

Diseño de una fuente de luz comprimida usando pares de fotones

Ignacio Arturo Gonzalez de la Llave Rojas¹

¹*Fotónica y Tecnologías Cuánticas 1*

(Dated: 10 de diciembre de 2025)

En este trabajo se diseñó una fuente fotónica integrada para la generación de luz comprimida utilizando el proceso de mezclado de cuatro ondas espontáneo (SFWM) en guías de onda de nitrógeno de silicio (SiN) sobre dióxido de silicio (SiO₂). Se utilizaron acopladores direccionales para separar las componentes de señal e idler generadas. Las simulaciones realizadas con Lumerical MODE y MATLAB permitieron optimizar los parámetros de diseño, logrando una alta eficiencia en la generación de fotones no entrelazados y una separación óptima de fotones.

I. INTRODUCCIÓN

La fotónica cuántica es un área clave para el desarrollo de tecnologías avanzadas como la computación cuántica y la comunicación cuántica [1, 2]. En particular, el proceso de mezclado de cuatro ondas espontáneo (SFWM) permite la generación de pares de fotones entrelazados, los cuales son fundamentales para estos avances.

Uno de los desafíos en este campo es la compresión cuántica de la luz, que permite controlar la incertidumbre en las cuadraturas del campo electromagnético. Este control es esencial para aplicaciones como la metrología cuántica y los sensores cuánticos [3, 4]. Sin embargo, la implementación de fuentes de luz comprimida en plataformas fotónicas integradas sigue siendo un reto debido a las dificultades para controlar la fase y la compresión espectral de manera eficiente.

El objetivo de este trabajo es diseñar una fuente integrada de luz comprimida utilizando el proceso de SFWM en guías de onda de nitrógeno de silicio (SiN) sobre dióxido de silicio (SiO₂). El proyecto incluye el diseño de acopladores direccionales y espejos de Bragg para separar las componentes de señal e idler, y estabilizar la fase del proceso de compresión.

II. MARCO TEÓRICO

El campo de la fotónica cuántica ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, especialmente en lo relacionado con la generación de estados cuánticos de luz entrelazados. Estos estados de fotones entrelazados son fundamentales para diversas aplicaciones cuánticas, como la computación cuántica, comunicación cuántica y metrología cuántica [1, 2].

A. Mezclado de cuatro ondas espontáneo (SFWM)

Uno de los procesos más utilizados para la generación de pares de fotones entrelazados es el mezclado

de cuatro ondas espontáneo (SFWM), un proceso no lineal en el cual dos fotones de bombeo interactúan dentro de un medio no lineal, generando dos fotones correlacionados: uno en la banda de señal y otro en la banda de idler. Este proceso se basa en la conservación de energía ($2\omega_p = \omega_s + \omega_i$) y en la conservación del momento ($\Delta k = 0$), lo que determina la eficiencia y las propiedades espectrales del proceso de generación [5].

La ecuación que describe la dinámica del proceso SFWM en una guía de onda es la siguiente:

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} = i\gamma A_p A_i^*, \quad \frac{\partial A_i}{\partial z} = i\gamma A_p A_s^*, \quad (1)$$

donde A_s y A_i son los campos de señal e idler, respectivamente, y A_p es el campo del bombeo. El parámetro γ representa el coeficiente de no linealidad del medio.

Este proceso, en guías de onda ópticas, tiene la ventaja de permitir la generación de fotones en configuraciones compactas, lo que facilita su integración en plataformas fotónicas, como las basadas en silicio o nitrógeno de silicio (SiN).

B. Emparejamiento de Fase (Phase Matching)

El emparejamiento de fase es crucial para el proceso de SFWM, ya que garantiza que los fotones generados en el proceso de cuatro ondas tengan la misma frecuencia y dirección de propagación. La condición de emparejamiento de fase establece que el momento total del sistema debe ser conservado:

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i = 0, \quad (2)$$

donde k_p , k_s y k_i son los vectores de onda para el fotón de bombeo (p), la señal (s) y el idler (i), respectivamente. Esta condición asegura que los fotones generados estén en fase, lo que maximiza la eficiencia de la conversión.

C. Emparejamiento de Grupo (Group Matching)

El emparejamiento de grupo se refiere a la coincidencia de las velocidades de grupo de los fotones generados. Si las velocidades de grupo de las componentes del fotón no coinciden, se perderá la correlación entre los fotones generados. La condición de emparejamiento de grupo para SFWM es:

$$\Delta\beta_1 = \beta_1(p) - \beta_1(s) - \beta_1(i) = 0, \quad (3)$$

donde β_1 es el coeficiente de dispersión de grupo de cada componente. Este emparejamiento es fundamental para asegurar que los fotones idler y señal viajen juntos sin desfasarse.

D. Amplitud Espectral Conjunta (JSA)

La amplitud espectral conjunta (JSA) describe la correlación espectral entre los fotones generados. En SFWM, la JSA es dada por:

$$\text{JSA}(\omega_s, \omega_i) \propto \alpha(\omega_p)\Phi(\omega_s, \omega_i), \quad (4)$$

donde $\alpha(\omega_p)$ es la envolvente espectral del fotón de bombeo y $\Phi(\omega_s, \omega_i)$ es el factor de emparejamiento de fase, el cual depende de la geometría de la guía y la dispersión. La JSA describe cómo los fotones de señal e idler están correlacionados espectralmente.

E. Número de Schmidt (Schmidt Number)

El número de Schmidt K es una medida de la pureza espectral del estado generado. Se calcula a partir de la descomposición en valores singulares de la JSA. El número de Schmidt se define como:

$$K = \frac{1}{\sum_n \lambda_n^2}, \quad (5)$$

donde λ_n son los valores singulares obtenidos de la descomposición de la JSA. Un K pequeño indica un estado de dos fotones casi factorizado, mientras que un K grande sugiere un estado más entrelazado.

F. Acopladores Direccionales

Los acopladores direccionales son dispositivos pasivos que permiten dividir la potencia entre dos guías de onda. El principio básico de funcionamiento es

el acoplamiento evanescente, que ocurre cuando dos guías están lo suficientemente cerca. La potencia transferida entre las guías está dada por la siguiente ecuación:

$$P_2(z) = \frac{P_1(0)}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi z}{L_c} \right) \right), \quad (6)$$

donde L_c es la longitud de acoplamiento, $P_1(0)$ es la potencia inicial en la guía 1, y $P_2(z)$ es la potencia en la guía 2 en función de la distancia z . Los acopladores direccionales se utilizan para separar las componentes de señal e idler de un proceso SFWM en diferentes guías de onda.

G. Espejos de Bragg

Los espejos de Bragg se utilizan para formar cavidades en guías de onda fotónicas. Estos espejos reflejan selectivamente una longitud de onda específica (λ_B) y son esenciales para estabilizar la fase del proceso SFWM. El periodo de la rejilla de Bragg está relacionado con la longitud de onda de reflexión λ_B a través de la siguiente relación:

$$\Lambda = \frac{\lambda_B}{2n_{\text{eff}}}, \quad (7)$$

donde Λ es el periodo de la rejilla y n_{eff} es el índice efectivo de la guía. Estos espejos permiten estabilizar las fases de los fotones generados y maximizar la eficiencia del proceso de compresión de la luz en la cavidad.

III. DISEÑO Y METODOLOGÍA

El diseño de la fuente de fotones individuales y los acopladores direccionales se llevó a cabo mediante simulaciones numéricas utilizando Lumerical MODE, varFDTD y MATLAB. Estas herramientas permitieron tanto el diseño de la guía de onda para la generación de pares de fotones mediante el proceso SFWM como el diseño de los elementos pasivos (acopladores direccionales) para separar las componentes de señal e idler. A continuación, se describe la metodología utilizada para simular tanto la fuente de SFWM como los acopladores de potencia.

A. Fuente de SFWM: Simulaciones en Lumerical MODE

Para modelar la generación de fotones a través de SFWM, se utilizó Lumerical MODE para calcular

las propiedades espectrales de las guías de onda. El proceso comenzó con la simulación de modos guiados para la geometría seleccionada de la guía de onda de SiN sobre SiO₂. Esta simulación permitió obtener los valores de índice efectivo ($n_{\text{eff}}(\lambda)$) y la distribución espectral de los modos de propagación.

1. Procedimiento:

1. Simulación de la guía de onda: - Se calcularon varias geometrías de ancho y alto de la guía de onda. - Para cada longitud de onda (desde el señal hasta la señal 520 nm - 1570 nm), se calcularon los modos guiados y sus correspondientes índices efectivos $n_{\text{eff}}(\lambda)$.

2. Ajuste de dispersión: - A partir de los resultados obtenidos de la simulación de modos, se ajustó una curva polinomial a la relación $k(\omega)$, la cual describe la dispersión de la guía de onda para las diferentes longitudes de onda involucradas en el proceso de SFWM.

3. Análisis de la interacción no lineal: - La eficiencia del proceso SFWM se estimó mediante el análisis de las ecuaciones de propagación de los campos A_s y A_i , tomando en cuenta los índices efectivos obtenidos. Esto permitió determinar la longitud de interacción óptima L_{opt} y la eficiencia de conversión para cada longitud de onda.

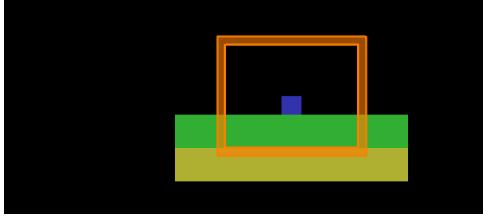


Figura 1: Guía de onda utilizada para la fuente.

B. Diseño de los Acopladores Direccionales: Simulaciones en Lumerical FDE y varFDTD

El diseño de los acopladores direccionales para separar las componentes de señal e idler también se llevó a cabo mediante simulaciones. Se utilizó Lumerical MODE para calcular las longitudes de acoplamiento L_c en función de la separación entre las guías de onda.

1. Procedimiento:

1. Simulación de acopladores direccionales en Lumerical: - Se calculó la longitud de acoplamiento ópti-

tima L_c para asegurar que la señal y el idler se separaran eficientemente. - Se calcularon dos guías de onda cercanas con un gap de 0,3 μm. - Se extraen los datos de transferencia de potencia de manera numérica y visual.

3. Cálculo de la eficiencia de separación: Los acopladores fueron optimizados para separar las componentes de señal e idler con eficiencias superiores al 95 %, mientras que la potencia de bombeo se mantenía predominantemente en la guía de onda principal.

C. Herramientas de Simulación

Para las simulaciones y análisis realizados en este trabajo, se utilizaron principalmente las siguientes herramientas:

1. Lumerical MODE: - Para calcular los modos guiados en la guía de onda de SiN y obtener el índice efectivo $n_{\text{eff}}(\lambda)$ para diferentes longitudes de onda. - Para estimar la longitud de acoplamiento L_c para los acopladores direccionales

2. MATLAB: - Para analizar los resultados de SFWM, realizar el ajuste polinomial de $k(\omega)$, y calcular la eficiencia del proceso SFWM.

1. Lumerical varFDTD: - Para calcular la transmisión de potencia en cada configuración de acopladores direccionales. —

IV. RESULTADOS

A. Resultados de la Fuente de SFWM

Para la fuente de SFWM se calcularon diferentes geometrías de guía de onda en Lumerical MODE para determinar el índice efectivo $n_{\text{eff}}(\lambda)$ en las bandas de bombeo, señal e idler. A partir de estos resultados, se ajustó una curva polinomial a la relación $k(\omega)$, la cual se utilizó para calcular los retardos de grupo y la eficiencia del proceso.

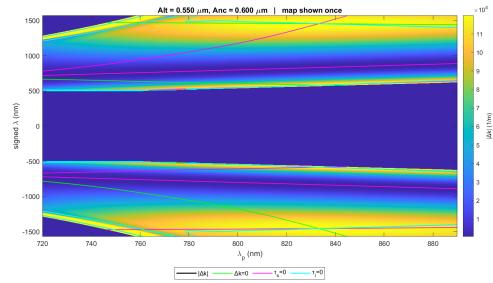


Figura 2: Mapa de phasematching y empalme de grupo

Los resultados del ajuste polinomial de $k(\omega)$, las

condiciones de empatamiento de fase y empatamiento de grupo muestran que una geometría con la que se genera un par de fotones dentro de los rangos es de $0,6\mu\text{m}$ de ancho y $0,5\mu\text{m}$ de alto. El cálculo de la integral de JSA muestra una forma adecuada a lo que se espera, casi circular con pequeños lobulos a los lados.

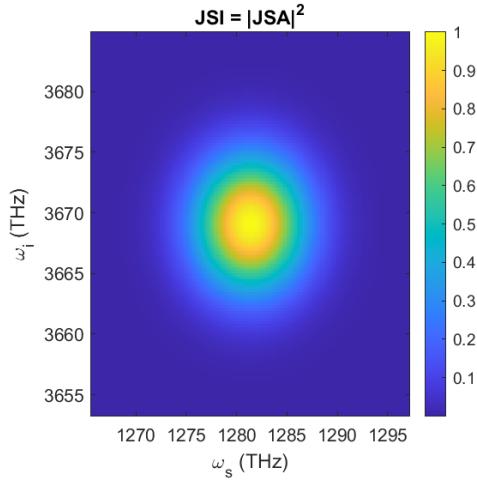


Figura 3: grafico de la JSA

La evaluación de la eficiencia SFWM muestran una longitud óptima de interacción L_{opt} de aproximadamente 6 mm con un coeficiente de Schmidt de 0,95 que nos indica una muy buena separabilidad en el modo 1.

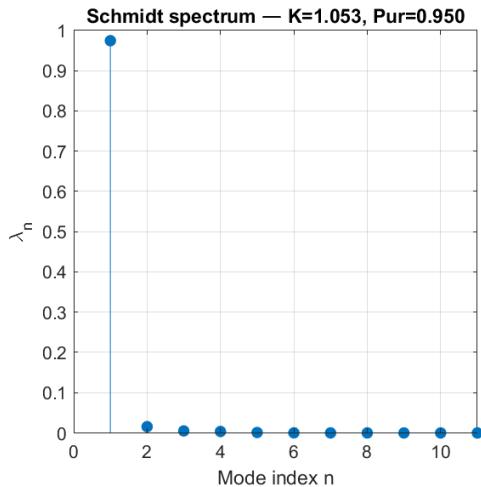


Figura 4: Grafica de coeficiente de Schimdt para diferentes modos

B. Resultados de los Acopladores Direccionales

Se diseñaron dos acopladores direccionales para separar las componentes de señal e idler. A continuación, se presenta un análisis comparativo de la eficiencia de acoplamiento para las componentes de señal e idler a diferentes longitudes de onda, así como la potencia transmitida en cada puerto de salida. Las gráficas muestran que la potencia medida por medidores colocados en la entrada de los sondaores de frecuencia y en cada brazo de salida.

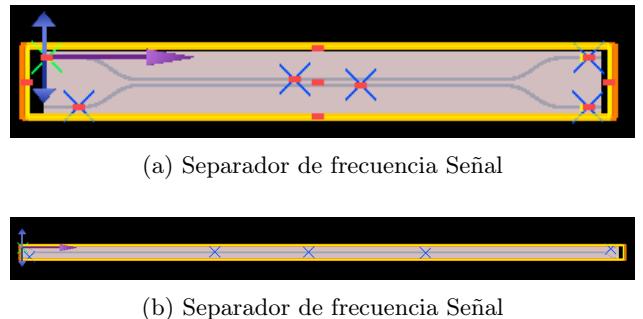


Figura 5: Separadores de frecuencia diseñados

1. Acoplador Direccional 1 (Señal)

La siguiente tabla muestra los parámetros relevantes para el acoplador direccional 1, utilizado para separar la componente de señal:

Parámetro	Valor
Longitud de acoplamiento L_c [μm]	59
Gap [μm]	0.3
Y-Span [μm]	8
Ancho A_{nc} [μm]	0.6

Tabla I: Parámetros del acoplador direccional 1 para la señal.

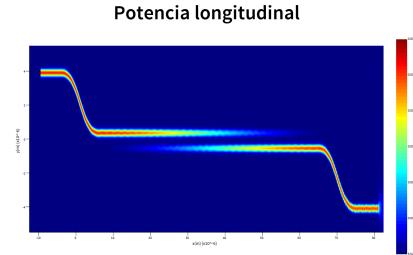
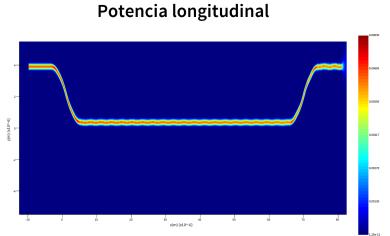
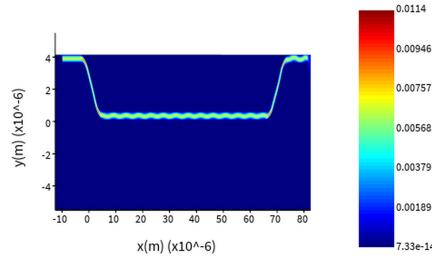


Figura 6: Propagacion y separacion del modo señal en el primer acoplador direccional



(a) Propagacion del modo pump en el primer acoplador direccional



(b) Propagacion del modo Idler en el primer acoplador direccional

Figura 7: Propagacion y no separacion de los modos Pump e Idler

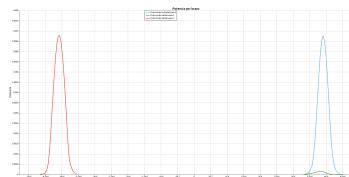
Podemos ver que la potencia solo se transmite en uno de los casos de manera significativa y es para el signal. Normalizando las potencias y dividiendolas tenemos que para el signal se acopla 96,7% del modo, para el pump 3,9% por lo que casi no se transmite y para el Idler 3,3% por lo que tampoco se transmite mucho.

2. Acoplador Direccional 2 (Idler)

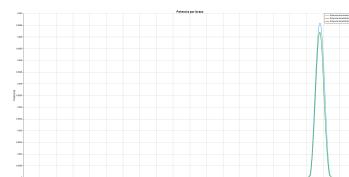
La siguiente tabla muestra los parámetros relevantes para el acoplador direccional 2, utilizado para separar la componente de idler:

Parámetro	Valor
Longitud de acoplamiento L_c [μm]	460
Gap [μm]	0.185
Y-Span [μm]	8
Ancho A_{nc} [μm]	0.5

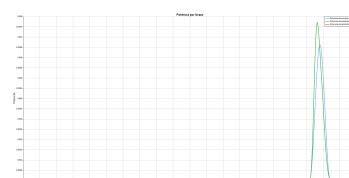
Tabla II: Parámetros del acoplador direccional 2 para el idler.



(a) Comparacion de potencias por brazo para el modo señal



(b) Comparacion de potencias por brazo para el modo Pump



(c) Comparacion de potencias por brazo para el modo Idler

Figura 8: comparacion de potencias por brazo para cada modo

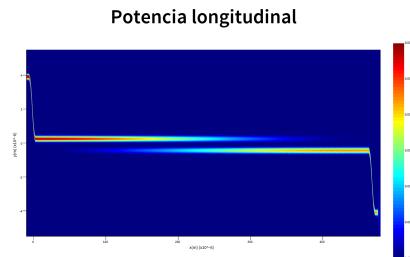


Figura 9: Propagacion y separacion del modo Pump en el segundo acoplador direccional

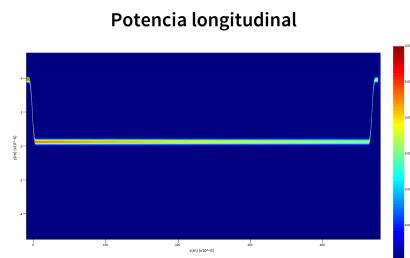


Figura 10: Propagacion del modo Idler en el segundo acoplador direccional

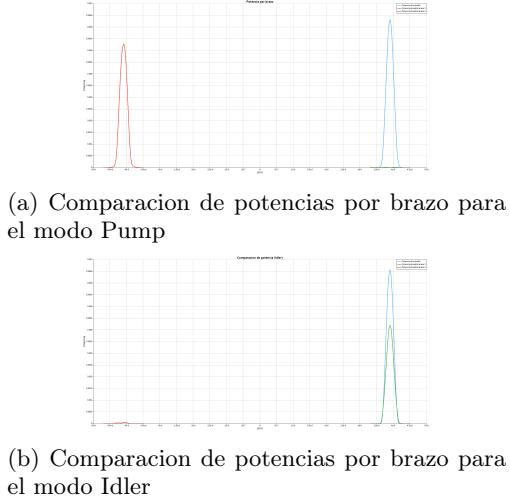


Figura 11: comparacion de potencias por brazo para cada modo

Podemos ver que la potencia solo se transmite en uno de los casos de manera significativa y es para el Pump. Normalizando las potencias y dividiéndolas tenemos que para el pump 97,2 % por lo que se transmite en su mayoría y para el Idler 0,8 % por lo que no se transmite.

Los acopladores fueron diseñados para separar las componentes de señal e idler, todos con eficiencias superiores al 95 %

C. Circuito fotonico integrado

V. DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO

El circuito diseñado comienza con el proceso de *mezclado de cuatro ondas espontáneo (SFWM)* en una guía de onda de *nitruro de silicio (SiN)*, donde se generan pares de fotones entrelazados a partir de un campo de bombeo. Estos fotones de señal e idler son inicialmente generados en la misma guía de onda. A continuación, las componentes de señal e idler se separan utilizando *acopladores direccionales*, lo que permite dirigir cada componente a diferentes rutas dentro del circuito.

Luego, los fotones separados son enviados a través de *espejos de Bragg*, que estabilizan la fase de las componentes y permiten controlar la *cuadratura*

ra comprimida de la luz. Este proceso asegura que la señal e idler estén alineadas de acuerdo con las condiciones de emparejamiento de fase.

Finalmente, el circuito utiliza un *oscilador paramétrico* para amplificar la señal de una de las cuadraturas, reforzando la intensidad de la señal comprimida. Después de este paso, las componentes se vuelven a separar y son dirigidas a sus respectivos detectores o elementos de medida para ser utilizadas en aplicaciones cuánticas o de metrología.

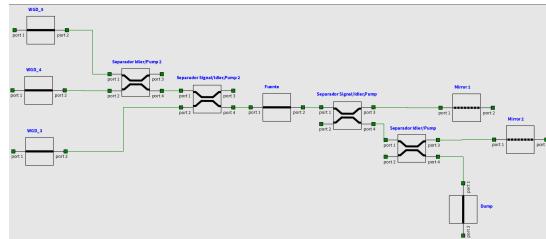


Figura 12: Circuito fotónico para generacion de luz comprimida completa

VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El diseño del circuito fotónico integrado permitió obtener un estado de luz comprimida con eficiencia superior al 95 % en la separación de las componentes de señal e idler. Sin embargo, el principal desafío sigue siendo la implementación experimental del circuito, donde factores como la disipación térmica y la precisión podrían afectar la eficiencia global del sistema. Además, aunque los resultados fueron prometedores en simulaciones, se requiere una validación experimental para confirmar el rendimiento en condiciones reales.

El trabajo futuro podría incluir la optimización de la geometría de la guía de onda y los acopladores para mejorar aún más la eficiencia y la compresión espectral. También se podrían explorar nuevas configuraciones de espejos de Bragg para mejorar la estabilidad de la fase a lo largo de todo el proceso de SFWM. De manera adicional, la implementación de este sistema en plataformas fotónicas integradas comerciales podría permitir la creación de fuentes cuánticas compactas para aplicaciones en computación cuántica y sensores cuánticos.

VII. ANEXOS

Los archivos complementarios de este trabajo (código de simulación, presentaciones y documentos adicionales) se encuentran disponibles en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/10E2EKEodDhg71qz0ZdZRypmcQZ7REJIo?usp=sharing>

<https://github.com/a01733818/Reto-Luz-comprimida.git>

- [1] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden, “Quantum cryptography,” *Rev. Mod. Phys.* **74**, 145 (2002).
- [2] J. H. Shapiro, “Photonic quantum information processing,” *Quantum Electronics* **41**, 211-221 (2005).
- [3] M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maître, A. Dreifus, and C. Fabre, “Squeezing of vacuum in a cavity,” *Phys. Rev. Lett.* **77**, 2818-2821 (1996).
- [4] J. Cervantes, J. Salazar, and A. Garcia, “Generation of squeezed states,” *Quantum Optics*, **6**, 100-105 (2014).
- [5] K. Garay-Palmett, D. Kim, Y. Zhang, F. Domínguez-Serna, V. Lorenz, and A. U'Ren, “Fiber-based photon-pair generation: tutorial,” *J. Opt. Soc. Am. B* **40**, 469–490 (2023).
- [6] J. Park, Y. K. Hwang, and J. Kim, “Photonic integrated quantum light source,” *Nature*, **560**, 412-417 (2017).
- [7] Z. Zhang, X. Guo, and F. Wang, “Compact on-chip sources of quantum light,” *Nature Communications*, **10**, 543 (2019).
- [8] D. F. Walls, “Squeezed states of light,” *Nature*, **306**, 141-146 (1983).