

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA FOTÓNICA COMO TECNOLOGÍA HABILITADORA CLAVE

JUAN MIGUEL IBÁÑEZ DE ALDECOA QUINTANA

Ingeniero Industrial del Estado

El objetivo de este trabajo es describir a la fotónica, como ciencia, pero fundamentalmente, como tecnología, ya que es considerada una de las seis tecnologías habilitadoras clave, en estrecha relación con las tecnologías cuánticas y con la micro y nanoelectrónica. Por lo que respecta a las tecnologías cuánticas, la fotónica es un componente esencial en el desarrollo de estas tecnologías, las cuales aprovechan las propiedades cuánticas de la luz para realizar tareas como la comunicación segura, computación cuántica, criptografía cuántica, detección precisa y creación de redes cuánticas, entre otras. La relación entre la micro y nanoelectrónica y la fotónica radica, p.ej., en su convergencia para abordar problemas y desafíos en la transmisión y procesamiento de información.

Ambas disciplinas se enfocan en la manipulación de señales eléctricas y ópticas, respectivamente, y se complementan mutuamente en diversas aplicaciones. La integración de estas disciplinas permite la creación de sistemas más pequeños, eficientes y de alto rendimiento, que tienen aplicaciones en una amplia variedad de campos. Estas tecnologías tienen el potencial de revolucionar, entre otros, campos como la informática, la criptografía, la detección y la comunicación.

INTRODUCCIÓN ↓

La Comisión Europea, en su misión de mejorar la competitividad de la industria europea y abordar los desafíos sociales, definió seis tecnologías transversales clave para conseguirlo. Una de ellas es la fotónica,

entendida como aquella parte de la ciencia y la ingeniería encargada del manejo de la luz (fotones) y su utilización en cualquier aplicación. En efecto, la fotónica se ocupa del estudio y manipulación de la luz y otras formas de radiación electromagnética, como los rayos X, los rayos gamma y las microondas. La fotónica se centra en la generación, transmisión, detección y manipulación de la luz, y juega un papel fundamental en una amplia variedad de aplicaciones tecnológicas, científicas e industriales.

La fotónica es una disciplina multidisciplinar que combina principios de la física, la ingeniería y la ciencia de los materiales para desarrollar tecnologías y aplicaciones que tienen un impacto significativo en nuestra vida cotidiana y en la investigación científica y tecnológica.

Actualmente la fotónica, sobre todo a través de la utilización de dispositivos como los láseres, LEDs y detectores, está presente en prácticamente todos los sectores de actividad –incluyendo de forma preferente la industria– y habiendo supuesto en muchos de ellos un cambio radical a favor de la eficiencia y la calidad, que, de otra manera, no hubiera sido alcanzable. Como tecnología transversal permite su utilización incluso en sectores donde hace unos años no era contemplada y gracias a su desarrollo y a la I+D(1) está encontrando nuevas aplicaciones en campos tales como la fabricación aditiva o la automoción.¹

En realidad, la fotónica no es inherentemente analógica ni digital, sino que puede utilizarse para implementar sistemas tanto analógicos como digitales. Puede utilizarse para transmitir información de manera analógica o digital, según la aplicación y la forma en que se configuren los sistemas ópticos.

A continuación, se realizan algunas consideraciones sobre el carácter analógico y digital de la fotónica:

- Transmisión analógica: en aplicaciones de transmisión de señales analógicas, como comunicaciones de fibra óptica para transmitir voz, video o datos en tiempo real, la fotónica se utiliza para transportar señales analógicas a través de fibras ópticas. En este caso, la información se representa de manera continua y varía con el tiempo, como una señal de voz o una señal de video.
- Transmisión digital: en aplicaciones digitales, como las comunicaciones de datos en redes de fibra óptica, la información se codifica en forma de señales digitales binarias (0 y 1). Los sistemas fotónicos digitales utilizan técnicas de modulación y demodulación para transmitir datos digitales.
- Procesamiento analógico y digital: los sistemas fotónicos también se utilizan en el procesamiento tanto analógico como digital. Por ejemplo, se pueden implementar procesadores fotónicos analógicos para aplicaciones como el procesamiento de señales en tiempo real, y procesadores fotónicos digitales para aplicaciones que requieren el procesamiento de datos digitales, como el filtrado digital y la multiplicación de números binarios.
- Sensores fotónicos analógicos y digitales: los sensores fotónicos pueden medir magnitudes analógicas, como la intensidad de la luz, o digitales, como patrones de luz y patrones de haces láser para aplicaciones de reconocimiento de patrones.

En resumen, la fotónica es una tecnología versátil que se adapta a una variedad de aplicaciones tanto analógicas como digitales. La elección entre una aplicación analógica o digital dependerá de los requisitos específicos de la aplicación y de cómo

se configuren los sistemas ópticos y fotónicos para cumplir con esos requisitos.

La fotónica es una disciplina de la óptica que apareció en los años 60 del siglo pasado, junto con la invención de los láseres. La fotónica tiene los mismos objetivos que la electrónica, pero utiliza fotones (los cuantos de luz) en vez de electrones. La mayor ventaja de usar fotones es la ausencia de interacciones entre ellos. Como resultado de ello, si las condiciones son las idóneas, los fotones pueden afrontar mejor que los electrones el problema de la transmisión de datos.²

A diferencia de la electrónica donde el dispositivo principal es el transistor, no existe un dispositivo dominante único. Como se verá, la gama de dispositivos requeridos en un chip de baja pérdida de interconexión incluye guías de ondas, divisores de potencia, amplificadores ópticos, moduladores ópticos, filtros, láseres y detectores. Estos dispositivos requieren una variedad de materiales y técnicas de fabricación diferentes, lo que dificulta la realización de todos ellos en un solo chip.³

UN POCO DE HISTORIA ↓

El descubrimiento de que la luz consta de unidades discretas, comenzó como una proposición teórica. Los fotones son las unidades elementales de luz. Fue Einstein quien hizo esta sugerencia durante su año milagroso de 1905. En su hipótesis, se refería a los cuantos de luz. La palabra fotón fue introducida más tarde, en 1925, por el eminente químico Gilbert Lewis. Era una proposición revolucionaria, y no fue bien acogida. La proposición de Einstein se basaba en las investigaciones de Planck. Éste había argumentado que la luz se emitía y absorbía en corpúsculos a raíz de los experimentos en que se medían las emisiones de cuerpos calentados, la llamada radiación del cuerpo negro. Einstein fue más allá e interpretó aquello como prueba de que la luz estaba hecha de corpúsculos. Los fotones son eléctricamente neutros, es decir, poseen carga cero y masa también cero, como se verá posteriormente. El descubrimiento del cuanto de energía en los primeros años del siglo XX proporcionó una explicación del efecto fotoeléctrico y permitió el éxito del modelo cuántico del átomo de Bohr. Este modelo y los otros éxitos de la época contribuyeron a lo que se conoce como teoría cuántica.

Sin embargo, la existencia del cuanto de energía, ya sea en la luz o en los átomos, planteaba un serio problema para la física, ya que era incompatible con la mecánica de Newton y la teoría de ondas electromagnéticas de Maxwell. En estas teorías, la energía es siempre continua e infinitamente divisible. Pero estas teorías clásicas se construyeron sobre la base de eventos que ocurren en el mundo visible a escala humana, desde planetas y estrellas hasta objetos microscópicos. No debería sorprender que la naturaleza pueda comportarse de manera diferente cuando se adentra en territorios muy alejados

de la experiencia cotidiana, como el interior de los átomos o la estructura submicroscópica de cantidades minúsculas de luz.

A mediados de la década de 1920, la comunidad científica tenía claro que los primeros modelos cuánticos, eran fundamentalmente inadecuados y que se necesitaba una nueva teoría para abarcar el mundo cuántico que existía a nivel subatómico, una nueva mecánica cuántica en la que el cuanto estuviese integrado en los cimientos mismos de la física desde el principio. La clave para el desarrollo de la nueva mecánica provino del estudio pormenorizado de los conceptos cuánticos de corpúsculo y onda.

La hipótesis de Einstein de cuantos de luz creaba un dilema. Si bien el trabajo de Einstein indicaba que la luz se comporta como corpúsculos en experimentos como el efecto fotoeléctrico, la luz se comportaba claramente como ondas en el experimento de doble rendija de Young. Cuando un rayo de luz incide en dos rendijas estrechas cercanas, la luz que emerge de cada una de las rendijas interfiere y forma en una pantalla bandas alternas brillantes y oscuras que son características de la interferencia de las ondas. Los corpúsculos no pueden formar este patrón. Además, la teoría electromagnética de Maxwell explicaba la radiación electromagnética como un fenómeno ondulatorio, idea ésta apoyada por el experimento de Young y muchos otros.

Por otro lado, la descripción de Einstein del efecto fotoeléctrico mostraba que la luz se comporta como si consistiera en cuantos de luz parecidos a corpúsculos, más tarde, como se ha indicado, llamados fotones. Cada fotón tiene energía $E = h \cdot f$, donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la luz. El propio Einstein señaló que, dado que los fotones transportan energía, esta energía, mientras el fotón se mueve a la velocidad de la luz, c , es equivalente a una cierta cantidad de masa, de acuerdo con su famosa fórmula $E = m \cdot c^2$. Esta cantidad de masa equivalente es, por tanto, $m = E/c^2$. Pero como se ha indicado anteriormente los fotones no tienen masa, por eso se mueven a la velocidad de la luz. Efectivamente, los fotones son partículas de luz y no tienen masa porque viajan a la velocidad de la luz. Pero, por otra parte, es cierto que es difícil comprender que algo que no tiene masa sí pueda tener energía. Sin embargo, p.ej., imaginando una onda expansiva se puede comprender. Una persona que esté cerca de una explosión siente esa onda expansiva, siente que una fuerza enorme la empuja hacia atrás. Esa onda o perturbación no tiene masa, la tiene el medio por el que se propaga, pero sí tiene energía, no se ve, pero se siente esa energía que empuja hacia atrás. Eso es lo primero que se tiene que tener claro, las ondas tienen energía. Además de una partícula, la luz también es una onda (dualidad onda-corpúsculo), así que tiene energía.

Precisamente de la ecuación (2) $E = m_0 \cdot c^2$, es de dónde viene la duda porque esa ecuación dice que

la energía de un cuerpo en reposo (E) es igual a su masa en reposo (m_0) multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado (c^2). Como esta ecuación necesita la masa para determinar la energía, puede llevar a pensar que un sistema sin masa no puede tener energía, pero no es así. La ecuación anterior solo es aplicable para partículas en reposo y la luz no lo está. Y aquí se llega a la segunda característica de los fotones que permite entender su energía y es que los fotones están siempre en movimiento, no paran quietos. Y en ellos, la energía les viene precisamente de ahí, del propio movimiento. A la cantidad de movimiento se la llama momento lineal y de ese momento lineal es de dónde les viene la energía a los fotones. Para hallarla se sustituye la masa (m) de la ecuación de Einstein por el momento lineal (que en las ecuaciones se llama p) y así se obtiene la cantidad de energía del fotón. Y eso hace que haya fotones como los de la luz visible, la que es capaz de captar el ojo humano, que tienen una energía 10.000 veces menor que, p.ej., la que hay en los rayos X, o millones de veces menor que la de los rayos gamma que producen los elementos radiactivos^v.

En física newtoniana el momento lineal, p , también llamado cantidad de movimiento, de un cuerpo se define como el producto de la masa de ese cuerpo por su velocidad, esto es, $p = m \cdot v$. Sustituyendo m por su equivalente, resulta que el momento es: $p = E \cdot v/c^2$, una ecuación en la que no aparece la masa directamente. Si la aplicamos al fotón, que se desplaza a la velocidad de la luz, $v = c$, resulta que $p = E/c$.

El efecto fotoeléctrico no dice nada del momento del fotón, pero sí de su energía, que como hemos mencionado antes, es $E = h \cdot f$. De donde resulta que podemos expresar el momento lineal de un fotón de frecuencia f como $p = h \cdot f/c$

También se sabe que la frecuencia y la longitud de onda son inversamente proporcionales, y la constante de proporcionalidad es la velocidad, esto es, $f = v/\lambda$, y, en el caso del fotón, $f = c/\lambda$. De donde resulta que el momento lineal del fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda, $p = h/\lambda$.^v

Para finalizar, es necesario señalar que cuando los fotones se encuentran en el interior de un material superconductor, su masa cambia de cero a un valor minúsculo pero distinto de cero. El valor varía en función del superconductor, pero suele ser de una millonésima de la masa de un electrón. De hecho, para los físicos más refinados, el hecho de que los fotones adquieran masa es la esencia misma de la superconductividad.^{vi}

MATERIALES FOTÓNICOS ↓

Así como en la micro y nanoelectrónica el material por excelencia es el silicio en la fotónica existen tam-

bién otras alternativas. De hecho, una de las ventajas de la electrónica sobre la fotónica, es que prácticamente solamente utiliza silicio. El silicio en sí mismo no genera luz de manera natural. El silicio es un material semiconductor ampliamente utilizado en la industria de la electrónica y la fotónica debido a sus propiedades eléctricas y ópticas, pero no es intrínsecamente luminiscente como un diodo emisor de luz (LED) o un diodo láser. Además, la electrónica es una tecnología madura con décadas de desarrollo y optimización, lo que ha llevado a la producción de componentes electrónicos altamente confiables y económicos.

Es importante tener en cuenta que la elección entre micro y nanoelectrónica y fotónica depende de las necesidades específicas de una aplicación. La fotónica tiene sus propias ventajas, como la alta velocidad de transmisión de datos y la capacidad de transmitir información a largas distancias con mínima pérdida de señal. Por lo tanto, la elección entre estas tecnologías se basa en los requisitos particulares de la aplicación y en la optimización de las ventajas de cada una.

Volviendo a los materiales fotónicos se pueden definir como aquellos que interactúan con la luz y tienen propiedades ópticas útiles para diversas aplicaciones, desde comunicaciones y sensores hasta tecnologías cuánticas y dispositivos ópticos avanzados. Algunos materiales fotónicos clave son:

- Silicio (Si): el silicio es uno de los materiales más utilizados en fotónica, especialmente en aplicaciones de guías de onda y componentes ópticos integrados en chips. El silicio es transparente en la mayoría del espectro visible e infrarrojo cercano y es compatible con la tecnología de fabricación de semiconductores.
- Nitruro de silicio (Si_3N_4): el nitruro de silicio es otro material importante en fotónica, conocido por su baja disipación de energía y pérdidas ópticas controladas. Se utiliza en guías de onda, componentes ópticos y sistemas fotónicos avanzados.
- Arseniuro de galio (GaAs): el GaAs es un material semiconductor utilizado en dispositivos optoelectrónicos, como diodos láser y moduladores, debido a sus propiedades de emisión de luz coherente.
- Diamante: el diamante contiene defectos de centros de color, como el centro de nitrógeno-vacante (NV), que emiten fotones individuales y son útiles en aplicaciones de sensores cuánticos y comunicación cuántica.
- Óxidos de semiconductores: algunos óxidos de semiconductores, como el óxido de zinc (ZnO) y el óxido de titanio (TiO_2), tienen propiedades fotónicas interesantes y se utilizan en dispositivos ópticos y sensores.

- Polímeros fotónicos: los polímeros pueden ser diseñados para tener propiedades ópticas específicas y se utilizan en dispositivos fotónicos como moduladores y guías de onda.
- Fotónica en cristales líquidos: los cristales líquidos pueden ser manipulados eléctricamente para cambiar sus propiedades ópticas y se utilizan en pantallas LCD, moduladores y otros dispositivos.
- Fotónica en materiales magneto-ópticos: los materiales magneto-ópticos cambian sus propiedades ópticas en respuesta a campos magnéticos y se utilizan en aplicaciones de detección y modulación.
- Materiales no lineales: los cristales no lineales, como el bario boro silicato (BBO) y el niobato de litio (LiNbO_3), se utilizan en la generación de fotones no lineales y en conversión de frecuencia.
- Materiales fotónicos en estado sólido: los materiales en estado sólido, como los vidrios dopados con iones de tierras raras, se utilizan en láseres y amplificadores de fibra óptica debido a sus propiedades de emisión de luz.
- Metales plasmónicos: Los metales como el oro y la plata pueden interactuar fuertemente con la luz a través de excitaciones plasmónicas de superficie. Se utilizan en aplicaciones de nanoóptica y sensores.

Estos son solo algunos ejemplos de materiales fotónicos utilizados en diversas aplicaciones en fotónica y óptica. La elección del material depende de la aplicación específica y de las propiedades ópticas requeridas. La fotónica es un campo multidisciplinar en constante evolución que aprovecha una amplia gama de materiales para desarrollar tecnologías avanzadas.

RELACIÓN ENTRE LA FOTÓNICA Y LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS ↓

La fotónica y las tecnologías cuánticas están estrechamente relacionadas y a menudo se superponen en diversos campos. La relación principal entre ellas radica en el uso de propiedades cuánticas de la luz, como la superposición y el entrelazamiento cuántico, para aplicaciones tecnológicas. Ambas áreas se centran en el estudio y la manipulación de la luz y los fotones, y comparten una serie de aplicaciones y tecnologías. Aquí hay algunas formas en que estas dos áreas se relacionan:

- Computación cuántica fotónica: en lugar de utilizar cúbits basados en estados cuánticos de partículas, como electrones o átomos, la computación cuántica fotónica utiliza cúbits fotónicos. Los fotones son ideales para la transmisión de información cuántica debido a su falta de interacción con el entorno. Los circuitos cuánticos fotónicos pueden manipular cúbits de luz

para realizar cálculos cuánticos y tienen el potencial de ser más robustos y escalables que otras implementaciones de la computación cuántica. Los cúbits fotónicos son una forma de almacenar y procesar información cuántica y son prometedores debido a su capacidad para transmitir información a larga distancia a través de redes de fibra óptica.

La creación y manipulación de cúbits fotónicos en sistemas de computación cuántica presenta varios desafíos debido a las propiedades únicas de los fotones y las interacciones que tienen con su entorno. Aquí se presentan algunos de los problemas comunes asociados con la implementación de cúbits fotónicos:

- Detección y pérdidas: los fotones son débilmente interactuantes con su entorno, lo que hace que su detección sea un desafío. La pérdida de fotones debido a reflexiones, dispersión o absorción en componentes ópticos puede reducir la calidad de los cúbits fotónicos y afectar la eficiencia de los sistemas.
- Interacción no lineal débil: las interacciones entre fotones en medios no lineales son inherentemente débiles. Para realizar operaciones lógicas cuánticas, es necesario amplificar estas interacciones, lo que puede requerir componentes ópticos especiales y altas intensidades de luz, lo que a su vez puede aumentar las pérdidas.
- Fuentes de fotones individuales: la creación de fuentes confiables de fotones individuales es un desafío técnico importante. Se han desarrollado fuentes de fotones individuales, como los puntos cuánticos y los centros de color en diamantes, pero aún pueden ser difíciles de fabricar y controlar con precisión.
- Cúbits no fijos en posición: A diferencia de los cúbits en otras implementaciones (como los cúbits superconductores), los cúbits fotónicos no están fijos en una ubicación física. Esto puede dificultar el control y la manipulación precisa de los cúbits fotónicos.
- Mediciones no destructivas: la medición de cúbits fotónicos generalmente destruye el estado cuántico del fotón. Esto complica la realización de mediciones repetidas en el mismo cúbit sin necesidad de regeneración, lo que puede requerir recursos adicionales.
- Dificultad en la generación de estados entrelazados: La creación de estados entrelazados de fotones (necesarios para muchas aplicaciones cuánticas) puede ser técnicamente complicada debido a la débil interacción entre fotones y a la necesidad de manipulaciones precisas.
- Error y corrección de errores: Los cúbits fotónicos también son susceptibles a errores causados por imperfecciones en los componentes ópticos y

las pérdidas. La corrección de errores cuánticos es un desafío importante para lograr la fiabilidad en la computación cuántica fotónica.

A pesar de estos desafíos, la computación cuántica fotónica sigue siendo un campo activo de investigación y desarrollo. Los investigadores están trabajando en soluciones para superar estos obstáculos y aprovechar las ventajas únicas de los cúbits fotónicos, como su velocidad de transmisión, resistencia a interferencias y capacidad de procesamiento paralelo, para aplicaciones cuánticas prometedoras en comunicaciones seguras, simulación cuántica y más.

- Comunicación cuántica fotónica: la comunicación cuántica se basa en la manipulación y transmisión de información cuántica, y los fotones son la elección natural para este propósito debido a su capacidad para llevar información cuántica a largas distancias sin degradación significativa. La fotónica es fundamental para la seguridad en las comunicaciones cuánticas y para la implementación de protocolos cuánticos como la criptografía cuántica.
- Criptografía cuántica: La criptografía cuántica es una aplicación importante de la fotónica y las tecnologías cuánticas. Utiliza principios cuánticos para garantizar la seguridad de las comunicaciones al permitir la detección de cualquier intento de interceptación de información. La generación y la detección de fotones individuales son componentes clave en los sistemas de criptografía cuántica.
- Detección y sensores cuánticos fotónicos: los sistemas de detección y sensores cuánticos a menudo utilizan tecnologías fotónicas para medir con alta precisión diversas magnitudes cuánticas o cuasi cuánticas. Esto es crucial en aplicaciones como la detección de partículas subatómicas o la medición de campos magnéticos extremadamente débiles. Además, los sensores cuánticos pueden medir con extrema precisión parámetros como el tiempo, la temperatura, la presión y el campo magnético utilizando efectos cuánticos y fotónicos.
- Microscopía cuántica fotónica: las técnicas de microscopía cuántica, como la microscopía de correlación de fotones y la microscopía de fuerza atómica cuántica, utilizan fotones para obtener imágenes a nivel cuántico de muestras biológicas y materiales. Esto puede proporcionar información detallada sobre la estructura y las propiedades de los objetos estudiados.
- Generación de estados cuánticos fotónicos: las tecnologías fotónicas se utilizan para generar estados cuánticos de fotones, como pares de fotones entrelazados o fotones en estados superpuestos, que son esenciales para experimentos y aplicaciones en informática cuántica, criptografía cuántica y teleportación cuántica.

- Metrología cuántica fotónica: la metrología cuántica a menudo involucra el uso de tecnologías fotónicas para realizar mediciones extremadamente precisas de magnitudes físicas. La interferometría cuántica es un ejemplo de cómo los efectos cuánticos de los fotones se utilizan para mediciones precisas de longitud y tiempo.
- Teleportación cuántica o entrelazamiento cuántico: la teleportación cuántica es un fenómeno en el que el estado cuántico de un fotón se transfiere instantáneamente a otro fotón, independientemente de la distancia entre ellos. Este concepto es un tema central en la investigación cuántica y se basa en la manipulación precisa de fotones.
- Entrelazamiento cuántico: el entrelazamiento cuántico es un fenómeno en el que dos o más partículas cuánticas, como fotones, están correlacionadas de manera que el estado de una está instantáneamente relacionado con el estado de la otra, independientemente de la distancia entre ellas. Esto se utiliza en aplicaciones como la teletransportación cuántica y la distribución de claves cuánticas en criptografía cuántica.

La teleportación cuántica y el entrelazamiento cuántico son dos conceptos relacionados en el campo de la física cuántica, pero no son lo mismo. Ambos conceptos involucran propiedades extrañas y fundamentales de la mecánica cuántica, pero tienen diferentes aplicaciones y significados. El entrelazamiento cuántico es un fenómeno en el que dos partículas subatómicas, como electrones o fotones, se vuelven correlacionadas de manera que el estado cuántico de una partícula está intrínsecamente ligado al estado de la otra, sin importar la distancia que las separe. Esto significa que, si se mide una de las partículas, instantáneamente se sabe algo sobre la otra partícula, incluso si están separadas por años luz.

El entrelazamiento cuántico es un concepto fundamental en la física cuántica y ha sido confirmado experimentalmente en numerosos experimentos. La teleportación cuántica es un protocolo cuántico que permite la transferencia de información cuántica (el estado cuántico exacto de una partícula) de un lugar a otro, utilizando entrelazamiento cuántico y comunicación clásica. En este proceso, el estado cuántico de una partícula se «teletransporta» de una ubicación a otra sin que la partícula misma se mueva físicamente. Es importante destacar que la teleportación cuántica no implica la transferencia instantánea de objetos o materia física, sino la transferencia de información cuántica.

En resumen, la fotónica y las tecnologías cuánticas comparten un enfoque en el estudio y la manipulación de la luz y los fotones, y se complementan entre sí en una variedad de aplicaciones. La investigación

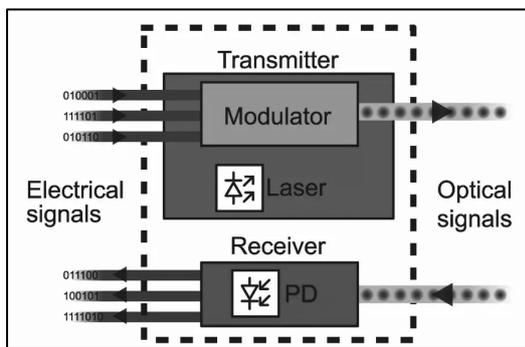
y el desarrollo en ambas áreas están impulsando avances significativos en la ciencia y la tecnología, con aplicaciones que van desde la criptografía segura hasta la computación cuántica y la detección de alta precisión.

RELACIÓN ENTRE LA FOTÓNICA Y LA MICRO Y NANO ELECTRÓNICA ↓

La tecnología fotónica sustituye los electrones por fotones, las partículas que componen la luz. De este modo, los microprocesadores de los dispositivos pasan de depender de señales eléctricas a utilizar la luz como conductora de información. La tecnología fotónica presenta las siguientes ventajas:

- Velocidad de transmisión: la fotónica utiliza la luz para transmitir información en lugar de electrones, lo que permite velocidades de transmisión mucho más altas. La luz viaja a la velocidad de la luz en el vacío, lo que es significativamente más rápido que la corriente eléctrica en un conductor. La sustitución de los electrones por fotones permitirá una velocidad de procesamiento más rápida.
- Mayor ancho de banda: la tecnología fotónica puede proporcionar un ancho de banda considerablemente mayor en comparación con la electrónica convencional. Esto es crucial para aplicaciones que requieren la transmisión de grandes cantidades de datos a alta velocidad.
- Menos disipación de energía: la transmisión óptica tiene menos pérdida de energía en forma de calor en comparación con la electrónica, lo que conduce a una mayor eficiencia energética y a la reducción de problemas de calentamiento en dispositivos y sistemas. Los productos construidos con esta tecnología consumirán menos batería.
- Menor interferencia electromagnética: los sistemas fotónicos son menos susceptibles a interferencias electromagnéticas y, por lo tanto, pueden funcionar mejor en entornos ruidosos o con interferencias.
- Compatibilidad con fibras ópticas: la tecnología fotónica es altamente compatible con las fibras ópticas, lo que facilita la transmisión de señales a largas distancias con pérdidas mínimas.
- Comunicación segura: la transmisión óptica es difícil de interceptar, lo que la hace más segura para aplicaciones que requieren alta seguridad de datos.
- Menor tamaño y peso: Los componentes fotónicos pueden ser más pequeños y livianos que sus contrapartes electrónicas, lo que es beneficioso para aplicaciones en las que el tamaño y el peso son críticos, como en dispositivos portátiles y aeroespaciales.

FIGURA 1
CONVERSIÓN DE SEÑALES ELÉCTRICAS EN SEÑALES
ÓPTICAS Y VICEVERSA



Fuente: Transceptor-fotonica.webbp.

- Durabilidad: Los componentes fotónicos a menudo tienen una vida útil más larga y son menos susceptibles a desgastes mecánicos y corrosión en comparación con los componentes electrónicos.

De hecho, los fotones fueron la siguiente partícula elemental que se descubrió después de los electrones. La relación entre la fotónica y la micro y nanoelectrónica es fundamental en el desarrollo de tecnologías avanzadas que abarcan desde la comunicación óptica hasta la fabricación de dispositivos más pequeños y eficientes. Pero más que sustituir a la electrónica, ambas tecnologías se complementarán. Aquí se describen algunas de las formas en que estas disciplinas se relacionan:

- Comunicaciones ópticas: La fotónica y la micro y nanoelectrónica se combinan en la fabricación de dispositivos para comunicaciones ópticas de alta velocidad. Los circuitos electrónicos permiten controlar y acondicionar las señales ópticas, mientras que los componentes fotónicos, como los láseres y moduladores ópticos, generan y transmiten la luz a través de fibras ópticas. Esto es esencial para la transmisión de datos a larga distancia a velocidades extremadamente altas en redes de comunicaciones.

En la figura 1 se observa, además de un láser y un modulador en el lado del transmisor, un fotodiodo (PD) en el lado del receptor, que es un dispositivo semiconductor que convierte la luz incidente en una señal eléctrica. Es una forma común de detector de luz y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde sistemas de comunicación óptica hasta sensores de luz en dispositivos electrónicos. Los fotodiodos funcionan según el principio de efecto fotoeléctrico. Cuando la luz incide en el fotodiodo, los fotones que componen la luz excitan electrones en el material semiconductor del fotodiodo.

Estos electrones excitados crean pares electrón-hueco (carga positiva) en el material. La separación y

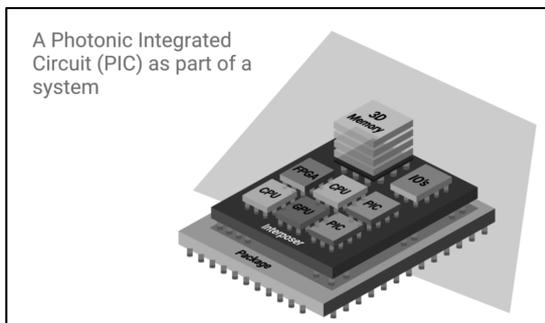
migración de estos pares electrón-hueco bajo la influencia de un campo eléctrico interno en el fotodiodo generan una corriente eléctrica, que es proporcional a la intensidad de la luz incidente. Los fotodiodos son componentes esenciales en muchas aplicaciones donde se necesita detectar, medir o controlar la luz de manera precisa y confiable. Vienen en diversas formas y tamaños para adaptarse a una variedad de necesidades y aplicaciones.

- Procesamiento de señales: En la nanoelectrónica, se fabrican circuitos y dispositivos a una escala extremadamente pequeña, en la que las dimensiones de los componentes son del orden de nanómetros. La fotónica se utiliza para el procesamiento de señales a alta velocidad, y su integración con la nanoelectrónica puede mejorar significativamente el rendimiento de los sistemas de procesamiento de señales, como las redes neuronales artificiales y el procesamiento de imágenes.
- Sensores y detección: En la fabricación de sensores a nivel micro y nanoelectrónico, se pueden integrar componentes fotónicos para mejorar la sensibilidad y precisión de los sensores. Por ejemplo, los sensores de fotodiodo nanométricos pueden detectar luz con alta eficiencia y resolución, lo que es esencial para aplicaciones como la detección de luz en cámaras y sensores de imagen.
- Energía: en la micro y nanoelectrónica, se investigan y desarrollan dispositivos como las células solares a nanoescala para la conversión de energía solar en electricidad. La fotónica juega un papel importante en la captura eficiente de la luz solar y su conversión en energía eléctrica mediante la integración de materiales fotovoltaicos y la optimización de la estructura de las células solares.
- Fabricación avanzada: la nanoelectrónica y la fotónica comparten métodos avanzados de fabricación y tecnologías de procesamiento, como la litografía y la deposición de materiales. Estos métodos son esenciales para la creación de dispositivos y sistemas a escala micro y nano.

En resumen, la relación entre la fotónica y la micro y nanoelectrónica es esencial para el desarrollo de tecnologías avanzadas en diversas áreas, incluyendo las comunicaciones ópticas, el procesamiento de señales, los sensores y la energía, entre otras. La integración de estas disciplinas permite la creación de sistemas más pequeños, eficientes y de alto rendimiento que tienen aplicaciones en una amplia variedad de campos.

Además, y por lo que respecta a la fotónica, la micro y nanofotónica son subcampos de la fotónica que se centran en la manipulación y control de la luz a escalas micro y nanométricas. Estos campos aprovechan las propiedades de la luz a escalas muy

FIGURA 2
CIRCUITO INTEGRADO FOTÓNICO



Fuente: <https://www.photondelta.com/news/what-is-a-photonic-integrated-circuit/>

pequeñas y tienen aplicaciones en una amplia variedad de áreas, incluyendo la tecnología de comunicaciones, la computación cuántica, la detección, la medicina y la energía.

Finalmente, es importante destacar que la elección entre fotónica y micro y nanoelectrónica depende de la aplicación específica y de los requisitos del sistema. En muchos casos, estas tecnologías se utilizan de manera complementaria para aprovechar sus respectivas ventajas y superar sus limitaciones, como se verá seguidamente.

FOTÓNICA INTEGRADA ▼

La fotónica integrada se refiere a la integración de componentes y circuitos fotónicos en un solo sustrato o chip, de manera similar a cómo se integran los componentes electrónicos en los circuitos integrados en la micro y nanoelectrónica. Esta tecnología se utiliza para manipular la luz y las señales ópticas en aplicaciones que van desde las comunicaciones hasta la computación y la detección. Más en concreto, la integración fotónica se refiere a la combinación de múltiples componentes fotónicos, como guías de onda, moduladores, detectores, etc., en un solo sustrato para crear circuitos y sistemas ópticos compactos y altamente funcionales.

En Bell Laboratories se realizó un trabajo pionero en este campo. Los centros académicos de excelencia de circuitos integrados fotónicos más notables en fosforo de indio (InP) son la Universidad de California en Santa Bárbara, EE.UU., y la Universidad Tecnológica de Eindhoven en los Países Bajos. Muchas de las aplicaciones construyen estos sistemas con componentes ópticos discretos, (p.ej. en transmisiones, un láser con su terminación de fibra, conectado a un modulador, este al medio y posteriormente al detector), pero cada vez, más y más, muchas aplicaciones hacen uso de la fotónica integrada, donde la luz está confinada en una estructura de múltiples capas y materiales, adecuadamente patronada para ello. En la figura 2 se muestra un ejemplo de micro-chip fotónico (PIC, 'Photonic Integrated

Circuit') y la estructura de capas y materiales con las que está construido. Esta es la versión análoga a los circuitos electrónicos integrados que desde hace algunas décadas ocupan un lugar prominente en nuestro entorno cotidiano: televisores, ordenadores, teléfonos móviles, entre otros.

Existen varias tecnologías de integración fotónica que permiten la fabricación de dispositivos fotónicos integrados. A medida que la tecnología fotónica integrada madura y se vuelve más accesible, puede ofrecer ventajas en términos de eficiencia en costes, al consolidar múltiples funciones en un solo dispositivo o chip, lo que reduce la complejidad y los costes de producción. Además, la fotónica integrada juega un papel clave en la creación de sistemas avanzados y complejos, como sistemas de comunicación de próxima generación, sistemas de radar y LIDAR, sistemas de procesamiento de señales y computación cuántica, entre otros.

Algunas de las tecnologías más comunes incluyen:

- **Silicon Photonics (SiPh):** la fotónica integrada de silicio (SiPh) que por su importancia se detallará más en el apartado siguiente, se basa en la fabricación de componentes fotónicos directamente en un sustrato de silicio. SiPh ha ganado una gran atención debido a su capacidad para integrar dispositivos ópticos y electrónicos en un solo chip de silicio, lo que lo hace especialmente adecuado para aplicaciones en comunicaciones ópticas y centros de datos.
- **III-V Photonics:** en lugar de silicio, esta tecnología utiliza compuestos III-V (como arseniuro de galio, fosforo de indio y otros) para fabricar dispositivos fotónicos integrados. Estos materiales tienen propiedades ópticas superiores en comparación con el silicio y se utilizan en láseres, moduladores y detectores de alta velocidad.
- **Polímeros y Materiales Orgánicos:** los polímeros y los materiales orgánicos se han utilizado en la fabricación de dispositivos fotónicos integrados, especialmente para aplicaciones en sensores ópticos y pantallas flexibles. Estos materiales son flexibles y tienen propiedades ópticas ajustables, lo que los hace adecuados para aplicaciones específicas.
- **Fibras Ópticas Integradas (IOF):** en lugar de usar un sustrato plano, la IOF utiliza fibras ópticas como plataforma para integrar componentes fotónicos. Esto es útil en aplicaciones donde se requieren dispositivos compactos y flexibles, como sensores y sistemas de detección en línea.
- **Silicio sobre Aislante (SOI):** esta tecnología utiliza una capa de silicio depositada sobre un aislante, como óxido de silicio, para fabricar componentes fotónicos. El SOI se utiliza comúnmente en aplicaciones de fotónica de silicio, como guías de onda y moduladores.

- *Waveguide-Integrated Photonics*: esta tecnología se centra en la fabricación de componentes fotónicos en guías de onda ópticas, que son estructuras que guían y enrutan la luz. Estas guías de onda se pueden integrar en una variedad de sustratos, incluido el silicio, para crear sistemas fotónicos integrados.
- Fotónica de Nanocristales y Cuántica: las estructuras basadas en nanocristales y tecnologías cuánticas permiten la creación de dispositivos fotónicos altamente compactos y avanzados que se utilizan en aplicaciones como la criptografía cuántica y la comunicación cuántica.

Estas tecnologías de integración fotónica se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, que van desde las comunicaciones ópticas de alta velocidad hasta los sensores y sistemas de detección en línea, y son esenciales para el desarrollo de la fotónica en la industria moderna. Cada una tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la elección de la tecnología depende de las necesidades específicas de la aplicación. Las tecnologías de integración fotónica se han extendido en la última década mediante modelos de fundición que reflejan los desarrollos de la industria de circuitos electrónicos integrados del siglo pasado. Como se ha visto, existen varias tecnologías monolíticas, basadas en silicio y semiconductores III-V.

La fotónica integrada es necesaria por varias razones fundamentales, y su importancia radica en su capacidad para superar desafíos y aprovechar oportunidades en diversas aplicaciones. Algunas de las razones por las cuales la fotónica integrada es esencial incluyen:

- **Miniaturización:** con la creciente demanda de dispositivos más pequeños y livianos, la fotónica integrada permite la miniaturización de componentes ópticos y electrónicos. Esto es especialmente valioso en aplicaciones como la electrónica portátil, los dispositivos médicos implantables y los sistemas aeroespaciales, donde el espacio es limitado. En efecto, al integrar componentes fotónicos en un solo chip, es posible reducir significativamente el tamaño y la complejidad, permitiendo la creación de dispositivos más pequeños y eficientes.
- **Mayor velocidad y ancho de banda:** la fotónica integrada permite la transmisión de datos a velocidades extremadamente altas y con un ancho de banda significativamente mayor en comparación con las tecnologías puramente electrónicas. Esto es crucial para aplicaciones que requieren transmisión de datos de alta velocidad, como la comunicación de datos de alta velocidad, la computación de alto rendimiento y la Internet de las cosas (IoT).
- **Menor consumo de energía:** la fotónica integrada puede ser más eficiente en términos energé-

ticos en comparación con la electrónica tradicional, lo que es beneficioso para dispositivos alimentados por batería y sistemas que buscan ser más eficientes desde el punto de vista energético. La luz puede propagarse a través de guías de onda con pérdidas mínimas, lo que reduce la disipación de energía en forma de calor.

- **Mayor confiabilidad:** al integrar componentes fotónicos en un solo sustrato, se reduce la necesidad de interconexiones eléctricas y conexiones de cableado, lo que disminuye la probabilidad de fallos y aumenta la confiabilidad de los sistemas.
- **Interconexión a larga distancia:** La fotónica integrada es esencial para la construcción de redes de comunicación de alta velocidad y centros de datos, donde la transmisión de datos a larga distancia sin degradación de la señal es crítica.
- **Aplicaciones variadas:** la fotónica integrada se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, que incluyen comunicaciones ópticas, sensores, procesamiento de señales ópticas, espectroscopia, y más. También se utiliza en la industria de la medicina para aplicaciones como la detección de biomarcadores y la imagen médica. En los sistemas electrónicos tradicionales, las interconexiones eléctricas pueden ser limitantes en términos de velocidad y eficiencia. La fotónica integrada permite interconexiones ópticas de alta velocidad y baja latencia entre componentes y chips, lo que es especialmente importante en la interconexión de centros de datos y supercomputadoras.

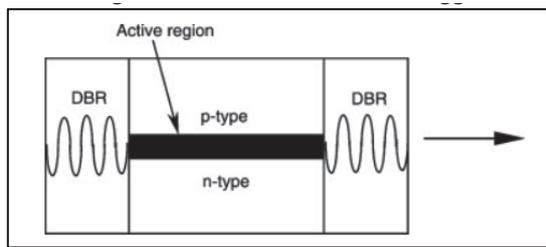
En resumen, la fotónica integrada es esencial para abordar desafíos tecnológicos y para aprovechar oportunidades en una variedad de aplicaciones. Su capacidad para combinar funcionalidades electrónicas y ópticas en un solo chip o dispositivo la convierte en una tecnología crítica para la próxima generación de dispositivos y sistemas en campos como las comunicaciones, la informática, la medicina, la detección y más.

FOTÓNICA INTEGRADA DE SILICIO ↓

La fotónica integrada de silicio, a menudo conocida como SiPh (*Silicon Photonics* en inglés), es una tecnología que combina componentes fotónicos y electrónicos en un solo sustrato de silicio. Esta tecnología ha demostrado ser fundamental en la industria de la comunicación y la información al permitir la transmisión, manipulación y detección de señales ópticas utilizando circuitos miniaturizados y altamente integrados en chips de silicio.

De hecho, la mayoría de los chips fotónicos integrados se basan en sustratos de silicio debido a la capacidad de integración de componentes electrónicos y ópticos en un solo material. El sustrato de silicio

FIGURA 3
LÁSER DE REFLECTOR BRAGG



Fuente: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/dbr-lasers>

puede ser de una o varias capas y proporciona la base para construir los componentes fotónicos.

En el chip fotónico, se integran componentes fotónicos como guías de onda, moduladores, detectores, amplificadores, divisores de haces, conmutadores ópticos, filtros y multiplexores, entre otros. Estos componentes se fabrican directamente en el sustrato de silicio del chip y son responsables de procesar y manipular la luz. De hecho, aunque el silicio no es un material naturalmente óptico, se han desarrollado técnicas para guiar y manipular la luz en estructuras de silicio a través de cambios en la refracción. De hecho, un desarrollo de 2005 mostró que el silicio puede, aunque es un material de banda prohibida indirecta, todavía ser utilizado para generar luz láser a través de la no linealidad Raman. Dichos láseres no son accionados eléctricamente sino ópticamente y, por lo tanto, todavía necesitan una fuente de láser de bomba óptica adicional.

Algunos aspectos clave de la fotónica integrada de silicio serían los siguientes:

- Integración con la electrónica: uno de los beneficios clave de la fotónica integrada de silicio es su capacidad para integrar componentes ópticos con circuitos electrónicos en un solo chip. Esto permite una comunicación eficiente entre señales ópticas y electrónicas, lo que es esencial en aplicaciones como transceptores de comunicaciones ópticas y sensores.
- Comunicaciones ópticas: la fotónica integrada de silicio se ha utilizado en la creación de transceptores ópticos de alta velocidad que son esenciales en las redes de comunicaciones de alta velocidad, como centros de datos y redes de fibra óptica de larga distancia. Estos dispositivos pueden transmitir datos a velocidades de varios gigabits por segundo y más.
- Detección óptica y sensores: los detectores de silicio integrados se utilizan en aplicaciones de detección óptica, como sensores de temperatura, presión y espectroscopia. La capacidad de integrar múltiples componentes ópticos en un solo chip permite la creación de sistemas de sensores compactos y de alto rendimiento.

- Aplicaciones en computación y datos: la fotónica integrada de silicio también se ha explorado para aplicaciones en la computación, incluida la comunicación de datos entre chips y la interconexión de alta velocidad en sistemas de cómputo cuántico.
- Eficiencia energética: en comparación con algunas tecnologías ópticas tradicionales, la fotónica integrada de silicio puede ofrecer ventajas significativas en términos de consumo de energía y tamaño, lo que la hace atractiva para aplicaciones de baja potencia y portátiles.

En definitiva, la fotónica integrada de silicio es un campo de rápido crecimiento que ha revolucionado la forma en que se transmiten, procesan y detectan las señales ópticas en una variedad de aplicaciones. Su capacidad para integrar componentes fotónicos con circuitos electrónicos en un chip de silicio ha impulsado avances significativos en la tecnología de la información y las comunicaciones.

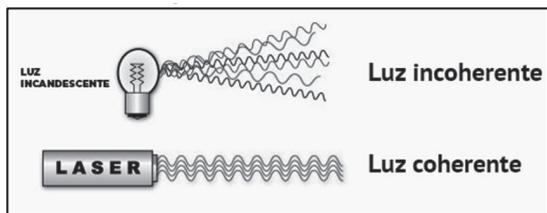
CIRCUITOS INTEGRADOS FOTÓNICOS (PICS) ↓

Un circuito integrado fotónico o *Photonic Integrated Circuit (PIC)* o circuito óptico integrado es un dispositivo que integra múltiples (al menos dos) funciones fotónicas y, como tal, es similar a un circuito integrado electrónico. La principal diferencia entre los dos es que un circuito integrado fotónico proporciona funciones para señales de información impuestas en longitudes de onda ópticas típicamente en el espectro visible 380 a 750 nm o en el infrarrojo cercano de 850 nm a 1650 nm.

La plataforma de material más utilizada comercialmente para circuitos integrados fotónicos es el fosforo de indio (InP), que permite la integración de varias funciones ópticamente activas y pasivas en el mismo chip. Los primeros ejemplos de circuitos integrados fotónicos fueron láseres de reflector Bragg (DBR) distribuidos de 2 secciones simples, que constan de dos secciones de dispositivo controladas de forma independiente: una sección de ganancia y una sección de espejo DBR (ver figura 3). En consecuencia, todos los láseres sintonizables monolíticos modernos, los láseres y transmisores ampliamente sintonizables, los láseres y transmisores modulados externamente, los receptores integrados, etc., son ejemplos de circuitos integrados fotónicos. A partir de 2012, los dispositivos integran cientos de funciones en un solo chip.

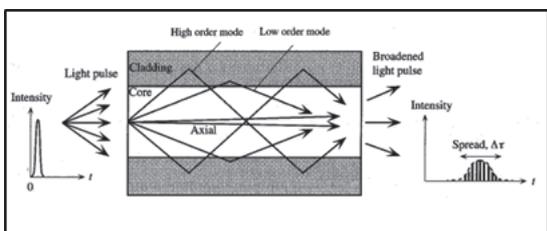
A diferencia de la integración electrónica donde el silicio es el material dominante, los circuitos integrados fotónicos se fabrican a partir de una variedad de sistemas de materiales, incluidos cristales electro-ópticos como niobato de litio, sílice sobre silicio, silicio sobre aislante, varios polímeros y materiales semiconductores que se utilizan para fabricar láseres semiconductores como GaAs e InP. Se utilizan los diferentes sistemas de materia-

**FIGURA 4
FUENTE DE LUZ**



Fuente: <https://ferrosplanes.com/tipos-laser/>

**FIGURA 5
GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS**



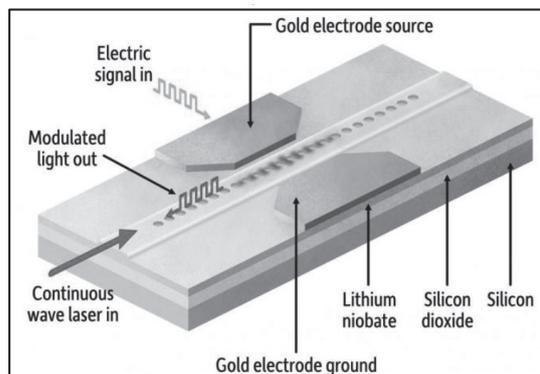
Fuente: B_T3 (uv.es)

les porque cada uno aporta diferentes ventajas y limitaciones en función de la función a integrar. Por ejemplo, los PIC basados en sílice (dióxido de silicio) tienen propiedades muy deseables para circuitos fotónicos pasivos como las rejillas de onda en matriz (AWG por sus siglas en inglés)^{vii} debido a sus pérdidas comparativamente bajas y baja sensibilidad térmica, los PIC basados en GaAs o InP permiten la integración directa de fuentes de luz y silicio. Los PIC permiten la integración conjunta de la fotónica con la electrónica basada en transistores.^{viii}

Los componentes clave de un chip fotónico pueden variar según su diseño y aplicación específica. Posteriormente se hará referencia a la Ley de Moore aplicada a la fotónica, pero se indican a continuación algunos de los componentes básicos que se encuentran comúnmente en estos chips y sus dimensiones características:

- Fuente de luz: la fuente de luz emite fotones, que pueden ser láseres, diodos emisores de luz (LED) o fuentes de luz coherente, dependiendo de la aplicación (ver figura 4). Esta fuente de luz es fundamental para generar la señal óptica. Los diodos láser integrados en chips fotónicos pueden tener dimensiones en el rango de micrómetros. Por ejemplo, un diodo láser de semiconductor típico puede tener un ancho de 1 a 10 μm y una longitud de varios cientos de micrómetros, si bien es necesario señalar que actualmente la fuente de luz no suele encontrarse integrada en el chip.

**FIGURA 6
MODULADOR ELECTRO-ÓPTICO DESARROLLADO EN EL LABORATORIO**



Fuente: <https://noticiasdelaciencia.com/art/39327/miniatuizando-chips-fotonicos>

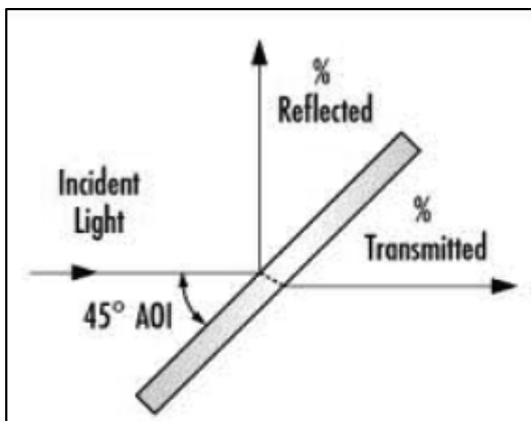
Para la emisión de luz en dispositivos basados en silicio, se suelen emplear tecnologías de dopaje, como los LED de silicio poroalineado, que pueden generar luz visible en ciertas condiciones, aunque estas tecnologías son menos comunes que los dispositivos emisores de luz basados en otros materiales como el arseniuro de galio (GaAs) o el fosforeno (*phosphorene*).

- Guía de onda óptica: las guías de onda son estructuras que dirigen y canalizan los fotones a lo largo de trayectorias predefinidas (ver figura 5). Pueden ser guías de onda lineales o curvas y se utilizan para llevar la luz desde la fuente de luz hasta los demás componentes y conexiones en el chip y realizar diversas funciones ópticas. Miniaturizar estas guías de onda implica reducir sus dimensiones transversales para permitir una mayor densidad de integración y un mejor control de la propagación de la luz. Sus dimensiones típicas están en el rango de micrómetros (μm) a unos pocos cientos de nanómetros en ancho y alto, mientras que la longitud puede variar según la aplicación. Miniaturizar y optimizar estas estructuras es importante para lograr un rendimiento óptico deseado.

El silicio se utiliza en guías de onda y también en moduladores y detectores de luz. En estos dispositivos, la luz es guiada o manipulada a través de estructuras de silicio, pero como se indicaba, la fuente de luz en sí suele ser un componente externo, como un diodo láser o una fuente de luz LED. El silicio es particularmente eficaz para guiar y manipular la luz debido a su capacidad de controlar la refracción y reflexión de la luz en su estructura cristalina.

- Moduladores ópticos: los moduladores son dispositivos que permiten controlar la intensidad, la fase o la frecuencia de la luz que pasa a través de ellos (ver figura 6). Se utilizan para realizar operaciones de modulación, como la modulación de amplitud o la modulación de fase, que

FIGURA 7
DIVISOR DE HAZ. UNA ONDA INCIDE SOBRE UNA CARA DEL DIVISOR DE HAZ Y SE DIVIDE EN UNA ONDA REFLEJADA Y OTRA TRANSMITIDA



Fuente: <https://www.photondelta.com/news/what-is-a-photonic-integrated-circuit/>

FIGURA 8
DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONMUTADOR ÓPTICO

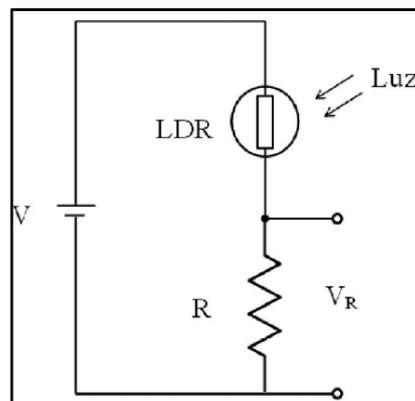


Fuente: <https://www.monografias.com/trabajos72/evolucion-redes-opticas-futuro/evolucion-redes-opticas-futuro2>

son esenciales en aplicaciones de comunicaciones ópticas. También pueden tener dimensiones en el rango de micrómetros. La longitud y el ancho dependen del diseño específico del modulador. Miniaturizar los moduladores implica reducir el tamaño de los dispositivos moduladores y mejorar su eficiencia.

- Divisor de haces: los divisores de haces son componentes que dividen la luz en múltiples caminos, permitiendo así que una señal óptica se divida en varias señales más pequeñas o se combine varias señales en una sola (ver figura 7). Los divisores de haces incluyen divisores de haz de interferencia y divisores de haces de acoplamiento. Estos componentes pueden variar en tamaño, pero a menudo tienen dimensiones en el rango de micrómetros. Por ejemplo, un divisor de haz puede tener un ancho de unos pocos micrómetros. Miniaturizar estos componentes es importante para dirigir la luz hacia diferentes partes del chip.

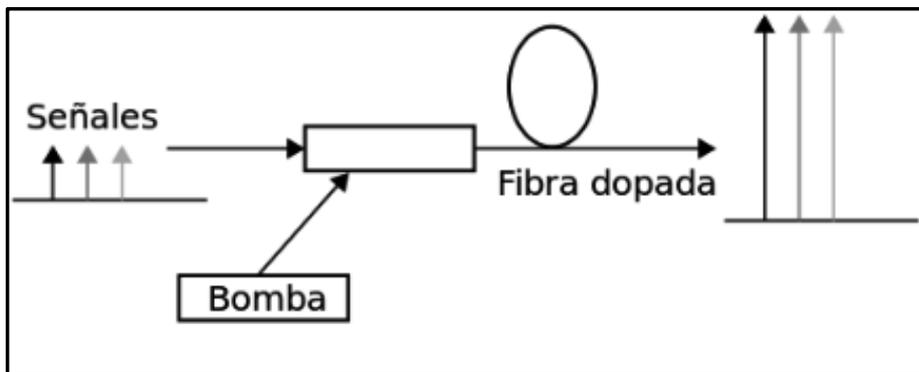
FIGURA 9
FOTODETECTOR



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Esque-ma-do-sistema-fotodetector_fig3_313352910

- Conmutadores: los conmutadores ópticos permiten enrutar la luz de un camino a otro (ver figura 8). Pueden ser conmutadores de tipo matriz o conmutadores basados en interferencia, y se utilizan para cambiar las conexiones ópticas en el chip. La miniaturización de conmutadores ópticos es esencial para cambiar las conexiones ópticas en el chip.
- Detector fotónico o fotodetector: los detectores fotónicos convierten la luz en señales eléctricas (ver figura 9). Los tipos comunes de detectores incluyen fotodiodos y detectores de avalancha de fotones (APD). Estos componentes son esenciales para recibir y convertir las señales ópticas en señales eléctricas que se pueden procesar o transmitir. Los fotodetectores integrados en chips fotónicos suelen tener dimensiones en el rango de micrómetros. Los fotodiodos, por ejemplo, pueden tener un área activa con un diámetro de unos pocos micrómetros. La miniaturización de detectores fotónicos implica reducir el tamaño de los fotodiodos u otros tipos de detectores y mejorar su sensibilidad.
- Amplificador óptico: los amplificadores ópticos, como los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) o amplificadores de semiconductor, se utilizan para aumentar la intensidad de la señal óptica en aplicaciones de comunicaciones de largo alcance (ver figura 10). Miniaturizar estos amplificadores puede mejorar la eficiencia del chip.
- Conectores y acoplamientos: los conectores y acoplamientos permiten la conexión y el acoplamiento de fibras ópticas al chip fotónico. Estos componentes son esenciales para la entrada y salida de señales ópticas en el chip. Miniaturizar estos componentes facilita la conexión de fibras y reduce las pérdidas de señal.
- Conexiones eléctricas: en algunos casos, se integran conexiones eléctricas en el chip para

FIGURA 10
AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_%C3%B3ptico

FIGURA 11
CONECTORES Y EMPALMES DE FIBRA ÓPTICA



Fuente: thefoa.org/ESP/Conectores.htm

controlar y alimentar los componentes fotónicos (ver figura 11). Estas conexiones eléctricas suelen estar conectadas a circuitos electrónicos complementarios para la gestión y control de las señales ópticas.

- Filtros y multiplexores: los filtros y multiplexores se utilizan para seleccionar y separar diferentes longitudes de onda de la luz, lo que permite la multiplexación y la demultiplexación de señales en sistemas de comunicaciones ópticas de alta velocidad. Existen aplicaciones que requieren la transmisión de múltiples señales ópticas a través de una sola fibra o guía de onda, pudiéndose integrar estructuras de multiplexación y demultiplexación para separar y combinar las longitudes de onda de la luz. La miniaturización de filtros permite la multiplexación y demultiplexación de señales ópticas en un espacio reducido.
- Estructuras de interferencia: en ciertos componentes, como multiplexores y demultiplexores, se utilizan estructuras de interferencia para dividir o combinar señales ópticas de diferentes longitudes de onda. Estas estructuras pueden

estar integradas en el chip para lograr funciones específicas de manipulación de luz. Miniaturizar estas estructuras permite la manipulación de longitudes de onda de manera más eficiente.

- Aislamiento y control térmico: para garantizar un rendimiento óptimo y evitar interferencias no deseadas, se pueden incluir estructuras de aislamiento y control térmico en el chip. Estos elementos ayudan a mantener la estabilidad de los componentes fotónicos en diferentes condiciones ambientales.
- Recubrimientos y aislantes: los recubrimientos ópticos y los aislantes pueden aplicarse en áreas específicas del chip para controlar la propagación de la luz y reducir las interferencias indeseadas.
- Electrodo y conexiones: los electrodos utilizados para aplicar voltajes a los moduladores y otros componentes pueden ser muy pequeños, con dimensiones en la escala de micrómetros.

Estos son algunos de los componentes básicos que se encuentran en un chip fotónico, pero la compo-

ción exacta y la complejidad del chip pueden variar según la aplicación y los requisitos específicos del sistema. La estructura y el diseño de un chip con fotónica integrada dependen en gran medida de la aplicación particular, los requisitos de rendimiento y las tecnologías de fabricación utilizadas. Los chips fotónicos integrados están diseñados para realizar funciones ópticas avanzadas en un espacio compacto, lo que los hace fundamentales en una amplia gama de aplicaciones, como las comunicaciones ópticas, la computación cuántica, la detección de sensores y más.

Las técnicas de fabricación son similares a las que se utilizan en los circuitos integrados electrónicos en los que se utiliza la fotolitografía para modelar obleas para el grabado y la deposición de material. A diferencia de la electrónica donde el dispositivo principal es el transistor, como ya se ha indicado, no existe un dispositivo dominante único. La gama de dispositivos requeridos en un chip incluye los dispositivos descritos. Estos dispositivos requieren una variedad de materiales y técnicas de fabricación diferentes, lo que dificulta la realización de todos ellos en un solo chip.

Por última señalar que las nuevas técnicas que utilizan interferometría fotónica resonante están dando paso a los LED UV para que se utilicen para los requisitos de computación óptica con costes mucho más baratos, lo que abre el camino a la electrónica de consumo de petahercios PHz.

FOTÓNICA Y LEY DE MOORE ▼

En la segunda década del presente siglo se han observado, signos crecientes que anticipan que la Ley de Moore dejará de cumplirse en algún momento forzando a la búsqueda de tecnologías alternativas que, en colaboración con la electrónica, permitan hacer frente a los nuevos desafíos que se atisban en el horizonte. Entre ellos, cabe destacar la necesidad de desarrollar nuevos modelos y sistemas de computación, que den soporte tanto a la inteligencia artificial como a la computación cuántica, entre otras aplicaciones.

La miniaturización de chips fotónicos es un campo de la tecnología óptica que se centra en reducir el tamaño de los componentes y circuitos ópticos en un chip fotónico, al igual que la miniaturización de componentes electrónicos en los circuitos integrados. Esto es esencial para mejorar la eficiencia y la capacidad de integración de los chips fotónicos, lo que a su vez tiene un gran impacto en una variedad de aplicaciones, incluyendo las comunicaciones ópticas, la computación cuántica, la detección y la sensorización óptica, entre otras. A medida que los componentes fotónicos, como guías de onda, moduladores y detectores, se han vuelto más pequeños gracias a la miniaturización, se ha facilitado la integración de estos componentes en un solo chip fotónico. Esto ha dado lugar a chips fotónicos más

compactos y eficientes. La miniaturización permite una mayor densidad de integración en los chips fotónicos, lo que significa que más componentes y funciones pueden ser empaquetados en un espacio más pequeño. Esto es esencial para aplicaciones como la comunicación óptica en la que se busca transmitir grandes cantidades de datos a través de fibras ópticas.

En el campo de la fotónica, especialmente en lo que respecta a la miniaturización y las dimensiones de los componentes ópticos, existen consideraciones importantes que se incluyen en hojas de ruta y estrategias de desarrollo. Estas consideraciones son fundamentales debido a la tendencia hacia dispositivos fotónicos cada vez más compactos y eficientes. A continuación, se presentan algunos puntos clave que se abordan en las hojas de ruta relacionadas con las dimensiones de los componentes ópticos⁸:

- Miniaturización y nanofotónica: una de las áreas clave en el desarrollo de componentes fotónicos es la miniaturización y la nanofotónica. Esto implica la fabricación de componentes ópticos en la escala de nanómetros para aprovechar al máximo las propiedades de la luz a nivel nanométrico. Las hojas de ruta a menudo incluyen objetivos específicos para la reducción de las dimensiones de los componentes, como guías de onda, resonadores y moduladores, con el fin de mejorar la eficiencia y la integración de los dispositivos.
- Integración en chips: la miniaturización y la integración en chips son aspectos críticos en la fotónica, y las hojas de ruta a menudo establecen objetivos para la integración de múltiples funciones fotónicas en un solo chip. Esto puede incluir la combinación de guías de onda, moduladores, detectores y otros componentes en un dispositivo compacto.
- Aplicaciones específicas: las hojas de ruta pueden variar según las aplicaciones específicas de la fotónica. Por ejemplo, en las comunicaciones ópticas de alta velocidad, se establecen objetivos para el desarrollo de moduladores y detectores ultra-compactos para mejorar la eficiencia y la velocidad de transmisión de datos.
- Materiales avanzados: las hojas de ruta pueden incluir investigaciones sobre nuevos materiales con propiedades ópticas únicas que permitan la fabricación de componentes más pequeños y eficientes. Esto incluye el desarrollo de materiales nanoestructurados y meta materiales.

En resumen, las hojas de ruta en fotónica a menudo tienen en cuenta las dimensiones de los componentes ópticos y promueven la miniaturización y la integración en chips como objetivos clave. Estas consideraciones son esenciales para el avance de la tecnología fotónica y su aplicación en una amplia gama de campos, desde las comunicaciones

ópticas hasta la detección remota y la computación cuántica.

El tema de la actualización de la Ley de Moore mediante la búsqueda de dependencias más complejas de la evolución de los sistemas informáticos que se plantea para la discusión es hoy bien entendido por los investigadores en el campo de las tecnologías plasmónicas (3) y nanofotónicas. Una alternativa a la clásica Ley de Moore, ha madurado gracias al análisis de las limitaciones físicas naturales en las tecnologías existentes para el funcionamiento de los núcleos de procesador, así como las perspectivas confirmadas experimentalmente de nuevos sistemas basados en nanofotónica.

Las continuas demandas del sistema industrial moderno para mejorar la eficiencia computacional y el ancho de banda de comunicación han llevado a las tecnologías de semiconductores a sus límites en su estado actual. Esto ha llevado a la aparición de nuevas tecnologías que pueden superar las soluciones tradicionales. Se trata de los preprocesadores o aceleradores fotónicos, circuitos híbridos electrón-fotón y redes neuronales. La fotónica integrada y posiblemente la plasmónica pueden expandir ciertos canales de comunicación en una placa o incluso en un chip. Como resultado, los problemas de disipación de potencia térmica se mitigarán significativamente, así como se conseguirá un mayor ancho de banda de datos con la capacidad de superar la barrera de eficiencia digital electrónica a través de enfoques conceptuales como multiplexación por división de longitud de onda (WDM), momento angular óptico o formatos de modulación más altos como modulación de amplitud de polarización (p.ej. modulación, QAM), donde la polarización de fase y amplitud se utilizan simultáneamente.

Con respecto a las compensaciones con otras tecnologías, un transistor electrónico con un nodo de proceso de 14 nm ocupa un área 3 órdenes de magnitud menos que un modulador en anillo de un microdisco fotónico, sin embargo, la fotónica proporciona interconexión a nivel de canal sin cables capacitivos de carga/descarga, aunque es sinérgica con respecto a lo anterior, características únicas que admiten velocidades de transferencia de datos de hasta Tbps.

La interconexión fotónica en chip ha mostrado recientemente una alta capacidad de transferencia de datos (superior a las interconexiones eléctricas convencionales) cuando se hibrida con dispositivos plasmónicos activos. Si bien el enrutamiento de datos ópticos se percibe como una posible solución para eliminar los cuellos de botella de comunicación entre los núcleos de cómputo y se usa comúnmente en los centros de datos y supercomputadoras, la fotónica integrada aún no se ha implementado en el sector de consumo convencional.

Algunas estrategias y técnicas comunes utilizadas en la miniaturización de chips fotónicos serían las siguientes:

- Escalado de longitudes de onda: al reducir las dimensiones físicas de los componentes fotónicos, se pueden manipular longitudes de onda más cortas, lo que permite una mayor densidad de componentes y la capacidad de operar en rangos de longitud de onda más amplios.
- Guías de onda fotónicas: las guías de onda fotónicas son componentes fundamentales en los chips fotónicos. La miniaturización implica reducir el tamaño de estas guías de onda y diseñarlas para confinar eficientemente la luz en dimensiones submicrométricas.
- Componentes fotónicos en miniatura: esto incluye componentes como moduladores, conmutadores, divisores de haces y detectores. Estos dispositivos se han diseñado para ocupar menos espacio físico y aun así mantener su eficiencia y rendimiento óptico.
- Tecnologías de silicio: la miniaturización de chips fotónicos a menudo se basa en tecnologías de silicio, ya que el silicio es un material que se presta bien a la integración de componentes electrónicos y ópticos en un solo chip. Los chips fotónicos de silicio pueden integrar componentes electrónicos y ópticos en un solo sustrato, lo que reduce aún más el tamaño del dispositivo. La fabricación en silicio permite la producción en masa y la reducción de costes de producción, ya que permite la fabricación en masa de chips fotónicos más pequeños y más eficientes. Esto a su vez puede hacer que las tecnologías fotónicas sean más accesibles y aplicables en una amplia gama de campos.
- Diseño asistido por ordenador: La miniaturización de componentes fotónicos requiere un diseño preciso y un control excepcional sobre las dimensiones y las propiedades de los materiales. El diseño asistido por ordenador y las herramientas de simulación juegan un papel crucial en este proceso, permitiendo a los ingenieros optimizar las estructuras a escalas nanométricas. Además de las estrategias convencionales, también se están investigando tecnologías emergentes, como la fotónica en sustratos 2D (por ejemplo, grafeno), para miniaturizar aún más los componentes fotónicos.
- Tecnologías de fabricación avanzadas: se utilizan técnicas de fabricación avanzadas, como la litografía de haz de electrones y la nanoimpresión, para crear estructuras a escala nanométrica en los chips fotónicos, permitiendo la miniaturización de estos componentes, lo que facilita la integración de múltiples funciones fotónicas en un solo chip.
- Materiales avanzados: La investigación se centra en el desarrollo de materiales ópticos avanzados que permitan la miniaturización sin comprometer el rendimiento.

La miniaturización de chips fotónicos es esencial para mantener el ritmo con las demandas de dispositivos más pequeños y eficientes en aplicaciones de alta tecnología. A medida que continúa la investigación y el desarrollo en este campo, es probable que veamos avances significativos en la miniaturización de chips fotónicos y su aplicación en diversas áreas de la tecnología. Las dimensiones de los componentes fotónicos integrados en un chip fotónico pueden variar significativamente dependiendo de la aplicación y la tecnología utilizada. Sin embargo, en general, estos componentes son diseñados para operar en la escala de la luz, que tiene longitudes de onda en el rango de nanómetros (nm). En el apartado anterior ya se han mencionado algunas dimensiones típicas de los diferentes dispositivos fotónicos.

Como ya se ha señalado, para miniaturizar chips fotónicos, es necesario trabajar a escala nanométrica, lo que implica la fabricación de estructuras ópticas y electrónicas a nivel de nanómetros. Esto permite la integración de componentes ópticos en una escala mucho más pequeña que la longitud de onda de la luz. La nanofabricación es esencial para crear estructuras en la escala nanométrica. Los procesos de litografía avanzados, como la litografía de haz de electrones o la litografía de nanoimpresión, se utilizan para definir las estructuras ópticas en los chips fotónicos. Además, la tendencia en la investigación y desarrollo de fotónica es reducir aún más las dimensiones de los componentes para aumentar la densidad de componentes fotónicos en un chip y mejorar el rendimiento y la eficiencia de los sistemas fotónicos.

En resumen, la miniaturización desempeña un papel clave en el avance de la fotónica al permitir la creación de dispositivos fotónicos más pequeños, eficientes y versátiles. Esta combinación de fotónica y miniaturización está impulsando innovaciones significativas en la tecnología y tiene el potencial de transformar una variedad de industrias y aplicaciones en el futuro. La miniaturización de estos componentes fotónicos en un chip de silicio es esencial para aumentar la densidad de integración, reducir los costes de producción y mejorar la eficiencia de los dispositivos fotónicos. A medida que avanza la investigación en este campo, es probable que veamos chips fotónicos cada vez más pequeños y potentes en el futuro.

Las guías de onda fotónicas a las que ya se ha hecho referencia, son componentes clave en los chips fotónicos y se pueden miniaturizar mediante la reducción de sus dimensiones transversales. Las guías de onda fotónicas de silicio son comunes en estos chips debido a su alto índice de refracción, lo que permite confinar eficazmente la luz en una región pequeña.

Los componentes ópticos, como moduladores y detectores, también se han miniaturizado. Por ejemplo, los moduladores electro-ópticos de silicio permiten

una modulación rápida y eficiente de la luz en un espacio reducido. La integración de componentes ópticos en un sustrato de silicio es una estrategia común para miniaturizar chips fotónicos. Esto permite la fabricación en masa utilizando tecnologías de semiconductores convencionales y la integración de componentes electrónicos y ópticos en un solo chip.

FOUNDRIES DE FOTÓNICA

Las foundries de fotónica se refieren a instalaciones de fabricación que se especializan en la producción y fabricación de dispositivos y componentes fotónicos a medida para empresas y proyectos de investigación. Estas instalaciones son esenciales para la creación y producción en masa de dispositivos fotónicos avanzados. A continuación, se mencionan algunas de las principales foundries de fotónica a nivel mundial:

- AIM Photonics (*Advanced Integrated Photonics Manufacturing Institute*): Con sede en los Estados Unidos, AIM Photonics es un instituto de fabricación avanzada que se enfoca en la fabricación de dispositivos fotónicos integrados en silicio. Ofrece servicios de diseño, fabricación y prueba de componentes fotónicos.
- JePPIX (*Joint European Platform for Photonic Integration of Components and Circuits*): JePPIX es una iniciativa europea que proporciona acceso a instalaciones de fabricación de fotónica en Europa. Ofrece servicios de diseño y producción de chips fotónicos integrados en silicio.
- LioniX International: esta empresa holandesa se especializa en el diseño y fabricación de componentes fotónicos integrados en silicio y nitruro de silicio, como moduladores, divisores de haz y guías de onda. Ofrecen servicios de diseño personalizado y producción en serie.
- Lumerical Photonics: aunque no es una foundry en el sentido tradicional, Lumerical ofrece herramientas de simulación y diseño de dispositivos fotónicos. Ayuda a los diseñadores a modelar y optimizar sus componentes antes de la fabricación física.
- CompoundTek: con sede en Singapur, CompoundTek se especializa en la fabricación de dispositivos fotónicos integrados en silicio y otros materiales semiconductores. Ofrecen servicios de diseño, desarrollo y fabricación a medida.
- Fraunhofer Institute for Photonic Microsystems (IPMS): Este instituto alemán se centra en la investigación y desarrollo de tecnologías fotónicas. Ofrece servicios de fabricación de dispositivos fotónicos, desde guías de onda hasta componentes de sensores.
- VTT Technical Research Centre of Finland: VTT es un centro de investigación finlandés que trabaja

en tecnologías fotónicas y ofrece servicios de diseño y fabricación de componentes fotónicos personalizados.

- InPulse Labs: con sede en Canadá, InPulse Labs se especializa en la fabricación de dispositivos fotónicos basados en materiales III-V, como el arseniuro de galio (GaAs) e indio-fosforo (InP). Ofrecen servicios de diseño y fabricación de componentes fotónicos.

Estas son solo algunas de las foundries y organizaciones que ofrecen servicios de fabricación y diseño de componentes fotónicos. Las foundries de fotónica desempeñan un papel crucial en el avance de la tecnología fotónica al permitir que empresas y proyectos de investigación accedan a instalaciones especializadas para crear dispositivos fotónicos a medida.

FABRICACIÓN DE UN CHIP FOTÓNICO ↓

La fabricación de un chip fotónico es un proceso altamente especializado que implica la creación de estructuras microscópicas en un sustrato semiconductor para manipular y guiar la luz en la escala de la nanotecnología.

Una descripción general del proceso de fabricación de un chip fotónico sería la siguiente:

- Selección del sustrato: se comienza con la elección de un sustrato semiconductor adecuado, como el silicio (Si), que es comúnmente utilizado debido a sus propiedades ópticas y electrónicas. Otros materiales ya mencionados, como el silicio sobre aislante (SOI), también se utilizan en aplicaciones fotónicas.
- Limpieza del sustrato: el sustrato se limpia y prepara cuidadosamente para eliminar cualquier contaminante superficial que pueda afectar la calidad de las capas posteriores depositadas.
- Deposición de capas: se aplican una serie de capas semiconductoras y dieléctricas sobre el sustrato utilizando técnicas de deposición química de vapor (CVD), deposición física de vapor (PVD) u otras técnicas de deposición. Estas capas se diseñan específicamente para guiar, modular y manipular la luz.
- Litografía: se utiliza litografía para definir las estructuras microscópicas en las capas depositadas. Este proceso implica la proyección de una máscara sobre el sustrato y la exposición a la luz ultravioleta (UV) para crear patrones precisos. Las hojas de ruta en fotónica al igual que en la micro y nanoelectrónica, también se centran en el desarrollo de tecnologías de fabricación avanzadas que permitan la creación de componentes ópticos a escalas cada vez más pequeñas y con alta precisión. Esto incluye técnicas de litografía avanzadas, deposición de

películas delgadas y grabado de precisión en la escala nanométrica.

- Grabado: después de la litografía, se utiliza un proceso de grabado (como el grabado químico o el grabado por plasma) para eliminar el material no deseado y definir las guías de onda, los moduladores, los divisores y otros componentes fotónicos en el chip.
- Dopaje: En algunas etapas, se pueden introducir impurezas o dopantes en áreas específicas para modificar las propiedades eléctricas y ópticas de las regiones seleccionadas del chip.
- Capas adicionales: se pueden agregar capas adicionales para proporcionar aislamiento, control eléctrico y otras funciones específicas del dispositivo.
- Depósito de metales: para conectar eléctricamente los componentes fotónicos, se depositan capas de metal (generalmente aluminio o cobre) y se modelan utilizando procesos de litografía y grabado.
- Pruebas y caracterización: se realizan pruebas y caracterizaciones exhaustivas para asegurarse de que el chip funcione según las especificaciones deseadas. Esto incluye la medición de la eficiencia de acoplamiento de la luz, la pérdida de inserción y otras propiedades ópticas y eléctricas.
- Montaje y encapsulado: El chip fotónico se puede montar en un paquete y encapsular para protegerlo y facilitar su integración en sistemas más grandes.
- Pruebas finales: Antes de su uso en aplicaciones específicas, los chips fotónicos se someten a pruebas finales para garantizar que cumplan con los estándares de rendimiento requeridos.

MERCADO DE LA FOTÓNICA ↓

La fotónica es un factor clave de la innovación tecnológica del siglo XXI. Desde 2015, el mercado mundial de la fotónica ha crecido un 7% al año, pero ¿cuál es la situación de la industria fotónica europea? Según un informe publicado por la Plataforma Tecnológica Europea Photonics21 con el apoyo de los proyectos financiados con fondos europeos NextPho21 y BestPhorm21, las noticias para la industria fotónica europea son abrumadoramente buenas. Entre 2015 y 2019, la fotónica europea creció de 76.000 millones EUR a 103.000 millones EUR, lo que representó una tasa de crecimiento anual del 7%. Además, Europa mantuvo su segundo puesto en la clasificación mundial, con el 16% de la cuota de mercado mundial, detrás de China, que siguió a la cabeza con un 29%. En tercer y cuarto puesto se situaron América del Norte (15%) y Japón (13%). El crecimiento del empleo en el sector de la fotónica

(un 2,1% anual) duplica al de toda la industria europea, con más de 30.000 nuevos puestos de trabajo creados entre 2015 y 2019 hasta alcanzar un total de 390.000 empleados.

El mercado de la fotónica es muy dinámico y está en constante evolución debido a la innovación tecnológica. Con avances en áreas como la fotónica cuántica, la fotónica integrada y la nanofotónica, se espera que este mercado continúe creciendo y diversificándose en el futuro. Las inversiones en investigación y desarrollo (I+D), así como la demanda de soluciones más eficientes y de mayor rendimiento, impulsarán aún más el crecimiento de la fotónica en una amplia variedad de aplicaciones. El mercado de la fotónica en España es una parte importante de la industria tecnológica y científica del país. España ha sido un actor significativo en el campo de la fotónica, con una fuerte presencia en investigación, desarrollo y aplicaciones comerciales.

Es importante tener en cuenta que el mercado de la fotónica en España está vinculado a la economía global y a las tendencias tecnológicas globales. La demanda de tecnologías fotónicas puede verse influida por factores económicos, políticos y de mercado en todo el mundo.

ALGUNAS APLICACIONES ▼

Algunas, de las múltiples aplicaciones de la fotónica, serían las siguientes:

- Comunicaciones ópticas: la fotónica es esencial para las comunicaciones de alta velocidad, como las redes de fibra óptica que se utilizan para transmitir datos a largas distancias a velocidades extremadamente altas. Esto se debe a que la luz tiene una mayor capacidad de transmisión de datos en comparación con los electrones. Esto es fundamental para las comunicaciones en Internet y en redes de telecomunicaciones. La demanda de redes de alta velocidad y capacidad, especialmente en centros de datos y sistemas de comunicaciones de larga distancia, ha impulsado el crecimiento de la fotónica. Esto incluye la fotónica de silicio, utilizada en transceptores ópticos y otros dispositivos para la transmisión de datos a través de fibras ópticas.
- Láseres y amplificación óptica: los láseres son dispositivos que generan luz coherente y concentrada en una sola dirección. Se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde cirugía láser en medicina, lectores de CD y DVD, hasta corte y soldadura en la industria. La amplificación óptica también se utiliza para amplificar señales de luz, lo que es fundamental en la comunicación óptica.
- Imagen médica: en medicina, la fotónica se utiliza para desarrollar técnicas de imagen

avanzadas como la resonancia magnética por imágenes (MRI) y la tomografía de coherencia óptica (OCT) para diagnosticar enfermedades y realizar investigaciones médicas, así como terapia láser en oftalmología y dermatología.

- Tecnologías fotovoltaicas: la conversión de la luz solar en electricidad se logra mediante tecnologías fotónicas, como las células solares fotovoltaicas. Estas células capturan la energía de los fotones de la luz solar y la convierten en electricidad.
- Sensores fotónicos: se utilizan para la detección precisa de luz y radiación electromagnética en una variedad de aplicaciones, como sensores de temperatura, presión, gas, humedad, también como sensores de imagen en cámaras digitales, sistemas de detección en la industria automotriz, en la industria aeroespacial, en la industria química y muchas otras, además de su utilización en la investigación científica
- Fabricación y Procesamiento: la fotónica también se utiliza en la fabricación y el procesamiento de materiales. Los láseres y otros dispositivos fotónicos se utilizan en corte, soldadura, marcado y grabado de precisión en la industria manufacturera. La automatización industrial y la robótica dependen de la fotónica para la visión por computador, el control de procesos y la navegación.
- Optoelectrónica: esta área combina la electrónica y la óptica para desarrollar dispositivos como diodos emisores de luz (LED) y fotodetectores. Los LEDs se utilizan en pantallas, iluminación y señalización, mientras que los fotodetectores se emplean en dispositivos de detección de luz.
- Procesamiento óptico: en la computación cuántica y otras áreas, se investiga el procesamiento de la información utilizando fotones en lugar de electrones para lograr una mayor velocidad y eficiencia en ciertas tareas.
- Electrónica Cuántica: la computación cuántica y la criptografía cuántica son áreas emergentes que dependen en gran medida de la fotónica para la manipulación y detección de partículas cuánticas (fotones) en lugar de bits tradicionales. Esto tiene el potencial de revolucionar la informática y la seguridad de la información.
- Defensa y Seguridad: La fotónica juega un papel importante en aplicaciones de defensa y seguridad, como sistemas de vigilancia por infrarrojos, comunicaciones seguras y sistemas de detección de amenazas.
- Entretenimiento y pantallas: en el sector del entretenimiento, la fotónica se utiliza en la proyección de imágenes, pantallas de alta definición y sistemas de visualización avanzados.

- Ciencia e investigación: en la investigación científica, la fotónica se utiliza en campos como la espectroscopia, la microscopía y la física de partículas para estudiar y comprender mejor el comportamiento de la luz y las partículas subatómicas.
- Inteligencia Artificial: no hay ninguna duda que la inteligencia artificial se ha convertido en el campo favorito de cara al desarrollo de nuevas arquitecturas en el mundo del *hardware*. Lo cual ha supuesto, el desarrollo de nuevas formas de sacar la máxima cantidad posible de operaciones por segundo con el mínimo consumo energético posible. Pero el avance supone la creación de procesadores fotónicos para la IA. La inteligencia artificial es una de las disciplinas que más datos mueven a la hora de ejecutarse en el *hardware* de nuestros PCs, esto supone enormes anchos de banda, los cuales están íntimamente ligados a los consumos energéticos de la transferencia de datos. En una era en que el movimiento de la información es más caro que el procesamiento de la misma, esto ha hecho que un mayor ancho de banda se convierta en un elemento clave. Es precisamente el uso de la fotónica lo que promete más avances en cuanto a la inteligencia artificial se refiere, en especial en un futuro donde los circuitos integrados no estarán en un solo chip, sino en varios intercomunicados entre sí. El gran problema en cuanto al desarrollo de futuros procesadores para inteligencia artificial, es que dentro de un mismo procesador donde los envíos de datos son a nivel muy local el consumo es muy bajo, pero si nos alejamos entonces el consumo aumenta. Este problema no ocurre con las intercomunicaciones a base de fotones en vez de electrones, ya que el consumo energético en las interfaces ópticas no aumenta con la distancia respecto a la que se encuentre el dato^{xi}.

CONCLUSIONES ↓

Como tecnología en desarrollo, la fotónica y más en particular, el ecosistema de fotónica integrada, presenta una oportunidad sin precedentes de innovación disruptiva estratégica, económica y social, para generar crecimiento y empleo de calidad. Se trata de innovación de alta complejidad, dando lugar a productos, servicios e industrias enteras con elevados retornos económicos y sociales, así como a la creación de empleos de elevada calidad.

Es la innovación que se origina por la introducción en el mercado de nuevas tecnologías, sin demanda previa, creando océanos azules libres de competidores, sirviendo a nuevos e inéditos grupos de usuarios. Su bajo consumo de energía, su rápida velocidad, su reducido tamaño y su alto rendimiento la convierten en sucesora de la actual tecnología electrónica. De hecho, la ciencia fotónica, presente en multitud de tecnologías como los láseres, Internet

y el GPS, podría llegar a los ordenadores en cuestión de años^{xii}.

Actualmente, la combinación de dispositivos electrónicos con fotónica integrada ofrece una forma más eficiente desde el punto de vista energético de aumentar la velocidad y la capacidad de las redes de datos, reducir los costes y satisfacer una gama cada vez más diversa de necesidades en distintos sectores. La revolución de la inteligencia artificial necesita muchísima potencia de procesamiento, ¿podría ser el momento de introducir una nueva generación de chips que combinen la fotónica con el silicio convencional?^{xiii}

Es bien sabido que la Ley de Moore está llegando a su fin. Ya no puede esperarse que la potencia del procesador se duplique cada dos años. Eso es un inconveniente para la TI(4) convencional, que se ha aprovechado de los continuos dividendos de la Ley de Moore. Es potencialmente un desastre para la inteligencia artificial, que está al borde de una gran expansión, pero una expansión que depende mucho del procesamiento rápido.

Lo que hace que los chips se calienten es la resistencia. Las señales eléctricas enfrentan resistencia a medida que los electrones fluyen en la corriente. Por el contrario, las señales de luz no enfrentan la misma resistencia y no generan calor, y los fotones también viajan más rápido que cualquier otra cosa. Durante algunos años, los diseños informáticos avanzados han intentado introducir la fotónica y utilizar electrones para el procesamiento, fotones para la comunicación. Las comunicaciones de larga distancia usan fibra óptica, y esas fibras ahora penetran profundamente en los bastidores de los centros de datos.

Los desarrollos recientes han permitido que los transistores y la fotónica se fusionen en la misma oblea, en la llamada fotónica integrada. Inicialmente, esto se vio como una forma de reducir el tamaño y el consumo de energía de esos enchufes ópticos, trayendo las señales al chip como luz, en lugar de convertir las señales de luz en señales eléctricas en los bordes del chip CMOS. De acuerdo con la hoja de ruta, los componentes ópticos se acercan cada vez más al silicio hasta que, finalmente, la óptica se apila en 3D y se empaqueta conjuntamente con los procesadores y los chips de red, lo que le brinda velocidades de datos muy altas con un bajo consumo de energía.

La idea es empujar los elementos ópticos más adentro del chip, de modo que todas esas interconexiones sean manejadas por una red fotónica conmutable dentro del silicio, que no genera calor y ocupa un volumen minúsculo. Esto podría reducir drásticamente el *hardware* requerido, integrando efectivamente un complejo sistema de entrenamiento de inteligencia artificial en un solo chip. La fotónica integrada usa las mismas herramientas de grabado de tal forma que todo es CMOS completamente estándar.

dar usándose la misma oblea aislante de silicio que se utiliza en la producción de los chips electrónicos.

Como ya se ha señalado, hay una disciplina en particular que tiene una proyección de futuro apabullante y a la que le vendría de maravilla erigirse sobre las ventajas que propone la fotónica del silicio: la inteligencia artificial.^{xiv}

Para concluir, mientras que el mercado de la microelectrónica crece al 5% anual desde hace 20 años, el de la fotónica integrada o chip fotónico lo hace a un promedio de alrededor del 30% en los últimos 10 años, ya que es una tecnología emergente. España cuenta con un ecosistema de fotónica integrada establecido y creciente, que abarca toda la cadena de valor, comenzando por un fuerte núcleo de I+D+i pública y emprendimiento, con fábricas, empresas de diseño, empaquetado, test, *fabless* (empresas que producen chips en fábricas de terceros), productores de equipo y usuarios finales de chips fotónicos. Nos encontramos compitiendo en muchos casos a nivel mundial, y ello aboca a desafíos.^{xv}

La ley de Moore seguirá sin duda en vigor porque mediante la combinación de la micro y nanoelectrónica y la fotónica integrada, el aumento en el número de transistores en un chip vendrá sin duda acompañado por una reducción del consumo de energía y un aumento de la velocidad y el rendimiento. El avance en la fabricación de ordenadores y otros dispositivos, hará que se vuelvan cada vez más pequeños, más potentes y más baratos.

NOTAS ↓

- [1] I+D: Investigación y Desarrollo
- [2] Nótese que en este caso se hace referencia a la masa en reposo m_0 y no a la masa $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$
- [3] Las tecnologías plasmónicas tienen la capacidad de manipular la luz visible a la escala del nanómetro
- [4] TI: Tecnología de la Información

REFERENCIAS ↓

- i <https://www.secpho.org/agenda/la-fotonica-en-la-industria/>
- ii <https://noticiasdelaciencia.com/art/16772/el-conmutador-fotonico-nanometrico-mas-rapido-del-mundo>
- iii https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_integrado_fot%C3%B3nico
- iv https://elpais.com/elpais/2019/02/08/ciencia/1549623557_186579.html
- v <https://culturacientifica.com/2019/12/10/el-comportamiento-corporcular-de-la-luz-momento-lineal-del-foton/>
- vi Las diez claves de la realidad. Frank Wilczek.
- vii https://es.wikipedia.org/wiki/Rejilla_de_gu%C3%ADa_de_ondas_en_matriz
- viii Circuito integrado fotónico (hmgong.es)
- ix <https://tech-es.netlify.app/articles/es512656/index.html>

- x <https://cordis.europa.eu/article/id/430508-europe-s-photonics-industry-holds-2nd-place-global-ranking/es>
- xi <https://hardzone.es/noticias/procesadores/lightmatter-fotonica-ia/>
- xii <https://www.uv.es/uvweb/master-ingenieria-telecomunicacion/es/master-universitario-ingenieria-telecomunicacion/fotonica-tecnologia-del-siglo-xxi-1285882889093/GasetaRecerca.html?id=1285957780334>
- xiii <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/transformando-la-luz-en-chips/>
- xiv <https://www.xataka.com/empresas-y-economia/se-esta-cocinando-revolucion-fabricacion-chips-se-llama-fotonica-silicio-sera-gran-apuesta-tsmc>
- xv <https://www.agenciasinc.es/Opinion/Espana-ante-los-desafios-en-chips-fotonicos>