

Improvement in active wavelength conversion to the visible of images illuminated in the SWIR by an ASE source

Mejora en la conversión activa de longitud de onda al visible de imágenes iluminadas en el SWIR con una fuente ASE

A. J. Torregrosa¹, H. Maestre¹, M. L. Rico², J. Capmany^{1*}

1. *Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad Miguel Hernández de Elche. Av. Universidad S/N, 03202 Elche (Alicante).*

2. *Departamento de Tecnología Informática y Computación. Universidad de Alicante. Ctra. San Vicente del Raspeig. 03690 San Vicente del Raspeig (Alicante).*

(*) E-mail: jcapmany@umh.es

Received: 27/09/2015

Accepted: 18/11/2015

DOI: 10.7149/OPA.48.4.317

ABSTRACT:

We present an experimental system for active image wavelength conversion to the visible spectral region from the illumination of targets with sources in the short wavelength infrared (SWIR) spectral region centered at 1550 nm. Furthermore, a significant improvement of converted images in terms of field of view and resolution is demonstrated when an illumination source based on amplified spontaneous emission (ASE) is used instead of a laser in the proposed conversion system. The system is based on the nonlinear optical frequency mixing in a periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal placed inside a diode-pumped Nd³⁺:GdVO₄ laser cavity. The up-converted image falls at 631 nm in the visible region as a result of the sum frequency mixing between the laser wave at 1064 nm and the SWIR wave resulting from the illumination of targets with ASE and laser sources in the vicinity of 1550 nm. This system also presents the advantage of providing images in the spectral region where CMOS and CCD standard silicon cameras are available with useful speed, efficiency, resolution and cost features.

Key words: Image wavelength conversion, Up-Conversion, Nonlinear Conversion, Quasi-Phase Matching.

RESUMEN:

En este trabajo se presenta un sistema experimental para la conversión activa de longitud de onda de imágenes al visible cuando se emplean fuentes de iluminación en la región espectral infrarroja de onda corta (SWIR). Además, los resultados obtenidos mediante dicho sistema permiten demostrar que el uso de una fuente de iluminación basada en emisión espontánea amplificada (ASE) en lugar de una fuente láser proporciona mejoras significativas en términos de campo visual y resolución en la imagen convertida. El sistema está basado en la mezcla no lineal de frecuencias ópticas que se produce en un cristal de niobato de litio periódicamente polarizado (PPLN) ubicado en el interior de una cavidad láser de estado sólido de Nd³⁺:GdVO₄ bombeada por láser de diodo. A través de un proceso de suma de frecuencias en el medio no lineal entre la onda generada en la cavidad a 1064 nm y la onda SWIR resultante de iluminar el objeto con fuentes ASE y láser en la región espectral de 1550 nm se obtiene la imagen convertida en el visible en las proximidades de 631 nm. El sistema presenta la ventaja de proporcionar directamente imágenes en la región espectral donde operan las cámaras CMOS o CCD de silicio con interesantes características de velocidad, eficiencia, resolución y coste reducido.

Palabras clave: Conversión de longitud de onda de imágenes, Conversión no Lineal, Quasi-Phase Matching.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] J. E. Midwinter, "Parametric infrared image converters," IEEE J. Quantum Electron. **4**, 716-720 (1968).
<http://dx.doi.org/10.1109/QOE.1968.1074965>
 - [2] C. Pedersen, E. Karamehmedović, J. S. Dam, P. Tidemand-Lichtenberg, "Enhanced 2D-image upconversion using solid state lasers," Opt.Express **17**, 20885-20890 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.17.020885>
 - [3] R. G. Smith, "Theory of Intra-cavity Optical Second-Harmonic Generation," IEEE J. Quantum Electron. **6**, 215-223 (1970).
<http://dx.doi.org/10.1109/QOE.1970.1076440>
 - [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).
<http://dx.doi.org/10.1109/3.161322>
 - [5] J. S. Dam, C. Pedersen, P. Tidemand-Lichtenberg, "High-resolution two-dimensional image upconversion of incoherent light," Opt. Lett. **35**, 3796-3798 (2010).
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.35.003796>
 - [6] D. N. Nikogosyan, *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*, Ed. Springer Science (2005).
 - [7] J. S. Dam, C. Pedersen, P. Tidemand-Lichtenberg, "Theory for upconversion of incoherent images," Opt. Express **2**, 1475-1482 (2012).
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.001475>
-

1. Introducción

La conversión no lineal de longitud de onda de imágenes se presenta en la actualidad como una técnica de especial interés en aplicaciones que requieren trasladar imágenes de una región espectral a otra para su visualización en bandas espectrales donde no existen o no están suficientemente desarrollados sensores de imagen de plano focal eficientes, rápidos y con elevada resolución. De esta forma, el desarrollo de sistemas de conversión no lineal de imágenes completas basados en procesos de mezcla no lineal de frecuencia suma (SFM) permitiría disponer de imágenes formadas en el infrarrojo medio o lejano en la región espectral en la que operan cámaras estándar CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) o CCD (*charge coupled device*) de silicio, o EMCD (*electron multiplying CCDs*) en caso de requerir sensibilidades para detectar niveles extremadamente bajos de luz. Esta posibilidad se muestra como una alternativa atractiva en aplicaciones que emplean fuentes láser pulsadas en la región SWIR del infrarrojo para visualización, detección o telemetría mediante cámaras vidicon y sensores de plano focal de InGaAs.

Aunque las primeras evidencias se remontan a hace varias décadas a través de los trabajos realizados por Midwinter, que sentaron las bases de la conversión de imagen a través de la mezcla no lineal de suma de frecuencias (*up-conversion*) mediante ajuste de fase birrefringente en procesos con láseres pulsados [1], no ha sido hasta los últimos años cuando este recurso ha experimentado importantes avances en términos de eficiencia y resolución gracias a las aportaciones realizadas por Pedersen et al. [2]. Tales aportaciones se centran en explotar las ventajas que proporciona la conversión de imágenes en la región del visible mediante la mezcla no lineal en cristales ferroeléctricos periódicamente polarizados a través de la técnica de QPM (Quasi-phase matching) [3]. Dichos cristales no lineales se ubican en el interior de la cavidad láser (conversión activa) donde tiene lugar la generación de una de las ondas participantes en el proceso de mezcla [4]. Dada la naturaleza de los procesos de conversión de imagen, se ha demostrado la importancia de las características de coherencia y de anchura espectral de la fuente de iluminación en la resolución de la imagen convertida. En particular, los trabajos realizados hasta el momento se han centrado fundamentalmente en explorar el efecto producido en la resolución de la imagen convertida cuando se emplean fuentes de iluminación en el infrarrojo basadas en láseres de anchura espectral reducida o fuentes térmicas incoherentes espectralmente anchas [2,5].

En este trabajo se presentan los resultados que proporciona el sistema de conversión activa de imágenes propuesto cuando se emplean fuentes de iluminación en la región espectral SWIR. Además, se demuestra que la utilización de una fuente de iluminación ASE centrada en la región espectral de 1550 nm proporciona un aumento en el campo de visión y en la resolución de las imágenes convertidas con respecto a las obtenidas mediante iluminación con una fuente láser en la misma región espectral. La conversión tiene lugar en un cristal periódicamente polarizado de niobato de litio (PPLN) ubicado en el

interior de una cavidad de un láser de estado sólido de $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ a partir de procesos de frecuencia suma de paso único entre la oscilación láser a 1064 nm y el haz SWIR resultante de la iluminación de los objetos. La imagen convertida se encuentra a 631 nm donde los sensores de plano focal de silicio muestran eficiencias de conversión elevadas.

2. Configuración experimental

La configuración experimental del sistema de conversión de longitud de onda de imagen implementado se muestra en la figura 1. El sistema está formado por un láser de estado sólido que emplea un cristal de $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ bombeado por un láser de diodo a 808 nm. El cristal láser presenta una sección de $3 \times 3 \text{ mm}^2$, una longitud de 4 mm y está dopado con una concentración atómica de Nd^{3+} del 3%. Sus caras de entrada y salida son plano paralelas, perpendiculares al eje cristalográfico a de forma que la oscilación láser presenta polarización paralela al eje c (mayor sección eficaz). Además, el cristal queda orientado para que la polarización de la oscilación láser coincida con la del resto de ondas participantes en interacciones QPM de tipo 0 (polarización extraordinaria paralela al eje cristalográfico del cristal no lineal), accediendo de este modo al coeficiente no lineal de mayor valor ($d_{33}=25.2 \text{ pm/V}$ a 1064 nm en cristales de LiNbO_3 [6]). Como mezclador, se emplea un cristal no lineal periódicamente polarizado de niobato de litio ($\text{MgO}:\text{PPLN}$) de $1 \times 3 \text{ mm}^2$ de sección, 5 mm de longitud, y $11.8 \mu\text{m}$ de periodo con ciclo de trabajo del 50%. La elección del periodo del cristal no lineal queda determinada por los procesos suma de interés en la banda del visible centrada en torno a 631 nm. El cristal está dopado con óxido de magnesio para evitar la aparición de efectos fotorrefractivos que degraden la calidad del haz convertido.

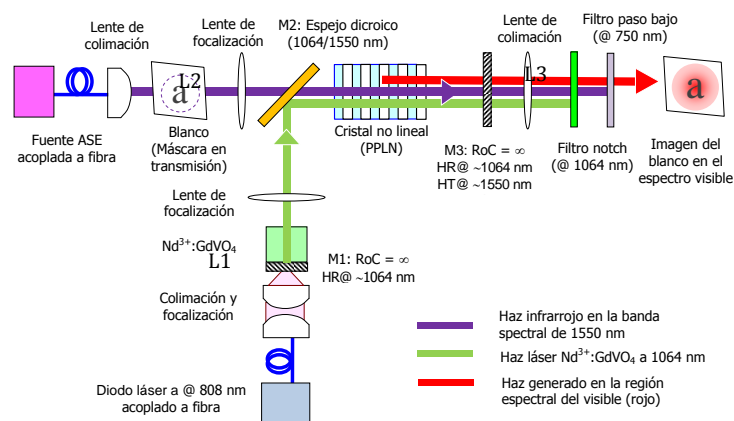


Fig. 1: Montaje experimental del sistema de conversión de imagen propuesto.

La cavidad láser presenta una configuración lineal doblada en ángulo recto que permite el acceso a los diferentes puntos de medida de interés y facilita el ajuste de los distintos elementos intracavidad. La cavidad queda definida por 3 espejos: M1 y M2 planos y M3 cuasi-plano (plano cóncavo) con el fin de minimizar la presencia de efectos aberrantes en la imagen convertida, y a través del espejo M3 tener también control del tamaño del modo y de la estabilidad del láser. El espejo M1 se encuentra depositado sobre la cara de entrada del cristal láser, presentando alta transmitancia a 808 nm (bombeo) y elevada reflectancia entre 1000 y 1100 nm. La cara opuesta presenta un tratamiento dieléctrico para ofrecer una elevada transmisión en dicha banda. El espejo M2 (*beam splitter* dicroico) se sitúa con un ángulo de 45° para permitir el acceso del haz de iluminación SWIR al interior de la cavidad y participar así en un proceso de suma de frecuencias de paso único con la oscilación láser. El espejo M2 tiene la función de combinar el haz SWIR con el haz láser, presentando su cara interior unas pérdidas en reflexión a 1064 nm inferiores a 1% y unas pérdidas en transmisión a 1550 nm del 5%. El espejo de salida M3 es plano cóncavo con un radio de curvatura de 3 m y presenta una reflectancia a 1064 nm de 99.4%.

Puesto que la resolución de la imagen convertida queda determinada por el tamaño del modo fundamental de la oscilación láser en el cristal no lineal, resulta necesario disponer control del diámetro del mismo con objeto de evaluar dicha dependencia. La introducción de una lente entre los espejos M1 y M2 permitirá ajustar el tamaño del modo en el interior del cristal no lineal a partir de la modificación de la longitud total de la cavidad mediante el desplazamiento longitudinal del espejo M3. La distancia focal de la

lente empleada L1 es de $f_1=125$ mm y posee tratamiento dieléctrico a 1064 nm para minimizar pérdidas intracavidad. Por último, entre el espejo de salida M3 y el sensor CMOS de silicio se sitúa un filtro elimina banda a 1064 nm y un filtro paso bajo a 750 nm para eliminar la presencia de la oscilación láser y de las componentes del bombeo a 808 nm no absorbidas por el cristal láser, respectivamente.

3.- Resultados

El sistema convertidor de longitud de onda de imágenes pretende trasladar imágenes desde la región SWIR a la región del visible mediante procesos de conversión activa. Para ello es necesario implementar un láser de estado sólido que presente un coeficiente de ganancia elevado que soporte las pérdidas de los distintos elementos ubicados en el interior de la cavidad con el fin de proporcionar procesos de conversión intracavidad eficientes, y que a su vez pueda ser bombeado con láseres de diodo disponibles comercialmente. Los láseres basados en el ion Nd^{3+} satisfacen tales requisitos, cuya emisión $\lambda_L = 1064$ nm participa el proceso intracavidad de mezcla de frecuencia suma con el haz que resulta de la iluminación con fuentes SWIR con emisión en la región espectral centrada en $\lambda_{\text{SWIR}} = 1550$ nm. De esta forma se obtienen imágenes en la región del visible correspondiente al rojo: $\lambda_{\text{vis}}^{-1} = \lambda_{\text{SWIR}}^{-1} + \lambda_L^{-1}$ (conservación de la energía: $1064 \text{ nm} + 1550 \text{ nm} \rightarrow 631 \text{ nm}$), donde tienen respuesta rápida y eficiente los sensores CMOS estándar de silicio. El umbral de potencia del láser $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ implementado se encuentra aproximadamente en torno a 150 mW, convirtiendo inmediatamente al rojo por encima de dicho nivel. Este comportamiento lo hace especialmente interesante en la consecución de sistemas miniaturizados y compactos. Para que el proceso sea eficiente (conservación del vector de onda), la técnica de QPM impone que el cristal PPLN tenga una periodicidad de $11.8 \mu\text{m}$ a 25°C . Si bien se ha demostrado que la resolución de la imagen convertida mejora mediante el uso de fuentes incoherentes de tipo térmico [5], la novedad de este trabajo radica en la utilización por primera vez de fuentes de iluminación basadas en emisión ASE en la región SWIR del espectro.

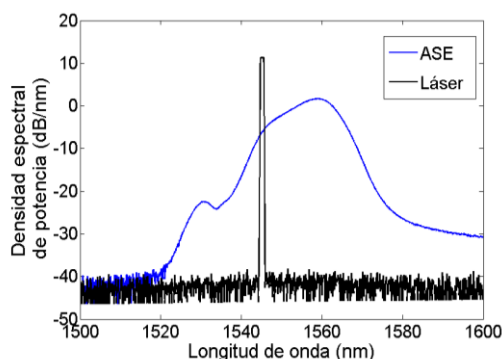


Fig. 2: Densidad espectral de potencia de las fuentes de iluminación empleadas: láser DFB a 1546 nm y ASE centrado en 1555 nm.

La fuente laser empleada para participar en los procesos de conversión de interés corresponde a un diodo láser DFB con emisión en 1546 nm (longitud de onda donde se alcanza la condición de QPM para procesos colineales a temperatura ambiente) y anchura espectral de 100 kHz (FWHM), cuya densidad espectral de potencia se muestra en la Fig. 2. Previa a la colimación y expansión del haz SWIR, la salida del láser se conecta a un controlador de polarización para garantizar la participación en procesos de QPM tipo 0 con polarización extraordinaria y proporcionar procesos de conversión eficientes mediante el acceso al coeficiente no lineal de mayor valor.

En cuanto a la fuente ASE, se implementa a partir del bombeo de una fibra dopada con erbio con un láser de diodo a 980 nm acoplado a fibra. La emisión resultante se amplifica y a continuación se colima mediante un expansor de haz hasta alcanzar un diámetro de ~ 10 mm con el que se iluminan los objetos (blancos en transmisión según el estándar USAF 1951). El haz que resulta de la formación de la imagen en el SWIR se focaliza de nuevo con una lente L2 de focal $f_2=150$ mm para ubicar su cintura en el centro del cristal no lineal e incrementar así la eficiencia del proceso. La densidad espectral de potencia del haz SWIR a la entrada de la cavidad se muestra en la Fig. 2. Con objeto de iluminar los objetos con el mismo nivel de potencia y poder comprobar las mejoras en condiciones de iluminación similares, se ajusta el nivel de potencia de bombeo a 980 para que la potencia de ASE distribuida en un ancho espectral $\Delta\lambda_{\text{ASE}} \sim 5$ nm en torno a 1546 nm sea equiparable al nivel de potencia del láser (~ 5 mW). El rango espectral $\Delta\lambda_{\text{ASE}}$ que

participa en el proceso de conversión a través de interacciones no colineales está determinado fundamentalmente por la aceptación angular de QPM y la focal de la lente de entrada al cristal no lineal (apertura numérica definida por f_2). La utilización de una lente L3 de focal $f_3=125$ mm de focal permitirá la formación de la imagen en la superficie del sensor. Por último, el haz que resulta de la conversión se filtra a la salida para eliminar las componentes láser (filtro *notch* a 1064 nm) y de bombeo residual (filtro paso bajo a 750 nm).

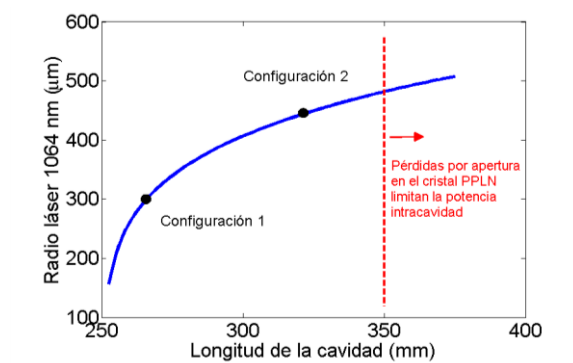


Fig. 3: Evolución del radio del haz a 1064 nm en función de la longitud total de la cavidad láser.

La resolución de las imágenes proporcionadas por el sistema convertidor de longitud de onda propuesto en la Fig. 1 se describe en términos de un sistema óptico 4- f a través de su respuesta al impulso o fuente puntual PSF (*Point Spread Function*). Ésta queda determinada principalmente por la calidad (debe presentar un perfil gaussiano) y por el tamaño del haz láser a 1064 nm a través de la expresión [5]: $PSF \sim \exp[-\alpha(r\pi\omega_L/\lambda_{vis}f_2)^2]$, donde α recoge el grado de coherencia del haz de iluminación SWIR ($\alpha=1$ para láser y $\alpha=2$ para ASE), r es la coordenada radial, ω_L es el radio del haz a 1064 nm, λ_{vis} la longitud de onda de la imagen convertida y f_2 la distancia focal de la lente L2 empleada. La resolución de la imagen convertida queda definida a partir de la convolución en el plano focal, que se encuentra en el centro del cristal no lineal, entre la PSF (pupila definida por el tamaño del haz láser a 1064 nm) y el haz SWIR que transporta la imagen original. Por ello, mediante la ubicación del espejo M3 es posible modificar la longitud total de la cavidad láser, y de este modo, el tamaño del haz ω_L en el centro del cristal PPLN. En la Fig. 3 se muestra el comportamiento teórico del tamaño del haz en función de la longitud de la cavidad para las condiciones que definen el sistema propuesto. La cavidad presenta un comportamiento estable para longitudes comprendidas entre 25.2 cm y 326 cm. Sin embargo, longitudes superiores a 35 cm dan lugar a tamaños de haz que experimentan pérdidas por apertura en las caras del cristal PPLN e implican una penalización en la potencia láser intracavidad, y por tanto, de la eficiencia del proceso de conversión. De este modo, las dimensiones de las caras del cristal también constituirán un factor limitante en la resolución del sistema.

Para cada una de las fuentes de iluminación empleadas, la dependencia del tamaño del haz en la resolución de la imagen convertida se evalúa extendiendo la longitud total de la cavidad para las dos configuraciones señaladas en la Fig. 3: la configuración 1 corresponde a una longitud de cavidad de 27 cm y un radio del haz de $\omega_L=300$ μm en el cristal PPLN, dando lugar a las imágenes mostradas en las figuras Fig.4(a), cuando se emplea iluminación láser, y Fig.4(b), cuando se ilumina con ASE, respectivamente. La configuración 2 representa una cavidad de longitud de 32 cm y un radio del haz de $\omega_L=440$ μm en el cristal PPLN, dando lugar a las imágenes Fig.4(c), cuando se emplea iluminación láser, y Fig.4(d), cuando se ilumina con ASE, respectivamente. Las imágenes se obtienen manteniendo los niveles de potencia y todas las dimensiones de la cavidad, salvo la correspondiente a la posición del espejo M3.

El conjunto de imágenes mostrado en la Fig. 4 se obtiene a partir de la iluminación del test de resolución USAF 1951, correspondiente a la zona donde se encuentran los elementos del 1 al 6 pertenecientes al grupo 1 y cuya resolución se encuentra comprendida entre 2.00 y 3.56 pares de línea/mm. A la derecha de cada una de las imágenes también se incluye el perfil de intensidad normalizado correspondiente al corte de la imagen señalado con (\rightarrow), que permite evaluar con mayor detalle la resolución y contraste para los casos mencionados. En general se aprecia un aumento de la resolución cuando se incrementa el tamaño del haz láser de 1064 nm como consecuencia de la mejora de la PSF. También es notable el aumento del campo de visión (presencia de los elementos 1 y 6 en las imágenes convertidas mediante ASE y ausentes con láser), así como una mejora en la resolución de las frecuencias espaciales más altas (elementos 4 y 5 comunes a láser y ASE) cuando se ilumina

con ASE. Estos efectos se explican a partir de la participación de una banda espectral de ASE en interacciones QPM no colineales, que permiten extender el ajuste de fase de tales componentes a un mayor conjunto de ángulos de entrada al cristal no lineal, compensando así las distintas direcciones de los vectores de onda, y como consecuencia, dando lugar a un aumento del campo de visión de las imágenes convertidas.

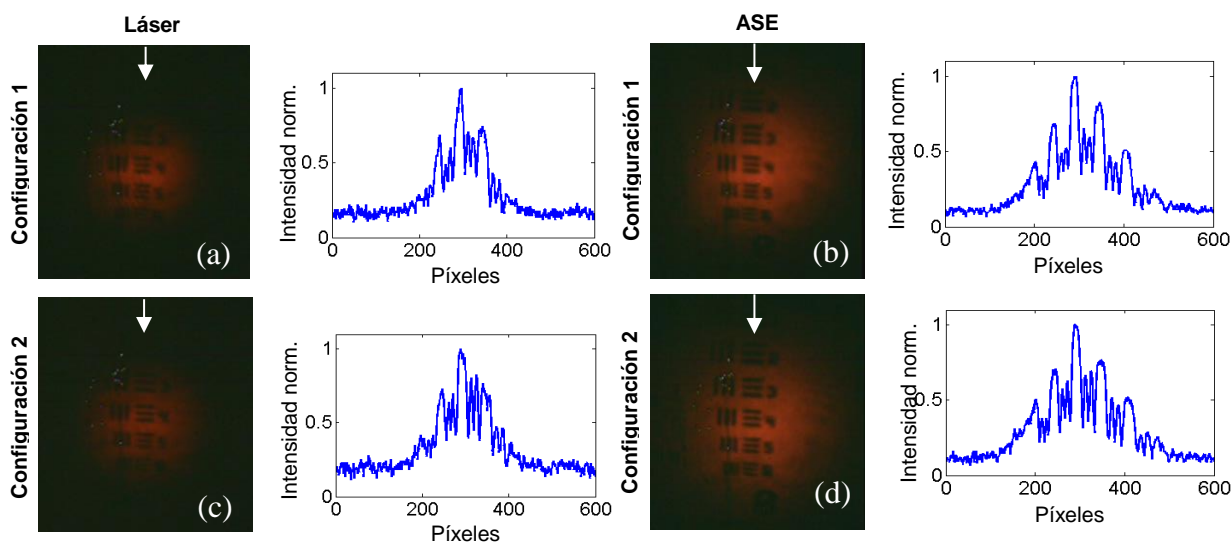


Fig. 4: Efecto del tamaño del haz (ω_L) a 1064 nm en la resolución de la imagen convertida en función de la fuente de iluminación. Imagen convertida e intensidad normalizada para el corte transversal señalado (\rightarrow) para los casos: a) iluminación láser y $\omega_L=300 \mu\text{m}$, b) iluminación ASE y $\omega_L=300 \mu\text{m}$, c) iluminación láser y $\omega_L=440 \mu\text{m}$, y d) iluminación ASE y $\omega_L=440 \mu\text{m}$.

El proceso de *up-conversion* también lleva asociado una reducción del tamaño de la imagen original impuesta por la conservación de la energía y determinada por la relación de longitudes de onda: $\lambda_{\text{vis}}/\lambda_{\text{SWIR}}$ [7]. Tal efecto se muestra experimentalmente en la Fig.5 mediante las capturas realizadas con una cámara vidicon cuando se emplea la fuente ASE. La utilización de este tipo de fuentes presenta la ventaja de captar simultáneamente ambas imágenes (Fig. 5(a)) así como aislar de forma selectiva cada una de ellas (Fig. 5(a) y (b)) dada la naturaleza aleatoria de la polarización de la emisión ASE con la que se ilumina la imagen original y la polarización de la imagen convertida definida por el proceso de QPM tipo 0. La interposición de un filtro *notch* para eliminar la componente de 1064 nm y la introducción de un polarizador entre la salida del sistema y el sensor CMOS permiten bloquear la componente convertida, captando únicamente la imagen original en el SWIR tal y como se aprecia en la Fig. 5(b). En cambio, cuando se cruza el polarizador para permitir únicamente el paso de la polarización extraordinaria, se consigue aislar la imagen convertida al visible, tal y como se muestra en la Fig. 5(c). Este procedimiento resulta de gran utilidad para demostrar la reducción angular que experimenta la imagen convertida en procesos de *up-conversion* bajo condiciones de agotamiento energético de la onda SWIR. En caso de no alcanzarse tal régimen, es necesario incluir una etapa de filtrado paso bajo adicional dada la sensibilidad de las cámaras vidicon en la región espectral SWIR.

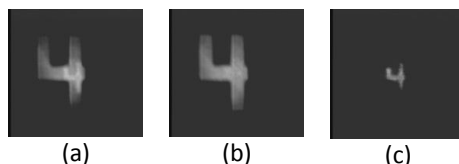


Fig. 5: Reducción del tamaño de la imagen convertida en *up-conversion*: (a) infrarroja + visible, (b) infrarroja, (d) visible.

4.- Conclusión

En este trabajo se ha presentado un sistema de conversión de longitud de onda de imágenes al visible a partir de la iluminación de blancos mediante fuentes ASE y láser en la región espectral SWIR centrada en 1550 nm. Los resultados proporcionados por el sistema evidencian que la utilización de la fuente ASE proporciona imágenes en el visible con mayor campo de visión y resolución que las obtenidas a partir de iluminación láser. Ello se debe a la participación de una banda espectralmente amplia en un proceso no

colineal, cuyo ancho espectral queda determinado por la aceptación angular y por las condiciones de focalización, permitiendo así alcanzar la condición de QPM para un mayor abanico de ángulos de entrada al cristal no lineal. El sistema propuesto permite la visualización y caracterización de imágenes mediante cámaras estándar CCD o CMOS de silicio en tiempo real. Asimismo se ha comprobado que la eficiencia de conversión obtenida resulta suficiente para alcanzar el nivel de saturación de la cámara empleada. Los umbrales de oscilación láser y de conversión son relativamente bajos, lo que posibilita la implementación de este tipo de sistemas en un formato miniaturizado y compacto. En la actualidad se está trabajando en determinar las condiciones óptimas de relación de tamaños y focalización de los haces intervinientes en el proceso de mezcla, y la influencia de la anchura espectral de las ondas participantes con el objetivo final de incrementar la eficiencia del proceso, la resolución y el campo de visión de imagen convertida. Por último, cabe indicar también que su funcionamiento es fácilmente extensible a otras regiones del infrarrojo, y simplemente basta con una adecuada elección de la onda auxiliar que participará en el proceso de mezcla (elección del ion activo del cristal láser) y el periodo de la estructura no lineal periódicamente polarizada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado a través de los proyectos TEC2011-26842 del Ministerio de Ciencia e Innovación y TEC2014-60084-R del Ministerio de Economía y Competitividad.