

El láser: desarrollo de la investigación en láseres y estado actual

Priscila García Fernández

En este artículo se resume la investigación más relevante realizada en España desde 1975 en el área de los láseres.

Introducción

He intentado en este artículo dar una visión lo más amplia posible de la investigación que se ha realizado en láseres en España desde 1975. He recopilado toda la información accesible y la he organizado usando criterios cronológicos y geográficos. En el artículo se da una panorámica muy resumida de las investigaciones de diversos grupos pertenecientes a diferentes Instituciones.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC

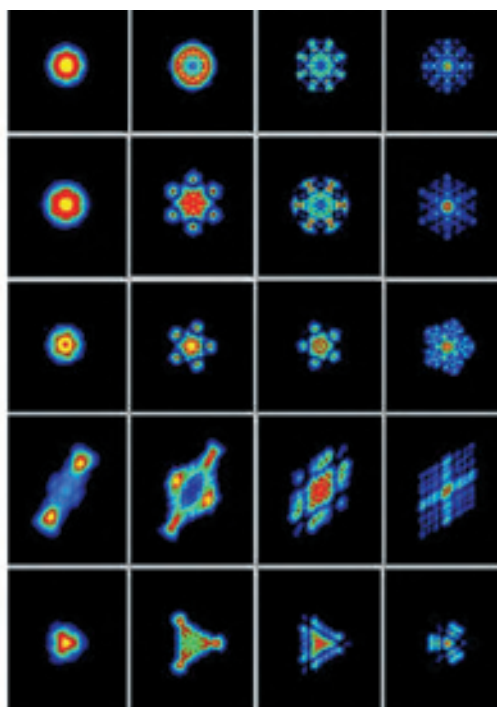
A. Instituto de Óptica

En el Instituto de Óptica han desarrollado investigaciones sobre láseres tres grupos diferentes: El laboratorio de Procesos Multifotónicos, que en una segunda etapa se trasladó al Instituto de Estructura de la Materia, el grupo de óptica Cuántica, que se trasladó al Instituto de óptica procedente del Instituto de Estructura de la Materia, y el grupo de Procesado por Láser. A continuación se resume la investigación realizada por estos tres grupos.

En los primeros años 80 comenzó la construcción y puesta a punto de un Laboratorio de Procesos Multifotónicos y Disociación Unimolecular Inducidos por Láser. El Laboratorio constaba de dos láseres TEA de CO_2 pulsados, de alta potencia y sintonizables, detectores piroeléctricos y UV, osciloscopios con memoria resuelta en el tiempo, fotomultiplicadores rápidos, láseres de alineación de He-Ne, una lámpara de Xe-Hg, así como un láser UV de pulsos muy cortos. Por otra parte, para llevar a cabo experiencias con excitación simultánea o retrasada con dos longitudes de onda IR resonantes o no, se incorporó al montaje un generador de retardos temporales de precisión.

Con este equipamiento se realizaron los siguientes tipos de experiencias:

1. Experiencias de disociación multifotónica (DMF) con haces focalizados en moléculas sencillas, en general deri-



vados halogenados del metano y etano: Estudio con fluencia, presión del gas, etc.

2. Excitación y disociación de moléculas orgánicas e inorgánicas más complejas, con las que se indujeron reacciones químicas de interés.
3. Excitación y disociación de moléculas en estado gaseoso irradiadas con dos longitudes de onda láser IR, simultáneas o con retardos controlados. Dichas excitaciones se llevaron a cabo también en moléculas diferentes para inducir su reacción mutua.
4. Estudio cualitativo y cuantitativo de los radicales formados en la disociación de pequeñas moléculas mediante (a) excitación con una lámpara continua visible, (b) fluorescencia inducida por láser UV.

5. Estudio de autoefectos en el haz láser tipo auto y desenfoque.
6. Generación de segundos armónicos y suma de frecuencias con láseres de CO_2 , usando cristales de AgGaSe_2 , crecidos en laboratorios de la Academia de Ciencias de Bielorrusia.
7. Deposición de láminas delgadas de Wolframio inducida por láser.

Simultáneamente a estos estudios de naturaleza esencialmente experimental, se realizaron un conjunto de investigaciones teóricas en temas relacionados con las experiencias o que concernían a tópicos más propios de la óptica Cuántica. Entre éstas podemos incluir:

1. Modelos del proceso de disociación multifotónica basados en la óptica no lineal, donde la disociación llega a producirse mediante efectos caóticos que involucran las frecuencias Rabi correspondientes a una o dos longitudes de onda de excitación.

2. Estudio mediante ecuaciones maestras del proceso de DMF utilizando los métodos estadísticos de la óptica cuántica y ciertos parámetros fenomenológicos [1].
3. Estudio de la Estadística cuántica de los procesos Hiper-Raman, Luminiscencia Anti-Stokes, cambio de la estadística cuántica de las transiciones Raman, etc.

En una segunda etapa, el Laboratorio de Procesos Multifotónicos se integró en el Instituto de Estructura de la Materia y se adquirieron un segundo láser de CO_2 y un láser de colorante bombeado por otro de N_2 , así como la infraestructura necesaria para poner a punto la técnica de Fluorescencia Inducida por Láser. En esta fase, el trabajo desarrollado se puede encuadrar en los siguientes apartados:

1. Deposición de láminas delgadas mediante irradiación láser infrarroja de precursores gaseosos: Se obtuvieron y caracterizaron láminas de polímeros basados en germanio y de materiales refractarios, eligiendo en este caso como materiales precursores diferentes carbonilos metálicos que fueron irradiados mediante radiación generada por suma de frecuencias de ambos láseres doblada con un cristal doblador adecuado.
2. Estudio de la redistribución de energía en moléculas excitadas vibracionalmente: Seleccionando moléculas que posean dos bandas de absorción en la región espectral cubierta por los láseres de CO_2 , obtuvimos los espectros multifotónicos de disociación sintonizando un campo láser IR en cada una de las bandas de forma simultánea o introduciendo un retraso temporal entre ellos. De esta forma se investigó la estructura de niveles de cada una de las moléculas excitadas. Controlando el retraso entre los pulsos de ambos láseres se estudió la desaparición de dicha estructura por procesos de transferencia de energía vibracional.
3. Estudio de los diferentes mecanismos colisionales que intervienen en los procesos de excitación y disociación multifotónica inducida por radiación láser IR: Se adaptó y extendió un modelo que permite cuantificar los diferentes procesos colisionales que tienen lugar en la DMF y se comprobó la fiabilidad del modelo aplicándolo al estudio de la DMF del difluoroclorometano.
4. Medida de la selectividad isotópica hidrógeno/deuterio en el proceso de disociación multifotónica inducida mediante irradiación con dos campos láser infrarrojos en la molécula CF_2HCl [2, 3]. Se comprobó que el uso de irradiación doble aumenta el rendimiento de la disociación del isótopo deuterado, aunque de forma moderada.

Actualmente se desarrollan en el laboratorio las siguientes líneas de investigación:

1. Estudio de los transitorios formados en la DMF del C_3F_6 y $\text{C}_2\text{H}_3\text{Br}$ como ejemplo de moléculas en las que los radicales se forman unimolecular y colisionalmente, respectivamente [4].
2. Estudio de las etapas iniciales de los procesos de deposición de láminas delgadas a partir de precursores derivados del silicio, investigación que se está desarrollando en colaboración con un grupo de investigación checoslovaco. La DMF de diferentes moléculas que dan lugar a polí-

meros de Si/C/H ha sido ya estudiada, estableciendo las especies transitorias formadas en el proceso, y la dependencia con las condiciones de irradiación de los diferentes canales de disociación.

3. La adquisición reciente de un nuevo láser de colorante de mucha mayor resolución, bombeado por uno de Nd:Yg de elevada potencia permitirá mejorar la resolución de los estudios espectroscópicos de los radicales producidos en la DMF, así como abordar nuevas líneas de trabajo.

El grupo de óptica Cuántica del Instituto de óptica ha trabajado, aparte de los tópicos propios de la óptica Cuántica, en problemas de comunicaciones ópticas por fibra e Información y Criptografía Cuánticas. En primer lugar se abordaron diversos problemas relacionados con el aprovechamiento de ciertos efectos cuánticos de la luz (luz comprimida o squeezed, es decir, luz con fluctuaciones en una cuadratura por debajo del límite cuántico), para lograr líneas de transmisión de señales láser de bajo ruido [5]. Estos estudios son del más alto interés para medidas de alta precisión, por ejemplo, en interferómetros para detectar ondas gravitacionales. En segundo lugar se estudiaron diversos esquemas de compensación de dispersión lineal en sistemas de transmisión óptica por fibra ya instalada, de señales ópticas procedentes de diodos láser. Esta investigación perseguía el aprovechamiento de las redes de fibra óptica estandar ya instalada. También se estudiaron fenómenos de sincronización de láseres caóticos, con vistas a aplicaciones de seguridad en transmisión de datos bancarios [6].

Suponiendo que el colapso fuera un proceso físico, ¿sería instantáneo o se produciría con una velocidad máxima determinada?

En una última etapa, se han aplicado dispositivos de naturaleza óptico-cuántica a problemas de Criptografía Cuántica [7], con aplicación a la transmisión de mensajes secretos seguros, donde la certeza de que no han sido detectados radica en los procesos cuánticos involucrados y no en la complejidad de ciertos algoritmos, como ocurre actualmente en criptografía clásica.

En 1982 se gestó en el Instituto de óptica el Grupo de Procesado por Láser. El eje central de la actividad del grupo en sus veinte años de existencia ha sido el estudio y aplicación de diferentes aspectos de la interacción láser-materia. La actividad investigadora inicial se centró en el desarrollo de nuevos materiales para el almacenamiento óptico de la información en dos áreas bien diferenciadas. La primera de ellas se relacionaba con el desarrollo de sistemas de almacenamiento de gran capacidad en el dominio de la frecuencia. Esta actividad, que se realizaba en colaboración con IBM San José (USA), requería la utilización de técnicas espectroscópicas de alta resolución, es decir, láseres de colorante de alta resolución. Uno de los resultados más innovadores de las investigaciones realizadas fué la demostración de que era posible realizar almacenamiento de información con un láser de semiconductor estabilizado en frecuencia.

La segunda área, que constituye el eje de las investigaciones del grupo en el periodo 1986-1996, fué el de las transformaciones de fase inducidas por láser. Esta área tenía

como objetivo de carácter aplicado la búsqueda de materiales optimizados para el desarrollo de discos ópticos reversibles por cambio de fase. Uno de los logros más innovadores alcanzados en estos temas ha sido el demostrar que se puede escribir y borrar la información mediante pulsos láser de pico y femtosegundos. Durante este periodo, el grupo inicia asimismo una actividad intensa en la producción de láminas delgadas por depósito con láser pulsado [8], con interés, tanto desde el punto de vista fundamental, estudiando las bases de la síntesis y la expansión del plasma, como desde el punto de vista aplicado, explorando la síntesis de materiales ópticos de interés tecnológico como el LiNbO_3 o materiales nanoestructurados ópticamente activos [9]. En este periodo se utilizaron inicialmente láseres de excímero que emiten pulsos de nanosegundos en el UV. Con el paso del tiempo, se vió la necesidad de acortar la duración del pulso y se trabajó además bien con un láser de excímero emitiendo pulsos de 500 fs o 10 ps o con un sistema basado en un láser de colorante con anclado de modos conectado a un amplificador de colorante que emite de forma optimizada pulsos de picosegundos a 583 nm.

Desde aproximadamente 1996 hasta la fecha, las actividades del grupo en el tema de transformaciones de fase y su aplicación al almacenamiento óptico de la información se han centrado en el estudio de los procesos ultrarrápidos en sólidos, es decir, fenómenos de excitación y/o transformaciones de fase inducidas por pulsos láser de 100 fs-10ps. De entre los resultados obtenidos es de destacar la demostración experimental de la formación de una fase desordenada inducida por excitación electrónica 250 fs después de la llegada del pulso láser de 100 fs a la superficie del material. Paralelamente, como extensión natural de las actividades realizadas, se comienza una actividad intensa en la producción de materiales ópticos y guías de onda nanoestructurados para su aplicación en dispositivos ópticos integrados de ganancia, conmutación y conversión de frecuencia. Ello lleva aparejado el estudio y la optimización de la emisión luminiscente de materiales dopados con tierra rara y de la respuesta óptica no lineal tanto de segundo como de tercer orden en diversos materiales [10]. Entre los resultados obtenidos quizás el más relevante sea la demostración de la necesidad de separar los iones de erbio inmersos en una matriz dieléctrica en más de 3 nm para evitar transiciones no radiativas que deterioran la respuesta luminiscente a 1.54 μm , lo que ha permitido alcanzar vidas medias de luminiscencia muy elevadas [11].

Las líneas de investigación que desarrolla actualmente el grupo, así como aquellas que tiene previsto iniciar a corto plazo incluyen el estudio de transformaciones de fase ultrarrápidas en sólidos de interés para el almacenamiento óptico de la información, y la producción de materiales noveles nanoestructurados y multifuncionales en lámina delgada.

B. Instituto de Estructura de la Materia (IEM)

A lo largo de los años ochenta, en el IEM se adquirió el equipo necesario para una primera instalación de espectroscopía Raman coherente. Se demostró la técnica “ultrasensible” de absorción intracavidad en el visible utilizando un láser de colorante lineal conjuntamente con un interferóme-

tro. Al final de los años ochenta se comenzaron a aplicar las técnicas de espectroscopía Raman estimulada y de infrarrojo por diferencia de frecuencias ópticas.

En esta última técnica, se genera radiación IR de características láser (alta colimación y monocromaticidad) mediante mezcla en un cristal no lineal (niobato de litio en este caso) de dos láseres visibles, uno de ellos de Ar^+ , de frecuencia fija, y el otro de colorante, sintonizable. Se obtiene así una emisión IR con una anchura espectral del orden de 5 MHz.

En la espectroscopía Raman estimulada (SRS) se parte de los mismos láseres, pero el de colorante es amplificado en pulsos (en un amplificador de colorante de tres etapas, bombeado por un láser de Nd-Yag a 532 nm). Las dos radiaciones se mezclan copropagantes en la célula que contiene el gas en estudio y, en caso de resonancia Raman, se observa una transferencia de energía de una radiación a la otra, en forma de una absorción transitoria sobre el haz del láser de Ar^+ . La integración de este pico de absorción frente a la diferencia de frecuencias constituye el espectro Raman. Los dos sistemas descritos comparten actualmente un mismo conjunto de láseres, siendo posible la obtención simultánea de ambos espectros, infrarrojo y Raman (una característica única de esta instalación).

El “colapso” o reducción no sería más que una especie de regla nemotécnica para descubrir el cambio de información sobre el sistema.

En el Departamento de Física Molecular coexisten dos líneas de investigación bien diferenciadas, una en torno al Raman espontáneo, y otra centrada en Raman coherente y generación de infrarrojo. Dentro de la primera línea de investigación se ha trabajado en espectroscopía Raman de alta sensibilidad y espectroscopía Raman en jet supersónico. Se ha examinado la potencialidad de la técnica para la investigación de expansiones supersónicas, con particular incidencia en los procesos de dimerización y formación de agregados líquidos y sólidos. En el año 2000 se ha instalado una nueva cámara de expansión hipersónica para estudios de fluidodinámica molecular, con la que se puede situar la onda de choque a 200 diámetros de tobera (es la onda de choque más ancha estudiada en laboratorio) [12].

La segunda línea de investigación versa sobre moléculas estables y complejos débilmente ligados en haces moleculares, espectroscopía láser en el límite de resolución Doppler y obtención de parámetros espectroscópicos de la atmósfera. El interés se dirige principalmente al desarrollo y aplicación de técnicas de alta resolución (en IR y Raman) para diferentes aplicaciones. En primer lugar, para determinar los parámetros espectroscópicos que caracterizan los niveles rovibracionales de moléculas simples. También de especies enfriadas en expansiones supersónicas para estudios sistemáticos de relajación rotacional de gases puros (N_2 , CH_4 , CO_2), y mezclas con He y Ar.

De entre los desarrollos instrumentales, los dos más importantes han sido la construcción de un ondámetro y la implementación de una técnica original de doble resonancia Raman-Raman. El ondámetro, esencialmente un interferó-

metro tipo Michelson, permite la medida de longitudes de onda de láseres continuos con una precisión de $6/10^9$ entre 400 y 1000 nm, utilizando como referencia la emisión de un láser de HeNe estabilizado, anclado a una transición hiperfina de I_2 mediante una técnica de saturación intracavidad.

La técnica de doble resonancia Raman-Raman consiste en poblar niveles moleculares excitados mediante bombeo Raman, y simultáneamente o tras un pequeño retraso, observar el espectro Raman desde estos niveles. Se demostró experimentalmente primero en H_2 a temperatura ambiente y luego se aplicó a las moléculas $^{12}CH_4$ y $^{13}CH_4$, y a los isótopos del acetileno con ^{12}C , ^{13}C y D [13]. Debe destacarse también la interpretación teórica de las experiencias realizadas en el laboratorio: estructura rotacional de diferentes tipos de bandas, interacciones anarmónicas, cálculos de función potencial, etc.

La linealidad de la evolución temporal en Mecánica Cuántica está muy relacionada con la imposibilidad de comunicación superlumínica.

C. Instituto de Química Física Rocasolano (IQFR)

En 1974 se inicia en el Departamento de Radioquímica del IQFR la investigación en láseres químicos. El primer montaje fue un láser de fotodisociación de yodo [14] que usaba CH_3I (yoduro de metilo) como precursor, bombeado mediante la fotodisociación del precursor con el pulso ultravioleta de microsegundos, emitido por una lámpara de flash fotólisis (fotólisis de destello).

Los láseres de yodo (basados en la transición entre los dos estados electrónicos más bajos del yodo, correspondiente a emisión en el infrarrojo cercano) ofrecían grandes perspectivas como láseres de alta potencia con aplicaciones en campos tales como la fusión nuclear. La investigación sobre estos sistemas se centraba en la obtención de precursores que condujeran a un mejor rendimiento de formación del estado superior de la transición láser, al desarrollo de nuevos procedimientos de bombeo y al estudio de los procesos que influenciaban la duración y rendimiento de la operación láser. En los años siguientes el trabajo se centró en este último punto. Junto con nuevos desarrollos del montaje láser inicial, se hizo una notable contribución, mediante estudios experimentales y modelado cinético, a la comprensión de los mecanismos de disipación y transferencia de energía y a la determinación de secciones eficaces de los procesos fotoquímicos implicados en los láseres de fotodisociación de CH_3I (normal y deuterado) y CF_3I .

Durante esta etapa de desarrollo y aplicaciones de los láseres químicos se montó un láser fotoquímico de cloruro de vinilo; en este sistema, la fotólisis de destello del cloruro de vinilo genera HCl con inversión de población. En el dispositivo montado en el IQFR, el resonador óptico, formado por un espejo y una red de difracción en montaje de Litrow permitía sintonizar el láser a las frecuencias infrarrojas discretas correspondientes a las diferentes transiciones rovibracionales del HCl. Con este montaje se investigó la dinámica de fotodisociación de moléculas potencialmente capaces de conducir a sistemas con inversión de población.

En 1982 se construyó en los laboratorios de fotoquímica del IQFR un láser de excímero (estos láseres, bombeados por una descarga transversal de alto voltaje habían sido desarrollados en 1976). El láser se optimizó para funcionar como láser de ArF (193 nm) y poco después se montó un segundo láser operando con la mezcla de XeCl (308 nm). Ambos láseres se construyeron en los talleres del IQFR adaptando un diseño proporcionado por el Clarendon Laboratory (Oxford). A partir de estos láseres ultravioleta, de alta potencia, se desarrollaron técnicas multifotónicas que se aplicaron a estudios de disociación multifotónica UV de moléculas pequeñas y a la generación de especies moleculares en estados electrónicos excitados para el estudio de sus procesos colisionales reactivos e inelásticos.

En 1985 se completó el montaje de un láser de colorante bombeado por el excímero de XeCl. El láser de colorante, constituido por un oscilador y dos amplificadores fué así mismo construido en los talleres del IQFR. A partir de los láseres de colorante, se inició una línea de trabajo para la generación de luz coherente en el UVV (ultravioleta de vacío).

La sólida base de conocimientos y experiencia sobre láseres adquirida en esas etapas iniciales, ha sido el impulso para una creciente actividad dirigida a la investigación sobre nuevos láseres y al desarrollo de aplicaciones de las técnicas láser y de la óptica no lineal. Las principales líneas de investigación activas en la actualidad se resumen a continuación:

1. Desarrollo de nuevos láseres de colorante de estado sólido [15]. Se lleva a cabo un estudio sistemático de las propiedades de emisión láser de matrices poliméricas dopadas con colorantes orgánicos. Se utilizan las amplias posibilidades que ofrece la síntesis de polímeros para modificar las propiedades de los materiales de un modo controlado, y se diseñan nuevos métodos para la incorporación de las moléculas de colorante a la matriz polimérica. Se desarrollan de este modo nuevos materiales con las propiedades adecuadas para emitir radiación láser eficiente y estable en la región visible del espectro (desde el azul-verde hasta el rojo). Se investiga, asimismo, la posibilidad de obtener materiales con emisión láser simultánea a varias longitudes de onda y se desarrollan combinaciones fotopoliméricas con las propiedades adecuadas para su utilización como memorias holográficas de alta velocidad de almacenamiento.
2. Propiedades ópticas no lineales de materiales. Se emplean técnicas de conjugación de fase por mezcla degenerada de cuatro ondas para caracterizar y obtener información acerca de la cinética de procesos de termalización en compuestos y materiales de interés para el desarrollo de láseres de colorante en estado sólido, y se estudian las propiedades de transmisión no lineal de dichos compuestos y materiales.
3. Interacción de moléculas con campos láser ultraintensos. Se estudian los mecanismos de ionización disociativa de moléculas pequeñas con pulsos láser de femtosegundos. Se estudian los mecanismos de acoplamiento láser-molécula que conducen a la fragmentación, ionización e ionización múltiple de las moléculas y su dependencia con la estructura y propiedades moleculares.

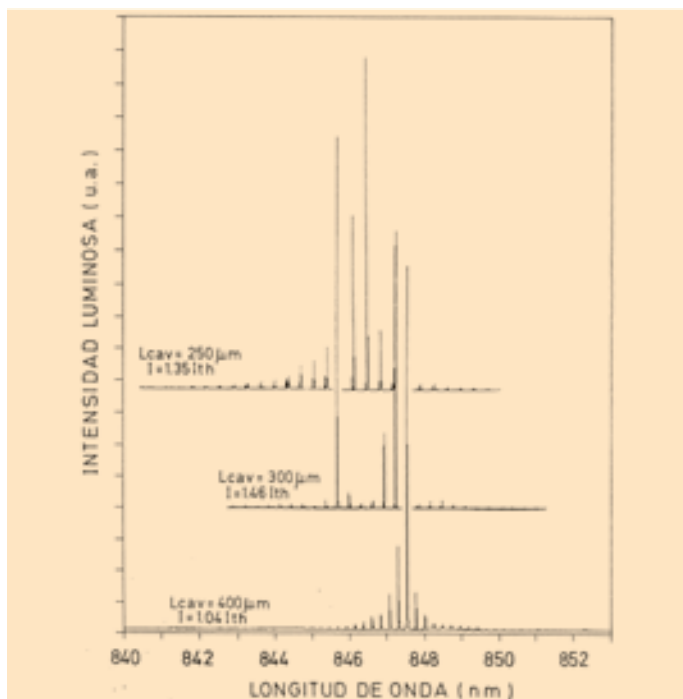


Figura 1. Espectros de emisión láser de estructuras de GaAs.

Dentro de esta línea, dirigida al estudio de la interacción de moléculas en campos láser ultraintensos, se participa en una línea de investigación (desarrollada en el Imperial College de Londres, en cuyos laboratorios se lleva a cabo el estudio experimental) dirigida a la generación de armónicos de orden elevado en moléculas orgánicas usando láseres de femtosegundos.

- Estudios de ablación con láseres. Aplicaciones para limpieza y conservación del patrimonio artístico y mobiliario urbano [16]. Aplicaciones para la caracterización de procesos en superficies. Fotoablación de precursores para la deposición de materiales nanoestructurados.

D. Instituto de Microelectrónica de Madrid

El Centro Nacional de Microelectrónica, en su fundación en el año 1985, abrió una línea de investigación cuyo objetivo, la fabricación de diodos láser, fue el móvil de la puesta a punto de varios procesos tecnológicos, tales como el crecimiento epitaxial, litografía ultravioleta, procesos de ataque, metalizaciones y montaje de dispositivos, imprescindibles para el desarrollo de las diferentes actividades y programas de un laboratorio de microelectrónica de materiales.

El dispositivo que se eligió fue un láser de pozo cuántico de GaAs, con estructura de confinamiento gradual separado de luz y portadores, con emisión en 850 nm. Para la guía de onda se diseñaron una serie de superredes para conseguir el perfil de índices gradual hasta el pozo de GaAs. Con estas estructuras se puso a punto la tecnología para definir contactos: evaporaciones de metales por haz de electrones (Au/Zn para el contacto p y Au/Ge para el contacto n), técnica de devastado del sustrato para dejar un espesor entorno a los 100 μm, exfoliación a lo largo de direcciones fáciles para la formación de espejos, individualización de los láseres, y por último, montaje y soldadura del dispositivo sobre un soporte

disipador. Espectros de emisión láser de estos dispositivos se presentan en la Fig. 1.

Con el desarrollo de las epitaxias pseudomórficas, y la técnica desarrollada en el laboratorio de crecimiento epitaxial con control capa a capa (atomic layer molecular beam epitaxy, ALMBE), a baja temperatura, se diseñaron estructuras con emisión en otras longitudes de onda, entorno a la micra, que tienen su aplicación principal en el bombeo de fibra óptica. Tales estructuras incorporaban en el pozo cuántico de GaAs diferentes números de capas de InAs, con lo que se consiguieron emisiones desde 880 hasta 1100 nm [17]. En la Fig. 2 se presentan las diferentes longitudes de onda conseguidas variando las capas de InAs.

En el campo de las comunicaciones por fibra óptica (1.3-1.55 μm), en el marco del proyecto, en colaboración con Telefónica I+D, "Láseres monocromáticos para comunicaciones coherentes", se empezó a investigar en sistemas de materiales (InGaAsP) sobre sustratos de fosfuro de Indio (InP). Se aplicó por primera vez la técnica del ALMBE a baja temperatura para el crecimiento epitaxial de InP y sus compuestos. El control que permite esta técnica sobre la cantidad de fósforo requerida para depositar una capa de InP, permitió demostrar la versatilidad y oportunidad del MBE para el crecimiento epitaxial de este tipo de láseres, que hasta la fecha estaban asociados a sistemas de crecimiento epitaxial a partir de compuestos metalorgánicos. Se investigaron guías de onda con pseudoaleaciones, basadas en superredes de periodo corto de materiales binarios y ternarios como son las InP/GaInAs o GaInP/GaInAs, sin tensión o con tensiones compensadas, respectivamente, con la zona activa formada por múltiples pozos cuánticos de GaInAs de diferentes composiciones. Por último, se está trabajando en un proyecto europeo para la consecución de láseres de puntos e hilos cuánticos en dos longitudes de onda, 980 nm y 1.55 μm.

E. Universidad de Baleares (UIB)-Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IME-DEA)

Las actividades de investigación en física de láseres en Palma de Mallorca comenzaron en 1986 en el Departamento

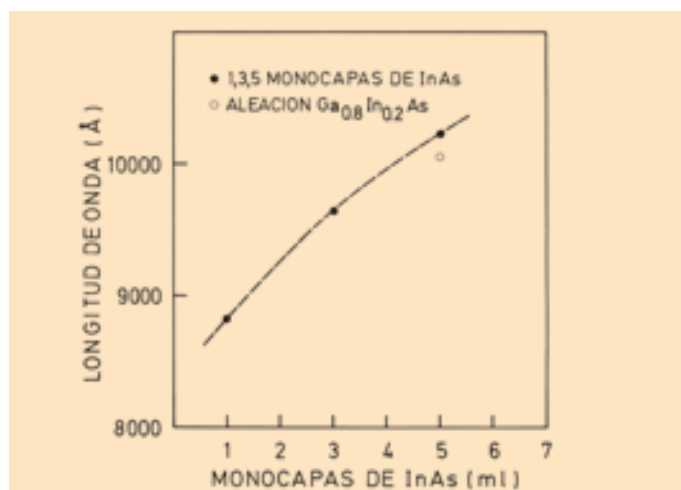


Figura 2. Variación de la longitud de onda espectral en función de las monocapas de InAs incorporadas en los pozos cuánticos de GaAs

de Física. Desde 1995 han continuado en el Departamento de Física Interdisciplinar del IMEDEA, Instituto mixto UIB-CSIC. Entre la variedad de temáticas estudiadas cabe destacar las siguientes contribuciones:

1. *Propiedades estadísticas de la luz láser y efectos de ruido:*

Las fluctuaciones y efectos del ruido se han estudiado en una gran variedad de situaciones. En unos primeros trabajos se explicaron aspectos llamativos observados en las funciones de correlación de intensidad en láseres de colorante en base a propiedades del ruido de bombeo. Las fluctuaciones de estructuras transversas en láseres de área ancha se modelizaron en términos de fases sujetas a un proceso de difusión. Más recientemente, y dentro de una nueva línea de actividad experimental se han demostrado propiedades constructivas del ruido en la dinámica no lineal de láseres de semiconductor, en los fenómenos de resonancia estocástica y resonancia coherente.

2. *Problemas de encendido láser:*

Como aspecto particular de las propiedades de ruido se han estudiado las distribuciones estadísticas de tiempos de encendido, proponiendo una teoría que explica las observaciones en láseres de colorante. Igualmente, se ha caracterizado la estadística de potencias máximas en encendido con emisión de pulsos y se ha dado evidencia experimental de cómo estas estadísticas discriminan los encendidos por ganancia o "Q-switching" en láseres de semiconductor, CO_2 y estado sólido. Además, se ha caracterizado la estadística de fluctuaciones de frecuencia y el problema de selección de frecuencia de emisión durante el encendido y los efectos de retroalimentación óptica.

3. *Láseres de semiconductor en comunicaciones ópticas:*

Las propiedades dinámicas y estocásticas de la respuesta de láseres de semiconductor modulados a frecuencias de GHz determinan muchos de los factores limitantes de velocidad en comunicaciones ópticas convencionales. Se han caracterizado propiedades de "jitter", "chirping", efectos de memoria y sus consecuencias en el "Bit Error Rate". Se han determinado puntos de operación óptima en que estos efectos son minimizados [18].

Dentro de los estudios de propiedades dinámicas de láseres se ha contribuido al desarrollo de las comunicaciones ópticas codificadas: Dos láseres emitiendo caóticamente pueden ser sincronizados cuando parte de la luz del láser "maestro" se inyecta en el "esclavo". El estado de sincronización de estos láseres permite utilizar la salida del láser maestro para codificar información sobre la portadora caótica que éste genera. La técnica, propuesta por primera vez en láseres de estado sólido, y extendida a los láseres de semiconductor, está en pleno desarrollo y ya se ha demostrado codificación y decodificación de mensajes a velocidades de Gbit/s [19].

4. *Dinámica no lineal de láseres:*

Además de los ya mencionados, se han estudiado diversos fenómenos asociados a la dinámica no lineal de láseres: a) Efectos de retroalimentación óptica: Se ha dado evidencia experimental de la influencia del carácter mul-

timodo de la emisión en el régimen de fluctuaciones de baja frecuencia. b) Láseres acoplados: Se ha caracterizado el régimen de sincronización caótica de láseres acoplados bidireccionalmente en términos de rotura de simetría. c) Láseres autopulsantes: Se ha dado una caracterización completa de los distintos regímenes de operación de láseres de semiconductor autopulsantes.

5. *Láseres de cavidad vertical y emisión superficial (VCSELs):*

Los VCSELs son nuevos láseres de semiconductor que emiten en un único modo longitudinal, pero presentan competición modal en polarización y modos transversos. Para la dinámica de polarización se desarrolló un modelo teórico ampliamente utilizado en la literatura para explicar la fenomenología observada [20]. La incorporación en ese modelo de una descripción más completa del material semiconductor, en términos de una susceptibilidad compleja dependiente de la frecuencia ha permitido desarrollar un escenario unificado para describir las inestabilidades de polarización y su relación con inestabilidades de modos transversos.

Por otra parte, y en el marco de una colaboración experimental con el Instituto No Lineal de Niza, se ha demostrado, en VCSELs de área ancha (150 μm de ancho), la posibilidad de generar cavitones como estructuras localizadas en el perfil de emisión, que pueden ser manipulados (encendidos o apagados) mediante cortos pulsos láser, y cuya posición y estado de movimiento pueden controlarse mediante el haz de holding. Esos cavitones se comportan como pixels luminosos naturales, lo que abre una vía para el procesamiento óptico paralelo de la información.

F. Universidad de Cantabria-Instituto de Física de Cantabria

En el Instituto de Física y en la Universidad de Cantabria se han desarrollado las siguientes líneas de investigación:

1. *Fluctuaciones en láseres de gas y colorante:*

Se han estudiado las propiedades estadísticas de los láseres de gas teniendo en cuenta la emisión espontánea, incluyendo el transitorio de encendido (en el que se ha realizado trabajo teórico y experimental), el régimen multimodo, el efecto de backscattering en láseres de anillo y la estadística de pulsos. En los láseres de colorante se ha analizado el efecto del ruido externo, tanto blanco como de color, para intentar explicar los resultados experimentales [21].

2. *Diodos láser y Comunicaciones ópticas:*

a) Fluctuaciones en láseres DFB (Distributed Feedback): Se ha estudiado el efecto de los modos secundarios durante el encendido. También se ha analizado la influencia de la corriente de polarización en los efectos de patrón de un láser modulado.

b) Generación de solitones:

Se ha propuesto, en base al estudio teórico, la generación de solitones en fibra óptica mediante la modulación pseudoaleatoria de diodos láser.

3. VCSELs (*Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*):

Se ha desarrollado un modelo sencillo para estudiar los VCSELs guiados débilmente por índice. Este modelo ha sido utilizado por los grupos más relevantes en este tema. Se ha estudiado el efecto del "spatial hole burning" en las propiedades de polarización y en la selección de modos transversales en VCSELs. Se ha analizado el efecto de los encendidos secundarios durante el apagado de VCSELs modulados y se ha obtenido una solución analítica para el estado estacionario de VCSELs en régimen multimodo transversal, que se ha utilizado para estudiar el espectro del ruido en intensidad [22, 23].

4. Comunicaciones Caóticas:

Se ha propuesto un modelo para explicar los datos experimentales de sincronización inversa de láseres con retroalimentación óptica en régimen caótico. Se ha desarrollado una teoría para determinar la región en la que láseres DFB con retroalimentación óptica sincronizan. Se ha estudiado la dinámica caótica de VCSELs modulados, y se ha propuesto su uso en sistemas de comunicación caótica con multiplexado en longitud de onda. Se ha analizado el efecto del ruido de emisión espontánea en la sincronización de láseres en régimen caótico, y se ha determinado el régimen de operación adecuado para su uso en sistemas de comunicaciones con portadora caótica.

imágenes en 10 μm bidimensionales, ha sido clave para estudiar este problema. Así, se ha demostrado que en estos láseres la radiación es emitida en un régimen extraordinariamente turbulento. No obstante, dentro del comportamiento localmente caótico se ha encontrado que los promedios son ordenados. Esta dinámica sólo se había observado en algunos experimentos en fluidos en una escala de tiempos mucho más accesible a las técnicas de registro de imágenes.

Al mismo tiempo, estudiando la dinámica en láseres de colorantes bombeados por radiación del láser de Nitrógeno, se ha demostrado que la emisión bicromática no es un fenómeno propio de los láseres de onda continua. Se ha obtenido emisión bicromática en tiempos tan cortos como los nanosegundos. Estos estudios ponen de manifiesto que este problema aún no ha sido satisfactoriamente modelizado. Es decir, su física aún no está perfectamente comprendida.

Recientemente se han empezado a estudiar otras inestabilidades espectrales como la de Risken-Nummedal-Grahn-Haken que, hasta ahora se ha mostrado como difícil de obtener de una forma limpia en los experimentos realizados. También se sigue el estudio de la dinámica espacio-temporal en láseres con apertura grande, que es en lo que se ha encontrado mayor riqueza de fenomenología.

Al mismo tiempo que se realizaban estudios conducentes a la mejor comprensión de la física del láser, se han desarrollado láseres industriales de CO_2 con potencias comprendidas entre 500 y 2000 vatios, que han sido explotados comercialmente. Finalmente, también se han estudiado una serie de efectos nuevos en la interacción de la radiación láser con la materia, en particular, fenómenos termoeléctricos y termomagnéticos en semimetales y superconductores de alta temperatura inducidos por pulsos de radiación láser. También se han estudiado los efectos fotoinducidos por radiación del láser de CO_2 ($\lambda=10\text{ }\mu\text{m}$) en uniones semiconductoras de Silicio y Germanio. Con estos estudios se busca la posibilidad de obtener alternativas a los detectores actuales, que en el infrarrojo lejano son muy poco sensibles. Algunos de los trabajos más relevantes se pueden consultar en [24-26].

Universidad Complutense de Madrid

A. Facultad de Ciencias Físicas

Las actividades del grupo de Física del Láser de la Universidad Complutense de Madrid comenzaron en el año 1970 con experimentos de bombeo óptico en vapor de Sodio. Posteriormente se investigó en la física y el desarrollo de láseres de Nitrógeno y láseres de colorante bombeados por láser de Nitrógeno. En esta etapa se desarrollaron diversos prototipos de estos láseres.

Posteriormente se estudió la física de los láseres de CO_2 bombeados transversalmente con el gas a presión atmosférica (láseres TEA). Estos láseres pueden operar también con Nitrógeno puro o con mezclas de Nitrógeno y Helio. De estos láseres se ha desarrollado un prototipo que operando con Nitrógeno ha permitido obtener hasta 22.5 mJ por pulso, funcionamiento que aún no ha sido superado en descarga automantenida y operando con mezclas de CO_2 iguala los mejores resultados existentes en energía por unidad de área.

También se ha estudiado la física de láseres de colorante bombeados por lámparas flash. Así, se ha observado que en estos láseres aparecen fluctuaciones irregulares de la intensidad cuando se mide en pequeñas áreas de la sección transversal del haz. Estas observaciones han sido también realizadas en el láser TEA de CO_2 .

El estudio de las fluctuaciones locales irregulares ha sido realizado en los últimos años en este laboratorio. El corto periodo medio de estas fluctuaciones (del orden de 10 ns) hace que este estudio sea experimentalmente muy difícil. Para poderlo acometer se ha desarrollado una técnica original de fotografía en el infrarrojo lejano con una resolución de 1 ns. Este sistema, único en el mundo con esta resolución en

B. Instituto Pluridisciplinar

La Unidad de Láseres y Haces Moleculares del Instituto Pluridisciplinar está compuesta de varios laboratorios donde se dispone de diferentes técnicas basadas en la espectroscopía láser y haces moleculares. A continuación se describen brevemente los diversos servicios y/o técnicas:

1. Interacción láser-gas-superficie: Catálisis láser

Se dispone de una máquina de haces moleculares para medir los productos de la interacción de un gas con una superficie. Tanto las moléculas del gas como de la superficie pueden ser excitadas por radiación infrarroja sintonizable. Uno de los aspectos básicos de esta línea de investigación es la inducción de reacciones químicas heterogéneas debido a la excitación láser. Estos estudios tienen como objetivo investigar la influencia de la excitación vibracional en la dinámica gas-sólido, así como abordar el estudio de procesos catalíticos [27].

2. Espectroscopía de ablación y desorción láser

Se dispone de dos técnicas de análisis por espectroscopía láser. En una primera modalidad se usa un láser de

Nd:YAG que bombea a uno de colorante. La radiación de ambos puede usarse alternativamente para vaporizar muestras sólidas. Esta técnica se ha usado para el análisis químico de materiales de interés tecnológico, como el análisis del contenido isotópico en materiales de interés para centrales.

La ablación de la muestra produce microplasma, cuya emisión es analizada directamente por un analizador óptico multicanal, que permite recoger y analizar la emisión en un determinado intervalo de longitudes de onda. Con esta técnica se detectan no sólo los componentes mayoritarios, sino trazas de hasta partes por millón con gran resolución y rapidez.

En una segunda variante se dispone de una técnica de dos fotones para realizar análisis de contaminantes en muestras sólidas para aplicaciones medioambientales. Usando un primer fotón de baja energía se logra desorber la sustancia de interés sin apenas fragmentación de la misma. Un segundo fotón de energía variable permite analizar la sustancia vaporizada induciendo su fluorescencia.

3. Espectrometría de ionización resonante: Análisis químico y medioambiental.

Recientemente se ha puesto a punto una técnica de análisis químico consistente en la desorción por láser de la muestra mediante las técnicas reseñadas anteriormente, y el análisis por espectrometría de ionización resonante, que consiste a su vez en el acoplamiento de dos técnicas: la ionización multifotónica resonante (REMPI) del analito, y su detección por espectrometría de masas por tiempo de vuelo (TOFMS). La principal innovación de este sistema es la realización de un análisis directo, ya que no requiere un tratamiento previo de preparación de la muestra, lo que supone un gran ahorro de tiempo y coste económico. Además, se obtiene una gran selectividad y resolución, así como muy buena sensibilidad.

Entre las múltiples aplicaciones de esta técnica al análisis químico medioambiental, se han estudiado principalmente los plaguicidas utilizados en los cultivos agrícolas del sur de España. Más recientemente se ha aplicado con éxito este método a un polifenol de gran interés presente en las uvas y el vino: el trans-resveratrol. En ambos casos, la sensibilidad y selectividad de estas técnicas han permitido obtener resultados comparables a los de técnicas convencionales, pero de una manera mucho más rápida y directa [28].

4. Espectroscopía y dinámica de las reacciones químicas en moléculas de van der Waals

Uno de los métodos actuales para el estudio de la espectroscopía del estado de transición en el dominio de frecuencias es usar moléculas de van der Waals, donde un átomo, generalmente metálico, se acompleja con un disolvente. La molécula no es reactiva en su estado electrónico fundamental, pero por el contrario sí lo es en su estado excitado. Así, la reacción se fotoinicia por excitación láser y se miden los espectros de acción o fotofragmentación, lo que permite investigar la dinámica de la reacción en las proximidades del estado de transición.

Recientemente se ha puesto a punto una técnica novedosa para el estudio de la espectroscopía y dinámica de moléculas de van der Waals con átomos metálicos. Se usa un primer láser para vaporizar una muestra metálica y formar por expansión supersónica el haz molecular conteniendo las moléculas van der Waals. A continuación, la estructura y reactividad de dichas moléculas se estudia por espectroscopía REMPI acoplada a un espectrómetro de masas de tiempo de vuelo. Esta técnica ha producido excelentes resultados en el campo de la espectroscopía del estado de transición. En esta dirección se han llevado a cabo estudios, tanto espectroscópicos como dinámicos, de la molécula Ba...FCH₃. Se han conseguido llevar a cabo medidas simultáneas de los espectros de fotofragmentación y acción, lo que permite cancelar los factores espectroscópicos y obtener directamente la probabilidad de reacción para cada canal reactivo. Por otro lado, la disponibilidad de láseres de una anchura de línea muy reducida –en nuestro caso de 0.1 cm⁻¹– nos permite medir la probabilidad de reacción con una gran resolución energética, a veces del orden de unas centésimas del milielectrón voltio. Esto permite revelar la estructura vibro-rotacional del estado de transición [29].

5. Reacciones químicas por cruce de haces moleculares

Se dispone de la técnica haz-gas para el estudio de las reacciones químicas mediante la espectroscopía de fluorescencia inducida por láser y quimiluminiscencia de emisión. Uno de los objetivos prioritarios es obtener información acerca de la estereodinámica de la reacción química. Estos estudios permiten obtener información sobre los mecanismos dinámicos a nivel molecular de las reacciones químicas, así como el diagnóstico de reacciones utilizables para crear nuevos láseres químicos.

6. Laboratorio para la medida de la contaminación urbana de Madrid

Recientemente se ha puesto a punto una técnica para la medida de la contaminación urbana. Básicamente consiste en un láser pulsado TEA-CO₂ sintonizable a dos longitudes de onda (resonante y no resonante), con su telescopio y óptica de detección. Desde un punto de vista operativo, su funcionamiento es similar al RADAR. Es decir, un pulso de radiación es enviado a la atmósfera y los “ecos” de la radiación son detectados y analizados para obtener información acerca de lo que hay en la atmósfera circundante. El sistema puede apuntarse en cualquier dirección, limitado por la topografía de los alrededores del Instituto. Esta limitación quedará eliminada en una segunda fase, en que el sistema se podría instalar en una plataforma móvil.

Las características básicas de esta estación son la rapidez de adquisición de datos y su gran resolución espacial. Estas características permiten que un barrido de la atmósfera urbana pueda hacerse en un tiempo extremadamente corto, de modo que las estructuras turbulentas pueden considerarse “congeladas”, minimizando su influencia en las medidas.

Universidad Autónoma de Madrid

Uno de los retos más atractivos en la física del láser es el desarrollo de nuevos sistemas que generen radiación coherente en el visible o en el ultravioleta, y que al mismo tiempo sean compactos y miniaturizables. Estos aspectos han incentivado el desarrollo de nuevos cristales láser que puedan ser bombeados con diodos láser infrarrojos, y que por tanto permitan aprovechar las ventajas de la compacidad de un sistema enteramente sólido y que hagan posible el desarrollo de dispositivos mixtos de tamaño muy reducido (mini y micro láseres).

Generalmente el esquema que se utiliza para los mencionados láseres visibles consiste en un cristal láser impurificado con iones trivalentes de tierras raras (TR^{3+}), y otro cristal no lineal intracavidad que convierte la radiación láser infrarroja del ión TR^{3+} en radiación visible (estos láseres suelen bombearse con láseres de diodos que emiten en la región espectral 750-900 nm). Sin embargo, dichos cristales no lineales pueden a su vez utilizarse como matrices para los iones activos de TR^{3+} , de manera que el sistema resulta más compacto, pues el proceso de generación de radiación láser y el de conversión de ésta en radiación visible se lleva a cabo en el mismo cristal. Estos sistemas se suelen denominar Láseres Autoconvertidores de Frecuencia (LAF). El primer LAF data de 1986 y consistió en un cristal de Niobato de Litio activado con iones de Nd^{3+} que emitía luz coherente verde después de autodoblar la frecuencia de radiación láser asociada a dichos iones. Este fue un paso fundamental para activar un nuevo campo de investigación: Láseres basados en cristales no lineales.

Desde aproximadamente 1994, el grupo de Láseres de Estado Sólido del Departamento de Física de Materiales, ha trabajado activamente en este campo, utilizando nuevos cristales no lineales (fundamentalmente niobatos y boratos) como matrices láser para distintos iones activadores trivalentes de tierras raras (Nd^{3+} , Yb^{3+}). Las investigaciones de este grupo abarcan un amplio campo, desde el crecimiento de monocristales activados con iones ópticamente activos, la caracterización espectroscópica (absorción, luminiscencia, eficiencias cuánticas, etc.) hasta la demostración final de su funcionamiento como sistemas láser. Estos sistemas han permitido generar radiación coherente en distintas longitudes de onda en el visible y en el ultravioleta, utilizando distintos procesos de autodoblado y autosuma de frecuencias en el cristal láser que se introduce en la cavidad.

A modo de ejemplo, se obtuvo [30] radiación coherente en el verde mediante un proceso de autodoblado de la frecuencia láser fundamental de iones de Yb^{3+} en monocristales de $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. También se obtuvo [31] radiación coherente en el azul mediante un proceso de autosuma de las frecuencias láser y de bombeo del ión Nd^{3+} en un monocristal de $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$. Esto dio lugar posteriormente a la consecución de los tres colores fundamentales del espectro visible (rojo, verde y azul) a través de distintos procesos no lineales en el mencionado cristal. Un problema que se ha abordado recientemente ha sido la consecución de los tres colores fundamentales de manera simultánea, lo que se ha conseguido utilizando un monocristal de $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ situado en una cavidad que además contenía un cristal láser de $\text{YVO}_4:\text{Nd}$ [32].

Universidad Politécnica de Madrid

El grupo de trabajo en Diodos Láser del Departamento de Tecnología Fotónica de la ETS de Ingenieros de Telecomunicación comenzó su actividad en 1992. Durante su primera época (hasta 1996), la actividad del grupo estuvo estrechamente relacionada con el Instituto Fraunhofer de Friburgo, con el que se colaboró en el diseño y caracterización de láseres de alta velocidad, alcanzándose valores record de modulación en pequeña señal de hasta 40 GHz. Asimismo se contribuyó a una mejor comprensión de los efectos de la tensión en la respuesta del láser a alta frecuencia.

Los temas de investigación del grupo en esta primera etapa se centraron en los fenómenos de captura y escape de portadores en láseres de pozo cuántico, y en el desarrollo de nuevas técnicas de medida basadas en el comportamiento eléctrico de los láseres. Se realizaron e interpretaron medidas de la impedancia eléctrica en alta frecuencia, obteniéndose información sobre los tiempos de captura y escape en diferentes estructuras, y se propuso un modelo simplificado que explicaba los resultados obtenidos. Asimismo, se midió y analizó la característica capacidad-voltaje en láseres de pozo cuántico, obteniéndose información sobre el dopado y alineamiento de las heterouniones [33-35].

Posteriormente, el grupo participó en un proyecto europeo sobre láseres de alta potencia, en el marco del cual se desarrollaron programas complejos de simulación numérica de las características de emisión en continua a partir de la estructura de capas del dispositivo. Estos modelos incluyeron la solución de las ecuaciones térmicas y eléctricas en dos dimensiones, y fueron empleados para analizar el calentamiento de los espejos en láseres de alta potencia. Los programas desarrollados fueron registrados y están siendo comercializados por una empresa británica. También se desarrolló un método de preselección de barras láser de alta potencia (20 W), basado en el análisis de la característica tensión-corriente, que permitía elegir aquellos dispositivos con menor número de defectos y por tanto mayor fiabilidad.

En la actualidad, el trabajo del grupo se centra en láseres de alta potencia y alto brillo acampanados (tapered), en el marco de un proyecto europeo. Se han desarrollado programas de simulación en tres dimensiones, con los que se realizan nuevos diseños para mejorar las características del haz. Desde el punto de vista experimental, se han desarrollado nuevos métodos de medida del índice diferencial y del factor de ensanchamiento de línea. En un futuro próximo, el interés del grupo se centrará en la simulación y caracterización de láseres de cavidad vertical (VCSEL) para aplicaciones en Ethernet de alta velocidad.

También en la Universidad Politécnica de Madrid, el Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) desarrolla investigación en láseres. El trabajo se centra en el desarrollo de láseres de semiconductor para su utilización en las bandas del azul-ultravioleta y el infrarrojo cercano. Los primeros son interesantes para aumentar la capacidad de los actuales dispositivos ópticos de almacenamiento de datos (CD-ROM, DVD), y también para mejorar la resolución de los sistemas de impresión láser de alta calidad. Los segundos encuentran su principal aplicación en los sistemas de comunicación mediante fibra óptica monomodo.

Para llevar a cabo esta investigación se están utilizando diferentes sistemas de materiales III-V, principalmente semiconductores basados en nitruro de Galio para la emisión en el azul, y los clásicos GaAs-AlGaAs-InGaAs para las longitudes de onda más largas. Entre las principales aportaciones de este grupo se encuentran: el estudio del crecimiento por epitaxia por haces moleculares de GaN sobre sustratos de Si(111), el desarrollo de diodos emisores de luz (LED) sobre este tipo de sustratos y también la obtención de LED de alta eficiencia con reflectores de Bragg sobre sustratos de zafiro.

En el caso de los arseniuros se ha realizado una amplia labor en la fabricación de láseres de pozo cuántico de InGaAs crecidos sobre obleas de GaAs (111) para alcanzar longitudes de onda cercanas a 1.1 μm . Este tipo de orientación cristalina tiene especial interés debido a su posible mejora del espesor crítico respecto a la orientación más habitual (100), lo que permite crecer pozos cuánticos más anchos con mayor incorporación de In, haciendo que sea posible llegar a las regiones del infrarrojo cercano. Además, la presencia de campo piezoeléctrico en el pozo debido a la tensión introducida por el InGaAs permite tener un grado más de libertad a la hora de diseñar las estructuras. A este respecto se han desarrollado programas autoconsistentes para un cálculo preciso de las longitudes de onda de emisión en función de las dimensiones de las capas que conforman el dispositivo [36].

La posición de la estructura láser sobre la superficie de la oblea es también importante, pues las direcciones cristalográficas preferenciales de exfoliación, que son las que definen la posición de los espejos se encuentran en un ángulo diferente a las obleas (100) y por tanto, el procesado de estos láseres necesita de técnicas más refinadas que las empleadas en los dispositivos comerciales. Actualmente el ISOM cuenta con varias estructuras desarrolladas totalmente en sus instalaciones con longitud de onda de emisión de 1.08 μm a temperatura ambiente.

Por otro lado, se ha abierto recientemente una nueva línea de investigación cuyo objetivo es el desarrollo de láseres en 1.3 y 1.5 μm . Para llegar a estas longitudes de onda es necesario utilizar sistemas de materiales que presenten una discontinuidad grande en la banda de conducción. A este respecto se están estudiando actualmente las llamadas aleaciones con nitrógeno diluido, formadas por sistemas III-V del tipo GaAs o InGaAs, con una pequeña incorporación de N. La adición de este elemento al sistema InGaAs permite reducir la tensión en la red cristalina de tal forma que teóricamente sería posible crecer dicho material en perfecto ajuste de red con el sustrato de GaAs. Estos materiales han sido propuestos como una alternativa a los láseres crecidos sobre sustratos de fosfuro de In, de prestaciones limitadas y tecnología costosa debido al estricto control de ajuste del parámetro de red necesario para evitar tensiones y dislocaciones en los dispositivos [37].

Para la realización de la estructura láser, el ISOM cuenta con dos equipos de epitaxia por haces moleculares (MBE), siendo las capas crecidas procesadas mediante fotolitografía y evaporación térmica de metales. El tamaño de la muestra resultante dependerá de la longitud efectiva de la cavidad resonante que se requiera en cada caso, pudiendo de esta forma estudiarse la variación en los modos ópticos del láser en función de las dimensiones de dicha cavidad.

Universidad Carlos III de Madrid

El grupo de Optoelectrónica y Tecnología láser del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Automática centra su actividad en el diseño y caracterización experimental de las nuevas fuentes láser de semiconductor necesarias para los futuros sistemas de comunicaciones ópticas. Sus principales líneas de investigación son las siguientes:

1. Diodos Láser de Semiconductor y Aplicaciones.

a) Modelado Lineal y No-Lineal de Diodos Láser

Esta línea de investigación, activa desde 1992, lleva a cabo el estudio y modelado de diversas estructuras y configuraciones de emisores láser de semiconductor, así como de su respuesta dinámica frente a la modulación. Las actividades del grupo en cuanto a la respuesta de los dispositivos frente a la modulación lo han adentrado en el estudio de la dinámica no lineal [38] de láseres modulados directamente.

Entre las estructuras que se estudian, merece la pena destacar los emisores láser de semiconductor acoplados lateralmente, tema en el que el grupo lidera un proyecto europeo para el modelado, diseño y fabricación de estas estructuras láser, que presentan aplicaciones en comunicaciones ópticas de alta velocidad [39]. Actualmente se trabaja junto con grupos de Francia, Bélgica, Holanda, Alemania y Portugal en la caracterización y propuesta de utilización de los dispositivos fabricados en sistemas de comunicaciones ópticas de tipo SCM (subcarrier multiplexing). En la Fig. 3 se muestra una fotografía de uno de los dispositivos fabricados, que ha demostrado un incremento del ancho de banda de modulación.

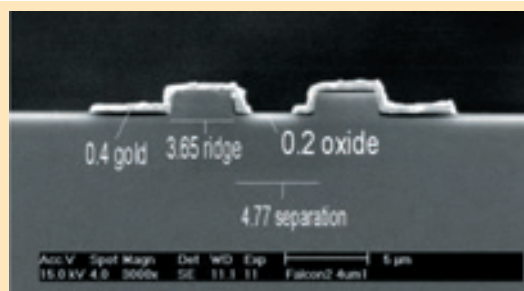


Figura 3. Fotografía de los dispositivos fabricados

Por otra parte, en esta línea de investigación, este grupo participa como socio en otro proyecto europeo que tiene como objetivo la especificación y desarrollo de un prototipo de una red local de fibra óptica de bajo coste para aplicaciones aeronáuticas. El grupo de la Universidad Carlos III tiene participación como responsable de la tarea específica de evaluación de dispositivos receptores y transmisores. La caracterización de estos dispositivos comprende el comportamiento óptico de emisores, la caracterización electrónica de emisores y detectores y la calificación de componentes optoelectrónicos avanzados, entre los que se encuentran varios de nueva creación. Los dispositivos a evaluar comprenden diodos láser, LEDs y VCSELs.

b) Utilización de Diodos Láser para Sistemas de Telemetría y Visión.

Dentro de esta línea de investigación se encuadran una serie de desarrollos de telémetros láser utilizando láser de semiconductor para los robots móviles del área de Ingeniería de Automática y de Sistemas de la Universidad Carlos III. Es de destacar el desarrollo de un sistema de visión con movimiento de haz para la empresa IBERDROLA dentro del proyecto "Robot para la inspección y mantenimiento de líneas de alta tensión".

2. *Interferometría láser para medidas de densidades electrónicas en plasmas de fusión* [40].

Esta línea de investigación está activa desde 1992. Se han realizado experimentos de interferometría con láseres de CO_2 y He-Ne, así como sistemas de procesamiento de la señal interferencial y electrónica de detección. Esta actividad es complementaria con una colaboración con el Massachusetts Institute of Technology para el desarrollo de sistemas de interferometría para medidas de densidades electrónicas basados en láseres de Nd:YAG. Se ha logrado la instalación por primera vez en un Tokamak de un interferómetro láser heterodino basado en un láser de Nd:YAG con doblado de frecuencia.

Universidad Autónoma de Barcelona

Desde 1975, en problemas relacionados con la física del láser, en la Universidad Autónoma de Barcelona se ha trabajado esencialmente en las siguientes cuatro líneas de investigación:

1. *Espectroscopía láser de alta resolución:*

En espectroscopía atómica y molecular, normalmente se trabaja con gases a baja presión, con lo que la principal causa de ensanchamiento de las transiciones ópticas es el efecto Doppler, que enmascara estructuras y efectos de gran interés (estructuras finas e hiperfinas, desplazamiento Lamb, etc.). Los métodos espectroscópicos cuyo poder resolutorio no viene limitado por el efecto Doppler se denominan de alta resolución. Se ha trabajado en uno de ellos, espectroscopía láser de saturación: Sobre la muestra actúan dos haces láser monomodo continuos. Uno de ellos (haz saturante) es lo suficientemente intenso como para producir una saturación apreciable, mientras que el otro haz (haz de prueba) es débil y sintonizable. Si ambos láseres se acoplan con la misma transición se tiene el llamado sistema de dos niveles; si se acoplan a transiciones diferentes que comparten un nivel común se tiene un sistema de tres niveles.

Se ha llevado a cabo un estudio teórico sistemático de la espectroscopía de saturación en sistemas de tres niveles, con onda saturante estacionaria (formada por dos ondas contrapropagantes de la misma frecuencia). Este estudio se desarrolló tanto en el formalismo semiclásico de la matriz densidad como en el formalismo cuántico del "átomo vestido" (dressed atom). Los formalismos desarrollados se aplicaron a una gran variedad de problemas diferentes, no suficientemente entendidos en su momento: a) perfiles espectrales en espectroscopía láser intraca-

vidad; b) resonancias con anchura subnatural; c) perfiles espectrales en espectroscopía de absorción de dos fotones sin efecto Doppler y en espectroscopía de absorción saturada cuando los dos haces láser que intervienen se acoplan simultáneamente a las dos transiciones del sistema de tres niveles; d) estudio de métodos para compensar total o parcialmente los desplazamientos radiativos que sufren los niveles de átomos/moléculas con velocidades diferentes y e) espectroscopía de saturación en muestras ópticamente densas, y espectroscopía con resolución sub-natural [41].

2. *Láseres de gas con bombeo óptico coherente (LGBOCs):*

En estos láseres, el bombeo lo efectúa un láser monomodo continuo acoplado con una transición que comparte el nivel superior con la transición láser (esquema Λ). Este tipo de bombeo es imprescindible para láseres que operan en longitudes de onda largas del lejano infrarrojo, ya que los dos niveles de la transición láser están poco separados energéticamente y es muy difícil que una descarga eléctrica o un bombeo óptico incoherente pueblen selectivamente el nivel superior. Con respecto a los láseres convencionales, los LGBOCs presentan una serie de peculiaridades asociadas al acoplamiento coherente no lineal entre el campo láser de bombeo y el campo láser generado. Así por ejemplo, en los LGBOCs juega un papel importante el efecto Raman. Se ha llevado a cabo un estudio teórico sistemático de los LGBOCs de alta intensidad, que permitió clarificar una serie de cuestiones tales como: a) anisotropías en la ganancia en láseres con cavidad Fabry-Perot y bombeo con onda propagante; b) espectro de emisión en función de la sintonización de la cavidad; c) emisión bidireccional en láseres con cavidad en anillo; d) perfil espectral del llamado Lamb dip transferido, que aparece en LGBOCs en los que el bombeo está formado por dos ondas contrapropagantes de la misma frecuencia. En relación con la cuestión a), también se han realizado estudios experimentales. Finalmente, se propuso teóricamente y se demostró experimentalmente un nuevo método de bombeo para aumentar la ganancia en LGBOCs que operan en el lejano infrarrojo [42].

3. *Dinámica láser no lineal:*

Desde el principio del desarrollo del láser, se observó que éstos podían presentar pulsaciones irregulares en su emisión. Inicialmente se relacionó este comportamiento con un control insuficiente de las condiciones experimentales. No obstante, posteriormente se reconoció que dado que los láseres son sistemas no lineales disipativos, pueden presentar de manera autónoma inestabilidades periódicas y caóticas. Desde el principio de los 80, este tema ha suscitado mucho interés. En el marco de un proyecto europeo, se trabajó inicialmente en la modelización teórica de las variadas inestabilidades observadas en LGBOCs que operan en el lejano infrarrojo y que incluyen un comportamiento caótico muy parecido al del paradigmático modelo de Lorenz. En el marco de estos estudios, se consideró por primera vez la influencia de la polarización de los haces de bombeo y de los generados en la dinámica láser, y se describió por primera vez la

aparición de caos en la polarización de la luz, mientras que hasta entonces se consideraba únicamente en la intensidad de la onda emitida.

Se ha llevado a cabo también un estudio experimental y teórico detallado del llamado método de control del caos sin realimentación, en sistemas que presentan una cascada de bifurcaciones de doblamiento de periodo. En concreto, en láseres de CO_2 con pérdidas o ganancia moduladas periódicamente, se ha estudiado la variada fenomenología que aparece al modular con otra señal periódica (señal de control) alguno de sus parámetros. Dado que el láser de CO_2 es de clase B (sólo tiene dos variables dinámicas relevantes), la primera modulación sirve para inducir, a través de una cascada de doblamientos de periodo, una dinámica rica que puede llegar a ser caótica. Con la segunda modulación (amplitud, frecuencia y fase diferentes de la primera), se pretende controlar la dinámica del sistema. Se han observado así una gran cantidad de fenómenos relevantes tales como: a) multitiestabilidad generalizada; b) supresión del caos por estabilización de estados estacionarios inestables; c) desdoblamiento de atractores; d) resonancia estocástica en un láser caótico, etc. [43].

4. Láseres sin inversión y otros efectos de coherencia atómica

Una de las tareas permanentes de la física del láser consiste en ampliar el rango de frecuencias en las que pueda disponerse de radiación coherente. Esta tarea encuentra graves dificultades en la zona de altas frecuencias (UV, rayos X,...), ya que la potencia de bombeo necesaria para alcanzar la inversión de población crece muy rápidamente con la frecuencia. Si el láser pudiera trabajar sin inversión de población, estos problemas se mitigarían mucho, y se abriría una nueva puerta hacia las altas frecuencias. Tal posibilidad se ha demostrado recientemente tanto teórica como experimentalmente. Para ello es necesario actuar no sólo sobre las poblaciones de los niveles (como se hace en los láseres convencionales), sino también sobre las coherencias atómicas. Estas necesarias coherencias atómicas se inducen habitualmente con la ayuda de un láser de bombeo, que actúa sobre una transición que comparte un nivel con la transición amplificadora del nuevo láser a generar. La presencia de coherencias atómicas lleva aparejada la existencia de interferencias cuánticas que pueden por ejemplo anular procesos de absorción mientras que incrementan procesos simétricos de amplificación, lo cual explica la posibilidad de amplificar sin que la población esté invertida. Para que los láseres sin inversión (LWI) puedan ampliar el rango de frecuencias láser disponibles hacia las regiones de los rayos X, etc., obviamente el láser de bombeo ha de ser de menor frecuencia que el láser a generar: éste es el denominado régimen de “frequency up-conversion”. Hasta ahora los LWI demostrados experimentalmente han trabajado en el régimen opuesto de “frequency down-conversion”.

Se han centrado los esfuerzos en el estudio teórico de LWIs con “frequency up-conversion”. Se ha aplicado en este estudio el formalismo clásico de la matriz densidad y también el recientemente desarrollado de los saltos

cuánticos (“quantum jumps”). Se ha trabajado también en otros fenómenos de coherencia atómica análogos, tales como la transparencia inducida electromagnéticamente o la amplificación sin inversión [44].

Universidad Politécnica de Cataluña

En relación con la temática que nos ocupa, desde 1992, en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) se han desarrollado las siguientes líneas de investigación:

1. Óptica No Lineal en cristales fotónicos

Se ha desarrollado una labor pionera en la investigación teórica y experimental (mediante láseres de picosegundos) de fenómenos ópticos no lineales cuadráticos en el nuevo tipo de estructuras materiales conocidas como materiales fotónicos. En particular, se ha demostrado un nuevo método de generación de segundo armónico (SHG) en el que el ajuste de fases necesario para optimizar la eficiencia del proceso se consigue gracias a la dispersión (o modificación del índice de refracción que introduce este tipo de estructuras en los bordes de las bandas fotónicas prohibidas). Al mismo tiempo se ha estudiado la radiación de un dipolo (generado también mediante SHG) en el interior de un cristal fotónico, demostrando fenómenos de estimulación y de inhibición de dicha radiación [45].

También en esta línea, se ha demostrado un nuevo fenómeno no lineal cuadrático, que se ha denominado reflexión no lineal activa, que permite controlar mediante un pulso luminoso la transmitancia y reflectancia de una microcavidad o un cristal fotónico, lo que puede ser de interés para procesado totalmente óptico de señales [46].

2. Dinámica espacio-temporal de sistemas ópticos no lineales

El grupo de investigación de la UPC ha sido uno de los primeros en investigar la dinámica temporal de la polarización en un láser, habiendo estudiado fenómenos de switching espontáneo de la polarización en láseres bombeados ópticamente (en este tema se ha colaborado con la Universidad Autónoma de Barcelona y la Universidad de Valencia), y en láseres de semiconductor. Es de señalar que se ha realizado la primera predicción de caos vectorial (o caos de la polarización) en óptica.

Por otra parte, se ha estudiado el comportamiento espacio-temporal de láseres de emisión en cascada y de dos fotones, habiendo predicho por primera vez la posibilidad de formación de solitones de cavidad (o solitones transversales) en un resonador puramente activo. Además, se ha predicho recientemente la formación de dicho tipo de solitones en láseres de dos niveles con efectos de campo local [47].

Se ha estudiado también el comportamiento dinámico temporal y espacial de láseres sin inversión de población, y recientemente se está estudiando la aparición de resonancias multifotónicas de diferente orden en haces atómicos irradiados mediante luz monocromática, que permiten la amplificación de radiación y pueden llevar a la formación de estados entangled en polarización.

Finalmente, en estos últimos años se está dedicando mucha atención al estudio teórico y experimental de la

dinámica temporal de láseres de semiconductor y de microchip, ya sea en láseres solitarios o bien en láseres acoplados. El acoplamiento entre láseres, aparte de su interés general como ejemplo práctico de acoplamiento de osciladores no lineales, puede ser de interés para encriptación de señales (en el caso de régimen de emisión caótica) y para la reducción de ruido cuántico.

Universidad de Valencia

El grupo de Óptica Cuántica y Óptica no lineal del Departamento de Óptica se formó a finales de los años ochenta. La primera línea de investigación que se abordó fue en el campo de la dinámica no lineal de láseres, más en concreto, en la emisión autopulsante y caótica de láseres. Las contribuciones más interesantes de esta línea de investigación conciernen al estudio de la evolución dinámica en régimen no lineal de la fase del campo láser [48], la interpretación de las observaciones experimentales de emisión caótica en láseres de amoníaco, y el estudio teórico de la dinámica no lineal de láseres de cascada y dos fotones. También se llevaron a cabo contribuciones puntuales en el campo de la coherencia atómica, en particular, estudios sobre la influencia del atrapamiento coherente de población en la emisión de láseres bombeados ópticamente y en emisión láser sin inversión de población [49]. Desde 1993 esta línea de investigación se extendió al estudio de láseres Zeeman (en los que la polarización del campo juega un papel esencial), láseres con señal inyectada y láseres en cavidad Fabry-Perot [50].

A partir de 1995 este grupo amplía sus investigaciones al campo de la formación de estructuras disipativas en sistemas ópticos no lineales, y desde 1998 viene prestando atención al problema de la emisión multimodo longitudinal en láseres con cavidad en anillo. En este sentido se ha contribuido a la interpretación de los resultados experimentales obtenidos con láseres de fibra óptica dopada con erbio.

Universidad de Vigo

El Grupo de Fotónica y Comunicaciones de la ETS de Ingenieros de Telecomunicación ha trabajado en el contexto de láseres de semiconductor desde 1992. La investigación se centró en el diseño y simulación de estructuras de láseres de semiconductor basados en pozos cuánticos.

Las estructuras de pozo cuántico han permitido mejorar las características de los láseres de semiconductor, permitiendo una reducción de la corriente umbral, mayor ancho de banda de modulación, funcionamiento con potencias ópticas elevadas y bajo envejecimiento. Estas características han permitido el aumento del ancho de banda en los Sistemas de Comunicaciones ópticas.

Paralelamente al desarrollo experimental de las técnicas de fabricación de pozos cuánticos, se ha realizado un gran esfuerzo para explicar teóricamente las mejoras que han introducido estos dispositivos. La resolución de la ecuación de Schrödinger considerando los distintos acoplamientos entre las sub-bandas de energía que aparecen en un pozo cuántico fue una de las principales líneas desarrolladas por el grupo al principio de los 90. Los programas desarrollados y su aplicación a las estructuras de pozos cuánticos permitió describir la compleja estructura de sub-bandas que aparece en un pozo cuántico de semiconductor.

Otra línea de investigación desarrollada por el grupo consistió en la simulación de la ganancia óptica que se produce en un láser de semiconductor con pozos cuánticos al suministrarle una determinada corriente eléctrica. Los modelos desarrollados consideran una estructura genérica de pozos cuánticos descrita mediante un conjunto de sub-bandas y las distintas interacciones ópticas (descritas de forma semiclásica) que ocurren entre ellas. El resultado consistió en la simulación de láseres de pozos cuánticos interdifundidos, que permiten centrar la longitud de onda de emisión dentro de un rango amplio.

En la actualidad se está investigando en la línea del diseño, construcción y modelado de láseres pulsantes de fibra dopada, en colaboración con las Universidades de Santiago, Córdoba y Extremadura. Se está abordando el tema de los láseres en figura de ocho y los láseres en anillo. Estos tipos de láseres permiten obtener pulsos ópticos muy estrechos (del orden de pico y femtosegundos), que son candidatos para los futuros sistemas de Comunicaciones ópticas de alta velocidad.

Agradecimientos

Este artículo no habría sido posible sin la valiosa información que sobre las investigaciones de sus grupos me han suministrado Pedro González Díaz, Magna Santos, C. Nieves Afonso, J.M. Orza, Margarita Martín, M.L. Dotor, Maxi San Miguel, L. Pesquera, J.M. Guerra, A. Ureña, J. García Solé, I. Esquivias, Álvaro de Guzmán, H. Lamela, R. Corbalán, R. Vilaseca, Eugenio Roldán y Rafael Gómez Alcalá.

Bibliografía

- [1] P. GARCÍA-FERNÁNDEZ, F.J. BERMEJO BARRERA AND P.F. GONZÁLEZ-DÍAZ, "Quantum statistics of unimolecular multiphoton dissociation with absorption of uv radiation", *J. Mod. Optics* **34**, 429-442 (1987).
- [2] C.L. SIGUENZA, "Activation of the IRMD of CF₂HCl", *Chem. Phys. Lett.* **181**, 351-354 (1991).
- [3] C.L. SIGUENZA, S.A. SIMEONOV, L. DÍAZ AND P.F. GONZÁLEZ-DÍAZ, "Chemical reactions between CF₂HCl and NH₃ induced by IR double beam excitation", *Appl. Phys. B* **56**, 367-372 (1993).
- [4] J.A. TORRESANO, M.SANTOS, "One- and two-color infrared multiphoton dissociation of C₃F₆", *J. Phys. Chem. A*, 2221 (1997)
- [5] PRISCILA GARCÍA FERNÁNDEZ, J. BERMEJO, "Low noise properties of squeezed light in transmission chains", *Phys. Rev. A* **37**, 4490-3 (1987)
- [6] C. MIRASSO, P. COLET, PRISCILA GARCÍA, "Synchronization of chaotic semiconductor lasers: Application to encoded communications", *IEEE Phot. Tech. Lett.* **8**, 299-301 (1996)
- [7] M. CURTY, D. SANTOS, E. PÉREZ, PRISCILA GARCÍA, "Quantum message authentication", *Phys. Rev. A* **66**, 022301 (2002)
- [8] J. SOLÍS, C.N. AFONSO, S.C.W. HYDE, N.P. BARRY, P.M.W. FRENCH, "Existence of electronic excitation enhanced crystallization in GeSb amorphous thin films upon ultrashort laser pulse irradiation", *Phys. Rev. Lett.* **76**, 2519-22 (1996).
- [9] F.J. GORDILLO-VÁZQUEZ A. PEREA, J.A. CHAOS, J. GONZALO, C.N. AFONSO, "Temporal and spatial evolution of the electronic density and temperature of the plasma produced by laser ablation of LiNbO₃", *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 7-9 (2001)
- [10] J.M. BALLESTEROS, R. SERNA, J. SOLÍS, C.N. AFONSO, A.K. PETFORD-LONG, D.H. OSBORNE, R.F. HAGLUND Jr, "Pulsed laser deposition of Cu:Al₂O₃ nanocluster thin films with high third order nonlinear susceptibility", *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2445-7 (1997)
- [11] R. SERNA, M. JIMÉNEZ DE CASTRO, J.A. CHAOS, C.N. AFONSO, I. VICKRIDGE, "The role of Er³⁺-Er³⁺ separation on the luminescence of Er doped Al₂O₃ films prepared by pulsed laser deposition", *Appl. Phys. Lett.* **75**, 4073-5 (1999).
- [12] A. RAMOS, B. MATÉ, G. TEJEDA, J.M. FERNÁNDEZ, S. MONTERO, "Raman spectroscopy of hypersonic shockwaves", *Phys. Rev. E* **62**, 4940 (2000).
- [13] R.Z. MARTÍNEZ, D. BERMEJO, J. SANTOS, J.P. CHAMPION, J.C. HILICO, "High resolution Raman spectroscopy from vibrationally excited states populated

- by a stimulated Raman process $2\nu_1 - \nu_1$ of $^{12}\text{CH}_4$ ", *J. Chem. Phys.* **107**, 4864 (1997).
- [14] A. COSTELA, J.M. FIGUERA, M. MARTÍN, L. VALLE, "The photolysis wavelength in the CH_3I laser. Repetitive operation", *Chem. Phys. Lett.* **58**, 478-481 (1978).
- [15] A. COSTELA, I. GARCÍA-MORENO, J.M. FIGUERA, F. AMAT-GUERRI AND R. SASTRE, "Solid-state dye laser based on polymers incorporating covalently bonded modified rodamine 6G", *Appl. Phys. Lett.* **68**, 593-595 (1996).
- [16] M. CASTILLEJO, M. MARTÍN, M. OUJA, D. SILVA, R. TORRES, C. DOMINGO, J.V. GARCÍA-RAMOS AND S. SÁNCHEZ, "Spectroscopic analysis of pigments and binding media of polychromes by the combination of laser-based and vibrational techniques", *Appl. Spectrosc.* **55**, 992-998 (2001).
- [17] M.L. DOTOR, P. HUERTAS, J. MELÉNDEZ, A. MAZUELAS, M. GARRIGA, D. GOLMAYO, F. BRIONES, "Quantum well laser with single InAs monolayer in active region", *Elect. Lett.* **28**, 935-6 (1992).
- [18] C.R. MIRASSO, P. COLET, M. SAN MIGUEL, "Dependence of timing jitter on bias level for single-mode semiconductor lasers under high speed operation", *IEEE J. Quant. Electron.* **29**, 23-32 (1993).
- [19] S. DONATI, C. MIRASSO, eds., "Feature section on optical chaos and applications to cryptography", *IEEE J. Quant. Electron.* **38** (2002).
- [20] M. SAN MIGUEL, Q. FENG, V. MOLONEY, "Light polarization dynamics in semiconductor lasers", *Phys. Rev. A* **52**, 1728-39 (1995).
- [21] A. VALLE, F. MORENO, L. PESQUERA, F. GONZÁLEZ AND M.A. RODRÍGUEZ, "Switch-on time statistics of modulated gas lasers", *JOSA B* **12**, 2486-2493 (1995).
- [22] A. VALLE, "Selection and modulation of high order transverse modes in vertical-cavity surface-emitting lasers", *IEEE J. Quant. Electronics* **34**, 1924-1932 (1998).
- [23] A. VALLE, L. PESQUERA, "Turn-off transients in current modulated multi-transverse mode vertical-cavity surface-emitting lasers", *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3914-3916 (2001).
- [24] M. SÁNCHEZ BALMASADA, J.M. GUERRA, "Laser induced thermomagnetic detection of a metastable band in Bismuth", *Phys. Rev. B* **41**, 10372-10376 (1990).
- [25] V.M. PÉREZ-GARCÍA, J.M. GUERRA, "Weak turbulent behaviour and dynamical frequency locking in a high Fresnel number dye laser", *Phys. Rev. A* **50**, 1861-1867 (1994).
- [26] F. ENCINAS-SANZ, I. LEYVA, J.M. GUERRA, "Time resolved pattern evolution in a large aperture laser", *Phys. Rev. Lett.* **84**, 883-886 (2000).
- [27] J.O. CÁCERES, J. TORNERO LÓPEZ, A. GONZÁLEZ UREÑA, "Laser catalysis of acrylonitrile on copper surfaces", *Chem. Phys. Lett.* **321**, 349-55 (2000).
- [28] J.M. OREA, B. BESCOS, C. MONTERO, A. GONZÁLEZ UREÑA, "Analysis of carbendazim in agricultural samples by laser desorption and REMPI time-of-flight mass spectrometry", *Anal. Chem.* **70**, 491-97 (1998).
- [29] S. SKOWRONEK, J.B. JIMÉNEZ, A. GONZÁLEZ UREÑA, "Spectroscopy and dynamics of van der Waals reactions: The $\text{Ba}\dots\text{FCH}_3^+$ photofragmentation channels", *Chem. Phys. Lett.* **303**, 275 (1999).
- [30] E. MONTOYA, J. CAPMANY, L.E. BAUS, T. KELLNER, A. DIENING, G. HUBER, "Infrared and self-frequency doubling laser action in Yb^{3+} doped $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ ", *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3113 (1999).
- [31] D. JAQUE, J. CAPMANY, F. MOLERO, J. GARCÍA SOLÉ, "Blue-light laser source by sum-frequency mixing in $\text{Nd:YAl}_2(\text{BO}_3)_4$ ", *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3659 (1998).
- [32] J.J. ROMERO, D. JAQUE, J. GARCÍA SOLÉ, A.A. KAMINSKII, "Simultaneous generation of coherent light in the three fundamental colours by quasicylindrical ferroelectric domains in $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ", *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4106 (2002).
- [33] J.I. ESQUIVIAS, S. WEISSER, B. ROMERO, J.D. RALSTON, J. ROSENZWEIG, "Carrier dynamics and microwave characteristics of GaAs-based quantum-well laser", *IEEE J. Quant. Electron.* **35**, 635-646 (1999).
- [34] J. ARIAS, I. ESQUIVIAS, E.C. LARKINS, S. BURKNER, S. WEISSER, J. ROSENZWEIG, "Determination of the band offset and the characteristics inter-diffusion length in quantum well lasers using a capacitance-voltage technique", *Appl. Phys. Lett.* **76**, 776-778 (2000).
- [35] B. ROMERO, J. ARIAS, I. ESQUIVIAS, M. CADA, "Simple model for calculating the ratio of the carrier capture and escape times in quantum well lasers", *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1504-1506 (2000).
- [36] T. FLEISCHMANN, M. MORÁN, M. HOPKINSON, H. MEIDIA, J.G. REES, A.G. CULLIS, J.L. SÁNCHEZ-ROJAS, I. IZPURA, "Strained layer (111)B GaAs/InGaAs single quantum well lasers and the dependence of their characteristics upon indium composition", *J. Appl. Phys.* **89**, 4689-96 (2001).
- [37] M.A. SÁNCHEZ, F.B. NARANJO, J.L. PAU, A. JIMÉNEZ, E. CALLEJA, E. MUÑOZ, "Ultraviolet electroluminescence in GaN/AlGaIn single heterojunction light emitting diodes grown on Si(111)", *J. Appl. Phys.* **87**, 1569 (2000).
- [38] H. LAMELA, G. CARPINTERO, P. ACEDO, "Truncation on the Feigenbaum sequence in directly modulated semiconductor lasers", *IEEE J. Quant. Electron.* **34**, 491-6 (1998).
- [39] H. LAMELA, B. ROYCROFT, P. ACEDO, R. SANTOS, G. CARPINTERO, "Experimental modulation bandwidth beyond the relaxation oscillation frequency in a monolithic twin-ridge laterally coupled laser based on lateral mode locking", *Opt. Lett.* **27**, 303-5 (2002).
- [40] H. LAMELA, P. ACEDO, J. IRBY, "Laser interferometric experiments for the TJ-II stellerator electron density measurements", *Rev. Scient. Instrum.* **40**, 96-102 (2001).
- [41] C. SCHMIDT-IGLESIAS, L. ROSO, R. CORBALÁN, "Saturation spectroscopy in optically thick three-level gas media", *Opt. Lett.* **15**, 63-5 (1990).
- [42] F. LAGUARTA, G. MERKLE, J. HEPPNER, R. CORBALÁN, R. VILASECA, "Standing-wave forward-backward gain asymmetry in optically pumped gas lasers", *Phys. Rev. Lett.* **57**, 831-4 (1986).
- [43] A.N. PISARCHIK, R. CORBALÁN, "Stochastic resonance in a chaotic laser", *Phys. Rev. E* **58**, R2697-700 (1998).
- [44] J. MOMPART, R. CORBALÁN, L. ROSO, "Coherent population trapping in two-electron three-level systems with aligned spins", *Phys. Rev. Lett.* **88**, 23603-4 (2002).
- [45] J. MARTORELL, R. VILASECA, R. CORBALÁN, "Second harmonic generation in a photonic crystal", *Appl. Phys. Lett.* **70**, 702-4 (1997).
- [46] C. COJOCARU, J. MARTORELL, R. VILASECA, J. TRULL, "Active reflection via a phase-insensitive quadratic nonlinear interaction within a microcavity", *Appl. Phys. Lett.* **74**, 504-6 (1999).
- [47] R. VILASECA, M.C. TORRENT, J. GARCÍA-OJALVO, M. BRAMBILLA, M. SAN MIGUEL, "Two-photon cavity solitons in active optical media", *Phys. Rev. Lett.* **87**, 083902 (2001).
- [48] E. ROLDÁN, G.J. DE VALCÁRCCEL, R. VILASECA, P. MANDEL, "Single mode laser phase dynamics", *Phys. Rev. A* **48**, 591-8 (1993).
- [49] V.J. SÁNCHEZ-MORCILLO, E. ROLDÁN, G.J. DE VALCÁRCCEL, "Lasing without inversion via a self-pulsing instability", *Quant. Semicond. Opt.* **7**, 889-99 (1995).
- [50] E. ROLDÁN, G.J. DE VALCÁRCCEL, R. VILASECA, R. CORBALÁN, V.J. MARTÍNEZ, R. GILMORE, "The dynamics of optically pumped molecular lasers. On its relation with the Lorenz-Haken model", *Quant. Semicond. Opt.* **9**, R1-R35 (1997).

Priscila García Fernández

está en el Instituto de Óptica. CSIC. Madrid

El Planetario de Castellón convoca para el fin de semana del 11 al 13 de abril de 2003 una nueva cita para la divulgación y la enseñanza de la Astronomía. Este encuentro organizado por el Dr. Josep M^a. Trigo (Univ. Jaume I) invita a los más destacados profesionales para que presenten los últimos avances en el conocimiento del Cosmos. Además, son seleccionados para su exposición los trabajos *amateurs* de mayor interés tanto desde un punto de vista pedagógico como científico. Deseamos que el profesorado que imparte astronomía aporte también sus experiencias e inquietudes. En este sentido estos últimos, podrán tras su inscripción en el CEFIRE de Castellón (matescastello@centres.cult.gva.es), convalidar este encuentro como curso de formación.