

Artículo de revisión

Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz

Optics and photonics: Light science and light technology

Angela María Guzmán Hernández

Universidad Nacional de Colombia; Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Artículo presentado como requisito para ser admitida como académica de número

Resumen

Este artículo de revisión presenta el panorama actual de las múltiples tecnologías basadas en la luz que se han hecho indispensables en nuestra vida diaria y que seguirán teniendo impacto en ella y en la economía mundial. Con el objetivo de motivar la formulación de un plan nacional de desarrollo de la investigación y apropiación de la tecnología fotónica en Colombia, se presentan los propósitos generales de algunas iniciativas regionales y nacionales de investigación y desarrollo en óptica y fotónica.

Palabras clave: Óptica; Fotónica; Óptica cuántica; Óptica atómica; Plasmónica.

Abstract

This review article presents an overview of the many light-based technologies that have become indispensable in our daily lives and will continue to impact them, as well as the world economy. To motivate the formulation of a national plan for the development of the research and appropriation of photonics technology in Colombia, the general purposes of some regional and national research and development initiatives in optics and photonics are presented.

Keywords: Optics; Photonics; Quantum optics; Atom optics; Plasmonics.

Citación: Guzmán Hernández AM.
Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):920-938, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1748>

Editor: Román Eduardo Castañeda-Sepúlveda

Correspondencia:
Angela María Guzmán Hernández;
amguzmanh@unal.edu.co

Recibido: 14 de agosto de 2022
Aceptado: 4 de noviembre de 2022
Publicado en línea: 25 de noviembre de 2022

Introducción

La luz, su naturaleza y su manipulación han intrigado desde siempre la mente humana. Cada avance en nuestra habilidad de controlar y utilizar la luz ha dado origen a nuevas áreas del conocimiento y al desarrollo de tecnologías innovadoras. Es difícil imaginar nuestra vida diaria sin las tecnologías nacidas de la ciencia de la luz, la óptica y la fotónica. Según la definición de Photonics21 (**Photonics21**, 2019), la fotónica incluye las ciencias y las técnicas de generación, emisión, detección, recolección, transmisión, modulación y amplificación de haces de fotones desde la banda de THz (mínimo: 200 GHz) a los rayos X.

El láser, fuente artificial de luz con propiedades de coherencia e intensidad sin parangón en las fuentes de luz naturales, cambió nuestra concepción sobre la coherencia y la interacción de la luz con la materia. Roy Glauber elaboró la teoría cuántica de la coherencia óptica (**Glauber**, 1963) partiendo del concepto clásico de coherencia de primer orden para arribar a la coherencia de campo en todos los órdenes característica del láser. Con ello sentó las bases de la óptica cuántica y se hizo acreedor al Premio Nobel de Física en el 2005.

En 1931, Maria Göppert-Mayer (segunda mujer en recibir el Premio Nobel de Física por el modelo de capas nucleares en 1963), calculó en su tesis de doctorado la probabilidad de absorción y emisión de dos fotones (**Göppert-Mayer**, 1931) y concluyó que con las fuentes de luz disponibles entonces tales transiciones eran extremadamente improbables. Peter Franken comprendió que con la intensidad del láser tales procesos deberían ser observables y logró en 1961 la generación del segundo armónico del láser de



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

rubí (**Franken et al.**, 1961). Casi simultáneamente, Nicolaas Bloembergen (Premio Nobel de Física 1981) y sus colaboradores desarrollaron la teoría de los procesos no lineales, en particular la mezcla de ondas para generar luz coherente en un amplio rango de frecuencias incluyendo el infrarrojo y el ultravioleta. Así nacieron la óptica no lineal y sus aplicaciones en espectroscopía.

Con el láser y su gran direccionalidad nació también la posibilidad de manipular átomos y iones con luz, en lo que hoy conocemos como óptica atómica (**Guzmán**, 1998), cuyos inicios se dieron con las técnicas de enfriamiento de átomos mediante láser. En 1984 se realizó la “Primera Conferencia Internacional de enfriamiento láser”, a la cual asistí como estudiante de doctorado. La foto de la **figura 1** de los participantes en este evento fue tomada por William Phillips, quien la incluyó en su conferencia de aceptación del Premio Nobel (**Phillips**, 1998), y publicada en el libro de los Premios Nobel 1997 (**Phillips**, 1997).

En esa ocasión, dos futuros Premios Nobel, William Phillips y Claude Cohen-Tannoudji, discutían con otros participantes los procesos físicos involucrados en el enfriamiento de átomos con láser. Yo estaba terminando entonces mi tesis de doctorado sobre procesos no lineales en vapores atómicos bombeados mediante una transición de dos fotones (**Guzmán de García**, 1984) y asistía al nacimiento de una nueva área de la física, la cual condujo al descubrimiento de un nuevo estado de la materia, el condensado de Bose-Einstein (**Davis et al.**, 1995) y, más recientemente, a la concreción experimental de la condensación continua de Bose-Einstein o láser de átomos (**Chen et al.**, 2022).

El Premio Nobel de Física de 1997 fue otorgado conjuntamente a Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William D. Phillips “por el desarrollo de métodos para enfriar y atrapar átomos con luz láser”. Su trabajo permitió incrementar apreciablemente la precisión metrológica del tiempo con el desarrollo de relojes atómicos que trabajan con fuentes de átomos fríos, así como la precisión en la medición de distancias, lo que ha hecho posible el sistema actual de posicionamiento global (GPS).

Este año el premio Nobel de Física fue otorgado a Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger, “por sus experimentos con fotones imbricados, estableciendo la violación de las desigualdades de Bell y siendo pioneros en la ciencia de la información cuántica”. La historia comienza en 1935, cuando Einstein, Podolsky y Rosen publicaron su famoso artículo titulado “¿Puede considerarse completa la descripción cuántica de



Figura 1. Participantes en la “Primera Conferencia Internacional de Enfriamiento Laser” organizada por Stig Stenholm en Tvärmine, Finlandia, en marzo de 1984. En la fila de atrás de izquierda a derecha: Juha Javanainen, Markus Lindberg, Stig Stenholm, Matti Kaivola, Nis Bjerre, (no identificado), Erling Riis, Rainer Salomaa, Vladimir Minogin. En la primera fila: Jürgen Mlynek, Angela Guzmán, Peter Jungner, Wolfgang Ertmer, Birger Ståhlberg, Olli Serimaa, Jean Dalibard, Claude Cohen-Tannoudji, Victor Balykin. Reproducida con licencia RNP/22/SEP/058488 de la APS.

la realidad física?” (Einstein *et al.*, 1935), que dio origen a una búsqueda de décadas de las denominadas variables ocultas que permitirían determinar con certeza, y no solo probabilísticamente, el resultado de una medición en sistemas cuánticos imbricados (entrelazados). Si los conceptos de realidad y localidad de las propiedades físicas de un sistema fuesen válidos, a la mecánica cuántica le faltaría considerar tales variables y por ello sería una teoría incompleta.

Durante décadas no se vislumbró una forma de confrontar experimentalmente las predicciones de las teorías de variables ocultas con las de la mecánica cuántica. En la década de 1960, John Stewart Bell desarrolló una desigualdad matemática para las teorías de variables ocultas (HVT), la cual impone un límite a la correlación entre resultados de un gran número de mediciones, y sería violada por la mecánica cuántica. Clauser *et al.* (1969) propusieron un experimento real para probar las HVT y formularon una desigualdad de Bell en términos de coincidencias de detección de pares de fotones en un estado imbricado de polarización originado en una transición atómica de dos fotones. Los fotones viajan en direcciones opuestas, cada uno atraviesa un polarizador y se miden las coincidencias de detección del par de fotones en diferentes configuraciones de la orientación de los polarizadores.

A comienzos de la década de 1980, Aspect *et al.* (1982) realizaron una serie de experimentos que zanjaron la discusión, mostrando inequívocamente la violación de la desigualdad de Bell, incluso cambiando la orientación de los polarizadores después de la emisión del par de fotones para evitar la justificación de que el átomo pudiera tener conocimiento del arreglo experimental antes de la emisión. Entonces yo iniciaba mi doctorado y mi primera charla científica de doctorado fue sobre este tema.

Anton Zeilinger, Daniel Greenberger y Michael Horne introdujeron en 1990 (Bouwmeester *et al.*, 1999) los estados imbricados de tres fotones, o estado de Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ), abriendo el camino para la nueva era de tecnologías basadas en la información cuántica que requiere estados imbricados de múltiples qubits: teleportación, computación y criptografía cuánticas. El 29 de septiembre de 2017 se realizó la primera videoconferencia segura con encriptación cuántica entre Viena y Beijing como resultado de un proyecto iniciado en el 2013 que utiliza un satélite chino para realizar experimentos de física cuántica entre la Tierra y el espacio.

Es innegable que la ciencia de la óptica y la fotónica ha cambiado nuestra visión de la naturaleza y nuestra concepción del universo y ha hecho posible la confrontación y corroboración experimental de las teorías físicas fundamentales, constituyéndose simultáneamente en la base de una miríada de tecnologías modernas.

Esta revisión versa sobre las múltiples tecnologías y aplicaciones de la óptica y la fotónica y, especialmente, su impacto en la economía mundial, que ha conducido a la formulación de algunas iniciativas regionales y nacionales en óptica y fotónica. Se presentan sus objetivos primordiales, así como una propuesta justificada de elaboración de un plan nacional de desarrollo en óptica y fotónica adecuado a las necesidades de Colombia.

Tecnologías basadas en la luz

La óptica y la fotónica, además de haber originado nuevas tecnologías e industrias, provee herramientas fundamentales que facilitan y hacen posible el desarrollo de otras ciencias e ingenierías. En áreas sin aparente aplicación comercial directa, pero fundamentales para el avance de la física y la química, tenemos los pulsos láser ultracortos (femto-segundos) para la observación (B. Guo *et al.*, 2019) y el control (Jiang *et al.*, 2017) de la dinámica de electrones en micro y nanofabricación y la ciencia de attosegundos para la obtención de imágenes de procesos electrónicos (Calegari *et al.*, 2016) en física atómica, molecular y de estado sólido. La luz también tiene un papel preponderante en la definición de nuestras unidades de medida de tiempo y espacio y, por ende, en la tecnología del GPS.

Según la Sociedad Internacional de Óptica y Fotónica, SPIE (SPIE, 2022), solo el 6,2 % de los profesionales en óptica y fotónica pertenece a la disciplina de la física, en tanto que el 64 % corresponde a ingenieros (Figura 2).

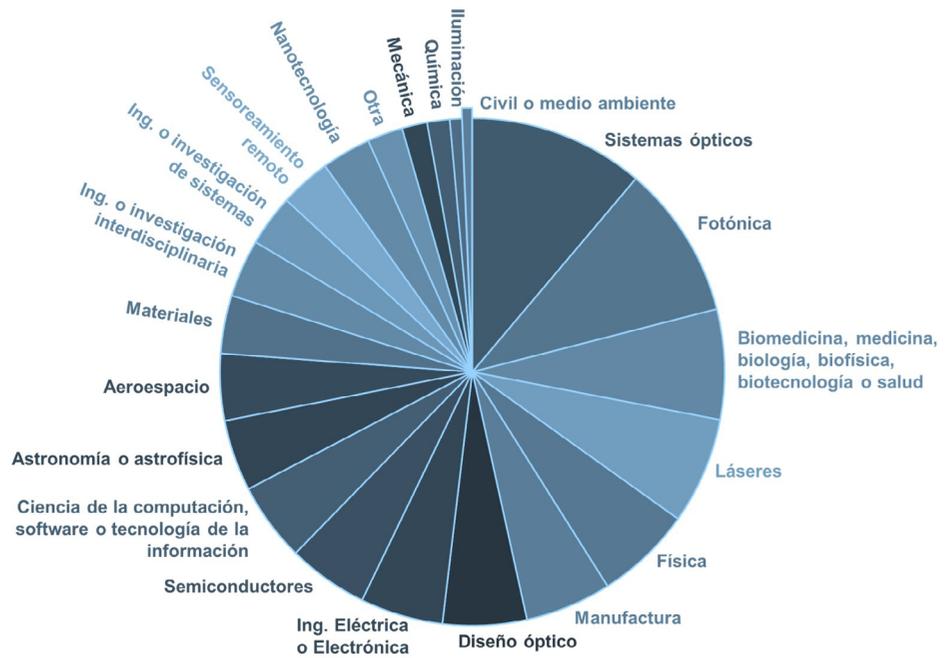


Figura 2. Disciplina primaria de profesionales de la óptica y la fotónica. Datos tomados de SPIE (2022).

La óptica y la fotónica están convirtiéndose en una disciplina *per se*. Los centros de investigación más relevantes en este campo en los Estados Unidos ofrecen programas de pregrado en esta área: The College of Optics and Photonics-CREOL de la Universidad de Florida Central ofrece el título de *Bachelor of Science* en ciencias e ingeniería fotónica; el James C. Wyant College de Ciencias Ópticas de la Universidad de Arizona lo ofrece en ciencias ópticas e ingeniería, y el Instituto de Óptica e Ingeniería Óptica de la Universidad de Rochester en óptica e ingeniería óptica. Por ello resalto aquí la importancia que ha adquirido la óptica en la ciencia y la tecnología a partir del descubrimiento del láser, y su carácter multidisciplinario e interdisciplinario. La fotónica está presente en la iluminación de bajo consumo, las cámaras, las imágenes satelitales, la fabricación aditiva, la cirugía láser, la detección, la comunicación, el entretenimiento, los sensores, el control, la aviación y muchos más dispositivos. Sin la fotónica no tendríamos internet de alta velocidad, ni cámaras en los celulares, ni grandes pantallas de televisión.

La posibilidad de miniaturización de elementos ópticos, su integración en chips de óptica integrada y la fabricación de microestructuras y nanoestructuras fotónicas nos han dotado de diversas fuentes de luz, instrumentos y métodos de medición de alta precisión y resolución, sensores biológicos y de monitoreo del medio ambiente, además de equipos de telecomunicación de gran capacidad y máxima seguridad. En la **figura 3** presentamos las principales áreas de aplicación de la óptica y la fotónica (SPIE, 2022).

A continuación, el lector encontrará una descripción de las contribuciones de la óptica y la fotónica a algunas de estas aplicaciones y las referencias de las publicaciones que permiten tener una visión general de la ciencia y la tecnología involucradas en cada aplicación.

Ciencias de la vida

Las aplicaciones de la biofotónica en medicina y oftalmología (Jelínková, 2013), y en el sector de salud en general, conforman, según este análisis, el 18,6 %. La biofotónica es un área de alto impacto científico y tecnológico en el campo de la salud. Emplea luz para el estudio de procesos biológicos a nivel molecular, celular y de tejidos, así como para

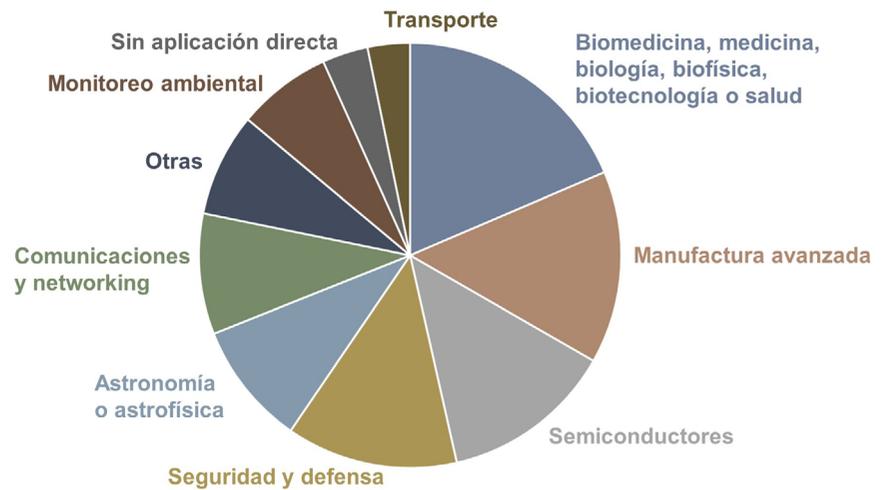


Figura 3. Áreas de aplicación de la óptica y la fotónica. Datos tomados de SPIE (2022)

el diagnóstico, tratamiento y cura no invasiva de enfermedades. Es claramente un área de carácter multidisciplinario, pues su avance requiere del trabajo conjunto de físicos, químicos, biólogos, ingenieros y médicos, entre otros.

Las herramientas fotónicas incluyen el equipo óptico para microcirugía, láseres para intervenciones quirúrgicas y dermatológicas y herramientas para la industria de productos farmacéuticos, la detección de virus, el tratamiento de aguas y la desinfección. Un avance científico de excepcional relevancia es la microscopía de superresolución en vivo (Godin *et al.*, 2014; Schermelleh *et al.*, 2019) y las imágenes médicas, incluidas aquellas en tiempo real que permiten distinguir tejido canceroso de tejido sano durante una cirugía.

Se espera que las nuevas herramientas fotónicas tengan gran aplicación en el campo de la salud personalizada y la medicina regenerativa, y permitan la secuenciación de ADN en menos de 10 minutos combinando la proteómica, la genómica y la metabolómica en tiempo real.

Manufactura avanzada

La fotolitografía es la principal tecnología de impresión de circuitos integrados; permite incorporar en ellos estructuras tridimensionales complejas, como los transistores, e interconexiones entre diversos dispositivos. El uso de láseres en el ultravioleta con la óptica UV, necesaria para proyectar patrones litográficos, permite crear circuitos a escala nanométrica y ha contribuido a su miniaturización.

Los láseres permiten realizar cortes, perforaciones y soldaduras de gran precisión en diversos materiales (Bogue, 2015). En las líneas de maquinado y fabricación también se utilizan diversos sensores ópticos. Las aplicaciones en la manufactura (14,7 %) incluyen las nuevas tecnologías de impresión en 3D (Chua *et al.*, 2017), o la fabricación aditiva, las cuales permiten minimizar el material de desecho producido con tecnologías sustractivas y el uso de los pulsos láser ultracortos (femtosegundos) para el control (Jiang *et al.*, 2017) de la dinámica de electrones en microfabricación y nanofabricación.

Semiconductores

La ciencia y la tecnología de semiconductores se ha desarrollado paralelamente con la óptica y la fotónica. Los avances en la ciencia y la tecnología de semiconductores han permitido el desarrollo de la optoelectrónica con nuevas fuentes láser, los LED, los puntos cuánticos y los fotodetectores. Asimismo, las nuevas fuentes láser son herramientas fundamentales para la fabricación con alta precisión de dispositivos semiconductores

integrados y miniaturizados. Por ello, un 13,2 % de los investigadores en óptica y fotónica trabaja en la ciencia y la tecnología de semiconductores, que también incluye la investigación en la fabricación de celdas fotovoltaicas de gran eficiencia.

Seguridad y defensa

La óptica y la fotónica tienen múltiples aplicaciones en seguridad y defensa (13,1 %), pues la mayoría de los sistemas de defensa se basan en la tecnología de imágenes, el uso de sensores remotos, detectores de agentes químicos y biológicos, cámaras de visión nocturna, comunicaciones y armamento antimisiles.

En cuanto a las aplicaciones civiles, un ejemplo son los hologramas de seguridad (Müller & Krehel, 2020), el reconocimiento biométrico dactilar, facial o del iris y los sistemas ópticos de seguridad mediante codificación óptica, en tanto que los códigos unidimensionales de barras verticales son de uso común en los supermercados y los códigos bidimensionales de respuesta rápida o códigos QR (Barrera *et al.*, 2013) se han popularizado enormemente gracias a la alta seguridad que ofrecen y a su tolerancia al ruido. Se usan masivamente, entre otros, en transacciones bancarias y en el comercio electrónico, en el transporte público de pasajeros, en medicina, para uso informativo en museos y sitios patrimoniales y como medio de acceso fácil a enlaces de comunicación.

Exploración del universo: astronomía y astrofísica

La observación de las estrellas y galaxias siempre ha fascinado a la humanidad, pero nuestra capacidad para lograr observaciones más detalladas ha ido avanzando de la mano de los desarrollos en la óptica y la fotónica desde el telescopio de Galileo hasta nuestros poderosos telescopios terrestres y espaciales. La ciencia de la óptica y la fotónica ha hecho posibles los avances en la astrofísica y en nuestra comprensión del universo y han contribuido a la comprobación de la teoría de la relatividad general de Einstein brindando herramientas metrológicas de gran precisión.

En la década de 1960, Joseph Weber inició la construcción de detectores de ondas gravitacionales usando grandes cilindros o barras de aluminio que vibraban al paso de estas. Eduardo Posada Flórez, físico y científico colombiano especializado en bajas temperaturas, criogénesis y superconductividad, reconocido, además, como uno de los padres de las políticas de ciencia y tecnología del país, quería construir uno de esos detectores en Colombia. Tales experimentos no fueron exitosos y la idea de usar una técnica interferométrica se abrió paso. En 1972, Kip S. Thorne y su grupo publicaron el primero de una serie de artículos que, a lo largo de varias décadas, recogieron las estimaciones de las intensidades y frecuencias de onda que producirían los agujeros negros, las estrellas de neutrones y las supernovas. En 1975, se comenzaron a desarrollar tres prototipos de interferómetros con brazos de decenas de metros en el MIT, Glasgow y Garching, Alemania. Dado que las ondas gravitacionales distorsionan a su paso el espacio-tiempo, producen compresiones y estiramientos alternados de la longitud de los dos brazos en L de interferómetros como el del Laser Interferometer Gravitational Observatory (LIGO), de 4 km de largo. La diferencia de longitud a medir entre los dos brazos es del orden de una milmillonésima de la longitud de onda de la luz usada en el interferómetro. Por ello, durante varias décadas la precisión experimental de la interferometría óptica usada para la detección de ondas gravitacionales aumentó en más de diez órdenes de magnitud. En el 2017 el Premio Nobel de Física fue otorgado precisamente a Kip S. Thorne, Rainer Weiss y Barry C. Barish por “contribuciones decisivas al detector de LIGO y la observación de ondas gravitacionales”.

En el 2020 el Premio Nobel se otorgó en reconocimiento de los trabajos de predicción y comprobación de la existencia de un agujero negro en el centro de nuestra galaxia. Por más de dos décadas los grupos de Reinhard Genzel (director del Instituto Max Planck de Astrofísica en Garching, Alemania) en el European Southern Observatory (ESO) en Chile, y de Andrea Ghez (fundadora y directora del grupo del Centro Galáctico de la Universidad de California en Los Angeles, UCLA, Estados Unidos) con el telescopio Keck en Hawaii, realizaron por separado observaciones de la posición y velocidad radial de estrellas

cercanas al centro de la Vía Láctea. La precisión de sus observaciones fue avanzando con los desarrollos de la óptica adaptativa para telescopios en el infrarrojo y la resolución de los espectrofotógrafos para la medición de la velocidad radial de esas estrellas. Sus observaciones permitieron inferir la presencia de un agujero negro supermasivo en el centro de nuestra galaxia y medir su masa. Vale destacar que Andrea Ghez es la cuarta mujer en ser galardonada con el Premio Nobel de Física.

La óptica y la fotónica nos han permitido explorar el espacio desde los telescopios terrestres con la óptica adaptativa en su versión extrema (Guyon, 2018) y desde el espacio con los telescopios espaciales Hubble (NASA, 2021), que orbita la Tierra desde 1990, y James Webb (JWST) (NASA, 2022a), cuyas primeras imágenes fueron publicadas el 12 de julio del 2022. El telescopio Hubble ha tomado espectros en el ultravioleta cercano, en el visible y en el infrarrojo cercano ($0,1 \mu\text{m}$ - $1,7 \mu\text{m}$) y ha contribuido al desarrollo de nuestra visión cosmológica investigando nuestro propio sistema solar, otras estrellas y sus exoplanetas, nebulosas, galaxias, agujeros negros, ondas y lentes gravitacionales.

El magnífico telescopio James Webb (JWST) orbita el Sol cerca al punto de Lagrange Sol-Tierra L2, aproximadamente a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra. Por ello, a diferencia del Hubble, cuya óptica pudo ser reparada por astronautas, todos sus mecanismos debían funcionar a la perfección desde su lanzamiento. El JWST observa en un rango de frecuencia más bajo, desde la luz visible en el rojo hasta el infrarrojo medio ($0,6 \mu\text{m}$ - $28,3 \mu\text{m}$), lo que nos da imágenes de las galaxias más lejanas, como la HD1, que se estima nació solo 330 millones de años después del Big Bang y se encuentra a una distancia aproximada de 33 mil millones de años luz. Está compuesto por 18 espejos hexagonales de berilio enchapado en oro de aproximadamente 20 kilos cada uno que deben alinearse con la precisión de un diezmilésimo del espesor de un cabello humano para actuar al unísono como un gran espejo de 6,5 m de diámetro (NASA, 2022b). Por trabajar en el infrarrojo, el telescopio debe mantenerse a una temperatura inferior a 50 K (-223°C), de modo que su propia radiación térmica no solape la luz recogida. Su protector solar de cinco capas de kapton recubiertas con aluminio es una maravilla de la tecnología moderna. El kapton es un material (poliimida) desarrollado por Dupont en la década de los 60 resistente a temperaturas entre los 4 y 700 K. Las dos capas exteriores tienen, además, un revestimiento reflectante de silicio dopado con conductor para evitar cargas espaciales.

Comunicaciones

La óptica y la fotónica literalmente mantienen la comunicación por internet y gran parte de las tecnologías de la información. El crecimiento de la Internet y el aumento notable de su velocidad ha sido posible gracias a la fibra óptica (Willner, 2019) y al desarrollo de láseres de alta monocromaticidad para la multiplexación de la información y su transmisión en forma digital. La máxima capacidad de transmisión reportada en laboratorio es de 50 Tb/s a 240 km utilizando 50 canales multiplexados en una fibra monomodal (Kobayashi *et al.*, 2022). Pero la comunicación óptica no se limita a las comunicaciones transoceánicas submarinas y otras de larga distancia por fibra. La fibra óptica se utiliza también en redes locales y en centros de datos para la interconexión rápida de componentes periféricos (PCIe) en supercomputadoras (Taubenblatt, 2012) a velocidades de cientos de Gb/s (Ajima, 2022). La supercomputadora Frontier del Laboratorio Nacional Oak Ridge del Departamento de Energía de Estados Unidos usa interconexión óptica, y en mayo de este año fue clasificada como la más rápida del mundo, capaz de ejecutar 10^{18} operaciones por segundo (ORNL, 2022). La óptica también se utiliza en memorias y almacenamiento de datos (Lian *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022).

Pantallas, monitores, realidad virtual

La tecnología de pantallas es crítica para la información y el entretenimiento (Huang *et al.*, 2010). Las pantallas de cristal líquido (LCD) se usan en los celulares, tabletas, computadores y televisores y se basan en la manipulación de la polarización de la luz

proveniente de una fuente exterior (actualmente luz LED) que ilumina la pantalla. Las pantallas OLED usan diodos emisores de luz orgánicos en cada pixel, con lo cual se elimina la necesidad de una fuente exterior de luz y ofrecen la posibilidad de tener pantallas flexibles (plegables y enrollables). Las pantallas QLED usan una película de puntos cuánticos que al ser iluminados por luz LED azul emiten luz verde o roja según su tamaño. Cada vez las pantallas son de mayor tamaño, tienen mayor resolución y mejor calidad de color.

Las tecnologías de visualización y pantallas en 3D (**Pastoor & Wöpking**, 1997), así como las tecnologías emergentes de realidad virtual y realidad aumentada (**Yin et al.**, 2021), tienen multiplicidad de aplicaciones novedosas que van desde la educación inmersiva (**Hamilton et al.**, 2021), la herencia cultural (**Teeng et al.**, 2022) y el entretenimiento, hasta el entrenamiento médico (**Samadbeik et al.**, 2018), la manufactura (**Choi et al.**, 2015) y la agricultura (**de Oliveira & Corrêa**, 2020).

Imágenes y sensores

La técnica de detección y localización con luz (*light detection and ranging*, LIDAR) ha evolucionado considerablemente desde su introducción en 1961, demostrando su utilidad en la prospección aérea de la topografía de la superficie terrestre y la marina, o el monitoreo de la polución ambiental. Puede ser bidimensional o tridimensional, terrestre o con vehículos aéreos, tripulados o no. Además de ser útil en la cartografía y la obtención de las características de los edificios en zonas urbanas, es muy útil en arqueología, pues puede escanear el paisaje y captar detalles difíciles de ver a simple vista, lo que ayuda en la detección de fósiles y huesos escondidos bajo la superficie. La LIDAR se emplea actualmente en los iPhone e iPad más modernos, que ya cuentan con un escáner LIDAR en 3D. El teléfono proyecta luz infrarroja sobre los objetos a escanear y la luz retrodispersada es detectada por un sensor, conjuntamente con su retraso temporal, a partir del cual se determinan las distancias. De este modo, el sistema LIDAR permite percibir la forma y la profundidad de los objetos y generar imágenes de ellos en 3D.

La espectroscopía láser para análisis elemental y molecular es otra forma de obtener imágenes y determinar la composición de materiales en arte y arqueología (**Nevin et al.**, 2012). Se han usado en el Mars Rover para determinar la composición de materiales en el suelo marciano. Actualmente ya se comercializan los sistemas de mapeo móviles en drones, que utilizan luz UAV y portan, además de los sensores LIDAR, sensores de color RGB y espectroscopios, por lo cual se adaptan a una gran diversidad de aplicaciones. También se comercializan los equipos LIDAR portátiles y manuales que trabajan en el azul con precisión milimétrica, por lo cual tienen múltiples aplicaciones en ciencia, educación, arte e ingeniería, y en salud para el diseño de prótesis. En los procesos de manufactura de precisión se usan máquinas ópticas de medición de perfiles, cuya precisión se mide en micrómetros.

Sin duda una de las aplicaciones de mayor relevancia en el futuro es el uso de sensores basados en LIDAR para la visión diurna y nocturna en 3D de robots, vehículos autónomos (**Royo & Ballesta-García**, 2019) y máquinas industriales inteligentes. En un futuro más lejano, será posible el diseño de ropa inteligente que pueda monitorear nuestra salud, nuestra postura y movimientos, sentir el medio ambiente y recolectar energía mediante fibras multimaterial que realicen las mismas funciones de los equipos electrónicos actuales pero integrados en un hilo de grosor ligeramente mayor que el de un cabello (**Schneegass & Amft**, 2017).

Monitoreo ambiental

El monitoreo ambiental tiene un papel central en el diagnóstico del impacto de las actividades humanas y el clima en los sistemas naturales, particularmente en los recursos hídricos y agrícolas, y permite pronosticar, e incluso prevenir, desastres naturales. Dos tecnologías ópticas son de gran utilidad en este campo: la LIDAR y los sensores de fibra óptica. La primera tiene múltiples aplicaciones ecológicas (**Q. Guo et al.**, 2021),

pues permite hacer inventario de bosques, vegetación, detección de algas y diagnóstico atmosférico (Hering *et al.*, 2010), así como evaluar el riesgo y el daño posterior de deslizamientos de tierra e inundaciones y tsunamis (Chan & Toth, 2018). Los sensores de fibra óptica pueden trabajar en instalaciones subterráneas o submarinas a altas temperaturas y presiones sin interferencia electromagnética (Joe *et al.*, 2018) y tienen múltiples aplicaciones en ingeniería civil, ingeniería agrícola, ingeniería de petróleos y minería. En todas estas actividades, el monitoreo ambiental es esencial para detectar los cambios ambientales producidos por instalaciones y procesos industriales y garantizar el uso de tecnologías verdes.

El láser, usualmente de Er:YAG, que trabaja a 2.940 nm en el infrarrojo (IR), ha sido muy útil en la restauración de obras de arte y la limpieza de edificios históricos. El láser elimina la suciedad de la superficie, el barniz amarillento, el exceso de pintura e, incluso, los retoques de una restauración anterior, hasta una micra de la superficie de la pintura (Lazzeretti *et al.*, 2011; Moretti *et al.*, 2010).

También es importante mencionar las nuevas tecnologías de iluminación LED para cultivos en invernaderos (Berkovich *et al.*, 2017) y la agrofotónica, en la que la LIDAR permite monitorear la salud del suelo y la hidrología, predecir los niveles de proteína en las cosechas de granos y determinar cuándo recoger la fruta. También hay múltiples aplicaciones de la fotónica en cultivos hidropónicos y acuicultura para analizar la calidad del agua y verificar la salud de las poblaciones de peces.

Iluminación

La luz LED (Khan, 2014) ha reemplazado los bombillos incandescentes por su eficiencia y durabilidad, y los fluorescentes, por no contener materiales peligrosos como el mercurio. Es común actualmente el usar luz LED blanca para la iluminación domiciliaria, por su bajo consumo energético y gran brillo. La creación de luz blanca para iluminación requiere una combinación de luz roja, verde y azul. Mientras que el primer LED verde fue patentado por Rubin Braunstein y Egon Loebner de la RCA en 1958, y Nick Holonyak Jr. de la GE inventó el primer LED rojo en 1962, los LED azules requirieron de dos décadas de investigación y de una tecnología mucho más avanzada. En vez de la tecnología del GaAs, el ingrediente clave de los LED azules es el nitruro de galio dopado con grandes cantidades de magnesio.

Durante las décadas de 1980 y 1990, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura desarrollaron la ciencia y la tecnología necesarias para fabricar los LED azules (Figura 4). Por ello fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en el 2014. Por su brillo, sus aplicaciones se han extendido a la iluminación en automóviles, semáforos, decoraciones en las ciudades, espectáculos (Daukantas, 2010), y obras de arte luminoso (Kirkland, 2022).



Figura 4. Clausura del Año Internacional de la Luz en 2016. De izquierda a derecha: Banderlei Bagnato, Shuji Nakamura y Ángela Guzmán

Energía solar

Lograr celdas solares de alta eficiencia y bajo costo ha sido uno de los objetivos primordiales de la investigación en fotovoltaicos. Las celdas solares de silicio absorben solo la parte del espectro solar comprendido entre los 400 y los 1.100 nm. Por ello tienen una eficiencia teórica máxima de 32 % y han alcanzado en la práctica una eficiencia aproximada de 25 %. Una estrategia para aumentar la eficiencia de las celdas solares para que abarquen el espectro solar, es apilar materiales semiconductores fabricados con diferentes bandas prohibidas, optimizadas utilizando aleaciones de semiconductores III-V. Otra estrategia es el uso de concentradores solares mediante dispositivos ópticos para enfocar la energía del sol y elevar así la energía incidente en la celda. Hasta el 2020 el récord mundial de eficiencia lo tenía una estructura de seis junturas sobre un sustrato de GaAs: 39,2 % bajo un sol y 47,1 % bajo concentración equivalente a 143 soles (**Geisz et al., 2020**). Actualmente el récord mundial lo tiene una estructura de triple juntura, con una celda intermedia de GaInAs/GaAsP de pozo cuántico (QW) entre una celda superior de GaInP y una celda inferior de GaInAs. Sin concentración óptica, su eficiencia es de 39,5 % del espectro global, lo que incluye el cielo azul y el suelo circundante (**France et al., 2022**).

Debido a la abundancia y bajo costo del silicio, la integración heteroepitaxial de celdas solares de multijunturas de semiconductores III-V de alta eficiencia en un sustrato de silicio (celdas multijuntura III-V basadas en silicio) es actualmente de gran interés y podría constituirse en la próxima generación de celdas fotovoltaicas (**Yamaguchi et al., 2021**).

La tecnología de concentradores solares para la producción de energía eléctrica (CPS) se utiliza también en plantas termosolares para elevar la temperatura de un líquido y producir electricidad impulsando una turbina de vapor. El complejo termosolar más grande del mundo, IVANPAH, produce 377 MW y está ubicado en el desierto de Mojave, Estados Unidos. Tiene tres torres de 140 m de altura con calderas en donde se concentra la energía solar focalizada por 173.500 heliostatos.

Fusión nuclear con láseres

El desarrollo de técnicas para elevar la potencia de los láseres se inició casi inmediatamente después del descubrimiento del láser. Al láser continuo de Maiman le siguió en 1961 el primer láser pulsado de rubí, con una potencia pico cercana a 1 MW, mil veces mayor que la potencia del láser continuo. Al obstruir el camino de la luz en el resonador, se disminuye su factor de calidad, lo que permite una mayor inversión de población. Al retirar la obstrucción, se eleva el factor de calidad y se produce la emisión de un pulso láser. Esta técnica se conoce como conmutación del factor de calidad del resonador láser (*Q-switching*).

En 1969 los equipos de la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas y la Compañía General de Electricidad de Estados Unidos demostraron que se podían producir neutrones de manera previsible y repetible irradiando deuterio sólido con impulsos láser de nanosegundos (**Bobin, 2020**). Motivado por esta posibilidad de usar pulsos láser de alta energía para la fusión nuclear, el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL) en California comenzó a desarrollar en 1970 láseres cada vez más potentes utilizando medios láser como amplificadores.

A mediados de los 80, este método de amplificación sucesiva alcanzó su límite, pues al alcanzar una potencia elevada, los efectos no lineales conducían a un autoenfoque y filamentación del haz. En 1985 Donna Strickland y Gerard Mourou demostraron el método de amplificación por compresión de pulsos de ancho de banda amplio (*chirped pulse amplification*, CPA) (**Strickland & Mourou, 1985**). Las diversas frecuencias individuales del pulso viajan a diferentes velocidades, lo que hace que el pulso se “estire” en el tiempo disminuyendo su potencia máxima por debajo de los límites de daño de los amplificadores. Después de la amplificación, el pulso se comprime temporalmente generando un pulso ultracorto de alta potencia. Su invención hizo posible la cirugía LASIK y abrió el camino a los láseres de petawatios de pulsos ultracortos (duración de decenas a centenas de

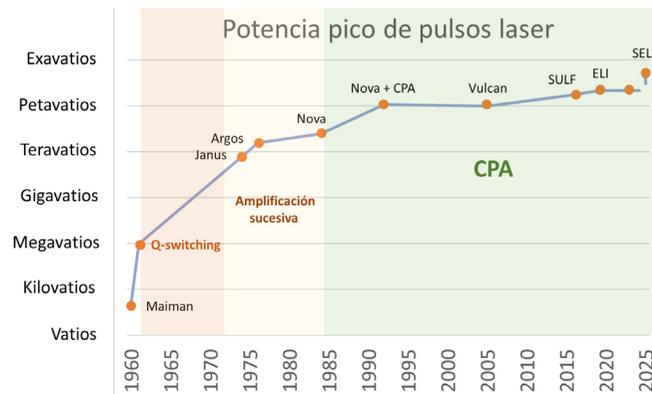


Figura 5. Evolución temporal de los láseres de alta potencia

femtosegundos) que han aumentado grandemente las posibilidades de obtener la fusión nuclear con láseres (Tollefson, 2021; Margarone *et al.*, 2022). Gérard Mourou y Donna Strickland recibieron el Premio Nobel del 2018 “por su método para generar pulsos ópticos ultracortos de alta intensidad”. En la **figura 5** puede observarse el decisivo impacto del método CPA en la obtención de láseres de alta potencia.

La técnica de CPA fue implementada en el láser NOVA del LLNL, que en 1992 alcanzó una potencia de 1,25 PW. En el 2019 el láser de Magurele de la *Extreme Light Infrastructure* (ELI) de la Unión Europea alcanzó los 10 PW de potencia pico. Este es un sistema láser de alta potencia (HPLS) que constará de dos segmentos láser independientes, cada uno de los cuales proporcionará una potencia máxima de 10 PW (10^{16} W).

Potencias de hasta 12,5 PW se han reportado en la Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility (SULF). El láser de la SULF utiliza CPA. La energía amplificada de 422 J se logró a una tasa de repetición de un disparo cada 3 minutos. Después del compresor, la duración del pulso fue de 23,4 fs, con una eficiencia del 71,3 %, lo que corresponde a una potencia máxima de 12,9 PW. Para el 2025 se ha programado que la Estación de Luz Extrema (SEL) de Shanghai, China, produzca un láser de 100 PW.

Europa desarrolla actualmente el proyecto de la European High Power Laser Energy Research Facility (HIPER); los estudios se encuentran en fase preparatoria con participación directa de la industria. Su objetivo principal es demostrar el potencial industrial y comercial de la producción de energía a partir de la fusión inercial con láseres.

En junio del 2021 la Instalación Nacional de Ignición (NIF) del LLNL demostró una reacción de fusión autosostenida que libera más energía de fusión que la energía entregada por el sistema láser. Recientemente, se produjeron 1,37 MJ de energía de fusión por confinamiento inercial utilizando una estrategia híbrida. Cuando se intenta aumentar el radio de la cápsula inicial con una energía fija del láser, existe el riesgo de perder densidad de energía. Por ello se utilizó un pistón de combustible de deuterio-tritio (DT) denso circundante para calentar y comprimir el “punto caliente” central de combustible DT, obteniendo así más energía acoplada al punto caliente (Kritcher *et al.*, 2022).

Donna Strickland es la tercera mujer en recibir el Premio Nobel de Física. Tuve la oportunidad de trabajar con ella en la mesa directiva de la ICO (Guzmán, 2011), siendo ella vicepresidenta designada por OSA (actualmente OPTICA) y yo secretaria general. La foto de la **figura 6** fue tomada en el Congreso General de ICO, ICO-22, en Puebla, México.

La industria de sistemas y componentes fotónicos

La producción anual de sistemas y componentes basados en óptica y fotónica ha sido estimada en 600 mil millones de dólares (OPTICA, 2022). En la **figura 7a** se observa la distribución de ingresos por productos y servicios que dependen de las tecnologías avanzadas de óptica y fotónica.



Figura 6. Miembros de la mesa directiva de ICO 2008– 2011 y 2011–2014. De pie de izquierda a derecha: Moshe Oron, H. Philip Stahl, Yasuhiko Arakawa, Gert von Bally, James A. Harrington, Ari Friberg, Tomasz Szoplik, Ahmadou Wagué. De izquierda a derecha primera fila: María Yzuel, Donna Strickland, Carmen Cisneros Gudiño, Roberta Ramponi, Zohra Ben Lakhdar, Duncan T. Moore, María Luisa Calvo, Ángela M. Guzmán, Fernando Mendoza Santoyo

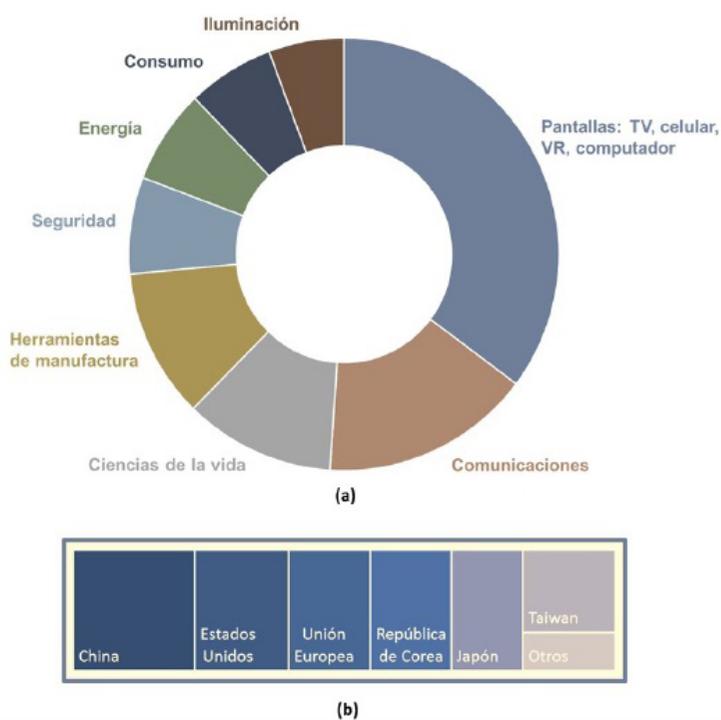


Figura 7. (a) Distribución de ingresos de la industria global de óptica y fotónica. (b) Cuota del mercado por países en el 2020

En la **figura 7b** podemos ver que Asia recibe casi dos tercios de los ingresos globales por esta tecnología (OPTICA, 2022), pues lidera la producción de pantallas de celulares, televisores y computadores, y de paneles fotovoltaicos y LED, entre otros. En el contexto latinoamericano solo Brasil inició tempranamente industrias de fibra óptica, comunicaciones y sensores (Torner *et al.*, 2007).

Iniciativas nacionales de desarrollo de la óptica y la fotónica

La importancia de la óptica y la fotónica como tecnologías estratégicas para incrementar la competitividad industrial, cerrar las brechas en comunicaciones y tecnologías de la información, contribuir al desarrollo sostenible, a la generación y ahorro energético, el monitoreo ambiental, a la salud y la agricultura, entre otros, ha motivado la creación de iniciativas nacionales y regionales de investigación y desarrollo en esta área.

Photonics 21: la Unión Europea

La Unión Europea creó la plataforma tecnológica Photonics 21 en el 2005 con el objetivo de mantener el liderazgo europeo en las tecnologías fotónicas con aplicaciones en comunicaciones e informática, iluminación, manufactura industrial, ciencias de la vida, ciencias del espacio, defensa y seguridad, educación y entrenamiento del recurso humano. La plataforma cuenta con más de 3.000 miembros que incluyen la mayoría de las industrias líderes en fotónica y de los grupos de investigación y desarrollo (I&D) europeos en esta área. Su nombre refleja la concepción del siglo XXI como el siglo de la fotónica, así como de la electrónica. La plataforma debe proporcionar el entorno adecuado para la investigación y desarrollo de componentes y sistemas fotónicos de aplicación en una amplia gama de sectores industriales, y crear conexiones estratégicas entre pequeñas y medianas industrias basadas en la fotónica y las industrias usuarias, de modo que compartan una misma visión de largo plazo.

En el marco del programa Horizon 2020 se creó en el 2013 la Asociación Photonics 21 (**Photonics21**, 2022), de carácter público-privado, comprometida en la promoción en Europa de la innovación en fotónica, área que contribuirá sustancialmente a la economía europea de este siglo. En el 2019 se publicó su hoja de ruta estratégica 2021-2027 (**Photonics21**, 2019) que se centra en: 1) información y comunicación; 2) fabricación industrial y calidad; 3) ciencias de la vida y salud; 4) iluminación emergente, electrónica y pantallas; 5) seguridad, metrología y sensores; 6) diseño y fabricación de componentes y sistemas; 7) investigación, educación y capacitación en fotónica; 8) agricultura y alimentación, y 9) automoción y transporte.

Iniciativa Fotónica Nacional de los Estados Unidos

En el 2013 el Consejo Nacional de Investigación publicó el informe “Óptica y fotónica: tecnologías esenciales para nuestra nación” (**NRC**, 2013), en el que se enfatiza el papel fundamental y omnipresente de las tecnologías ópticas en la creación de nuevas industrias y el crecimiento laboral. Atendiendo a este llamado, las principales sociedades en óptica y fotónica (OSA, SPIE, IEEE, LIA) y la Sociedad Americana de Física crearon la Iniciativa Fotónica Nacional (NPI) (**NPI**, 2013) que reúne expertos de la industria, la academia y el gobierno. Estos expertos asesoran a los legisladores y los responsables de las decisiones relacionadas con la financiación e inversión de Estados Unidos en cinco campos clave: fabricación avanzada, comunicaciones y tecnologías de la información, defensa y seguridad nacional, energía y salud y medicina.

En el 2018, el congreso promulgó la ley de Iniciativa Cuántica Nacional que estableció un programa federal para acelerar la investigación en la ciencia y el desarrollo de la tecnología de información cuántica y sus aplicaciones: computadores cuánticos, sensores cuánticos y redes de telecomunicación con encriptación cuántica de máxima seguridad, entre otros (**National Quantum Initiative-NQI**, 2018). La fotónica es también parte integral de esta iniciativa.

Hacia un México más brillante: mapa de ruta de óptica y fotónica (ProMéxico, 2016)

En el 2016 ProMéxico, con el apoyo de la ICO, la Academia Mexicana de Óptica y varios centros de investigación, publicó la estrategia mexicana para el impulso de la óptica y la fotónica, especificando los siguientes hitos en su plan de acción: 1) lograr la iluminación urbana con LED inteligentes para mejorar el uso eficiente de la energía en un entorno de sistemas operativos urbanos (SOU); 2) lograr un incremento de la eficiencia energética mediante el uso y producción de celdas fotovoltaicas y combustibles líquidos eficientes;

3) lograr la conectividad urbana con fibra óptica nacional de alta calidad y, así, habilitar la industria correspondiente en el país; 4) diseñar y producir sensores fotónicos en el rango de 2 a 20 μm ; desarrollar un láser de ultra-alta potencia (petawatt) y controlar la calidad de los procesos con certificaciones adecuadas.

Para el logro de estos hitos se establecen diferentes proyectos y un sistema de laboratorios mexicanos de investigación en fotónica encargado de desarrollar o implementar las siguientes tecnologías: sensores de fibra óptica, sensores para uso biológico y médico, manejo del calor, detectores de un solo fotón, fibra óptica con menor error de desempeño, láseres en el rango de 2 a 20 μm , silicón especializado médico, medios y tecnologías para la reducción de errores en transmisión, manufactura de silicios y compuestos orgánicos comunes y avanzados, celdas solares de segunda y tercera generación y LED avanzados.

Iniciativa Brasileña de fotónica (IBFóton) (MCTI, 2021)

En marzo del 2021, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación del Brasil publicó dos resoluciones que definen la Iniciativa Brasileña de Fotónica (IBFóton) y crean el Sistema Brasileño de Laboratorios de Fotónica (Sisfóton-MCTI) destinados a la investigación, el desarrollo y la prestación de servicios tecnológicos, y emprendimiento e innovación en fotónica. IBFóton es un programa estratégico de fomento de la fotónica que priorizó las siguientes aplicaciones de la fotónica para recibir incentivos gubernamentales: comunicaciones e información y tecnología de la comunicación, salud, energía, agricultura, medio ambiente, industria, defensa, movilidad y educación. Asimismo, definió las tecnologías prioritarias: fibra óptica, dispositivos fotónicos, integración híbrida, óptica integrada, dispositivos optoelectrónicos, sistemas y redes de comunicaciones ópticas, láseres, materiales avanzados para fotónica, nanofotónica, plasmónica, óptica clásica, óptica cuántica y óptica no lineal, instrumentación óptica, espectroscopía, metrología, sensores, pantallas e iluminación.

Elementos para una iniciativa colombiana en óptica y fotónica

Colombia cuenta con una comunidad de investigadores en óptica y fotónica que desde la década de 1980 está integrada en una red que hoy recibe el nombre de Sociedad Red Colombiana de Óptica. Existen grupos de investigación de larga trayectoria en la adquisición y procesamiento de imágenes, espectroscopía, sensores, LIDAR y metrología óptica, cuyo conocimiento y experiencia constituyen una base científica y tecnológica sólida para nuevas industrias intensivas en conocimiento y tecnología (*knowledge- and technology-intensive*, KTI). Las empresas KTI de monitoreo y sensoramiento ambiental de bajo costo y de operación distribuida cobrarán cada vez mayor importancia en la mitigación de los efectos adversos del cambio climático y en la preservación de nuestra biodiversidad y ecosistemas. Por otra parte, la LIDAR y el análisis de imágenes satelitales en tiempo real podrían proporcionar información fundamental para la toma de decisiones de autoridades locales en cuanto a contaminación ambiental, seguridad alimentaria y riesgo de desastres. Una hoja de ruta de desarrollo y transferencia adecuada de tecnologías fotónicas en el país brindaría apoyo fundamental a la creación de ciudades inteligentes, agroindustrias eficientes y una economía sostenible.

Pero Colombia carece de apoyo financiero, estatal o privado, para el desarrollo de industrias KTI. En Estados Unidos se financian tres tipos de investigación: básica, aplicada y de desarrollo experimental, entendiendo que son campos de trabajo sistemático dirigido a producir nuevos productos o procesos, o a mejorar los existentes, con base en el conocimiento obtenido de la investigación y la experiencia práctica. El estado financia aproximadamente un 13 % de la investigación de desarrollo experimental (NSF, 2022), en tanto que el sector privado financia el 86 %. ProColombia, la entidad análoga a ProMexico en Colombia, sólo contempla inversiones financieras y en turismo, pero no financia investigación ni desarrollo de empresas KIT.

Actualmente, el sistema de unidades internacionales (SI) se define en términos de un conjunto de siete constantes con valor fijo, de las que se puede derivar el sistema completo de unidades: 1) la frecuencia de transición hiperfina del estado fundamental no perturbado

del átomo de cesio-133 medida por métodos ópticos, cuyo inverso define el segundo; 2) la velocidad de la luz que define el metro; 3) la constante de Planck que define el kilogramo patrón; 4) la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz que define la candela; 5) la constante de Boltzmann que define el grado Kelvin; 6) la carga del electrón que define el amperio, y 7) el número de Avogadro. Excepto por este último, todas las unidades del SI involucran en su definición el segundo. Por ello, la medición precisa del tiempo es fundamental para la metrología y, en consecuencia, la comunidad de investigadores en óptica y fotónica debería tener un rol preponderante en la metrología de precisión y estándares.

El Instituto Nacional de Metrología (INM) es, en principio, responsable de mantener en Colombia los patrones nacionales del SI. El INM posee un reloj atómico, pero no tiene un laboratorio de óptica que le permita mantener los patrones nacionales de tiempo, longitud y masa y, por ende, de temperatura, corriente e intensidad luminosa. En su plan estratégico 2018-2022 reconoce la necesidad de articulación con el sistema de ciencia, tecnología e innovación y la carencia de información sobre posibles institutos designados para la custodia y mantenimiento de los patrones nacionales. Tampoco el ICONTEC tiene laboratorio de metrología óptica, ni asociado ni propio.

En la formulación de la hoja de ruta mexicana es claro que ProMexico entendió el papel fundamental de la metrología en el comercio internacional para la certificación de la calidad de los productos de exportación con estándares internacionales y el control de la calidad y las especificaciones de la tecnología importada, así como la necesidad de que la metrología óptica cuente con una red de laboratorios de investigación de excelencia. Una labor pionera de la Sociedad Red Colombiana de Óptica sería el contactar instituciones estatales y privadas para organizar un sistema de laboratorios de investigación dispuestos a ofrecer servicios metrológicos y conseguir que el gobierno financie la generación de empresas KTI en el país.

Por último, no debemos dejar de lado los nuevos desafíos de las tecnologías emergentes y cuánticas que modificarán profundamente todos los aspectos de nuestro diario vivir y sin cuya apropiación y adecuada comprensión veremos aumentar vertiginosamente nuestra dependencia y la brecha de desarrollo tecnológico con los países desarrollados.

Observaciones finales

Nuestra habilidad para generar luz de características espaciales y temporales controlables y en estados cuánticos específicos, y para amplificarla, transmitirla, detectarla y controlar en general su interacción con la materia, nos ha permitido desarrollar múltiples tecnologías basadas en la óptica y la fotónica que son de relevancia crucial para nuestra sociedad. En esta revisión se brinda un panorama general de los avances científicos y tecnológicos en esta área con múltiples referencias a artículos de revisión recientes que permiten al lector profundizar en tópicos específicos.

John Dudley, el presidente del Año Internacional de la Luz, publicó recientemente un artículo titulado “Luz, láseres y el Premio Nobel” (Dudley, 2020). Desde la entrega de los primeros Premios Nobel en diciembre 10 de 1901, por el trabajo en óptica se han entregado 34 Premios Nobel de Física, cinco de Química y cuatro de Fisiología y Medicina. Es también de resaltar que las cuatro mujeres galardonadas con premios Nobel de Física han investigado en óptica o usado herramientas ópticas para su trabajo de investigación.

Dudley señala que ya en la segunda mitad del siglo XIX, los estudios del espectro característico de la radiación del cuerpo negro estuvieron motivados y fueron estimulados más que por curiosidad científica por problemas económicos. En ese momento Berlín escogía entre iluminación con gas o iluminación eléctrica, así como recientemente hemos migrado de las bombillas incandescentes a la iluminación con LED. El descubrimiento del LED azul, y su alimentación con energía solar, abrió también la posibilidad de llevar iluminación a zonas no electrificadas. Las necesidades de la cuarta revolución industrial que se inicia con el cambio en nuestras fuentes de energía seguirán motivando avances científicos en la nanofotónica y la plasmónica.

Hoy la óptica y la fotónica no son una disciplina dependiente de la física, sino una ciencia y una tecnología desarrolladas conjuntamente por profesionales de diferentes disciplinas que hacen posible el avance de otras ciencias y que genera y seguirá generando grandes ingresos a las regiones y países que optaron u opten por fortalecer esta área de investigación y apoyar la creación de nuevas empresas de base científica y tecnológica en este campo.

Las tecnologías fotónicas emergentes nos permiten atisbar un futuro en el campo de la “internet de las cosas”, los computadores cuánticos, la robótica, la automatización vehicular, la medicina personalizada, la agricultura y la producción eficiente de alimentos, la seguridad energética, la manufactura inteligente, y mucho más.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar.

Referencias

- Ajima, Y.** (2022). Optical connection of top-level supercomputers: current status and future expectations. In R. T. Chen & H. Schröder (Eds.), *Optical interconnects XXII* (Vol. 12007, pp. 11 – 19). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2607916>
- Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G.** (1982, Dec). Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-varying Analyzers. *Physical Review Letters*, 49, 1804-1807. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
- Barrera, J. F., Mira, A., Torroba, R.** (2013). Optical encryption and QR codes: Secure and noise-free information retrieval. *Optical Express*, 21(5), 5373-5378. <https://doi.org/10.1364/OE.21.005373>
- Berkovich, Y.A., Konovalova, O., Smolyanina, S.O., Erokhin, A. N., Averchevab, O.V., Bassarskayab, M., Kochetovab, G.V., Zhigalovab, T.V., YakovlevacI, O.S., Tarakanovc, I.G.** (2017). LED crop illumination inside space green-houses. *REACH*, 6, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.reach.2017.06.001>
- Bobin, J.** (2020). 50 years ago: the first nuclear fusion reactions induced by laser radiation. *Reflète de la Physique*, 67, 21-25. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:520712055
- Bogue, R.** (2015). Lasers in manufacturing: a review of technologies and applications. *Assembly Automation*, 35(2), 161-165. <https://doi.org/10.1108/AA-07-2014-066>
- Bouwmeester, D., Pan, J.-W., Daniell, M., Weinfurter, H., Zeilinger, A.** (1999, Feb). Observation of three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. *Physical Review Letters*, 82, 1345-1349. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.82.1345>
- Calegari, F., Sansone, G., Stagira, S., Vozzi, C., Nisoli, M.** (2016). Advances in attosecond science. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 49(6), 062001. <https://doi.org/10.1088/0953-4075/49/6/062001>
- Chan, J., Toth, C. K.** (2018). Topographic laser ranging and scanning, 2nd. edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781315154381>
- Chen, C.-C., González-Escudero, R., Minář, J., Pasquiou, B., Bennetts, S., Schreck, F.** (2022). Continuous Bose–Einstein condensation. *Nature*, 606(3), 683-687. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04731-z>
- Choi, S., Jung, K., Noh, S. D.** (2015). Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions. *Concurrent Engineering*, 23(1), 40-63. <https://doi.org/10.1177/1063293X14568814>
- Chua, C. K., Matham, M. V., Kim, Y.-J.** (2017). Lasers in 3D printing and manufacturing. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/9500>
- Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., Holt, R. A.** (1969, Oct). Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 23, 880-884. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.23.880>
- Daukantas, P.** (2010). A short history of laser light shows. *OPN Optics & Photonics News*, 44, 42-47. <https://laserfest.org/news/opn-laser-shows.pdf>
- Davis, K. B., Mewes, M. O., Andrews, M. R., van Druten, N. J., Durfee, D. S., Kurn, D. M., Ketterle, W.** (1995). Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms. *Physical Review Letters*, 75, 3969-3973. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.3969>
- de Oliveira, M. E., Corrêa, C. G.** (2020). Virtual reality and augmented reality applications in agriculture: a literature review. In 2020 22nd symposium on virtual and augmented reality (svr) (p. 1-9). <https://doi.org/10.1109/SVR51698.2020.00017>

- Dudley, J. M.** (2020). Light, Lasers, and the Nobel Prize. *Advanced Photonics*, 2(5), 050501. <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.5.050501>
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N.** (1935, May). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47, 777-780. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.47.777>
- France, R. M., Geisz, J. F., Song, T., Olavarria, W., Young, M., Kibbler, A., Steiner, M. A.** (2022). Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices. *Joule*, 6(5), 1121-1135. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.024>
- Franken, P. A., Hill, A. E., Peters, C. W., Weinreich, G.** (1961). Generation of optical harmonics. *Physical Review Letters*, 7(4), 118-119. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.118>
- Geisz, J. F., France, R. M., Schulte, K. L., Steiner, M. A., Norman, A. G., Guthrey, H. L., Matthew, R., Young, M.R., Song, T., Moriarty, T.** (2020). Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 suns concentration. *Nature Energy*, 5, 326-335. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>
- John F Geisz, Ryan M France, Kevin L Schulte, Myles A Steiner, Andrew G Norman, Harvey L Guthrey, Glauber, R. J.** (1963). The quantum theory of optical coherence. *Physical Review*, 130(6), 2529-2539. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.130.2529>
- Godin, A. G., Lounis, B., Cagnet, L.** (2014). Super-resolution microscopy Approaches for live cell imaging. *Biophysical Journal*, 107(8), 1777-1784. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2014.08.028>
- Guo, B., Sun, J., Lu, Y., Jiang, L.** (2019). Ultrafast dynamics observation during femtosecond laser-material interaction. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 1(3), 032004. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab3a24>
- Guo, Q., Su, Y., Hu, T., Guan, H., Jin, S., Zhang, J., . . . Coops, N. C.** (2021). Lidar boosts 3D ecological observations and modelings: A review and perspective. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(1), 232-257. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2020.3032713>
- Guyon, O.** (2018). Extreme adaptive optics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1), 315-355. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-052000>
- Guzmán, A. M.** (1998). Óptica atómica ¿la óptica del año 2000? *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 22(84), 363-373. https://www.acecefyn.com/revista/Vol_22/84/363-373.pdf
- Guzmán, A. M.** (2011). Worldwide community of optics at ICO-22 (No. 89). https://www.e-ico.org/blog/wp-content/uploads/2022/06/ICO_news_oct_11.pdf
- Guzmán de García, A.** (1984). Nonlinear processes in two-photon pumped atomic vapors (Tech. Rep.). Max-Planck-Institut fuer Quantenoptik, Garching (Germany, FR). <https://www.osti.gov/biblio/6224722>
- Göppert-Mayer, M.** (1931). Über Elementarakte mit zwei Quantensprüngen. *Annalen Der Physik*, 401(3), 273-294. <https://doi.org/10.1002/andp.19314010303>
- Hamilton, D., McKechnie, J., Edgerton, E., Wilson, C.** (2021). Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: a systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design. *Journal of Computers in Education*, 8, 1-32. <https://doi.org/10.1007/s40692-020-00169-2>
- Hering, P., Stry, S., Lay, J. P.** (2010). Laser in environmental and life sciences. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08255-3>
- Huang, Y., Hsiang, E.-L., Deng, M.-Y., Wu, S.-T.** (2010). Mini-LED, micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives. *Light: Science & Applications - Nature*, 9, 105. <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0341-9>
- Jelínková, H.** (2013). Lasers for medical applications. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Elsevier, United States of America. <https://www.elsevier.com/books/lasers-for-medical-applications/jelinkova/978-0-85709-237-3>
- Jiang, L., Wang, A.-D., Li, B., Cui, T.-H., Lu, Y.-F.** (2017). Electrons dynamics Control by shaping femtosecond laser pulses in micro/nanofabrication: modeling, method, measurement and application. *Light: Science & Applications - Nature*, 7, 17134. <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.134>
- Joe, H., Yun, H., Jo, S., Martin B.G., Byung-Kwon Min, J.** (2018). A review on optical fiber sensors for Environmental monitoring. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5, 173-191. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0017-6>
- Khan, M. N.** (2014). Understanding LED illumination. CRC Press, Taylor and Francis Group. <https://www.routledge.com/Understanding-LED-Illumination/Khan/p/book/9780367867102>

- Kirkland, A. H.** (2022, julio/agosto). Optics & art. *Optics and Photonics News*, 30-39. https://www.optica-opn.org/home/articles/volume_33/july_august_2022/features/optics_art/
- Kobayashi, T., Shimizu, S., Nakamura, M., Umeki, T., Kazama, T., Yoshida, J., . . . Miyamoto, Y.** (2022). 50-Tb/s (1 Tb/s × 50 ch) WDM transmission on two 6.25-Thz bands using hybrid inline repeater of PPLN-based OPAs and incoherent-forward-pumped DRA. In Optical fiber communication conference (OFC) 2022 (p. Th4A.8). Optica Publishing Group. <https://doi.org/10.1364/OFC.2022.Th4A.8>
- Kritcher, A. L., Zylstra, A. B., Callahan, D. A., Hurricane, O. A., Weber, C. R., Clark, D. S., . . . Yang, S. T.** (2022). Design of an inertial fusion experiment exceeding the Lawson criterion for ignition. *Physical Review E*, 106(2), 025201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.025201>
- Lazzeretti, L., Capone, F., Cinti, T.** (2011). Open innovation in city of art: The case of laser technologies for conservation in Florence. *City, Culture and Society*, 2(3), 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2011.09.001>
- Lian, C., Vagionas, C., Alexoudi, T., Pleros, N., Youngblood, N., Ríos, C.** (2022). Photonic (computational) memories: tunable nanophotonics for data storage and computing. *Nanophotonics*, 1117, 3823-3854. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0089>
- Liu, Z., Cheng, S., Zhang, Y., Jin, W., Li, X., Li, Y., . . . Yuan, L.** (2022). Intelligent all-fiber device: storage and logic computing. *Photonics Research*, 10(2), 357-363. <https://doi.org/10.1364/PRJ.439506>
- Maiman, T. H.** (1960). Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical Review Letters*, 4(11), 564-566. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.564>
- Margarone, D., Bonvalet, J., Giuffrida, L., Morace, A., Kantarelou, V., Tosca, M., . . . Batani, D.** (2022). In-target proton-boron nuclear fusion using a PW-class laser. *Applied Sciences*, 12(3), 1444. <https://doi.org/10.3390/app12031444>
- MCTI.** (2021). Ibfóton. MCTI, Brasil. https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/3/o/Folder_IBFóton_e_Sisfóton.pdf?1651583682
- Moretti, P., Iwanicka, M., Melessanaki, K., Dimitroulaki, E., Kokkinaki, O., Daugherty, M., . . . Costanza-Miliani, L. C.** (2010). Laser cleaning of paintings: in situ optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), reflection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF). *Heritage Science*, 7, 44. <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0284-8>
- Müller, M., Krehel, M.** (2020, mayo). Holograms as security features: Origination, development, and perception. *Photonics Spectra*, 65675. https://www.photonics.com/Articles/Holograms_as_Security_Features_Origination/a65675
- NASA.** (2021). Hubblesite. <https://hubblesite.org/science>
- NASA.** (2022a). James Webb Space Telescope. <https://webb.nasa.gov/index.html>
- NASA.** (2022b). Webb's mirrors. <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/ote/mirrors/index.html>
- Nevin, A., Spoto, G., Anglos, D.** (2012). Laser spectroscopies for elemental and molecular analysis in art and archaeology. *Applied Physics A*, 106, 339-361. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6699-z>
- NPI.** (2013). National photonics initiative. <https://www.lightourfuture.org/home/about-npi.aspx>
- NQI.** (2018). National quantum initiative. <https://www.quantum.gov/>
- NRC.** (2013). Optics and photonics: Essential technologies for our nation. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13491>
- NSF.** (2022). The state of US science and engineering 2022 (Tech. Rep.). <https://ncses.nsf.gov/indicators>
- OPTICA.** (2022). Optica industry reports. Optics and photonics: The impact on a global economy. (Tech. Rep.). <http://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OIDA-2022-12>
- ORNL.** (2022, mayo). Frontier supercomputer debuts as world's fastest, breaking Exascale barrier. Oak Ridge National Laboratory, USA. <https://www.ornl.gov/news/frontier-supercomputer-debuts-worlds-fastest-breaking-exascale-barrier>
- Pastoor, S., Wöpking, M.** (1997). 3-D displays: A review of current technologies. *Displays*, 17(2), 100-110. [https://doi.org/10.1016/S0141-9382\(96\)01040-2](https://doi.org/10.1016/S0141-9382(96)01040-2)
- Phillips, W. D.** (1997). Laser cooling and trapping of neutral atoms. In Les Prix Nobel 1997 (p. 130-175). Almquist and Wiksell International, Stockholm, Sweden.
- Phillips, W. D.** (1998). Nobel lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms. *Review of Modern Physics*, 70(3), 721-741. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.70.721>
- Photonics21.** (2019). Europe's age of light! <https://www.photonics21.org/download/ppp-services/photronics-downloads/Europes-age-of-light-Photonics-Roadmap-C1.pdf>

- Photonics21.** (2022). Photonics 21. <https://www.photonics21.org/about-us/>
- ProMéxico.** (2016). Hacia un México más brillante: mapa de ruta de óptica y fotónica. <https://docplayer.es/39899429-Hacia-un-mexico-mas-brillante-mapa-de-ruta-de-fotonica-y-optica.html>
- Royo, S., Ballesta-Garcia, M.** (2019). An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles. *Applied Sciences*, 9(19), 4093. <https://doi.org/10.3390/app9194093>
- Samadbeik, M., Yaaghobi, D., Bastani, P., Abhari, S., Rezaee, R., Garavand, A.** (2018). The applications of virtual reality technology in medical groups teaching. *Journal of Advances in Medical Education & Professionalism*, 6(3), 123-129. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30013996/>
- Schermelleh, L., Ferrand, A., Huser, T., Eggeling, C., Sauer, M., Biehlmaier, O., Drummen, G.** (2019). Super-resolution microscopy demystified. *Nature Cell Biology*, 21, 72-84. <https://doi.org/10.1038/s41556-018-0251-8>
- Schneegass, S., Amft, O.** (2017). Smart textiles. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50124-6>
- SPIE.** (2022). Optics and photonics global salary report 2022. (Tech. Rep.). <https://www.spie.org/documents/CareerCenter/2022-Global-Salary-Report.pdf>
- Strickland, D., Mourou, G.** (1985). Compression of amplified chirped optical pulses. *Optics Communications*, 563, 219-221. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(85\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(85)90120-8)
- Taubenblatt, M. A.** (2012). Optical interconnects for high-performance computing. *Journal of Lightwave Technology*, 30(4), 448-457. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2172989>
- Teeng, C., Lim, C. K., Rafi, A., Tan, K., Mokhtar, M.** (2022). Comprehensive systematic review on virtual reality for cultural heritage practices: coherent taxonomy and motivations. *Multimedia Systems*, 28, 711-726. <https://doi.org/10.1007/s00530-021-00869-4>
- Tollefson, J.** (2021). US achieves laser-fusion record: what it means for nuclear-Weapons research. *Nature*, 597(2), 163-164. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02338-4>
- Torner, L., Calvo, M., Guzmán, A.** (2007). Óptica y fotónica: contexto iberoamericano. *Transatlántica de educación*, ISSN 1870-6428, (3), 128-140. https://www.researchgate.net/publication/28202766_Optica_y_Fotonica_contexto_iberamericano
- Willner, A.** (2019). Optical fiber telecommunications (Vol. VII). Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/optical-fiber-telecommunications-vii/willner/978-0-12-816502-7>
- Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J. F., Ekins-Daukes, N. J.** (2021). Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics*, 129, 240901. <https://doi.org/10.1063/5.0048653>
- Yin, K., He, Z., Xiong, J., Zou, J., Li, K., Wu, S.-T.** (2021). Virtual reality and augmented reality displays: advances and future perspectives. *Journal of Physics: Photonics*, 3(2), 022010. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/abf02e>