

Generación de frecuencias ópticas mediante conversión no lineal activa en láseres de Cr³⁺:LiCAF - PPSLT

Optical frequency generation based on active nonlinear conversion processes in Cr³⁺:LiCAF – PPSLT lasers

Adrián J. Torregrosa, Haroldo Maestre, Juan Capmany^(*)

Grupo de Sistemas Fotónicos. Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. Universidad Miguel Hernández. Av. Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante), Spain

^(*) Email: jcapmany@umh.es

Recibido / Received: 16/09/2011. Revisado / Revised: 14/12/2011. Aceptado / Accepted: 16/12/2011.

RESUMEN:

En este trabajo se presenta un sistema de conversión óptica activa en la región espectral comprendida entre 1500-1700 nm, basado en procesos intracavidad de generación de diferencia de frecuencias (DFG) en estructuras no lineales ferroeléctricas que emplean la técnica de cuasi-ajuste de fase (QPM). Los procesos tienen lugar en interior de una cavidad láser de Cr³⁺:LiCaAlF₆ (Cr:LiCAF) que se encuentra operando en régimen de *self-injection locking*. La oscilación láser presenta un rango de sintonía de 8 nm que permite la reconfiguración de los procesos de interés. Como medio no lineal se emplea un cristal periódicamente polarizado de tantalato de litio estequiométrico (PPSLT). El sistema propuesto presenta un amplio ancho de banda de QPM que se extiende a lo largo de 35 nm. Esta característica permite explotar procesos de mezcla de señales de banda ancha para fuentes incoherentes (ASE) así como la conversión simultánea de múltiples longitudes de onda o canales. Los resultados obtenidos muestran el potencial de la técnica propuesta para la conversión de señales débiles.

Palabras clave: Óptica no Lineal, Generación por Diferencia de Frecuencias, Quasi-Phase Matching, Conversión de Longitud de Onda, Fuentes Ópticas Espectralmente Anchas.

ABSTRACT:

This paper presents and demonstrates an intracavity optical conversion system in the spectral region between 1500 and 1700 nm based on difference frequency generation (DFG) in quasi-phased matched (QPM) devices. Processes take place in a periodically poled stoichiometric lithium tantalate (PPSLT) crystal employed as a nonlinear medium. This crystal is placed inside a Cr³⁺:LiCaAlF₆ (Cr³⁺:LiCAF) laser cavity operating under a self-injection locking regime. The laser oscillation has a tuning range of 8 nm to provide the reconfiguration capability of converted wavelengths. A wide QPM bandwidth of 35 nm is exploited to perform simultaneous conversion of multiple wavelengths and broadband incoherent sources (ASE). These results also show the potential of the proposed technique for the conversion of weak signals.

Key words: Nonlinear Optics, Difference Frequency Generation, Quasi-Phase Matching, Wavelength Conversion, Broadband Optical Sources.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. S. J. B. Yoo, "Wavelength conversion technologies for WDM network applications", *IEEE J. Lightwave Technol.* **14**, 955-966 (1996).
- [2]. J. M. Schmitt, "Optical coherence tomography (OCT): A review", *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **5**, 1205-1215 (1999).

- [3]. J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, P. S. Pershan, "Interactions between light waves in a nonlinear dielectric", *Phys. Rev.* **127**, 1918-1939 (1962).
- [4]. M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt, R. L. Byer, "Quasi-phase-matched second harmonic generation: Tuning and tolerances", *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, 2631-2654 (1992).
- [5]. C. R. Fernández-Pousa, J. Capmany, "Dammann grating design of domain-engineered lithium niobate for equalized wavelength conversion grids", *IEEE Photonic Tech. L.* **17**, 1037-1039 (2005).
- [6]. R. G. Smith, "Theory of intra-cavity optical second-harmonic generation", *IEEE J. Quantum Electron.* **6**, 215 (1970).
- [7]. J. E. Geusic, H. J. Levinstein, S. Singh, R. G. Smith, L. G. Van Uitert, "Continuous 0.532 μm solid-state source using $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ", *Appl. Phys. Lett.* **12**, 306-308 (1968).
- [8]. J. Capmany, J. A. Pereda, V. Bermúdez, D. Callejo, E. Diéguez, "Laser frequency converter for continuous-wave tunable Ti:sapphire lasers", *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1751-1753 (2001).
- [9]. J. P. Meyn, M. M. Fejer, "Tunable ultraviolet radiation by second-harmonic generation in periodically poled lithium tantalate", *Opt. Lett.* **22**, 1214-1216 (1997).
- [10]. V. R. Shidlovski, J. Wei, "Superluminescent diodes for optical coherence tomography", *Proc. SPIE* **4648**, 139-147 (2002).
- [11]. Y. S. Xu, D. Chen, W. Wang, Q. Zhang, H. Zeng, C. Shen, G. R. Chen, "Broadband near-infrared emission in Er^{3+} - Tm^{3+} codoped chalcogenide glasses", *Opt. Lett.* **33**, 2293-2295 (2008).
- [12]. D. Liu, N. Q. Ngo, S. C. Tjin, "A reconfigurable multiwavelength fiber laser with switchable wavelength channels and tunable wavelength spacing", *Opt. Commun.* **281**, 4715-4718 (2008).
- [13]. H. Maestre, A. J. Torregrosa, J. A. Pereda, C. R. Fernández-Pousa, J. Capmany, "Widely tuneable dual-wavelength operation of a highly doped erbium fiber laser based on diffraction gratings", *IEEE J. Quantum Electron.* **47**, 1238-1243 (2011).
- [14]. S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk, L. K. Smith, W. F. Krupke, "LiCaAlF₆: Cr³⁺: A promising new solid-state laser material", *IEEE J. Quantum Electron.* **24**, 2243-2252 (1988).
- [15]. H. Maestre, A. J. Torregrosa, J. A. Pereda, C. R. Fernández-Pousa, J. Capmany, "Dual-wavelength Cr³⁺:LiCaAlF₆ solid-state laser with tunable THz frequency difference", *IEEE J. Quantum Electron.* **46**, 1681-1685 (2010).
- [16]. G. D. Boyd, D. A. Kleinman, "Parametric interaction of focused Gaussian light beams", *J. Appl. Phys.* **39**, 3597-3641 (1968).
- [17]. R. L. Sutherland, *Handbook of Nonlinear Optics*, CRC Press, 2^a Ed. pp. 83-91 (2003).
- [18]. <http://www.sandia.gov/pcnsc/departments/lasers/opo.html>
- [19]. U. Demirbas, D. Li, J. R. Birge, A. Sennaroglu, G. S. Petrich, L. A. Kolodziejski, F. X. Kärtner, J. G. Fujimoto, "Low-cost, singlemode diode-pumped Cr:colquiriite lasers", *Opt. Express* **17**, 14374-14388 (2009).

1. Introducción

El desarrollo de nuevas fuentes coherentes basadas en procesos de mezcla de frecuencias ópticas en medios no lineales, así como los avances realizados en las técnicas de fabricación de las estructuras han permitido en los últimos años cubrir nuevas regiones espectrales y mejorar otras que se encontraban explotadas ineficientemente en la región del infrarrojo (IR). En este contexto, la conversión de longitud de onda basada en generación por diferencia de frecuencias (DFG) irrumpe como una opción atractiva para satisfacer las necesidades actuales en campos como el de las comunicaciones ópticas y aplicaciones biomédicas [1,2]. Las

fuentes de DFG están basadas en la interacción paramétrica de dos ondas a diferentes frecuencias (bombeo y señal) en un medio no lineal, donde se genera una tercera onda a la frecuencia diferencia (*idler*). La técnica de cuasi ajuste de fase o QPM (*quasi-phase matching*) permite adaptar y explotar eficientemente las interacciones en la región espectral de interés mediante la utilización cristales ferroeléctricos periódicamente polarizados [3,4]. Estas estructuras aportan un vector recíproco que participa en la relación global de conservación del vector de onda de la interacción, y que es necesario para la generación eficiente de procesos de mezcla de frecuencias ópticas. En

diseños más sofisticados, la distribución estratégica del coeficiente no lineal (ingeniería de dominios) proporciona un conjunto de vectores recíprocos que permite la realización simultánea y eficiente de diversos procesos de conversión sobre la misma estructura (respuesta de QPM) [5]. La elección de los materiales como el tantalato o niobato de litio está motivada por sus elevados coeficientes no lineales. La introducción del medio no lineal en el interior de la cavidad de un láser de estado sólido (oscilador), que proporciona una intensa onda que actuará de bombeo y control del proceso, contribuirá a mejorar la eficiencia de los procesos de conversión [6,7]. De este modo, el dispositivo resultante actuaría como un mezclador heterodino en el dominio óptico. Se ha demostrado teórica y experimentalmente la generación de segundo armónico y procesos de suma [8,9]. A diferencia de estos procesos, la generación de diferencia de frecuencias puede ofrecer conversión potencialmente superior al 100% como consecuencia del proceso de ganancia paramétrica que los diferencia del resto de procesos no lineales.

En la actualidad, la posibilidad de realizar procesos de conversión de banda ancha o de componentes espectrales discretas de forma simultánea resulta de especial interés tanto en aplicaciones de redes de comunicaciones basadas en la tecnología WDM (*wavelength division multiplexing*) [1] como en técnicas de tomografía de coherencia óptica (*Optical Coherence Tomography*, OCT), cuya resolución está estrechamente relacionada con el ancho espectral de las fuentes empleadas [2]. Para tales cometidos, resulta interesante desarrollar nuevas opciones tecnológicas que complementen a las existentes, basadas fundamentalmente en fuentes ópticas de banda ancha compuestas por dispositivos LED superluminiscentes o por fibras dopadas con tierras raras [10,11], así como de múltiple emisión de longitud de onda reconfigurable [12,13]. En este trabajo se presenta y demuestra la conversión activa de múltiples de longitudes de onda (canales) y de fuentes ópticas de banda ancha en régimen de onda continua (CW), mediante procesos intracavidad de generación de diferencia de frecuencias de paso único en la región espectral comprendida entre 1500-1700

nm. Los procesos estarán compuestos por una onda intensa próxima a 794 nm que se mezcla con una señal o conjunto de señales externas (generalmente débiles) en un cristal periódicamente polarizado de tantalato de litio estequiométrico (PPSLT). El amplio ancho de banda de QPM del sistema propuesto posibilitará la extensión de las componentes convertidas a lo largo de regiones espectrales de hasta 35 nm. Por otro lado, la sintonización de la oscilación láser en un rango espectral de 8 nm permitirá reconfigurar los procesos de conversión previo ajuste de la temperatura del cristal PPSLT (cumplimiento de la condición de QPM). En este trabajo también se comprueba que la eficiencia de los procesos obtenidos es independiente del nivel de señal de entrada, permitiendo extender los procesos de conversión a señales con niveles bajos de potencia.

2. Configuración experimental

Los procesos de conversión de longitud de onda en la región comprendida entre 1500 y 1700 nm mediante DFG requieren la utilización de ondas de bombeo próximas a los 800 nm. Para ello, el uso de cristales láser pertenecientes a la familia de las colquiriitas se postulan como una opción atractiva, ya que presentan una amplia banda de emisión en la región de 800 nm. Entre ellos, los cristales de $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCaAlF}_6$ ($\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$) se caracterizan por poseer una ganancia de emisión máxima en torno a ~790 nm extendiéndose espectralmente desde 720 hasta 840 nm. Esta característica permite la posibilidad de sintonizar su longitud de oscilación a lo largo de un amplio rango espectral. Por otro lado, poseen la ventaja de poder bombearse directamente mediante diodos rojos comercialmente disponibles de bajo coste en las proximidades de 665 nm [14].

En la Fig. 1 se muestra la configuración experimental adoptada. Como medio de ganancia se emplea un cristal de $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$ de 3 mm de diámetro y 3 mm de longitud dopado con una concentración del 3% at. de cromo, cuyas caras son planas y paralelas. El espejo M1 se encuentra depositado sobre la cara de entrada presentando alta transmitancia a ~665 nm

(bombeo) y elevada reflectancia entre 775 y 800 nm. La cara opuesta posee tratamiento dieléctrico que presenta una elevada transmisión en dicha banda. El primer brazo se encuentra delimitado por el espejo M2 que junto con el espejo de salida M3 define el segundo brazo. Ambos brazos quedan dispuestos formando un ángulo de 30° como resultado de los condicionantes impuestos por presencia del horno y posicionadores micrométricos, de forma que dan lugar a cierto astigmatismo residual en el modo. Los espejos M2 y M3 son plano-cóncavos con un radio de curvatura de 100 mm. Están dispuestos en una configuración confocal para producir una cintura de haz en el punto medio del segundo brazo donde se colocará el centro del cristal no lineal. Así, tanto la onda de bombeo como la de señal quedan confinadas y superpuestas con objeto de incrementar la eficiencia de la interacción colineal en procesos de paso único.

Los procesos tendrán lugar en un cristal PPSLT de periodo 22.1 μm , donde las ondas participantes presentarán polarización

extraordinaria con objeto de explotar el coeficiente más alto (d_{33}) del tensor no lineal de segundo orden mediante interacciones QPM de tipo 0. Este tipo de interacciones se caracteriza porque todas las ondas presentan polarización extraordinaria (paralela al eje cristalográfico), y de esta forma se consigue evitar también la presencia de efectos de refracción doble o *walk-off*. La elección de la reflectancia del espejo M2 queda determinada por el doble paso de la onda de bombeo por el mismo. Por esta razón se emplea un espejo con $R_2=99.98\%$ en la banda de ~ 800 nm, de forma que se garanticen elevados niveles de potencia intracavidad.

Los haces obtenidos a su salida se utilizan como referencia en el proceso de alineado del cristal PPSLT y para monitorizar la realimentación de la cavidad cuando oscila bajo un régimen de *self-injection locking*. Sobre el espejo M3, que presenta una reflectancia $R_3=98.25\%$, se acopla una cavidad externa basada en una red de difracción (1200 líneas/mm) siguiendo un montaje de Littrow [15], desde donde se lleva a cabo la

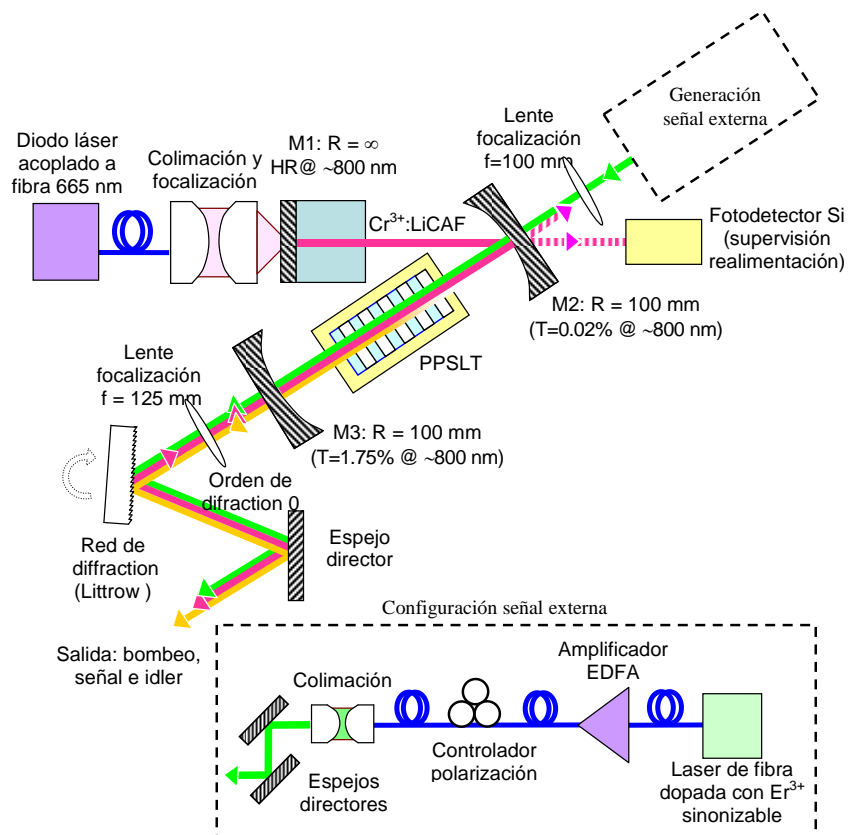


Fig. 1. Esquema de la configuración experimental adoptada (incluye esquema de la fuente externa sintonizable).

realimentación selectiva espectralmente de la cavidad principal que induce al láser a operar en el régimen de *self-injection locking*. De este modo se consigue concentrar la densidad espectral de potencia en una reducida anchura espectral y, mediante la rotación de la red de difracción, la sintonización de la onda de bombeo en un margen espectral que permita su adaptación a los diferentes procesos de interés. Por último, como salida del sistema se utiliza la componente correspondiente al orden cero, cuya dirección se ve modificada cuando se rota la red para llevar a cabo la sintonización de un proceso. Ésta se corrige mediante la utilización de un par de espejos directores.

3. Resultados experimentales

Gracias a la versatilidad del esquema propuesto, la variación de la temperatura del medio no lineal de forma coordinada con la sintonización de la onda de bombeo permiten adaptar las condiciones de QPM a los diferentes procesos de interés sobre una misma estructura PPSLT de periodo único, y de esta manera ejecutar la reconfiguración de los procesos que en ella tienen lugar. La Fig. 2 muestra las respuestas de sintonía de QPM en función de la temperatura del cristal PPSLT en la banda de operación para ondas de bombeo situadas en 792, 793 y 794 nm. En el margen derecho de la misma se particularizan las curvas de eficiencia de conversión a partir de cortes en las curvas de sintonía correspondientes a las temperaturas de operación de 28, 41 y 53°C.

Para obtener eficiencias de conversión elevadas resulta necesario disponer de niveles de potencia intracavidad altos. La disposición de la cavidad en las proximidades del límite de estabilidad (312.2 mm) permite reducir el umbral de oscilación e incrementar la densidad de potencia intracavidad. Por otro lado, permite la reducción de la cintura del haz en el centro del cristal PPSLT como consecuencia de su ubicación en el centro de una configuración confocal. Sin embargo, dadas las condiciones experimentales se produce reducción de la potencia a medida que nos aproximamos al límite de estabilidad como consecuencia de las pérdidas por difracción que producen las caras del cristal

PPSLT. Ello conduce a adoptar una solución de compromiso entre el tamaño del haz y el nivel de potencia intracavidad. De este modo, para una longitud total de 309.6 mm se obtiene una cintura de haz $w_p=55 \mu\text{m}$ (cinturas de las ondas de señal e idler $w_s=w_i \sim 100 \mu\text{m}$), dando lugar a potencias de 4 y 8 mW en condiciones de oscilación libre y bajo *self-injection-locking*, respectivamente. Tras confirmar el cumplimiento de la condición de campo lejano según los resultados de Boyd-Kleinman [16], las condiciones de confinamiento espacial proporcionan una eficiencia de focalización del 85%, la cual no supone una penalización significativa en la eficiencia de conversión. Bajo estas condiciones, a continuación se procede a caracterizar el funcionamiento del sistema propuesto cuando se realizan procesos de conversión múltiple de canales y de forma simultánea, así como para conversión de señales espectralmente amplias.

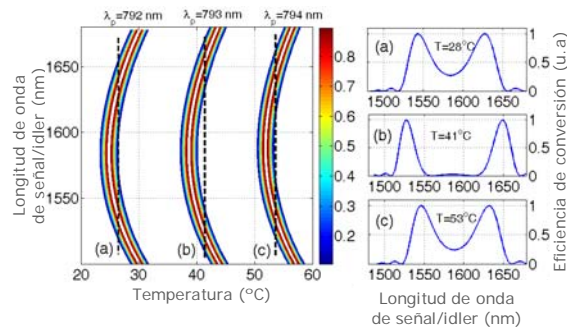


Fig. 2. Curvas QPM de sintonía. Eficiencia de conversión a las temperaturas (a) 28°C, (b) 41°C y (c) 53°C.

3.a. Conversión múltiple de canales

En la Fig. 3 se muestran diferentes procesos de conversión de múltiples longitudes de onda para distintas combinaciones que se generan mediante un láser de fibra dopada con erbio con emisión múltiple de longitud de onda sintonizable basada en redes de difracción [13]. El resultado se obtiene a partir del proceso de mezcla no lineal de tres señales en onda continua ubicadas en 1547.2, 1550.6, y 1554.5 nm, y cuya anchura espectral FWHM se encuentra próxima a 0.4 nm (dependiendo de la configuración adoptada, este valor puede reducirse hasta 0.04 nm en la banda de los 1550 nm, limitada por la resolución del analizador de espectro empleado según los resultados obtenidos en [13]).

Con respecto a la onda de bombeo, se encuentra sintonizada en 794.0 nm (representada deliberadamente como referencia a través del segundo orden que introduce el analizador de espectro óptico) cuando el cristal PPSLT se encuentra a la correspondiente temperatura de QPM (53.8°C). En tales condiciones, la onda de bombeo presenta un rango de sintonía comprendido entre 790 y 798 nm cuando se encuentra oscilado en régimen de *self-injection locking*, caracterizándose por una anchura espectral FWHM de ~1 nm, reducible hasta valores de 0.025 nm en la banda de 800 nm (limitado por la resolución del analizador de espectro), dependiendo de la configuración empleada (Littrow o Littman, respectivamente), tal y como se ha demostrado en trabajos previos [15]. Mediante una adecuada relación entre la longitud de la cavidad principal y la cavidad externa, y la elección de una red de difracción con una resolución óptima es posible obtener un funcionamiento monomodo axial de la onda de bombeo.

La banda que conforman los canales inicialmente utilizados comprenden un rango espectral de 7.8 nm. Según las respuestas de QPM mostradas en Fig. 3, la banda empleada experimenta una penalización no superior al 4% con respecto al máximo de la eficiencia de conversión. Este efecto no supone limitación alguna en el funcionamiento del sistema, que proporciona eficiencias de conversión muy superiores a las obtenidas con procesos externos. Su amplia respuesta de QPM permite además la conversión de señales de banda ancha (espectros ASE) o bandas compuestas por múltiples canales, así como el desplazamiento espectral de las mismas mediante el control de la condición de QPM. Por otro lado, si las señales incidentes contienen información (en su amplitud, frecuencia o fase) y la onda de bombeo opera en onda continua, las ondas generadas conservarán la información original (salvo conjugación de fase) como resultado de la combinación lineal de las señales interactuantes en un proceso paramétrico. Debido a la naturaleza del proceso produce la inversión del espectro de la señal convertida con respecto a la frecuencia de bombeo. Tal efecto se emplea en técnicas de compensación de la dispersión en sistemas de comunicaciones ópticas. La

combinación de todas estas características resulta de especial interés en aplicaciones de redes de comunicaciones basadas en WDM dada la amplia respuesta de QPM.

La Fig. 4 muestra los niveles de potencia para un proceso de conversión de longitud de onda compuesto por una onda de bombeo situada a 794 nm, una onda de señal introducida externamente a 1543 nm y la correspondiente onda generada a 1633 nm, mientras el cristal PPSLT se mantiene a la correspondiente temperatura de QPM ($T=54^{\circ}\text{C}$). Manteniendo constante la potencia de la onda de bombeo, se introducen diferentes niveles de potencia óptica asociada a la onda de señal que oscilan entre 8 y 20 dBm. Se comprueba que el nivel de potencia generada reproduce el de entrada manteniendo un escalado lineal con la potencia de entrada (se mantiene una diferencia de 35 dB). De este modo se desprende que la eficiencia de conversión es independiente de la intensidad de la onda de señal incidente siempre que el sistema se encuentre operando en condiciones de no agotamiento de la onda de bombeo [17]. Este resultado confirma la posibilidad de obtener niveles de potencia de la onda convertida más altos a partir de la disponibilidad de mayores niveles de la onda de bombeo y de señal debido a su dependencia directa. Por otro lado, el aumento de la eficiencia de conversión a partir de la mejora de los condicionantes señalados abre la posibilidad la utilización del sistema en la conversión de señales débiles, como por ejemplo señales de banda ancha no coherentes (espectros ASE).

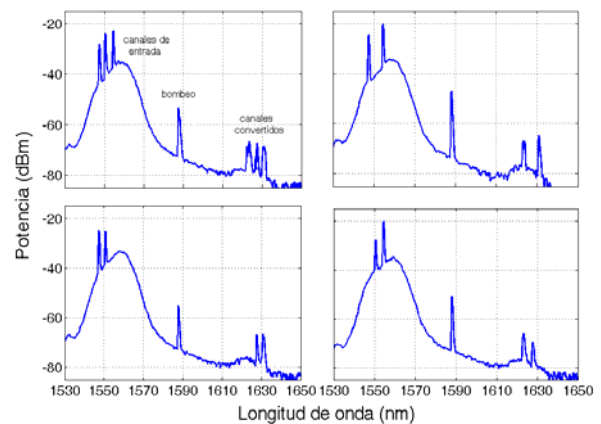


Fig. 3. Espectros de potencia de las ondas de señal, bombeo e idler participantes en el proceso de conversión de banda ancha.

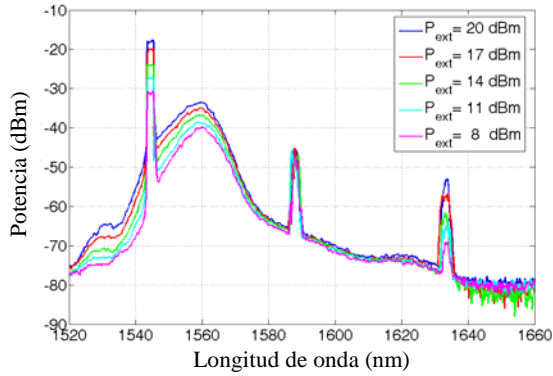


Fig. 4. Independencia de la eficiencia de conversión con la intensidad de la señal de entrada. (P_{ext} potencia señal de entrada).

3.b. Conversión de fuentes de banda ancha

En la Fig. 5 se muestran los espectros obtenidos de las ondas participantes en el proceso de conversión. Para ello, la fuente externa utilizada en el montaje experimental mostrado en la Fig. 2 se sustituye por una fuente espectralmente amplia compuesta por un tramo de fibra dopada con Er3+ de 100 cm de longitud y bombeada mediante un láser de diodo semiconductor de 100 mW de potencia. Su salida es amplificada y parcialmente polarizada con objeto de incrementar la eficiencia de los procesos de conversión. El espectro de la señal ASE amplificada resultante se extiende desde 1530 hasta 1560 nm. La onda de bombeo se encuentra ubicada a 794 nm (representada deliberadamente como referencia a través del segundo orden del analizador de espectro óptico) para satisfacer las condiciones de QPM a la temperatura de $T=53^{\circ}\text{C}$, aunque admite en torno a ella un rango de sintonía de 8 nm. Se puede comprobar que los resultados experimentales se ajustan a los obtenidos teóricamente en la Fig. 2, cuando el cristal es sometido a una temperatura de QPM de 53°C en un proceso de mezcla entre una onda de señal de banda ancha comprendida entre 1535 y 1565 nm y una de bombeo próxima a 794 nm.

Por último, en la Fig. 6 se representa teóricamente la evolución de la intensidad óptica de las ondas de señal e *idler* a lo largo del cristal PPSLT (obtenidas a partir del software proporcionado por SANDIA SNLO software [18]). El esquema propuesto permite obtener eficiencias de conversión superiores al 100% en

condiciones realizables y realistas. En particular, tras una focalización óptima, la eficiencia de conversión queda determinada por la longitud del cristal (depende del régimen de operación y de las condiciones de confinamiento espacial) y por la densidad de potencia espectral intracavidad. Estas condiciones corresponderían a una cintura del haz de bombeo de $w_p \sim 20 \mu\text{m}$ y una onda de bombeo con potencia intracavidad de hasta $P_{Pintra} \sim 30 \text{ W}$.

En condiciones de régimen de no agotamiento del bombeo, se obtiene un incremento de 6 dB en la onda de señal con respecto al nivel que presenta a su entrada como consecuencia de un proceso de ganancia paramétrica. En cambio, el nivel de intensidad de la onda convertida alcanzaría el mismo que el de la señal tras recorrer $\sim 15 \text{ mm}$, mientras que experimentarían un incremento de $\sim 4 \text{ dB}$ con respecto al nivel de la señal a la entrada del cristal PPSLT. En ambos casos, la discrepancia entre los resultados obtenidos experimentalmente y los teóricos se explica a través de una serie de condicionantes presentes en el montaje experimental. El principal obedece a la limitación de la potencia intracavidad de la onda de bombeo que se encuentra operando tan solo 1.5 veces por encima de su umbral de oscilación. Ello se debe por un lado a la limitación de la potencia de bombeo y a una pobre adaptación entre el modo del bombeo a 665 nm y el modo de la cavidad. La mejora de estos aspectos podría proporcionar un aumento de la pendiente de eficiencia hasta valores del 54% como se ha demostrado recientemente [19].

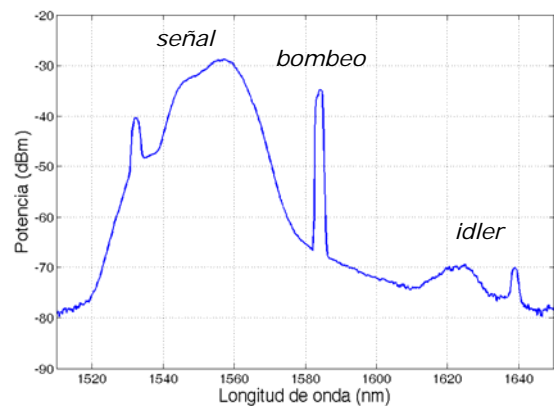


Fig. 5. Espectros de potencia de las ondas de señal, bombeo e idler participantes en el proceso de conversión de banda ancha.

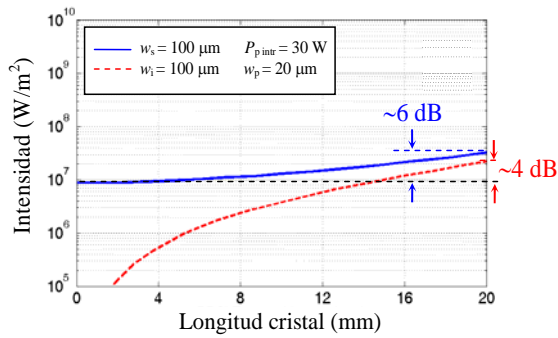


Fig. 6. Evolución de la intensidad de las ondas de señal e idler a lo largo de la longitud del cristal PPSLT cuando la onda de bombeo presenta $P_{p\text{intra}}=30$ W y $w_p=20$ μm .

4. Conclusión

En este trabajo se ha propuesto y demostrado experimentalmente un sistema convertidor de longitud de onda activo y reconfigurable mediante control de temperatura, que proporciona simultáneamente múltiples procesos de conversión de longitud de onda y la conversión de fuentes espectralmente amplias de hasta 35 nm mediante procesos intracavidad de paso único de generación de diferencia de frecuencias en la región espectral comprendida entre 1500-1700 nm. El sistema está compuesto por un láser de estado sólido sintonizable de $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$ en cuya cavidad se ubica el medio no lineal y donde también se genera la propia onda que actúa como bombeo en el proceso de mezcla, presentando intensidades dos órdenes de magnitud superiores a las que poseen típicamente en procesos de conversión pasiva. El

acoplo a su salida de una cavidad externa basada en una red de difracción induce al láser a operar en un régimen de *self-injection locking* que proporciona un margen de sintonía de 8 nm en torno a la longitud de onda de 794 nm, y que permite la sintonización de la ubicación espectral de la onda convertida. La optimización de las condiciones experimentales disponibles, donde el láser se encuentra operando 1.5 veces por encima de su umbral de oscilación con niveles de potencia intracavidad moderados, proporcionaría elevadas eficiencias de conversión que podrían ser superiores al 100% si el sistema se diseña para que presente ganancia paramétrica neta. Asimismo, se comprueba que la eficiencia de conversión es independiente del nivel de señal de entrada, posibilitando la conversión de señales con reducidos niveles de potencia. A partir de tales demostraciones y de los cálculos obtenidos teóricamente, el esquema propuesto presenta el potencial para desarrollar dispositivos atractivos y versátiles tanto para aplicaciones en redes de comunicaciones ópticas basadas en WDM como para aplicaciones biomédicas como en el caso de la tomografía de coherencia óptica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente a través de los proyectos TEC-2008-02606 del Ministerio de Ciencia e Innovación y ACOMP2009-346 de la Generalitat Valenciana.