

Conversion cuántica de frecuencia

Oscar Adrián Jiménez Gordillo¹, Yiming Lai², Antonio Badolato²

¹ Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Coordinación de Óptica, Puebla, México

² University of Rochester, Physics and Astronomy Department, New York, E.U.A

oscar.jimenez@inaoep.mx, badolato@pas.rochester.edu

Resumen. La conversión de frecuencia cuántica de estados de luz no clásicos permite la integración de diferentes sistemas cuánticos que funcionan a diferentes energías. El proceso de conversión consiste en combinar dos campos ópticos en un medio no lineal para generar un tercer campo que es igual a la suma de las dos entradas. Para cumplir con la conservación de impulso requerida por este proceso, necesitamos compensar la falta de correspondencia del vector de onda entre los haces de salida y de entrada. Esto se logra mediante el uso de una rejilla en el medio no lineal, un proceso llamado cuasi-coincidencia de fase. En este trabajo usaremos una guía de ondas Lithium Niobate LiNbO₃ (PPLN) polarizada periódicamente como el material no lineal. Nuestro objetivo es desarrollar una conversión de frecuencia cuántica de alta eficiencia, baja pérdida y alta fidelidad. El objetivo específico es transducir fotones emitidos por puntos cuánticos desde longitudes de onda NIR ($\lambda > 1.1 \mu\text{m}$) a longitudes de onda visibles ($< 0.70 \mu\text{m}$), donde los detectores de silicio de fotón único rinden mejor.

Keywords: conversion cuántica, frecuencia.

Quantum Frequency Conversion

Abstract. Quantum frequency conversion of non-classical states of light allows the integration of different quantum systems working at different energies. The conversion process consists in combining two optical fields in a nonlinear medium to generate a third field that is equal to the sum of the two inputs. To fulfill the momentum conservation required by this process, we need to compensate for wave vector mismatch between the output and input beams. This is achieved by using a grating in the nonlinear medium, a process named quasi-phase matching. In this work we will use a periodically poled Lithium Niobate LiNbO₃ (PPLN) waveguide as the nonlinear material. We aim to develop high efficiency, low loss, and high fidelity quantum frequency conversion. The specific objective is to transduce photons emitted by quantum dots from NIR wavelengths ($\lambda > 1.1 \mu\text{m}$) to visible wavelengths ($< 0.70 \mu\text{m}$), where single photon silicon detectors perform best.

Keywords: Quantum conversion, frequency.

1. Introducción

De una manera simple, la conversión cuántica de frecuencia (CCF) describe los métodos mediante los cuales la longitud de onda de un fotón es cambiada sin destruir su estado cuántico (Ates, 2012). De manera más precisa, en un dispositivo de QFC, el estado cuántico de un fotón de entrada con una longitud de onda λ_a , es transferido a un fotón de salida con λ_b , donde el fotón con λ_a es aniquilado y el fotón con λ_b es creado (Boyd, 1968). Para este fin, se utilizan las no linealidades intrínsecas en cristales de estado sólido (Fejer, 1992). El proceso de conversión tiene que ser bombeado por uno o dos láseres de bombeo bastante potentes. Se denomina conversión de bajada cuando la longitud de onda de entrada es más corta que la de salida ($\lambda_a < \lambda_b$) y conversión de subida cuando ocurre el caso contrario.

La CCF fue propuesta por primera vez por Kumar (1990) y fue demostrada experimentalmente dos años después por Huang y Kumar (1992). Los autores demostraron correlaciones de intensidad no clásicas entre el haz de entrada y el haz convertido.

Grupos como el de Kwiat (2004), Wong (2004) y Fejer (2004) han investigado la conversión de frecuencia para solucionar el problema de la ineficiencia de los detectores de fotones con longitud de onda en el rango de telecomunicaciones. Más adelante, Tanzilli et al. (2005) reportaron un experimento en el que demostraron que el entrelazamiento de energía-tiempo entre dos qubits fotónicos se mantenía durante la conversión de frecuencia de subida. El objetivo de este trabajo es desarrollar conversión cuántica de frecuencia altamente eficiente para convertir fotones emitidos por puntos cuánticos con longitudes de onda mayores que $1.1\mu\text{m}$ (en el infrarrojo cercano) a longitudes de onda menores que $0.70\mu\text{m}$ (en el visible), donde los detectores de fotones individuales de silicio tienen mejor rendimiento.

2. Materiales y métodos

Para lograr los objetivos de este trabajo se utilizará como material no lineal una guía de onda de Niobato de Litio (LiNbO_3) periódicamente polarizada (PPLN-WG) de 4cm de longitud para llevar a cabo el proceso no lineal de generación de suma de frecuencias (GSF). La polarización periódica de la guía de onda es necesaria para lograr la condición de cuasi-adaptación de fase (QPM) con la que satisface la conservación de momento requerida por este proceso.

Este trabajo constituye la primer etapa del proyecto que consiste en la caracterización de la PPLN – WG y para esto se utilizará un láser New Focus TLB-6700 a 1175nm como la señal a convertir y un láser semiconductor ajustable Santec TLS-150 a 1560nm como fuente de bombeo, las altas potencias necesarias se lograrán amplificando este mediante un amplificador de fibra óptica dopada con Erblio (EDFA) de la marca Amonics AEDFA-B.

En la Fig. 1 se muestran las dimensiones físicas del dispositivo que contiene la guía de onda fabricado por la empresa NTT Electronics. El dispositivo cuenta con 12 guías de onda y para este trabajo se escogió la de nombre WG1 del grupo 2, en la Tabla 1 se muestran sus especificaciones.

Tabla 1. Especificaciones de la guía de onda utilizada dadas por el fabricante.

Grupo	Periodo de polarización (μm)	Grosor (μm)	Guía de onda	Altura (μm)	Temperatura de acoplamiento de fase (°C)
G2	13.160	9.4	WG1	11.9	54

La temperatura del dispositivo PPLN-WG tiene que ser cuidadosamente controlada para que se cumpla la condición de QPM. En este trabajo se utiliza como elemento térmico un enfriador termoeléctrico (TEC) conectado a un controlador de temperatura (Thorlabs TED 200 C) y la temperatura es detectada mediante un termistor.

Se cuenta con un elemento polarizador para cada láser ya que ambos tienen que tener la misma polarización para que se lleve a cabo el proceso no lineal de GSF. En la Figura 8 se puede observar el arreglo experimental de este trabajo.

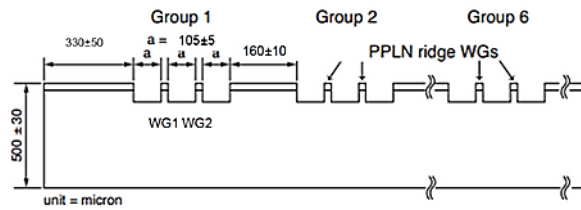


Fig. 1. Diagrama del dispositivo que contiene las guías de onda.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de esta primera etapa del proyecto que consiste en la caracterización y rendimiento de la PPLN-WG.

3.1. Potencia de salida

En las siguientes figuras se muestra la potencia obtenida de la luz convertida a la salida del dispositivo.

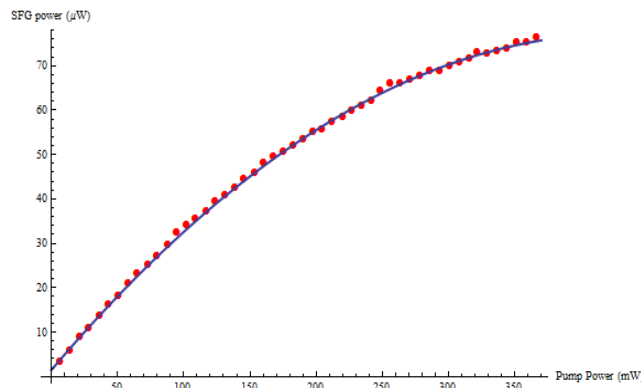


Fig. 2. Generación de GSF con potencia de señal constante a 0.111mW.

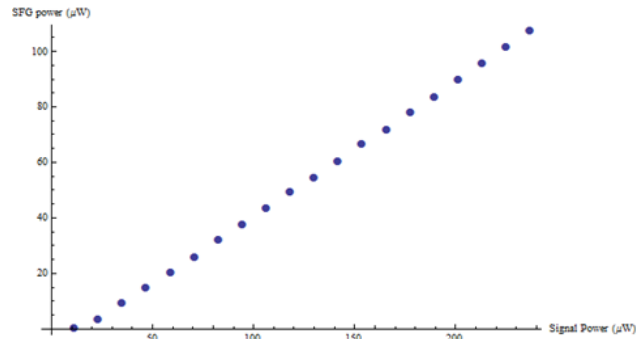


Fig. 3. Generación de GSF con potencia de bombeo constante a 170mW.

3.2. Eficiencia de conversión

En las siguientes figuras se muestra cómo varía la eficiencia de conversión (Potencia de la señal a la entrada de la PPLN-WG / Potencia de la luz convertida a la salida de la PPLN-WG) para diferentes valores de potencia de la señal y del bombeo.

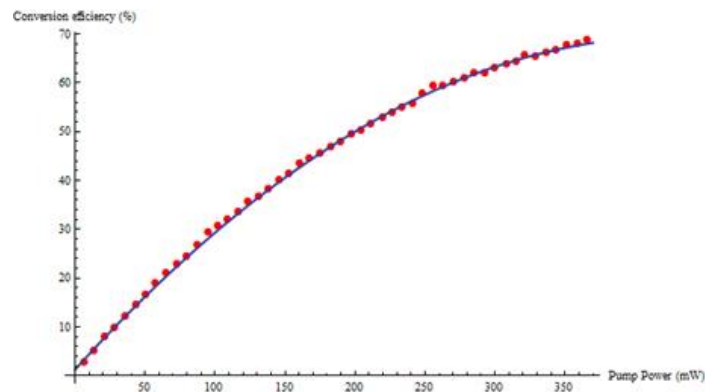


Fig. 4. Eficiencia de conversión con potencia de señal constante a 0.111Mw.

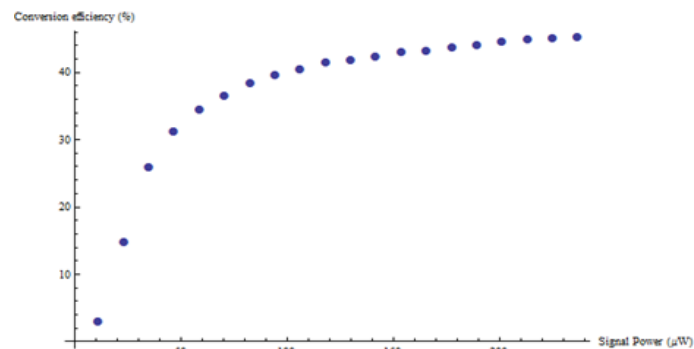


Fig. 5. Eficiencia de conversión con potencia de bombeo constante a 170mW.

3.3. Ancho de banda espectral

En la siguiente figura se muestran los datos experimentales de las mediciones utilizadas para obtener el ancho de banda espectral del dispositivo. Los procesos no lineales de segundo orden poseen cierto ancho de banda de acoplamiento de fase que sigue un comportamiento de la función Sinc². Dentro de este ancho de banda, la conversión de longitud de onda ocurre y porciones significativas de la potencia de entrada se distribuyen a campos de luz con otras frecuencias. A partir del ajuste a la función Sinc² se obtuvo un ancho de banda espectral de 0.38nm de la anchura a media altura (FWHM).

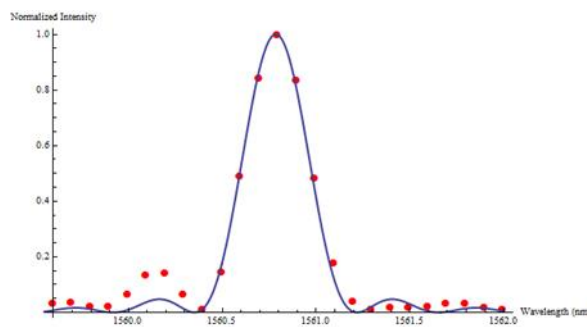


Fig. 6. Ancho de banda espectral de SFG para la PPLN-WG.

3.4. Ancho de banda de temperatura

En la siguiente figura se muestran los datos experimentales de las mediciones utilizadas para obtener el ancho de banda de temperatura del dispositivo. La condición de QFM es altamente sensible a la temperatura del dispositivo, por lo que es necesario conocer su ancho de banda de temperatura para lograr un buen control de esta y evitar tener variaciones importantes en la eficiencia de conversión.

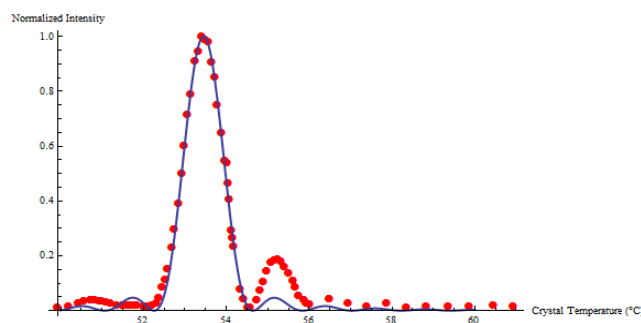


Fig. 7. Ancho de banda de temperatura de la PPLN-WG. Los datos están normalizados con respecto al máximo central.

Esta medición se llevó a cabo fijando los dos láseres de entrada (bombeo a 1560.775nm y 170mW y el de señal a 1174.9nm y 0.111mW) y variando la temperatura

del dispositivo. Se obtuvo un ancho de banda de temperatura de 1.06°C (FWHM) del ajuste a la función Sinc^2 .

4. Discusión

La caracterización del rendimiento del dispositivo no lineal PPLN-WG es una etapa muy importante para el desarrollo de la conversión cuántica de frecuencia ya que esta nos dará los parámetros básicos para trabajar posteriormente de manera óptima con fotones individuales.

Con los resultados obtenidos en la Figura 4 se observa claramente que a medida que el aumento de la potencia de la luz convertida es directamente proporcional al aumento de las potencias de entrada. Al aumentar la potencia de bombeo se llega eventualmente a un punto en que no se puede obtener más potencia a la salida del dispositivo. El aumento de la potencia de la señal de entrada tiene un efecto lineal en el aumento de la potencia de la luz convertida como se puede ver en la gráfica del lado derecho.

Partiendo de los resultados descritos en el párrafo anterior, se obtuvieron los valores de la eficiencia de conversión del dispositivo. Se intenta obtener la mayor eficiencia posible y esto depende de muchas variables como lo son la temperatura, la potencia de bombeo, la potencia de la señal, el acoplamiento de la luz dentro de la guía de onda, las imperfecciones de la guía de onda, el ancho de banda espectral, entre otras. La mayor eficiencia de conversión lograda con este arreglo experimental fue casi del 70%. Hay bastante campo para mejorar esta eficiencia, sobretodo poniendo atención a las pérdidas provocadas por los elementos ópticos, especialmente en la etapa de filtrado de la señal.

El ancho de banda espectral obtenido a partir del ajuste de la gráfica en la figura 6 es un parámetro sumamente importante ya que el ancho de banda de las señales de entrada debe ser menor a este para que se cumpla eficientemente la condición de QPM. Hay que tomarlo en cuenta a la hora de elegir las fuentes de entrada de nuestro dispositivo.

El ancho de banda de temperatura obtenido nos da bastante flexibilidad ya que la precisión de control de temperatura de nuestro controlador es de 0.01°C .

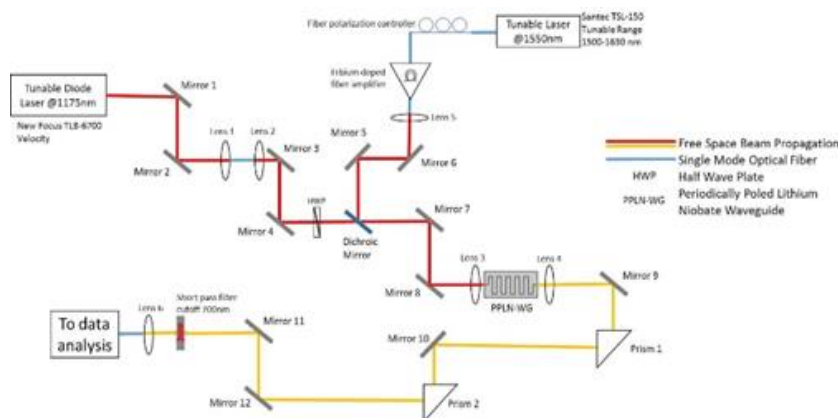


Fig. 8. Arreglo experimental.

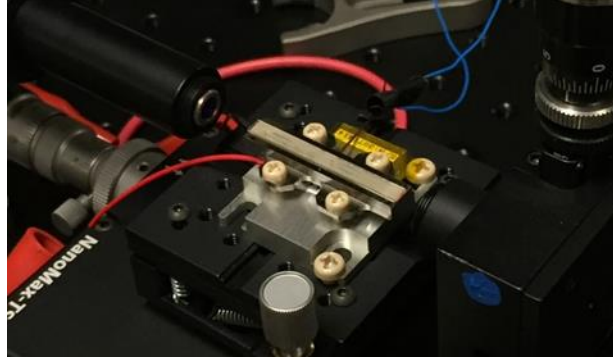


Fig. 9. Fotografía de la PPLN-WG.

5. Conclusiones

Esta primera etapa del proyecto de QFC permite establecer los parámetros de operación del dispositivo PPLN-WG para posteriormente lograr una conversión de frecuencia cuántica altamente eficiente. El siguiente paso es conocer el comportamiento del dispositivo con una señal de entrada de un láser atenuado simulando una fuente de fotones individuales para finalmente usar una verdadera fuente de fotones individuales provenientes de un punto cuántico localizado en la cavidad de un cristal fotónico y demostrar una interfaz cuántica capaz de convertir fotones con longitudes de onda en el infrarrojo a longitudes de onda en el visible conservando sus propiedades cuánticas.

Agradecimientos. Oscar Jiménez agradece especialmente a su asesor en el INAOE y a la beca mixta CONACYT asignada para poder realizar este trabajo de investigación en la Universidad de Rochester.

Referencias

1. Albota, M. A., Wong, F. N. C.: Efficient single-photon counting at 1.55 μm by means of frequency upconversion. *Opt. Lett.*, 29, pp. 1449–1451 (2004)
2. Ates, S., Agha, I., Gulinatti, A., Rech, I., Rakher, M.T., Badolato, A., Srinivasan, K.: Two-Photon Interference Using Background-Free Quantum Frequency Conversion of Single Photons Emitted by an InAs Quantum Dot. *Phys. Rev. Lett.*, 109, 147405.8 (2012)
3. Boyd, G. D., Kleinman, D. A.: Parametric interaction of focused Gaussian light beams. *J. Appl. Phys.*, 39, pp. 3597–3639 (1968)
4. Fejer, M. M., Magel, G. A., Jundt, D. H., Byer, R. L.: Quasi-phase-matched second harmonic generation – tuning and tolerances. *IEEE J. Quantum Electron*, 28, pp. 2631–2654 (1992)
5. Huang, J., Kumar, P.: Observation of Quantum Frequency Conversion. *Phys. Rev. Lett.*, 68, pp. 2153–2156 (1992)
6. Kumar, P.: Quantum frequency conversion. *Opt. Lett.*, 15, pp. 1476–1478 (1990)
7. Roussev, R. V., Langrock, C., Kurz, J. R., Fejer, M. M.: Periodically poled lithium niobate waveguide sum-frequency generator for efficient single-photon detection at communication wavelengths. *Opt. Lett.*, 29, pp. 1518–1520 (2004)

Oscar Adrián Jiménez Gordillo, Yiming Lai, Antonio Badolato

8. Tanzilli, S., Tittel, W., Halder, M., Alibart, O., Baldi, P., Gisin, N., Zbinden, H.: A photonic quantum information interface. *Nature*, 437, pp. 116–120 (2005)
9. VanDevender, A. P., Kwiat, P. G.: High efficiency single photon detection via frequency up-conversion. *J. Mod. Opt.*, 51, pp. 1433–1445 (2004)
10. Zaske, S., Lenhard, A., Becher, C.: Efficient frequency downconversion at the single photon level from the red spectral range to the telecommunications C-band. *Opt. Express*, 19, pp. 12825–12836 (2011)