



*Aplicación de Estructuras de Acoplo Eficientes para Circuitos Integrados
Fotónicos en Redes de Acceso Ópticas de Nueva Generación*

*Application of Efficient Coupling Structures for Photonic Integrated Circuits in
New Generation Optical Access Networks*

*Aplicação de Estruturas de Acoplamento Eficientes para Circuitos Integrados
Fotônicos em Redes de Acesso Óptico de Nova Geração*

Roberto Alejandro Larrea Luzuriaga ^I
roberto.larrea@istcarloscisneros.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1568-5113>

Cristina Alejandra Orozco Cazco ^{II}
cristina.orozco@istcarloscisneros.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1896-1590>

Kleber Augusto Jaramillo Galarza ^{III}
kjaramillo@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1488-5412>

Ciara Milena Vargas Salgado ^{IV}
cmvargas10@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0003-7604-5133>

Gabriel Fernando Larrea Luzuriaga ^V
gflarrea1@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1562-7191>

Correspondencia: roberto.larrea@istcarloscisneros.edu.ec

Ciencias Técnica y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de marzo de 2023 * **Aceptado:** 12 de abril de 2023 * **Publicado:** 25 de mayo de 2023

- I. Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, Ecuador.
- II. Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, Ecuador.
- III. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.
- V. Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.

Resumen

El presente trabajo analiza el impacto del desarrollo de estructuras de acoplo y su aplicabilidad en el desarrollo de la fotónica de silicio, como interfaz entre una red de comunicaciones en fibra, a nivel de capa física y dispositivos encargados del procesamiento óptico, compuestos por circuitos integrados fotónicos, en redes todo óptico. Para su análisis se ha establecido una comparativa respecto a redes en las cuales la propagación de la señal se lo realiza en el régimen óptico mientras que el procesamiento se lo realiza en el régimen eléctrico, sistemas en los cuales el tipo de fotodetector juega un papel fundamental respecto al material y características intrínsecas que determinan su capacidad y retardo para detectar luz y establecer una señal eléctrica en un ancho de banda determinado. Como resultados se establece la capacidad de los acopladores ópticos eficientes corresponde a transmitir altos volúmenes de información sobre una pequeña área de un circuito integrado nanofotónico con bajas pérdidas, aplicados al diseño de redes ópticas de nueva generación.

Palabras Clave: Fotónica de silicio; Acopladores de rejilla; Red de difracción; Redes ópticas; Fotodetectores.

Abstract

This paper analyzes the impact of the development of coupling structures and their applicability in the development of silicon photonics, as an interface between a fiber communications network, at the physical layer level, and devices in charge of optical processing, composed of integrated circuits. photonic, in all optical networks. For its analysis, a comparison has been established with respect to networks in which the propagation of the signal is carried out in the optical regime while the processing is carried out in the electrical regime, systems in which the type of photodetector plays a fundamental role. with respect to the material and intrinsic characteristics that determine its capacity and delay to detect light and establish an electrical signal in a determined bandwidth. As results, the capacity of efficient optical couplers corresponds to transmitting high volumes of information over a small area of a nanophotonic integrated circuit with low losses, applied to the design of new generation optical networks.

Keywords: silicon photonics; grid couplers; diffraction grating; optical networks; photodetectors.

Resumo

Este artigo analisa o impacto do desenvolvimento de estruturas de acoplamento e sua aplicabilidade no desenvolvimento da fotônica de silício, como interface entre uma rede de comunicações de fibra, no nível da camada física, e dispositivos responsáveis pelo processamento óptico, compostos por circuitos integrados. , em todas as redes ópticas. Para sua análise, foi estabelecida uma comparação com relação a redes nas quais a propagação do sinal é realizada no regime óptico enquanto o processamento é realizado no regime elétrico, sistemas nos quais o tipo de fotodetector desempenha um papel fundamental. no que diz respeito às características materiais e intrínsecas que determinam sua capacidade e atraso para detectar a luz e estabelecer um sinal elétrico em uma determinada largura de banda. Como resultados, a capacidade de acopladores ópticos eficientes corresponde à transmissão de grandes volumes de informação sobre uma pequena área de um circuito integrado nanofotônico com baixas perdas, aplicado ao projeto de redes ópticas de nova geração.

Palavras-chave: fotônica de silício; acopladores de rede; grade de difração; redes ópticas; fotodetectores.

Introducción

La creciente necesidad de un mayor ancho de banda en los sistemas de comunicación en concordancia con el desarrollo de nuevas tecnologías de la información y comunicación mediante la utilización de aplicaciones que provean de mayores prestaciones, y al masivo tráfico sobre la red, implica mayores requerimientos en los sistemas de comunicación, lo que resulta en el punto de partida para nuevas investigaciones que satisfagan dicha necesidad. Es así como la tecnología de comunicaciones ópticas se ha desarrollado y evolucionado, presentándose como una tecnología clave, debido a sus propiedades como inmunidad a las interferencias electromagnéticas, bajas pérdidas de propagación y un elevado ancho de banda [1], ideal para el diseño de redes de nueva generación.

La utilización de la tecnología óptica en los sistemas de comunicaciones inicialmente consistió en transmitir la señal procedente del dominio eléctrico y transformarla al dominio óptico, haciendo uso de técnicas de multiplexación como OTDM (Multiplexación por división de tiempo óptico) y WDM (Multiplexación por división de longitud de onda), de manera que se aproveche todo el ancho de banda que el medio dispone, sirviendo como transporte de la señal en enlaces punto a

punto. Sin embargo, el procesamiento de la señal y otras funciones relevantes a la transmisión se lo hace en puntos intermedios, en el dominio eléctrico.

El cambio de régimen de la señal de eléctrico/óptico y viceversa, en los puntos intermedios de los sistemas de comunicación ocasiona retardos, debido a que la velocidad de transmisión es mayor que la de procesamiento, lo cual provoca cuellos de botella en dichos puntos. Es así, como se desarrolla la tecnología nanofotónica, diseñada específicamente para aumentar la capacidad de transmisión de información, reducir el consumo energético y espacio de los equipos, en las redes de comunicaciones, con el objetivo de mejorar sus prestaciones mediante la sustitución de componentes electrónicos por otros que trabajen en el dominio óptico. De manera que, se evite la transformación de dominio en puntos intermedios. [2]

En la actualidad se comercializan, numerosos dispositivos ópticos (láseres, moduladores, amplificadores, entre otros), con elevados costos de fabricación y gran tamaño, debido a los materiales especiales que se utilizan (compuestos III y V). Por tal razón, es imprescindible la investigación de nuevos materiales compatibles con la tecnología de desarrollo de elementos electrónicos CMOS (Semiconductor de óxido metálico complementario) y la miniaturización de los elementos fotónicos (nanofotónica), que permita aprovechar la madurez de la tecnología microelectrónica y su proceso de fabricación, de modo que se admita su integración, se mejoren las prestaciones y su coste de fabricación sea económico.

La madurez de los procesos de fabricación y técnicas de diseño a escala nano-métrica hoy en día, permiten la implementación de nuevos sistemas compuestos de circuitos integrados fotónicos, cada vez más complejos. Estos avances promueven nuevos desafíos asociados al desarrollo de estructuras eficientes que permitan establecer una vía de comunicación o interfaz entre estructuras de dimensiones sumamente diferentes como es el caso entre una fibra óptica y una guía de onda de un circuito integrado fotónico (PIC).

En la década pasada muchas investigaciones se han enfocado sobre circuitos integrados fotónicos SOI (Silicio sobre aislante), debido a los reducidos tamaños que se puede alcanzar a nivel de estructuras, debido al alto contraste de índice de refracción disponible sobre este material. Sin embargo, las dimensiones de las secciones transversales de los dispositivos complican la interconexión con una fibra óptica monomodo, para lo cual varios esquemas de acoplo se han propuesto en el plano (horizontal) y fuera del plano (vertical). [3]

Por un lado, el acoplamiento horizontal por medio de la utilización de convertidores de tamaño de modo (spot-size converters) proveen un gran ancho de banda y bajas pérdidas de acoplamiento, a menudo requieren un procesamiento posterior y no pueden ser testeados a nivel de oblea. Por otro lado, el acoplamiento vertical utiliza una estructura de difracción o rejilla (gratings), que provee mayores pérdidas de acoplo, pero que resulta como una adecuada solución para ser testeados a nivel de oblea y sin requerir de un procesamiento posterior, ya que la luz se acopla fuera del plano. [4]

El desarrollo de estructuras de acoplo eficientes, sirven de interfaz para el paso de la señal óptica de un medio de transmisión guiado, fibra óptica, cuyo diámetro del núcleo es de alrededor de 10um (Fibra monomodo), y de una guía de onda de 500nm de ancho, procedente de un PIC, en el cual se llevará acabo el procesamiento de la señal en el dominio óptico, sin la necesidad de cambio de régimen de la señal eléctrico. La diferencia de tamaño entre los elementos mencionados, hace necesaria una estructura intermedia, basando en el presente estudio a nivel de acoplamiento vertical mediante la utilización de una red de difracción, que permita difractar la luz incidente de la fibra óptica a la guía de onda o viceversa. A mayor acoplamiento de potencia óptica, menos pérdidas se obtendrán siendo más eficiente la estructura.

En la siguiente sección como parte del análisis del presente estudio se hará una breve explicación de las redes ópticas pasivas y activas (PON y AON). Seguido, de una breve explicación de conversores de dominio (foto-detectores). Posterior, se hace una explicación sobre acopladores verticales y una muestra de resultados obtenidos en la investigación. Con lo cual, se realizará un análisis comparativo entre foto-detectores y estructuras de acoplo. Y finalmente, se presentará las conclusiones en relación al análisis realizado.

Métodos o metodología

Análisis de cada uno de los elementos que intervienen en el estudio:

Redes de comunicacioes ópticas

- *Redes Ópticas Activas (PON)*

Una red óptica pasiva, constituye una red de banda ancha basada en fibra a nivel de capa de acceso, es decir una red punto multipunto, donde el ancho de banda disponible no es dedicado para cada usuario sino multiplexado en una misma fibra. Esta arquitectura de red al ser pasiva no requiere de nodos intermedios para el procesamiento de la señal, desde el proveedor de servicios hacia el

usuario, lo que permite reducir costos en su implementación, sin embargo, la distancia máxima de despliegue que puede alcanzar esta tecnología es de aproximadamente 20Km. [5]

- *Redes Ópticas Activas (AON)*

Una red óptica activa, utiliza dispositivos activos para el procesamiento o amplificación de la señal, los cuales consumen energía para su funcionamiento, y se encuentran en nodos intermedios entre el proveedor de servicios y el usuario. Provee un ancho de banda dedicado para cada usuario, ya que se utilizan dos longitudes de onda diferentes y multiplexadas sobre cada fibra, de modo que la una sirve para comunicación de descarga (downstream) y la otra para carga (upstream), obteniéndose una comunicación full-dúplex con una velocidad de transmisión simétrica por puerto (fibra) de 1Gbps. El despliegue de esta tecnología puede superar los 80 Km. [6]

La multiplexación que se utiliza en este tipo de redes es CWDM (Multiplexación por longitudes de onda gruesa) o DWDM (Multiplexación por longitudes de onda densa), con longitudes de onda de tercera ventana, en el rango de los 1550nm. Su funcionamiento es similar a la multiplexación por división de frecuencia (FDM) utilizado en las comunicaciones del espectro radioeléctrico, se transmiten varias portadoras ópticas con una longitud de onda diferente generadas por diferentes láseres en una misma fibra, de modo que cada portadora óptica puede ser tratada como un canal de comunicaciones independiente del resto, multiplicándose el ancho de banda efectivo de la fibra y permitiendo una comunicación bidireccional.

Sin embargo, esta arquitectura de red constituye una red de acceso de conmutación de circuitos ya que se preestablece la ruta y longitud de onda a utilizar (canal dedicado) para establecer la comunicación con el usuario.

En redes troncales, de conmutación de paquetes, se mantiene el proceso de la señal del sistema de comunicación en el dominio eléctrico. Estas redes se interconectan por fibra óptica teniendo que realizarse una conversión de dominio del régimen óptico a eléctrico y viceversa, el cambio de régimen de la señal implica un retardo en la comunicación, así como también un elevado consumo de energía debido al masivo intercambio de información.

Debido a las mejoras a la capacidad del canal respecto a velocidades de transmisión en fibra y al incremento del volumen de información que se propaga sobre la red, los requerimientos de procesamiento electrónico son cada vez mayores lo que hace que estos nodos sean cada vez más vulnerables a cuellos de botella. Esta vulnerabilidad, hace pensar en una solución de red toda óptica, a nivel de redes troncales, por lo que hoy en día existen muchas investigaciones en fotónica

para reemplazar componentes electrónicos con componentes nanofotónicos, que permitan mejorar sus prestaciones a un bajo coste y con un consumo energético mucho menor.

foto-detectores

Los receptores ópticos son un elemento fundamental en los sistemas de comunicaciones ópticos, se encarga de convertir la señal óptica proveniente de la fibra en señal eléctrica, a este elemento se le denomina foto-detector y basa su funcionamiento en el efecto opto-eléctrico.

Los foto-detectores deben tener una alta sensibilidad, además de una respuesta rápida y bajos niveles de ruido, de modo que sean bastante confiables.

El proceso fundamental de la foto-detección es la absorción óptica, para lo cual su funcionamiento se basa en tres conceptos básicos: responsividad, eficiencia cuántica y ancho de banda. Considerando un foto-detector como una estructura de un material semiconductor, y si la energía de los fotones incidente supera la banda de energía de la zona prohibida del material, se genera un par electrón – hueco cada vez que un fotón sea absorbido por el semiconductor, el cual bajo la influencia de un campo eléctrico debido a una diferencia de potencial establecida en él, los electrones y huecos pueden ser barridos por el semiconductor, generando una corriente eléctrica denominada fotocorriente, la cual es directamente proporcional a la potencia óptica incidente. [7]

La responsividad es la constante de proporcionalidad entre la fotocorriente y la potencia óptica incidente.

La eficiencia cuántica se define como el cociente de la tasa de generación de electrones y la tasa de incidencia de fotones.

El ancho de banda, corresponde a la velocidad con la que el foto-detector responde a las variaciones de potencia óptica incidente.

Los foto-detectores utilizados para comunicaciones ópticas son el fotodiodo PIN que se caracteriza por su alta fiabilidad, bajo ruido, compatibilidad con los amplificadores de bajo voltaje y fácil fabricación, y el fotodiodo APD, con una menor sensibilidad y altos voltajes de alimentación para su funcionamiento.

Los materiales empleados para su fabricación de los foto-detectores dependen de la longitud de onda de operación, es así como se utiliza Silicio para detección de longitudes de onda de alrededor de los 800nm, Germanio para longitudes de onda de 1300nm, e InGaAsP para longitudes de onda de 1500nm. [8]

En la tabla 1, se muestran los parámetros de funcionamiento de fotodiodos PIN, con los diferentes materiales para su fabricación.

Tabla 1.- Parametros fotodiodo pin

Parámetro	Símbolo	Unidad	Si	Ge	InGaAsP
Longitud de onda	λ	μm	0.4 - 1.1	0.8 - 1.8	1 - 1.7
Responsividad	R	A/W	0.4 - 0.6	0.5 - 0.7	0.6 - 0.9
Eficiencia cuántica	η	%	75 - 90	50 - 55	50 - 70
Corriente de oscuridad	I_d	nA	1 - 10	50 - 500	1 - 20
Tiempo de subida	T_r	ns	0.5 - 1	0.1 - 0.5	0.02 - 0.5
Ancho de banda	Δf	GHz	0.1 - 0.6	0.5 - 3	1 - 10
Diferencia de potencial de polarización	V_b	V	50 - 100	6 - 10	5 - 6

En la tabla 2, se muestran los parámetros de funcionamiento de fotodiodos APD, con los diferentes materiales para su fabricación.

Tabla 2.- Parametros fotodiodo APD

Parámetro	Símbolo	Unidad	Si	Ge	InGaAsP
Longitud de onda	λ	μm	0.4 - 1-1	0.8 - 1.8	1 - 1.7
Responsividad	R	A/W	80 - 130	3 - 30	5 - 20
Ganancia del APD	M	-	100 - 500	50 - 200	10 - 40
Factor k	k_A	-	0.02 - 0.05	0.7 - 1	0.5 - 0.7
Corriente de oscuridad	I_d	nA	0.1 - 1	50 - 500	1 - 5
Tiempo de subida	T_r	ns	0.1 - 2	0.5 - 0.8	0.1 - 0.5
Ancho de banda	Δf	GHz	0.2 - 1	0.4 - 0.7	1 - 10
Diferencia de potencial de polarización	V_b	V	200 - 250	20 - 40	20 - 30

acopladores verticales

El acoplamiento de circuitos nanofotónicos a una fibra monomodo resulta en un ejercicio complejo debido a la gran diferencia de tamaño de estos dos componentes, lo que resulta en pérdidas. Por esta razón, es necesaria una estructura que permita generar un acoplamiento, para reducir las pérdidas y permitir el paso de la luz de una estructura a la otra.

Los acopladores verticales o redes de difracción, son estructuras de reducido tamaño a nivel de dimensiones totales de la estructura con las cuales se logra un acoplamiento. Sin embargo, las

pérdidas de acoplo dependen de la geometría de la estructura, de las propiedades ópticas del material con el cual fue construida y de un ajuste o calibración respecto a la posición de la fibra respecto a la normal a la superficie de la estructura de difracción (distancia, altura y ángulo de acoplamiento de incidencia), parámetros con los cuales se diseña la estructura para garantizar una mayor eficiencia de acoplamiento.

Para el diseño de la red de difracción se utiliza el principio de difracción, utilizando la ecuación de Bragg, que establece que un rayo de luz incidente a una superficie de una estructura periódica será difractado, obteniéndose una relación entre el vector de onda incidente y el vector de onda difractado. [9]

El estudio se basa en el diseño de estructuras de acoplo eficientes sobre una guía de onda SOI, fabricada sobre una oblea silicio y cubierta con una capa de óxido de silicio, para generar una guía enterrada de núcleo de silicio, cuyo índice de refracción es mayor que el de las capas inferior y superior, lo cual asegura una propagación por reflexión interna total (TIR) en la guía de onda. Sobre la guía se diseña una estructura periódica o red de difracción que establece una variación en el índice de refracción en cada periodo de la red. Una guía de onda mantiene la polarización de la onda que incide por la red periódica y se acopla a la guía, pudiendo ser un acoplamiento con polarización eléctrica (TE) o polarización magnética (TM), siendo un diseño diferente de la estructura de acoplo para cada tipo. [10]

La eficiencia de acoplamiento está directamente ligada a parámetros de la estructura de acoplamiento y parámetros de alineamiento con respecto a la fibra monomodo. Dentro de los parámetros de la estructura podemos nombrar: las propiedades ópticas del material, con el cual se fabrica la guía de onda (índices de refracción), longitud de onda de operación, periodo de la red de difracción, factor porcentual de atacado, número de periodos, profundidad o altura correspondiente a la parte atacada de la red, y parámetros referentes al alineamiento de la fibra y la red como: ángulo del eje del núcleo de la fibra respecto al eje normal a la estructura, longitud de acoplo correspondiente a la distancia óptima de la fibra en relación al inicio de la red y la altura entre la superficie de la red y la fibra. En la figura 1 se muestra la estructura de una red de difracción en una guía de onda silicio (Si) recubierta por óxido de silicio (SiO_2), en la cual n_{Si} , n_{box} y n_{c} corresponden a índices de refracción de los materiales de la guía para una longitud de onda de operación λ ; L_{box} , L_{Si} y L_{cover} corresponden a la altura de cada una de las capas de la guía; P es el periodo de la red; L_g es la longitud de la estructura correspondiente a multiplicar el número de

periodos por el periodo de la red; du y de corresponden a la parte no atacada y atacada de la guía de onda en función del factor de atacado, H corresponde a la altura de la parte atacada; L_c corresponde a la longitud de acoplamiento; S corresponde a la altura entre la fibra y la estructura; y W_g corresponde al ancho de la guía de la red de difracción de $12\mu\text{m}$, en función del diámetro de la fibra $10\mu\text{m}$.

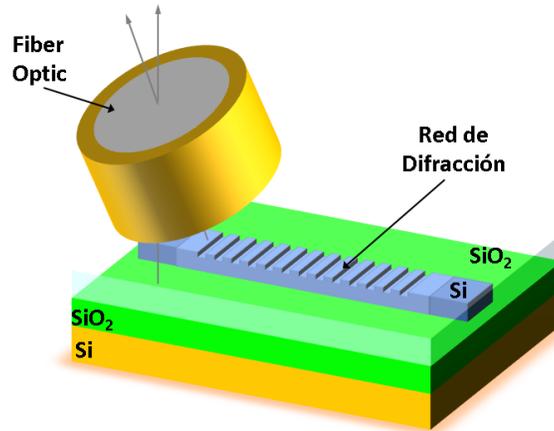


Figura 1.- Red de difracción en guía de onda SOI

La red de difracción es una estructura tridimensional, pero puede ser aproximada a una estructura bidimensional, ya que el ancho de la guía es mucho más grande que la longitud de onda y la altura de las capas de la guía de onda. Por tal razón la estructura puede ser diseñada en el plano XZ, considerando una guía infinita a lo largo del eje Y, tal como se muestra en la figura 2.

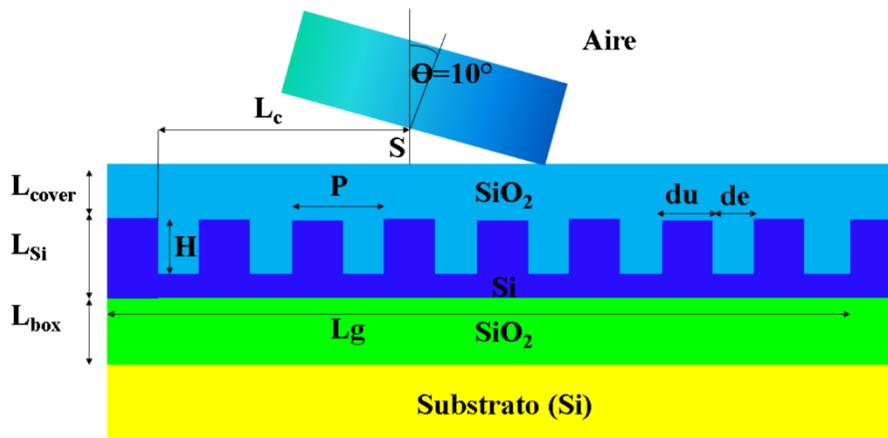


Figura 2.- Red de difracción en el plano bidimensional XZ

Para el estudio y diseño de la estructura se realizó la simulación de la red de difracción, para una polarización en TE, con un acoplamiento de la guía a la fibra, por reciprocidad los resultados obtenidos en este acoplamiento serán los mismos para el acoplo de luz de la fibra a la guía. [9]

El uso de redes de difracción lineales, utiliza estructuras tapers, para acoplar el ancho de la estructura de la red de difracción con el ancho de la guía de onda del PIC, dichas estructuras están ampliamente estudiadas cuyas pérdidas son casi nulas, dependiendo de la longitud del taper.

En la figura 3, se observa los resultados de simulación obtenidos, luego de fijar los parámetros de diseño de la estructura en valores óptimos (Tabla 3). En relación a la eficiencia de acoplo de la red de difracción para un rango de longitudes de onda que van desde los 1500nm – 1600nm, se obtiene una potencia de la señal -4.82dBm para una longitud de onda de 1550nm y un ancho de banda de 82nm a 3dB.

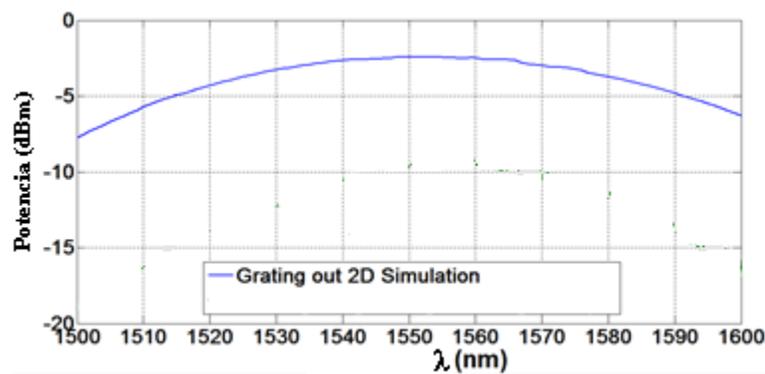


Figura 3.- Espectro de funcionamiento de la estructura de acoplo simulada con los parámetros óptimos.

Tabla 3.- Parámetros óptimos de diseño red de difracción

λ (nm)	P(nm)	H(nm)	de(nm)	du(nm)	Lcover(nm)	L _{Si} (nm)	L _{BOX} (um)	Ángulo
1550	609	70nm	256	353	750	220	2	10°

Otros estudios han demostrado de manera práctica una interfaz escalable con 61 acopladores verticales colocados de manera exagonal sobre un arreglo de fibras, obteniéndose resultados experimentales sobre el diseño del grating de pérdidas por inserción de 4.5dB y un ancho de banda 50nm 3dB, con el cual ha probado altas velocidades de transmisión con un ancho de banda

alcanzado de 27Tb/s/mm^2 sobre un área impresa de 0.096mm^2 , demostrando el potencial de la tecnología fotónica sobre silicio para interconexiones ópticas de banda ancha. [11]

Resultados y discusión

Análisis comparativo

Los foto-detectores son elementos activos, indispensables en un sistema de comunicaciones, sin embargo, son estructuras que han evolucionado en un menor grado. La mayoría de los procesos en las redes de comunicaciones a nivel de señal transmitida se lo realiza en el régimen eléctrico, señalándose las siguientes limitaciones de las estructuras:

a. A nivel de fabricación, se requiere de diferentes materiales para la detección de distintas longitudes de onda, además está determina el ancho de banda o velocidad con la cual el foto-detector puede detectar un cambio a nivel de potencia óptica, lo que limita la velocidad de transferencia de información del medio óptico al eléctrico, al ancho de banda del foto-detector, convirtiéndose en la principal limitante para el uso del total ancho de banda efectivo disponible en la fibra óptica.

b. Se requiere de la aplicación de una diferencia de potencial, o alimentación eléctrica para su funcionamiento, dependiendo de la longitud de onda a detectar la diferencian de potencial puede ser mayor o menor, lo que lo hace energéticamente ineficiente.

c. Es necesario una elevada sensibilidad por parte del foto-detector para aportar una mayor fiabilidad en el receptor, es decir mientras mayor sea la responsividad se obtendrá una mayor sensibilidad.

d. Es necesario que el umbral de la fotocorriente generada por el efecto óptico-eléctrico sea mayor al de la corriente de oscuridad generada por el efecto térmico, de modo que el sistema sea fiable.

Las estructuras de acoplamiento vertical son elementos pasivos, donde su función radica en pasar una señal óptica entre dos estructuras, medios de propagación, cuya escala es 20 veces menor, en relación una con otra, de modo que la señal óptica se difracte y se acople fuera del plano. La eficiencia de este proceso depende de las propiedades ópticas del material, así como también de la geometría de diseño de la red de difracción y parámetros de alineamiento con la fibra, sin embargo, su utilidad como elemento integrador para el paso de la señal óptica provista por una fibra monomodo a un PIC, se puede definir:

- a. Todo el proceso se realiza en el régimen óptico, la velocidad de acoplo no se encuentra limitada, el ancho de banda disponible para un acoplamiento eficiente es mucho mayor y depende del diseño de la red, permitiendo una mayor utilización del ancho de banda efectivo de la fibra óptica.
- b. Las pérdidas por inserción no son muy elevadas, dependen del diseño de la estructura de acoplo, lo que permite el uso de una ventana de longitudes de onda con un acoplo eficiente y bajas pérdidas.
- c. Al ser un elemento pasivo, no hay un consumo de energía, permitiendo la transmisión de grandes volúmenes de información en un área de reducido de tamaño (mm^2), lo que lo hace energéticamente muy eficiente.
- d. El acoplamiento en diferentes longitudes de onda, depende en mayor medida de la geometría de la estructura más que del material de fabricación, lo que lo hace que se puedan realizar estudios sobre materiales que puedan ser fácilmente integrables, como lo es la tecnología sobre silicio (SOI).

Conclusión

El impacto de los acopladores verticales, en redes de comunicaciones de nueva generación es relevante, ya que marca un punto de partida para el desarrollo de interconexiones ópticas entre fibras ópticas y PICs donde se procese la señal, siendo este proceso energéticamente eficiente.

La utilidad de una red de difracción y un foto-detector, es indispensable para los sistemas en los cuales estos dispositivos operan, a nivel de procesamiento de señal, sin embargo, se ha tratado de dar un enfoque sobre redes donde el procesamiento de la señal se lo haga completamente en el régimen óptico sin necesidad de una conversión de régimen de la señal, e identificar los beneficios con respecto de ciertas limitantes que supone la conversión de señal opto-eléctrica.

Para trabajos futuros se pretende fabricar la red de difracción diseñada y medir su eficiencia de modo que se pueda comprobar los parámetros de operación alcanzados en simulación.

Referencias

1. Acelerando la Revolución digital: Banda Ancha para América Latina y el ... [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2972/LCR2167.pdf?sequence=1>.

2. G. Puerto Leguizamón, “Evolución de las redes de datos: Hacia una plataforma de comunicaciones completamente óptica,” *Rev.fac.ing.univ. Antioquia* [online]. 2008, n.45, pp. 148-156. ISSN 0120-6230.
3. D. Vermeulen et. al., “High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible Silicon-On-Insulator platform,” *Optics Express*, Vol. 18, Issue 17, pp. 18278-18283, 2010.
4. <https://doi.org/10.1364/OE.18.018278>
5. Shankar Kumar et. al., “Highly efficient grating coupler between optical fiber and silicon photonic circuit,” in *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper CTuC6.
6. <https://doi.org/10.1364/CLEO.2009.CTuC6>
7. ITU. (Marzo de 2009). Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recuperado en Enero 2023, de G.984.1 : Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Características generales: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=s&id=T-REC-G.984.1-200803-I!!PDF-E&type=items
8. X. Masip, “Mecanismo de Encaminamiento Dinámico en Redes ASON,” *Centro de Tecnología de Comunicaciones de Cataluña, Grupo de Redes Ópticas, Gran Capità*, 2-4, pl. 2ª, 08034 Barcelona
9. Universidad de Valladolid, . (2008). Tutorial de Comunicaciones Ópticas. Recuperado en Enero de 2023, de La Fibra Óptica: <https://www.tel.uva.es/personales/co/index.html>
10. Agrawal G. P. *Fiber – Optic Communication Systems*, 3ed, Wiley – Interscience, EUA, 2002
11. G. Oriol., “Design and Simulation of Vertical Grating Coupler for Photonic Integrated System-in-Package”, *Universitat Politècnica de Catalunya*, Master Thesis, 2010.
12. M. Iqbal, Z. Zheng and J.S. Liu.“Slot Optical Waveguides Simulations and Modeling, Passive Microwave Components and Antennas”, Vitaliy Zhurbenko (Ed.), ISBN: 978-953-307-083-4, InTech, DOI: 10.5772/9414, 2010
13. P. Liao, “Ultradense Silicon Photonic Interface for Optical Interconnection,” *Ieee Photonics Technology Letters*, Vol. 27, No. 7, April 1, 2015.
14. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2015.2390540>

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).