

La Serie Universitaria de la Fundación Juan March presenta resúmenes, realizados por el propio autor, de algunos estudios e investigaciones llevados a cabo por los becarios de la Fundación y aprobados por los Asesores Secretarios de los distintos Departamentos.

El texto íntegro de las Memorias correspondientes se encuentra en la Biblioteca de la Fundación (Castello, 77. Madrid-6).

La lista completa de los trabajos aprobados se presenta, en forma de fichas, en los Cuadernos Bibliográficos que publica la Fundación Juan March.

Estos trabajos abarcan las siguientes especialidades: Arquitectura y Urbanismo; Artes Plásticas; Biología; Ciencias Agrarias; Ciencias Sociales; Comunicación Social; Derecho; Economía; Filosofía; Física; Geología; Historia; Ingeniería; Literatura y Filología; Matemáticas; Medicina, Farmacia y Veterinaria; Música; Química; Teología. A ellas corresponden los colores de la cubierta.

Edición no venal de 300 ejemplares, que se reparte gratuitamente a investigadores, Bibliotecas y Centros especializados de toda España.

Este trabajo fue realizado con una Beca de España, 1975. Departamento de Ingeniería.

Fundación Juan March



FJM-Uni 41-San
Comunicación por fibras ópticas
Sandoval Hernández, Francisco.
1031750



Biblioteca FJM

Fundación Juan March (Madrid)

SERIE UNIVERSITARIA



Fundación Juan March

Comunicación por fibras ópticas

Francisco Sandoval Hernández

FJM
Uni-
41
San

41

Fundación Juan March
Serie Universitaria

41



Comunicación por fibras ópticas

Francisco Sandoval Hernández



Fundación Juan March
Castelló, 77. Teléf. 225 44 55
Madrid - 6

Fundación Juan March (Madrid)

*La Fundación Juan March no se solidariza
necesariamente con las opiniones de los
autores cuyas obras publica.*

Depósito Legal: M-32313-1977
I.S.B.N. 84 - 7075 - 066 - 6
Ibérica, Tarragona, 34.- Madrid-7

INDICE

	Página
I.- INTRODUCCION	1
II.- FIBRAS OPTICAS	9
III.- FUENTES DE RADIACION	14
IV.- FOTODETECTORES	18
V.- AMPLIFICACION	30
VI.- CONCLUSIONES PARA UN SISTEMA REPETI- DOR	38
VII.- BIBLIOGRAFIA	42

El presente trabajo fruto de la beca concedida al autor por la Fundación Juan March ha -
contado para su elaboración con la inestimable
ayuda de los Srs.: García Guerra, K. Atallah y
Muñoz Merino que con sus orientaciones y discusiones lo han hecho posible.

La parte más molesta, mecanografiado y dibujo de figuras, la han elaborado Isabel Fernández y Angel González a quienes agradezco su esmero en la realización.

I. INTRODUCCION

Ya en el año 1964, se realizaron pruebas iniciales para el establecimiento de un sistema de comunicaciones a través de fibras ópticas, pero entonces los resultados obtenidos no fueron lo suficientemente buenos como para competir con los sistemas implantados. Desde entonces las investigaciones y mejoras realizadas últimamente en la tecnología de fabricación de fibras de vidrio así como en los dispositivos emisores y receptores de luz, han dado lugar a un futuro muy esperanzador para las comunicaciones optoelectrónicas, habiendo asegurado su competitividad con los sistemas convencionales a la vez que ofrecen ventajas significativas sobre las comunicaciones de radiofrecuencia.

Se considera como el adelanto más importante en la electrónica desde la introducción del transistor y dadas las ventajas técnicas y económicas sobre el cable coaxial, se espera - vaya desplazando a éste sucesivamente, como lo demuestra ya la comercialización de sistemas - de distribución de T.V. por cable de fibra de vidrio.

La fibra óptica puede utilizarse como

canal de comunicaciones de banda muy ancha, - del orden de varios GHz., debido a que la fre cuencia portadora varía entre 10^{13} y 10^{15} Hz. Si no se han utilizado hasta ahora anchos de banda tan elevados es debido a las limitacio- nes de velocidad en los dispositivos lo que - dificulta la construcción de moduladores y re ceptores ópticos así como la dispersión en la fibra.

Para anchos de banda más modestos la - menor atenuación de la fibra óptica que en - otros sistemas de banda ancha (cable coaxial y guía de ondas milimétricas) lo hace atractivo comercialmente a la vez que se presenta co mo el principal competidor para los sistemas futuros en longitudes que varían desde 10m. - hasta unos 10Kms.; tiene además otras ventajas adicionales como son: inmunidad a las interferencias eléctricas, buenas flexibilidad, pequeño tamaño, bajo costo, tolerancia a pequeñas curvaturas, coeficientes de pérdidas indepen- diente de la temperatura ambiente.....

Los problemas a resolver principalmen- te son: el mantenimiento de las características de la fibra instalada dentro de un cable, larga estabilidad en diodos láser y nuevos sistemas prácticos de uniones y acopladores.

Inicialmente las telecomunicaciones civiles utilizan las fibras ópticas operando en modo simple y con grandes anchuras de banda. Una de las atracciones principales de estos sistemas ante el sistema por cable coaxial (donde - la distancia entre repetidores depende fuertemente del ancho de banda necesario para la transmisión) es la independencia en principio con - el ancho de banda a transmitir, pues las fre--cuencias ópticas son de varios órdenes de magnititud mayores que el mayor ancho de banda práctico necesario para transmitir cualquier señal - eléctrica.

En cuanto al sistema de guiaonda de larga distancia de estructura helicoidal, que puede propagar frecuencias de hasta 100GHz. y anchos de banda muy amplios, resulta cara de instalar por necesitar conductores especialmente - rectos que deben permanecer estructuralmente estables. Un cable de fibras ópticas debidamente protegido mecánicamente soporta una capacidad potencial de información muy elevada, a la vez que bajo coste y posibilidad de introducirlo - en las conducciones existentes, dadas sus tolerancias a la curvatura y su poco peso.

Dada la limitación de los moduladores optoelectrónicos y los receptores ópticos, hace

pensar en sistemas de decenas o centenas de Mb/s que, si bien el ancho de banda es modesto frente al potencial que ofrece el medio, al disponer de fibras con atenuaciones menores de 20dB/Km. - los hace atractivos en muchas aplicaciones, pues el espaciamiento entre repetidores puede ser del orden de 10Kms., distancia grande comparada con la mayoría de los tendidos telefónicos de muchos países, pudiendo sustituirse en relación aproximada de uno por cinco del sistema de cable coaxial con las ventajas de reducir los requerimientos de alimentación y el mantenimiento de registros.

En cuanto al sistema de modulación a emplear, el indicado es el de modulación por pulsos dadas las características no lineales de los actuales dispositivos emisores de luz, que junto con el hecho de que las características de la fibra en banda-base están todavía bajo estudio, lo hace preferible frente a los otros métodos analógicos.

Como aplicaciones típicas e inmediatas podemos considerar para distancias cortas, la transmisión de datos en lugares de espacios limitados o que exista alto nivel eléctrico (dado su pequeño tamaño e inmunidad a las interferencias eléctricas), los enlaces de video dentro de un

mismo edificio (como por ejemplo en un estudio de T.V.), los enlaces urbanos de videotelefonía así como la distribución a emplear puede ser el de pulsos con codificación sencilla como es el PPM (modulación de pulsos en posición).

En grandes distancias tenemos como aplicación inmediata la de los enlaces interurbanos de gran capacidad, con repetidores intermedios. En este caso el sistema de modulación más adecuado es el PCM (modulación de pulsos codificados) que permite una regeneración de la señal con baja probabilidad de error.

La mayoría de las aplicaciones nos presentan a las comunicaciones por fibra óptica como una alternativa ante la línea de transmisión convencional en los sistemas establecidos. Aún cuando las nuevas tecnologías se han utilizado inicialmente para mejorar las características de los sistemas existentes, su principal impacto puede ser el contribuir a cambiar los conceptos de los sistemas de comunicación.

La etapa siguiente en la evolución lógica es el desarrollo de sensores que actuando como transductores transformen la señal óptica en eléctrica, quedando para una etapa posterior la modulación y conmutación en régimen óptico, sien

do en éste área donde la tecnología de circuitos integrados ópticos pueden jugar el mayor papel en este desarrollo y tendrá gran influencia para acabar con los conceptos existentes de sistemas electrónicos para comunicación, control e instrumentación.

Como otra etapa en el desarrollo de las comunicaciones ópticas se prevé el procesar directamente la señal en lugar de hacerlo en banda base, lo que incluirá amplificación, conmutación, formación de señales múltiples a partir de varias señales luminosas que podrían separarse por medio de filtros ópticos.

En la Fig. 1 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones ópticas. La señal que conlleva la información a transmitir es codificada en el adecuado formato de modulación de la amplitud, intensidad, frecuencia, fase o polarización del haz del láser transmisor. Esta modulación puede ser o bien interna en la cavidad láser o bien mediante un modulador externo.

Una vez modulado el haz del láser éste es colimado mediante la debida antena en el caso que el medio de transmisión sea el aire o bien se acopla a la fibra óptica si se utiliza ésta. En el canal de transmisión la radiación

sufre una serie de perturbaciones multiplicativas como son atenuación y retardos aleatorios que enmascaran la señal en el proceso de detección. Si el medio de transmisión es el aire, hay que tener en cuenta también la radiación background que se suma a las anteriores fuentes de ruido externo - al receptor.

En recepción se aplicará la energía de la señal transmitida al detector óptico a través del debido acoplamiento, obtendremos una señal eléctrica la cual debidamente codificada presentará la información obtenida.

En sucesivos apartados quedará reflejado la forma de realizar estas operaciones así como los dispositivos de interés y propiedades de la fibra óptica, realizando una exposición más amplia en lo relativo a dispositivos fotodetectores y amplificadores así como sus fuentes de ruido.

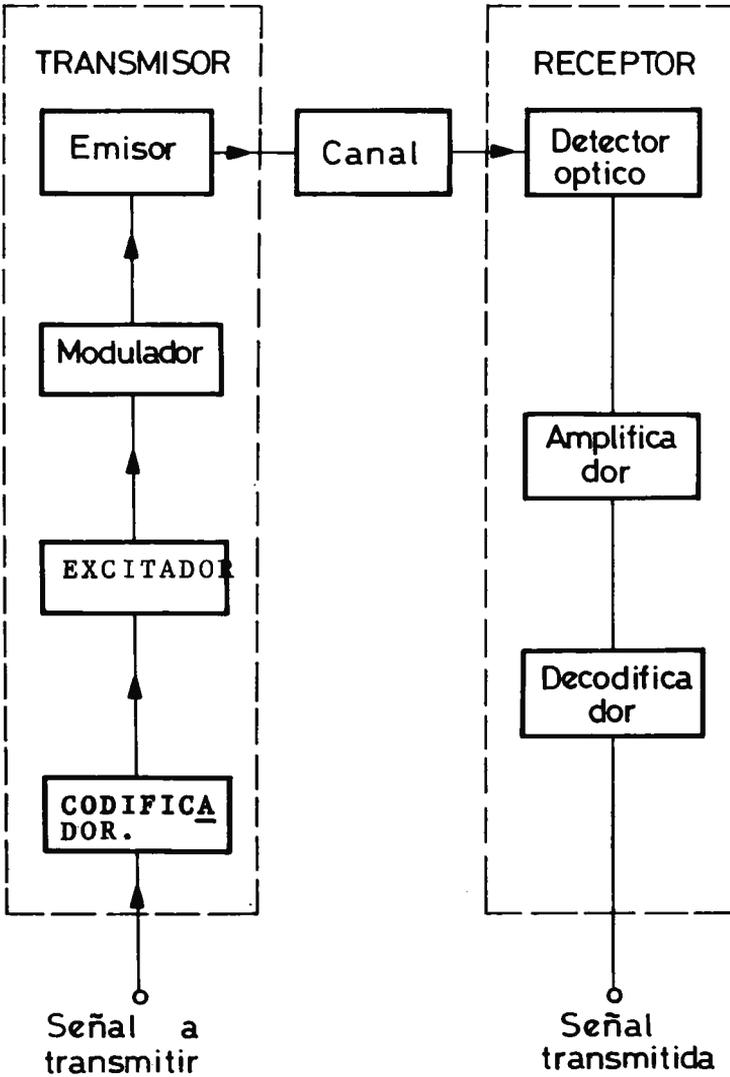


Fig.1.- Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones ópticas.

II. FIBRAS OPTICAS

Una fibra óptica es un conductor de luz y está constituido por un cilindro homogéneo transparente en la región del espectro que nos interesa para la transmisión; este cilindro se encuentra rodeado de otro dieléctrico homogéneo caracterizado por tener su índice de refracción menor. Al interior se le llama alma o núcleo de la fibra mientras que al exterior se le conoce por vaina o cubierta.

Si n_1 es el índice de refracción del alma y n_2 el de la vaina, al incidir un rayo desde el alma a la vaina con un ángulo de incidencia α' - (Fig.2) el rayo se refleja de acuerdo con la ley de refracción:

$$n_1 \operatorname{sen} \alpha' = n_2 \operatorname{sen} \beta$$

siempre que β sea menor que el ángulo de reflexión total

$$\beta_T = \operatorname{arc} \operatorname{sen} (n_2/n_1)$$

Vemos que si el rayo se propaga con una inclinación menor de $(90^\circ - \beta_T)$, la fibra se comporta de manera análoga a un tubo de guíasondas siempre que $n_1 > n_2$, pues de lo contrario el rayo se acercaría a la superficie y no se propagaría.

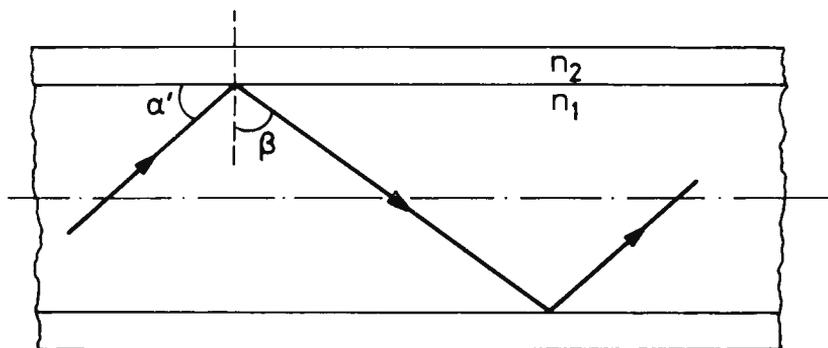


Fig. 2.- Trayectoria de un rayo en una fibra óptica

Analogamente al incidir un rayo sobre la cara de entrada con un ángulo α (Fig.3), continua con un ángulo α' tal que:

$$\text{sen } \alpha' = \frac{1}{n_1} \text{ sen } \alpha$$

pues el índice de refracción del aire es $n=1$.

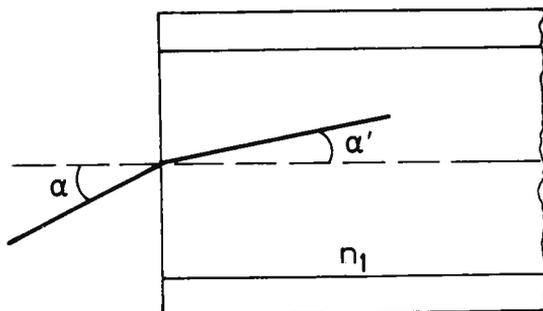


Fig. 3.- Incidencia de un rayo sobre una fibra óptica.

Para asegurar que el rayo quede atrapado en la fibra y hacer posible su transmisión, se debe cumplir que $\alpha' < (90^\circ - \beta_T)$; para ello el ángulo máximo con que puede incidir un rayo en la cara de entrada es:

$$\text{sen } \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Esta expresión es conocida como Apertura Numérica (AN), siendo α_0 de gran interés para determinar la eficacia de emisión de un transmisor de luz y su acoplamiento a la fibra.

Las características de las fibras vienen dadas por su atenuación y su dispersión. Los factores principales que influyen en la atenuación son la absorción y la difusión de la fibra. El primero se debe sobre todo a la presencia de impurezas metálicas en la materia (Fe, Cu, Ni.... y de estas el oxidado de Cobre y el reducido de Hierro) y - el segundo a la falta de homogeneidad del material que si son grandes comparada con la longitud de onda constituyen obstáculos y producen gran atenuación.

La dispersión se debe a que la onda transmitida contiene componentes que se propagan a distinta velocidad por lo que en el extemo receptor llegan con distintos retardos lo que provoca una deformación de la señal y limitando, por tanto, la separación entre emisor y receptor. Las causas que motivan la dispersión en una fibra pueden - ser varias: Diferentes velocidades de grupo entre modos, ancho espectral de la señal, deformaciones

de la fibra, birrefringencia del material,.....

Acudiendo a las ecuaciones de Maxwell para explicar los fenómenos electromagnéticos se puede obtener que existe un número finito de modos de propagación que para una longitud de onda λ viene dado aproximadamente por:

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d \cdot AN}{\lambda} \right)^2$$

siendo d el diámetro del núcleo.

Así las fibras se clasifican en monomodo o multimodo según permitan la transmisión de uno o varios modos de propagación. Las monomodo tienen dimensiones del orden de la λ a transmitir (μm) lo que presenta un problema de fabricación y también de acoplamiento con el emisor y el receptor. Las fibras multimodo, si bien presentan unas dimensiones más razonables para su utilización, - tienen el problema de una mayor dispersión'

La fibra cuyo perfil presenta un índice de refracción gradual (fibra de gradiente de índice) agrupa las ventajas de las fibras anteriores. Se consigue reducción en la dispersión, manteniendo una alta apertura numérica. La baja dispersión - nos mantiene la ventaja de la fibra monomodo, a la vez que las mayores dimensiones facilitan la inyección de energía. La fabricación de este ti-

po de fibras presenta dificultades obvias de fa
bricación, quedando por resolver todavía proble-
mas de atenuación. Con fibras multimodo de gradient
e de índice se pueden obtener dispersiones por
debajo de 1ns/Km y pérdidas de transmisión del ord
en de 5dB/Km y aún menores.

En la actualidad en sistemas de banda ancha -
el desafío a la tecnología consiste en encontrar
una fibra con perfil de índice controlada y de -
baja atenuación.

III. FUENTES DE RADIACION

Estas fuentes deben ser viables económicamente y compatibles con el medio de transmisión en este caso la fibra óptica, de la que se deberán conocer sus características geométricas, modales, de atenuación, de dispersión,

En comunicaciones ópticas las fuentes de radiación tienen que poseer ciertas condiciones como son: espectro estrecho de emisión, potencia suficiente, fácil acoplamiento a la fibra (tamaño pequeño), robustez, larga duración, pequeña variación de las características con el tiempo y facilidad de modulación.

Las fuentes que presentan un interés primordial son los diodos láser de semiconductor y los diodos emisores de luz (LED) por emitir en la zona del espectro que va de 0,8 a 0,9 y 1,0 a 1,1 μm , que es donde las pérdidas de transmisión son mínimas en las fibras ópticas.

En sistemas por fibra se pueden utilizar fuentes coherentes o incoherentes para fibras monomodo (modo único de propagación), mientras que en fibras multimodo solo da buen rendimiento una fuente incoherente.

Un LED es una fuente incoherente basado en el proceso de recombinación de portadores inyectados a lo largo de una unión p-n de un diodo semiconductor. El material más utilizado es el AsGa que tiene una anchura de banda prohibida de 1,43eV que corresponde a una emisión en el infrarrojo cercano al espectro visible con $\lambda=0,87\mu\text{m}$ valor de interés para la fibra óptica.

Principales características del LED son:

- Radiación incoherente
- Elevada luminiscencia (del orden de 5 a $10\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sg}^{-1}$).
- Espectro de emisión estrecho de 200 a 400 Å.
- Velocidad de respuesta muy rápida con tiempos de respuesta de 1 a 10ns. que los hace aptos para ser modulados por señales de muy alta frecuencia.
- Fácil modulación. Se realiza por variación de corriente.
- Tensiones de alimentación y consumo reducido.
- Buena linealidad entre corriente y potencia radiada en un gran rango.
- Robusto y con área radiante de la unión

Estas características los hace interesantes para trabajar con fibra multimodo de alta apertura numérica. Con modulación analógica presenta cierta distorsión por su característica - no completamente lineal. En PCM es fácil llegar a 100Mb/s, habiéndose llegado hasta 280Mb/s.

El láser semiconductor de inyección es el más adecuado para transmisión por fibra óptica y consiste en una unión p-n polarizada en directo con gran concentración de impurezas en ambas zonas produciéndose gran inyección. El láser con mayores posibilidades es el de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, crecido por epitaxia en fase líquida y que emite entre 0,75 y 0,9 μm .

Las principales características de un diodo láser son:

- Radiación coherente y muy direccional
- Gran potencia radiada
- Espectro de emisión muy estrecho (unos 20 Å).
- Tiempo de respuesta muy bueno, mejor que en LED.
- Puede ser bombeado y modulado simple y directamente por la corriente inyectada.
- Corrientes muy elevadas con problemas de disipación térmica, si bien en la actual

lidad pueden trabajar en onda continua (CW) a la temperatura ambiente.

- Presenta corta vida por degeneración de sus características, cuyas causas no son todavía bien conocidas. Se logran funcionamientos aceptables de algunas miles de horas.

- Eficaz acoplamiento entre el láser y la fibra multimodo. Para operar en modo único se necesitan lasers de unión corta con longitudes de unión menores de $15\mu\text{m}$.

El láser de Nd:YAG es utilizado para emitir a $1,064\mu\text{m}$, tiene pocas pérdidas por reflexión permite el bombeo con un LED lo que prolonga su vida. No admite modulación directa, por lo que un láser de Nd:YAG debe ir siempre acompañado de un modulador exterior.

IV. FOTODETECTORES

IV.1. Generalidades

Un fotodetector es un dispositivo que convierte la señal luminosa en señal eléctrica. Según el mecanismo físico de la operación pueden clasificarse en efecto: fotoemisor, conductivo, fotovoltaico y fotomagnético. En comunicaciones ópticas el que más interesa es el fotoconductor.

El funcionamiento de un fotodetector in--cluye tres procesos o etapas básicas que son:

- Generación de los portadores de carga - (electrones y/o huecos) por incidencia de luz.
- Transporte de portadores y/o multiplicación de los mismos según el mecanismo de ganancia en corriente que esté presente.
- Interacción de la corriente en el fotodetector con el circuito externo para proporcionar la señal de salida.

Los parámetros que definen la caracterización de un fotodetector son:

- Sensibilidad. Se define como la razón - de la corriente media del detector a la potencia óptica media incidente.
- Ancho de banda. Limita la máxima fecuencia a la que se puede hacer una transmisión. De-

pende mucho de las capacidades internas del fotodetector.

- Ruido . Viene como consecuencia de los mecanismos internos del dispositivo para la generación de corriente y por la corriente de oscuridad, que es la que circula cuando no existe radiación incidente y se compone de la que circula por el volumen y por la superficie (corriente de pérdidas). Interesa minimizarlas todas.

IV.2. Fotoconductor

Un fotoconductor es un trozo de semiconductor con contactos ohmicos fijados en sus extremos opuestos. Al incidir luz sobre su superficie se generan portadores por transición banda a banda bien directamente o bien a través de niveles trampa en la banda prohibida, el resultado es un incremento de la conductividad lo que proporciona un mecanismo vásico en el proceso de detección de señales ópticas ya que si aplicamos un voltaje de polarización, esta modulación de la conductividad se transforma en modulación de corriente que transferida al circuito de salida dará la información de la señal.

Si la conductancia queda dominada por un tipo de portador (hueco o electrón) la corriente al

terna de pequeña señal inducida es

$$i_s(\omega) = \eta \frac{q \cdot P_{opt}}{h\nu} \frac{\tau}{T_r} \frac{L}{1+j\omega\tau}$$

siendo τ = tiempo de vida media del portador, T_r = tiempo de tránsito del portador = L^2/V , L = separación entre contactos ohmicos, V = tensión de polarización y η = eficiencia cuántica.

La ganancia de este fotodetector, $M = \tau/T_r = \tau\mu V/L^2$ viene limitada porque la tensión V no llegue a la ruptura y el ancho de banda está también limitado por la capacidad que se forma entre el par de electrodos de contacto y que queda dada por la constante de tiempo de relajación del dieléctrico $\tau_d = \rho \cdot \epsilon$, siendo ρ la resistividad y ϵ la permitividad.

IV.3. Fotodetectores con zona de depleción

Los fotoconductores descritos presentan un escaso producto ganancia-ancho de banda; este se mejora con un detector con zona de depleción que consiste en un diodo semiconductor polarizado en inversa cuya corriente queda modulada por la generación de pares electrón-hueco en la zona de depleción debido a la absorción de la luz.

El fotodetector con zona de depleción más utilizado es el fotodiodo P-I-N. Como la captura de

fotones se hace en la región de depleción, interesa una anchura de esta región mayor que lo habitual en una unión p-n. Esto se logra con una estructura tal como la que aparece en la Fig.4. La zona N ligeramente dopada, que casi es intrínseco, ocupa la mayor parte del diodo. El contacto de salida es tipo N altamente dopado.

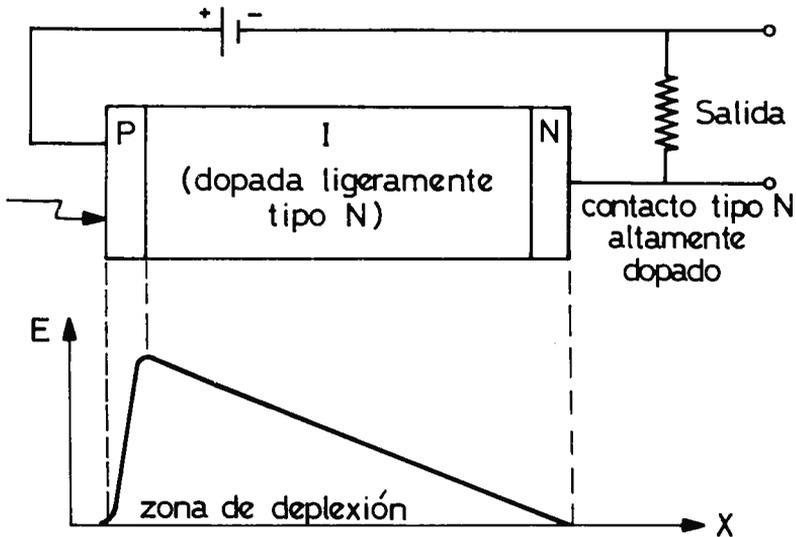


Fig.4.- Fotodiodo P-I-N

El diodo se polariza en inverso y la densidad de corriente se puede descomponer como la debida al arrastre de los portadores generados dentro de la región de depleción y la debida a la difusión de portadores fuera de la capa de depleción. El tiempo que necesitan los portadores para atravesar la zona de depleción limita la respuesta a

altas frecuencias, apareciendo el compromiso entre velocidad de respuesta y eficiencia de absorción.

El fotodiodo se puede caracterizar para pequeña señal por el circuito equivalente de la Fig.5, constituido por un generador de fotocorrien

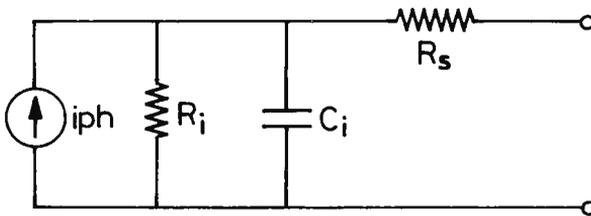


Fig.5.- Circuito equivalente de un fotodiodo P-I-N.

te, i_{ph} , en paralelo con la resistencia interna R_i y la capacidad del diodo C_i , junto con una pequeña resistencia serie R_s debida a los contactos.

IV.4. Fotodetectores de avalancha

Trabajan con altos voltajes de polarización inversa, consiguiendo un alto campo eléctrico en la zona de deplexión que permite a los portadores el tener suficiente energía como para generar nuevos pares electrón-hueco por el mecanismo de ionización por colisión, de forma que estos a su vez creen otros nuevos consiguiendo la

avalancha de portadores. Si sobrepasamos la tensión de ruptura del diodo el número de portadores puede tender a infinito. Hay una ganancia interna.

La probabilidad de que un portador haga colisión con ionización depende directamente de la mágnitud del campo eléctrico; como el campo es función de la posición, los coeficientes de ionización para huecos y electrones, β y α respectivamente, dependen de la posición en la zona de deplexión.

La sensibilidad del fotodetector de avalancha respecto a la tensión de polarización hace que esta deba de ser estable, con compensación de - temperatura y ser capaz de proporcionar algún ciento de voltios.

La estructura típica es la RAPD ("Reach-through Avalanche Photodetector") que combina alta velocidad, alta ganancia y relativo bajo ruido (este último depende de la relación α/β). Se consigue por la separación física que se hace de la zona de arrastre, en la que los fotones se - absorben, y la zona de multiplicación, donde - los portadores fotogenerados se multiplican (Fig. 6).

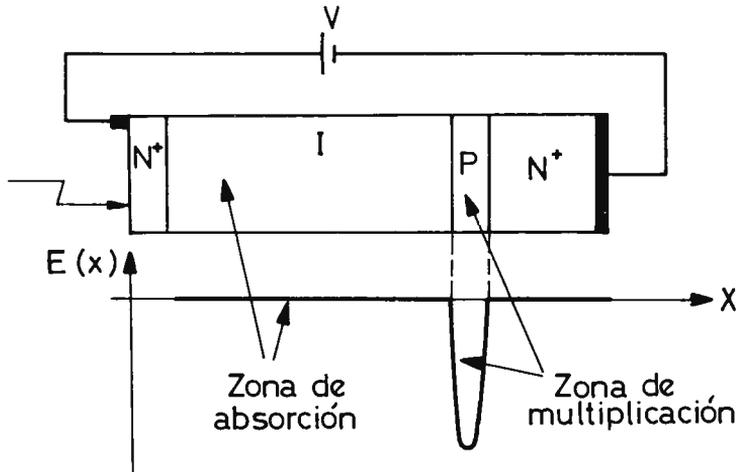


Fig.6.- Fotodiodo de Avalanche RAPD

El circuito equivalente es igual al del P-I-N con la salvedad de que pueden aparecer efectos no lineales (saturación) si la potencia óptica aplicada es muy grande.

IV.5. Ruido en fotodetectores

El ruido que se genera en los fotodetectores viene como consecuencia del proceso de generación-recombinación de pares electrón-huecos - por el hecho de haber señal, de las corrientes de oscuridad, y del proceso estadístico que se produce, sobre todo, en la ionización por impacto. Si el fotodetector no es de avalancha, el último no tiene lugar.

Parece que siempre sería más conveniente el utilizar el fotodetector de avalancha y además

con mucha ganancia. Sin embargo, si se hace así a partir de una ganancia determinada, cuanto más grande se haga, se amplifica más el ruido que la señal.

IV.6. Fotodetector de avalancha de AsGa de campo controlado (CFAPD) y su optimización.

Este fotodetector, en proceso de optimización, aún no comercializado, consiste, como indica la Fig.7, en una unión metal-semi-aislante-p-n⁺. Posee ganancias (avalancha) del orden de 10⁴ (los anteriores solo de 10²) y la región de alto campo se extiende a la zona del semiaislante con un bajo incremento del campo máximo

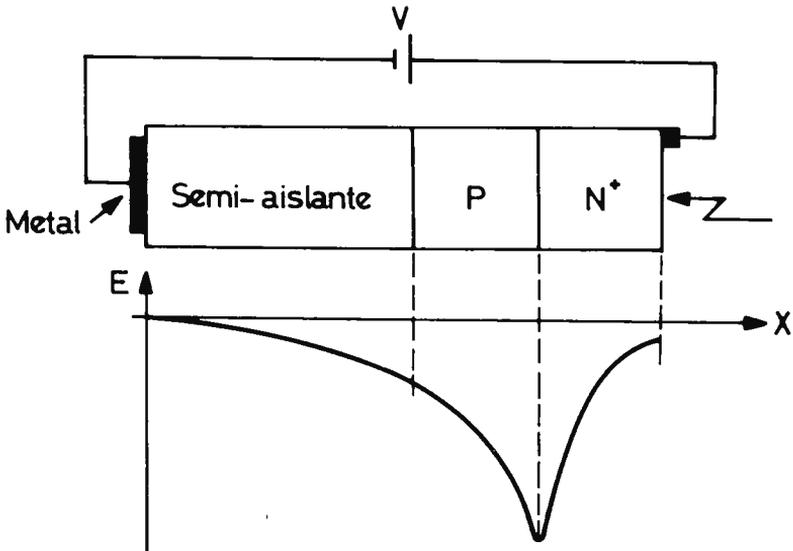


Fig. 7.- Estructura y campo eléctrico de un CFAPD.

La unión semiaislante-p es una unión gradual comparada con la unión abrupta $p-n^+$. Así, la unión semiaislante-p puede ser considerada como polarizada en directo, con una pequeña caída de voltaje, por lo que prácticamente toda la tensión exterior cae en el diodo $p-n^+$. La región de depleción de esta unión alcanza la región del semi aislante antes de la ruptura por avalancha y cualquier incremento en el voltaje inverso se emplea en incrementar el campo a lo largo de la zona del semiaislante sin cambiar el pico en la superficie de separación $p-n^+$.

La característica ganancia-tensión es bastante plana por inyectar en la zona de multiplicación portadores de un solo tipo (huecos o electrones dependiendo de la λ incidente) y solo hay un pequeño margen de longitudes de onda a las que se inyectan ambos tipos de portadores.

Las propiedades de ruido de este fotodetector se consideraron, en un principio, como limitativas de su uso debido a que se midió que los coeficientes de ionización de huecos y elec trones eran iguales ($\alpha=\beta$). En medidas posteriores se ha visto que $\beta>\alpha$ dando lugar a una me jora significativa en cuanto a la mínima poten cia óptica necesaria. Hay algunas controversias

en las medidas realizadas.

El proceso de optimización del CFAPD ha requerido ver cuales son los factores que intervienen en la obtención de la multiplicación M y cuales en el ruido. El conjunto experimental empleado tanto para la medida de M como para el ruido es el mostrado en la Fig.8. Consiste en la luz de un monocromador modulada con un "chopper" mecanico y focalizada con un microscopio sobre la capa n^+ del dispositivo para conseguir un punto de unos $90\mu\text{m}$. De esta forma, la multiplicación se midió para que no difiriera de un punto a otro del diodo, excepto en los bordes.

Las conclusiones a las que se han llegado son:

1. Los estudios teóricos sobre fotodetectores de avalancha de Si, Ge y AsGa han demostrado la superioridad del AsGa para bajas tensiones de polarización y anchos de banda elevados.

2. Los sistemas actuales de comunicaciones por fibras ópticas están basados, en gran parte, en las propiedades y disponibilidad de emisores de AsGaAl muy adecuados para el margen de $0,7$ a $0,85\mu\text{m}$. Concretamente en este margen los fotodetectores de AsGa tienen sus mejores características al desarrollar una eficiencia cuántica ca

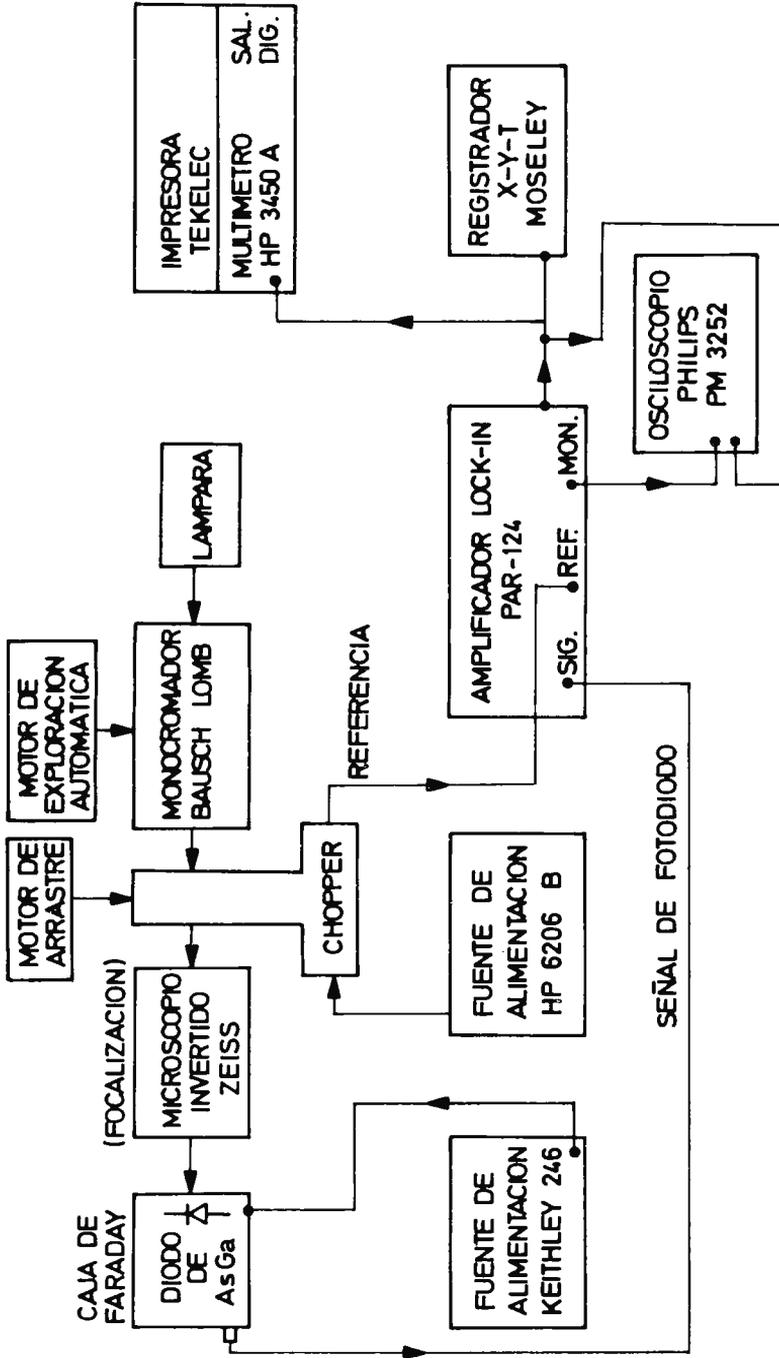


Fig.8.- Sistema de medida M y ruido.

si del 100%.

3. Una de las limitaciones teóricas del AsGa residía en la igualdad de los coeficientes de ionización de electrones y huecos ($\alpha = \beta$) ya que ello implica un mayor ruido generado bajo condiciones de avalancha. Sin embargo, las medidas experimentales de un número de investigaciones demuestran que $\beta > \alpha$, lo cual implica unas características de ruido del AsGa comparables a las del Si.

4. De nuestro trabajo hemos obtenido los siguientes resultados que coinciden con investigaciones previas y que clarifican algunos puntos de estos:

- a) $\beta > \alpha$, $K = \beta/\alpha \rightarrow 1$ para campos elevados, como indican las últimas estimaciones de Stillman.
- b) Los factores de exceso de ruido tienen una dependencia con la multiplicación de $M^{2,0-2,3}$.

5. Los criterios tecnológicos para la optimización del CFAPD son los siguientes:

- Utilización como sustrato de material de alta resistividad con la menor compensación posible, en lugar del semiaislante dopado con Cr. Esto evita la ionización y efectos de los niveles profundos.

- Formación por epitaxia líquida de la capa p, en lugar de por tratamientos térmicos. - Se consigue así un buen control del campo eléctrico en la zona de multiplicación.

- Formación por implantación iónica o por epitaxia líquida fina de las capas n^+ .

- Formación de anillo de guarda alrededor de las capas n^+ que evite la ruptura por los -bordes.

V. AMPLIFICACION

El receptor o repetidor en un sistema de comunicaciones por fibra óptica requiere detectar la señal, amplificarla y regenerarla para ser nuevamente transmitida o decodificada para sacarle la información. El problema de diseño de un buen receptor está en conseguir que la potencia óptica necesaria para producir una relación de error pequeña ($\sim 10^{-9}$) sea mínima.

Estamos, por tanto, interesados en la elección de un adecuado circuito de polarización - para el fotodetector, así como en el diseño de amplificadores de bajo nivel de ruido y de gran ancho de banda o de gran velocidad de respues-ta con el fín de que el sistema sea capaz de -transmitir la mayor información posible. Iguall

mente estamos interesados en la potencia óptica que se necesita para conseguir un determinado - factor de error, el cual varía con la frecuencia de repetición de los impulsos, la forma de los impulsos en la recepción y la forma deseada en los impulsos de salida.

Los factores que limitan el comportamiento de un receptor óptico son el ruido cuántico, - ruido de pérdidas en el fotodetector, ruido térmico introducido por la resistencia de carga - del detector, y las diversas formas de ruido - introducidas por el amplificador de entrada. Si el detector es de avalancha hay que añadir el ruido dependiente de la señal detectada (se evalúa mediante el llamado factor de exceso de ruido).

La limitación en frecuencia, aparte de la que introduzca el fotodetector, viene determinada por la constante de tiempo formada por las capacidades del detector y de entrada del amplificador y las resistencias de polarización del detector y de entrada del amplificador.

V.1. Fotodetector-Receptor

A la hora de construir el amplificador que

sigue al fotodetector aparecen dos opciones. Por una parte se trata del amplificador "front-end" que tiene como características más importantes: la de presentar una alta impedancia de entrada, factor importante cara a la disminución del ruido, y el tener una frecuencia de corte relativamente baja como consecuencia de esta impedancia y de las capacidades del fotodetector y de entrada del amplificador; es decir, realiza una integración de la señal que queremos amplificar y, finalmente, como consecuencia de esta integración la necesidad de colocar un ecualizador después del amplificador para evitar el solapamiento de impulsos.

La otra opción se caracteriza porque el amplificador es de los realimentados dando lugar a una impedancia de entrada relativamente baja que conlleva el introducir un mayor ruido como principal inconveniente, pero como ventaja evita el colocar un ecualizador posteriormente. - Esto es importante porque el diseño de un buen ecualizador, sobre todo a altas frecuencias de repetición ($>200\text{Mb/s}$), presenta problemas difíciles. Hemos optado por el tipo "front-end".

El sistema repetidor consta de una parte de electrónica lineal y otra digital (Fig.9). En la primera estaría incluido el fotodetector, el

preamplificador, el amplificador principal, el ecualizador si se necesitara y el filtro; su misión es la de detectar la señal y amplificarla. La parte digital, que constará de comparador-regenerador, extractor de la señal de reloj o sincronismo, un excitador y el LED o láser, tiene como misión principal regenerar la señal para volverla a transmitir.

V.2. Amplificador "front-end" y electrónica digital.

En función de la impedancia de entrada que ha de tener el amplificador, parece lógico utilizar como dispositivo de entrada un FET. De él nos interesará que tenga alta transductancia g_m y baja capacidad de entrada. En cuanto al ruido el FET se comporta mejor que el transistor bipolar a bajas frecuencias, igual en frecuencias del orden 40-100 Mb/s y peor en frecuencias superiores. El FET seleccionado 2N4416 tiene una capacidad de entrada de 4pF, y una g_m del orden de 6 mmhos.

El diseño (Fig.10) está realizado de forma tal que la impedancia de salida sea de $\sim 50\Omega$. El FET de entrada está polarizado con tensión puerta-fuente de 0V a fin de minimizar el ruido del

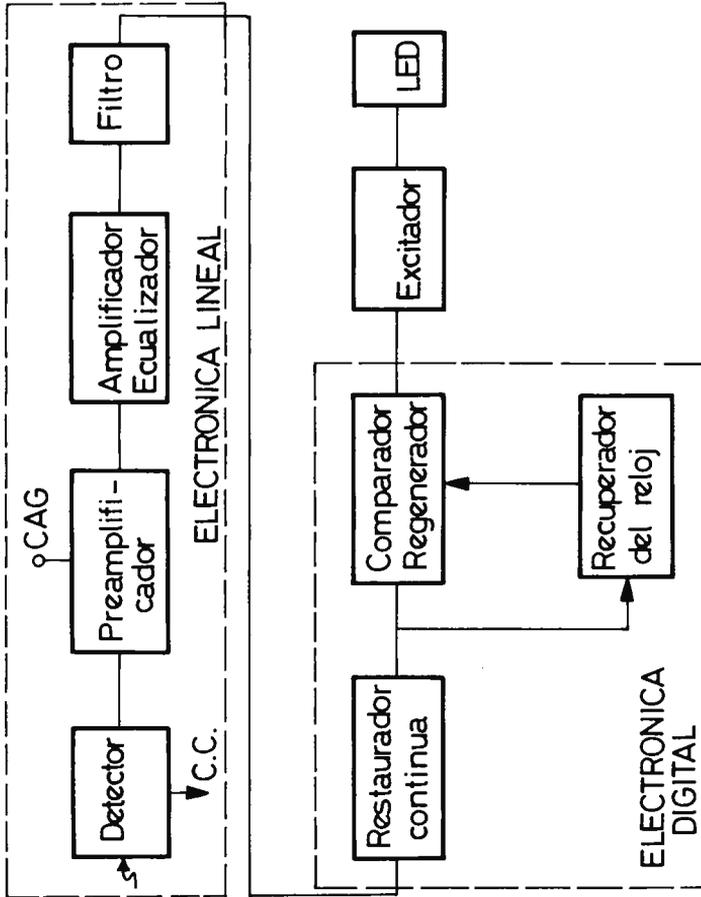


Fig. 9.- Diagrama de bloques de un repetidor para comunicaciones ópticas.

dispositivo. La finalidad del tetrodo 40673 es poder introducir una señal continua en una de las puertas para conseguir un control automático de ganancia (CAG). El seguidor de fuente proporciona el desacoplo entre el amplificador y los siguientes circuitos.

El inconveniente del circuito es su pequeña ganancia como consecuencia de la baja g_m de los FET y de la imposibilidad de poder conseguir altas corrientes de polarización con fuentes de alimentación de baja tensión y resistencias de carga pasivas. Esto ha llevado a colocar carga activa en la primera etapa a fin de aumentar la ganancia. Se ha comprobado por otra parte que el ruido que se introduce es mínimo. Aparecen, sin embargo, faltas de estabilidad en la polarización debido al escape térmico y hay que recurrir a un diodo para que compense las variaciones de corriente por la temperatura.

Las características medidas del amplificador han sido: Ganancia de 44dBs, ancho de banda de 500 KHz y un nivel de ruido de $120\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ entre 10 y 1000 KHz. El ruido es mayor a frecuencias más bajas.

Después del preamplificador seguiría el amplificador principal y el ecualizador; este último

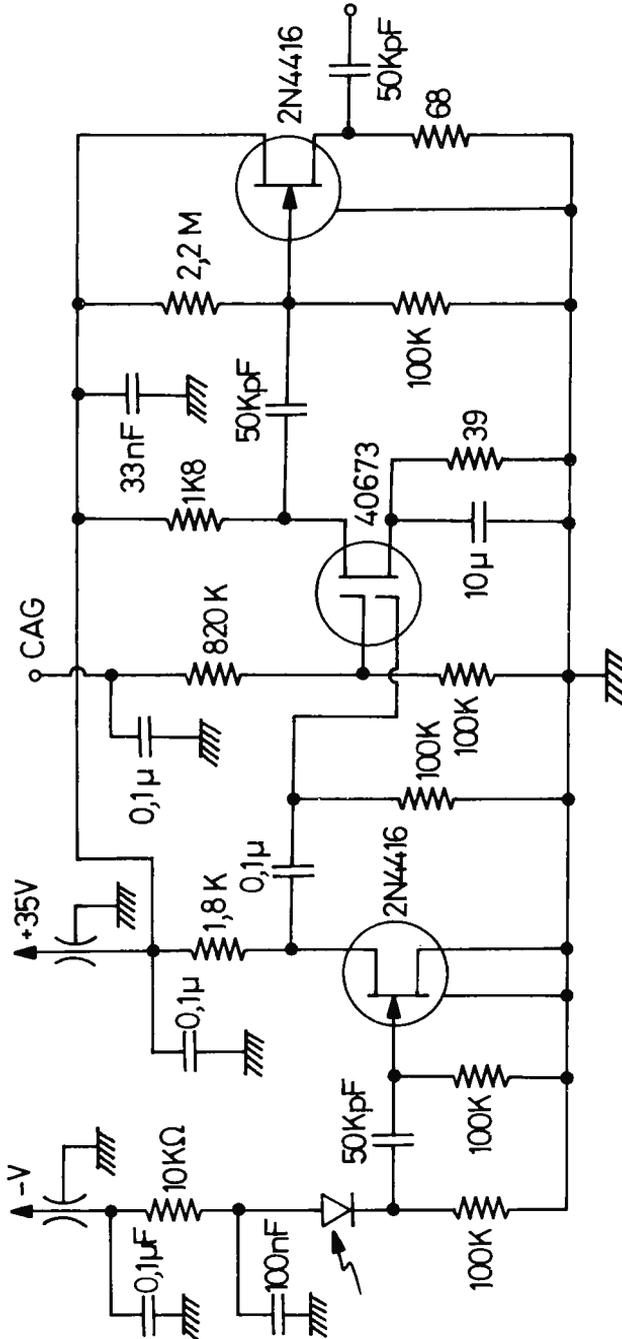


Fig. 10.- Amplificador "front-end"

para evitar interferencias entre símbolos que se producirían como consecuencia de las largas colas que aparecen en los flancos de bajada por la baja frecuencia de corte del preamplificador. El filtro paso bajo que sigue nos limita el ancho de banda de los impulsos y elimina las componentes de ruido de alta frecuencia.

Para evitar que la línea base de la secuencia de impulsos sufra desplazamientos de continua se coloca un fijador cuya salida ataca al comparador que es el encargado de regenerar los impulsos. La salida del comparador está formada por dos salidas complementarias (Fig. 11) de las que se obtienen la señal de información y la señal de reloj para los sincronismos.

La señal de reloj se puede extraer de la misma señal de información mediante un oscilador a cristal sintonizado (Fig.12) o un PLL (Phase Locked Loop)

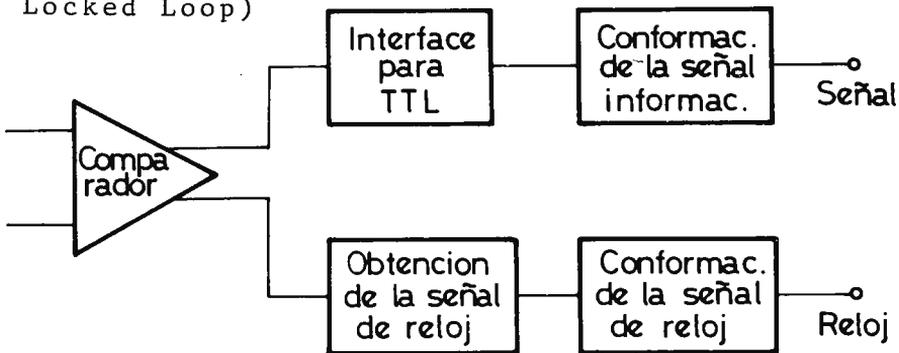


Fig. 11.- Obtención de las señales de información y reloj.

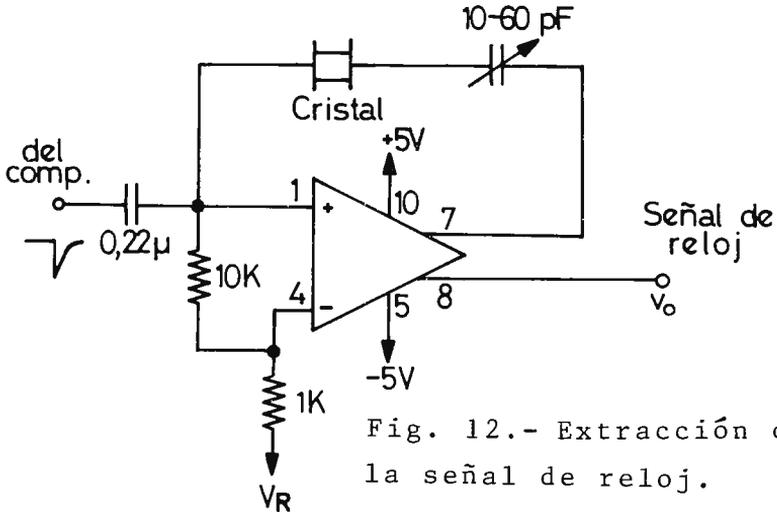


Fig. 12.- Extracción de la señal de reloj.

VI. CONCLUSIONES PARA UN SISTEMA REPETIDOR

El problema último de un sistema de comunicación por fibra óptica, como en general en cualquier sistema, reside, hoy en día, en el grado de avance de la tecnología empleada. Esta se concentra en el dispositivo fotoemisor (LED ó láser), en la fibra y en el dispositivo fotodetector. Todo lo demás que forma parte del sistema (moduladores, amplificadores, ecualizadores, etc.), si bien experimenta avances lo hace en mucha menor cuantía o, cuando menos, por ser parte común a otros muchos sistemas de comunicación, no inciden de forma importante.

En la medida en que parece se va llegando a cotas tecnológicas, inciertas por otra parte, las formas diversas de modulación de los impulsos ayudan a conseguir mejores rendimien-

tos en un sistema de transmisión por fibras ópticas.

Hoy en día, el estudio realizado de las ventajas potenciales de las fibras ópticas sobre los cables coaxiales para comunicaciones civiles, sugiere que atenuaciones de 20dB/Km son suficientemente atractivas para utilizar cables de fibras ópticas. Es interesante hacer notar que el progreso alcanzado en la reducción de la atenuación en fibras ha excedido las expectativas originales.

Hoy mucho del esfuerzo se está dedicando a la reducción de problemas de ingeniería tales - como mantener las características de la fibra dentro de un cable instalado, obtener larga estabilidad térmica para láseres de AsGa,.....etc.

A pesar de que con fibras ópticas los repetidores se pueden colocar a distancias mayores (10 Km) que con cable coaxial, la utilización de fibras ópticas no es, hoy, muy entusiástica. La necesidad de capitalizar las redes urbanas de cobre ya instaladas tiene gran peso. Salvo para problemas concretos como falta de espacio, o razones de planificación, las administraciones pueden preferir cambiar las bobinas de carga de las redes a frecuencias vocales por repetidores PCM. Sin embargo, en nuevas líneas o rutas donde se intente

usar PCM a baja velocidad compatible con las ru
tas existentes, se pueden usar cables ópticos con
fibras multimodo de baja atenuación.

En la tabla se muestran los problemas principal
es de un sistema de comunicaciones por fibra -
óptica.

TABLA I.- Problemas en comunicación por fibras ópticas y su solución

	Problemas Primarios	Soluciones Primarias	Problemas Secundarios	Soluciones Secundarias
Fuente Óptica (diodo - láser).	No Linealidad.	Transmisión binaria directa.	Desaparición ocasional del sincronismo. Detección de error de línea	Supresión del código cero. Control de paridad.
Medio de Transmisión (fibra Óptica).	Dispersión de pulsos.	Fibras graduadas. Fibras tipo W	Dispersión residual.	Ecualización. Fibras monomodo.
Detector Óptico (fotodetector de avalancha)	Inestabilidad de la polarización.	Amplificadores acoplados en alterna.	Variaciones de la línea base.	Fijadores.
Sistema	Economía óptima. Alimentación de repetidores.	Repetidores sencillos o gran espaciado entre ellos.		

VII. BIBLIOGRAFIA

- 1.- M.K. BARNOSKI: "Fundamentals of Optical Fiber Communication". Academic Press. N.Y. 1976.
- 2.- C.D. SANDBANK: "Fiber Optica Communications: A survey". Electrical Comm. Vol.50, n°1, pp. 20-27. 1975.
- 3.- C.D. MOTCHENDABHER et Al.: "Low-Noise Electronic Design". John Wiley and Sons. N.Y. 1973.
- 4.- R.W. LUCKY et Al: "Principles of Data Communication". McGraw-Hill N.Y. 1968.
- 5.- J.E. MIDWINTER: "Optical Fibres for communication". Physics in Technology. Marzo 1975. pp. 60-66.
- 6.- W.A. GAMBLING: "Low-Loss Optical Fibres". 23 Congreso Internacional de Electrónica. Marzo 1976. Roma. pp.269-281.
- 7.- S. MASLOWSKI: "Development of cables and connectors for optical fibres". 1a. Conferencia Europea sobre "Optical Fibre Communication" pp.64-66. IEE 1975.
- 8.- S.M. SZE: "Physics of Semiconductor Devices" J. Wiley and Sons. N.Y. 1969.
- 9.- H. MELCHIOR et Al: "Photodetectors for Optical Communication systems". Proc. IEEE Vol.58 n°10 pp.1466-1486. Oct. 1970.

- 10.- P.P. WEBB et Al: "Properties of avalanche photodiodes". RCA Review Vol.35, pp.234-278. Junio 1974.
- 11.- J. PIQUERAS et Al: "Photoresponse of de GaAs con controlled field avalanche photodiodes (CFAPD)" American Inst. of Phys. 1975.
- 12.- S.D. PERSONICK: "Receiver design for digital fiber optic communication system I and II" B.S.T.J. Vol.52, n°6, pp.843-886. Julio-Agosto 1973.
- 13.- S.D. PERSONICK: "Statics of a general class of avalanche detectors with applications to optical communications". B.S.T.J. Vol.50, pp.3075-3095. Diciembre 1971.
- 14.- J.E. GOELL: "Imput amplifiers for optical PCM receivers". B.S.T.J. Vol.53 n°9, pp.1771-1793. Nov. 1974.
- 15.- F. LOMBARDI et Al: "Design considerations for a receiver for digital fibre-optic communication systems". Electronic Letters. Vol.11, n° 18, pp.439-440. Sept.4, 1975.
- 16.- V. TAKASAKI et Al: "Optical pulse formats for fiber optic digital communication" IEEE Trans. on Comm. Vol. COM-24, n°24 pp.404-413. Abril 1976.



FUNDACION JUAN MARCH
SERIE UNIVERSITARIA

Titulos Publicados:

- 1.— *Semántica del lenguaje religioso*/A. Fierro
(Teología. España, 1973)
- 2.— *Calculador en una operación de rectificación discontinua*/A. Mulet
(Química. Extranjero, 1974)
- 3.— *Skarns en el batolito de Santa Olalla*/F. Velasco
(Geología. España, 1974)
- 4.— *Combustión de compuestos oxigenados*/J. M. Santiuste
(Química. España, 1974)
- 5.— *Películas ferromagnéticas a baja temperatura*/José Luis Vicent López
(Física. España, 1974)
- 6.— *Flujo inestable de los polímeros fundidos*/José Alemán Vega
(Ingeniería. Extranjero, 1975)
- 7.— *Mantenimiento del hígado dador in vitro en cirugía experimental*
José Antonio Salva Lacombe (Medicina, Farmacia y Veterinaria. España, 1973)
- 8.— *Estructuras algebraicas de los sistemas lógicos deductivos*/José Plá Carrera
(Matemáticas. España, 1974)
- 9.— *El fenómeno de inercia en la renovación de la estructura urbana.*
Francisco Fernández-Longoria Pinazo (Urbanización del Plan Europa 2.000
a través de la Fundación Europea de la Cultura)
- 10.— *El teatro español en Francia (1935–1973)*/F. Torres Monreal
(Literatura y Filología. Extranjero, 1971)
- 11.— *Simulación electrónica del aparato vestibular*/J.M. Drake Moyano.
(Métodos Físicos aplicados a la Biología. España, 1974)
- 12.— *Estructura de los libros españoles de caballerías en el siglo XVI.*
Federico Francisco Curto Herrero (Literatura y Filología. España, 1972)
- 13.— *Estudio geomorfológico del Macizo Central de Gredos*
M. Paloma Fernández García (Geología. España, 1975)
- 14.— *La obra gramatical de Abraham Ibn ^c Ezra*/Carlos del Valle Rodriguez
(Literatura y Filología. Extranjero, 1970)

15. – *Evaluación de Proyectos de Inversión en una Empresa de producción y distribución de Energía Eléctrica.* Felipe Ruíz López (Ingeniería. Extranjero, 1974)
16. – *El significado teórico de los términos descriptivos.* /Carlos Solís Santos (Filosofía. España, 1973)
17. – *Encaje de los modelos econométricos en el enfoque objetivos-instrumentos relativos de política económica.* /Gumersindo Ruíz Bravo (Sociología. España, 1971)
18. – *La imaginación natural (estudio sobre la literatura fantástica norteamericana).* /Pedro García Montalvo (Literatura y Filología. Extranjero, 1974)
19. – *Estudio sobre la hormona Natriurética.* /Andrés Purroy Unanua (Medicina, Farmacia y Veterinaria. Extranjero, 1973)
20. – *Análisis farmacológico de las acciones miocárdicas de bloqueantes Beta–Adrenérgicos.* /José Salvador Serrano Molina (Medicina, Farmacia y Veterinaria. España, 1970)
21. – *El hombre y el diseño industrial.* /Miguel Durán–Lóriga (Artes Plásticas. España, 1974)
22. – *Algunos tópicos sobre teoría de la información.* /Antonio Pascual Acosta (Matemáticas. España, 1975)
23. – *Un modelo simple estático. Aplicación a Santiago de Chile.* Manuel Bastarache Alfaro (Arquitectura y Urbanismo. Extranjero, 1973)
24. – *Moderna teoría de control: método adaptativo-predictivo Teoría y realizaciones.* /Juan Manuel Martín Sánchez (Ingeniería España, 1973)
25. – *Neurobiología (I Semana de Biología. Conferencias-coloquio sobre Investigaciones biológicas 1977)*
26. – *Genética (I Semana de Biología. Conferencias-coloquio sobre Investigaciones biológicas 1977)*
27. – *Genética (I Semana de Biología. Conferencias-coloquio sobre Investigaciones biológicas 1977)*
28. – *Investigación y desarrollo de un analizador diferencial digital (A.D.D.) para control en tiempo real.* /Vicente Zugasti Arbizu (Física. España, 1975)
29. – *Transferencia de carga en aleaciones binarias.* /Julio A. Alonso (Física. Extranjero, 1975)
30. – *Estabilidad de osciladores no sinusoidales en el rango de microondas.* / José Luis Sebastian Franco. (Física. Extranjero, 1974)

31. – *Estudio de los transistores FET de microondas en puerta común.* Juan Zapata Ferrer. (Ingeniería. Extranjero, 1975).
32. – *Estudio sobre la moral de Epicuro y el Aristóteles esotérico.* / Eduardo Acosta Mendez (Filosofía. España, 1973)
33. – *Las Bauxitas Españolas como mena de aluminio.* / Salvador Ordoñez Delgado (Geología. España, 1975).
34. *Los grupos profesionales en la prestación de trabajo: obrero y empleados.* / Federico Durán López (Derecho. España, 1975)
35. – *Obtención de Series aneuploides (monosómicas y ditelosómicas) en variedades españolas de trigo común.* / Nicolás Jouve de la Barreda. (Ciencias Agrarias. España, 1975).
36. – *Efectos dinámicos aleatorios en túneles y obras subterráneas.* / Enrique Alarcón Alvarez. (Ingeniería. España, 1975).
37. – *Lenguaje en periodismo escrito.* / Fernando Lázaro Carreter, Luis Michelena Elissalt, Robert Escarpit, Eugenio de Bustos, Víctor de la Serna, Emilio Alarcos Llorach y Juan Luis Cebrián. (Seminario organizado por la Fundación Juan March los días 30 y 31 de mayo de 1977).
38. – *Factores que influyen en el espigado de la remolacha azucarera, beta vulgaris L.* / José Manuel Lasa Dolhagaray y Antonio Silván López. (Ciencias Agrarias. España, 1974).
39. – *Compacidad numerable y pseudocompacidad del producto de dos espacios topológicos. Productos finitos de espacios con topologías proyectivas de funciones reales.* / José Luis Blasco Olcina (Matemáticas. España, 1975).
40. – *Estructuras de la épica latina.* / M^a. del Dulce Nombre Estefanía Alvarez. (Literatura y Filología, España, 1971).

