

¡Polaritones y Metamateriales: Una Investigación Exhaustiva sobre la Sinergia de Excitaciones Cuánticas y Estructuras Artificiales para el Control de la Luz

Resumen

Este informe proporciona una investigación detallada sobre los polaritones y los metamateriales, dos conceptos revolucionarios que están redefiniendo nuestra capacidad para controlar las interacciones luz-materia. Comenzamos por definir los polaritones como cuasipartículas híbridas nacidas del acoplamiento fuerte de fotones con excitaciones de materiales, tales como excitones, fonones o plasmones. Analizamos sus propiedades fundamentales, incluyendo sus singulares relaciones de dispersión energía-momento y su capacidad para fenómenos cuánticos macroscópicos. Posteriormente, introducimos los metamateriales como estructuras artificialmente diseñadas cuyas propiedades electromagnéticas están determinadas por su arquitectura sublongitud de onda en lugar de su composición química. El núcleo de este informe reside en la síntesis de estos dos campos. Exploramos el floreciente área de los metamateriales polaritónicos, donde la naturaleza resonante de los polaritones se aprovecha para crear metadispositivos sintonizables y activos. Además, profundizamos en el paradigma de los metamateriales cuánticos, donde los "meta-átomos" constituyentes son en sí mismos sistemas cuánticos coherentes, y sus estados polaritónicos colectivos dictan la respuesta del material. Esta convergencia abre vías sin precedentes para el procesamiento de información cuántica, la láserización de umbral ultrabajo, la simulación cuántica avanzada y el campo emergente de la química polaritónica. Concluimos esbozando los principales desafíos y la hoja de ruta futura para esta vibrante y prometedora área de investigación.

Sección 1: Fundamentos de los Polaritones como Cuasipartículas Híbridas de Luz-Materia

En el corazón de la física de la materia condensada y la óptica cuántica se encuentra el

concepto del polaritón, una cuasipartícula que desafía la distinción tradicional entre luz y materia. Estas entidades no son meras mezclas, sino estados cuánticos fundamentalmente nuevos que surgen de la interacción íntima y coherente entre fotones y excitaciones elementales dentro de un material. La formación de polaritones representa una redefinición completa de los modos normales del sistema acoplado, dando lugar a un conjunto de propiedades ópticas y de transporte que no se encuentran en ninguno de sus constituyentes por separado. Esta sección establecerá la física fundamental de los polaritones, definiéndolos como nuevas entidades que reconfiguran la respuesta de un sistema a los campos electromagnéticos.

1.1 El Régimen de Acoplamiento Fuerte: El Nacimiento de una Cuasipartícula

Los polaritones son cuasipartículas bosónicas que emergen cuando el intercambio de energía coherente entre las ondas electromagnéticas (fotones) y una excitación portadora de dipolo eléctrico o magnético en la materia se vuelve más rápido que las tasas de disipación o decoherencia de cualquiera de los constituyentes.¹ Esta interacción intensa da lugar a una superposición cuántica, un estado híbrido que no es ni puramente luz ni puramente materia, sino que comparte las propiedades de ambos.³

El fenómeno subyacente a la formación de polaritones es la repulsión de niveles, un principio fundamental en la mecánica cuántica donde dos estados acoplados con energías similares no pueden cruzarse, sino que se "repelen" mutuamente, formando nuevos estados con energías separadas.¹ En este contexto, los estados originales —el fotón confinado en una cavidad y la excitación del material (como un excitón o un fonón)— dejan de ser los modos propios o las excitaciones elementales válidas del sistema. En su lugar, el sistema debe ser descrito por un nuevo conjunto de modos normales: los polaritones. Esta redefinición es la razón fundamental de las propiedades novedosas observadas en estos sistemas, ya que la forma en que el material responde a la luz y transporta energía está ahora dictada por estas cuasipartículas híbridas.

La condición para alcanzar este régimen de acoplamiento fuerte se define cuantitativamente: la energía de acoplamiento, que se manifiesta como la división de Rabi ($2\hbar\Omega_R$), debe ser mayor que las anchuras de línea (inversamente proporcionales a los tiempos de vida) tanto de los fotones de la cavidad como de las excitaciones del material. Esta condición asegura que la energía pueda ser intercambiada de forma reversible entre el componente de luz y el de materia varias veces antes de que la coherencia se pierda por disipación.² Este régimen se ha logrado en una amplia gama de plataformas experimentales, desde microcavidades semiconductoras de alta calidad hasta moléculas individuales acopladas a brechas plasmónicas a nanoescala.⁷ La capacidad de crear estas cuasipartículas a voluntad ha abierto un campo para la ingeniería de las propiedades ópticas de los materiales a nivel

cuántico. En lugar de estar limitados por las propiedades intrínsecas de un material, los científicos pueden ahora diseñar "cuasipartículas a medida" cuyas características, como la masa efectiva y la fuerza de interacción, pueden ser ajustadas controlando el entorno de acoplamiento, como la geometría de una microcavidad.

1.2 La Curva de Dispersión Energía-Momento: La Huella Dactilar del Polaritón

La firma experimental definitiva del acoplamiento fuerte y la formación de polaritones es el anti-cruzamiento en la curva de dispersión energía-momento. Cuando se trazan las energías de los modos de fotón y de materia no acoplados en función de su momento en el plano, sus líneas de dispersión se cruzan. Sin embargo, en el régimen de acoplamiento fuerte, este cruce es evitado. Los modos originales desaparecen y son reemplazados por dos nuevas ramas de dispersión polaritónica: la Rama Polaritónica Superior (UPB, por sus siglas en inglés) y la Rama Polaritónica Inferior (LPB).¹

La forma precisa de estas nuevas curvas de dispersión es de vital importancia, ya que codifica las propiedades fundamentales de los polaritones. La curvatura de la dispersión en su mínimo de energía determina la masa efectiva de la cuasipartícula, que puede ser muchas órdenes de magnitud más ligera que la de un electrón. La pendiente de la curva determina la velocidad de grupo, es decir, la velocidad a la que un paquete de ondas polaritónico se propaga a través del material. Estas propiedades no son estáticas; son altamente sintonizables. Al cambiar el desajuste de energía (detuning) entre el fotón y el excitón desnudos, lo que a menudo se logra experimentalmente simplemente cambiando el ángulo de observación, se puede modificar la composición de luz-materia del polaritón y, por lo tanto, ajustar su masa y velocidad.⁹

Las técnicas de espectroscopia resuelta en ángulo son las herramientas primarias para mapear directamente estas curvas de dispersión. Métodos como la fotoluminiscencia resuelta en ángulo (ARPL), la reflectividad resuelta en ángulo y la espectroscopia de fotoemisión resuelta en ángulo (ARPES) permiten a los investigadores medir la energía de los fotones emitidos por el sistema en función de su ángulo de salida, que se corresponde directamente con su momento en el plano.¹¹ La separación energética entre la UPB y la LPB en el punto de anti-cruzamiento (momento cero) es la división de Rabi, una medida directa de la fuerza de acoplamiento luz-materia.⁶

1.3 Naturaleza Bosónica y Fenómenos Cuánticos Macroscópicos

Los polaritones de excitón, formados a partir de un fotón (bosón) y un excitón (que se comporta como un bosón compuesto a bajas densidades), son cuasipartículas bosónicas.

Esta naturaleza bosónica les permite ocupar el mismo estado cuántico, una propiedad que conduce a uno de los fenómenos más espectaculares en la física de polaritones: la capacidad de formar un Condensado de Bose-Einstein (BEC).¹⁵ Un BEC es un estado macroscópico de la materia en el que una gran fracción de las partículas colapsa en el estado cuántico de menor energía, exhibiendo coherencia cuántica a gran escala.

Lo que hace que la condensación de polaritones sea particularmente notable es que puede ocurrir a temperaturas significativamente más altas que las requeridas para los BEC de átomos. Esto se debe a la masa efectiva extremadamente ligera de los polaritones, que es heredada de su componente fotónico y es órdenes de magnitud menor que la de los átomos.¹⁷ Sin embargo, los condensados de polaritones son fundamentalmente sistemas de no equilibrio. Tienen un tiempo de vida finito (típicamente del orden de picosegundos) debido a que el componente fotónico puede escapar de la microcavidad. Por lo tanto, el condensado debe ser mantenido por un bombeo externo continuo de energía, lo que lo convierte en un sistema impulsado-disipativo. Esta naturaleza de no equilibrio lo distingue de los BEC atómicos convencionales y da lugar a una rica variedad de comportamientos dinámicos, incluyendo la superfluidez y la formación de vórtices cuánticos.¹⁷

La evidencia experimental de la formación de un condensado de polaritones incluye una serie de firmas inequívocas: un aumento no lineal en la intensidad de la emisión por encima de una densidad de bombeo umbral, un colapso drástico en la anchura de línea de la emisión (indicativo de un aumento en la coherencia temporal), la acumulación de una población macroscópica en el estado fundamental de momento en el plano cero ($k=0$), y el desarrollo de coherencia espacial de largo alcance a través de la muestra.²⁰

Sección 2: Una Taxonomía de los Sistemas Polaritónicos: Propiedades y Plataformas

El concepto de polaritón es amplio y abarca diferentes tipos de cuasipartículas, cada una definida por la naturaleza de la excitación material que se acopla fuertemente a la luz. Las tres familias principales —excitón-polaritones, fonón-polaritones y plasmón-polaritones— poseen características distintivas en términos de su rango de frecuencia operativa, grado de confinamiento del campo, pérdidas de propagación y, en consecuencia, sus dominios de aplicación. Esta sección proporciona un análisis comparativo de estos sistemas, estableciendo un marco para comprender sus ventajas y limitaciones relativas.

2.1 Excitón-Polaritones: La Plataforma para los Fluidos Cuánticos de Luz

Los excitón-polaritones se forman a partir del acoplamiento fuerte entre fotones y excitones,

que son pares electrón-hueco ligados por la interacción de Coulomb en semiconductores.¹ Estos sistemas son la plataforma por excelencia para estudiar fenómenos cuánticos macroscópicos como la condensación de Bose-Einstein y la superfluidez, gracias a las fuertes interacciones no lineales heredadas de sus componentes de excitón.

Materiales y Plataformas:

La investigación en excitón-polaritones se ha beneficiado de una diversa gama de materiales y estructuras de cavidad, cada uno ofreciendo ventajas únicas:

- **Semiconductores III-V (GaAs, CdTe):** Estos materiales han sido el banco de pruebas para los estudios fundamentales. Su alta pureza cristalina y las técnicas de fabricación bien establecidas permiten la creación de microcavidades de muy alta calidad, lo que ha sido crucial para las demostraciones pioneras de BEC y superfluidez a temperaturas criogénicas.²⁴
- **Semiconductores de Banda Ancha (GaN, ZnO):** La principal ventaja de estos materiales es la alta energía de enlace de sus excitones, que los hace estables a temperatura ambiente. Esta robustez térmica es un requisito previo para el desarrollo de dispositivos polaritónicos prácticos que puedan operar fuera de entornos de laboratorio controlados.²⁴
- **Materiales 2D (Dicalcogenuros de Metales de Transición - TMDCs):** Las monocapas de materiales como MoS₂ o WSe₂ poseen una fuerza de oscilador excepcionalmente alta y grados de libertad únicos de valle y espín. Cuando se acoplan a modos fotónicos, estos grados de libertad pueden ser transferidos a los polaritones, abriendo la puerta a la "valle-polaritónica" y la "espín-polaritónica".²⁵
- **Semiconductores Orgánicos y Perovskitas:** Estos materiales ofrecen divisiones de Rabi extremadamente grandes debido a sus fuertes transiciones dipolares, permitiendo un robusto acoplamiento fuerte a temperatura ambiente. Han abierto el campo emergente de la "química polaritónica", donde las reacciones químicas pueden ser modificadas por el acoplamiento vibrónico fuerte.²⁴

Propiedades y Aplicaciones:

La capacidad de interactuar fuertemente entre sí hace que los excitón-polaritones sean ideales para la construcción de dispositivos totalmente ópticos, como interruptores y puertas lógicas que operan a velocidades de terahertz.³¹ Su naturaleza bosónica es la base de los láseres de polaritones, que pueden emitir luz coherente con umbrales de energía órdenes de magnitud más bajos que los láseres convencionales.²¹ Además, la capacidad de crear redes o "cristales" de polaritones los convierte en una plataforma prometedora para la simulación cuántica de complejos problemas de muchos cuerpos.³⁴

2.2 Fonón-Polaritones: Dominando los Reinos del Infrarrojo y el Terahertz

Los fonón-polaritones surgen del acoplamiento entre fotones (típicamente en el infrarrojo) y fonones ópticos transversales, que son vibraciones cuantizadas de la red en cristales polares.¹

Materiales y Plataformas:

Estos polaritones se encuentran en materiales dieléctricos polares. Los más estudiados incluyen el carburo de silicio (SiC) y, de manera destacada, los materiales de van der Waals como el nitrato de boro hexagonal (hBN).³⁷ El hBN es particularmente interesante porque es un metamaterial hiperbólico natural, lo que significa que sus permitividades dieléctricas tienen signos opuestos en diferentes direcciones cristalográficas.

Propiedades y Aplicaciones:

Los fonón-polaritones operan en el rango de frecuencias del infrarrojo medio al terahercio (THz). Su propiedad más destacada es la capacidad de soportar ondas altamente confinadas con tiempos de vida de propagación muy largos en comparación con los plasmones, debido a las bajas pérdidas óhmicas en los dieléctricos.³⁸ En el hBN, la dispersión hiperbólica permite una propagación altamente direccional y sin difracción de la luz a nanoescala. Estas características los hacen ideales para aplicaciones en la gestión térmica a nanoescala, la detección en el infrarrojo, y la espectroscopia e imagenología de sub-difracción en el IR.⁵

2.3 Plasmón-Polaritones: Confinando la Luz a la Nanoescala

Los plasmón-polaritones, a menudo llamados plasmones de superficie polaritones (SPPs), se forman por el acoplamiento de fotones con plasmones, que son las oscilaciones colectivas de los electrones libres en un metal.¹

Materiales y Plataformas:

Los SPPs se excitan típicamente en la interfaz entre un metal noble (como el oro o la plata) y un dieléctrico. Más recientemente, los materiales 2D como el grafeno han surgido como plataformas altamente sintonizables para los plasmón-polaritones, ya que su densidad de portadores de carga (y por lo tanto su respuesta plasmónica) puede ser controlada eléctricamente a través de un voltaje de compuerta.⁴⁵

Propiedades y Aplicaciones:

La característica definitoria de los plasmón-polaritones es su capacidad para confinar campos electromagnéticos en volúmenes extremadamente sub-longitud de onda, lo que conduce a un enorme aumento del campo en la superficie del metal.²² Esta propiedad es la base de técnicas de detección ultra-sensibles como la Espectroscopia Raman Mejorada en Superficie (SERS), donde la señal de moléculas individuales puede ser amplificada por muchas órdenes de magnitud. Sin embargo, este confinamiento extremo tiene un coste: las pérdidas óhmicas inherentes a los metales causan una fuerte amortiguación, lo que limita la distancia de propagación de los SPPs a unas pocas micras en el visible.⁵² Las aplicaciones clave incluyen la biodetección, las guías de onda nanofotónicas y la mejora de las

interacciones luz-materia en sistemas híbridos, como los polaritones de plasmón-excitón.⁵ La elección del tipo de polaritón para una aplicación específica implica una compensación fundamental entre la fuerza de la interacción y el confinamiento del campo, por un lado, y el tiempo de vida y la distancia de propagación, por otro. Los plasmón-polaritones ofrecen el confinamiento más extremo pero sufren las mayores pérdidas, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren una mejora masiva del campo local en distancias cortas.⁵² Los fonón-polaritones presentan un compromiso, con un fuerte confinamiento en el infrarrojo y pérdidas mucho menores, lo que permite una propagación más larga.³⁸ Los excitón-polaritones tienen los tiempos de vida más largos, lo que les permite formar condensados coherentes macroscópicos, pero típicamente con un confinamiento más débil.¹⁷ Este "espacio de diseño" polaritónico permite a los investigadores seleccionar la plataforma de cuasipartículas óptima para una amplia gama de tecnologías, desde la detección de una sola molécula hasta la computación cuántica.

Tipo de Polaritón	Partículas Constituyentes	Rango de Frecuencia Típico	Materiales Clave	Nivel de Confinamiento	Pérdida de Propagación	Áreas de Aplicación Primarias
Excitón-Polaritón	Fotón + Excitón	Visible / UV	GaAs, GaN, ZnO, TMDCs, Orgánicos, Perovskitas	Moderado (limitado por difracción)	Muy Baja	Láseres de bajo umbral, simulación cuántica, puertas lógicas ópticas, química polaritónica ²²
Fonón-Polaritón	Fotón + Fonón Óptico	Infrarrojo Medio / THz	SiC, hBN, Cristales Polares	Alto (sub-difracción)	Baja	Gestión térmica, imagenología IR, detección, óptica de THz ²²
Plasmón-Polaritón	Fotón + Plasmón	UV / Visible / IR	Au, Ag, Grafeno, Metales	Extremo (sub-difracción profunda)	Alta	Biodetección (SERS), guías de onda nanofotónicas, mejora de

						interacciones luz-materia 22
--	--	--	--	--	--	---------------------------------

Sección 3: Metamateriales: Diseñando la Realidad Electromagnética

Paralelamente al desarrollo de la polaritónica, ha surgido otro campo revolucionario en la fotónica: los metamateriales. Mientras que la ciencia de los materiales tradicional se ha centrado en descubrir o sintetizar compuestos con propiedades intrínsecas deseables, los metamateriales adoptan un enfoque radicalmente diferente. Su objetivo es crear propiedades electromagnéticas efectivas que no se encuentran en la naturaleza, no a través de la química, sino a través de la arquitectura. Esta sección introducirá el paradigma de los metamateriales, sentando las bases para su eventual fusión con los conceptos cuánticos y polaritónicos.

3.1 Más Allá de la Naturaleza: El Paradigma del Metamaterial

Un metamaterial es un compuesto artificial estructurado a una escala de sub-longitud de onda, cuyas propiedades electromagnéticas macroscópicas no derivan de la composición química de sus constituyentes, sino de la geometría y disposición de sus elementos estructurales.⁵⁵ Estos elementos, a menudo llamados "meta-átomos" o "resonadores", pueden ser diseñados para interactuar con los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética incidente de maneras específicas. Al organizar estos meta-átomos en una red periódica, es posible diseñar un material con una permitividad eléctrica efectiva (ϵ_{eff}) y una permeabilidad magnética efectiva (μ_{eff}) personalizadas.⁵⁸

Este enfoque representa un cambio de paradigma fundamental: de la exploración de la tabla periódica a la exploración de un espacio de diseño geométrico casi ilimitado. Las propiedades se vuelven emergentes, surgiendo de la respuesta colectiva y coherente de los meta-átomos a la onda incidente. Esencialmente, se trata de una transición de la ciencia de los materiales a la arquitectura de materiales, donde la función electromagnética se programa directamente en la estructura del material.

3.2 Propiedades Exóticas y Nuevas Funcionalidades

La libertad de diseño inherente al paradigma de los metamateriales permite la creación de

propiedades electromagnéticas que son raras o simplemente inexistentes en los materiales naturales. El ejemplo más célebre es la consecución simultánea de permitividad y permeabilidad negativas, lo que da lugar a un índice de refracción negativo.⁴⁴ Un material con un índice de refracción negativo refracta la luz en la dirección "equivocada" en una interfaz, un comportamiento que desafía la intuición y que es la base de conceptos como la superlente, capaz de obtener imágenes por debajo del límite de difracción, y las capas de invisibilidad, que pueden guiar la luz alrededor de un objeto para hacerlo indetectable.⁵⁵

Estas propiedades exóticas no son meras curiosidades científicas; habilitan formas fundamentalmente nuevas de manipular el flujo de la luz y otras formas de radiación electromagnética. Las aplicaciones van desde antenas compactas y de alta directividad hasta la gestión térmica avanzada, donde los "metamateriales térmicos" pueden guiar el flujo de calor de maneras no convencionales, y la óptica cuántica, donde las estructuras de metamateriales pueden usarse para diseñar la densidad local de estados fotónicos y controlar la emisión espontánea.⁵⁷

La conceptualización de los metamateriales proporciona un marco para la "ingeniería de la estructura de bandas" para los fotones. La disposición periódica de los meta-átomos en un metamaterial es análoga a la red cristalina que experimentan los electrones en un sólido. Así como la periodicidad de la red cristalina da lugar a la formación de bandas de energía electrónicas, la periodicidad de la red de meta-átomos crea estructuras de bandas fotónicas. Al diseñar la forma, el tamaño y el espaciado de los meta-átomos, se puede esculpir la relación de dispersión para la luz que se propaga a través del medio. Este concepto establece una profunda conexión conceptual con la polaritónica. En ambos campos, el objetivo final es el control de la dispersión, ya sea a través del acoplamiento fuerte con excitaciones de la materia (polaritónica) o a través de la estructuración a sub-longitud de onda (metamateriales). Esta convergencia de objetivos sugiere una sinergia natural entre los dos campos.

Sección 4: La Convergencia: Metamateriales Cuánticos y Polaritónicos

La intersección de la física de polaritones y el diseño de metamateriales representa una de las fronteras más emocionantes de la fotónica moderna. Esta convergencia no es simplemente la suma de dos campos, sino la génesis de un nuevo paradigma: materiales cuánticos artificiales donde el control sobre la luz y la materia alcanza un nivel sin precedentes. Esta sección explora cómo la resonancia inherente de los polaritones puede ser utilizada para crear metamateriales activos y cómo, en un nivel más profundo, el propio concepto de metamaterial se está cuantizando, dando lugar a estructuras cuyas propiedades ópticas están gobernadas por la coherencia cuántica colectiva.

4.1 Metamateriales Polaritónicos: Control Resonante de las Meta-Propiedades

El primer nivel de sinergia implica el uso de materiales que soportan polaritones de forma natural como los bloques de construcción para las arquitecturas de metamateriales. Por ejemplo, se puede fabricar una matriz periódica de varillas de un cristal polar, como el carburo de silicio (SiC) o el nitruro de boro hexagonal (hBN). La respuesta electromagnética de tal estructura estará dominada por la resonancia del fonón-polaritón inherente al material constituyente.⁴⁴

Este enfoque permite la creación de metamateriales cuyas propiedades efectivas son inherentemente resonantes, altamente sintonizables y potencialmente activas. La fuerte y anómala dispersión que experimentan los polaritones cerca de su frecuencia de resonancia puede ser explotada para lograr valores extremos de permitividad o permeabilidad efectiva, incluyendo valores negativos, dentro de bandas de frecuencia específicas.⁵⁹ En estos metamateriales polaritónicos, el acoplamiento electromagnético entre los resonadores individuales (las varillas, por ejemplo) se convierte en un parámetro de diseño crítico. Este acoplamiento entre elementos determina la respuesta colectiva del metamaterial y puede ser diseñado para dar forma a la dispersión de los modos de superficie y de volumen, permitiendo un control sofisticado sobre la propagación de la luz.⁶⁰

4.2 Metamateriales Cuánticos: Diseñando el Vacío Cuántico

El concepto de metamaterial cuántico representa un salto conceptual más profundo. En este paradigma, las celdas unitarias individuales, o "meta-átomos", que componen el material no son simples resonadores clásicos, sino que son elementos cuánticos coherentes. Estos pueden ser sistemas cuánticos de dos niveles como puntos cuánticos, átomos fríos atrapados, o qubits superconductores basados en uniones Josephson.⁵⁸

En este régimen, la respuesta del metamaterial ya no puede ser descrita adecuadamente por parámetros efectivos clásicos como ϵ_{eff} y μ_{eff} . En su lugar, su comportamiento está gobernado por el estado cuántico colectivo de sus constituyentes. La descripción teórica requiere una sinergia entre las ecuaciones de Maxwell, que describen el campo electromagnético, y la ecuación de Schrödinger, que describe la dinámica cuántica de los meta-átomos.⁶¹ La interacción entre un fotón incidente y un único meta-átomo se modela utilizando herramientas de la óptica cuántica, como el Hamiltoniano de Jaynes-Cummings-Hubbard, que describe una red de cavidades acopladas a sistemas de dos niveles.⁵⁸

Los polaritones son, de hecho, el lenguaje natural para describir los metamateriales cuánticos. El estado híbrido que se forma a partir del acoplamiento fuerte entre un fotón y la

excitación cuántica de un meta-átomo es, por definición, un polaritón. Por lo tanto, un metamaterial cuántico puede ser visualizado como una red de polaritones interactuantes. La característica revolucionaria es que las propiedades de esta red —y, en consecuencia, la forma en que la luz se propaga a través de ella— pueden ser controladas dinámicamente mediante la manipulación del estado cuántico de los meta-átomos.⁵⁸

La convergencia de la polaritónica y los metamateriales marca una transición fundamental desde el control estático de la luz hacia un control dinámico y cuánticamente coherente. Los metamateriales clásicos poseen propiedades que son fijadas por su geometría en el momento de la fabricación. Los metamateriales polaritónicos, como se discutió en la sección 4.1, introducen un grado de sintonización, ya que la resonancia polaritónica puede ser modificada por parámetros externos como la temperatura o un campo eléctrico. Sin embargo, los metamateriales cuánticos, descritos en la sección 4.2, representan un avance cualitativo. Dado que los meta-átomos son sistemas cuánticos, sus estados individuales pueden ser preparados y manipulados coherentemente; por ejemplo, pueden ser colocados en una superposición de sus estados base. Esto implica que las propiedades ópticas del metamaterial, como su índice de refracción, podrían existir ellas mismas en una superposición cuántica. Este salto conceptual transforma el metamaterial de un elemento óptico pasivo a un objeto cuántico dinámico y controlable.⁶¹ Esto abre la puerta a aplicaciones en el procesamiento de información cuántica, donde la luz que se propaga a través del material puede entrelazarse con el estado cuántico colectivo del propio material, permitiendo la codificación y manipulación de información cuántica directamente en el haz de luz.⁵⁸

Sección 5: Aplicaciones de Vanguardia y Perspectivas Futuras

La fusión de la física de polaritones con los principios de diseño de los metamateriales no es solo un ejercicio académico; está impulsando una nueva generación de tecnologías con capacidades sin precedentes. Al aprovechar las propiedades únicas de estas cuasipartículas híbridas, a menudo realizadas en estructuras que se asemejan a metamateriales, los investigadores están abriendo nuevas fronteras en la fotónica, la computación cuántica y la química. Esta sección destaca algunas de las aplicaciones más prometedoras que están surgiendo de este campo interdisciplinario.

5.1 Láseres de Polaritones: Fuentes de Luz Coherente sin Inversión

Una de las aplicaciones más maduras y exitosas de los polaritones es el láser de polaritones.

A diferencia de los láseres convencionales, que se basan en el principio de emisión estimulada y requieren una inversión de población (es decir, más electrones en un estado de energía excitado que en el estado fundamental), los láseres de polaritones operan bajo un mecanismo fundamentalmente diferente.²¹

El mecanismo se basa en la naturaleza bosónica de los excitón-polaritones. Por encima de una densidad de excitación umbral, los polaritones experimentan una transición de fase hacia un Condensado de Bose-Einstein (BEC). En este estado macroscópico cuántico, una gran población de polaritones ocupa el estado de energía más bajo, formando una onda de materia coherente. El componente fotónico de este condensado se fuga de la microcavidad, produciendo un haz de luz coherente y monocromático.²¹

La principal ventaja de este mecanismo es que no requiere inversión de población. La dispersión estimulada de polaritones hacia el estado condensado es un proceso mucho más eficiente que la emisión estimulada en los láseres tradicionales. Como resultado, los láseres de polaritones pueden tener umbrales de energía para la láserización que son órdenes de magnitud más bajos que los de los láseres fotónicos convencionales fabricados con la misma estructura de material.²¹ Esta eficiencia energética intrínseca los convierte en candidatos muy prometedores para futuras tecnologías de comunicación óptica y computación en chip. Se ha logrado la operación a temperatura ambiente en materiales de banda ancha como el GaN y semiconductores orgánicos, lo que acerca estos dispositivos a aplicaciones prácticas.³³

5.2 Simulación y Computación Cuántica

La capacidad de crear "cristales de luz" artificiales utilizando redes de polaritones ha abierto la puerta a su uso como simuladores cuánticos analógicos.³⁴ Al grabar microcavidades semiconductoras o utilizar películas metálicas estampadas para crear una matriz periódica de trampas de potencial, los investigadores pueden confinar polaritones en una red, de forma análoga a como los electrones están confinados en un cristal sólido.

Las fuertes interacciones no lineales entre los polaritones (heredadas de su componente de excitón) imitan las interacciones entre partículas en sistemas de materia condensada complejos. Esto permite a los científicos simular y estudiar directamente Hamiltonians de muchos cuerpos, como el modelo de Bose-Hubbard, que describe partículas bosónicas que saltan entre sitios de una red e interactúan en el mismo sitio.³⁵ Resolver estos modelos es computacionalmente intratable para los ordenadores clásicos a medida que aumenta el tamaño del sistema, pero un simulador cuántico de polaritones puede proporcionar la solución simplemente dejando que el sistema evolucione y midiendo su estado final.⁶⁵

Más allá de la simulación, las fuertes no linealidades de los polaritones, que pueden ser efectivas incluso a nivel de una sola partícula, los convierten en candidatos para construir puertas lógicas totalmente ópticas. Estas puertas podrían formar la base de los procesadores fotónicos para la computación clásica y cuántica, donde las operaciones

lógicas se realizan utilizando interacciones fotón-fotón mediadas por polaritones, ofreciendo velocidades de procesamiento potencialmente mucho más rápidas que las de la electrónica.³¹

5.3 Química Polaritónica: Modificando Reacciones Químicas con Luz

Quizás la aplicación más sorprendente y contra-intuitiva de los polaritones se encuentra en el campo emergente de la química polaritónica. Al acoplar fuertemente las vibraciones moleculares (en lugar de las transiciones electrónicas) a un modo de fotón infrarrojo confinado en una cavidad, se forman polaritones vibracionales. Esta hibridación luz-materia modifica fundamentalmente el paisaje de energía potencial (PES) de la molécula.⁷¹

La modificación del PES puede alterar las barreras de energía para las reacciones químicas, cambiando así sus velocidades y, en algunos casos, incluso la selectividad de los productos. Lo más notable de esta "química vibro-polaritónica" es que estos efectos pueden ocurrir en el estado fundamental electrónico, es decir, en la oscuridad, sin necesidad de excitación óptica. El acoplamiento se produce con las fluctuaciones del campo de vacío de la cavidad, lo que significa que la mera presencia de la cavidad puede catalizar o inhibir una reacción térmica.⁷⁷ Se ha demostrado experimentalmente que este efecto modifica las velocidades de reacción, lo que abre una vía completamente nueva para el control químico, donde las reacciones se dirigen no por catalizadores químicos tradicionales, sino por la ingeniería del entorno electromagnético.

5.4 Desafíos y Hoja de Ruta Futura

A pesar del inmenso potencial, la transición de los conceptos polaritónicos y de metamateriales cuánticos de las demostraciones de laboratorio a los dispositivos prácticos se enfrenta a importantes desafíos.

- **Desafíos:**
 - **Pérdidas de Material:** Las pérdidas óhmicas intrínsecas, especialmente en los sistemas plasmónicos, limitan severamente los tiempos de vida de los polaritones y la eficiencia de los dispositivos. La dispersión por imperfecciones también contribuye a la decoherencia.⁸⁴
 - **Fabricación:** La creación de estructuras de alta calidad y diseñadas con precisión a nanoescala, especialmente para metamateriales 3D y la integración en chip, sigue siendo un proceso complejo y costoso que dificulta la producción a gran escala.⁸⁴
 - **Operación a Temperatura Ambiente:** Aunque se ha logrado en varias plataformas, conseguir una operación robusta, eficiente y a temperatura ambiente para todos los tipos de dispositivos polaritónicos sigue siendo un

objetivo clave para la viabilidad comercial.²⁵

- **Hoja de Ruta Futura:** El camino a seguir para el campo implica un esfuerzo concertado en varias áreas clave:
 - **Nuevos Materiales:** La exploración de materiales novedosos, incluyendo materiales 2D, perovskitas y materiales topológicos, es crucial para descubrir plataformas con acoplamiento más fuerte, menores pérdidas y funcionalidades mejoradas o completamente nuevas.⁸⁷
 - **Teoría y Modelado Avanzados:** El desarrollo de herramientas teóricas integrales que puedan modelar con precisión estos sistemas cuánticos abiertos, multiescala y complejos es esencial para guiar el diseño experimental y predecir nuevos fenómenos.⁸⁵
 - **Integración y Escalabilidad:** Un objetivo principal es pasar de las demostraciones de laboratorio a circuitos polaritónicos integrados y escalables en un chip que puedan interactuar sin problemas con las tecnologías electrónicas y fotónicas existentes, allanando el camino para sistemas de procesamiento de información cuántica y comunicación totalmente integrados.⁸⁶

Conclusión

La investigación sobre polaritones y metamateriales ha revelado una profunda y fructífera sinergia entre la física cuántica de la materia condensada y la ingeniería electromagnética. Los polaritones, como cuasipartículas híbridas de luz y materia, ofrecen un conjunto de propiedades sin precedentes —masa efectiva ultraligera, fuertes interacciones no lineales y la capacidad de formar condensados cuánticos macroscópicos a altas temperaturas— que los establecen como una plataforma ideal para controlar la luz a nivel cuántico. Por otro lado, los metamateriales proporcionan un paradigma de diseño arquitectónico que permite la creación de propiedades electromagnéticas efectivas que trascienden las limitaciones de los materiales naturales.

La convergencia de estos dos campos no es meramente una intersección, sino la creación de un dominio completamente nuevo: el de los materiales cuánticos artificiales. En los metamateriales polaritónicos, la respuesta resonante de los polaritones se aprovecha para crear metadispositivos con una funcionalidad sintonizable y activa. Llevando este concepto a su conclusión lógica, los metamateriales cuánticos, compuestos por "meta-átomos" cuánticamente coherentes, transforman el material de una estructura pasiva a un objeto cuántico dinámico. En este régimen, las propiedades ópticas del material están intrínsecamente ligadas al estado cuántico colectivo de sus constituyentes, lo que permite un control coherente y en tiempo real sobre la propagación de la luz.

Las aplicaciones que surgen de esta sinergia son transformadoras. Los láseres de polaritones prometen fuentes de luz coherente de umbral ultrabajo, los simuladores cuánticos de

polaritones ofrecen una ventana a la física de muchos cuerpos que es inaccesible para los ordenadores clásicos, y la química polaritónica presenta una nueva herramienta radical para controlar las reacciones químicas a nivel molecular. A pesar de los desafíos significativos en la ciencia de los materiales, la fabricación y el desarrollo teórico, la hoja de ruta para el futuro es clara. A través de la exploración de nuevos materiales, el desarrollo de modelos teóricos más sofisticados y el avance hacia la integración en chip, el campo de los polaritones y los metamateriales está preparado para ofrecer tecnologías que definirán la próxima generación de la fotónica, la computación y la química. En última instancia, el control de las interacciones luz-materia en el nivel más fundamental proporciona una plataforma poderosa no solo para explorar nuevos fenómenos cuánticos, sino también para desarrollar las tecnologías transformadoras del futuro.

Fuentes citadas

1. Polariton - Wikipedia, acceso: agosto 16, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Polariton>
2. Strong light-matter interactions: a new direction within chemistry - PMC, acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6365945/>
3. library.fiveable.me, acceso: agosto 16, 2025, <https://library.fiveable.me/solid-state-physics/unit-10/excitons-polaritons/study-guide/eDDEXMS7wjOP2TJ3#:~:text=Quasiparticles%20that%20arise%20from%20the,matter%20interactions%20at%20the%20nanoscale>
4. Polaritons in an Electron Gas—Quasiparticles and Landau Effective Interactions - MDPI, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.mdpi.com/2218-2004/9/4/81>
5. Unlocking Polaritons in Solid State Physics - Number Analytics, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-to-polaritons-in-solid-state-physics>
6. Microcavity exciton polaritons at room temperature, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/photronics-insights/volume-1/issue-01/R04/Microcavity-exciton-polaritons-at-room-temperature/10.3788/PI.2022.R04.full>
7. Strong light-matter coupling in quantum chemistry and quantum photonics, acceso: agosto 16, 2025, http://ciqm.harvard.edu/uploads/2/3/3/4/23349210/flick_rivera2018.pdf
8. Exciton-polariton - Wikipedia, acceso: agosto 16, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Exciton-polariton>
9. Tunable Multiresonant Microcavity Exciton-Polaritons in Colloidal Quantum Wells | Nano Letters - ACS Publications, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.nanolett.5c00015>
10. Strongly interacting dipolar-polaritons - Princeton Center for Complex Materials, acceso: agosto 16, 2025, <https://pccm.princeton.edu/sites/g/files/toruqf2196/files/media/1802.01123.pdf>

[df](#)

11. Assessing the Determinants of Cavity Polariton Relaxation Using Angle-Resolved Photoluminescence Excitation Spectroscopy - PMC - PubMed Central, acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11146005/>
12. Equipment - Neupane Group - UCF College of Sciences, acceso: agosto 16, 2025, <https://sciences.ucf.edu/physics/neupane-group/equipment/>
13. Advanced Techniques | Physics - University of California, Berkeley, acceso: agosto 16, 2025, <https://physics.berkeley.edu/research-faculty/research-groups/lanzara-group/projects/advanced-techniques>
14. arXiv:2212.04874v1 [cond-mat.mes-hall] 9 Dec 2022, acceso: agosto 16, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2212.04874>
15. Polaronic polariton quasiparticles in a dark excitonic medium - arXiv, acceso: agosto 16, 2025, <https://arxiv.org/html/2312.00985v1>
16. Molecular Polaritons for Chemistry, Photonics and Quantum Technologies - PubMed Central, acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10941193/>
17. Exciton-polaritons in microcavities: Recent discoveries and perspectives - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/227701690_Exciton-polaritons_in_microcavities_Recent_discoveries_and_perspectives
18. Exciton-Polariton Bose-Einstein Condensates - Annual Reviews, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-conmatphys-031214-014542>
19. Bose-Einstein Condensation of Long-Lifetime Polaritons in Thermal Equilibrium | Phys. Rev. Lett. - Physical Review Link Manager, acceso: agosto 16, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.016602>
20. Bose-Einstein Condensation of Polaritons at Room Temperature in a GaAs/AlGaAs Structure | ACS Photonics - ACS Publications, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsp Photonics.4c01992>
21. Polariton lasing vs. photon lasing in a semiconductor microcavity ..., acceso: agosto 16, 2025, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2634328100>
22. Unlocking Polaritons in Condensed Matter - Number Analytics, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-polaritons-condensed-matter-physics>
23. Light-matter interaction in 2D materials in weak and strong-coupling regimes - arXiv, acceso: agosto 16, 2025, <https://arxiv.org/abs/2401.09470>
24. Materials for excitons-polaritons: Exploiting the diversity of semiconductors - ohadi.group, acceso: agosto 16, 2025, <https://ohadi.group/publication/ohadi-mrs-2024/ohadi-MRS-2024.pdf>
25. Materials for Excitons-Polaritons: exploiting the diversity of ..., acceso: agosto 16, 2025, <https://research-portal.st-andrews.ac.uk/files/313646549/Bellessa-2024-Materials-for-excitons-MRSBulletin-AAM-CCBY.pdf>
26. Whispering-Gallery Quantum-Well Exciton Polaritons in an Indium Gallium

- Arsenide Microdisk Cavity | Phys. Rev. Lett. - Physical Review Link Manager, acceso: agosto 16, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.132.126901>
27. GaAs-Based Quantum Well Exciton-Polaritons beyond 1 μm , acceso: agosto 16, 2025, <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/124/a124z5p17.pdf>
 28. Characteristics of exciton-polaritons in ZnO-based hybrid microcavities, acceso: agosto 16, 2025, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=oe-19-5-4101>
 29. Moiré excitons and exciton-polaritons: A review - arXiv, acceso: agosto 16, 2025, <https://arxiv.org/html/2507.05204v1>
 30. Microcavity-like exciton-polaritons can be the primary photoexcitation in bare organic semiconductors - PMC, acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8585971/>
 31. Exploring the Frontier of Integrated Photonic Logic Gates: Breakthrough Designs and Promising Applications - MDPI, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.mdpi.com/2227-7080/13/8/314>
 32. Theory of polarization-controlled polariton logic gates | Phys. Rev. B, acceso: agosto 16, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.81.125319>
 33. Polariton laser - Wikipedia, acceso: agosto 16, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Polariton_laser
 34. Polariton Fluids as Quantum Field Theory Simulators on Tailored Curved Spacetimes | Phys. Rev. Lett. - Physical Review Link Manager, acceso: agosto 16, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/t5dh-rx6w>
 35. Polariton Lattices for Quantum Simulation - Optics Express, acceso: agosto 16, 2025, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=cleo-si-2014-STu3O.1>
 36. Exciton-Polariton Quantum Simulators, acceso: agosto 16, 2025, <https://arxiv.org/abs/1510.08203>
 37. Surface and volume phonon polaritons in a uniaxial hyperbolic material: optic axis parallel versus perpendicular to the surface, acceso: agosto 16, 2025, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=oe-29-24-39824>
 38. MIT Open Access Articles Tunable Phonon ... - DSpace@MIT, acceso: agosto 16, 2025, https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/90317/1246833_v4.pdf?sequence=1
 39. Phonon polaritons and hyperbolic response in hBN. a) The nanoscale... - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Phonon-polaritons-and-hyperbolic-response-in-hBN-a-The-nanoscale-Fourier-transform_fig7_337163994
 40. Tailoring hBN's Phonon Polaritons with the Plasmonic Phase-Change Material In₃SbTe₂ - arXiv, acceso: agosto 16, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2504.18418>
 41. Hyperbolic whispering-gallery phonon polaritons in boron nitride nanotubes, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.nanophotonics.org/assets/pdfs/paper412.pdf>
 42. Phonon Polaritons in Monolayers of Hexagonal Boron Nitride - Center for Integrated Quantum Materials, acceso: agosto 16, 2025,

- <http://ciqm.harvard.edu/uploads/2/3/3/4/23349210/dai2019.pdf>
43. (PDF) On the theory of three types of polaritons (phonon, exciton ..., acceso: agosto 16, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/317928981 On the theory of three types of polaritons phonon exciton and plasmon polaritons](https://www.researchgate.net/publication/317928981_On_the_theory_of_three_types_of_polaritons_phonon_exciton_and_plasmon_polaritons)
 44. polaritonic metamaterials - UNAM, acceso: agosto 16, 2025, [https://sistemas.fciencias.unam.mx/~coronado/article PolaritonicMetamaterials.php](https://sistemas.fciencias.unam.mx/~coronado/article_PolaritonicMetamaterials.php)
 45. Theoretical comparison between graphene-on-silver and gold-on-silver based surface plasmon resonance sensor | Request PDF - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/350567055 Theoretical comparison between graphene-on-silver and gold-on-silver based surface plasmon resonance sensor](https://www.researchgate.net/publication/350567055_Theoretical_comparison_between_graphene-on-silver_and_gold-on-silver_based_surface_plasmon_resonance_sensor)
 46. (PDF) A PRIMER ON SURFACE PLASMON-POLARITONS IN GRAPHENE - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/235432301 A PRIMER ON SURFACE PLASMON-POLARITONS IN GRAPHENE](https://www.researchgate.net/publication/235432301_A_PRIMER_ON_SURFACE_PLASMON-POLARITONS_IN_GRAPHENE)
 47. Electrical Tuning of Surface Plasmon Polariton Propagation in Graphene-Nanowire Hybrid Structure | ACS Nano, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nn406221s>
 48. Surface plasmon polaritons in multilayer jellium systems: Dispersion and spatial description | Phys. Rev. B - Physical Review Link Manager, acceso: agosto 16, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.111.205419>
 49. Review of Gold Nanoparticles in Surface Plasmon-Coupled Emission Technology: Effect of Shape, Hollow Nanostructures, Nano-Assembly, Metal-Dielectric and Heterometallic Nanohybrids - MDPI, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.mdpi.com/2079-4991/14/1/111>
 50. Surface Plasmon Polariton Interference in Gold Nanoplates | The Journal of Physical Chemistry Letters - ACS Publications, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpclett.7b02079>
 51. Full article: Exciton-surface plasmon polariton interactions, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23746149.2020.1749884>
 52. In-plane exciton polaritons versus plasmon polaritons: Nonlocal corrections, confinement, and loss | Request PDF - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/379362477 In-plane exciton polaritons versus plasmon polaritons Nonlocal corrections confinement and loss](https://www.researchgate.net/publication/379362477_In-plane_exciton_polaritons_versus_plasmon_polaritons_Nonlocal_corrections_confinement_and_loss)
 53. In-plane exciton polaritons versus plasmon polaritons: Nonlocal corrections, confinement, and loss | Phys. Rev. B, acceso: agosto 16, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.109.L121408>
 54. Plasmon-exciton polaritons in two-dimensional semiconductor/metal interfaces | Phys. Rev. B - Physical Review Link Manager, acceso: agosto 16, 2025,

- <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.97.041402>
55. Design and Processing of Metamaterials - MDPI, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4352/15/4/374>
 56. A Review on Metamaterials for Device Applications - MDPI, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/5/518>
 57. Metamaterials: artificial materials beyond nature | National Science Review, acceso: agosto 16, 2025, <https://academic.oup.com/nsr/article/5/2/131/4880450>
 58. Quantum metamaterials: Applications in quantum information ..., acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.aip.org/aip/apq/article/2/2/021501/3343035/Quantum-metamaterials-Applications-in-quantum>
 59. (PDF) Features of Plasmon-polaritons in Polaritonic Metamaterials - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/340654509_Features_of_Plasmon-polaritons_in_Polaritonic_Metamaterials
 60. Surface polaritons in magnetic metamaterials from perspective of effective-medium and circuit models | Journal of Applied Physics | AIP Publishing, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.aip.org/aip/jap/article/117/16/163910/133103/Surface-polaritons-in-magnetic-metamaterials-from>
 61. Quantum metamaterial - Wikipedia, acceso: agosto 16, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_metamaterial
 62. Quantum Metamaterials - AIP Publishing LLC, acceso: agosto 16, 2025, <https://publishing.aip.org/publications/journals/special-topics/are/quantum-metamaterials/>
 63. Ultra-low threshold polariton lasing at room temperature in a GaN membrane microcavity with a zero-dimensional trap - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/318469528_Ultra-low_threshold_polariton_lasing_at_room_temperature_in_a_GaN_membrane_microcavity_with_a_zero-dimensional_trap
 64. Low-threshold polariton lasing in a highly disordered conjugated polymer - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/335431442_Low-threshold_polariton_lasing_in_a_highly_disordered_conjugated_polymer
 65. Quantum simulation | Rev. Mod. Phys. - Physical Review Link Manager, acceso: agosto 16, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.86.153>
 66. REVIEW - Quantum Simulators - Franco Nori, acceso: agosto 16, 2025, https://dml.riken.jp/images/pub/nori/pdf/Science_326_108.pdf
 67. Understanding Polaritonic Chemistry from Ab Initio Quantum Electrodynamics | Chemical Reviews - ACS Publications, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.2c00788>
 68. Designing Polaritonic Integrated Circuits for Quantum Processing - OpenReview, acceso: agosto 16, 2025, <https://openreview.net/pdf?id=7jBGTxpLR8>
 69. Universal all-optical logic gate reaches 240 GHz at room temperature, a research

- team from Skoltech and the University of Wuppertal in Germany determined -
 Reddit, acceso: agosto 16, 2025,
https://www.reddit.com/r/OptimistsUnite/comments/1kzxk8x/universal_alloptical_logic_gate_reaches_240_ghz/
70. Review on all-optical logic gates: design techniques and classifications – heading toward high-speed optical integrated circuits - SPIE Digital Library, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-61/issue-6/060902/Review-on-all-optical-logic-gates--design-techniques-and/10.1117/1.OE.61.6.060902.full>
 71. Polaritonic potential energy surfaces. (a) Case of a single molecule... - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025,
https://www.researchgate.net/figure/Polaritonic-potential-energy-surfaces-a-Case-of-a-single-molecule-strongly-coupled_fig2_360262325
 72. Polaritonic modification of potential energy landscapes. (A)... - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Polaritonic-modification-of-potential-energy-landscapes-A-Displacement-LP-for-the_fig4_387974907
 73. Polariton Chemistry: Action in the Dark - PMC - PubMed Central, acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6439444/>
 74. Polaritonic Chemistry: Hindering and Easing Ground State Polyenic Isomerization via Breakdown of σ - π Separation - PubMed Central, acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10577679/>
 75. Polaritonic Chemistry: Hindering and Easing Ground State Polyenic Isomerization via Breakdown of σ - π Separation - ACS Publications, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcllett.3c02081>
 76. A perspective on ab initio modeling of polaritonic chemistry: The role of non-equilibrium effects and quantum collectivity | The Journal of Chemical Physics | AIP Publishing, acceso: agosto 16, 2025,
<https://pubs.aip.org/aip/jcp/article/156/23/230901/2841290/A-perspective-on-ab-initio-modeling-of-polaritonic>
 77. Chemistry under Vibrational Strong Coupling - PubMed, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34609858/>
 78. On the S N 2 reactions modified in vibrational strong coupling experiments - RSC Publishing, acceso: agosto 16, 2025,
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/cp/d0cp04154h>
 79. Modification of Enzyme Activity by Vibrational Strong Coupling of Water - PMC, acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6856831/>
 80. Nonequilibrium effects of vibrational strong coupling on chemical reactions, acceso: agosto 16, 2025, <https://escholarship.org/uc/item/2w56b8fq>
 81. Chemical reactivity under collective vibrational strong coupling - AIP Publishing, acceso: agosto 16, 2025, https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-pdf/doi/10.1063/5.0124551/16556227/224304_1_online.pdf
 82. (PDF) Chemical reactivity under collective vibrational strong coupling -

- ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/366162688_Chemical_reactivity_under_collective_vibrational_strong_coupling
83. Investigating the collective nature of cavity-modified chemical kinetics under vibrational strong coupling - PMC, acceso: agosto 16, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11636483/>
 84. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials | Request PDF - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/232795918_Past_achievements_and_future_challenges_in_the_development_of_three-dimensional_photonic_metamaterials
 85. Theoretical Challenges in Polaritonic Chemistry - PMC, acceso: agosto 16, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9026242/>
 86. Roadmap on Neuromorphic Photonics - University of Strathclyde, acceso: agosto 16, 2025, <https://pureportal.strath.ac.uk/files/257554830/Brunner-et-al-ArXiv-2025-Roadmap-on-neuromorphic-photonics-neuromorphic-photonics.pdf>
 87. In partnership with the DOD: Weichman Lab explores strong light-matter coupling, acceso: agosto 16, 2025,
<https://dof.princeton.edu/news/2025/partnership-dod-weichman-lab-explores-strong-light-matter-coupling>
 88. The road towards polaritonic devices - PubMed, acceso: agosto 16, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27429208/>
 89. (PDF) Theoretical Challenges in Polaritonic Chemistry - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/360262325_Theoretical_Challenges_in_Polaritonic_Chemistry
 90. Theoretical Challenges in Polaritonic Chemistry | ACS Photonics, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsphotonics.1c01749>
 91. Theoretical Advances in Polariton Chemistry and Molecular Cavity Quantum Electrodynamics (Journal Article) | OSTI.GOV, acceso: agosto 16, 2025,
<https://www.osti.gov/pages/biblio/1996166>