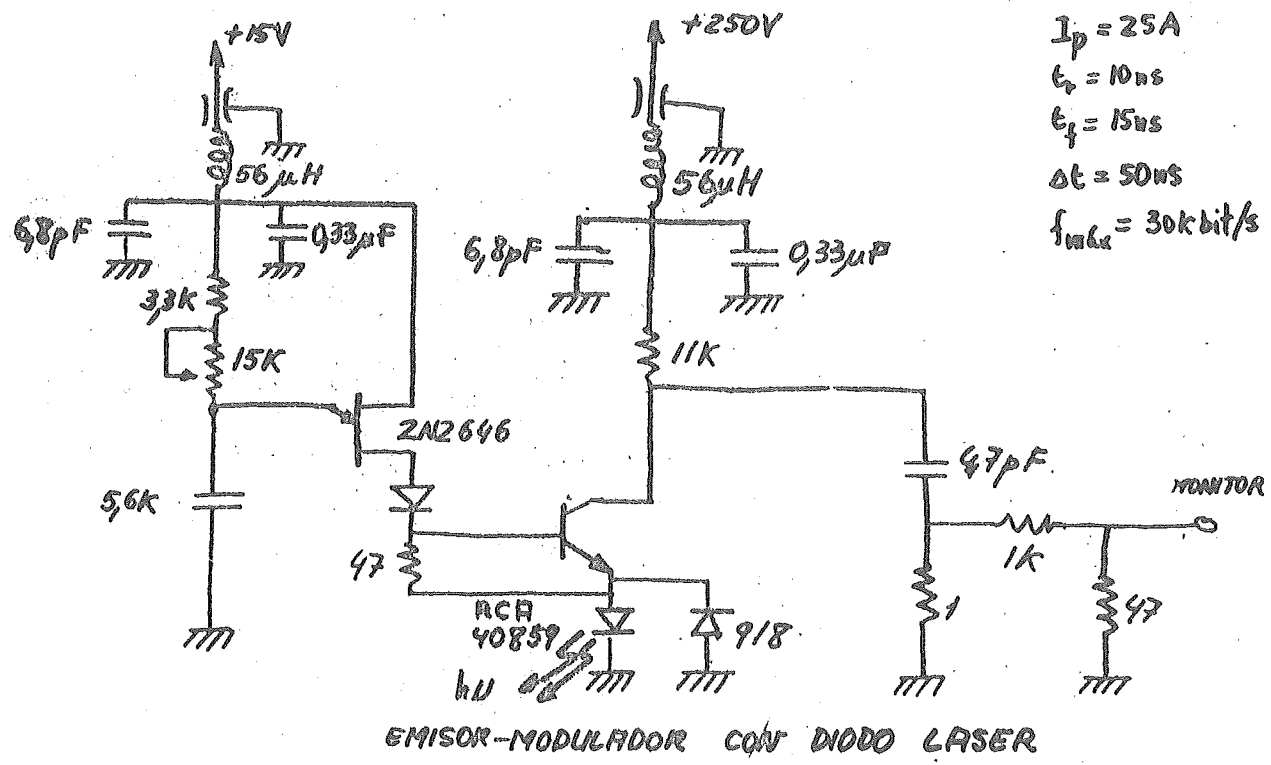


FIG. 15.- Circuito emisor.

PERSPECTIVA GENERAL DE LAS FIBRAS OPTICAS. SITUACION ACTUAL

Por:

Carlos Llanos Garcés

Cátedra de Tecnología de Fabricación.
E.T.S.I. Telecomunicación. U.P.M.

INTRODUCCION

Una fibra óptica como medio de transmisión es en realidad una guíaonda dieléctrica que consta, en esencia, de dos cilindros concéntricos. El interior o núcleo conduce la onda óptica y el exterior o cubierta tiene un índice de refracción ligeramente inferior al del núcleo.

A consecuencia de esta estructura de índices de refracción los rayos luminosos viajan por el núcleo y, cuando alguno alcanza la capa de depuración entre núcleo y cubierta con un ángulo igual o mayor que un ángulo crítico (definido por los dos índices de refracción), se refleja totalmente. De esta forma, la mayor parte de la energía luminosa se transmite por el interior del núcleo y solo una pequeña parte se transmite, a su vez, por la cubierta.

La radiación contenida en el ángulo máximo (θ_1) que puede aceptar una fibra depende unicamente de los índices de refracción del núcleo y de la cubierta (n_1 y n_2 respectivamente), y se define habitualmente en función del concepto de apertura numérica - (A.N.), de acuerdo con la expresión:

$$A.N. = \text{sen}\theta_1 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

A la propagación de la luz contribuyen los rayos meridionales, así como los oblicuos cuyas trayectorias no pasan por el eje de la fibra. Sin embargo, para estudiar el aspecto físico de la fibra óptica es suficientemente bueno el modelo de los rayos meridionales, no así cuando se consideran otros aspectos tales como la distribución de la potencia luminosa en el extremo de la fibra o la optimización de su estructura, en que es preciso considerar los rayos oblicuos.

A través de la fibra unicamente se propagan un cierto número de modos, puesto que es una transmisión electromagnética guiada,

cada uno con su constante de propagación y con diferentes velocidades de grupo. El número de modos transmitidos depende de:

- La relación entre el diámetro del núcleo y la longitud de onda de la luz.
- apertura numérica

Tipos de fibras

Se pueden distinguir los siguientes tipos de fibras:

- Fibras de índice abrupto
 - Fibras de índice gradual
- | | |
|---|-----------|
| { | Multimodo |
| } | Monomodo |

I.- FIBRAS MULTIMODO

Este tipo de fibra tienen un diámetro de núcleo relativamente grande, mientras que la cubierta es comparativamente delgada. Tienen capacidad para transmitir muchos modos. La mayor parte de la energía se retiene en el núcleo, de forma que la cubierta tienen una contribución muy pequeña a las pérdidas totales. Un diagrama de rayos de la fibra multimodo sería el indicado en la figura.

Es la fibra de más fácil manejo, en cuanto a empalmes y emisión de la luz, pero por el contrario está limitada en su capacidad de anchura de banda. Por supuesto ésta anchura de banda depende de muchos factores, tales como diámetro del núcleo, material del núcleo, espesor de la cubierta, material de la cubierta, diferencia de los índices de refracción de núcleo y cubierta, etc. Actualmente el límite está entre 5 y 500 Mbits/seg/Km.

Las dimensiones típicas son:

- Diámetro del núcleo 30 - 90 μm
- Diámetro de la cubierta 100 -150 μm
- Índice de refracción del núcleo 1,45
- Diferencia de índices de refracción 0,5%

II.- FIBRAS MONOMODO

En esta fibra el diámetro del núcleo es muy pequeño, del orden de 3 μm .

Debido a su extremadamente fino núcleo, este tipo de fibra solo transmite un modo, que es el modo dominante HE_{11} , todos los demás modos se encuentran por debajo de corte.

Estudiando el diagrama de rayos luminosos por la fibra monomodo se observa que solo se transmite aquel cuyo ángulo con el eje es lo suficientemente pequeño como para que se pueda reflejar en la unión del núcleo con la cubierta, mientras que todos los demás rayos se refractan y se pierden.

Esta es la fibra que presenta mayores dificultades para su manejo, especialmente para uniones y potencia de la emisión luminosa, etc. Pero como contrapartida admite la mayor capacidad de anchura de banda, pudiendo transmitir hasta 10 Gbits/seg/Km. (Con muy baja dispersión temporal).

Las dimensiones típicas son:

- Diámetro del núcleo 3 μm
- Diámetro de la cubierta 50 - 100 μm
- Índice de refracción del núcleo 1,5

- Diferencia de índices de refracción 1%

III.- FIBRAS DE INDICE GRADUAL

En estas fibras no existe una diferencia entre núcleo y cubierta como en las vistas anteriormente. Es decir, que no existe un salto en la diferencia de índice de refracción del núcleo y cubierta, sino que el cambio de índice se va produciendo de una forma gradual, disminuyendo progresivamente según se va alejando del eje de la fibra.

El diagrama de rayos que determina el proceso de la transmisión en estas fibras es el que se muestra en la figura. Como se observa esta estructura tiene ventajas desde el punto de vista de transmisión, puesto que es posible tener guías de muy baja dispersión temporal con diámetros de núcleo relativamente altos. Igualmente reduce las pérdidas por reflexión.

El perfil del índice a lo largo del radio del núcleo viene dado por la expresión

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

donde:

$n(r)$ = índice de refracción a distancia r del centro del núcleo.

$n(o)$ = índice de refracción en el centro del núcleo

a = radio del núcleo

Δ = diferencia relativa entre los índices de refracción del centro del núcleo y la cubierta

α = parámetro que define la forma del gradiente del perfil del índice de refracción e influye sobre la igualación de las velocidades de grupo de los modos transmitidos.

El valor óptimo de α está próximo a 2, depende de la composición del núcleo y de la longitud de onda de la luz.

La capacidad de anchura de banda de esta fibra es intermedia entre las monomodo y multimodo, y puede alcanzar 2 Gbits/seg/Km. Admite muchos modos con aproximadamente la misma velocidad de grupo.

Su dimensión típica es un diámetro del orden de 200 μ m.

Materiales

Un importante problema es el de la atenuación de la luz en su recorrido a través de la fibra, debido fundamentalmente a dos mecanismos íntimamente ligados con el material o materiales utilizados en la composición de la fibra. Estos mecanismos son: la absorción de la energía luminosa, y la dispersión o difusión de las ondas en su desplazamiento.

La absorción depende de la pureza del material, donde son muy importantes cualquier tipo de impurezas, pero influyen especialmente las impurezas de ciertos metales y del agua (ion OH^-).

La difusión depende de la falta de uniformidad, particularmente en la unión entre el núcleo y la cubierta, debido a partículas de impurezas o burbujas en el material del núcleo, lo que a la longitud de onda de la luz transmitida hace que el material tenga aspecto granular, de tal manera que al aumentar la longitud de onda disminuye la dispersión.

Por ello, es importante la elección del tipo de material constitutivo de la fibra. En esta elección influirían diversos factores, entre otros:

- Dominio espectral en que va a trabajar
- Bajas pérdidas en la banda pasante

- Fácil tecnología de fabricación
- Posibilidad de índices variables

Teniendo en cuenta que algunos factores que pueden influir en el material son fijos dentro de unos ciertos márgenes, como por ejemplo: longitud de onda utilizada entre 800 y 900 nm; los emisores que mejor se adaptan son los diodos electroluminiscentes LED, láseres semiconductores $Ga_{1-x}Al_xAs$, y láseres de matriz dopada por Neodimio; etc. Se pueden comenzar a determinar algunos materiales que darán los mejores resultados para cada uno de los tipos de fibras estudiados. De esta manera y considerando que los núcleos serán siempre muy finos (2 a 90 μm), así como que las distancias entre repetidores serán de varios kilómetros, parece aconsejable pensar en materiales isotropos, como son los vidrios, dentro de estos particularmente la sílice.

Con estas premisas el índice de refracción de la cubierta debe de encontrarse entre 0,5 y 2% por debajo del índice del núcleo. Con lo que la A.N. es de 0,1 a 0,4.

Parámetros característicos

Los parámetros más importantes de una fibra óptica son: atenuación y dispersión.

- Atenuación: Los mecanismos de reducción progresiva del nivel de la intensidad luminosa a lo largo de la fibra, son dos:
 - Absorción o conversión de la luz en calor. Las causas fundamentales son las interacciones entre los fotones y las vibraciones moleculares, la presencia de impurezas fundamentalmente iones de metales de transición e iones hidróxilo (OH^-), y los defectos atómicos estructurales.
 - Difusión (Scatter) o fuga de los modos conducidos por la fibra. Se produce a consecuencia de la dispersión de las radiaciones

al propagarse en la fibra bien por causas intrínsecas como las fluctuaciones térmicas que hacen variar el índice de refracción o la composición del material (Rayleigh), bien por inhomogeneidades del material tales como burbujas de gas, desvitrificaciones o separaciones de fase, o bien por irregularidades en el diágrama del núcleo.

Una medida de la atenuación se realiza comparando el nivel de la intensidad luminosa en el extremo final de la fibra, con el nivel detectado después de que la luz atraviere unos pocos metros de la misma fibra, esta medida se dá como

$$\alpha \text{ (dB/Km)} = \frac{1}{L} 10 \lg \frac{I_2}{I_1}$$

L = longitud de la fibra (Km)

I_2 = intensidad medida en el extremo de la fibra

I_1 = intensidad medida después de unos 3 m de fibra

Otro aspecto importante que hay que considerar es la variación de la atenuación en la fibra con la longitud de onda de la luz transmitida o atenuación espectral, que como se puede observar en la figura determinará las ventanas en las cuales es factible operar dada su baja atenuación, como son por ejemplo las del orden de 850 nm y 1100 nm.

Valores de atenuación facilmente repetibles actualmente son inferiores a 5 dB/Km, con cotas mínimas alcanzadas de 1,5dB/Km. (Para fibras de sílice)

- Dispersión: es una función de la respuesta temporal de la fibra, que da lugar a un ensanchamiento de los impulsos en el extremo final de la misma. Este parámetro es crítico cuando se desea transmitir grandes capacidades de información con velocidades altas y a distancias largas, puesto que puede dar lugar a la con

fusión de impulsos.

Las causas fundamentales de la dispersión son:

- Dispersión del material. Debido a que el índice de refracción del material varía con la longitud de onda.
- Dispersión modal. Se debe a las diferentes velocidades de grupo de los modos, ya que los que se desplazan paralelos al eje de la fibra, lo hacen con mayor rapidez que aquellos que sufren reflexiones, puesto que su recorrido es más largo. Se puede reducir disminuyendo el número de modos a captar por la fibra.
- Dispersión espectral. Se debe a la anchura de banda de la luz transmitida que afecta a cada modo particular. Se reduce eligiendo una fuente luminosa de gran coherencia temporal. (ancho de banda estrecho)

La anchura del impulso de salida se incrementa por estos factores, en forma lineal de acuerdo con el aumento de la longitud de la fibra, por consiguiente se mide la dispersión por unidad de longitud.

La medida del parámetro se realiza comparando las anchuras de los impulsos de entrada y salida, por medio de la expresión:

$$t = (T_2^2 - T_1^2)^{1/2}$$

donde T_2 : anchura mitad del impulso de salida

T_1 : anchura mitad del impulso de entrada

Este problema se reduce en las fibras de índice gradual, en las que las velocidades de grupo de los modos propagados tienen valores muy próximos. Y prácticamente es nulo en las fibras monomodo donde solo se transmite un modo paralelamente al eje del núcleo.

En la actualidad, teniendo en cuenta los bajos valores de atenuación alcanzados, inferiores a 5dB/Km con repetibilidad, el más importante condicionante de las fibras es precisamente la dispersión que dificulta la resolución de los impulsos en el extremo receptor, dando lugar a una limitación real en la capacidad de transmisión de información de la fibra, la cual presentará una frecuencia de corte del orden de 20 MHz las multimodo y cientos de MHz en las de índice gradual.

Valores alcanzados, actualmente, en la producción de fibras están entre 3 y 6 ns/Km.

Técnicas de fabricación

Dentro de las fibras de vidrio hay que distinguir entre fibras dos índices de refracción diferentes, es decir, las que presentan núcleo y cubierta claramente diferenciados (monomodo o multimodo), y fibras de índice gradual, puesto que sus técnicas de fabricación serán esencialmente distintas.

Para obtener fibras de dos índices se emplean dos procedimientos:

- Método del doble crisol
- Método de la preforma

Para fibras de índice gradual se emplea básicamente:

- Método de la deposición química de vapor (CVD).
- Método del doble crisol

Este método utiliza dos crisoles concéntricos (generalmente de platino), rellenos previamente con los vidrios fundidos de nú-

cleo en el crisol interior y de cubierta en el exterior; todo ello instalado dentro del horno de calentamiento.

Entre las ventajas de este método figura el permitir un buen control geométrico de la fibra.

- Método de la preforma

Para evitar el inconveniente de la elevada contaminación que se aprecia en el método anterior, se emplea el de la preforma, técnica mucho menos polutiva por no necesitar el empleo de crisoles. En la figura se aprecia el procedimiento, en el que se parte de unas preformas que deberán ser lo más puras posibles.

- Método de la deposición química de vapor

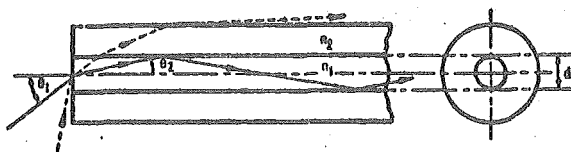
El método de mayor difusión consiste en partir de un tubo de sílice a través de cuyo interior se hacen circular gases reactivos que contienen los dopantes como germanio, boro, etc que se van depositando por capas en el interior del tubo.

A continuación se somete el tubo a un tratamiento térmico en un horno, al tiempo que se estira, con lo cual se produce una contracción convirtiéndose en una varilla, o preforma a partir de la cual se obtiene la fibra por estirado.

Cables de fibras

La fibra constituida por el núcleo y la cubierta, se protege a continuación con recubrimientos plástico que se aplican en dos etapas, la primera durante el mismo proceso de estirado de la fibra, su misión es evitar la degradación de las características mecánicas de la fibra, la segunda proporciona a la fibra un diámetro del orden de 1 mm y además de protegerla hace que sea manejable.

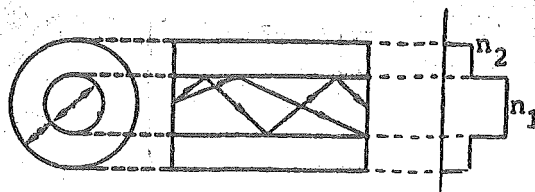
No obstante la fibra así constituida todavía no es útil para algunas de las aplicaciones, en las que es preciso realizar cables ópticos constituidos por varias fibras, en los que se incluye un elemento de refuerzo que le proporciona mejores características mecánicas. Existen diversos diseños de la geometría - del cable, de acuerdo con el tipo de aplicación y el grado de protección requerida.



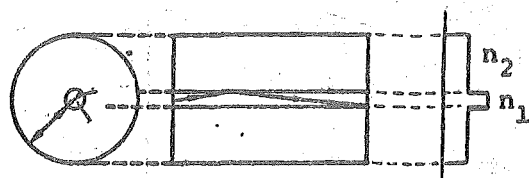
Apertura numérica $A.N. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin\phi_1 = n_1 \sin\phi_2$

Variación del índice

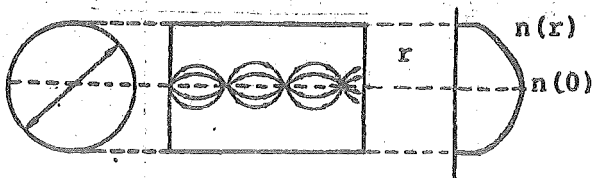
MULTIMODO



MONOMODO



INDICE GRADUAL

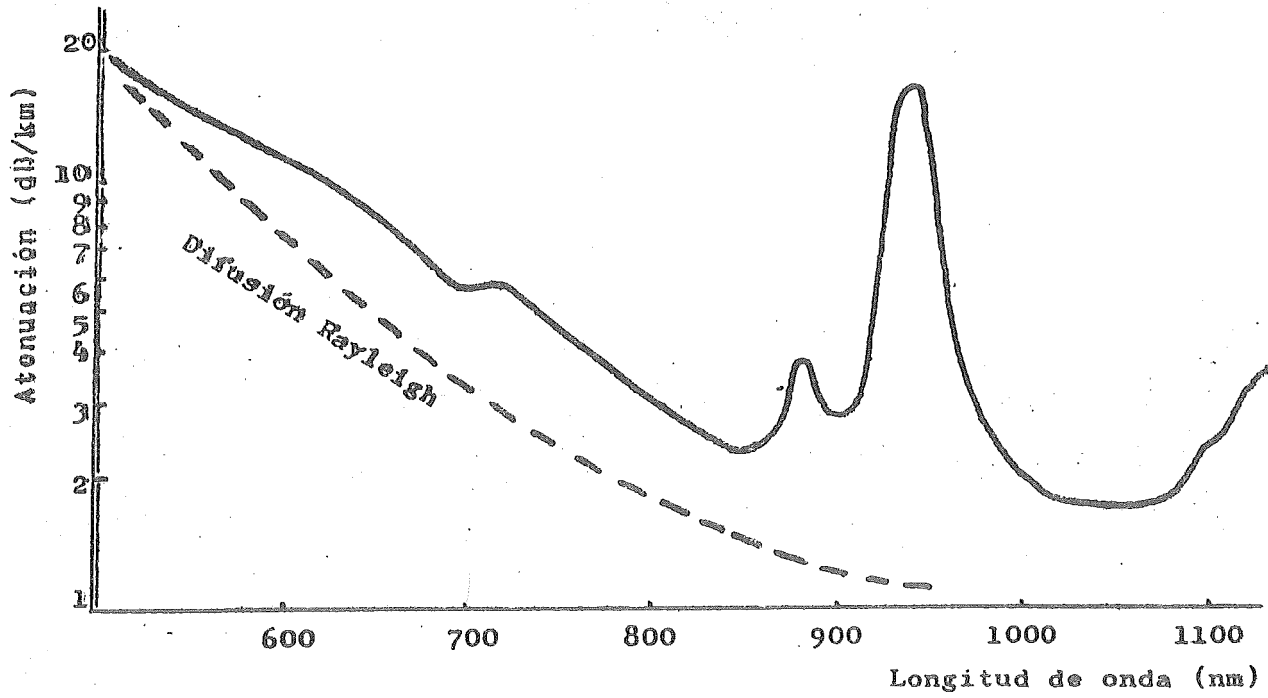


$$n(r) = n(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2}$$

Medida de la atenuación

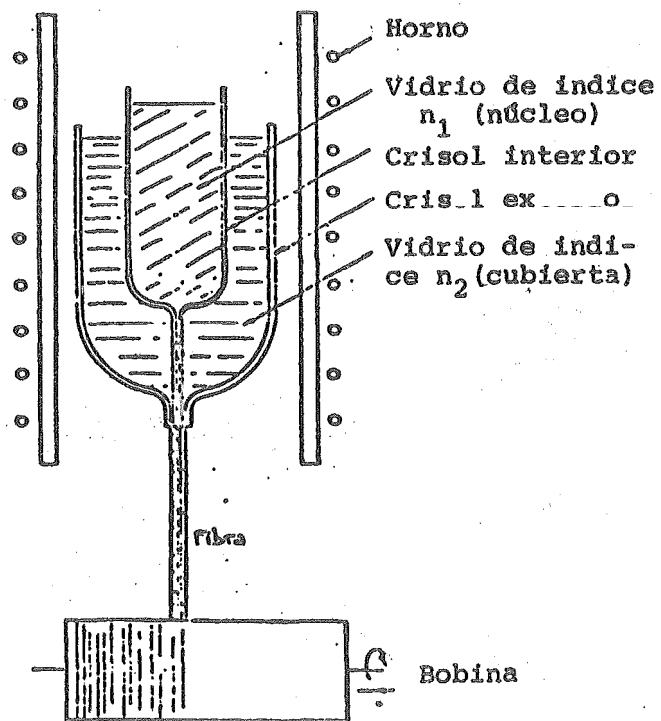
$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \cdot \lg \frac{I_2}{I_1} \quad (\text{dB/km})$$

Atenuación espectral

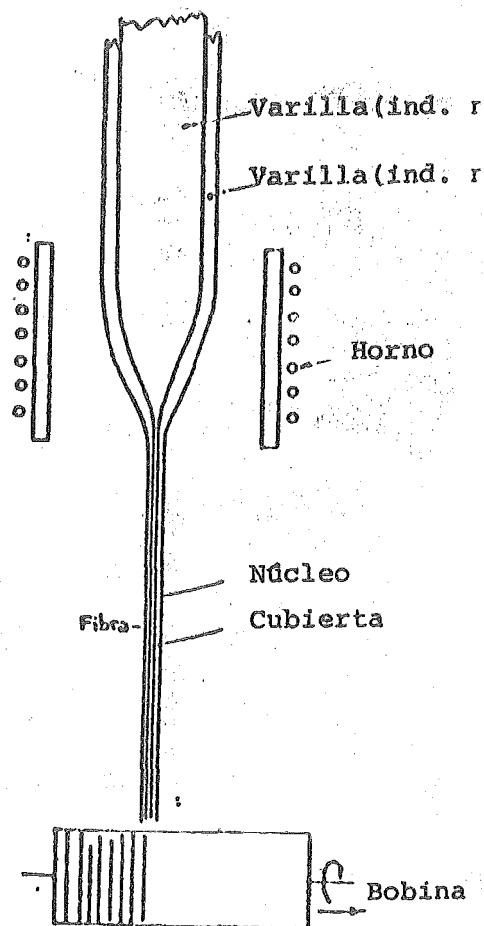


Dispersión temporal

$$t = (T_2^2 - T_1^2) \cdot 1/2$$



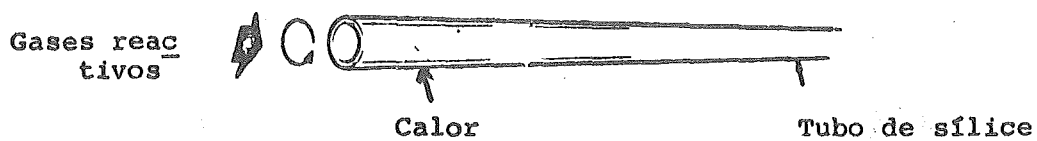
DOBLE CRISOL



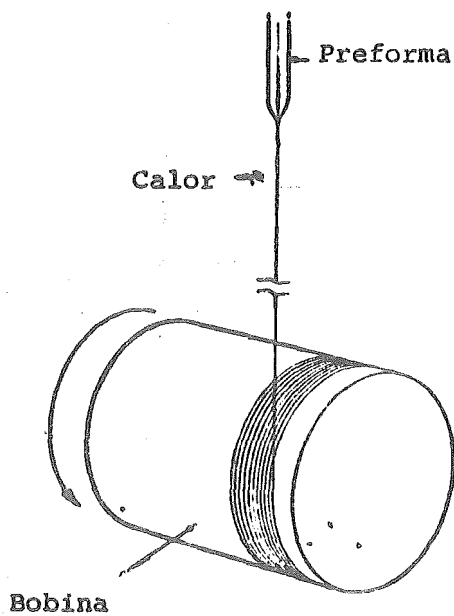
PREFORMA

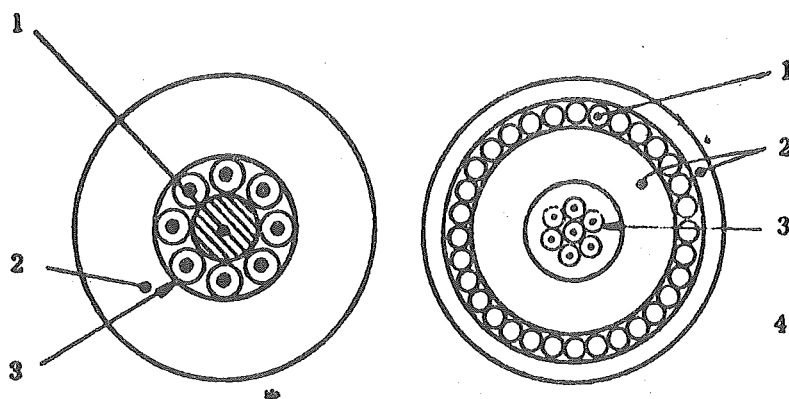
M E T O D O C V D

Deposición



Contracción





- 1.- Elemento de refuerzo (metal o plástico)
- 2.- Cubierta (PE)
- 3.- Fibras Ópticas

CARACTERISTICAS TECNICAS DE INSERCCION Y ACOPLAMIENTO DE
FIBRAS OPTICAS

Por:

José Atin Baibás
Dr. Ciencias Físicas
C.I.E. - C T N E

I.- TECNICAS DE INSERCCION Y ACOPLAMIENTO

A efectos de acordar un lenguaje común, denominaremos inserción a todo empalme entre componentes activos (fotoemisores o fotodirectores) y fibra óptica, y por acoplamiento a todo empalme entre fibras. (Fig. 1)

Cualquiera sea la técnica de empalme a utilizar, su eficiencia estará gobernada por parámetros radiométricos. En tal sentido, se deberá tener en cuenta distribuciones y cantidades de intensidad luminosa, así como las geometrías de las superficies activas.

A la hora de considerar una técnica de empalme con proyección a su empleo en sistemas de transmisión aptos para su explotación, los requerimientos-base sobre los que se debe asentar la elección deben ser:

- 1° Eficiente: mínima pérdida de empalme
- 2° Resistente: según se trate de un empalme fijo o desmontable, debe ser de fácil manipulación y de ajuste estable.
- 3° Repetitivo: en el caso de empalme desmontable, debe - ofrecer una mínima desviación en sus valores de atenuación.

En el caso de que el empalme deba ser realizado en planta, será necesario el diseño de unas herramientas específicas y de sencilla manipulación. En tal sentido, y contra lo que aparentemente cabe esperar, las tolerancias en tales diseños, no tienen por qué realizarse bajo severas exigencias, pues la portadora óptica presenta la ventaja de que la realización del ajuste del empalme puede ser realizado con el enlace en activo.

Para que los requerimientos mencionados se vean satisfechos, es necesario tener en cuenta parámetros de distinta naturaleza y sobre los que se exigirán determinados márgenes. En tal sentido, tales parámetros son:

- 1° Geométricos: dimensiones de áreas emisoras y receptoras de luz, enfrentamiento y proximidad entre tales caras.
- 2° Refractométricos: coeficientes de reflexión, índices de refracción (presión, temperatura)
- 3° Mecánicos: ajustes.

Los tres empalmes a tener en cuenta, cara al diseño de la técnica a utilizar son:

- A.- Inserción A1 fotoemisor-fibra
 A2 fibra-fotodetector
- B.- Acoplamiento B1 fibra-fibra
 B2 cable-cable

En el caso A1 existen tres opciones. La primera, la más inmediata es la de recurrir al embutido de la fibra en la zona de emisión del fotoemisor, recurriendo a una microlente intermedia, en el caso de que la sección activa del fotoemisor sea menor que la del núcleo de la fibra. Esta opción obliga a la fabricación de emisores teniendo en cuenta que la fibra embutida deberá ser acoplada a la portadora, y que a efectos de evitar pérdidas y dispersiones normales o modales, interesa sean lo más equivalentes posible. La segunda opción es la de contacto óptico entre las áreas activas, y que siendo las más cómodas a efectos de reparación, podrá ser realizado mediante un conector mecánico. Obsérvese que la primera opción implica un empalme fijo, mientras la segunda uno desmontable.

Para el caso A2, la eficiencia en la fotodetección está di

rectamente relacionada con el área activa del fotodetector. Por tal razón, si bien puede realizarse una fijación mediante un pegamento adecuado, también puede recurrirse a un conector mecánico por contacto óptico.

Obsérvese que en las técnicas de inserción mencionadas, no hemos hablado de instrumentos ópticos que optimizarán los flujos de energía en aras de una mejora de eficiencia. Tal inclusión obligaría a tener en cuenta aspectos de rigidez mecánica ajenos a las secciones activas a insertar.

En ambos acoplamientos, fibra-fibra y cable-cable, se trata de realizar una unión donde los parámetros característicos de propagación de la radiación óptica se mantengan al pasar de una fibra a otra fibra, por lo que las técnicas a emplear difieren de las anteriores, en las que lo que se pretendía era aprovechar al máximo el flujo óptico en juego.

II.- PARAMETROS DE DISEÑO

Si bien las consideraciones que haremos las centraremos en técnicas de acoplamiento, admiten su extensión en las correspondientes de inserción, para lo que sólo basta tener en cuenta secciones radiantes sobre fibra aceptora como secciones de fotodetección y de fibra incidente como secciones de fotoemisión.

Todo acoplamiento debe tener en cuenta la naturaleza y geometría de las fibras ópticas en juego (Fig. 2). En cuanto a la naturaleza, dado que el objetivo reside en mantener unas características de propagación, puede recurrirse a dos procedimientos: el de inmersión y el seco.

El procedimiento de inmersión, recurre a un líquido cuyo índice de refracción sea igual al de los núcleos de la fibras a acoplar, mientras que el seco descansa en un simple contacto óptico

entre dichas fibras. Teniendo en cuenta que la emitancia varía con la naturaleza de la fibra, el procedimiento por inmersión es solo útil a efectos de acoplar fibras con perfil de salto de índice, y a tales efectos la calidad óptica de las secciones a acoplar es secundaria.

Por su parte, cualquier acoplamiento por simple contacto óptico, deberá tener en cuenta, no sólo la equivalencia de los perfiles de índices a contactar, sino además, todos los parámetros geométricos de enfrentamiento de las secciones activas de los núcleos.

Dichos parámetros geométricos son:

- 1.- Desplazamientos transversal y horizontal
- 2.- Desplazamiento axial o no coincidencia de los ejes ópticos de las fibras.

Si bien el desplazamiento transversal es el de mayor influencia, debe tenerse en cuenta que cualquier medida de pérdida a efectos de su ponderación, incluye la desviación en el perfil de índices de las caras de las fibras enfrentadas, y que originadas durante su fabricación, pueden significar hasta el 50% del total de la atenuación medida.

En cuanto al desplazamiento axial (Fig. 3), también dependerá de la A.N. de las fibras, además de la emitancia de la fibra incidente. En tal sentido obsérvese que para la evaluación de la eficiencia del acople, teniendo en cuenta cualquiera de los desplazamientos, es fundamental la técnica del corte de las fibras debiéndose cuidar la calidad del plano de corte de las mismas y su perpendicularidad respecto al eje óptico común que se pretende conseguir.

Otro parámetro de pérdida, es el motivado por la reflexión de la luz incidente sobre la fibra aceptora, y que es fruto de la

inevitable presencia de aire en las zonas donde el contacto no es homogéneo. Tales pérdidas son eliminables mediante el procedimiento de inmersión.

En tal sentido, cualquiera sea el empalme seco desmontable que nos ocupe, debemos tener en cuenta pérdidas por reflexión - (Fresnel) entre 0,3 y 0,4 dB, entre las caras activas.

La tabla final de la Fig. 3 muestra el orden de magnitud con que se reducen las pérdidas según los parámetros mencionados para dos fibras ópticas multimodo de salto de índice. Obsérvese la mejora que supone el trabajar con fibras de mayor diámetro de núcleo, lo cual permitiría ser más flexibles a la hora de exigir tolerancias al enfrentamiento de las fibras a acoplar.

Es evidente que a efectos de fijar la unión, interesa que los esfuerzos que la realicen no produzcan un incremento a las pérdidas obtenidas. En tal sentido, el diseño de las piezas mecánicas que comprenderán los acopladores, serán diseñadas teniendo en cuenta tolerancias mecánicas, y que deberán permitir ajustes cuyos márgenes son del orden de la micra. Tal situación plantea un compromiso, y que es, precisamente el talón de Aquiles en el mantenimiento de los parámetros de pérdida mínimos, en acopladores desmontables.

III.- CONECTORES EXPERIMENTALES

Si bien existe un gran número de conectores, la mayoría de gran utilidad para la experimentación, los diseñados para su empleo en explotación son pocos. En la Fig. 4 presentamos los desarrollos que, a nuestro juicio, ofrecen mayor interés.

Si bien la pérdida (repetitiva) que actualmente constituye la meta de los diseñadores es de 0,5 dB, las pérdidas experimentales muestran que aún se está en el camino. De cualquier manera, si pensamos que con conectores de diseño equivalente, en 1975 se con-

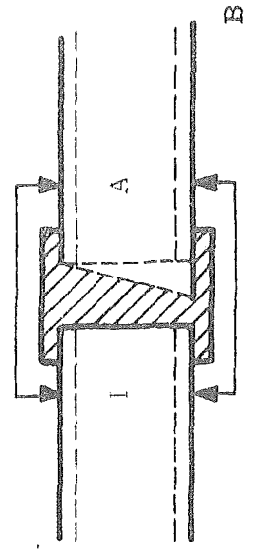
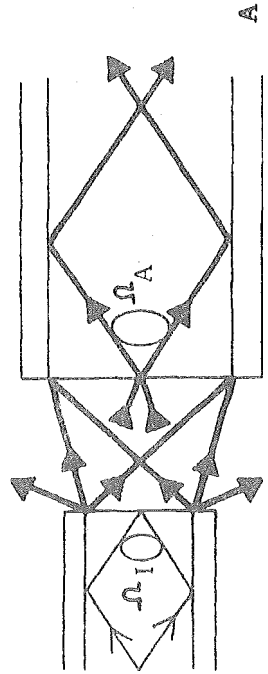
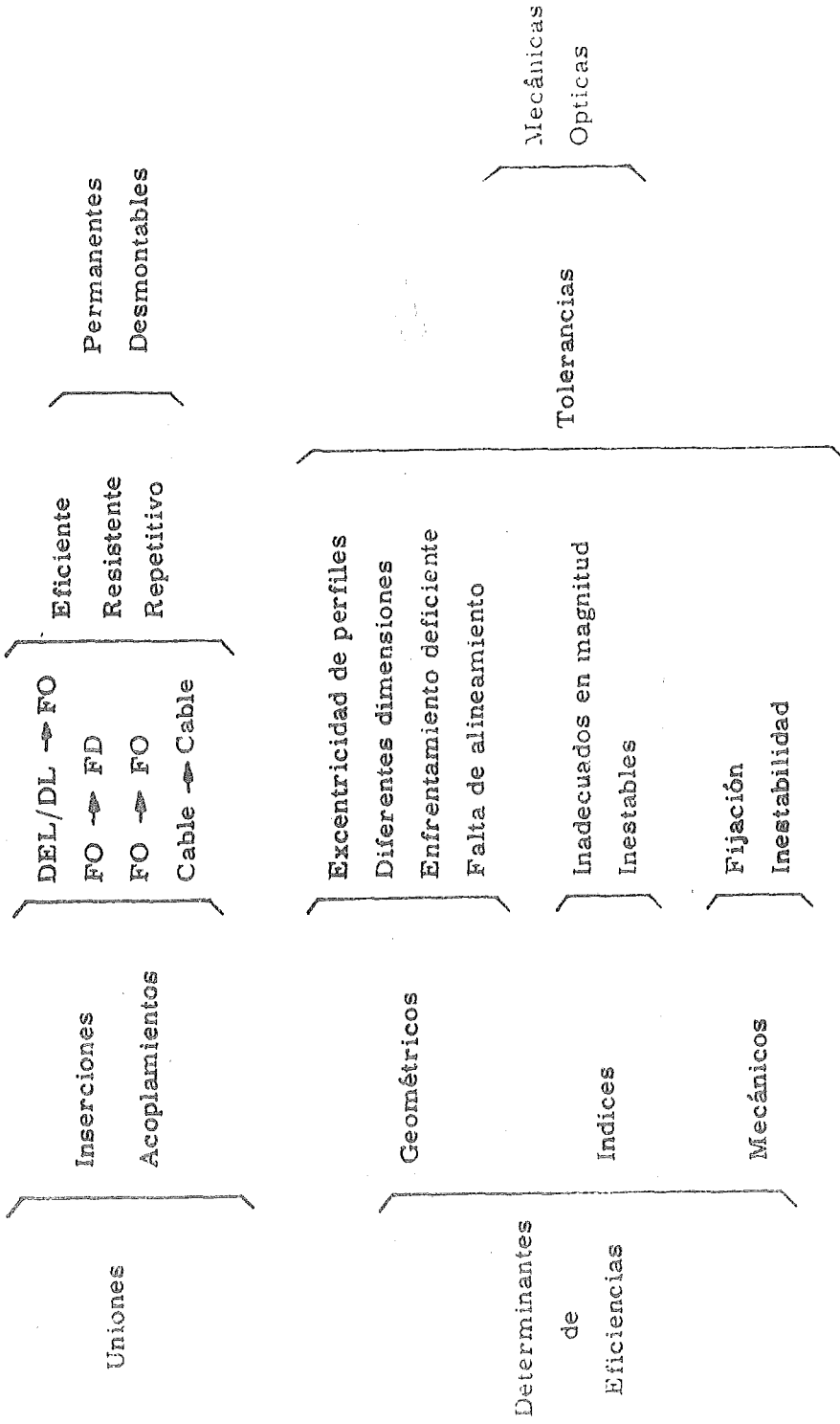
sideraba un éxito lograr pérdidas entre 3 y 5 dB, los valores mostrados no dejan de ser un avance.

De cualquier manera es bueno saber que los conectores experimentales en desarrollo, han mostrado ser capaces de superar la barrera de los 0,5 dB. De hecho, acoplamientos por fusión han llegado a 0,1 dB y realizados repetidas veces han oscilado entre 0,5 y 6 dB. El problema radica en que tales cantidades han sido obtenidas bajo condiciones experimentales muy severas.

En cuanto a conexiones fijas, de difícil aceptación, si bien se han logrado valores repetitivos interesantes ($\ll 1$ dB), los procesos de contracción de los pegamentos durante su secado, han motivado incrementos de pérdida superiores al 30%.

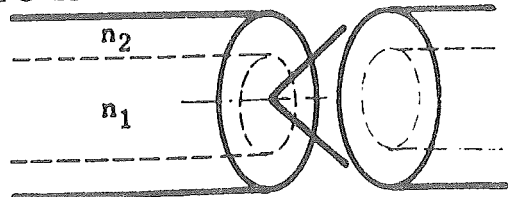
Teniendo en cuenta que las técnicas mencionadas aún se encuentran en fase de investigación tecnológica y con las miras puestas en su posterior proyección a la conversación y mantenimiento, ya han comenzado a diseñarse herramientas que bajo simple manipulación permite el acoplamiento fibra-fibra. En tal sentido se han desarrollado fibras con cubierta plástica en las que, por diseño de herramientas especiales y una posterior manipulación, se han logrado empalmes fibra-fibra de buena calidad repetitiva. Una primera herramienta pela (corta y elimina) la cubierta plástica, una segunda herramienta corta las fibras dejando las caras a empalmar en condiciones de acople por contacto. Mediante un plástico adicional se fija el contacto, siendo finalmente recubierta la zona del empalme mediante un segundo plástico que fija definitivamente la unión. Con tal técnica, sobre sesenta fibras de "salto de índice" multimodo, se han observado sobre veinte muestras, atenuaciones comprendidas entre 0,21 y 0,36 dB.

El panorama mostrado, si bien es optimista, muestra que aún queda por hacer, muy especialmente debido a los márgenes geométricos dentro de los cuales debe realizarse el enfrentamiento y el ajuste (o fijación) de las áreas activas.



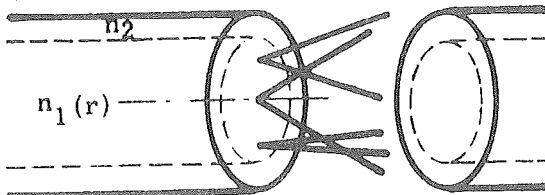
RADIANCIAS DE FIBRAS OPTICAS

FO-SI



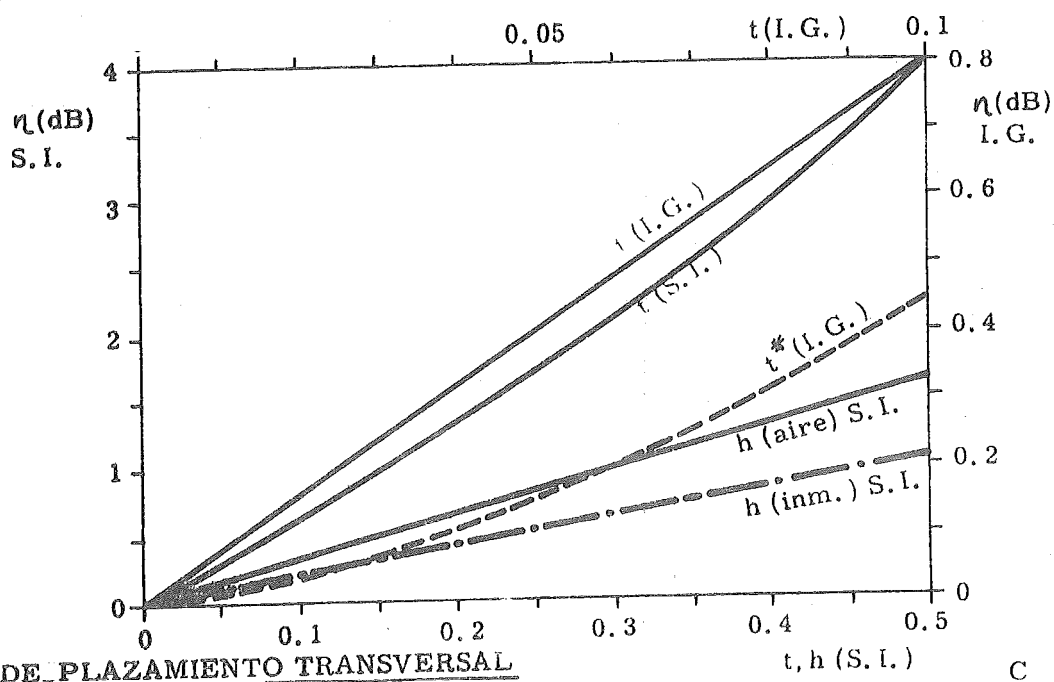
A

FO-IG



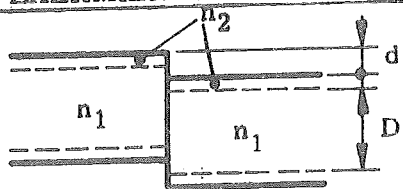
B

PERDIDAS EN FUNCION DE DESPLAZAMIENTOS



C

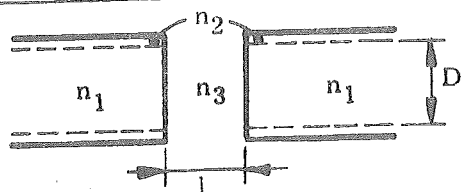
DE PLAZAMIENTO TRANSVERSAL



$$t = d/D$$

$$t^* = t(G.I.) \quad (c/\text{modos de fuga})$$

DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL

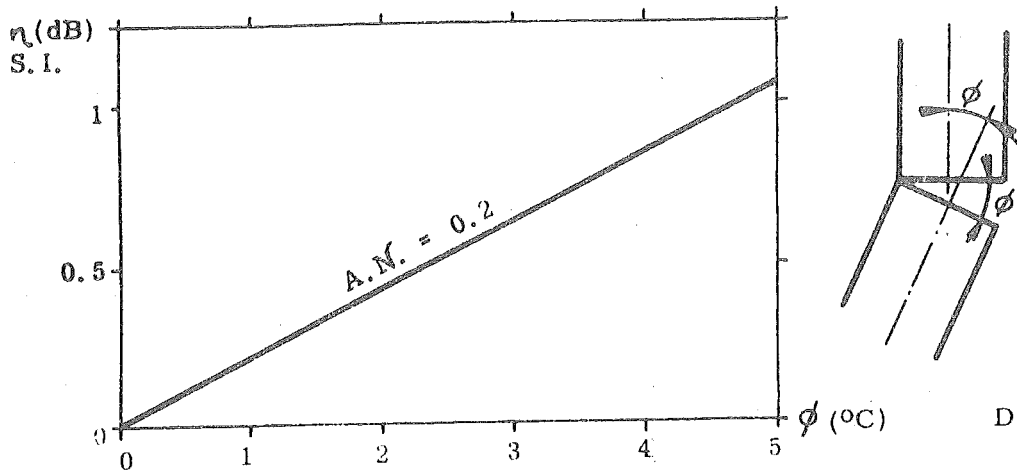


$$h = l/D$$

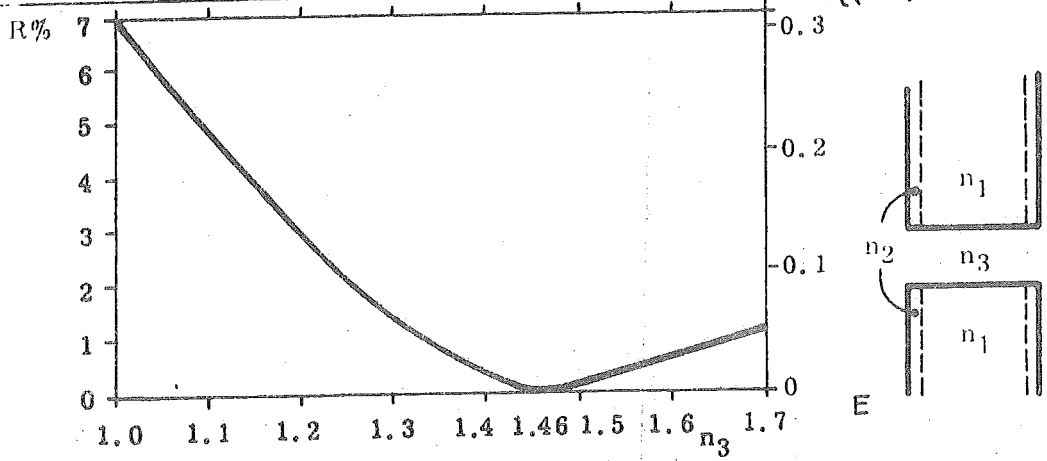
$$h(\text{aire}) \Rightarrow n_3 = 1$$

$$h(\text{inm.}) \Rightarrow n_3 = n_1$$

PERDIDAS POR DESPLAZAMIENTO AXIAL



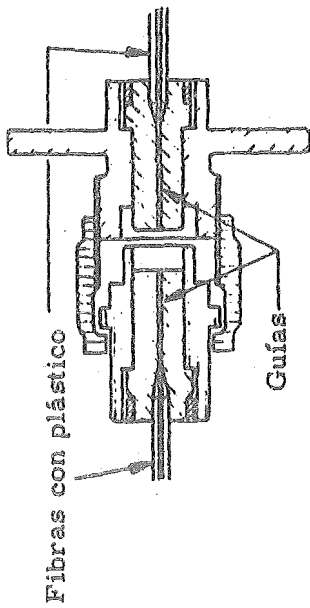
PERDIDAS POR REFLEXION (INMERSION)



PERDIDA DE ACOPLAMIENTO TOTAL EN FO DE A.N. = 0.2

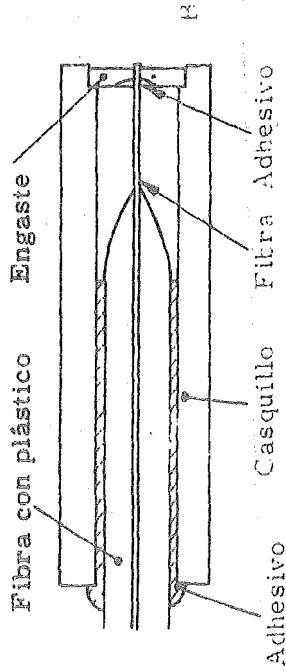
FUENTES DE PERDIDA		$D_1 = 50 \mu m$		$D_2 = 100 \mu m$	
Desplazamiento t	$10 \mu m$	1.3		0.6	
	$5 \mu m$		0.6		0.3
Desplazamiento h	$10 \mu m$	0.7		0.4	
	$5 \mu m$		0.2		0.1
Desplazamiento ϕ	3°	0.6		0.6	
	1°		0.2		0.2
Reflexiones	Seco	0.3		0.3	
	Inmersión		0		0
PERDIDA TOTAL (dB)		3.9	1	1.9	0.6

ACOPLADORES EXPERIMENTALES



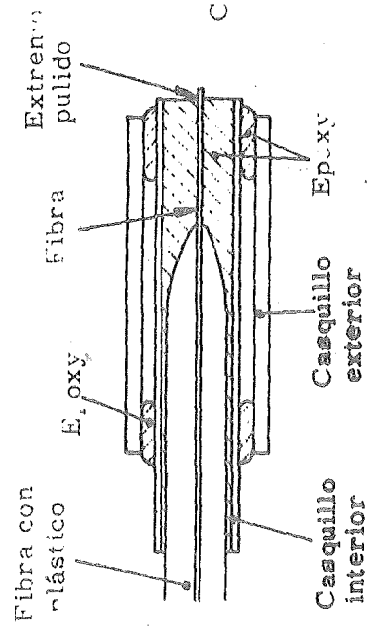
A

CONECTOR DE GUIA CON ENTRADA (≤ 1 dB)



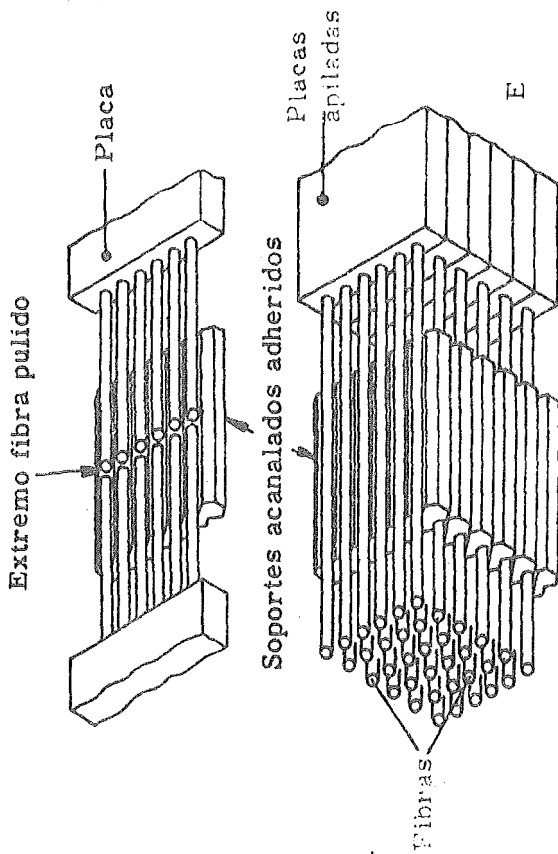
B

CONECTOR DE ENGASTE (1 a 1.5 dB)



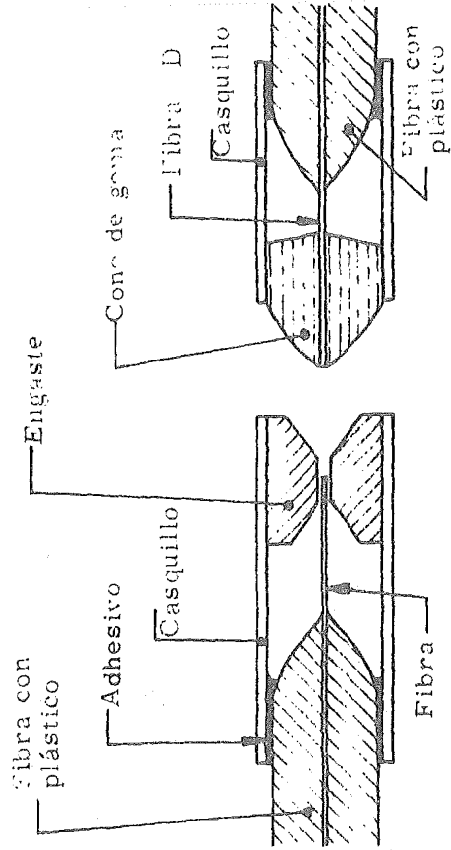
C

CONECTOR DE DOBLE CASQUILLO (2 a 4 dB)



D

CONECTOR CABLE BTL (0.5 dB)



CONECTOR DE ENGASTE EN X (≤ 2 dB)

SISTEMAS DE TRANSMISION NUMERICA POR FIBRA OPTICA

Por:

J. Antonio Delgado Penin

Cátedra de Sistemas de Telecomunicación.
E.T.S.I. Telecomunicación. U.P.B.

I.- SISTEMA DE TRANSMISION NUMERICA POR FIBRAS OPTICAS

INTRODUCCION

El tratamiento de la temática de la transmisión que usa fibras ópticas no puede ser diferente del que se da a cualquier otro tipo de transmisión que emplea soporte físico. Esta transmisión tiene problemas peculiares a causa del margen de frecuencias en que nos movemos, pero la filosofía de la transmisión se mantiene. En definitiva, cambia la metodología de resolución del problema de transmitir y recibir y como consecuencia aparece una nueva tecnología.

A nadie pasa desapercibido el hecho de que la cantidad de información aumenta de día en día y que por consiguiente, las Redes de Telecomunicación actuales quedarán desbordadas en un plazo de tiempo no muy lejano. Este hecho ha llevado a pensar, que una de las posibles soluciones sea la de la "digitalización" tanto de la parte que afecta a los sistemas de transmisión como aquella que toca a la conmutación. Por consiguiente, se prevee una evolución del tráfico en sentido creciente, difícil de cuantificar a la hora actual, a causa del impacto imprevisible de las transmisiones numéricas que por múltiples razones técnicas y económicas aumentan de día en día.

Las señales numéricas que existen en las Redes de Transmisión tienen dos fuentes bien conocidas. Una, señales que en su origen ya son numéricas como es el caso de los datos digitales, telegrafía, telex, etc.; y otra, señales que nacen analógicas en su fuente pero se transforman en numéricas por conveniencia técnica y económica para los procesos de transmisión y conmutación. En nuestra opinión, las primeras no tendrán por sí solas tal entidad como para decidir el diseño de un sistema de transmisión numérica por fibras ópticas. La razón se comentará más adelante. La situación es

diferente para el caso de las señales que emplean la conversión A/D y D/A. Hoy la transmisión PCM (modulación de impulsos codificados) de canales telefónicos ofrece ventajas a tener en cuenta, como son: la de reducir el equivalente de transmisión, mejorar la estabilidad de dicho equivalente, reducir costes en longitudes de circuitos inferiores a 80 Km., rebajar el coste de manutención y proveer una mayor adaptabilidad a señales procedentes de orígenes distintos.

El soporte físico hasta ahora utilizado para estas transmisiones numéricas ha sido y es, el cable en sus diferentes versiones: pares, cuadretes, coaxiales. El futuro era previsible para las guías circulares metálicas hace unos cuantos años, pero la aparición de la transmisión guiada por fibras ha puesto en tela de juicio tal medio por las enormes dificultades técnicas que posee. En consecuencia se trastocaron muchos planes, muchos estudios y se reorientaron nuevos esfuerzos.

Es de estos esfuerzos en el dominio de las fibras como soporte de transmisión numérica de los que nos ocupamos en lo que sigue. Para ello hemos articulado lo tratado, brevemente, en tres partes.

En la primera hacemos un planteamiento del problema de este tipo de transmisión empleando como soporte la fibra óptica. En la segunda comentamos las soluciones de tipo teórico y práctico (tecnológico), y en la tercera hacemos referencia al futuro que se puede preveer para este tipo de transmisiones.

Planteamiento del problema para este tipo de transmisión

Hemos comentado al principio, que las fibras ópticas como soporte de transmisión dan un aspecto al problema completamente análogo al que se suscita en la transmisión por cables de cobre. En consecuencia, debe plantearse el problema en este tipo de transmisión de manera semejante a la utilizada para dichos cables de co

bre. No obstante, habrá que tener en cuenta que el medio es propagador de señales ópticas que exigen la presencia de dispositivos de extremidad para verificar la transducción señal eléctrica a señal óptica en la parte transmisora y viceversa en la receptora, lo que introduce elementos nuevos en un planteamiento de transmisión por soporte físico.

Sentada la premisa anterior, cabe preguntarse, ¿cómo modelar una situación de transmisión numérica? La respuesta es también clásica pero particularizada para este caso. El modelo de canal numérico tiene en cuenta el hecho de que la fibra óptica se comporta como un filtro paso bajo equivalente con una función de transferencia completamente análoga a la de un cable. En definitiva, el modelo numérico desde nuestro punto de vista puede esquematizarse como indicamos en la Figura 1 y cuyos bloques los indicamos a continuación:

- Fuente de información digital
- Codificador de línea
- Modulador
- Fuente luminosa: LED o LD
- Fibra óptica
- Fotodetector
- Amplificador de bajo ruido
- Igualador
- Muestreo y Decisión
- Decodificador de línea
- Destinatario de información digital

Si se enfoca el problema bajo esta perspectiva, que por otra parte es la única que actualmente se emplea tanto por investigadores como por tecnólogos, las hipótesis verosímiles para un modelo de canal numérico como el que estamos comentando están enton-

ces ligadas a las características que pueden tener cada uno de los bloques señalados en la Figura 1 y por supuesto a la cantidad de información que se pueda producir en la entrada del sistema.

Los sistemas de transmisión numérica por fibra óptica que están en fase de Laboratorio para transmisiones que se verifiquen a distancias superiores a los dos Km., emplean velocidades del orden de los 34 Mbit/sg., que corresponden al segundo nivel jerárquico para las transmisiones digitales en Europa. Dicha cifra sale a relucir porque una cantidad de información tan voluminosa procedente tan sólo de fuentes directamente digitales es una masa de información que no existirá durante muchos años en un país europeo y en consecuencia se infrautilizaría el sistema de transmisión. Pero no sucede lo mismo con las señales telefónicas; éstas aumentan día a día y su transformación en señales numéricas PCM es un paliativo al problema que se origina. En este caso, la cantidad de información de 34Mbit/sg., (aproximadamente 480 canales telefónicos simultáneos) ya no es una cifra tan voluminosa, un ejemplo: la transmisión de señales de una central urbana a otra central urbana. Las posibles soluciones con pares simétricos son insuficientes y los radioenlaces digitales para centros urbanos tendrán que trabajar en frecuencias milimétricas lo que plantea nuevos problemas y nuevas inversiones económicas que con las estimaciones actuales son superiores a aquellas que se han hecho para la transmisión por fibras. Parece pues verosímil, que el tráfico mayor vendrá de las fuentes telefónicas que cada vez exigirán mayores velocidades para dar fluidez al enorme volumen de tráfico originado.

La siguiente hipótesis a considerar es la que hace referencia al codificador/decodificador de línea. En este caso se plantean los mismos problemas que para la transmisión por cable, es decir, la señal eléctrica que lleva la información debemos codificarla de tal manera que la densidad espectral de potencia tenga las características que se ajusten lo mejor posible al proceso de transmisión y recepción. Concretamente, la selección del código adecuado para una señal que cuando transita por el medio es óptica no es nada sencilla y posee condiciones de contorno diferentes a las de los cables, como por ejemplo, el hecho de que una señal óptica es por su

misma naturaleza positiva, y en consecuencia no podemos utilizar la información que se produce en todo cambio de signo de una señal, lo que si es factible en una transmisión por cable. Buenas características para un código a utilizar en este tipo de transmisión pueden ser las siguientes:

- Que pueda extraerse de la señal recibida el sincronismo que existe en todo sistema de transmisión numérica.
- Que el decodificador sea capaz de reconocer la fase con que llega la señal de sincronismo.
- Que sea capaz de detectar los errores de transmisión en línea con el objeto de asegurar un telecontrol del sistema en su totalidad.
- Debe poseer un espectro que no tenga componentes espectrales importantes en baja frecuencia.
- Debe ocupar una banda lo mas pequeña posible.

A estas restricciones que surgen de la propia organización del sistema, es necesario añadir aquellas que ponen los componentes llamados de extremidad, como es el caso de las fuentes luminosas. No se plantean las mismas cuestiones si la fuente luminosa trabaja en régimen impulsivo que si lo hace en régimen continuo y en consecuencia las soluciones para elegir el código de línea harán hincapié en unos u otros aspectos. La elección de una fuente luminosa concreta condiciona la cantidad de información que podemos transmitir por unidad de tiempo. La aparición de los diodos a efecto Láser nos permite obtener impulsos de potencia luminosa muy rápidos y en consecuencia trabajar con velocidades, que alcanzan el tercer nivel jerárquico en las recomendaciones del CCITT, del orden de 140 Mbit/sg.

Por lo que se refiere a la fibra desde nuestra perspectiva solo podemos pedir que la atenuación por Km. sea lo más pequeña posible y lo mismo para el parámetro dispersión.

Dentro del planteamiento que estamos haciendo, los primeros bloques del receptor están constituidos por el fotodetector y el amplificador de bajo ruido. Estos dos bloques condicionan también la transmisión definitiva a causa de su mayor o menor respuesta y hasta ahora una vez que tenemos el fotodetector sólo nos queda construir un amplificador llamado de bajo ruido precisamente porque se desea que a su salida el cociente señal/útil/ruido total sea mínimo. El diseño de un tal amplificador es el caballo de batalla previo a cualquier otra consideración posterior en el receptor. Si no tenemos la suficiente relación señal-ruido para verificar la detección no podemos tener una buena eficiencia del sistema traducida en tasa de error. Para velocidades del orden de 8 Mbit/seg. (120 canales telefónicos simultáneos) el amplificador de bajo ruido suele tener como componente activo principal un transistor FET. Por tanto, debemos lograr que el ruido térmico y de granalla junto con el cuántico, sean lo mas pequeños posibles a la salida del amplificador de bajo ruido; y por lo que se refiere al fotodetector que posea la mayor ganancia de conversión junto con un buen diseño del amplificador desde el punto de vista de ganancia.

Por último, comentemos cuáles son las condiciones que exige la parte digital del receptor, que obviamente son diferentes según la velocidad de la señal recibida y condicionadas de manera decisiva por la función de transferencia de la fibra óptica.

Para las velocidades de 2,8 y 34 Mbit/seg., el espectro de las señales encaja perfectamente en las fibras hoy ya operacionales, a causa de que su ancho de banda es mucho mayor que el de las señales digitales recibidas. No obstante, se ha utilizado una Igualación con el único fin de reducir el ruido antes de la detección propiamente dicha y en consecuencia elevar también la razón señal útil/ruido. Esto se puede realizar con una sencilla célula RC.

Para velocidades de transmisión, en las que la fibra ya ponga serias dificultades al espectro de la señal transmitida, la solución al problema de la Igualación no será el mismo, y esto plantea otro motivo de discusión.

Soluciones actuales para el problema planteado

Acabamos de comentar que la transmisión numérica por fibras ópticas es interesante en transmisiones que podemos llamar "civiles" siempre y cuando tengamos un gran caudal de información que transmitir, pero no hemos comentado nada sobre los diferentes sistemas en función de un parámetro que condiciona todo sistema de transmisión sobre soporte físico. Nos referimos a la distancia que debe separar los diferentes repetidores regenerativos cuando deseamos proyectar un sistema completo de transmisión. Aparece por consiguiente el parámetro distancia pequeña, mediana y grande todavía no definido en sede internacional. En definitiva, los parámetros caudal de información y distancia entre repetidores deben ser datos para solventar nuestro problema.

Siguiendo de forma lógica la "cadena" de transmisión que hemos representado en la Fig. 1 comentamos las diferentes soluciones adoptadas.

En el caso de la codificación-decodificación de línea, los diferentes equipos de personas que trabajan en el campo tienen todos el mismo deseo: enviar en el período del símbolo que representa un estado de información formas de onda lo más estrechas posibles con el objeto de reducir al máximo el problema de la interferencia entre símbolos en el momento de la detección. Normalmente se emplea un "duty cycle" del 50%. Este punto junto con el deseo de trabajar con señales binarias limita el campo de elección de los códigos multinivel. La experiencia a 2 Mbit/sg. ha confirmado que con códigos multinivel el "diagrama del ojo" se presenta más cerrado que en el caso de un código a dos niveles, lo que indica que las prestaciones del sistema son peores, es decir, tasa de error más elevada para un mismo cociente señal ruido en la recepción. Como comentamos también anteriormente, las fuentes luminosas condicionan el tipo de código de línea utilizado, se ha comprobado experimentalmente -caso del CNET francés- que para velocidades de 2, 8 y 34 Mbit/seg. los códigos utilizables para régimen impulsivo o continuo tienen presta

ciones diferentes. Concretamente, en régimen continuo no presentan mal comportamiento los que indicamos a continuación:

- Binario NRZ
- Binario NRZ pasado por "scrambler"
- Bifase
- Miller
- H D B 3 que tiene tres niveles

Todos ellos han sido utilizados para el caso de un diodo con efecto Láser.

En cuanto se refiere a las exigencias de las fuentes luminosas, fibras y fotodetectores, son datos para el proyectista que nosotros no podemos modificar. Normalmente, la potencia óptica inyectable en la fibra varía entre 10 dbm para un Diodo Láser y 0 dbm para un LED, mientras que las potencias exigidas en recepción para los fotodetectores oscilan entre 20 y 60 dbm para los del tipo PIN o APD en función de la frecuencia de repetición de los impulsos transmitidos.

Otro de los problemas abiertos que exige soluciones es el que hace referencia a la etapa regenerativa del receptor numérico, es decir, las partes que forman el Igualador-Muestreador-Regenerador como se indica en la Fig. 2. Dijimos al plantear el problema, que la Igualación se está haciendo actualmente a nivel de reducir el ruido, y presentar buena relación señal-ruido cuando se muestree y decida, pero todavía no se ha intentado atacar el problema de Igualar la fibra en su conjunto. En la Fig. 2 se dibuja el esquema clásico para una Igualación de tipo transversal para velocidades medias y bajas. No obstante, debemos ser conscientes que aun cuando se podría mejorar las situación y emplear por tanto fibras mas baratas, la inserción de un Igualador aumentará el coste del enlace numérico en fibra, disminuyendo su competitividad con los actuales sistemas via cable, por lo que cada vez que sea posible, es oportuno emplear fibras con dispersión menor. Sin embargo, hay velocidades superiores

a 140 Mbit/seg. que obligan a emplear en el receptor la Igualación, ya que la dispersión de los impulsos transmitidos llega a ser el factor determinante de la longitud de la "sección de regeneración". En la Tabla I se señalan, a título de indicación, las diferentes atenuaciones longitudes de sección y velocidades para las diferentes fuentes luminosas y fotodetectores. En la Tabla II se comparan las longitudes de las secciones de los tipos de fibra con el caso de los cables coaxiales. Si comparamos los resultados de la Tabla I y la II podemos observar que las longitudes de Sección para las diversas velocidades resultan mayores en el caso de las fibras, por lo que ofrecen mayores ventajas.

Perspectivas futuras

Las perspectivas futuras de este tipo de transmisión están ligadas a las soluciones que acabamos de comentar.

Parece que para transmisiones a corta distancia no vale la pena emplear transmisiones numéricas por una sola fibra, mientras que en distancias medias y grandes, las perspectivas tanto teóricas como prácticas para una sola fibra sí son esperanzadoras.

Hemos dejado de comentar la cuestión de los cables de fibras por que es un tema que todavía no está suficientemente maduro desde el punto de vista de la transmisión numérica, pero no cabe duda que si además del múltiplex especial en que se presentan las señales numéricas consideramos un multiplex espacial, el número de canales telefónicos que se pueden transmitir crece exponencialmente, pero todavía hoy no se sabe si a causa de la colocación de las fibras en un mazo que forme un cable, varían y de qué modo, las características de transferencias de la fibra y en consecuencia todos los parámetros de distancia, caudal de información, potencia óptica recibida, etc, etc.

Por último un tema futuro tal vez cercano, es el de las transmisiones a muy alta velocidad -superior a 250 Mbit/seg- que se

creo no podrán lograrse con fibras multimodo, pero sí con fibras mo nomodo y de las cuales son defensores los que creen que el tráfico telefónico crece exponencialmente. Quizás tengan razón.

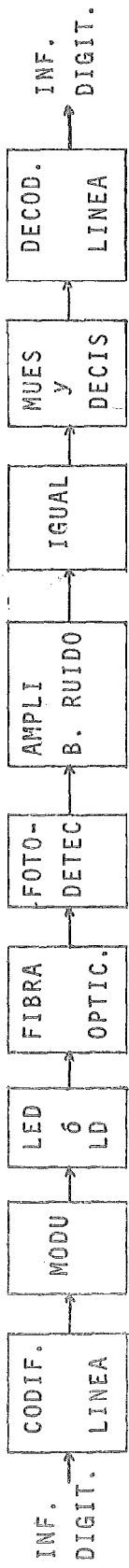


Fig. 1.

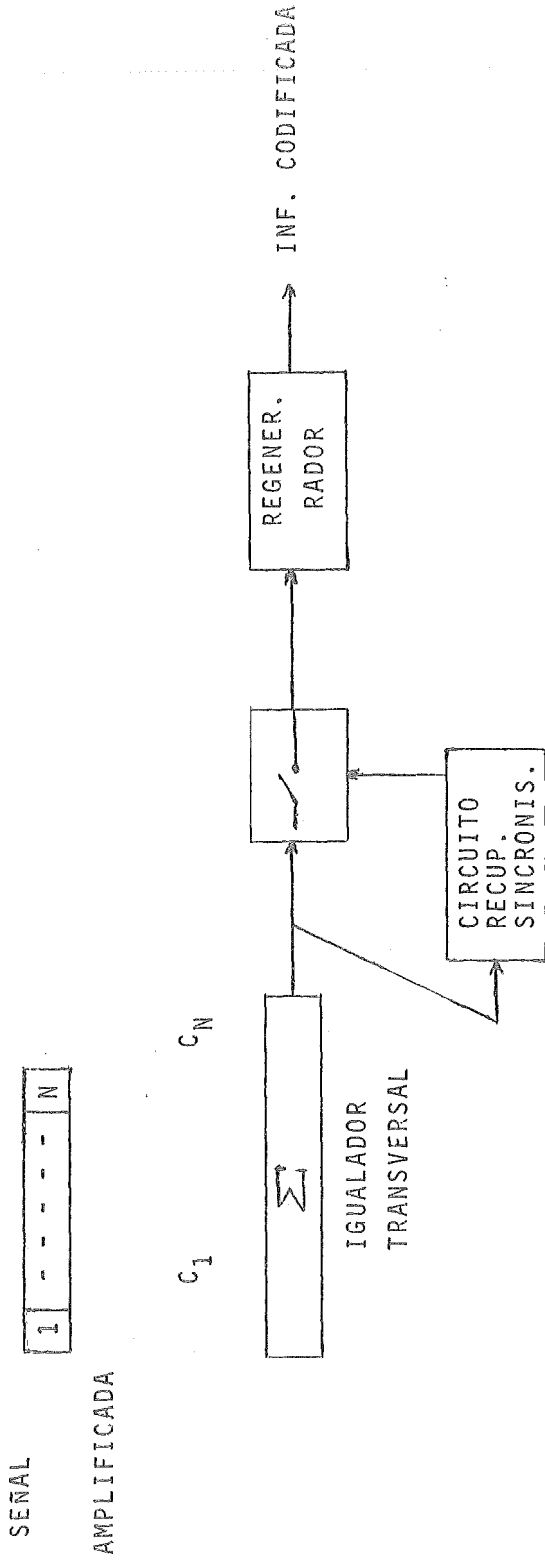


Fig. 2

T A B L A 1

VELOC. TRANS. 2,048 Mb/seg. 8,448 Mb/seg. 34,368 Mb/seg. 139,264Mb/seg.

Fuente	Receptor	α	e	α	e	α	e
Láser							
Láser a Semic	Fotodet. si APD	49,5	9,9	43,3	8,66	37,3	7,46
"	" si PIN	40	8	33,8	6,76	27,8	5,56
Diodo							
Diodo Elect. Lumi- misc.	" si APD	36,5	7,3	30,3	6,06	24,3	4,86
"	" si PIN	27	5,4	20,8	4,16	14,8	2,96

T A B L A II

<u>Veloc. Transm.</u>	2,048	8,448	34,368	139,264
Fibra Step(10 nsg/Km)	45,5Km	11Km	2,7Km	0,67Km
" Graded (1 nsg/Km)	455Km	110Km	27Km	6,7Km
Tipo de cable	Pares simétricos	Coax.:0,7/29	Coax.:0,7/29	Coax.:1,2/44
Longitud regeneración	2 Km	4 Km	2 Km	2 Km

PROPAGACION POR FIBRA OPTICA

Por:

Angel Cardoma Aznar

Cátedra de Antenas y Propagación de Ondas.
E.T.S.I.T.B.

* El resumen de esta charla no se encontraba disponible en el momento de la edición.

DEGRADACION DE DISPOSITIVOS EMISORES DE LUZ

C.A. LOPEZ BARRIO
A. GARCIA GUERRA

Cátedra de Electrónica II-III. E.T.S.I.T.-U.P.M.

I. INTRODUCCION

Uno de los problemas más importantes que se presentan en los sistemas de comunicaciones por fibras ópticas es la degradación del dispositivo emisor de los pulsos ópticos. Y buena prueba del interés actual por este problema la constituye el hecho de que la investigación de las posibles causas ocupa, en algunas empresas, el primer lugar en lo que se refiere a esfuerzo económico aplicado.

Por degradación de un dispositivo se entiende cualquier variación, generalmente irreversible, de una o varias características del dispositivo en cuestión, debidas al funcionamiento o a las condiciones exteriores. Ciñéndonos a los dispositivos utilizados en comunicaciones ópticas, dicha degradación se concreta en que, con el tiempo de funcionamiento, la potencia óptica de pico emitida tiende a decrecer, para una misma excitación del diodo láser o del diodo electroluminescente:

Es un fenómeno complejo y en que, desafortunadamente, no basta con pensar se trate de fallos o defectos en la fabricación del dispositivo emisor. Por el contrario, existen algunos mecanismos de degradación intrínsecos a los materiales y dopantes utilizados.

En esta comunicación pretendemos presentar, brevemente, la situación actual de este problema, así como un resumen de los mecanismos propuestos últimamente. En general, todos llevan hacia la existencia de unos niveles profundos, que son causantes de una recombinación no radiante. Por ello, al final presentaremos una de las técnicas para la determinación de estos niveles profundos, la cual se está llevando a cabo en la actualidad en nuestro laboratorio.

Esta información constituye una base de partida en nuestra propia investigación experimental sobre la degradación y determinación de niveles profundos, ya que, a pesar de la gran

cantidad de datos y teorías existentes, no puede afirmarse que sea éste un fenómeno conocido.

Los dispositivos empleados en nuestras experiencias - no son los utilizados en comunicaciones ópticas - diodos láser ó LED's de AsGa de emisión en el infrarrojo-, sino los - de PAsGa de emisión roja. Esta elección queda justificada -- por el gran interés de estos diodos en displays y acopladores optoelectrónicos, junto a una mejor disponibilidad a más bajo precio. No constituye esto, sin embargo, un alejamiento del problema principal, ya que la técnica de medida es general y los mecanismos propuestos son básicamente los mismos para los distintos tipos de emisores de luz. En cualquier caso, - éste constituye simplemente un primer paso en nuestra investigación sobre la degradación de los dispositivos emisores - de comunicaciones ópticas.

II. PROCESOS DE RECOMBINACION EN UNIONES P-N

Los diodos electroluminiscentes son uniones p-n semiconductoras de estado sólido, los cuales son fabricados y en capsulados utilizando muchas de las tecnologías usadas en la fabricación de productos semiconductores de silicio o germanio, aunque aquí los materiales son otros como AsGa, PGa, AsGaP, etc..... Es por ser básicamente uniones p-n, y estar interesados en las causas de la disminución de la radiación, por lo que es de interés conocer los posibles procesos de recombinación, sabiendo cuales dan lugar a radiación y cuales no.

Antes de indicar dichos procesos, indicaremos las distintas transiciones que pueden presentarse en un semiconductor. Todas ellas, radiantes y no radiantes, se encuentran resumidas en las Figs. 1 y 2. Son transiciones radiantes las que se producen a través de la recombinación banda a banda (a), niveles poco profundos aceptores (donadores) - banda de conducción - (banda de valencia) (b), donador-aceptor (c), vía niveles pro

fundos (d), y transiciones exciton¹. Por el contrario serán no radiantes: la multifonón (la energía cedida se convierte en -- cuantos de vibración de la red, fonón) (a) y la Auger (se re combinan un electrón y un hueco dando la energía a un segundo electrón de la BC, el cual perderá la energía posteriormente - por un proceso de termalización).

Fijándonos ya en una unión p-n, en la Fig. 3 se muestra la estructura de bandas en el caso de que no exista polarización, así como bajo una polarización directa. Al disminuir la barrera de potencial para el caso de polarización directa, fluirá una corriente a través de la unión, la cual se compone de tres términos de los que sólo uno produce una excitación que - dé lugar a un proceso de recombinación radiante. Estas tres - componentes son:

a) Corriente de difusión, que viene como consecuencia del flujo de electrones desde la zona N, los cuales se difundirán a través de la unión en la zona P, y ello como consecuencia de la - disminución de la barrera de potencial al polarizar en directo. Estos electrones difundidos se recombinarán con los huecos (mayoritarios de la zona P). Análogamente ocurrirá con los huecos, aunque en sentido inverso.

Normalmente sólo una de estas dos componentes de la corriente de difusión da lugar a un aumento de la recombinación radiante - normalmente la corriente de electrones-, y la unión - se debe diseñar para que dicha corriente sea la que domine.

1. Un exciton es un sistema formado por un electrón y un hueco, los cuales interactúan para formar un estado cuya energía es menor que la del electrón y hueco. Estas cargas, con una asociación espacial entre electrón y hueco, pueden estar asociadas con un centro cargado positivamente (excitón limitado). Este exciton puede decaer con la emisión de radiación. Este proceso es de interés en materiales de gap indirecto como el PGa.

b) Corriente de recombinación en la zona de carga espacial. Un análisis simple supone que en dicha zona no se produce recombinación de minoritarios. A veces no es válida tal suposición, ya que si existen niveles profundos de energía (niveles permitidos) cerca del midgap (zona media de la banda prohibida) existe una recombinación en ellos y, por tanto, una corriente, que estará en paralelo con la de difusión pero sin dar lugar a radiación. Por consiguiente, han de minimizarse estos niveles profundos no deseados.

c) Corriente de efecto tunel. Puede presentarse en uniones estrechas y con materiales en ambas partes altamente dopados, de modo que la corriente se produce por efecto tunel al recombinarse electrones de la zona N de la unión con huecos de la zona P a través de la banda prohibida. Esta corriente tampoco contribuye a la radiación por no inyectar minoritarios.

Podemos resumir, en función de los niveles de corriente, cuales son las componentes dominantes:

Corrientes bajas	$I \sim \exp qV/(2kT)$ (recombinación)	No radiante.
Corrientes intermedias	$I \sim \exp qV/(kT)$ (difusión)	Radiante.
Corrientes altas	$I \sim \exp V/R$ (efecto resistivo)	

Por último indiquemos que los niveles profundos, aunque dieran una transición radiante, no nos interesan, porque la longitud de onda de la radiación a la que dieran lugar sería distinta de la de interés (λ inversamente proporcional al salto de energía).

III. TECNICAS PARA LA MEDIDA DE LA DEGRADACION. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Las técnicas de medida van dirigidas a obtener una indicación de las posibles causas de la degradación. Para ello, se somete al dispositivo a distintas pruebas extremas de forma que, de la información cuantitativa y/o cualitativa, se investiguen los posibles procesos que dan lugar a dicha degradación.

Como primeros aspectos importantes que conviene conocer es si dichos fenómenos lo son de superficie o/y de volumen. Igualmente es de interés distinguir si son fenómenos de física electrónica, temperatura, etc... A fin de obtener información de cada uno de estos aspectos, se han intentado realizar aquellas medidas que llevaran a la búsqueda o comprobación de algún mecanismo intuído.

Las técnicas incluyen una medidas iniciales que permitan caracterizar al dispositivo, unas fuertes condiciones de funcionamiento que equivalgan a muchas horas de trabajo en distintos ambientes, y unas medidas intermedias y finales de los parámetros, siendo necesaria su posterior interpretación.

Las características o parámetros normalmente medidos, y en los que se observa degradación, son: característica I-V (una disminución de la radiación a igualdad de corriente de excitación supondría un aumento de la corriente de recombinación), - característica C-V (como intento de detectar cualquier cambio en la concentración neta de impurezas), tiempo de vida de los portadores minoritarios a través del tiempo de recuperación inversa del diodo. En cuanto al funcionamiento forzado, las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo son: a tensión constante, a corriente constante, bajo fuertes impulsos de corriente, en polarización inversa, en modo avalancha, altas temperaturas de almacenamiento y funcionamiento, radiación, pruebas de humedad y ataques químicos. Estas dos últimas dirigidas especialmente a estudiar los efectos superficiales.

En cuanto a los resultados obtenidos, podemos resumir que no se obtuvo una degradación apreciable, o cambio de las características del dispositivo, en el funcionamiento en inverso y avalancha. Lo mismo puede afirmarse en cuanto a la temperatura pues, aunque en algunos casos se obtuvo una cierta influencia, ella fué tan pequeña que no puede tomarse como decisiva. La humedad tampoco produjo cambio, al igual que el ataque químico. Este último aunque sí producía mejora, igualmente ocurría con los diodos no degradados, y ello puede justificarse si pensamos que,

al atacar, se quita material tipo p con lo que disminuye la absorción, mejorando, por tanto, la eficiencia cuántica externa. Con radiación, en unos casos se obtuvo y en otros no; en cualquier caso, se postula que puede haber degradación debida a que la recombinación de los portadores generados por la radiación puede crear defectos de Frenkel, similares a los de la recombinación de los portadores inyectados. Ahora bien, una fuerte radiación genera pares electron-hueco/seg./cm² de unos ordenes - más bajos que la corriente, por ello podemos despreciar su efecto.

La degradación, como hemos dicho, se traduce en una disminución de la intensidad luminosa con el tiempo de funcionamiento. Esto puede observarse en la Fig. 4, en la que podemos destacar, en primer lugar, que la pendiente para bajas corrientes es kT , lo que indica que la recombinación radiante es sólo a causa de la corriente de difusión. La curvatura observada para altas intensidades viene a consecuencia de la resistencia óhmica del diodo. Después de la degradación se sigue teniendo la misma pendiente, lo cual indica que el decrecimiento de la luz es causado exclusivamente por la reducción del tiempo de vida de los portadores. Lo mismo se deduce del estudio del tiempo de recuperación inversa del diodo (disminuye con las horas de funcionamiento).

Si se analiza la característica I-V, se observa un aumento de la corriente de recombinación (Fig. 5).

Por último, si nos fijamos en la característica C-V (Fig. 6), se pueden distinguir dos cambios después de la degradación:

- cambio del potencial de contacto (built-in voltage). Esto provocaría una caída de la corriente de inyección y, por tanto, de la radiación.

- cambio de la pendiente. Esto vendrá como consecuencia del cambio en el perfil de dopaje de los dispositivos.

IV. MECANISMOS PROPUESTOS PARA LA DEGRADACION DE LOS LED's.

De acuerdo con lo anterior, no son mecanismos dominantes los de temperatura y superficiales y sí, por el contrario, los de volumen los que provoquen algún cambio en las cercanías de la unión al someter al dispositivo a un esfuerzo con polarización directa.

Teniendo en cuenta las limitaciones enunciadas, de no existir una teoría concluyente, resumimos los mecanismos más importantes propuestos para justificar la degradación. En general podrá ser a causa de uno de ellos o a la suma de varios.

Contaminación durante el proceso de fabricación: Durante el proceso de fabricación pueden aparecer impurezas metálicas, como el cobre, las cuales, difundiéndose rápidamente bajo polarización directa, pueden llevar a la formación de imperfecciones cristalinas, creando, posiblemente, trampas profundas que darán lugar a una degradación irreversible.

Difusión normal en la unión: Podría pensarse en un proceso de difusión activado térmicamente, aunque parece improbable dado que existe degradación incluso a muy bajas temperaturas. La otra posibilidad sería una difusión a causa del campo en la unión, el cual haría difundirse a los centros con niveles profundos de energía cuyo estado de carga hubiese sido cambiado por el flujo de corriente directa. Igualmente puede desecharse este proceso, dado que, a baja temperatura, los niveles profundos deberían conservar su nuevo estado de carga y, por tanto, continuar la degradación durante horas, aún sin flujo de corriente, y ello no se verifica.

Defectos cristalinos: En cristales de alto dopaje pueden crearse centros no radiantes como consecuencia de defectos que pueden desarrollarse, por ejemplo por falta de apareamiento en la red.

Mecanismo de Longini: El Zn, componente en la fabricación del dispositivo, puede pasar de sustitucional a intersticial a causa de la tensión directa, y este Zn-intersticial, ayudado por el campo eléctrico, se difunde a través de la unión, obteniéndose como consecuencia de ésto un ensanchamiento de la misma y, por tanto, una degradación irreversible.

Conforme a esta teoría, se crearían unos niveles profundos que darían lugar a una recombinación, reduciéndose el tiempo de vida de los portadores pues, para bajos niveles de inyección, resulta inversamente proporcional a la densidad de trampas por unidad de volumen.

Mecanismo de Gold-Weisberg: Durante el flujo de corriente con recombinación en la unión los portadores se recombinan a través - de un centro dado, obteniéndose como resultado la emisión de un fotón o un fonón. De ser ésto último, la energía se entrega al centro de recombinación en un tiempo muy pequeño, lo que provoca un pico térmico (thermal spike) en el mismo. Este pico puede provocar el salto del átomo de Zn a intersticial, el cual se - queda allí sin difundirse. La combinación resultante del Zn-intersticial y la vacancia probablemente será neutral, o bien si fuera aceptor profundo estaría descargada. Este proceso movería átomos aceptores desde la unión, obteniéndose como consecuencia un ensanchamiento de la misma.

De estos resultados se pueden deducir dos causas generales de la degradación:

- niveles profundos en la zona de carga espacial, como consecuencia de la modificación del perfil de potencial de la unión.
- formación de regiones no radiantes en imperfecciones del cristal.

Precisamente para comprobar qué tipo de niveles profundos son los que se crean, o aumentan, en la degradación es por lo que indicaremos una de las técnicas que se han desarrollado para la caracterización de los mismos.

V. ESTADISTICA DE NIVELES PROFUNDOS

Los niveles profundos en la banda prohibida, o "trampas", tienen una gran influencia en los procesos de generación-recombinación, actuando como centros capaces de atrapar un electrón (trampa aceptora) o de liberarlo (trampa donante). Su caracterización implica conocer su naturaleza (aceptora o donante), nivel de energía, densidad y velocidades de captura y emisión de portadores.

Un estudio simple de los niveles profundos se refiere sólo a los centros simples, es decir, aquellos que tienen un sólo nivel de energía y dos estados posibles: uno neutro (0) y otro positivo (+) cuando haya liberado un electrón, si donante, y uno neutro (0) y otro negativo (-) cuando capture un electrón, si aceptor. El paso de un estado de carga bajo al alto puede realizarse emitiendo un electrón o capturando un hueco, y a la inversa capturando un electrón o emitiendo un hueco (Fig.7).

Las velocidades de emisión de electrones y huecos será proporcional al número de trampas en el estado adecuado para producir dicha emisión (n_T^- y n_T^+ respectivamente). Las velocidades de captura serán proporcionales al número de estado libres y al número de portadores que puedan ocupar dichos estados. Las expresiones siguientes recogen dichas proporcionalidades, donde e_n y e_p son los coeficientes de emisión, y c_n y c_p los de captura:

emisión de electrones	$v_{en} = e_n \cdot n_T^-$
emisión de huecos	$v_{ep} = e_p \cdot n_T^+ = e_p (N_T - n_T^-)$
captura de electrones	$v_{cn} = c_n \cdot n_T^+ \cdot n = c_n (N_T - n_T^-) \cdot n$
captura de huecos	$v_{cp} = c_p \cdot n_T^- \cdot p$

donde

$$c_n = \sigma_n \cdot v_{th}; \quad c_p = \sigma_p \cdot v_{th}$$

$$e_n = c_n N_C \exp \frac{E_T - E_C}{kT}; \quad e_p = c_p N_V \exp \frac{E_V - E_T}{kT}$$

siendo σ las secciones eficaces de captura y v_{th} la velocidad térmica o velocidad cuadrática media correspondiente al movimiento térmico de los portadores.

La variación de la concentración de trampas en el estado de menor carga, n_T^- , con el tiempo, o bien, la velocidad de disminución de niveles en dicho estado será:

$$\begin{aligned} \frac{-dn_T^-}{dt} &= v_{en} - v_{cn} - v_{ep} + v_{cp} = \\ &= (e_n + c_n \cdot n + e_p + c_p \cdot p) \cdot n_T^- - (c_n \cdot n + e_p) N_T \end{aligned}$$

que da una exponencial cuya constante de tiempo es $\tau = 1/(e_n + c_n \cdot n + e_p + c_p \cdot p)$. En casos particulares resulta más sencilla. En la tabla se resumen los dos casos extremos: $e_n \gg e_p$ y $e_p \gg e_n$, siendo E_{Fn} y E_{Fp} los seudoniveles de Fermi.

	Posición del nivel	Estado Final	1/ τ
$e_n \gg e_p$	$E_T > E_{Fn}$	Estado de mayor carga	e_n
	$E_T < E_{Fn}$	Estado de menor carga	$c_n \cdot n$
$e_p \gg e_n$	$E_T > E_{Fp}$	Estado de mayor carga	$c_p \cdot p$
	$E_T < E_{Fp}$	Estado de menor carga	e_p

6. DETERMINACION DE NIVELES PROFUNDOS POR TRANSITORIOS DE CAPACIDAD

El fundamento de este método reside en que la capacidad en alta frecuencia de un diodo polarizado en inversa depende únicamente de la anchura total de la zona de deplexión (W), la cual, a su vez, es función de la distribución de carga, estando esta distribución de carga influida por las trampas.

$$C = \frac{\epsilon S}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon(N_D + n_T^+)}{2(V_B - V)}}$$

- Con los datos C_∞ , C_0 y N_D obtendremos la densidad de niveles profundos, N_T

Al contrario de lo que sucede con las trampas de electrones, en las de huecos nunca se puede garantizar el relleno pasando a directa. Por eso, para el estudio de estas trampas, se acude al siguiente procedimiento: Se polariza en inverso al diodo, obteniéndose el diagrama de bandas de la Fig. 9. Si un flujo luminoso de frecuencia $\nu > (E_C - E_T)/h$ incide sobre la unión, se hacen más probables las emisiones de electrones y es posible cargar positivamente todas las trampas (si es donante). Si la frecuencia es $\nu > (E_C - E_V)/h$ se producen pares electrón-hueco, y los huecos pueden ser fácilmente capturados ya que su coeficiente de captura es grande, lográndose igualmente la carga de la trampa. Al quitar la iluminación, todas las trampas por debajo de E_{Fp} tenderán a emitir los huecos, descargándose con una constante de tiempo $\tau = 1/e_p$. Un estudio análogo al caso de trampa de electrones nos permitiría caracterizar esta trampa.

En nuestro comentario nos hemos fijado exclusivamente en las trampas donantes. El estudio hubiese sido totalmente análogo con trampas aceptoras; el único cambio reside en tener un estado de menor carga negativo y un estado de mayor carga neutro.

En la actualidad, en nuestro laboratorio nos encontramos poniendo a punto esta técnica de caracterización de niveles profundos aplicada a diodos de PAsGa que emiten en el rojo del espectro visible. En este caso no parece que pueda ser válido un modelo tan sencillo como el indicado. En las Figs. 10 y 11 se presentan los transitorios de capacidad obtenidos en el paso de directo a inverso (Fig. 10) y con iluminación (Fig. 11), mediante medidas diferenciales hechas en un puente de capacidad a 1MHz modelo Boonton 72BD. Concretamente, en el primer caso hemos obtenido un primer transitorio de capacidad decreciente que nos ha hecho pensar en una trampa de huecos y después capacidad creciente (trampa de electrones). En el caso de iluminación sólo se han detectado trampas de huecos y, sin que sean datos definitivos, con una densidad mucho mayor que las de electrones.

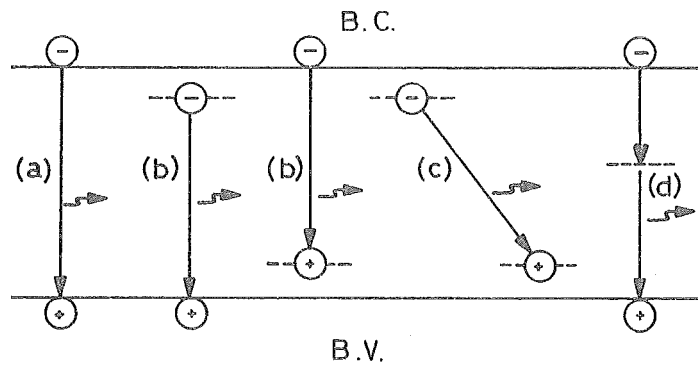


FIG. 1.- TRANSICIONES RADIANTES

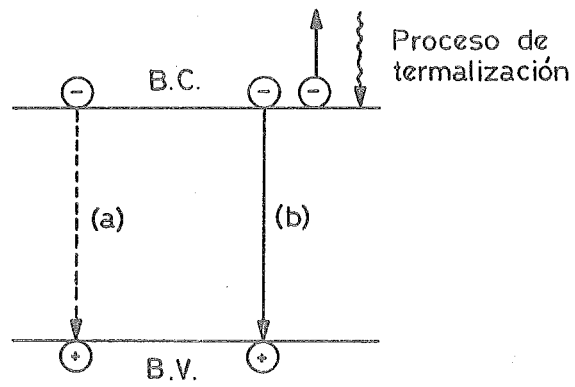
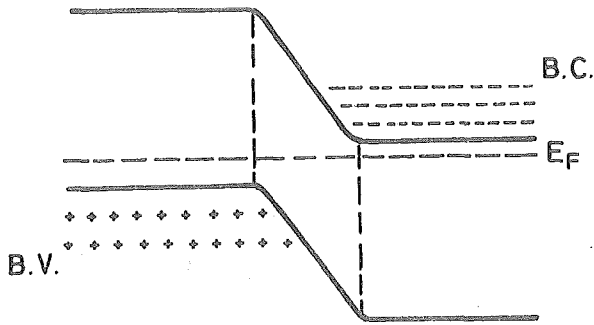
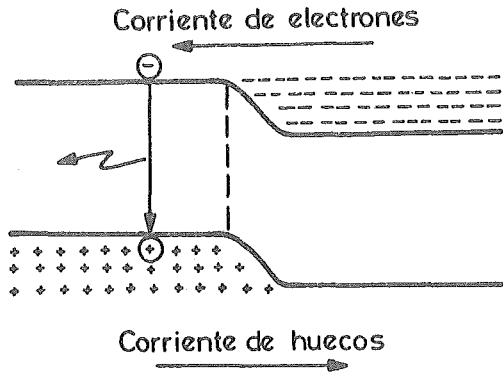


FIG. 2.- TRANSICIONES NO RADIANTES

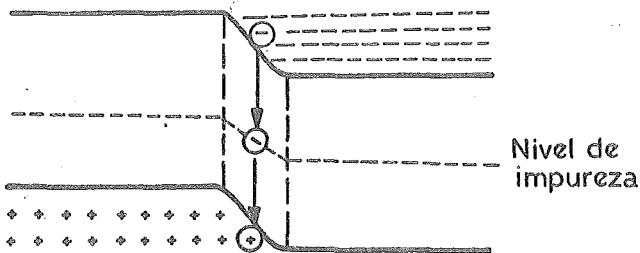


(A) POLARIZACION NULA



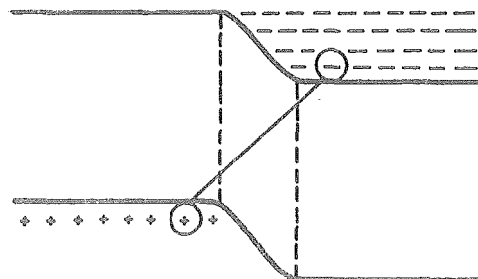
(B) POLARIZACION EN DIRECTO
(Corriente de difusión y re-combinación radiativa)

$$J_d = A \exp(qV/kT)$$



(C) POLARIZACION EN DIRECTO
(Corriente de recombinación en la zona de carga de espacio)

$$J_R = B \exp(qV/nkT)$$



(D) POLARIZACION EN DIRECTO
(Corriente de efecto tunel)

$$J_T = C \exp \alpha V$$

FIG. 3.- RECOMBINACIONES RADIANTE Y NO RADIANTES EN UNIONES P-N

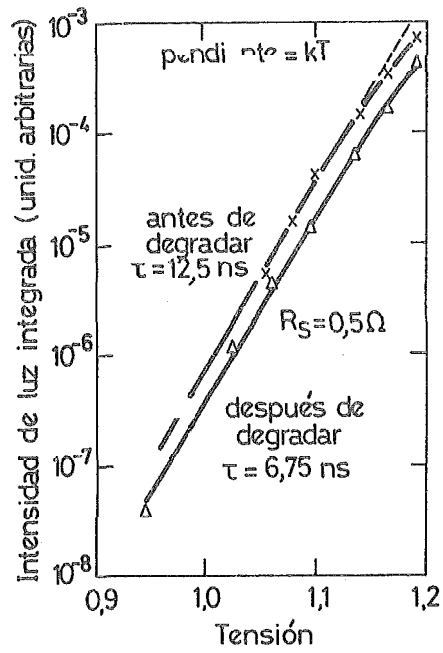


FIG. 4.- INTENSIDAD DE LUZ EN FUNCION DE LA TENSION APLICADA ANTES Y DESPUES DE LA DEGRADACION

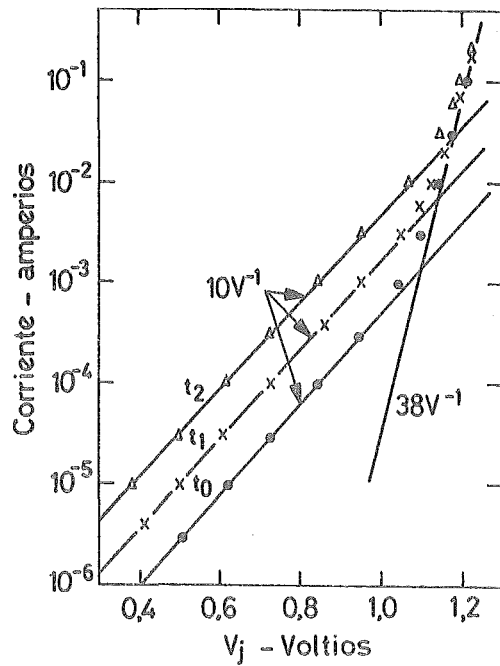


FIG. 5.- CARACTERISTICA I-V DESCOMPUESTA DE UN DIODO EMISOR DE LUZ ALTAMENTE DOPADO ANTES (t_0) Y EN DOS INSTANTES DESPUES (t_1, t_2)

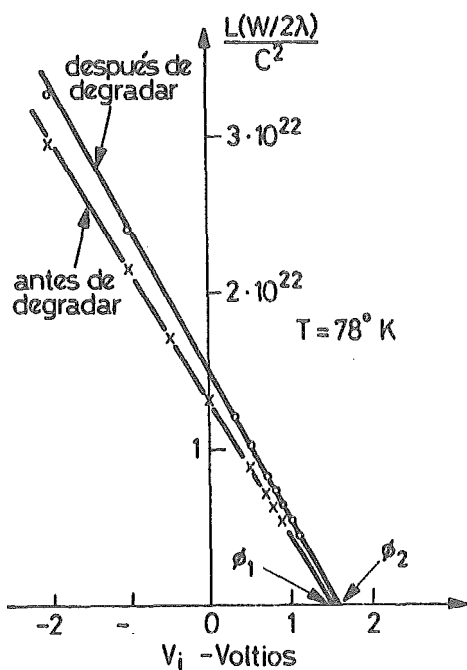


FIG. 6.- DIAGRAMA DE $(1/C^2)L(W/2\lambda)$ EN FUNCION DE LA TENSION PARA UN DIODO EMISOR DE LUZ LIGERAMENTE DOPADO

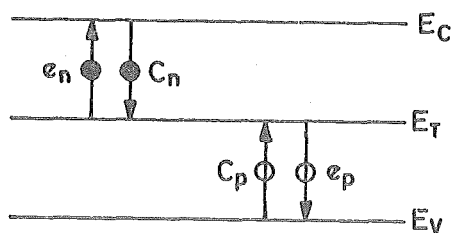


FIG. 7.- TRANSICIONES POSIBLES EN UN SEMICONDUCTOR CON UN NIVEL PROFUNDO

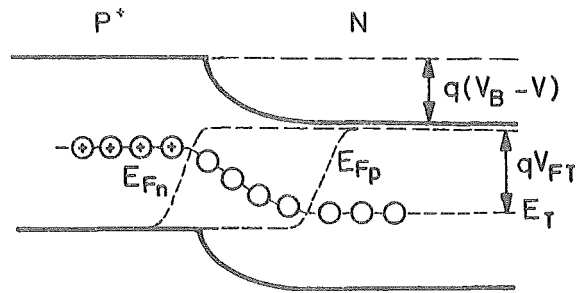


FIG. 8.- DIAGRAMA DE BANDAS DE UN DIODO POLARIZADO EN DIRECTO CON UNA TRAMPA DONADORA

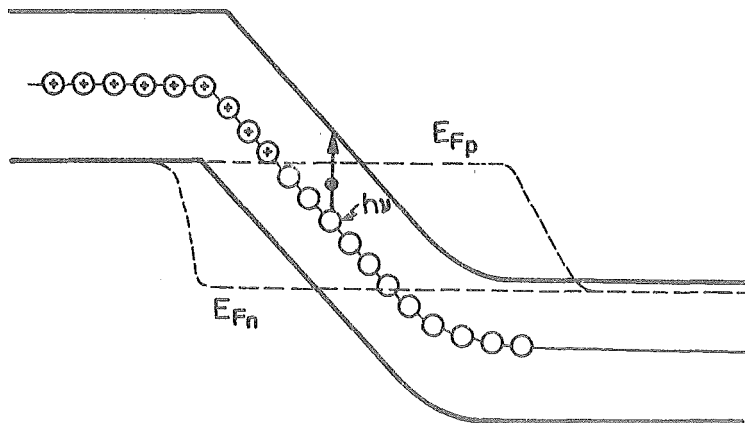


FIG. 9.- DIAGRAMA DE BANDAS DE UN DIODO POLARIZADO EN INVERSO CON ILUMINACION

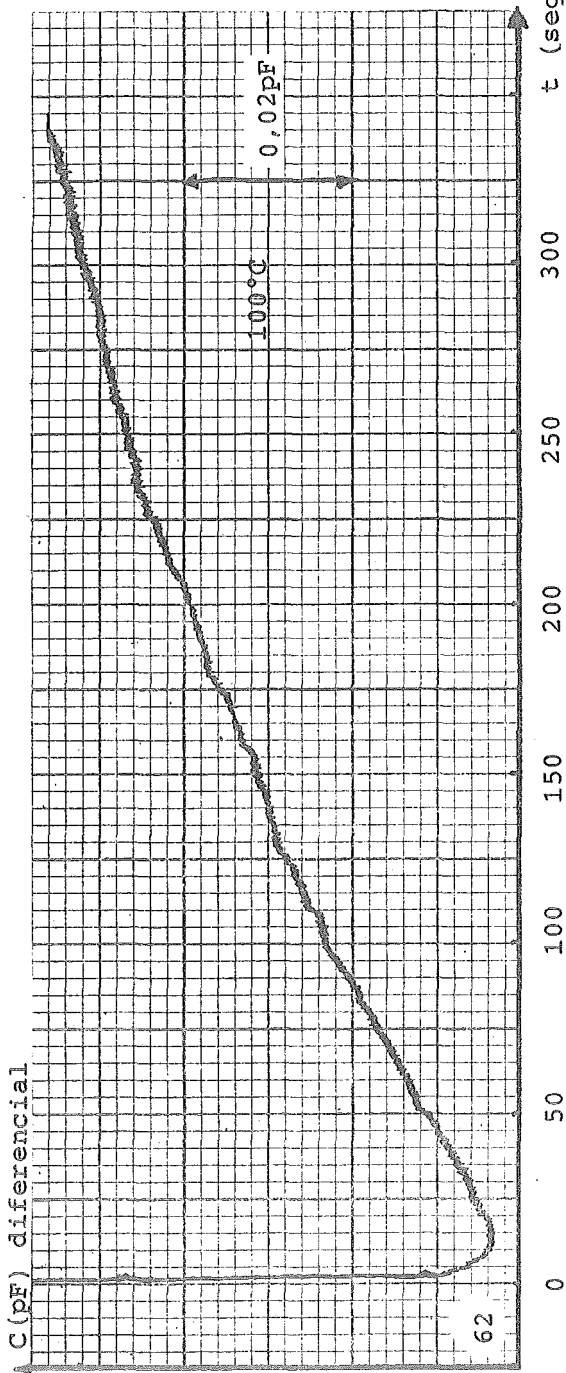


FIG.10.-

(Ambas curvas: Referidas a una $C=28,4\text{ pF}$)
(C diodo - C)

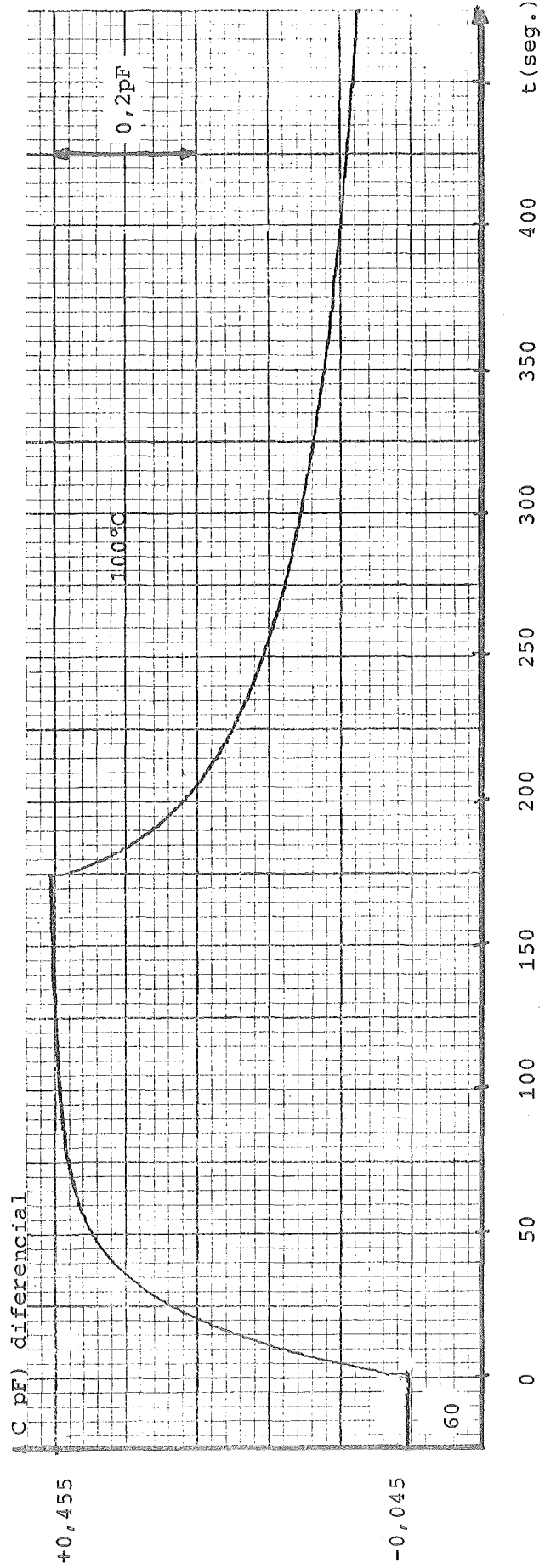
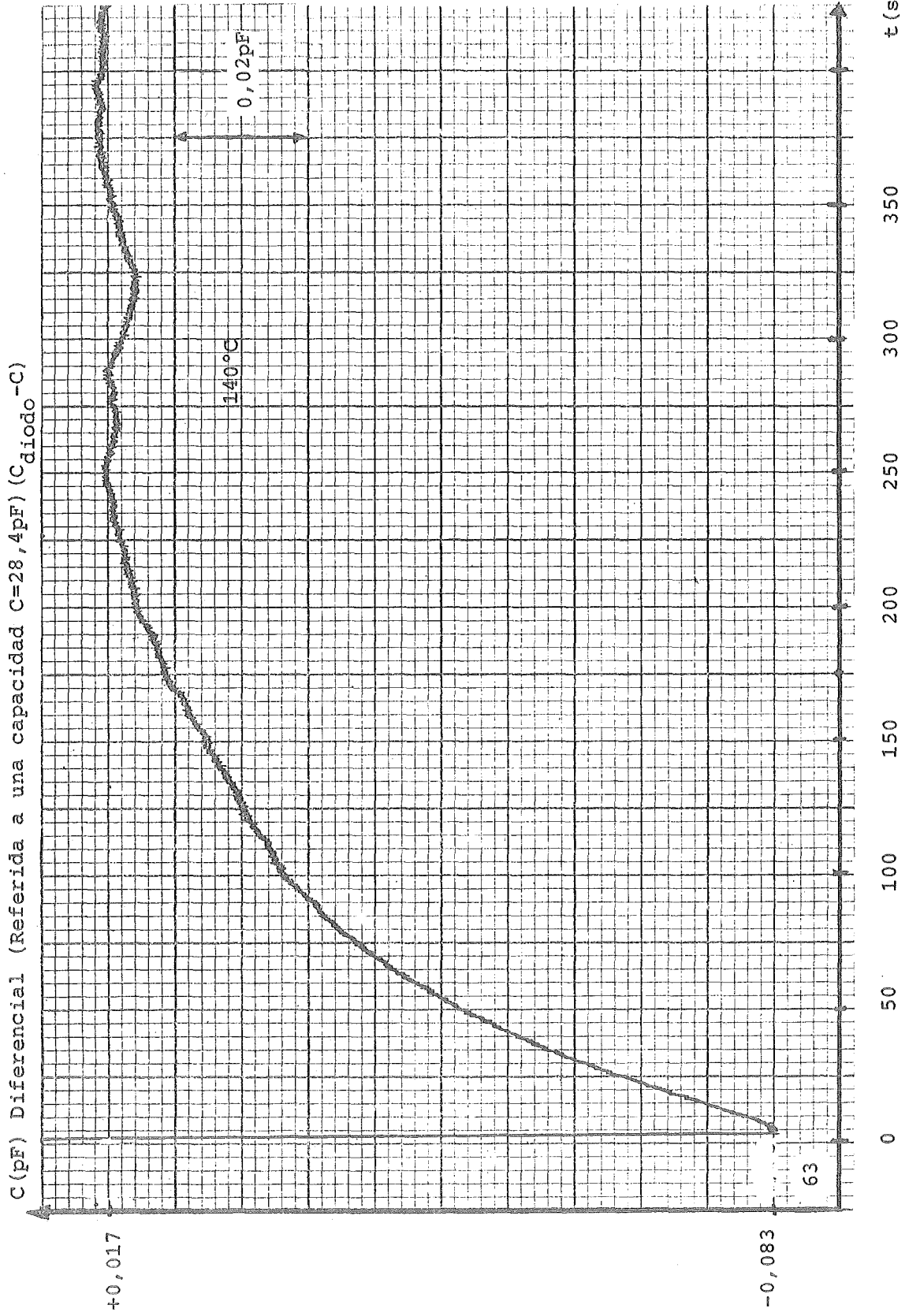


FIG.11.-



C (pF) Diferencial (Referida a una capacidad $C = 28,4 \text{ pF}$) ($C_{\text{diodo}} - C$)

FIG. 12

FOTODETECTORES DE AVALANCHA

Por:

Juan Piqueras Piqueras

Departamento de Física Aplicada. U.A.M.

I.- CRECIMIENTO EPITAXIAL

Se denomina crecimiento epitaxial u orientado, aquel que se realiza en una cierta dirección cristalográfica, esto es, sobre un sustrato se deposita una lámina epitaxial que tiene la misma orientación del sustrato.

Los métodos más importantes para realizar crecimiento epitaxial son:

- Por evaporación en vacío
- Epitaxia en fase de vapor o por transporte químico
- Epitaxia en fase líquida
- Epitaxia por haz molecular

Ya que los dos sistemas más utilizados son el segundo y el tercero nos referimos a ellos exclusivamente.

Los principales requerimientos para hacer una buena epitaxia líquida, y que son comunes a cualquiera de los métodos, son:

- El material que se quiere crecer debe tener una constante de su red cristalina lo más próxima posible a la del material utilizado como sustrato. Para dar una idea numérica digamos que el desacople entre ambas constantes de red debe ser a lo sumo de un 1%, aún cuando esta exigencia puede solventarse utilizando capas intermedias cuya constante de red varía lentamente desde el valor en el sustrato a aquel del material que se quiere crecer.
- Los átomos que alcanzan la superficie del sustrato deben conservar durante un cierto tiempo su energía cinética de agitación térmica, para que tengan oportunidad de alcanzar sus posiciones de mínima energía, es decir, se acoplan en sus posiciones de la red cristalina. Un medio sencillo de conseguirlo es mantener el sustrato a temperatura convenientemente elevada.

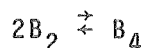
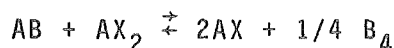
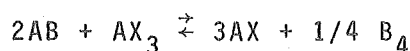
- La deposición de la lámina epitaxial debe ser lenta para que los átomos que alcanzan la superficie del sustrato tengan tiempo suficiente para acomodarse en sus lugares de la red cristalina.

Como puede verse claramente estas dos condiciones últimas están íntimamente ligadas.

II.- EPITAXIA EN FASE GASEOSA

Su característica principal es que el material que se quiere depositar es arrastrado de alguna forma por un cierto gas portador.

Las especies gaseosas existentes en los sistemas semiconductor-halógeno para compuestos III-V son de la forma: AX, AX₂, AX₃, B₂ y B₄, donde A es el elemento de la columna III, B el elemento de la columna V y X el halógeno utilizado. Estas especies están en equilibrio, expresado por las siguientes ecuaciones químicas: (1)



Dichas ecuaciones químicas parecen desplazarse hacia la derecha para temperaturas elevadas, por tanto, el sustrato donde debe formarse la fase sólida debe encontrarse a temperatura inferior que la fuente del elemento III.

Para fijar ideas hemos elegido un sistema de deposición de P_xAs_{1-x}In sobre sustratos que pueden ser AsIn, AsGa, PGa. (2)

En la fig. 1 puede verse un esquema de este sistema de crecimiento. El ácido clorhídrico usado para las reacciones de

transporte se obtiene por descomposición térmica del tricloruro de arsénico arrastrado por hidrógeno en un burbujeador. Dicho clorhídrico ataca al In en la zona de reacción que es transportado en forma de Cl_3In . Dicha zona se encuentra a una temperatura entre 800 y 820°C. El Cl_3In vuelve a descomponerse en la zona del sustrato, a temperaturas entre 650°C y 700°C, depositando In sobre el mismo.

El arsénico y el fósforo se introducen en el sistema a través de unos controladores de flujo, en forma de AsH_3 y PH_3 , que en la zona del sustrato se descomponen depositando As y P.

Finalmente, el dopante se sitúa en un ensanchamiento de una conducción aparte, de donde es arrastrado por un flujo de hidrógeno. Para el dopaje tipo P se utiliza Zn mientras que para obtener capas n se utiliza Se ó Te. El índice de dopaje deseado se obtiene controlando la temperatura del dopante.

Todo el hidrógeno que fluye a través de las distintas conducciones ha sido previamente purificado a través de una membrana de Pd-Ag.

III.- EPITAXIA EN FASE LIQUIDA

El crecimiento se efectúa a partir de una solución saturada que se enfría lentamente, con lo que la especie disuelta se difunde hacia el sustrato depositándose sobre el mismo en forma monocristalina.

Como en el caso de la epitaxia gaseosa nos referiremos a compuestos III-V, y, más concretamente a AsGa.

En estos sistemas se utiliza el galio como disolvente en el que se introduce una cierta cantidad de As suficiente para conseguir una solución saturada a la temperatura de crecimiento.

El sistema se mantiene, como en el caso anterior, bajo un flujo de hidrógeno purificado a través de una membrana de Pd-Ag durante todo el proceso de crecimiento para evitar la oxidación.

Este proceso fue desarrollado por primera vez por Nelson. (3)
 En la Fig. 2 se muestra un esquema simplificado del sistema de crecimiento.

En dicho sistema, el Ga fundido se pone en contacto con un trozo de AsGa policristalino y con el dopante (estaño en el caso de la figura) inclinando hacia un lado el horno. En el lado opuesto del crisol se mantiene sujeto el sustrato monocristalino. Una vez que se ha conseguido la saturación, el sistema se inclina en el sentido contrario de forma que la solución saturada queda en contacto con el sustrato monocristalino y se baja lentamente la temperatura.

El inconveniente de tener que mover el horno puede dar lugar a inestabilidades en la temperatura dando lugar a capas epitaxiales de poca homogeneidad.

Otro tipo de sistema muy utilizado ha sido el vertical. (4)
 En la Fig. 3 puede verse un esquema de tal sistema. El sustrato así como el trozo de AsGa policristalino utilizado para la saturación se sujetan entre dos prismas de cuarzo abrazados por un anillo y pueden introducirse en el crisol que contiene el Ga fundido.

Aún cuando el sistema consigue algunas mejoras en cuanto a estabilidad de temperaturas presenta el inconveniente de que ha de abrirse entre la saturación y el crecimiento haciendo el proceso largo y tedioso.

En la Fig. 4 se muestra un esquema de bloques del sistema de control y programación de temperatura. Un pequeño voltaje linealmente creciente con el tiempo se suma al termopar de control con lo que el controlador al entender que el sistema se está calentando reduce la potencia suministrada al sistema produciendo un enfriamiento efectivo en el mismo.

Más tarde se desarrolló el sistema llamado deslizante (5)
 que viene a solventar todos estos problemas y añade algunas ventajas adicionales. El crisol como puede verse en la Fig. 5 consta de dos partes una es fija y la otra móvil. En la parte fija existen

dos rebajes para situar un trozo de material policristalino para efectuar la saturación y un sustrato monocristalino. En la parte móvil que desliza sobre la anterior hay perforados una serie de pozos en los que se sitúan las soluciones de crecimiento. La distancia entre los centros de los pozos para las soluciones es exactamente la misma que entre los centros del trozo policristalino y el sustrato.

Para efectuar el crecimiento se sitúa el pozo número 1 sobre el AsGa policristalino hasta que se ha alcanzado la saturación, entonces dicho pozo se sitúa sobre el sustrato y se hace descender la temperatura de forma que se crece una capa monocristaliza. Después se estabiliza la temperatura de manera que el 2º pozo que había quedado sobre el policristal efectúa su saturación. Este proceso puede repetirse de forma que pueden obtenerse tantas capas como pozos para soluciones tenga uno en la parte móvil.

En la Fig. 6 puede verse una fotografía del crisol de crecimiento utilizado en el sistema de nuestro laboratorio.

Ya que la parte móvil del crisol es pequeña y se encuentra en el centro del horno, las inestabilidades de temperatura que se producen son pequeñas.

Al igual que en el sistema inclinable, el horno no tiene que abrirse entre la saturación y el crecimiento.

Otras ventajas adicionales son los tiempos extraordinariamente cortos de crecimiento, y el hecho de poder crecer en un sólo proceso varias capas simultáneamente.

En la Fig. 7 puede verse una fotografía del sistema de epitaxia líquida de nuestro laboratorio. El horno de crecimiento está montado sobre cono móvil y el sistema está equipado con un sistema de vacío auxiliar para evacuar el tubo de reacción antes de admitir hidrógeno en él.

IV. - COMPARACION ENTRE LA EPITAXIA GASEOSA Y LA EPITAXIA LIQUIDA

Características de la epitaxia gaseosa:

- Es fácilmente industrializable
- Puede obtenerse grandes superficies crecidas con espesor homogéneo
- No hay partes móviles
- Ya que el elemento de la columna III es más difícil de transportar que el elemento de la columna V resulta un pequeño defecto de estequiometría en este sentido.

Características de la epitaxia líquida:

- El equipo es relativamente más simple
- Las velocidades de crecimiento son más elevadas
- La elección de los dopantes es más amplia
- Ya que para el crecimiento se parte de una fase disuelta rica en Ga y el As tiene una presión de vapor más alta que la del galio, se produce cierta evaporación de As y en consecuencia origina un pequeño defecto de estequiometría en sentido contrario al que ocurre en la epitaxia en fase gaseosa.

V.- APLICACIONES

Prácticamente las aplicaciones de la epitaxia en fase líquida y vapor son las mismas, diodos electroluminiscentes, fotodiodos de avalancha, diodos láser, y componentes de microondas como diodos Gunn, impatt y transistores de efecto campo (MESFETS).

Ya que el elemento de la columna III presenta dificultades de transporte en fase vapor, especialmente cuando se trata del aluminio se prefiere para aquellos dispositivos en que entra el aluminio la epitaxia líquida.

VI.- FOTODIODOS DE AVALANCHA

Un fotodiodo de avalancha es un fotodiodo que utiliza la multiplicación por avalancha como mecanismo de ganancia interna. A diferencia de los fotodiodos habituales, conocidos como fotodiodos de zona de carga espacial, los fotodiodos de avalancha pueden presentar una ganancia interna superior a la unidad.

En principio cualquier unión p-n aislada podría utilizarse como fotodiodo de avalancha, pero ya que la subida del codo de avalancha es casi vertical sería necesaria una fuente de tensión muy estabilizada para que pudiera ser utilizada.

Las características más señaladas de un fotodiodo de avalancha, aparte de su rango espectral que se refiere al material a utilizar, son su ganancia interna y sus características señal-ruido.

La ganancia interna de un fotodiodo de avalancha puede expresarse como: ⁽⁶⁾

$$G_A = \frac{M_e + \phi \left(\frac{\partial M_e}{\partial \phi} \right)}{1 + qn_i \phi \left[(R_L + R_S) \frac{\partial M_e}{\partial V} - \frac{\partial M_e}{\partial I} \right]}$$

Donde

M_e es el factor de multiplicación propiamente dicho

ϕ es el flujo de luz incidente

n_i es la eficiencia de conversión de fotones en pares electrón-hueco.

q es la carga del electrón.

R_L es la resistencia de carga.

R_S es la resistencia en serie asociada.

V voltaje aplicado.

I la intensidad que atraviesa el fotodiodo.

En el numerador, M_e , representa la multiplicación por avalancha propiamente dicha de los portadores fotogenerados. De todos los factores que afectan a la ganancia este es sobre el que más fácilmente puede actuarse en la práctica.

El término $\partial M_e / \partial \phi$ representa la posibilidad de un cambio directo por la iluminación en el factor de multiplicación. Tal cambio se puede observar en algunos casos a través de una disminución en el voltaje de ruptura de un diodo determinado. Este efecto puede conseguirse fundamentalmente de dos formas.

Configuración de campo eléctrico constante a través de la variación de los coeficientes de ionización por efecto de la variación de la población de fonones ópticos, o bien, por variación de la configuración del campo eléctrico, a través de la fotoionización de impurezas profundas que al variar la carga espacial acumulada producen una reconstrucción del campo. Ninguno de estos dos caminos ofrece unas posibilidades muy prometedoras, el primero porque exigiría una iluminación adicional en el infrarrojo lejano (rama óptica del espectro de vibraciones de la red), y el segundo porque el espectro de absorción de un cristal debido a impurezas no suele ser muy grande.

El paréntesis cuadrado del denominador representa el término de realimentación. Ya que el factor de multiplicación aumenta con el voltaje aplicado al diodo, el término $(R_L + R_S) \partial M_e / \partial V$ da lugar a una realimentación negativa, mientras que el término restante $(\partial M_e / \partial I)$ puede ser positivo o negativo dependiendo del punto de trabajo e incluso de la configuración del campo en la región de multiplicación.

El requerimiento básico para la producción de una ganancia útil de corriente en este tipo de dispositivos es obtener una unión libre de microplasma, esto es, de pequeñas áreas en las que el voltaje de ruptura es ligeramente menor que la de la unión en conjunto. Esto hace rechazar el procedimiento de difusión ya que como es sabido produce gran cantidad de defectos donde pueden nuclearse tales microplasma.

Por otra parte ya que la epitaxia permite la obtención de

uniones más abruptas parece mas adecuado este método para obtener campos eléctricos elevados.

En orden a conseguir un funcionamiento lineal en los circuitos optoelectrónicos es de primordial importancia que la ganancia sea constante, e independiente de la señal, es decir que la realimentación no sea muy grande para que las características multiplicación-voltaje sean ⁽⁶⁾relativamente planas. Esto puede demostrarse como demostró Ruegg siempre que la inyección de portadores en la región de multiplicación sea de un solo tipo. Además si los portadores inyectados son aquellos cuyo coeficiente de ionización es mayor las características señal-ruido resultan sensiblemente mejoradas.

En orden a conseguir este efecto Ruegg propuso, una estructura de dispositivos en que la zona de carga espacial de la unión multiplicadora alcanza una región semiaislante sobre la que puede extenderse fácilmente sin aumento apreciable del campo máximo en una unión. Estas estructuras ⁽⁷⁾son conocidas como "reach through avalanche photodiode"(RAPD).

En la Fig. 8 se muestra el esquema de uno de estos dispositivos, metal-semiaislante (ν)-P-N⁺. Si la luz incidente es tal que la energía de sus fotones es superior a la energía del gap, se absorbe en la capa n⁺ y al estar inversamente polarizado el dispositivo sólo los huecos podrán alcanzar la unión, mientras que si la energía de los fotones incidentes es inferior a la energía del gap, pero superiores a la altura de la barrera metal-semiconductor, la luz atraviesa todo el dispositivo inyectando electrones del metal al semiconductor.

En la Fig. 9 puede verse un diagrama de bandas del dispositivo así como un esquema del campo eléctrico sin polarización. Cuando el voltaje aplicado crece la zona de carga espacial se extiende a través de la capa p alcanzando la región semiaislante. A partir de ese momento todo el dispositivo ha quedado vaciado de portadores y el voltaje aplicado se distribuye homogéneamente con lo que el campo máximo crece lentamente.

En la Fig. 10 se muestran algunas curvas teóricas de multiplicación-voltaje para distintos voltajes umbrales y en la Fig. 11 se muestran los resultados experimentales para el mismo dispositivo. Como puede verse aparece la zona casi plana de multiplicación con el voltaje, aunque el umbral no se alcanza de una manera brusca sino suavemente.

Finalmente en la tabla I, se resumen los fotodetectores y emisores indicando aquellos que pueden ser utilizados conjuntamente. El estado actual de las fibras ópticas apuntan hacia los rangos de 0,8 a 0,9 μ m y de 1,0 a 1,1 μ m, que son precisamente ventanas de transmisión o de bajas pérdidas.

En las primeras medidas en AsGa y algunos compuestos (8,9) III-V aparecía que los coeficientes de ionización para electrones y huecos eran distintos, pero más recientemente se ha encontrado que el coeficiente para la ionización iniciada por huecos es ligeramente superior al de electrones, con lo que los fotodiodos de avalancha de AsGa podrían llegar a competir con los de Silicio.

VII.- REFERENCIAS

- 1.- H. Watanabe, T. Nishinaga y T. Arizumi "Vapour Transport Equations for III-V Compound Semiconductors"
- 2.- J. Hallais, C. Schemalli y E. Fabre. "Vapour Epitaxial Growth and Characterization of $\text{InAs}_{1-x}\text{Px}$ "
J. of Crýstal Growth, 17, 173 (1972)
- 3.- H. Nelson, RCA Rev. 24, 603 (1963)
- 4.- W.L. Snyder. "GaAs Liquid Epitaxial Crystal Growth"
Rept. dec. 1968. Stanford Electronic Labs. Stanford. Cali
fornia.
- 5.- I. Mayashi, M.B. Panish, P.W Foy y S. Sumski.
Phip. Lett., 17, 109 (1970)
- 6.- H.W. Ruegg: "Avalanche multiplication as again mechanisun in
Photodiodes" Ph.D. Thesis. Stanford Electronic Labs. 1966.
Stanford. California.
- 7.- I.M. Naqvi, Solid State Electron, 16, 19 (1973)
- 8.- G.E. Stillman, C.M. Wolfe, J.A. Rossi y A.G. Foyt.
Appl. Phip. Lett, 24, 471 (1974)
- 9.- G.E. Stillman, C.M. Wolfe, J.A. Rossi y J.P Dbnnelly.
Appl. Phip. Lett, 25, 671 (1974)

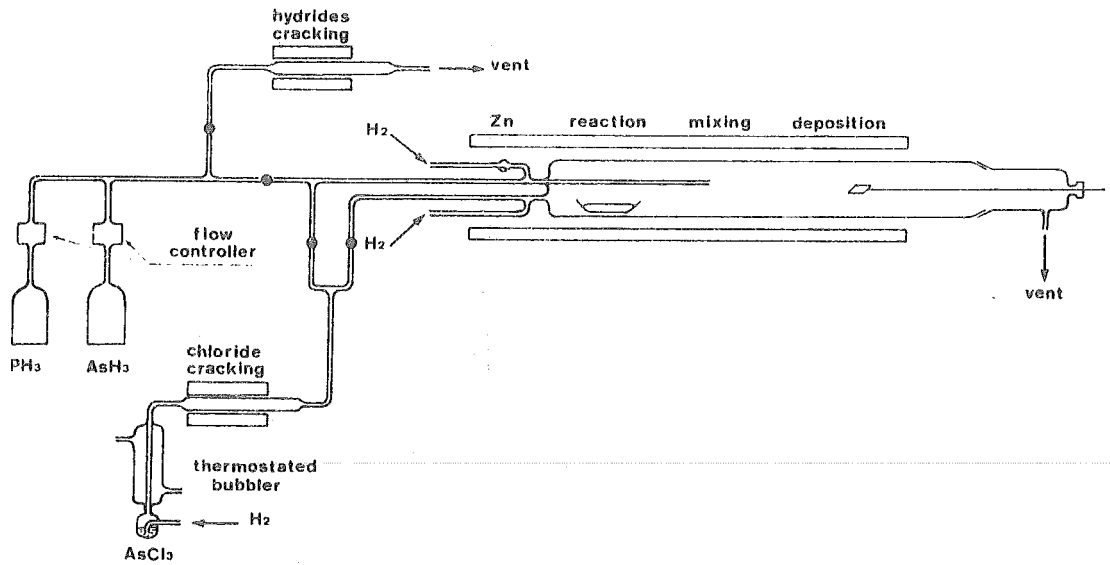


FIG. 1.- Sistema de crecimiento por epitaxia. Fase gaseosa.

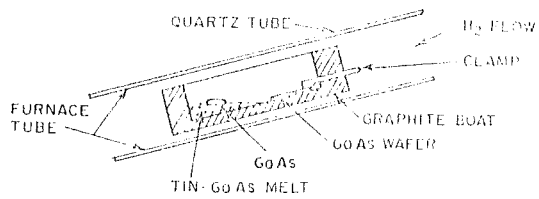


FIG. 2.- Crecimiento por epitaxia en fase líquida. Sistema inclinable.

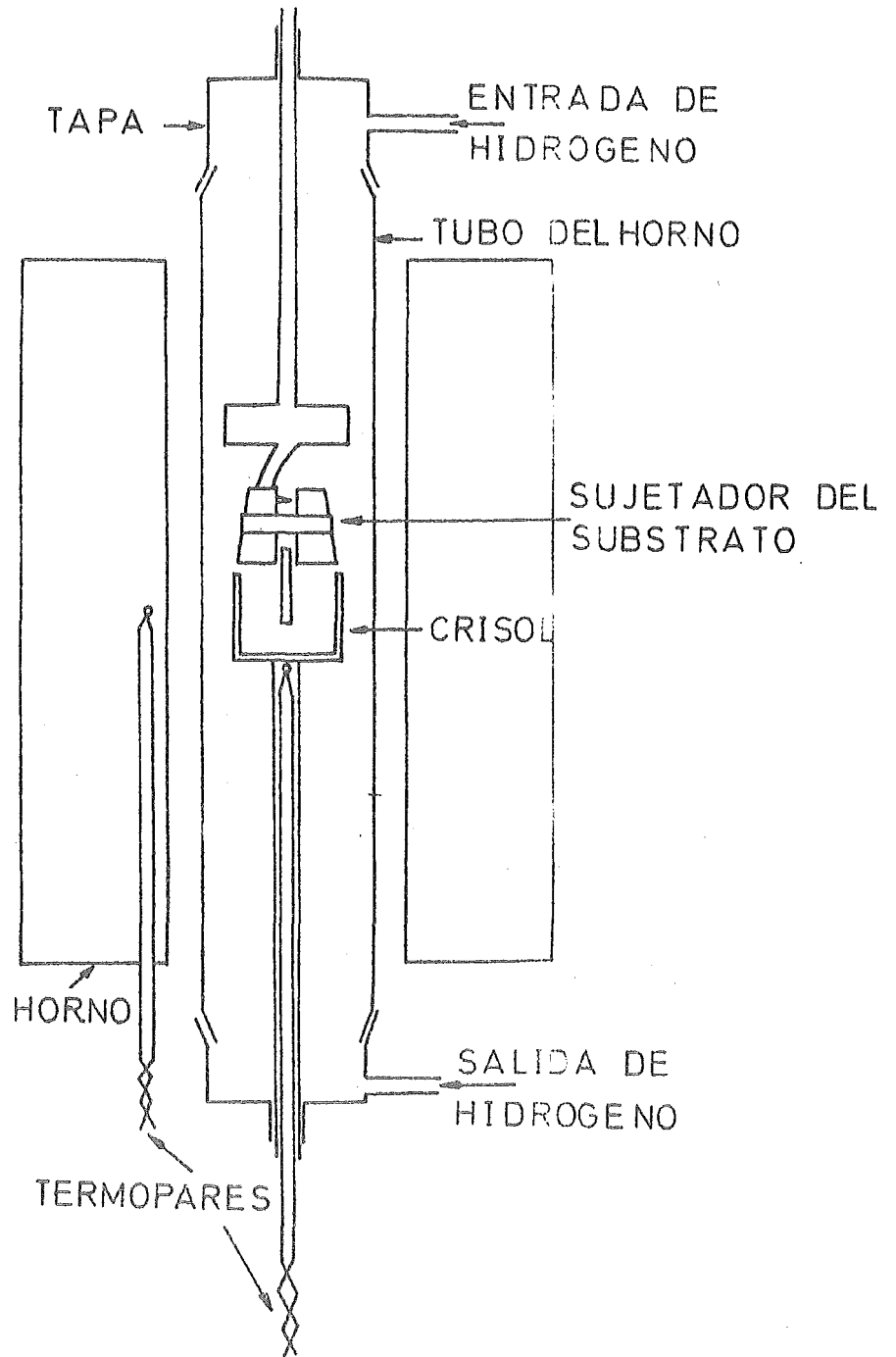


FIG.- 3 Epitaxia en fase líquida.
Horno vertical.

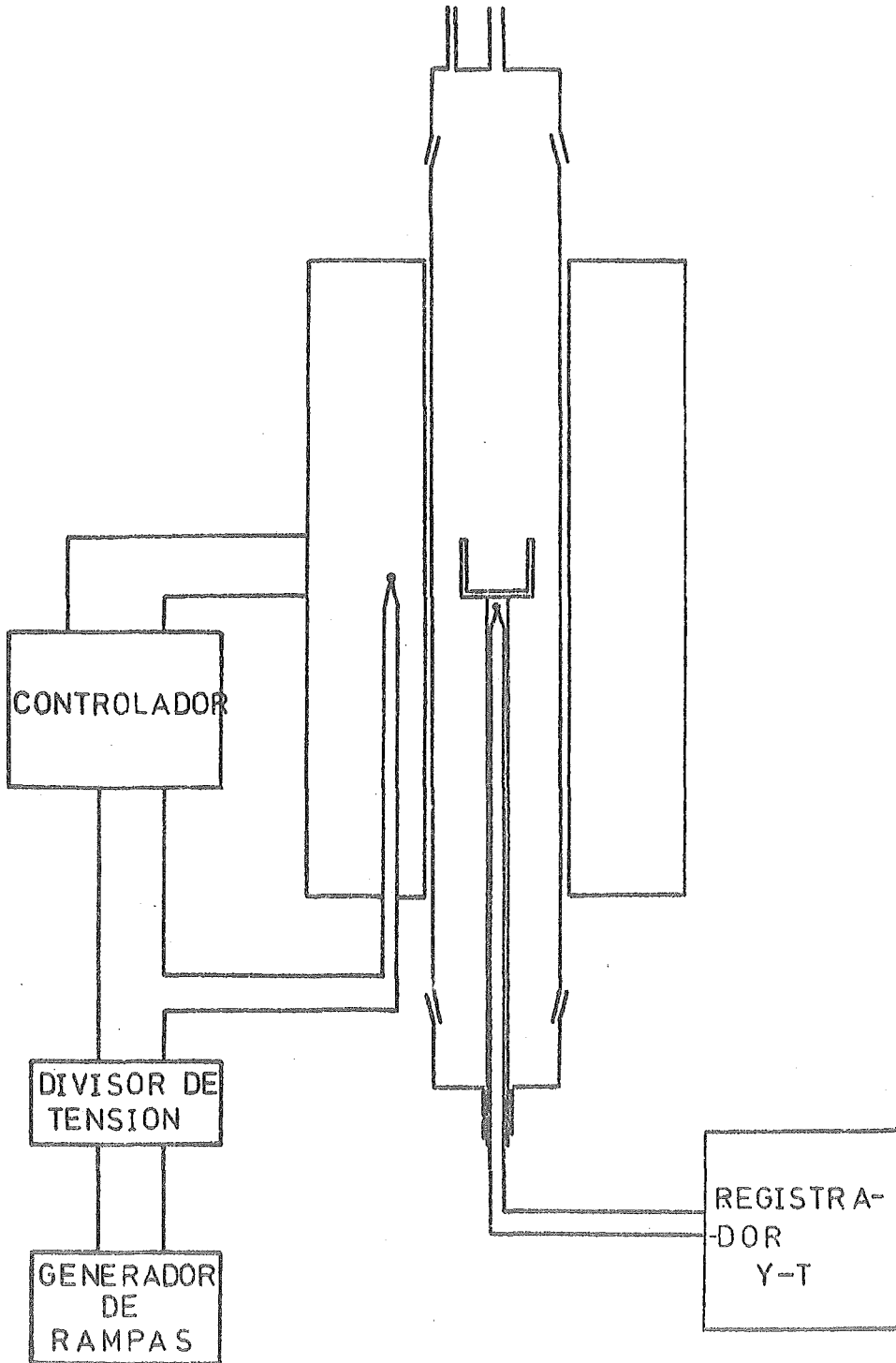


FIG.- 4 Circuito de control de temperatura del sistema LPE vertical.

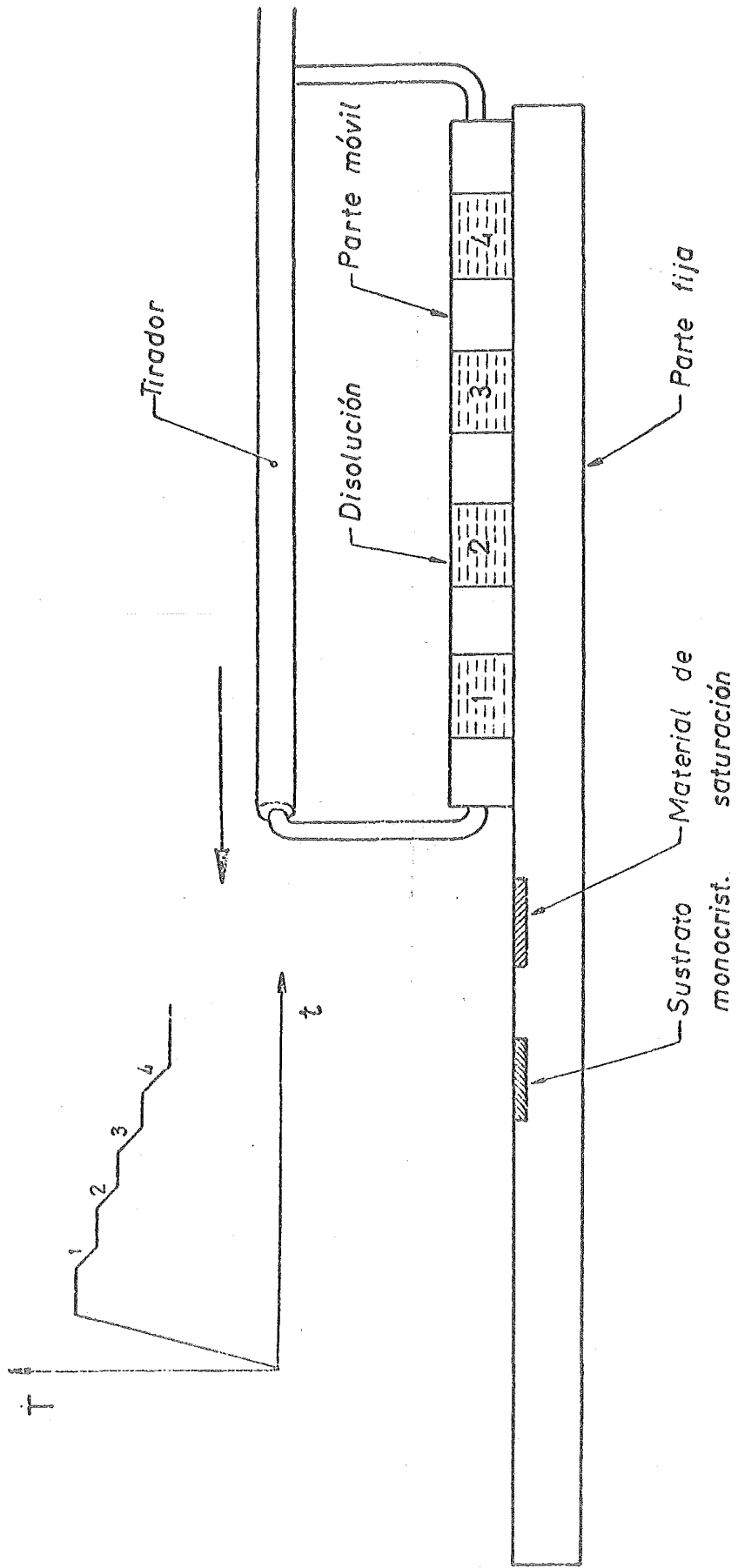


FIG. 5.- ESQUEMA DEL CRISOL DE CRECIMIENTO DE CAPAS SUCCESIVAS



FIG. 6.- Crisol sistema LPE deslizable.

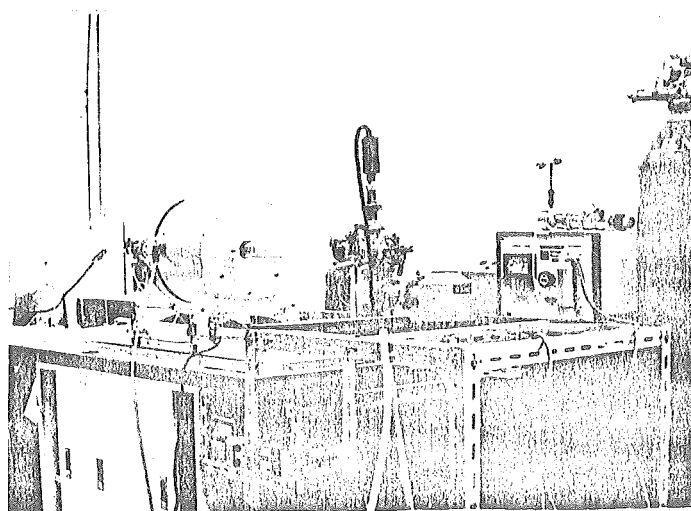


FIG. 7.- Instalación de epitaxia en fase líquida. (U.A.M.)

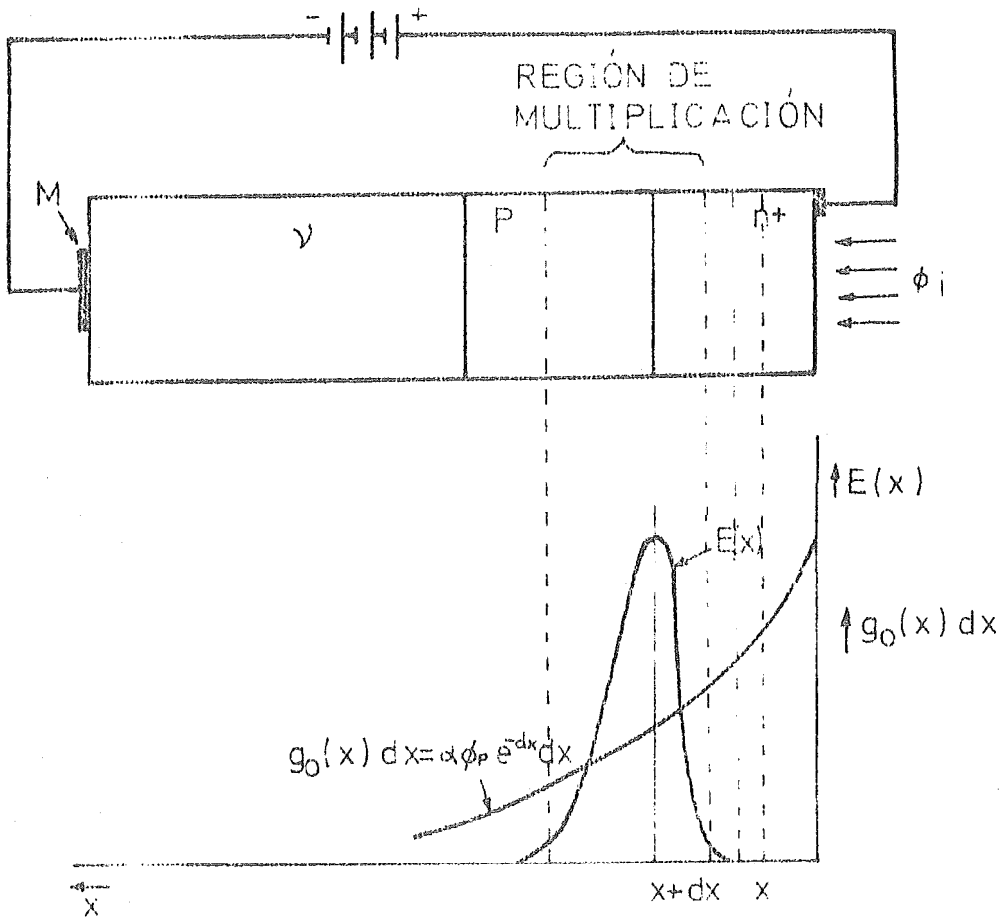


Fig.-B Fotodetector de avalancha de AsGa.

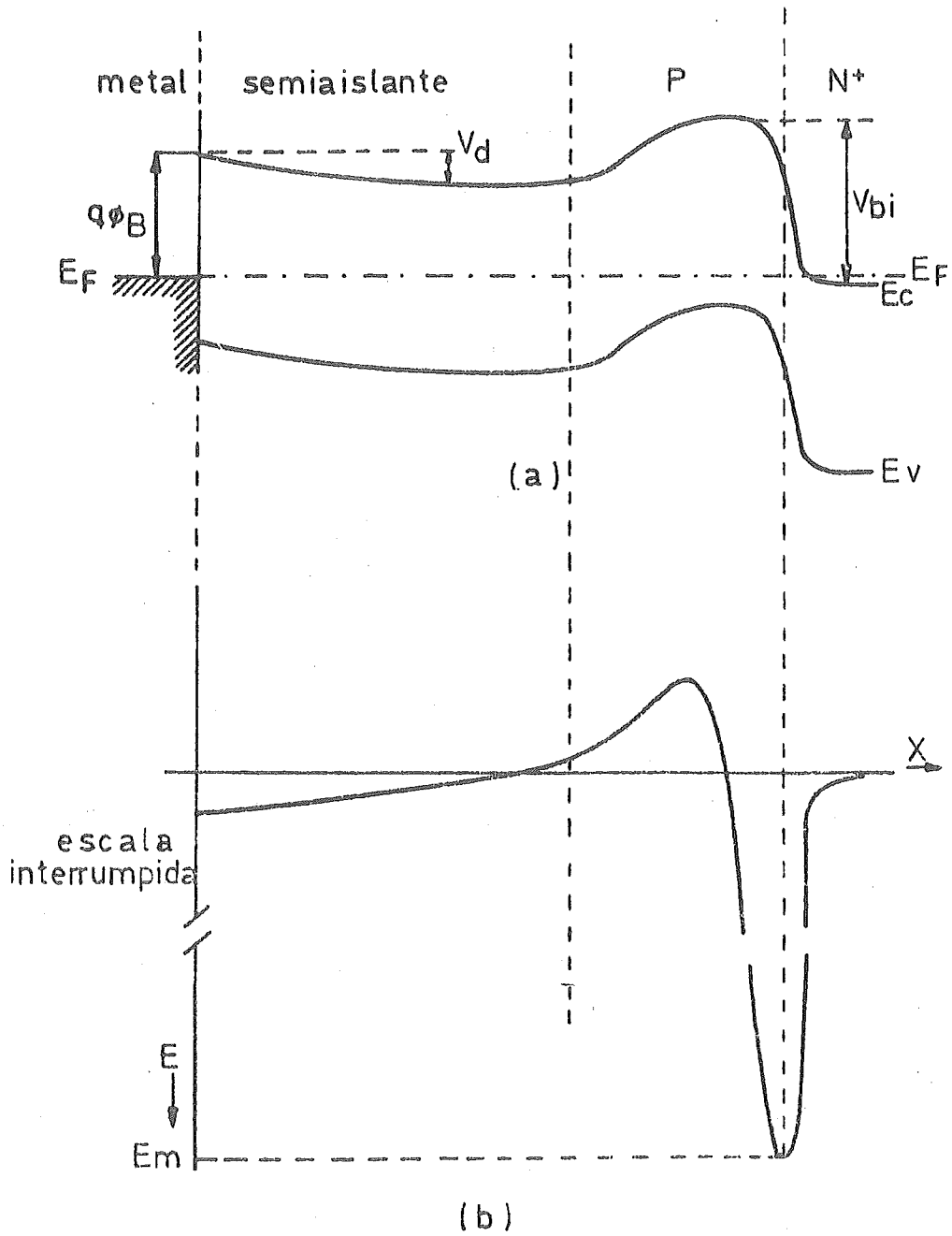


Fig. 9 Bandas y campo eléctrico en el CFAPD de AsGa.

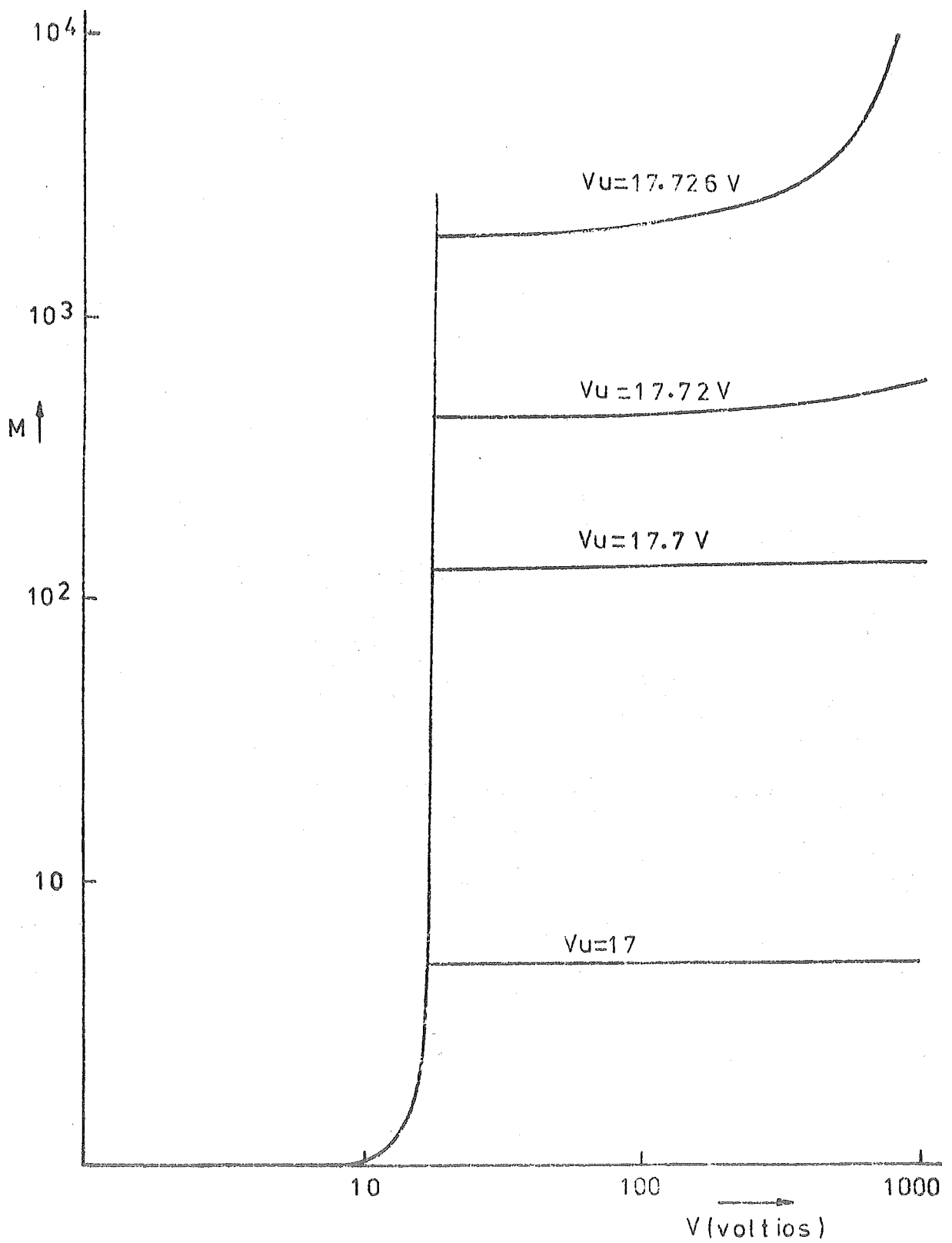


Fig.- 10 Multiplicación-tensión.
Cálculo teórico.

- ◆ - $\lambda = 1.13 \mu\text{m}$ (1.10 eV)
- ▲ - $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$ (1.41 eV)
- - $\lambda = 1.2 \mu\text{m}$ (1.03 eV)
- - $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ (0.83 eV)
- - $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ (1.38 eV)
- - $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$ (1.24 eV)
- △ - $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$ (0.89 eV)
- ◇ - $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ (0.95 eV)

Sn BARRIER
T = 300°K

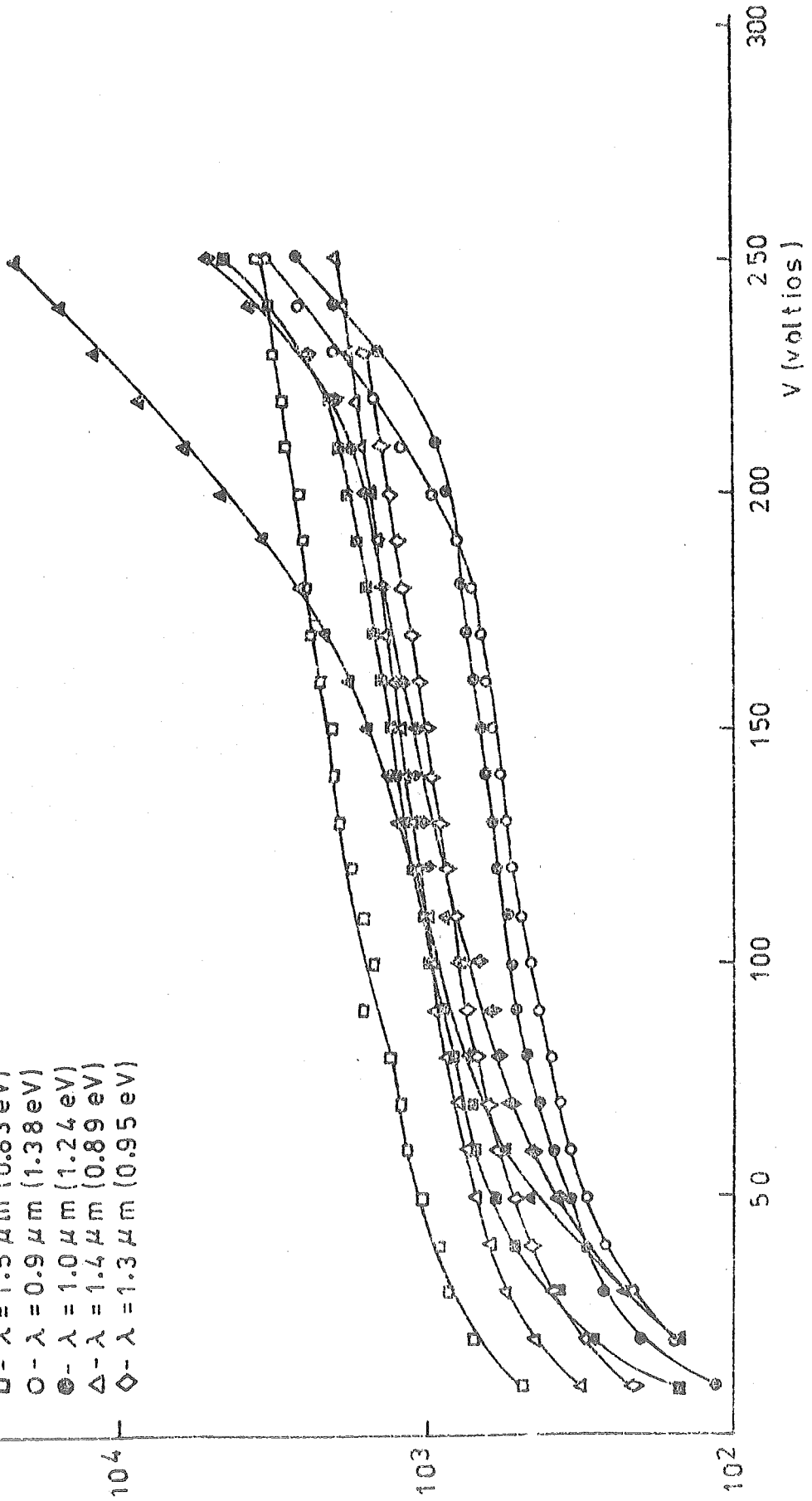


Fig.-11. Multiplicación-tensión aplicada. Resultados experimentales.

TABLA I

DISPOSITIVOS PARA COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS				
LONGITUD DE ONDA λ (μm)	FOTOEMISOR		FOTODETECTOR	
	MATERIALES	ESTRUCTURA	MATERIALES	ESTRUC.
0.8 to 0.9			GaAlAs Ge, Si	p-n p-i-n SB P-N APD RAPD
	GaAs/GaAlAs	DH LED DH Injection laser DFB Injection laser	GaAs Ge, Si	SB CF APD p-i-n p-n SB SB APD RAPD
	GaAs	LED Injection Laser	Ge, Si	p-i-n p-n APD SB SB APD RAPD
0.9-1.0	GaAsSb			
1.0	GaAsSb/ AlGaAsSb	DH LED's		
1.03	InGaAs	LED	InGaAs	SB SB APD
1.0 to 1.1				
1.06	VAG:Nd	Solid-State Laser	Ge, Si GaAsSb	SH

"RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DE LOS CRISTALES LIQUIDOS NEMATICOS"

por:

Francisco Javier Sansa Torres

Cátedra de Tecnología de Fabricación.

E.T.S.I. Telecomunicación.

"RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DE LOS CRISTALES LIQUIDOS NEMATICOS"

1.- ORDEN EN LOS CRISTALES LIQUIDOS NEMATICOS

Los cristales líquidos nemáticos tienen moléculas elongadas y el único orden existente en este tipo de cristales es uno en el que los ejes largos de las moléculas son paralelos entre si.

Con respecto a la superficie soporte de cristal pueden distinguirse dos tipos de alineamiento: Homogéneo y Homeotrópico.

En el alineamiento homogéneo el eje largo de la molécula es paralelo a la superficie, mientras que en el homeotrópico es perpendicular.

2.- ANISOTROPIA OPTICA Y DIELECTRICA

La mayoría de las propiedades físicas de los cristales líquidos presentan anisotropía. Así, por ejemplo, puede definirse una constante dieléctrica paralela (ϵ_{\parallel}) o perpendicular (ϵ_{\perp}) al eje molecular.

Se define la anisotropía dieléctrica ϵ_a ó $\Delta\epsilon$ como:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$$

La anisotropía puede ser tanto positiva como negativa.

Análogamente el índice de refracción de un cristal líquido es también anisótropo. Por otra parte las propiedades ópticas de un cristal líquido pueden modificarse por medio de campos eléctricos o magnéticos.

3.- FENOMENOS ELECTROOPTICOS EN CRISTALES LIQUIDOS NEMATICOS

Se distinguen dos clases fundamentales de interacción.

En el primer caso se efectúa una transición entre un estado transparente y otro dispersor del material. (El ejemplo típico es la dispersión dinámica).

En el segundo caso el cambio de estado interacciona con la luz polarizada. Esto se debe a que el índice de refracción según una dirección determinada puede ser influido por el campo eléctrico.

El resultado de esa interacción puede hacerse visible por medio de un polarizador. (Los ejemplos más familiares son el nemático torsionado y la birefringencia variable).

4.- DISPERSION DINAMICA

El material debe tener anisotropía negativa ($\Delta\epsilon < 0, \epsilon_{\parallel} < \epsilon_{\perp}$) y el fenómeno sucede cuando una corriente continua o de baja frecuencia atraviesa el material. El flujo de corriente induce movimientos del cristal líquido que se hace turbulento y pasa de ser transparente a dispersar luz.

El estado inicial puede ser tanto homogéneo como homeotrópico.

Normalmente se emplea el estado homeotrópico ya que se controla con mayor facilidad. En este caso el primer efecto del campo eléctrico es producir un estado homogéneo, ya que debido a la anisotropía negativa las moléculas se alinean perpendicularmente al campo.

Este fenómeno está al parecer relacionado con la existencia de impurezas en el material, que facilitan el paso de la corriente que es quien causa la turbulencia en el cristal.

La misma naturaleza del fenómeno, hace que éste no tenga una tensión umbral claramente definida.

5.- NEMATICO TORSIONADO

Consideremos un material nemático (y con $\Delta\epsilon > 0$) contenido entre dos superficies que han sido tratadas para producir un alineamiento homogéneo, y posteriormente giradas para producir una torsión de 90° .

Este tipo de estructura, presenta una interesante propiedad. Al ser atravesada por luz polarizada linealmente con su vector E paralelo al alineamiento inicial, el campo es rotado 90° en su paso por el dispositivo. Por tanto ofrece esta estructura la interesante propiedad de permitir pasar de luz no polarizada a polarizada.

Al aplicarle un campo eléctrico al dispositivo se obtiene, debido a la anisotropía positiva del dieléctrico, un alineamiento homeotrópico con lo que la rotación del plano de polarización desaparece.

Aplicando unos polarizadores girados 90° al dispositivo e iluminandolo con luz sin polarizar el dispositivo pasa con la aplicación de un campo eléctrico de ser transmisor a opaco.

6.- BIREFRINGENCIA VARIABLE

Este efecto puede obtenerse con materiales de anisotropía tanto positiva como negativa.

En el caso de la anisotropía negativa su funcionamiento es el siguiente. El material está inicialmente con un alineamiento homotrópico. La aplicación de un campo eléctrico hace que las moléculas se orienten perpendicularmente al campo y la célula se convierte en birefringente.

Si se pone la célula entre polarizadores cruzados la luz queda bloqueada en el estado OFF y lo atraviesa en el estado ON.

El fenómeno comienza para una tensión umbral entre 5 y 10V para una película de 10 micras.

7.- TIEMPOS DE CONMUTACION

Los tiempos de conmutación, tanto para fenómenos de efecto de campo como para la dispersión dinámica, vienen dados, de forma aproximada, por las fórmulas siguientes.

$$\tau_{\text{ subida}} = \frac{C_1 \eta d^2}{\epsilon v^2}$$

$$\tau_{\text{ bajada}} = \frac{C_2 \eta d^2}{K}$$

Siendo C_1 y C_2 constantes características del material, η la viscosidad, ϵ la constante dieléctrica efectiva, K es una constante elástica de Franck, d el espesor de la célula y v la tensión aplicada.

8.- INFLUENCIA DE LOS CAMPOS MAGNETICOS

La influencia de un campo magnético estático, sobre un C.L.N, es el lograr el alineamiento de las moléculas.

La energía magnética viene dada por:

$$U_{\text{mag}} = - \frac{1}{2} \chi_a (\bar{N} \cdot \bar{H})^2$$

donde $\chi_a = \chi - \chi_{\parallel}$; y N el director.

Si $\chi_a > 0$, un campo aplicado perpendicularmente a la superficie de alineamiento tenderá a linear las moléculas perpendicularmente respecto a la superficie.

Se define ξ como la medida de la longitud de la región en la cual la orientación cambia de paralela a perpendicular.

$$\text{Se obtiene } \xi = \left(\frac{K}{\chi_a} \right) \frac{1}{2} \pi/H$$

a $\xi \equiv$ longitud de coherencia

Fréedericksz ha demostrado que un C.L.N, entre placas paralelas y con orientación normal a las mismas, en presencia de un H de intensidad suficiente, se orientará paralelamente en las mismas.

$H_c \propto \frac{1}{d}$ donde d es el espesor de la muestra, la transición no sucederá si la longitud de coherencia es menor o igual que d/π .

R E F E R E N C I A S

C R C A Review of the structure and Physical properties of liquid
cristals pp. 28-33.

CREAGH Nematic liquid crystal materials for Displays
Proc IEEE Jul. 73 pp. 814-823

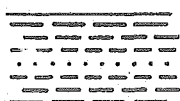
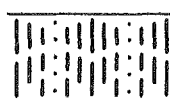
CAMATINI Progress in electrooptics. Plenum Press 1975. pp. 87-107.

Nemático

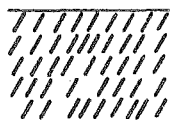
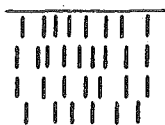
Homeotrópico



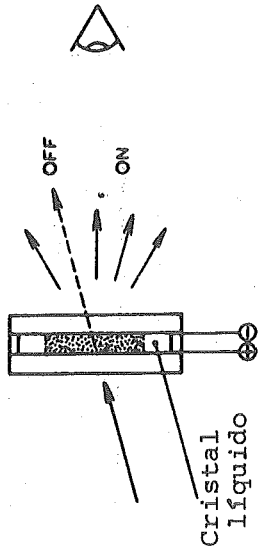
Homogeneo

ColestéricoPlanos de
Grandjean

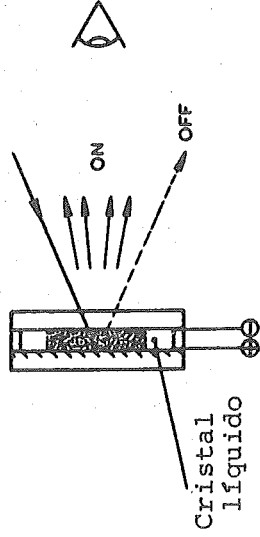
Estructura focal cónica

Esmectico

(a) Transmisión

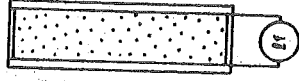


(b) Reflexión



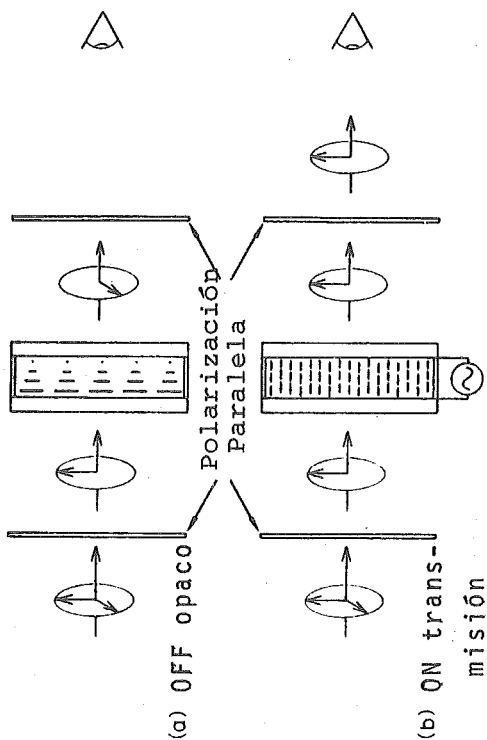
OFF

Nemático transparente



ON

Dispersión Dinámica



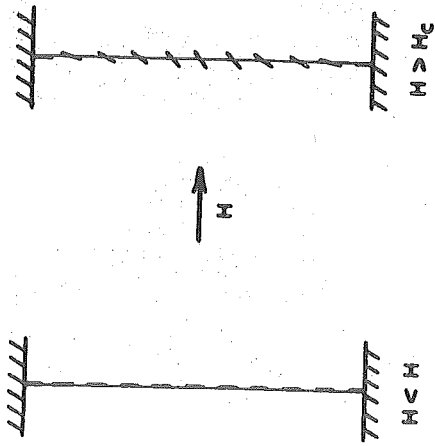
OFF

Nemático
Torsionado
Rotador

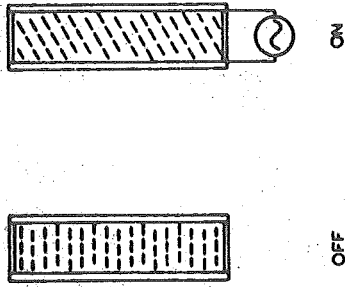


ON

Nemático
Homeotrópico



Transición de Fréedericksz



OFF ON
 Nemático Nemático
 Homeotrópico Birefringente
 Birefringencia Variable

EXPERIENCIAS DE MODULACION MAGNETOOPTICAS EN CRISTALES LIQUIDOS

Por:

Fco. Javier Sansa Torres

Cátedra de Tecnología de Fabricación.
E.T.S.I. Telecomunicación. U.P.M.

EXPERIENCIAS DE MODULACION MAGNETOOPTICA EN CRISTALES LIQUIDOS

1.- DESCRIPCION DEL MONTAJE EMPLEADO Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La idea del experimento era observar la influencia de los campos magnéticos sobre la transmitancia de un cristal líquido neumático.

Para ello se efectuó un montaje en el que el cristal líquido se introdujo en un capilar de vidrio. Este capilar era iluminado por un extremo por un láser, cuya luz tras atravesar el cristal líquido era recogida en el otro extremo por medio de una célula solar.

El campo magnético se aplicaba transversalmente al capilar y para ello se dispuso a este entre los polos de un electroimán.

El campo magnético que aplicado era un campo alterno y de baja frecuencia. Se observó que, con este montaje, se lograba una modulación de la luz del láser.

La modulación que se consiguió era una modulación negativa es decir la influencia del campo magnético disminuía la transmitancia del cristal líquido, con un índice de modulación de aproximadamente un 10%.

Por otra parte la señal recogida en la célula solar presentaba una frecuencia doble que la de la señal moduladora y la profundidad de la modulación variaba en forma aproximadamente parabólica con la tensión moduladora, para valores superiores a una cierta tensión umbral.

2.- BREVE EXPLICACION TEORICA

Es un hecho conocido que la agitación técnica de las moléculas de un cristal líquido puede ser causa de que este disperse la luz.

La influencia que un campo, ya sea eléctrico y magnético, puede tener sobre este comportamiento del cristal líquido es muy varia-

ble dependiendo del efecto alineador de las paredes y de la forma de aplicación del campo.

En el caso que estamos examinando la pared del capilar propicia un alineamiento con el vector director paralelo a la dirección de propagación de la luz.

Si aplicamos un campo transversal se logra, aprovechando un efecto similar al de Freedericksz cambiar la tendencia al alineamiento inducido por el capilar, para un campo mayor que un cierto campo umbral.

En este caso el coeficiente de atenuación crece según una ley que depende del cuadrado del campo lo que explica que aparezca el segundo amónico de la frecuencia del campo aplicado exteriomente.

R E F E R E N C I A S

- Hu y Whinnery. Losses of a nematic liquid crystal optical waveguide. J. Optical. Soc. of America. Vol. 64 pp 1424-1432. 1974.
- CRC. A review of the structure and physical properties of liquid crystal. pp. 28-33.

TENDENCIAS Y PERSPECTIVAS EN LAS COMUNICACIONES
OPTICAS

Por:

J. Antonio Martín Pereda

Cátedra de Tecnología de Fabricación.
E.T.S.I. Telecomunicación. U.P.M.

I.- INTRODUCCION

Según hemos visto en las charlas que nos han precedido, varios son los puntos a considerar a la hora de hacer una adecuada elección de los medios emisores de radiación. Una primera es, evidentemente, la longitud de onda a transmitir. Otra, la posibilidad de fácil modulación de la señal emitida. Finalmente, las características de los pulsos transmitidos, tanto en duración temporal como en anchura espectral, requieren también un cierto estudio.

Dos son los principales candidatos como emisores de luz: los láseres basados en el AsGa y los en el Nd. Las características de las fibras ópticas eliminan casi automáticamente a los otros tipos de láser que pudieran resultar mas cómodos, al menos desde un punto de vista de facilidad de trabajo. Y que son láseres, además, con bastantes mas años de experimentación que aquellos. Quedan eliminados así láseres como el de Rubí, el de He-Ne y el de Ar, que a todos resultan mas familiares. Y que por otra parte, al trabajar en la región visible del espectro, podrían eliminar peligros e inconvenientes que el uso de la zona del infrarrojo acarrea. Pero, por el momento, los límites están fijados y a ellos nos ceñiremos.

Comencemos, en primer lugar, analizando brevemente la situación actual de los láseres de AsGa y de los de Nd. Es un hecho el que los primeros se encuentran ya, en un punto en el que, aunque pueden tener problemas, su facilidad de manejo y su comodidad de empleo aventaja con mucho a los de Nd. Los de Nd de que se dispone en el mercado son láseres de gran tamaño, que manejan altas potencias y en los que la modulación de la señal emitida no es fácil. Los de AsGa, por el contrario, son de dimensiones muy reducidas, de potencias de trabajo medias y de modulación muy simple gracias a su mecanismo de inyección. Esta conversión directa de energía eléctrica en óptica hace que todos los circuitos electrónicos asociados sean mucho mas elementales que en otras situaciones y de aquí el interés en su uso. Por el contrario, las propiedades espectrales del láser de Neodimio son considerablemente superiores merced a la estructura de la línea de la transición entre los niveles

${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ del ión libre de Nd, que se mantiene en el cristal. Su longitud de onda de emisión, por otra parte, es tan adecuada o más, que la del AsGa, según vimos en las propiedades de las fibras.

Queda, en consecuencia, como problema básico a resolver en el láser de Nd el de su tamaño. Y las perspectivas actuales parecen esperanzadoras. Veremos aquí algunas de las tendencias presentadas en los últimos meses analizándolas con vistas a su aplicación práctica.

A modo de resumen, en la Tabla adjunta aparecen los requisitos necesarios en un transmisor láser que serían precisos en un sistema de comunicaciones ópticas de banda ancha, comparando lo ofrecido y lo posible en los dos láseres que nos preocupan.

II.- CARACTERISTICAS DE LOS LASERES DE Nd (Nd:YAG)

Como hemos visto antes varias son las características que presentan los láseres de Nd, y que los hacen trabajar con ventaja sobre los de AsGa. Estas, detalladamente, son las siguientes:

- a) La longitud de onda de emisión es de $1,06\mu$, que coincide con una región de bajas pérdidas de las fibras usadas.
- b) Esta mayor longitud de onda de trabajo, le da una gran ventaja intrínseca sobre los de AsGa (de longitudes de onda entre $0,8$ y $0,9\mu$) con respecto al mecanismo de pérdidas asociado con la dispersión Rayleigh, que como sabemos presenta una dependencia con $1/\lambda^4$.
- c) Su emisión espectral es mucho más estrecha que en un láser de inyección, por lo que se obtendrán una dispersión por el material, mucho menor.

T A B L A

Requisitos	Diodo Láser AsGa	Láser miniatura Nd bombeado con un LED.
1 Potencia de salida adecuada.	●	△
2 Longitud de onda adecuada con las mínimas pérdidas de la Fibra.	△	●
3 Larga vida.		○
4 Pequeña anchura de banda de la Línea de Emisión.		○
5 Estabilidad en la emisión.	—	●
6 Capacidad de modulación directa.	●	—
7 Gran anchura de banda en la modulación.	●	—
8 Posibilidad de integración con otros dispositivos.	●	△
9 Alta eficiencia de acoplo.	●	△
10 Pequeño consumo de potencia.	○	
11 Economía de producción.	○	
12 Pequeño volumen.	●	△

● Realizado

△ Realizable

○ Probablemente mas fácil de realizar con este tipo de láser

— Realizable unicamente con dispositivos auxiliares.

- d) Es relativamente fácil obtener una salida monomodo.
- e) Con un bombeo por LED se espera tenga una vida relativamente larga.

Desde 1964 existen láseres de este tipo trabajando en forma continua, a temperatura ambiente, y con un bombeo por lámpara de halógenos dentro de una cavidad de sección elíptica. Es bastante fácil de obtener una salida multimodo de potencia superior a los 10w y con un rendimiento de alrededor del 1%. Pero su alto consumo y la necesidad de refrigeración por agua, hacen de él que, en estas condiciones sea impracticable su uso directo en un sistema de comunicaciones.

En 1969 se comenzó a estudiar la posibilidad de miniaturizarle, basándose en el hecho de poder bombearle mediante un LED que emitiese alrededor de los 8100 Å. Los primeros estudios dieron resultados de una salida de 1,4mw habiendo gastado 30w en la excitación de los LEDs.

Entre las estructuras empleadas, la mas extendida fue la de un LED acoplado directamente, a través de una pasta transparente de unión, a un extremo de la barra de Nd:YAG. Las dimensiones de ésta eran de 5mm x 0,45 mmφ, y sus extremos estaban recubiertos por espejos dieléctricos. Esta configuración no ha dado lugar a lo que se esperaba de ella, esencialmente por la dificultad de un acoplo eficiente.

Una solución, recientemente presentada por Ostermayer, (1) es la que puede verse en la Figura. En ella se sigue bombeando por un extremo, pero la diferencia es de que se hace por reflexión de la luz emitida por el LED sobre una semiesfera de vidrio recubierta internamente de una metalización de oro. Ambos elementos, LED y varilla de Nd:YAG, se encuentran muy próximos al centro de dicha esfera. Los extremos del láser se recubren de una cubierta tal que posea muy alta reflectividad para 1,06μ y una transmisión superior al 90% para 8050 Å (longitud de onda de emisión del láser). Con este montaje, aproximadamente un 56% de la potencia emitida por el -

LED es absorbida por el láser, obteniéndose al final un rendimiento del 0,07%. Con una corriente de unos 250mA en el LED, la salida del láser fue de 0,25 mW. (multimodo)

Como puede apreciarse aún falta bastante para conseguir un resultado aceptable.

Otra solución que creo puede ser base de futuros desarrollos, es la presentada por G. Winzer, et al. (2) En ella, una de las formas de laseado que utiliza es radicalmente diferente a la de los láseres convencionales. Es la que suele denominarse para láser de película delgada y que puede verse en la Figura correspondiente. En ella el láser está constituido por la colocación de un "espejo" de película delgada en cada uno de los extremos de una guía-onda. Estos "espejos" no son sino redes de difracción reflectantes, realizadas sobre el substrato, y sobre los que se depositó la película. Una red de unas 500 líneas, en una anchura de alrededor de 0,1mm, es capaz de reflejar virtualmente toda la luz, con lo que si el material de la película es el adecuado, podrá alcanzarse la acción láser. Hasta 1974 el uso de estos láseres fue muy escaso debido al material empleado: el poliuretano dopado con rodamina 6G. Su vida, como láser, no alcanzaba a las seis horas, G. Winzer et al., en su trabajo depositaron diferentes tipos de películas, de $P_5O_{14}Nd$, de $P_5O_{14}Nd_{0,5}Y_{0,5}$ y de YAG:Nd. La primera presenta la ventaja de una ganancia óptica seis veces mayor que para la segunda, mientras que ésta tienen la de no sufrir deformaciones al cambiar de estructura cristalina. La tercera ya nos es familiar. En todas estas situaciones, el bombeo se hace directamente sobre la superficie de la película por una batería de LED's que permiten alcanzar el nivel de potencia requerido. En el caso del Nd:YAG, la intensidad requerida es, con mucho la menor de todos los otros materiales de Nd (unos $15W/mm^2$).

Evidentemente la situación no es todavía la que puede servir de antesala a una rápida aplicación práctica. Falta conseguir que la radiación de salida del láser sea modulada y que sea intro-

cida de forma adecuada a un medio transmisor. Ya sabemos que con un láser de Nd esto no es conseguible de manera automática como ocurre con los de AsGa. Es necesario un modulador posterior. Procede, en consecuencia, hacer un pequeño repaso de los tipos posibles de moduladores.

III.- MODULADORES OPTICOS Y EFECTOS FISICOS EMPLEADOS

Como ya es sabido, tres son los grupos en los cuales pueden englobarse todos los moduladores empleados: electro-ópticos, acusto-ópticos y magneto-ópticos. Los primeros engloban efectos - que cambian el índice de refracción, la absorción del material o la dispersión de la luz en su paso por éste. Esencialmente los mas empleados son los que cambian el índice de refracción aprovechando efectos como el Pockels o el Kerr cuya descripción no es éste su lugar.

Los moduladores acusto-ópticos son, básicamente, modula-
dores del índice de refracción de un material, originándose el -
cambio por tensiones mecánicas provocadas por el paso de una se-
ñal acústica. La potencia de este tipo necesaria alcanza órdenes
de 100 wat/cm^2 que pueden ser, a veces, algo altos para las apli-
caciones que aquí vemos.

Con respecto a los magneto-ópticos es solo el efecto Fa-
raday el empleado. Ello lleva consigo el uso de radiaciones lineal-
mente polarizadas lo cual no es fácil de obtener en los láseres de
Nd tipo miniatura como el que hemos estudiado. De hecho muy pocas
han sido las aplicaciones concretas realizadas.

Desde un punto de vista puramente estructural, pueden en-
contrarse asimismo divididos en dos grandes bloques los moduladores
ópticos: en moduladores de volumen y de guía-onda. Si lo que esta-
mos tratando de conseguir es una adaptación, lo mas perfecta posi-
ble, entre un láser de Nd (a ser posible miniatura) y una fibra óp-

tica, parece lógico el que nuestro modulador sea también muy reducido. A fin de obtener una completa integración de todos los componentes, la solución más plausible parece la centrada en torno a los moduladores ópticos en guía-onda. De los hablaremos brevemente.

En el momento actual casi todos los trabajos realizados han tenido como centro a los moduladores, desde un punto de vista aislado. La unión, sobre el mismo sustrato, con el láser, aún no se ha realizado con plena efectividad. Debido a ello, en los análisis que pueden verse en la literatura (3)-(4) aparece como punto importante, en primer lugar, el del acoplo de la luz al interior de la guía-onda. Una de las formas de realizarlo es la que aparece en la Figura, donde puede verse que tanto la introducción como la extracción, se realizan gracias a un prisma. Puede verse un hecho fundamental que separa este caso de la conducción de luz por un simple cristal: aquí ésta pasa, únicamente, por una pequeña región del circuito. Y para que esto ocurra los índices de refracción de los medios que rodean a la guía han de ser perfectamente estudiados. Con ello los ángulos α y β de reflexión total, en la figura, son críticos y diferentes entre sí. Evidentemente, diferentes ángulos de incidencia podrán crear diferentes modos en la guía, por lo que la introducción de un único rayo puede ser de considerable importancia.

Existen varias otras formas de acoplo, como por red de difracción, pero no conviene detallarlas ya que nos separaríamos del tema.

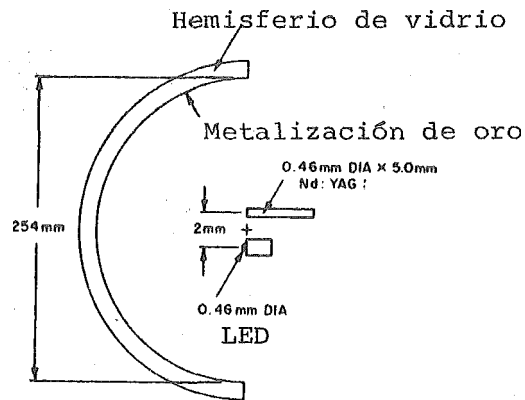
Volviendo al tema de los moduladores vamos a centrarnos en uno de ellos: el magneto-óptico. Y esto no por su importancia sino simplemente por introducir uno que es, quizás, el más desconocido. Su fundamento aparece en la Figura. El dispositivo está compuesto por un disco de un granate de hierro, magnetizado, sobre un sustrato de otro granate. En íntimo contacto con la película aparece un circuito eléctrico sobre el que actúa la señal

moduladora. Si un haz de radiación infrarroja, polarizada linealmente, se introduce por la izquierda de acuerdo a si hay o no señal en el circuito, pasará a tener una polarización perpendicular o igual a la de entrada. Si el prisma de salida es birrefringente podremos tener dos haces con la correspondiente información. Velocidades del orden de 3×10^8 Mc/s se han llegado a obtener con este dispositivo.

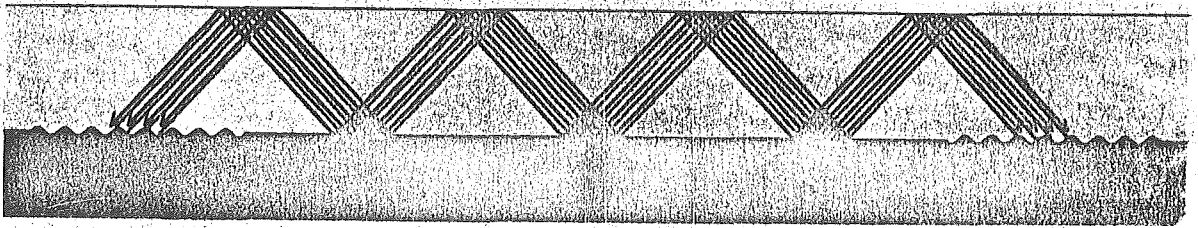
Queda así, como circuito completo el que puede apreciarse en la figura. En ella aparecen, por el momento teóricamente, integrados todos los componentes que podrían dar lugar a un emisor para comunicaciones ópticas. La realidad o no de este dispositivo la veremos en los años venideros.

IV.- BIBLIOGRAFIA

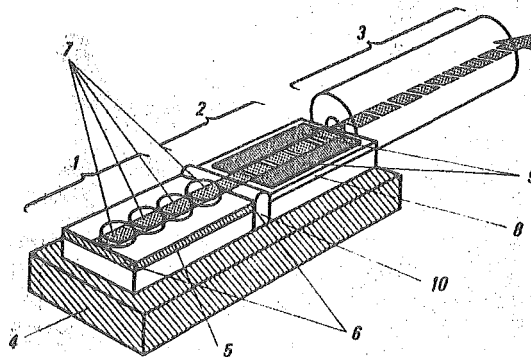
- 1.- F.W. OSTERMAVER, Jr: "LED End-Pumped Nd:YAG Lasers"
IEEE J.Q.E. Jan. 77 1-6
- 2.- G. WINZER et al.: "Miniature Neodymium Lasers (MNL) as Possible Transmitters for Fiber-Optics Communication Systems"
Siemens Forsch Bd. 5 (1976) 287-302
- 3.- "INTEGRATED OPTICS" : ed. D. Marcuse. IEEE Press. 1973
- 4.- "INTEGRATED OPTICS" : ed. T. Tamir. Springer-Verlag 1975



ACOPLO DE LA RADIACION DE UN LED

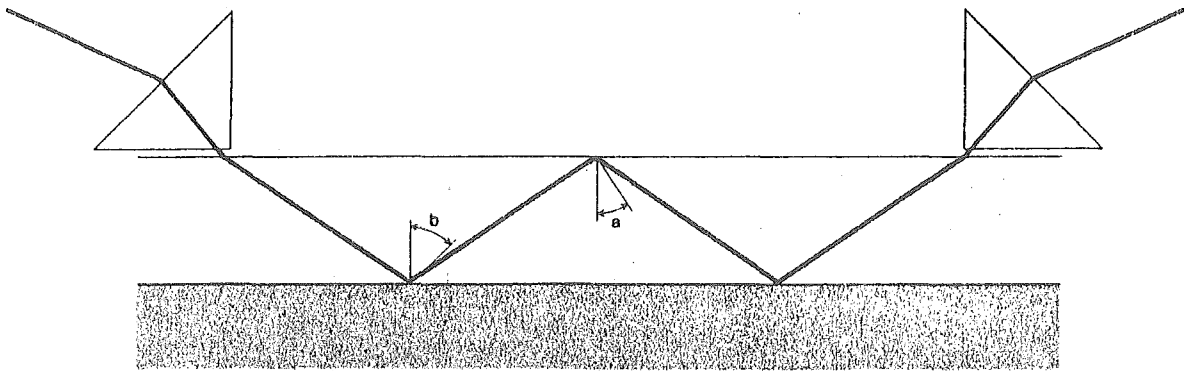


LASER DE PELICULA FINA

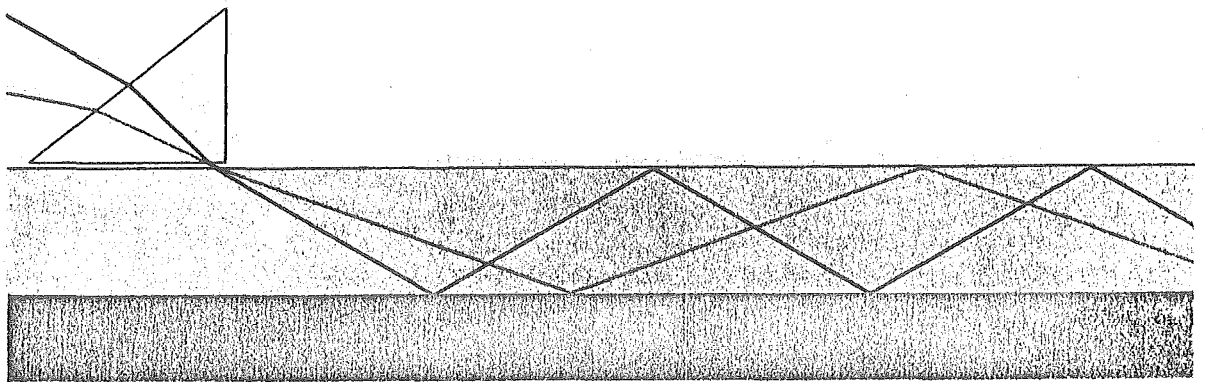


LASER DE PELICULA FINA SEGUIDO DE UN MODULADOR ELECTRO-
OPTICO Y ACOPLADO EL CONJUNTO A UNA FIBRA OPTICA.

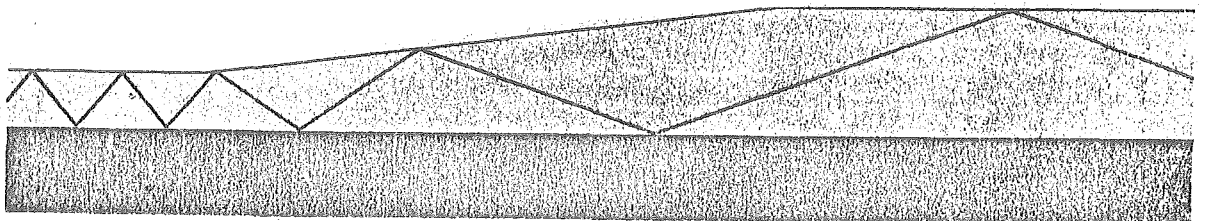
1. Láser.
2. Modulador
3. Fibra de salida
4. Substrato común
5. Láser de película fina
6. Espejos terminales
7. Sistema de bombeo por LEDs
8. Guia de onda electrooptica
9. Electrodo modulator
10. Cemento de unión.



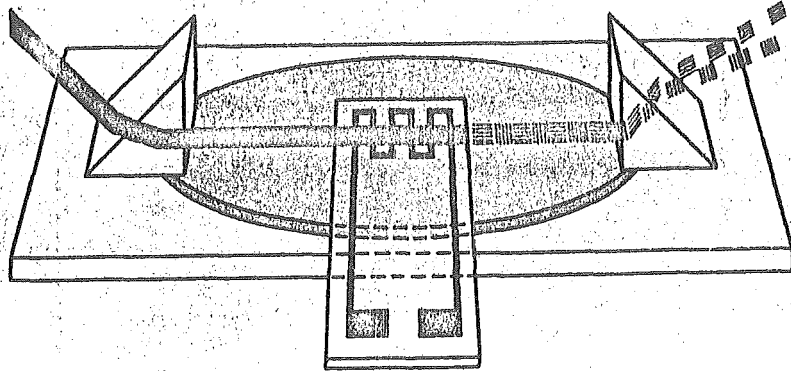
ACOPLO DE LA RADIACIÓN A LA PELICULA CONDUCTORA



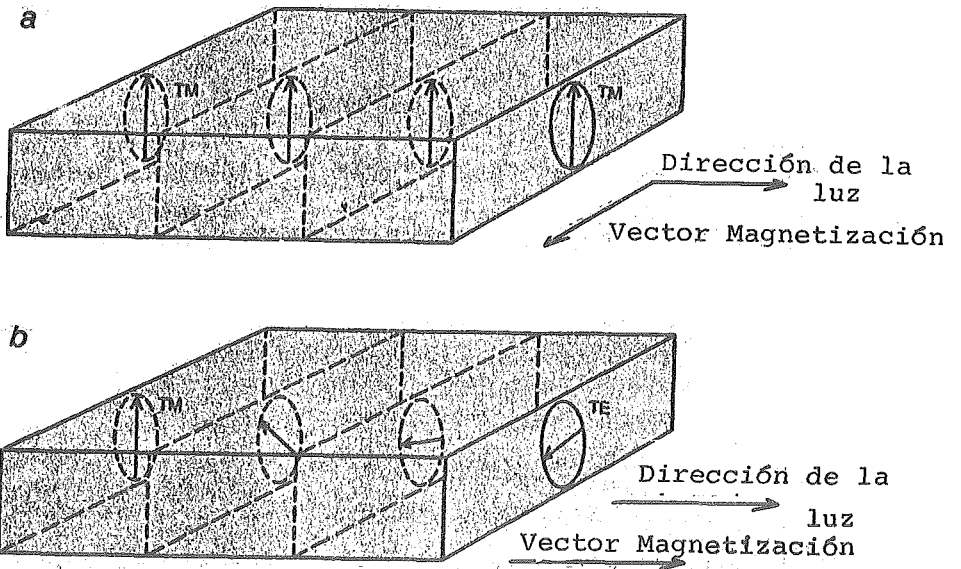
PENETRACION DE DIFERENTES MODOS



ACOPLO ENTRE DIFERENTES ESPESORES

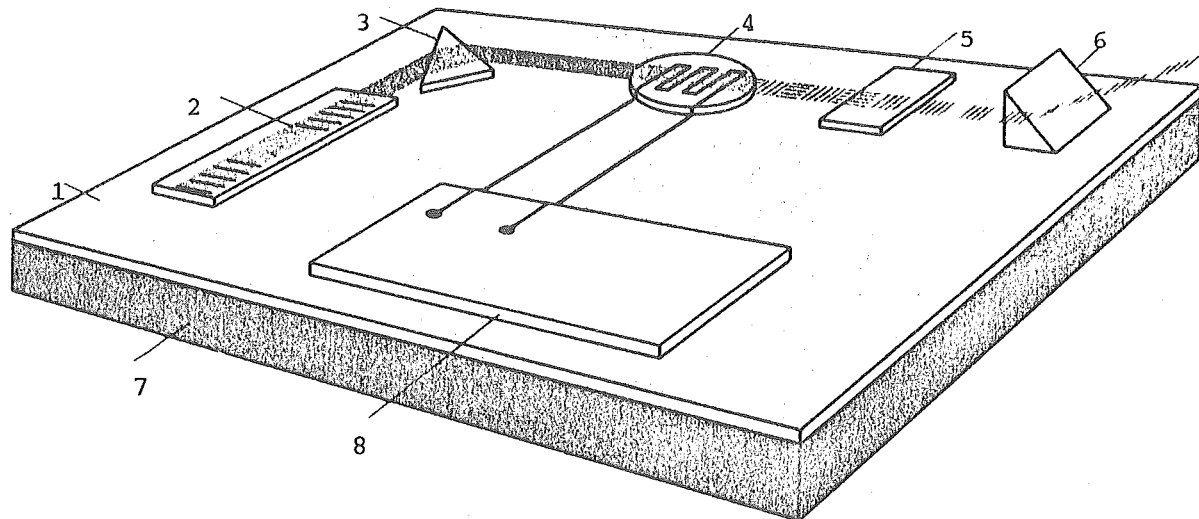


MODULADOR MAGNETO-OPTICO



FORMA DE TRABAJO DE UN MODULADOR MAGNETO-OPTICO

- a. Sin campo magnetico externo
- b. Con campo magnetico externo



CIRCUITO OPTICO COMPLETAMENTE INTEGRADO

- | | |
|----------------------|------------------------|
| 1.- Película soporte | 2.- Láser |
| 3.- Prisma | 4.- Modulador |
| 5.- Polarizador | 6.- Acoplador de prima |
| 7.- Substrato | 8.- C.I. electrónico |