

Diseño de *grating couplers* de orden cero de banda ancha y alta eficiencia para el infrarrojo medio

Alejandro Sánchez-Postigo⁽¹⁾, J. Gonzalo Wangüemert-Pérez⁽¹⁾, José Manuel Luque-González⁽¹⁾,
Íñigo Molina-Fernández⁽¹⁾, Pavel Cheben⁽²⁾, Robert Halir⁽¹⁾, Jens H. Schmid⁽²⁾,
Alejandro Ortega-Moñux⁽¹⁾

asp@ic.uma.es, gonzalo@ic.uma.es, jmlg@ic.uma.es, imf@ic.uma.es, pavel.cheben@nrc-cnrc.gc.ca,
robert.halir@ic.uma.es, jens.schmid@nrc-cnrc.gc.ca, aom@ic.uma.es

⁽¹⁾ Universidad de Málaga, Dept. de Ingeniería de Comunicaciones, ETSI Telecomunicación, Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga, Spain

⁽²⁾ National Research Council Canada, 1200 Montreal Road, Bldg. M50, Ottawa K1A 0R6, Canada

Abstract- The mode fields of optical fibers and high-index contrast photonic waveguides have different dimensions, making difficult the coupling of light from one to the other. To solve this problem, surface grating couplers are one of the most used alternatives. However, in conventional grating couplers the bandwidth is limited. To overcome this drawback, we have recently proposed zero-order grating couplers, which, making use of a high-index prism and subwavelength grating structures, substantially mitigate the wavelength dependency of conventional grating couplers. In the near-infrared ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) it is not possible to take full benefit from the potential bandwidth enhancement of zero-order grating couplers. Thus, in this work we migrate our zero-order grating coupler design from the near-infrared wavelength range to the mid-infrared one, which is attaining increasing attention because of its sensing applications. Subdecibel coupling efficiencies and broad bandwidths up to $\sim 680 \text{ nm}$ are achieved at $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ for silicon-on-insulator and germanium-on-silicon nitride platforms.

I. INTRODUCCIÓN

Las plataformas de alto contraste de índice (*High Index Contrast*, HIC), como la de silicio sobre aislante (*Silicon On Insulator*, SOI), están muy extendidas en fotónica integrada, pues permiten la fabricación de dispositivos compactos debido al alto confinamiento de la luz dentro de los núcleos de las guías de onda. No obstante, esta ventaja constituye un inconveniente cuando se pretende acoplar luz desde el chip a la fibra óptica o viceversa, ya que las dimensiones de los modos de las guías de onda fotónicas son mucho menores que las de los modos cuasi Gaussianos de las fibras ópticas convencionales. Para solventar el problema del acoplo chip-fibra se han propuesto diversas soluciones, como los *facet couplers* o los *grating couplers*. Los primeros permiten el acoplo de la luz con gran ancho de banda directamente a través del canto del chip, pero esto impide que pueda extraerse la luz desde cualquier punto del chip y, además, obliga a pulir los bordes del mismo por los que se va a extraer o inyectar la luz [1]. En los *grating couplers*, por el contrario, el acoplo se realiza por la superficie del chip en cualquier punto de la misma con tolerancias por desalineamiento más relajadas que en el caso de los *facet couplers*. Sin embargo, los *grating couplers* convencionales poseen un ancho de banda limitado [2].

Los *grating couplers* son guías periódicas de periodo Λ que trabajan en régimen de radiación, de manera que la luz se radia hacia fuera del chip conforme se propaga por ellas. El campo radiado puede recogerse con una fibra óptica convenientemente situada. Los dos factores de mérito con los que se evalúan las características de los *grating couplers* son el ancho de banda a 1 dB ($BW_{1\text{dB}}$) y la eficiencia de acoplo (CE), definida como la fracción de potencia radiada respecto de la que se inyecta en el acoplador. En los *grating couplers* convencionales el ancho de banda está limitado principalmente por la fuerte dependencia que existe entre el ángulo de radiación y la longitud de onda. La eficiencia de acoplo, por su parte, tiene un valor máximo del $\sim 80\%$, que es la máxima integral de solapamiento posible entre un campo radiado de perfil exponencial y el modo cuasi Gaussiano de una fibra óptica. En la literatura pueden encontrarse ejemplos de *grating couplers* en los que se consiguen superar las limitaciones en el ancho de banda y en la eficiencia de acoplo propias de estos dispositivos. Por ejemplo, en [3] se consigue un notable ancho de banda a 1 dB de 90 nm haciendo uso de estructuras sub-longitud de onda (*SubWavelength Grating*, SWG). Sin embargo, esta mejora respecto de los 40 – 50 nm que habitualmente tienen los *grating couplers* va acompañada de una eficiencia de acoplo baja de -3.8 dB .

Recientemente, en [4], los autores de esta comunicación diseñamos un nuevo tipo de *grating coupler* que, trabajando en régimen SWG ($\Lambda \ll \lambda$) y empleando un prisma de alto índice de refracción, opera en el orden cero de radiación. De esta forma, para la polarización TE el dispositivo consigue simultáneamente una eficiencia de acoplo del 92% (-0.4 dB) y un ancho de banda a 1 dB de 126 nm para una longitud de onda nominal de $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ (infrarrojo cercano). No obstante, la mejora del ancho de banda de este *grating coupler* de orden cero respecto de los *grating couplers* convencionales está limitada por la dispersión introducida por la guía SWG empleada. El menor tamaño que puede fabricarse, o *minimum feature size*, impide utilizar periodos más pequeños y, por tanto, obliga a trabajar más cerca del régimen de Bragg de lo deseable, lo que incrementa la dispersión SWG.

En consecuencia, para aprovechar más la ganancia en el ancho de banda que ofrecen los *grating couplers* de orden cero, es necesario reducir el cociente Λ/λ y, con él, la

dispersión de la guía periódica. Para valores de Λ fijos, esto puede conseguirse aumentando la longitud de onda de operación desde el infrarrojo cercano hasta el infrarrojo medio (*Mid-InfraRed*, MIR) [5]. Es importante destacar que este rango de longitudes de onda, de $2 \mu\text{m}$ a $20 \mu\text{m}$, está en auge en óptica integrada debido a sus múltiples aplicaciones, entre las que destacan la detección y determinación de sustancias con sensores fotónicos. Cuanto mayor sea la región del infrarrojo medio en la que operen los dispositivos diseñados para esta banda, mayor variedad de sustancias detectables podrá abarcarse.

En este trabajo trasladamos el concepto de *grating coupler* de orden cero a $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ para la polarización TE, consiguiendo ganancias en el ancho de banda de casi 4.5 veces las obtenidas a $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Los diseños se realizan en las plataformas de alto contraste de silicio sobre aislante (SOI) y de germanio sobre nitruro de silicio (GON), consiguiendo anchos de banda a 1 dB de hasta $\sim 680 \text{ nm}$ con eficiencias de acoplo mejores de -1 dB. La organización de este documento es la siguiente: en la sección II se detalla el principio de funcionamiento de los *grating couplers* de orden cero; después, en la sección III, se describe brevemente el procedimiento empleado para diseñarlos y se proponen varios diseños para la banda del infrarrojo medio; finalmente, en la sección IV, se resumen las conclusiones de este trabajo.

II. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS GRATING COUPLERS DE ORDEN CERO

En la Fig. 1 se muestra la representación esquemática en 2D de un *grating coupler* de orden cero. Este acoplador está constituido por una guía periódica SWG de grosor t_{core} , longitud L y periodo $\Lambda = a + b$, donde a y b son las longitudes de los segmentos de cada uno de los materiales que conforman cada periodo. Sobre ella se sitúa un prisma de alto índice de refracción n_u y ángulo ϕ_p que se encuentra separado del núcleo de la guía periódica por una capa de índice de refracción n_e y altura variable $t_{\text{clad}}(z)$ que recibe el nombre de *cladding*. Para evitar las reflexiones en la interfaz entre el prisma y el aire, se utiliza una capa antirreflectante de grosor t_{AR} e índice de refracción n_{AR} . En la Fig. 1 se incluye también el núcleo de una fibra óptica con un ángulo de orientación θ destinada a recibir la luz radiada por el acoplador.

El ángulo de radiación, θ , de los *grating couplers* convencionales se calcula a partir de la ecuación [6]

$$n_u \sin(\theta) = n_B + m \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (1)$$

donde n_u es el índice de refracción del medio en el que se encuentra la fibra óptica, n_B es la parte real del índice efectivo del modo Bloch-Floquet que se propaga por la guía periódica, Λ es el periodo de la guía, λ es la longitud de onda de trabajo y m es un número entero que recibe el nombre de orden de radiación. Habitualmente $n_u = 1$ (aire) y $m = -1$. Como puede verse en la ecuación, existe una relación directa entre $\sin(\theta)$ y λ . Por tanto, para diferentes longitudes de onda se obtienen diferentes ángulos de radiación. Esto significa que, para una fibra colocada en un ángulo y una posición fijos, sólo a la longitud de onda nominal se podrá alcanzar la máxima eficiencia de acoplo. Esta proporcionalidad es la principal causante del ancho de banda reducido de los *grating couplers* convencionales [3, 7].

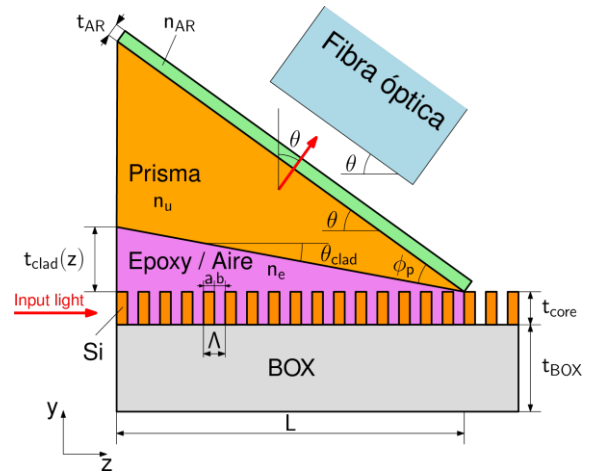


Fig. 1. Representación esquemática 2D de un *grating coupler* de orden cero. En la figura se muestra también el núcleo de la fibra óptica. Las dimensiones no están a escala.

Los *grating couplers* de orden cero suprimen la dependencia explícita con λ haciendo que la guía periódica tenga un periodo suficientemente pequeño como para trabajar en régimen SWG [8]. Esta circunstancia se verifica cuando

$$\Lambda < \frac{\lambda}{2n_B}. \quad (2)$$

En ese caso no existe ningún orden de radiación. Las figuras 2(a) y 2(b) reflejan esta situación. En ellas se representan los índices efectivos de cada uno de los órdenes de radiación de la ecuación (1). Solo se produce radiación para aquellos órdenes contenidos dentro de la semicircunferencia de radio n_u . La separación entre índices efectivos de distinto orden es λ/Λ . En la Fig. 2(a) se muestra el caso de un *grating coupler* convencional radiando en el orden $m = -1$. Cuando el periodo se reduce hasta operar en régimen SWG, satisfaciendo la ecuación (2), ningún orden cae dentro de la circunferencia, impidiendo la radiación para todo $|m| \geq 0$, como se ve en la Fig. 2(b). Para conseguir que se radie con el orden cero, se introduce un material superior con un índice de refracción que satisfaga

$$n_u > n_B. \quad (3)$$

De esta forma, como puede observarse en la Fig. 2(c), el orden cero ($m = 0$) radia con un ángulo dado por

$$\theta = \arcsen\left(\frac{n_B}{n_u}\right). \quad (4)$$

La relación de proporcionalidad explícita entre $\sin(\theta)$ y λ desaparece en un *grating coupler* de orden cero. Por este motivo, se produce un incremento en el ancho de banda, que es proporcional a [3, 4]

$$\left|\frac{d\lambda}{d\theta}\right| = \left|\frac{1}{\tan(\theta)}\right| \cdot \left|\frac{1}{n_B} \cdot \frac{dn_B}{d\lambda} - \frac{1}{n_u} \cdot \frac{dn_u}{d\lambda}\right|^{-1}. \quad (5)$$

Para alcanzar los mayores anchos de banda es necesario, por tanto, que se cumplan dos condiciones. Por un lado, el ángulo de radiación θ , relacionado con n_B a través de la Ec. (4), debe ser lo menor posible. Por otro, la dispersión con la longitud de onda $dn_B/d\lambda$ debe ser baja, lo que se cumple cuando $\Lambda \ll \lambda$ y se trabaja lejos del régimen de Bragg [8].

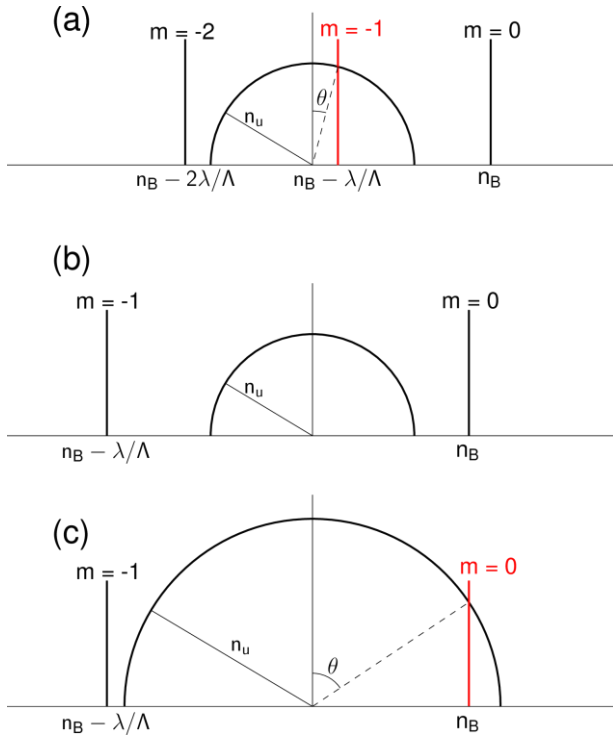


Fig. 2. Representación de la ecuación del grating coupler (1) para (a) un grating coupler convencional radiando en el orden $m = -1$, (b) una guía periódica en régimen SWG y (c) un grating coupler de orden cero.

Para maximizar la eficiencia de acoplo se emplea un apodizado lineal en el *cladding*. De acuerdo con [9], esta variación en el grosor del *cladding* puede lograr eficiencias de acoplo de hasta 95%. La variación en la altura del *cladding* apenas tiene efecto en el índice efectivo del modo Bloch-Floquet que se propaga por la guía, por lo que el aumento de la eficiencia de acoplo producido por este apodizado lineal no penaliza el ancho de banda de los grating couplers de orden cero [4].

III. DISEÑO DE GRATING COUPLERS DE ORDEN CERO PARA LA BANDA DEL INFRARROJO MEDIO

El diseño del grating coupler de orden cero se acomete en dos fases: en la primera, se escoge la guía periódica que maximiza el ancho de banda; en la segunda, para esa guía periódica, se aplica el apodizado lineal en el *cladding* que produce la mayor eficiencia de acoplo.

Así, en primer lugar escogemos la guía periódica que cuenta con un ciclo de trabajo $DC = a/\Lambda = 0.5$ y $\Lambda = 2 \cdot MFS$, siendo MFS el *minimum feature size* impuesto por los procesos de fabricación. Esta guía es la que consigue los menores ángulos de radiación con la menor dispersión de n_B posible. Podrían conseguirse ángulos de radiación menores incrementando Λ y reduciendo DC , pero hacerlo aproximaría la guía SWG al régimen de Bragg y aumentaría la dispersión SWG, pudiendo reducirse la mejora en el ancho de banda.

Una vez que se ha seleccionado la guía del grating coupler, utilizamos nuestro simulador 2D propio optimizado para estructuras periódicas [10] para variar la altura inicial del *cladding* $t_{clad,0}$ y la longitud del dispositivo L . Este par de valores ($t_{clad,0}$, L) determina el apodizado lineal que maximiza la eficiencia de acoplo. Finalmente, el diseño se comprueba con una simulación FDTD 2D [11]. Nuestra experiencia en el

diseño de grating couplers usando esta estrategia garantiza que la aproximación obtenida al simular el modelo 2D del dispositivo da resultados muy similares a los del problema tridimensional real debido a la gran anchura de las guías en la dirección x .

Se han diseñado grating couplers de orden cero para la plataforma SOI. Como ésta presenta pérdidas no despreciables a partir de $\lambda = 4 \mu\text{m}$ causadas por el dióxido de silicio, para abarcar longitudes de onda superiores es necesario buscar plataformas alternativas. Por este motivo, además se han diseñado grating couplers para la plataforma GON, transparente hasta $\lambda = \sim 6.6 \mu\text{m}$. En ambas tecnologías se han demostrado experimentalmente guías fotónicas con alturas del núcleo $t_{core} = 0.5 \mu\text{m}$ (SOI) [Fig. 3(a)] y $1 \mu\text{m}$ (GON) [Fig. 3(b)] en la banda del infrarrojo medio [12, 13]. Para poder comparar ambos diseños, se asume un *minimum feature size* de 100 nm y de 200 nm, siendo este último más realista para la plataforma GON. Estas especificaciones implican periodos de 200 nm y 400 nm, respectivamente, para un ciclo de trabajo del 50%.

Para estudiar la mejora en el ancho de banda que puede alcanzarse en cada plataforma, la Fig. 3 muestra las curvas de dispersión para los dos periodos utilizados en SOI (azul) y GON (rojo). Para ambas plataformas se observa que valores mayores de Λ conllevan dispersiones más altas, lo que se justifica por la proximidad al régimen de Bragg. Para la plataforma SOI, la dispersión es baja en todo el rango considerado y, para longitudes de onda en torno a $3.8 \mu\text{m}$, prácticamente igual y constante para los dos periodos, por lo que el ancho de banda del grating coupler de orden cero diseñado apenas disminuirá al pasar de $\Lambda = 200 \text{ nm}$ a $\Lambda = 400 \text{ nm}$. Por el contrario, en el caso de la plataforma GON, si bien para $\Lambda = 200 \text{ nm}$ la dispersión es menor que en SOI, para $\Lambda = 400 \text{ nm}$ la entrada en el régimen de Bragg produce una mayor dispersión que, además, se acrecienta para longitudes de onda pequeñas. Como consecuencia de ello, es de esperar que la mejora en el ancho de banda se reduzca al pasar de $\Lambda = 200 \text{ nm}$ a $\Lambda = 400 \text{ nm}$.

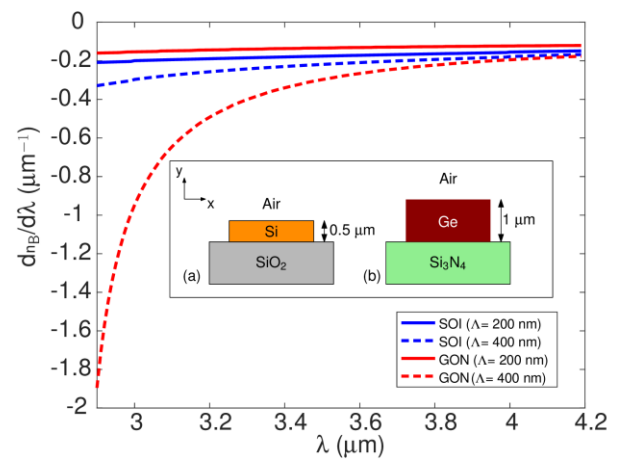


Fig. 3. Dispersión con la longitud de onda del índice efectivo del modo Bloch-Floquet, $dn_B/d\lambda$, para guías periódicas de periodo $\Lambda = 200 \text{ nm}$ y 400 nm y ciclo de trabajo $DC = 50\%$ en las plataformas (a) SOI y (b) GON.

En nuestras simulaciones empleamos una fibra óptica monomodo para el infrarrojo medio con un diámetro modal de $17.76 \mu\text{m}$ [14]. La reflexión de Fresnel en la interfaz aire-fibra

es $R \approx 3.8\%$. Utilizamos un prisma de silicio ($n_u = 3.424$) para la plataforma SOI y un prisma de germanio ($n_u = 4.028$) para GON. En ambos casos usamos capas antirreflectantes que se comportan como adaptadores de $\lambda/4$ con $n_{AR} = n_u^{1/2}$ y $t_{AR} = \lambda/(4 \cdot n_{AR})$. Por simplicidad se escogió un *cladding* de aire ($n_e = 1$).

Para la plataforma SOI la máxima eficiencia de acoplo $CE = -0.38$ dB ($\sim 92\%$) se obtuvo para $(t_{\text{clad},0}, L) = (1 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m})$ para $\Lambda = 200$ nm con $\theta = 34.7^\circ$, y $(0.85 \mu\text{m}, 27 \mu\text{m})$ para $\Lambda = 400$ nm con $\theta = 35.3^\circ$. Los anchos de banda a 1 dB resultantes fueron $BW_{1\text{dB}} = 562$ nm y 503 nm, respectivamente. Como adelantaba la Fig. 3, el ancho de banda para $\Lambda = 400$ nm es solo ligeramente menor que el obtenido para $\Lambda = 200$ nm. En la Fig. 5 se representa la propagación del modo TE a través del acoplador calculada mediante simulación FDTD 2D.

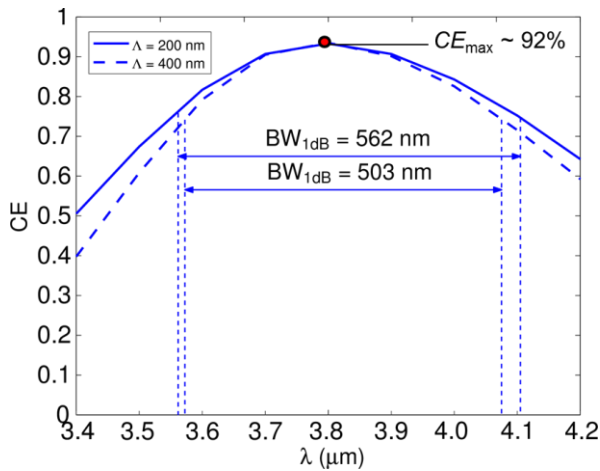


Fig. 4. Eficiencia de acoplo (CE) en función de la longitud de onda del *grating coupler* de orden cero diseñado para la plataforma SOI para $\Lambda = 200$ nm y 400 nm.

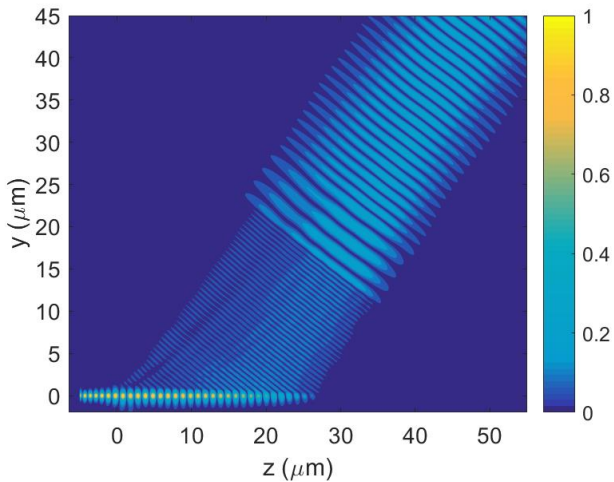


Fig. 5. Propagación del modo TE (campo eléctrico) a través del *grating coupler* de orden cero diseñado para la plataforma SOI con $\Lambda = 200$ nm.

Para la plataforma GON y $\Lambda = 200$ nm, el par de valores $(t_{\text{clad},0}, L) = (0.6 \mu\text{m}, 33 \mu\text{m})$ condujo a una eficiencia de acoplo de -0.44 dB ($\sim 90\%$) con un ancho de banda $BW_{1\text{dB}} = 681$ nm y $\theta = 42.6^\circ$. Por otro lado, $\Lambda = 400$ nm y $(t_{\text{clad},0}, L) = (1 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m})$ dieron lugar a una eficiencia de acoplo de -0.53 dB ($\sim 89\%$) con un ancho de banda $BW_{1\text{dB}} = 359$ nm y $\theta = 44.4^\circ$. Aunque los ángulos de radiación son muy similares en los dos

diseños, la mayor dispersión con λ de n_B cuando $\Lambda = 400$ nm (Fig. 3) reduce la mejora en el ancho de banda del *grating coupler* de orden cero diseñado.

IV. CONCLUSIONES

A diferencia de los *grating couplers* convencionales, los *grating couplers* de orden cero permiten obtener simultáneamente una alta eficiencia de radiación y un gran ancho de banda. Para ello, estos acopladores utilizan una guía periódica en régimen sub-longitud de onda y un prisma de alto índice de refracción. En el infrarrojo medio, los *grating couplers* de orden cero diseñados para $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ pueden alcanzar mejoras en el ancho de banda de hasta ~ 4.5 veces las obtenidas para $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. En los diseños propuestos para el infrarrojo medio para las plataformas de silicio sobre aislante (SOI) y germanio sobre nitruro de silicio (GON) se alcanzan eficiencias de acoplo de hasta -0.4 dB y anchos de banda de hasta ~ 680 nm. Actualmente varios *grating couplers* de orden cero están en fase de fabricación. Los resultados obtenidos son muy prometedores para el desarrollo de dispositivos de banda ancha y alta eficiencia en el infrarrojo medio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) en el marco del proyecto TEC2016-80718-R, por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (MECD) a través de una ayuda con referencia FPU14/06121 y por la Universidad de Málaga.

REFERENCIAS

- [1] P. Cheben *et al.*, "Broadband polarization independent nanophotonic coupler for silicon waveguides with ultra-high efficiency," *Opt. Express*, vol. 23, no. 17, pp. 22553–22563, 2015.
- [2] D. Taillaert, P. Bienstman, and R. Baets, "Compact efficient broadband grating coupler for silicon-on-insulator waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 23, pp. 2749–2751, 2004.
- [3] Y. Wang *et al.*, "Design of broadband subwavelength grating couplers with low back reflection," *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 20, pp. 4647–4650, 2015.
- [4] A. Sánchez-Postigo *et al.*, "Broadband fiber-chip zero-order surface grating coupler with 0.4 dB efficiency," *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 13, pp. 3013–3016, 2016.
- [5] R. Soref, "Mid-infrared photonics in silicon and germanium," *Nat. Publ. Gr.*, vol. 4, no. 8, pp. 495–497, 2010.
- [6] T. Tamir and S. T. Peng, "Analysis and design of grating couplers," *Appl. Phys.*, vol. 14, no. 3, pp. 235–254, 1977.
- [7] C. R. Doerr, L. Chen, Y.-K. Chen, and L. L. Buhl, "Wide Bandwidth Silicon Nitride Grating Coupler," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, no. 19, pp. 1461–1463, 2010.
- [8] R. Halir *et al.*, "Waveguide sub-wavelength structures: A review of principles and applications," *Laser and Photonics Reviews*, vol. 9, no. 1, pp. 25–49, 2015.
- [9] R. Ulrich, "Optimum excitation of optical surface waves," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 61, no. II, pp. 1467–1477, 1971.
- [10] L. Zavargo-Peche, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, and Í. Molina-Fernández, "Fourier Based Combined Techniques To Design Novel Sub-Wavelength Optical Integrated Devices," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 123, no. January, pp. 447–465, 2012.
- [11] "Rsoft." [Online]. Available: <https://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-passive-device-fullwave.html>.
- [12] J. Soler Penadés *et al.*, "Suspended silicon mid-infrared waveguide devices with subwavelength grating metamaterial cladding," vol. 24, no. 20, pp. 5661–5664, 2016.
- [13] W. Li *et al.*, "Germanium-on-silicon nitride waveguides for mid-infrared integrated photonics," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 24, p. 241101, 2016.
- [14] "Thorlabs." [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7999