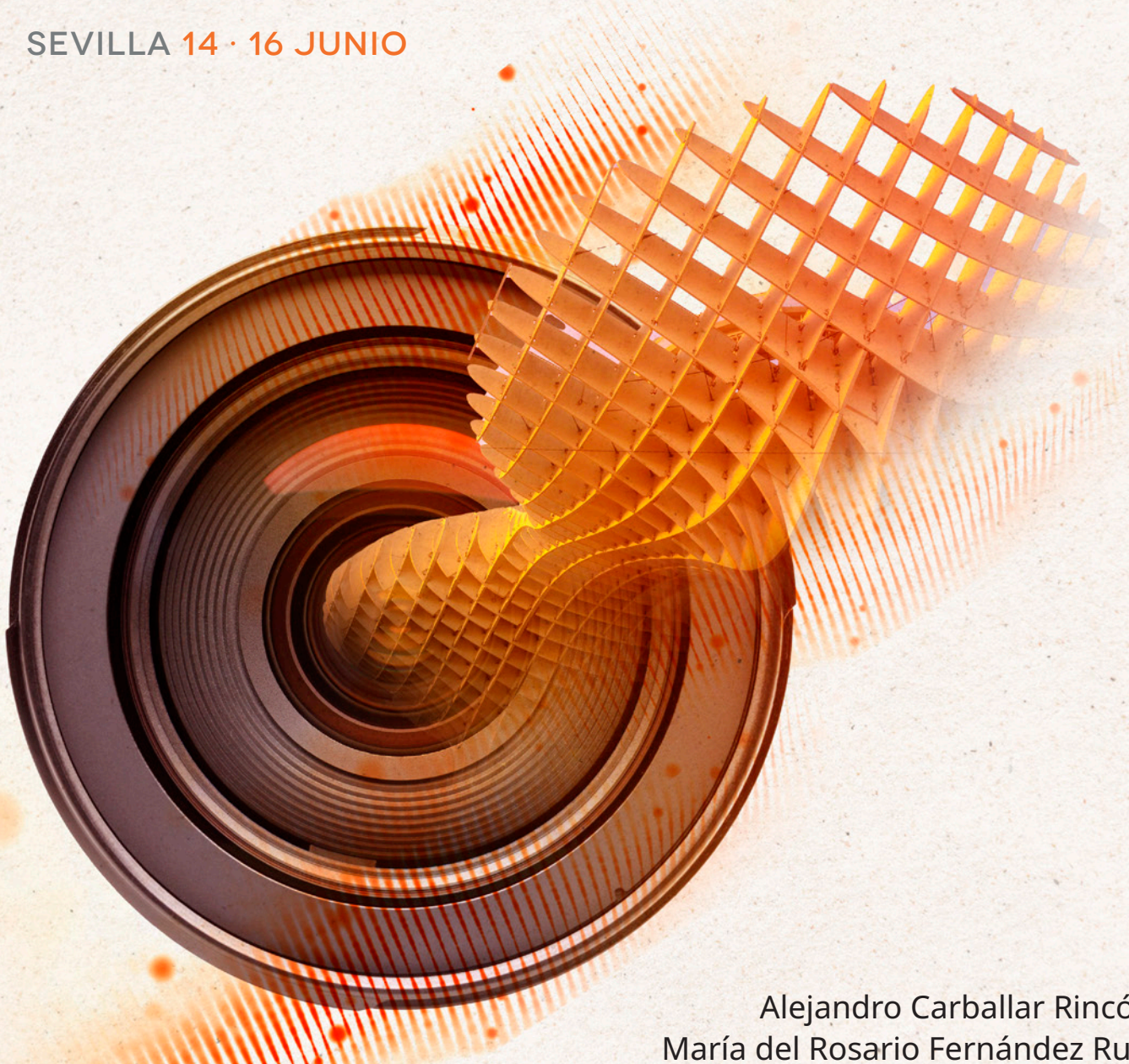


OPTOEL
2023

XIII REUNION OPTOELECTRONICA

SEVILLA 14 · 16 JUNIO

WWW.OPTOEL2023.ES



Alejandro Carballar Rincón
María del Rosario Fernández Ruiz
(coords.)

LIBRO DE ACTAS

CONECTANDO LA ACADEMIA Y LA INDUSTRIA

Editorial Universidad de Sevilla

Colección Actas
Núm.: 90

Comité editorial de
la Editorial Universidad de Sevilla:

Araceli López Serena
(Directora)
Elena Leal Abad
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda
Marina Ramos Serrano
José-Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

OPTOELECTRONICA
2023

XIII REUNION OPTOELECTRONICA
SEVILLA 14 · 16 JUNIO

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

© Editorial Universidad de Sevilla 2024
c/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: info-eus@us.es
Web: <https://editorial.us.es>

© Alejandro Carballar Rincón y
María del Rosario Fernández Ruiz (coords.) 2024

© De los textos, los autores 2024

Diseño de interior y cubierta: Viajes El Corte Inglés - Congresos

DOI: <https://dx.doi.org/10.12795/9788447225507>

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	4
COMITÉS	6
SEDE Y LOGÍSTICA	9
EMPRESAS PARTICIPANTES	11
LOCALIZACIÓN DE PATROCINADORES, EXPOSITORES Y COLABORADORES	12
PONENTES INVITADOS	13
PROGRAMA DETALLADO	14
MIÉRCOLES	15
JUEVES	20
VIERNES	26
PREMIOS A ESTUDIANTES	31
COMUNICACIONES	38
01. EMISORES, DETECTORES Y AMPLIFICADORES DE RADIACIÓN ÓPTICA (INCLUIDOS LOS THz)	
02. DISPOSITIVOS ÓPTICOS Y ELECTROÓPTICOS PARA PROCESADO ÓPTICO DE SEÑAL (INCLUYENDO IMAGEN)	
03. FIBRA ÓPTICA: TECNOLOGÍA DE FIBRAS Y CABLES: MULTIPLEXACIÓN ESPACIAL, FIBRAS ESPECIALES	
04. MICRO-ÓPTICA Y ÓPTICA INTEGRADA: TECNOLOGÍA Y DISPOSITIVOS PARA CIRCUITOS FOTÓNICOS INTEGRADOS	
05. ÓPTICA NO-LINEAL Y ÓPTICA CUÁNTICA	
06. SENSORES, METROLOGÍA Y ESTÁNDARES	
07. COMUNICACIONES ÓPTICAS. REDES, SISTEMAS Y SUBSISTEMAS	
08. BIOFOTÓNICA. FOTÓNICA APLICADA A LOS MATERIALES BIOLÓGICOS Y LA MEDICINA	
09. LÁSERES: SUS APLICACIONES INDUSTRIALES, MÉDICAS Y DE PROCESADO DE MATERIALES	
10. INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA A LA FOTÓNICA	
12. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA FOTÓNICA	
13. NUEVAS TEORÍAS, EFECTOS, TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS PARA LA FOTÓNICA	
DATOS GENERALES	443

AGRADECIMIENTOS

Estimado participante:

Gracias por tu asistencia a la XIII edición de la Reunión Española de Optoelectrónica (OPTOEL). En Sevilla, durante los días del 15 al 16 de junio de 2023, hemos podido explorar juntos los últimos desarrollos en el campo de la fotónica y la optoelectrónica realizados en nuestro país.

Durante estos tres días, hemos tenido la oportunidad de intercambiar ideas y aprender sobre los últimos avances científicos e industriales en nuestro ámbito de investigación.

Como en ediciones anteriores, la reunión ha contado con presentaciones invitadas, exhibiciones y charlas técnicas por parte de las empresas participantes, así como sesiones de pósteres para las comunicaciones recibidas por parte de la comunidad científica. Este año, además, hemos seguido el lema **“Conectando la Academia y la Industria”**, y hemos contado con novedades como la celebración de un **Foro de Innovación**, en el que se ha pretendido fomentar la colaboración academia-industria, generando consorcios para proyectos que resuelvan retos específicos de la industria, y un **Foro de Talento**, donde se ha promovido una dinámica feria de empleo para conectar ofertas de la industria con candidaturas de talento emergente por parte de las universidades.

En este apartado, nos gustaría también agradecer a nuestros patrocinadores, expositores y colaboradores su valiosa contribución, sin la cual este evento no hubiera sido posible.

Esperamos que estas jornadas hayan resultado muy fructíferas, agradables, y hayan cubierto vuestras expectativas.

Recibe un cordial saludo,

Alejandro CARBALLAR RINCÓN
María Rosario FERNÁNDEZ RUIZ

Comité Organizador de la OPTOEL 2023



XIII REUNION OPTOELECTRONICA
SEVILLA
14 · 16 JUNIO

ORGANIZADORES



COLABORADORES



COMITÉS

COMITÉ ORGANIZADOR

Presidente



ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN
Universidad de Sevilla

Vicepresidenta

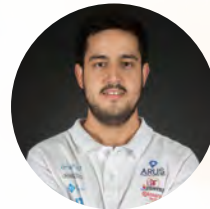


MARÍA DEL ROSARIO FERNÁNDEZ
Universidad de Alcalá de Henares

Secretaría Técnica



FRANCISCO COLODRO RUIZ
Universidad de Sevilla



RUBÉN TINOCO DE SOTO
Universidad de Sevilla



JOSÉ ÁNGEL PRAENA RODRÍGUEZ
Universidad Pablo de Olavide

COMITÉS

COMITÉ ORGANIZADOR

Vocales



JAVIER MATEO GASCÓN
Universidad de Zaragoza



SANTIAGO ROYO ROYO
Universidad Politécnica de Cataluña



JOSÉ ANTONIO LÁZARO VILLA
Universidad Politécnica de Cataluña



SERGIO SÁEZ
SECPHO

COMITÉ CIENTÍFICO

Presidente:

JOSÉ ANTONIO LÁZARO VILLA
Universidad Politécnica de Cataluña

Vicepresidente:

ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN
Universidad de Sevilla

Secretario:

SANTIAGO ROYO ROYO
Universidad Politécnica de Cataluña

Vocales:

MARÍA TERESA FLORES ARIAS – Universidad de Santiago de Compostela
MIGUEL VICENTE ANDRÉS BOU – Universidad de Valencia
ANTONIO DÍEZ CREMADES – Universidad de Valencia
PEDRO CORREDERA GUILLÉN – Instituto de Óptica, CSIC
JUAN DIEGO ANIA CASTAÑÓN – Instituto de Óptica, CSIC
ADOLFO COBO GARCÍA – Universidad de Cantabria
ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN – Universidad de Sevilla
ANTONIO PUERTA NOTARIO – Universidad de Málaga
AUGUSTO BELÉNDEZ VÁZQUEZ – Universidad de Alicante
CARMEN VÁZQUEZ GARCÍA – Universidad Carlos III de Madrid
FRANCISCO JAVIER FRAILE PELÁEZ – Universidad de Vigo
GABRIEL JUNYENT GIRALT – Universidad Politècnica de Catalunya
IGNACIO MATÍAS MAESTRO – Universidad Pública de Navarra
IGNACIO MORENO SORIANO – Universidad Miguel Hernández de Elche
IÑIGO MOLINA FERNÁNDEZ – Universidad de Málaga
JAVIER MARTÍ SENDRA – Universidad Politècnica de Valencia
JOSÉ ANTONIO MARTÍN PEREDA – Universidad Politècnica de Madrid
JOSEBA ZUBIA ZABALLA – Universidad del País Vasco
JOSÉ GONZALO DE LOS REYES – Instituto de Óptica, CSIC
JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ PENA – Universidad Carlos III de Madrid
JOSÉ MIGUEL LÓPEZ-HIGUERA – Universidad de Cantabria
JOSÉ MANUEL OTÓN SÁNCHEZ – Universidad Politècnica de Madrid
JUAN ANTONIO VALLÉS BRAU – Universidad de Zaragoza
MANUEL LOPEZ-AMO – Universidad Pública de Navarra
MANUEL JOAQUIM BASTOS MARQUÉS – Universidad do Porto, Portugal
JUAN IGNACIO GARCÉS GREGORIO – Universidad de Zaragoza
MIGUEL ANGEL REBOLLEDO SANZ – Universidad de Zaragoza
MIGUEL GONZÁLEZ HERRÁEZ – Universidad de Alcalá de Henares
RAFAEL PÉREZ JIMÉNEZ – Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
XABIER QUINTANA ARREGU – Universidad Politècnica de Madrid
JOSÉ ANTONIO LÁZARO VILLA – Universidad Politècnica de Catalunya
MARÍA DEL CARMEN BAO VARELA – Universidad de Santiago de Compostela
JAVIER MATEO GASCÓN – Universidad de Zaragoza
SANTIAGO ROYO ROYO, Universidad Politècnica de Catalunya
ENRIQUE CARRETERO CHAMARRO – Universidad de Zaragoza
OSCAR ESTEBAN MARTÍNEZ – Universidad de Alcalá de Henares
IGNACIO ESQUIVIAS MOSCARDÓ – Universidad Politècnica de Madrid
MARTINA DELGADO PINAR – Universidad de Valencia
SALVADOR SALES MAICAS – Universidad Politècnica de Valencia
SANTIAGO MIGUEL OLAIZOLA – CEIT Universidad de Navarra

SEDE Y LOGÍSTICA

La OPTOEL 2023 ha tenido lugar en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSi) de la Universidad de Sevilla. El edificio de la ETSi es el antiguo pabellón Plaza de América de la Expo'92, sede de la mayoría de países sudamericanos durante el evento.

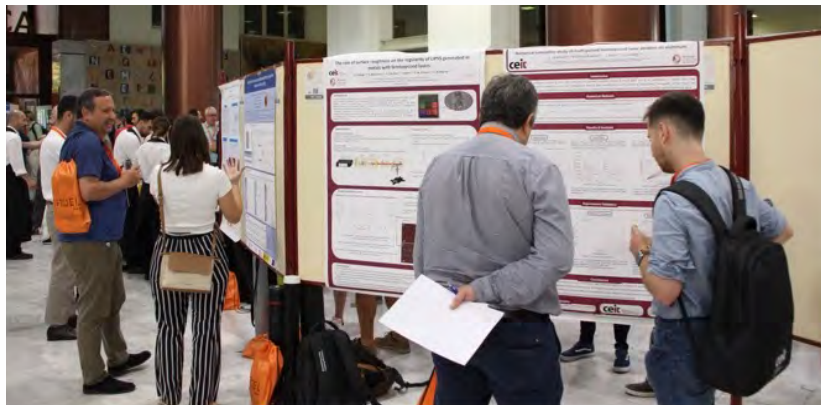
 *E. T. S. de Ingeniería de la Universidad de Sevilla
C/ Camino de los Descubrimientos, s/n - 41092 Sevilla*



Sede E.T.S. de Ingeniería de la US



Salón de Actos - Conferencias plenarias y de empresas



Hall de la ETSi - Zona de pósteres, exposición de empresas y catering



Acceso a red inalámbrica de la Universidad de Sevilla (a través del SSID: reinus-web) con los siguientes usuario y contraseña:

Usuario: **Eventos_OPTOEL2023**

Contraseña: **OPTOEL.2023**

EMPRESAS PARTICIPANTES

PATROCINADORES



EXPOSITORES

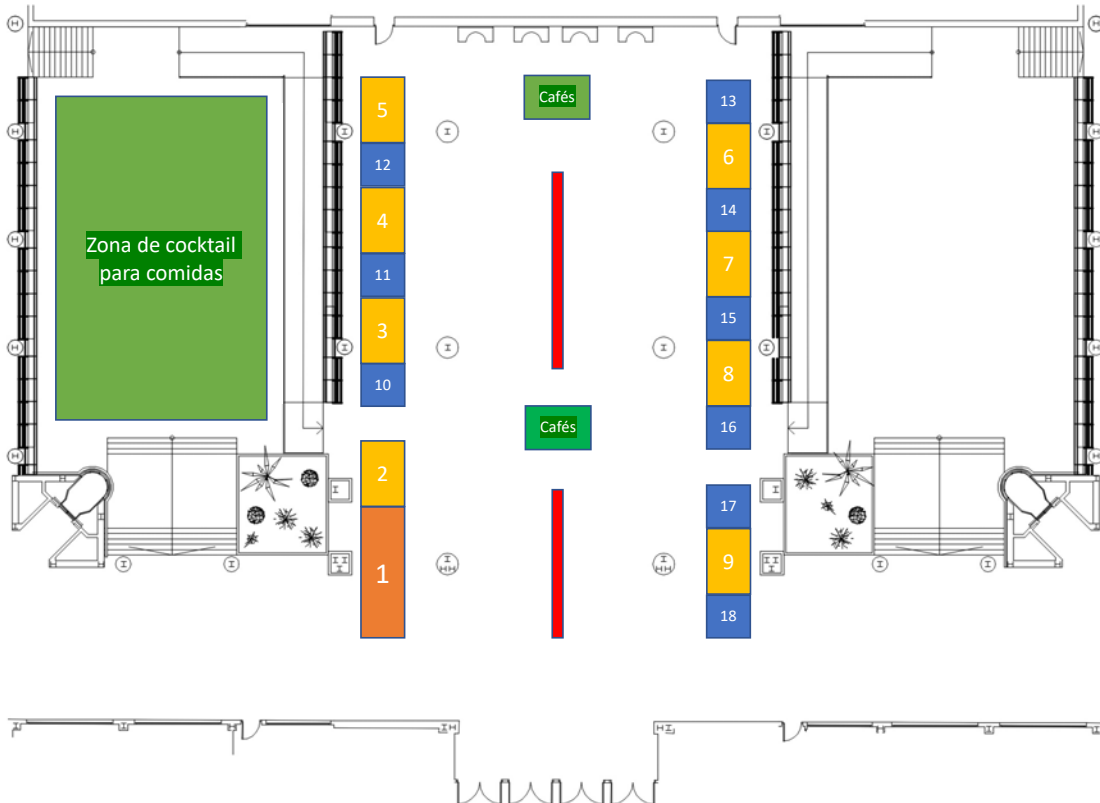


COLABORADORES



**LOCALIZACIÓN DE PATROCINADORES, EXPOSITORES
Y COLABORADORES:**

Planta Baja de la E.T.S. de Ingeniería de la Universidad de Sevilla



- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1. Fibercom /EXFO | 10. ZEPREN Solutions |
| 2. Aragon Photonics Labs | 11. FYLA Laser |
| 3. PROLITE | 12. LASING |
| 4. PIMICOS | 13. Procareligh |
| 5. IBEROPTICS | 14. Fotonica 21 |
| 6. SECPHO | 15. IMB-CNM |
| 7. Bioherent | 16. Hamamatsu |
| 8. AMS Technologies | 17. VLC Photonics |
| 9. ALTER | 18. MTB |

PONENTES INVITADOS

La OPTOEL2023 ha contado con la participación de 5 expertos en optoelectrónica y fotónica españoles que desarrollan su labor profesional fuera de nuestras fronteras. Dichos ponentes desarrollan su labor en institutos de investigación, en organizaciones científico-técnicas, en grandes empresas del sector, en Universidades, y/o en la gestión tecnológica-empresarial de nuevas empresas emergentes en nuestro campo.

Vicente Calvo Alonso

COMPTEK SOLUTIONS, FINLANDIA

- **Comptek Solutions, de concepto universitario a empresa tecnológica.**



Andrea Blanco Redondo

CREOL - THE COLLEGE OF OPTICS & PHOTONICS, USA

- **Robust nonlinear and topological quantum photonics.**



Fernando Muñoz Fernández

HUAWEI, ALEMANIA

- **Huawei's R&D on Optical Applications: Intelligent Automotive Solutions.**



José Azaña Luna

INRS-EMT, CANADA

- **Photonic signal processing for classical and quantum applications.**



Sonia García Blanco

ALUVIA - UNIVERSITY OF TWENTE, PAISES BAJOS

- **Aluvia Photonics: from academic research to a commercial integrated photonics platform.**



PROGRAMA DETALLADO

	MIÉRCOLES 14 JUNIO	JUEVES 15 JUNIO	VIERNES 16 JUNIO
09:00-09:30	RECOGIDA DE ACREDITACIONES Y DOCUMENTACIÓN	CONFERENCIA INVITADA 3 SONIA GARCÍA BLANCO, UNIVERSITY OF TWENTE + ALUVIA (PAISES BAJOS)	CONFERENCIA INVITADA 5 JOSÉ AZAÑA LUNA, INRS-EMT (CANADA)
09:30-10:00	SESIÓN APERTURA (SALÓN DE ACTOS - ETSI)		
10:00-10:30	CONFERENCIA INVITADA 1 ANDREA BLANCO REDONDO, CREOL (USA)	CHARLAS TÉCNICAS 2 (ZEPREN SOLUTIONS, ALTER, FYLA LASER, AMS TECHNOLOGIES, LASING, BIOHERENT)	CHARLAS TÉCNICAS 4 (IBEROPTICS, IMB-CNM, PIMICOS)
10:30-11:00			SESIÓN PÓSTERES 3 ÁREAS TEMÁTICAS 04.MIC; 08.BIO; 10.IAF; 12.IND.
11:00-11:30	CHARLAS TÉCNICAS 1 (FIBERCOM-EXFO)	SESIÓN PÓSTERES 2 ÁREAS TEMÁTICAS 03.FIB; 06.SEN; 07.COM.	
11:30-12:00			CHARLAS TÉCNICAS 5 (HAMAMATSU, PRO-LITE, VLC PHOTONICS, MTB, ARAGON PHOTONICS)
12:00-12:30	SESIÓN PÓSTERES 1 ÁREAS TEMÁTICAS 01.EMI; 02.DIS; 05.ONL; 09.LAS; 13.FOT.	CHARLAS TÉCNICAS 3 (PROCARELIGHT, SECPHO, FOTONICA21)	
12:30-13:00			
13:00-13:30	CONFERENCIA INVITADA 2 FERNANDO MUÑOZ FERNÁNDEZ, HUAWEI (ALEMANIA)	CONFERENCIA INVITADA 4 VICENTE CALVO ALONSO, COMPTTEK SOLUTIONS (FINLANDIA)	ENTREGA PREMIOS Y CLAUSURA
13:30-14:00			
14:00-14:30	PAUSA COMIDA		COCKTAIL DESPEDIDA MAESTRO CORTADOR DE JAMÓN IBÉRICO BELLOTA 100% VINO MANZANILLA
15:00-15:30			
15:30-16:00	FORO DE INNOVACIÓN	FORO DE TALENTO	
16:00-16:30	RETOS DE INNOVACIÓN POR PARTE DE EMPRESAS EN:	CHARLAS DE CARMEN VÁZQUEZ Y BÁRBARA BUADES	
16:30-17:00	SENSORES ÓPTICOS, COMUNICACIONES ÓPTICAS, SISTEMAS LÁSER, Y FOTÓNICA INTEGRADA	OFERTAS DE EMPLEO DE EMPRESAS Y CVS DEL ÁREA JOVEN DE SEDOPTICA	
17:00-17:30		ENTREVISTAS ENTRE EMPRESAS Y CANDIDATOS CON PERFILES SOLICITADOS	(ASAMBLEA DEL COMITÉ DE OPTOELECTRÓNICA DE SEDOPTICA)
17:30-18:00			
18:00-20:00			
20:00-21:30	RECEPCIÓN DE BIENVENIDA PATIOS DEL RECTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA		
21:30-00:00		CENA DE GALA RESTAURANTE ABADES TRIANA (ABADESTRIANA.COM)	

PROGRAMA DETALLADO

MIÉRCOLES, 14 DE JUNIO

9:00 - 9:30 Recogida de Acreditaciones y Documentación.
Hall central

9:30 - 10:00 Sesión de Apertura.
Salón de Actos

10:00 - 11:00 Conferencia invitada 1.
Salón de Actos

Andrea Blanco Redondo
CREOL - The College of Optics & Photonics, USA



Robust nonlinear and topological quantum photonics

In this talk we will discuss how to engineer the dispersion relation of photonic platforms to provide robust propagation of classical and quantum states of light. In the first part, we will unveil how to leverage the interaction of nonlinearity with higher orders of dispersion to create novel types of solitons, wave packets that propagate unperturbed for long distances. These objects have advantageous energy-width scaling laws with respect to conventional nonlinear Schrodinger solitons and show promise for applications in ultrafast lasers and integrated frequency combs. Subsequently, we will cover recent developments in topological quantum photonics. Topological photonics studies topological phases of light and leverages the appearance of robust topological edge states. We will emphasize our experimental demonstration of nonlinearly generated and topologically protected photon pairs and path-entangled biphoton states in silicon waveguide arrays. Further, we will detail our latest experiments demonstrating entanglement between topologically distinct modes, highlighting topology as an entanglement degree of freedom.



Charlas Técnicas 1.
Salón de Actos

Fausto GOMEZ-AGIS, PhD
FIBERCOM - EXFO

How EXFO can support PIC-Testing With Cutting-Edge Technologies?

MIÉRCOLES, 14 DE JUNIO

11:30 - 13:00 Sesión de Pósteres 1.
Hall de la ETSi

Los trabajos de estudiantes han optado al premio **Carlos Gómez-Reino** patrocinado por la empresa RADIANTIS.

EMI 01. Emisores, detectores y amplificadores de radiación óptica (incluidos los THz)

SP1.EMI01 Células solares de nanocolumnas de nitruro de indio sobre silicio amorfo depositadas por pulverización catódica.

Michael Sun, Rubén G. Cornejo, J. Olea, Sirona Valdueza-Felip, Fernando B. Naranjo.

SP1.EMI02 Densificación electroóptica de alta densidad de peines de frecuencias ópticas generados por láseres semiconductores de conmutación de ganancia inyectados ópticamente.

Alejandro Rosado, María R. Fernández-Ruiz, Pedro Corredera, Jose Manuel Tijero, Ignacio Esquivias.

SP1.EMI03 Detección de chirps en láseres con realimentación de frecuencia desplazada.

Miguel Cuenca, Haroldo Maestre, Germán Torregrosa, Carlos R. Fernández-Pousa.

DIS 02. Dispositivos ópticos y electroópticos para procesado óptico de señal (incluyendo imagen)

SP1.DIS01 Desarrollo de una cámara hiperespectral basada en un filtro de espectro óptico lineal variable.

Leyre Larraya, Enrique Carretero, Carlos Heras.

SP1.DIS02 Full complex modulation using distance-based Iterative Fourier Transform Algorithm.

Angela Soria-García, Luis Miguel Sanchez-Brea, Joaquin Andres-Porras, Jesus Del Hoyo, Veronica Pastor-Villarrubia, Javier Alda.

SP1.DIS03 Implementation of triplicator diffraction gratings in a pixelated display.

Shang Gao, María Del Mar Sánchez-López, Ignacio Moreno.

SP1.DIS04 Reconfigurable liquid crystal devices for light handling.

Javier Pereiro-García, Olga Blanco-Fernández, Rafael Ramos, Morten A. Geday, Xabier Quintana, Manuel Caño-García.

MIÉRCOLES, 14 DE JUNIO

ONL 05. Óptica no-lineal y Óptica cuántica

SP1.ONL01 Descomposición en valores singulares, interferencia cuántica y divisores de potencia Wilkinson.

Osmerly Hernández, Angel Ortega-Gomez, Iñigo Liberal.

SP1.ONL02 Estudio del chirp en solitones disipativos en láseres de fibra con anclado de modos pasivo en configuración de anillo ultralargo en el rango de los femtosegundos.

Inés Cáceres, Alejandro Rosado, Juan Diego Ania.

SP1.ONL03 Modeling metal nonlinearities for FDTD simulation of plasmonic devices.

José Ramón Salgueiro, Albert Ferrando.

SP1.ONL04 Preservation of biphoton quantum coherence in frequency up-conversion using gas-filled hollow-core fibres.

Arturo Mena, Joseba Zubia, David Novoa.

LAS 09. Láseres: sus aplicaciones industriales, médicas y de procesamiento de materiales

SP1.LAS01 Guías de onda superficiales con perfil modal optimizado para aplicaciones de detección en Nd:YAG: diseño y fabricación con pulsos láser de femtosegundos.

Víctor Arroyo, Carolina Romero, Javier R. Vázquez De Aldana.

SP1.LAS02 High-frequency photothermal processing of commercial polymers under femtosecond laser irradiation for waveguide writing.

Andrés P. Bernabeu, Daniel Puerto, F. Javier Martínez-Guardiola, Guillem Nájjar, Alberto Ruiz, Manuel G. Ramírez, Sergi Gallego, Andrés Márquez, Inmaculada Pascual, Augusto Beléndez.

SP1.LAS03 Numerical simulation study of multi-pulsed femtosecond laser.

Luis Omeñaca, Mikel Gómez, Isabel Ayerdi, Enrique Castaño.

SP1.LAS04 The role of surface roughness on the regularity of LIPSS generated in metals with femtosecond lasers.

Diego Gallego, Oihane Beldarrain, Alejandro San-Blas, Isabel Ayerdi, Santiago M. Olaizola, Ainara Rodriguez.

MIÉRCOLES, 14 DE JUNIO

- FOT** **13. Nuevas teorías, efectos, técnicas y tecnologías para la fotónica**
- SP1.FOT01** **Caracterización de ventanas con doble acristalamiento y Superficies Selectivas en Frecuencia (FSS).**
Rocio Chueca, Raul Alcain, Carlos D. Heras, Iñigo Salinas.
- SP1.FOT02** **Finite energy Airy surface-plasmon polaritons at a lossy interface.**
Rosario Martínez-Herrero, Javier Hernández-Rueda.
- SP1.FOT03** **Inferencia Bayesiana aplicada a simulaciones numéricas de polarimetría Mueller Full Poincaré.**
Juan Carlos Suárez, Javier Gorgas, Sergio Pascual, Juan Carlos G. De Sande, Massimo Santarsiero, Gemma Piquero.
- SP1.FOT04** **Light switch based on a nanoparticle chain and on the opto-mechanically generated field enhancement.**
Alicia Fresno-Hernández, Manuel Ignacio Marqués, Carmen Vázquez.
- SP1.FOT05** **Nonplanar partially coherent sources.**
Juan Carlos G. De Sande, Massimo Santarsiero, Rosario Martínez-Herrero, Gemma Piquero, Olga Korotkova, Franco Gori.
- SP1.FOT06** **Validación del modelo de índice efectivo como alternativa viable en el diseño de metasuperficies.**
Pablo A. Sánchez, Óscar Esteban, Mahmoud H. Elshorbagy, Alexander Cuadrado, Javier Alda.

13:00 - 14:00 Conferencia invitada 2.
Salón de Actos

Fernando Muñoz Fernández
HUAWEI, Alemania



Huawei's R&D on Optical Applications: Intelligent Automotive Solutions.

As digital technologies are widely adopted and carbon neutrality has become a globally recognized mission, it is becoming an obvious trend that vehicles will become more electric and intelligent. Bringing digital to every vehicle will empower intelligent driving, intelligent spaces, intelligent services, and intelligent operations. This will allow for safer and more efficient transportation, greener and more convenient travel, more fun and intelligent lifestyles, and more efficient and lower-carbon operations. Huawei hopes to bring its decades of ICT expertise to the automotive industry as a provider of new components for intelligent connected vehicles. As vehicles become more electric and intelligent, Huawei wants to help carmakers build better vehicles. This presentation shows Huawei's Intelligent Automotive Solutions.

MIÉRCOLES, 14 DE JUNIO

14:00 - 15:30 Comida.
Hall de la ETSi

15:30 - 18:00 Foro de Innovación.

El objetivo de este Foro ha sido generar proyectos de innovación colaborativos entre las empresas asistentes del sector industrial, proyectos en los que las tecnologías Deep Tech suponen un potente foco de innovación.

Para ello, se han abordado varios retos y la dinámica ha estado enfocada en generar debates útiles y centrada en problemáticas concretas, de manera que se impulse la colaboración entre los asistentes.

Retos de Innovación:

Coordinadores:

Sergio Sáez, *Clúster Manager de SECPHO.*

Rosa Sánchez, *Innovation Manager de SECPHO.*

20:00 - 00:00 Recepción de Bienvenida.
Patios del Rectorado de la Universidad de Sevilla

JUEVES, 15 DE JUNIO

9:00 - 10:00 Conferencia invitada 3.
Salón de Actos

Sonia García Blanco
ALUVIA, University of Twente



Aluvia Photonics: from academic research to a commercial integrated photonics platform.

In this talk we will describe the journey from research on a new photonic integrated circuit platform, the aluminium oxide platform, to its commercialization via the creation of a spin-off company, Aluvia Photonics.

10:00 - 11:00 Charlas Técnicas 2.
Salón de Actos



Asier Villafranca
Zepren Solutions

Estrategias de desarrollo de producto innovador.



Enrique Cordero
ALTER

Montaje y test de componentes opto-electrónicos para aplicaciones aero-espaciales, enfoque de ALTER Technology.



Héctor Muñoz
FYLA Laser

Ultrafast Fiber Lasers In Smart Manufacturing.



Por concretar
AMS Technologies

Presentación a cargo de AMS Technologies.



Por concretar
LASING

Presentación a cargo de LASING.



Jonas Leuermann
Bioherent

Ultra Sensitive Photonic Biosensors on a Chip.

JUEVES, 15 DE JUNIO

11:00 - 12:30 Sesión de Pósteres 2.
Hall de la ETSi

Los trabajos de estudiantes han optado al premio **Francisco Villuendas** patrocinado por la empresa FIBERCOM.

FIB **03. Fibra óptica: Tecnología de fibras y cables: multiplexación espacial, fibras especiales**

SP2.FIB01 **Analysis of the frequency response of a dynamically modulated, high Q, optical fiber ring resonator.**

Anna I. Garrigues-Navarro, Luis A. Sánchez, Martina Delgado-Pinar, Antonio Díez, Miguel V. Andrés.

SP2.FIB02 **Sensor de impacto de baja energía basado en un interferómetro supermodal y una red de Bragg.**

Montserrat Alonso-Murias, David Monzón-Hernández, Joseba Zubia, Joel Villatoro.

SP2.FIB03 **Measurement of the UV-induced radius decrease in a silica fiber by means of optic and acoustic resonances.**

Juan Julián-Barriel, Luis A. Sanchez, Martina Delgado-Pinar, Jose Luis Cruz, Antonio Díez, Miguel V. Andrés.

SP2.FIB04 **Monitorización dinámica de la curvatura utilizando Φ OTDR de tiempo expandido.**

Camilo Escobar-Vera, Miguel Soriano-Amat, Hugo F. Martins, David Barrera, Sonia Martin-Lopez, Miguel Gonzalez-Herraez, María R. Fernandez-Ruiz.

SP2.FIB05 **Optimización del corte de fibras ópticas microestructuradas de plástico (mPOF) con estructura de anillos hexagonales.**

David Sánchez Montero, Alberto Tapetado, Óskar Arrizabalaga, Pedro L. Carro, Carmen Vázquez.

SP2.FIB06 **Self-compression of ultrafast near-ultraviolet light in ultrathin-walled hollow-core fibres.**

David Novoa, Jie Luan, Philip St. J. Russell.

SP2.FIB07 **Discriminación de tejidos sanos sin etiquetar mediante microscopía óptica de contraste de fase cuantitativa.**

José Luis Ganoza Quintana, José Luis Arce Diego, Félix Fanjul Vélez.

JUEVES, 15 DE JUNIO

SEN 06. Sensores, metrología y estándares

SP2.SEN01 Caracterización de un sistema de imagen LiDAR circularmente polarizado en una cámara de niebla.

Maria Ballesta-Garcia, Ana Rodríguez-Aramendía, Pablo García Gómez, Noel Rodrigo, Santiago Royo.

SP2.SEN02 Dual-parameter fiber-optic sensor with a cascaded FPI and FBG for pressure and temperature measurements.

Valeria HERNÁNDEZ-AMBATO, Bryan SANIPATIN, Daniel Maldonado Hurtado, Javier Madrigal, David Barrera, Salvador Sales.

SP2.SEN03 Estrategias de desenrollado de fase para metrología de retardadores variables.

Adriana R. Sánchez-Montes, Fco. J. Martínez-Guardiola, Andrés Márquez, Jorge Francés, Sergi Gallego, Inmaculada Pascual, Augusto Beléndez.

SP2.SEN04 Interrogador phi-OTDR de tiempo expandido espectralmente eficiente con resolución espacial milimétrica.

Miguel Soriano-Amat, Philippe Guay, Hugo. F. Martins, Sonia Martin Lopez, Miguel Gonzalez-Herraez, Jerome Genest, María R. Fernández Ruiz.

SP2.SEN05 Low-cost energy-harvesting hybrid radiofrequency - visible light positioning system based on flexible perovskite photovoltaic cells for indoor positioning.

Carlos Iván Del Valle Morales, Juan C. Torres Zafra, Iñaki Martinez-Sarriegui, Kaisa-Leena Väisänen, Riikka Suhonen, Randy Lozada Domínguez, Juan S. Betancourt Perlaza, José Manuel Sánchez Pena.

SP2.SEN06 Medida del eje rápido de un retardador mediante el uso de un interferómetro de Michelson.

Joaquin Andres-Porras, Jesus Del Hoyo, Angela Soria-Garcia, Luis Miguel Sanchez-Brea, Veronica Pastor-Villarrubia, Javier Alda.

SP2.SEN07 Método teórico para el diseño de sensores de desplazamiento de fibra óptica bifurcados.

Gorka Zubia, Gaizka Durana, Josu Amorebieta, Gotzon Aldabaldetrekue, Joseba Zubia.

SP2.SEN08 Monitorización de la flecha en líneas de alta tensión mediante Φ OTDR con pulsos chirpeados.

Jorge Canudo, Pascual Sevillano, Andrea Iranzo, Sacha Kwik, Javier Preciado-Garbayo, Jesús Subías.

SP2.SEN09 Pirheliómetro basado en fibra óptica y fotodiodo semiconductor.

Roberto Rodríguez-Garrido, Alejandro Carballar, Jonathan Vera.

JUEVES, 15 DE JUNIO

SP2.SEN10 Polarímetro de imagen para la medida del vector completo de Stokes y de la matriz de Mueller en el rango del visible.

Sara Peña Gutiérrez, Maria Ballesta García, Santiago Royo.

SP2.SEN11 Pseudo random phase modulation coherent lidar.

Diego Domínguez-Castillejo, Clara Quevedo-Galán, Pablo López-Querol, Antonio Pérez-Serrano.

SP2.SEN12 Redes de Bragg en fibras ópticas recubiertas con níquel para implementación de sensores de corriente.

Hector García Miquel, Javier Madrigal Madrigal, Lorena Cebrián Saiz, Salvador Sales Maicas.

SP2.SEN13 The gradient-phase interferometer: a novel interferometer for precise segment phasing in the primary mirror of the eso extremely large telescope (e-elt).

Gaizka Murga, Alexander Díaz, Rubén Sanquirce, Santiago Royo, Maialen González, Elena Lara, Borja Vega, Noel Rodrigo, Pau Santos, Andreas Förster, Sebastian Schmid, Samuel Lévêque, Philippe Gitton, Giorgio Filippi.

SP2.SEN14 Ultra-high resolution dual comb spectroscopy based on gain-switching optical frequency combs.

Clara Quevedo-Galán, Alejandro Rosado, Laura Monroy, Pablo López-Querol, Antonio Pérez-Serrano, José Manuel G. Tijero, Ignacio Esquivias.

SP2.SEN15 ZIF-8 based Fabry-Pérot interferences for VOC detection.

Anna Estany-Macià, Sachin Navale, Ignasi Fort-Grandas, Nirav Yoshi, Albert Romano-Rodríguez, Mauricio Moreno-Sereno.

SP2.SEN16 Integrando sensores de fibra óptica de plástico en estructuras de composites reforzados con fibra de carbono.

Fco. Rogelio Palomo, Soledad Molina.

SP2.SEN17 Análisis espectral del efecto de la ablación láser Nd:YAG en tejido porcino.

Sonia Buendia Aviles, José Luis Arce Diego, Margarita Cunill Rodríguez, José Alberto Delgado Atencio, Félix Fanjul Vélez.

COM 07. Comunicaciones ópticas. Redes, sistemas y subsistemas

SP2.COM01 Análisis de la capa física de una red de acceso óptica pasiva GPON mediante LabVIEW.

Jesús Ángel Andrés, Noemí Merayo, Juan Carlos Aguado, Ignacio De Miguel, Ramón J. Durán, Julio San Román, Patricia Fernández, Rubén M. Lorenzo, Evaristo J. Abril.

JUEVES, 15 DE JUNIO

SP2.COM02 Impact of LTE Bandwidth on the Performance of RoF Downlink Transmission over a Large-Core GI-POF.

Muhammad Waseem, Alicia López, Pedro Luis Carro, María Angeles Losada, Carmen Vázquez, Javier Mateo, Joseba Zubia.

SP2.COM03 Photonic Microwave Phase Shifter based on an I/Q modulator.

Silvia Del Río-Martín, Clara Quevedo-Galán, Pablo López-Querol, Ignacio Esquivias.

SP2.COM04 Transmisión a 32Gb/s empleando un receptor coherente y demultiplexación en polarización basada en DSP para redes ópticas pasivas de siguiente generación.

Miguel Barrio, David Izquierdo, Pascual Sevillano, José Antonio Altabás, Ignacio Garcés.

12:30 - 13:00 Charlas Técnicas 3. *Salón de Actos*



José María Silvestre
ProCareLight

Buenas prácticas de seguridad láser en el laboratorio.



Sergio Sáez
SECPHO

Secpho: collaborate to innovate.



Santiago Royo Royo
Fotónica 21

Actividades de la Plataforma Española de Fotónica, Fotónica 21.

JUEVES, 15 DE JUNIO

13:00 - 14:00 Conferencia invitada 4.
Salón de Actos

Vicente Calvo Alonso
COMPTTEK SOLUTIONS, Finlandia



Comptek Solutions, de concepto universitario a empresa tecnológica.

Introducción de Comptek Solutions y de su oferta tecnológica. Una mirada atrás al origen y la aventura de crear una empresa "Deep tech" activa en el campo de la optoelectrónica, así como cosas a tener en cuenta antes de empezar un negocio basado en las lecciones aprendidas.

14:00 - 15:30 Comida.
Hall de la ETSi

15:30 - 18:00 Foro de Talento.
Salón de Actos

- ▶ **15:30. Presentación del Foro de Talento, por Secpho.**
- ▶ **15:35. Presentación de los ponentes, por Fotónica21.**
- ▶ **15:40. Bárbara Buades, CEO de Meetoptics.**
De la ciencia a la creación de tu propia empresa: ¿Cómo di el salto?
- ▶ **16:00. Carmen Vázquez, Catedrática en UC3M.**
Debatamos sobre sesgos de género y fotónica.
- ▶ **16:20. Ronda de matchmaking entre ofertas y demandas de empleo.**

17:00 - 18:00 Asamblea del Comité de Optoelectrónica de SEDOPTICA.
Salón de Grados (Planta Ático)

21:30 - 00:00 Cena de Gala.
Restaurante ABADES Triana

VIERNES, 16 DE JUNIO

9:00 - 10:00 Conferencia invitada 5.
Salón de Actos

José Azaña Luna
INRS-EMT, Canada



Photonic signal processing for classical and quantum applications.

Photonic-enabled wave energy-redistribution methods have attracted considerable interest for signal analysis and processing, enabling the realization of novel and greatly enhanced functionalities for a wide range of applications, from high-speed telecommunications to sensing and spectroscopy. Based on simple physical mechanisms, these methods can be applied to wavefields from the microwave to the optical spectrum regions via widely available fiber-optics or integrated-waveguide technologies. To illustrate the general methodology, we will review analog signal processing techniques based upon Talbot self-imaging effects in dispersive optical fibers. The focus will be on a new framework of broad practical interest, namely, passive amplification of time- and frequency-domain waveforms with unique denoising capabilities for both classical optical waves and quantum correlation functions. This approach to noise mitigation enables the recovery of information that could not be accessed otherwise, pushing new frontiers in both fundamental and applied sciences.

10:00 - 10:30 Charlas Técnicas 4.
Salón de Actos

André Acosta e Iris Elvira
Iberoptics



Imagen SWIR para aplicaciones científicas y Catálogo Fotónica e Imágen.

Jad Sabek
IBM-CNM



Spanish foundries ecosystem for PICs.

Thomas Etzkorn
PIMICOS



Dispositivos piezoeléctricos para el alineamiento de fibra óptica.

VIERNES, 16 DE JUNIO

10:30 - 12:00 Sesión de Pósteres 3.

Hall de la ETSi

Los trabajos de estudiantes han optado al premio **INNOVA SCIENTIFIC**.

MIC **04. Micro-óptica y óptica integrada: Tecnología y dispositivos para circuitos fotónicos integrados**

SP3.MIC01 **Acoplador integrado controlado por bombeo escrito mediante láser de femtosegundos.**

David Benedicto, Juan C Martín, M Victoria Collados, Antonio Días, Javier Solís, Juan A Vallés.

SP3.MIC02 **Análisis y caracterización de Bragg Gratings integradas en tecnología Silicon-on-Insulator.**

José A. Praena, Alejandro Carballar.

SP3.MIC03 **Demostración experimental de un acoplador de interferencia multimodal insensible a la polarización basado en un metamaterial sublongitud de onda.**

Carlos Pérez-Armenta, Alejandro Ortega-Moñux, José Manuel Luque González, Robert Halir, Jens Schmid, Pavel Cheben, Iñigo Molina Fernández, J. Gonzalo Wangüemert-Pérez.

SP3.MIC04 **Estudio y caracterización experimental de cavidades Fabry-Pérot para una plataforma de silicio sobre aislante.**

Alejandro Sánchez-Sánchez, José Manuel Luque-González, David Medina-Quiroz, Carlos Pérez-Armenta, Paula Nuño Ruano, David González-Andrade, Alejandro Ortega-Moñux, Iñigo Molina-Fernández, Carlos Alonso-Ramos, J. Gonzalo Wangüemert-Pérez.

SP3.MIC05 **Hybrid Active/Passive Photonic Integration Platform based on Micro Transfer Printing.**

Rubén Alemany, Luis A. Bru, Gloria Micó, Daniel Pastor, Pascual Muñoz.

SP3.MIC06 **Mejora de la relación señal ruido en dispositivos ópticos integrados mediante divisores de potencia Wilkinson.**

Angel Ortega-Gomez, Osmerly Hernández, Douglas Oña, Iñigo Liberal.

SP3.MIC07 **Optical Phased Array Antenna Apodization for Lidar in Autonomous Vehicles.**

José Lozano, Humberto Jimenez, Sergio Torres, Pau Biosca, Bernat Fontanet, Jorge Pinazo, Adolfo Lerin, Federico Dios, Josep R. Casas, José A. Lázaro.

VIERNES, 16 DE JUNIO

SP3.MIC08 Optimization of the design and operating parameters of active waveguide Bragg gratings for laser performance.

Ángel Sanz-Felipe, Juan A. Vallés.

SP3.MIC09 Photonic integrated circuits at CEMDATIC-UPM.

Pablo López-Querol, Clara Quevedo-Galán, Alicia Soria-Gómez, Ismael Pintor, José Manuel G. Tijero, Ignacio Esquivias, Antonio Pérez-Serrano.

SP3.MIC10 Redes ópticas de divisores de potencia Wilkinson en silicio sobre aislante.

Douglas Oña, Ángel Ortega-Gómez, Osmerly Hernández, Iñigo Liberal.

SP3.MIC11 Towards SiN photonic platform: plasma-free manufacturing process flow. Deposition, oxidation, and wet etching of silicon nitride.

Giuseppe Libero Bufi, Louw Roel Van Der Zon, Adrián Fernández, César Alminyana, Isabelle Rodriguez, Pascual Muñoz, Daniel Pastor.

BIO 08. Biofotónica. Fotónica aplicada a los materiales biológicos y la medicina

SP3.BIO01 A novel biosensing transducer for real-time detection of biomolecules in biological samples.

Alain Castaño Andres, Jose Luis Zugaza, Joseba Zubia, David Sánchez Montero, Alicia López, Oskar Arrizabalaga.

SP3.BIO02 Etched Few-mode fiber interferometer biosensor for Staphylococcus aureus detection..

Valeria Hernández-Ambato, David Barrera, Elena Aznar, Salvador Sales.

SP3.BIO03 Modelo de ruido de una cámara para lectura de biosensores fotónicos multiplexados.

Laura Perez-Sanchez, Ana Sanchez-Ramirez, Jose De Oliva-Rubio, Jonas Leuermann, Robert Halir, Alejandro Ortega-Moñux, J. Gonzalo Wangüemert-Perez, Iñigo Molina-Fernandez.

SP3.BIO04 Mueller matrix polarimeter and birefringence imaging.

Esther Nabadda, María Del Mar Sánchez-López, Asticio Vargas, Angel Lizana, Juan Campos, Ignacio Moreno.

VIERNES, 16 DE JUNIO

IAF 10. Inteligencia artificial aplicada a la fotónica

SP3.IAF01 Determination of fat content in tomato sauce by means of optical spectroscopy in the visible and near infrared regions assisted with neural networks classification.

A. G. Moises, M. Moreno, A. Avedillo, I. Vitoria, J. J. Imas, C. Sanz, L.j. Marín, C. R. Zamarreño.

SP3.IAF02 Prevención de accidentes en obra mediante visión 3D e inteligencia artificial.

Gerard Demas-Giménez, Pablo García-Gómez, Marcela C. Rubio, Santiago Royo.

IND 12. Aplicaciones industriales de la fotónica

SP3.IND01 Design of a solar simulator using a Genetic Algorithm: a case study.

Marta Rodríguez-Guerra, Ricardo Vergaz Benito, Eduardo López Fraguas.

SP3.IND02 Fabricación de prototipos de concentrador solar luminiscente basados en fibras.

Jon Grandes, M. Asunción Illarramendi, Eneko Arrospide, Jon Arrue, Joseba Zubia, Nekane Guarrotxena, Olga García.

SP3.IND03 Lentes difractivas permeables.

Veronica Pastor-Villarrubia, Angela Soria-Garcia, Jesus Del Hoyo, Joaquin Andres-Porras, Luis Miguel Sanchez-Brea, Javier Alda.

SP3.IND04 Machine learning based photonic dry/curing system of industrial coating deposition process's images for its quality management.

Elena Torralba-Calleja, Mónica Della Pirriera, Astrid Ribot, Aitor Jara, Antoni Climent, Sergio Martinez-Navas, David Cecilia, Aina Cabrer, Zeynep Beyazkili, Lorenzo Bautista.

SP3.IND05 Sistema de monitorización basado en FBGs para la detección de incidencias en rodamientos industriales.

Rubén Ruiz-Lombera, Aida Álvarez, Santiago Muiños-Landin, Tania Grandal.

SP3.IND06 Sistema de posicionamiento de 4 cuadrantes basado en láser semi-activo pulsado de alta energía.

Manuel R. Lebrón, Rubén Tinoco, Alejandro Carballar, Juan A. Sánchez, Javier Galnares, Rafael Ortiz.

VIERNES, 16 DE JUNIO

12:00 - 13:00 Charlas Técnicas 5.
Salón de Actos

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

Por concretar
HAMAMATSU

Presentación de HAMAMATSU.

PRO-LITE
TECHNOLOGY

Guillermo Santa María
PRO-LITE

Aplicaciones en Geología de tecnología hiperspectral: análisis no destructivo de testigos y muestras de suelo, sedimentos y rocas.

VLC
PHOTONICS
A Hitachi Group Company

David Domenech Gómez
VLC Photonics

Transformando el futuro con fotónica integrada.

mtb
TECNOLOGÍA DE PRECISIÓN

Sandrine Grenet
MTB

Presentación de MTB.

ARAGÓN
PHOTONICS

Ricardo Arias
Aragon Photonics

Instrumentación de altas prestaciones para análisis espectral y sensado distribuido.

13:00 - 14:00 Entrega de Premios y Clausura.
Salón de Actos

14:00 - 15:30 Cocktail de Despedida.
Hall de la ETSi

Maestro cortador de jamón ibérico de bellota 100%.
Vino manzanilla

Nota: Todos los trabajos presentados por estudiantes han optado al premio SPIE-SEDOPTICA.

PREMIOS A ESTUDIANTES

Con el objeto de promover la investigación de calidad entre los más jóvenes y reconocerla a través de sus resultados, el Comité de Optoelectrónica ha gestionado la convocatoria de cuatro premios a los mejores trabajos en las diferentes áreas temáticas de la reunión.

► PREMIO CARLOS GÓMEZ-REINO, *patrocinado por la empresa Radiantis.*

RADIANTIS

El Premio Carlos Gómez-Reino fue creado por el Comité de Optoelectrónica y Radiantis, en reconocimiento por el distinguido trabajo realizado por el Dr. Carlos Gómez-Reino a lo largo de su carrera profesional en el área de la Óptica y la Fotónica.

Carlos Gómez-Reino fue Catedrático de Física Aplicada, área de Óptica, de la Universidad de Santiago de Compostela (USC) hasta que desafortunadamente nos dejó el 25 de Julio de 2012. Hasta entonces estuvo intensamente involucrado en el campo de la óptica y la fotónica, especializándose en el área de Microóptica y Óptica GRIN, grupo que dirigió durante múltiples años en la USC.

A lo largo de su carrera, aportó innumerables avances a la ciencia, siendo ampliamente reconocido por la comunidad científica a nivel internacional. Pero su contribución no solo se centró en su actividad investigadora de primer nivel, sino también en su indudable capacidad de liderazgo y su clara visión que permitieron la globalización de la investigación colaborativa así como la expansión de espacios e instalaciones científicas de vanguardia que hicieron prosperar inmensamente la óptica y la fotónica en el entorno de la USC.

Carlos tenía una personalidad arrolladora, era optimista, amable, dedicado a su trabajo y tenía una manifiesta pasión por apoyar a jóvenes investigadores en su incipiente carrera en el área de la óptica y la fotónica. Una de las personas para las que Carlos fue un apoyo crucial en sus primeros años fue Sara Otero, que tras completar su licenciatura en Física, realizó sus primeras actividades de investigación en el área de Óptica y Fotónica de la USC.

Sara es hoy en día fundadora y Directora General de Radiantis, una empresa fundada en el 2005, que se ha convertido en una de las principales fabricantes de láseres sintonizables y Osciladores Paramétricos Ópticos a nivel mundial. Radiantis no existiría hoy, si no fuera por la pasión y esfuerzo que dedicaba Carlos Gómez-Reino a sus alumnos y, en concreto por el apoyo desinteresado y guía prestada a Sara Otero en los comienzos de su carrera profesional.

Por ello, una de las mejores formas de reconocer y mantener vivo el espíritu de Carlos Gómez-Reino, sus contribuciones a la Óptica y Fotónica y su apoyo desinteresado a las carreras de los jóvenes investigadores es este premio que se otorga en el marco Optoel.

PROCEDIMIENTO DE VALORACIÓN Y FALLO DEL JURADO:

Premio: CARLOS GÓMEZ-REINO

Patrocinador: RADIANTIS

Sesión de Pósteres 1: miércoles 14 de junio de 2023

Categorías:

01.EMI: Emisores, detectores y amplificadores de radiación óptica (incluidos los THz) 02. DIS: Dispositivos ópticos y electroópticos para procesamiento óptico de señal (incluyendo imagen)

05.ONL: Óptica no-lineal y Óptica cuántica

09.LAS: Láseres: sus aplicaciones industriales, médicas y de procesamiento de materiales 13.FOT: Nuevas teorías, efectos, técnicas y tecnologías para la fotónica

TOTAL: 21 PÓSTERES; Optan a premio: 12 pósteres

Jurado compuesto por:

- Miguel Vicente Andrés (Universidad de Valencia)
- Xabier Quintana (Universidad Politécnica de Madrid)
- Javier Mateo (Universidad de Zaragoza)

Premiado:

ROCÍO CHUECA, por su contribución *SPI.FOT01: Caracterización de ventanas con doble acristalamiento y superficies selectivas en frecuencia (FSS)*.



PREMIOS A ESTUDIANTES

- PREMIO FRANCISCO VILLUENDAS, *patrocinado por la empresa Fibercom.*



El premio Francisco Villuendas se instituyó en 2019 en el marco de la OPTOEL, aprovechando su celebración en Zaragoza, en honor y reconocimiento a la labor que este profesor de la Universidad de Zaragoza desarrolló durante toda su vida profesional.

Francisco Villuendas Yuste fue Catedrático de Física Aplicada de UNIZAR hasta la desafortunada fecha del 3 de febrero de 2013, en que nos dejó. Si bien su valía profesional ha sido reconocida por toda la comunidad científica, solo unos pocos privilegiados tuvimos la suerte de poder disfrutar de su personalidad y carisma. Paco era una persona de trato directo y sincero, que amaba su trabajo y siempre estuvo preocupado por la proyección social de la investigación que realizaba. Fundó junto a Javier Pelayo y otros compañeros de la facultad el hoy sobradamente conocido y prestigioso Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del que tan buenas ideas y profesionales han salido.

Uno de los primeros frutos de esta manera de entender la labor científica fue la empresa Fibercom. Creada en el año 1991, cuando ni siquiera existían conceptos como Start-up o Spin-off, tan de moda en nuestros días, Fibercom se centró inicialmente en la prestación de servicios relacionados con las, entonces incipientes, redes de telecomunicaciones ópticas. No obstante, su espíritu creativo, herencia directa de la personalidad de sus fundadores, hizo que con el devenir de los años, esa microempresa creciera hasta constituir lo que actualmente es el Grupo Fibercom, en cuyo seno se encuentran empresas como Aragón Photonics Labs, nacida en 2004 como división industrial de la empresa original.

Paco tenía el firme convencimiento de que la labor de un científico debía inexcusablemente redundar en beneficio social. Para dar continuidad a esa visión sobre la labor científica, este premio pretende, además de mantener vivo su recuerdo, trasladar a los jóvenes investigadores la idea de que "la proyección social de la investigación debe ser tenida en consideración en todo el proceso creativo".

Siguiendo con esa impronta dejada por Paco, con el premio Francisco Villuendas se busca reconocer la actividad de jóvenes investigadores que, además de su carácter innovador, presenten trabajos en el campo de la fotónica, especialmente en fibras ópticas, que tengan un enfoque eminentemente aplicado al beneficio social.

PROCEDIMIENTO DE VALORACIÓN Y FALLO DEL JURADO:

Premio: FRANCISCO VILLUENDAS

Patrocinador: FIBERCOM

Sesión de Pósteres 2: jueves 15 de junio de 2023

Categorías:

03.FIB: Fibra óptica: Tecnología de fibras y cables: multiplexación espacial, fibras especiales

06.SEN: Sensores, metrología y estándares

07.COM: Comunicaciones ópticas. Redes, sistemas y subsistemas

TOTAL: 27 PÓSTERES; Optan a premio: 14 pósteres

Jurado compuesto por:

- **Francisco López** (representante de FIBERCOM)
- **Salvador Sales** (Universidad Politécnica de Valencia)
- **Juan Ignacio Garcés** (Universidad de Zaragoza)

Premiado:

BRYAN DAVID SANIPATIN URQUIZO, por su contribución SP2.SEN02: Dual-parameter fiber- optic sensor with a cascaded FPI and FBG for pressure and temperature



PREMIOS A ESTUDIANTES

- PREMIO INNOVA SCIENTIFIC, *patrocinado por la empresa INNOVA Scientific.*



INNOVA Scientific, S.L., empresa líder en la distribución de equipamiento para aplicaciones láser desea fomentar y reconocer el espíritu investigador dentro de la comunidad científica, mediante la concesión de un premio al mejor trabajo de investigación en el campo de los láseres y sus aplicaciones industriales, médicas y de procesado de materiales.

Podrán ser candidatos al premio, cualquier estudiante de doctorado que realice trabajos de investigación experimental en el campo del procesado de materiales con aplicaciones industriales y/o médicas en centros públicos o privados de España y Portugal. La naturaleza del presente premio será económica. El jurado concederá un solo premio al doctorando seleccionado.

La comisión evaluadora del premio tendrá en cuenta:

- El nivel científico de la investigación realizada.
- La utilidad social de la investigación desarrollada y su interés para el entorno socioeconómico.
- Se valorará positivamente que el trabajo haya dado lugar a una o más publicaciones en alguna revista del campo o al registro de alguna patente en el periodo Julio 2021 – Julio 2022.
- El doctorando ha de figurar como primer autor.

PROCEDIMIENTO DE VALORACIÓN Y FALLO DEL JURADO:

Premio: INNOVA SCIENTIFIC

Patrocinador: INNOVA-SCIENTIFIC

Sesión de Pósteres 3: viernes 16 de junio de 2023

Categorías:

04.MIC: Micro-óptica y óptica integrada: Tecnología y dispositivos para circuitos fotónicos integrados

08.BIO: Biofotónica. Fotónica aplicada a los materiales biológicos y la medicina

10.IAF: Inteligencia artificial aplicada a la fotónica

12.IND: Aplicaciones industriales de la fotónica

TOTAL: 24 PÓSTERES; Optan a premio: 15 pósteres

Tribunal:

- **Juan Antonio Vallés** (*Universidad de Zaragoza*)
- **Ignacio Moreno** (*Universidad Miguel Hernández de Elche*)
- **Pascual Sevillano** (*Universidad de Zaragoza*)

Premiado:

CARLOS PEREZ ARMENTA, por su contribución SP3.MIC03: Demostración experimental de un acoplador de interferencia multimodal insensible a la polarización basado en un metamaterial sublongitud de onda



PREMIOS A ESTUDIANTES

► PREMIO SPIE-SEDOPTICA, *patrocinado por la SPIE.*

SPIE.

 **SEDOPTICA**
SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ÓPTICA

SPIE-SEDOPTICA continúan estimulando la investigación en el campo de la fotónica y la optoelectrónica en general con la convocatoria de este premio en el marco de la OPTOEL.

PROCEDIMIENTO DE VALORACIÓN Y FALLO DEL JURADO:

Premio: SPIE-SEDOPTICA

Patrocinador: SPIE

Sesión de Pósteres: 1, 2 y 3: 14, 15 y 16 de junio de 2023

Categorías:

Todas las áreas temáticas de la OPTOEL2023.

TOTAL: 72 PÓSTERES; Optan a premio: 41 pósteres

Tribunal:

- **Santiago Royo Royo** (*representante de SEDOPTICA*)
- **José Antonio Lázaro** (*representante de SEDOPTICA*)
- **Evaluadores de las sesiones de poster 1, 2, y 3.**

Premiado:

JAVIER PEREIRO GARCÍA, por su contribución SP1.DIS04: Reconfigurable liquid crystal devices for light handling



OPTOEL
2023

XIII REUNION OPTOELECTRONICA

SEVILLA 14 · 16 JUNIO

WWW.OPTOEL2023.ES



Escuela Técnica Superior de
INGENIERÍA DE SEVILLA



Universidad
de Alcalá



COMUNICACIONES

CONECTANDO LA ACADEMIA Y LA INDUSTRIA

OPTOEL 2023 - Índice de publicaciones

Índice de publicaciones

01. Emisores, detectores y amplificadores de radiación óptica (incluidos los THz).	45
1.1. Células solares de nanocolumnas de nitruro de indio sobre silicio amorfo depositadas por pulverización catódica	46
1.2. Densificación electroóptica de alta densidad de peines de frecuencias ópticas generados por láseres semiconductores de conmutación de ganancia inyectados.	52
1.3. Detección de chirps en láseres con realimentación de frecuencia desplazada.	58
02. Dispositivos ópticos y electroópticos para procesado óptico de señal (incluyendo imagen).	64
2.1. Desarrollo de una cámara hiperespectral basada en un filtro de espectro óptico lineal variable	65
2.2. Full complex modulation using distance-based Iterative Fourier Transform Algorithm.	71
2.3. Implementation of triplicator diffraction gratings in a pixelated display.	76
2.4. Reconfigurable liquid crystal devices for light handling	82
03. Fibra óptica: Tecnología de fibras y cables: multiplexación espacial, fibras especiales.	88
3.1. Analysis of the frequency response of a dynamically modulated, high Q, optical fiber ring resonator.	89
3.2. Sensor de impacto de baja energía basado en un interferómetro supermodal y una red de Bragg	94
3.3. Measurement of the UV-induced radius decrease in a silica fiber by means of optic and acoustic resonances.	99

3.4. Monitorización dinámica de la curvatura utilizando Φ OTDR de tiempo expandido.....	104
3.5. Optimización del corte de fibras ópticas microestructuradas de plástico (mPOF) con estructura de anillos hexagonales.....	110
3.6. Self-compression of ultrafast near-ultraviolet light in ultrathin-walled hollow-core fibres.....	116
3.7. Discriminación de Tejidos Sanos sin Etiquetar mediante Microscopía Óptica de Contraste de Fase Cuantitativa.....	120
04. Micro-óptica y óptica integrada: Tecnología y dispositivos para circuitos fotónicos integrados.....	124
4.1. Acoplador integrado controlado por bombeo escrito mediante láser de femtosegundos.....	125
4.2. Análisis y caracterización de Bragg Gratings integradas en tecnología Silicon-on-Insulator.....	129
4.3. Demostración experimental de un acoplador de interferencia multimodal insensible a la polarización basado en un metamaterial sublongitud de onda.....	135
4.4. Estudio y caracterización experimental de cavidades Fabry- Pérot para una plataforma de silicio sobre aislante.....	141
4.5. Hybrid Active/Passive Photonic Integration Platform based on Micro Transfer Printing.....	147
4.6. Mejora de la relación señal ruido en dispositivos ópticos integrados mediante divisores de potencia Wilkinson.....	153
4.7. Optical Phased Array Antenna Apodization for Lidar in Autonomous Vehicles.....	158
4.8. Optimization of the design and operating parameters of active waveguide Bragg gratings for laser performance.....	164
4.9. Photonic Integrated Circuits at CEMDATIC-UPM.....	170
4.10. Redes ópticas de divisores de potencia Wilkinson en silicio sobre aislante.....	175

4.11. Towards SiN photonic platform: plasma-free manufacturing process flow. Deposition, oxidation, and wet etching of silicon nitride	179
05. Óptica no-lineal y Óptica cuántica	185
5.1. Descomposición en valores singulares, interferencia cuántica y divisores de potencia Wilkinson.....	186
5.2. Estudio del Chirp en Solitones Disipativos en Láseres de Fibra con Anclado de Modos Pasivo en Configuración de Anillo Ultralargo en el Rango de los Femtosegundos.....	191
5.3. Modeling metal nonlinearities for FDTD simulation of plasmonic devices.....	195
5.4. Preservation of biphoton quantum coherence in frequency up-conversion using gas-filled hollow-core fibres.....	200
06. Sensores, metrología y estándares.....	204
6.1. Caracterización de un sistema de imagen LiDAR circularmente polarizado en una cámara de niebla.....	205
6.2. Dual-parameter fiber-optic sensor with a cascaded FPI and FBG for pressure and temperature measurements.....	211
6.3. Estrategias de desenrollado de fase para metrología de retardadores variables.....	216
6.4. Interrogador OTDR de tiempo expandido espectralmente eficiente con resolución espacial milimétrica.....	221
6.5. Low-Cost Energy-Harvesting Hybrid Radiofrequency - Visible Light Positioning System based on Flexible Perovskite Photovoltaic cells for Indoor Positioning.....	227
6.6. Medida del eje rápido de un retardador mediante el uso de un interferómetro de Michelson.....	233
6.7. Método teórico para el diseño de sensores de desplazamiento de fibra óptica bifurcados.....	238
6.8. Monitorización de la flecha en líneas de alta tensión mediante Φ OTDR con pulsos chirpeados.....	243
6.9. Pirheliómetro basado en fibra óptica y fotodiodo semiconductor.....	249

6.10. Polarímetro de imagen para la medida del vector completo de Stokes y de la matriz de Mueller en el rango del visible	255
6.11. Pseudo Random Phase Modulation Coherent LiDAR	261
6.12. Redes de Bragg en fibras ópticas recubiertas con níquel para implementación de sensores de corriente.....	266
6.13. The Gradient-Phase Interferometer: A Novel Interferometer for Precise Segment Phasing in the Primary Mirror of the ESO Extremely Large Telescope (E-ELT).....	271
6.14. Ultra-high resolution dual comb spectroscopy based on gain-switching optical frequency combs	276
6.15. ZIF-8 based Fabry-Pérot interferences for VOC detection	281
6.16. Integrando Sensores de Fibra Óptica de Plástico en Estructuras de Composites reforzados con Fibra de Carbono.....	286
6.17. Análisis espectral del efecto de la ablación láser Nd:YAG en tejido porcino.....	291
07. Comunicaciones ópticas. Redes, sistemas y subsistemas.....	296
7.1. Análisis de la capa física de una red de acceso óptica pasiva GPON mediante LabVIEW	297
7.2. Impact of LTE Bandwidth on the Performance of RoF Downlink Transmission over a Large-Core GI-POF	303
7.3. Photonic Microwave Phase Shifter based on an I/Q modulator.....	309
7.4. Transmisión a 32Gb/s empleando un receptor coherente y demultiplexación en polarización basada en DSP para redes ópticas pasivas de siguiente generación.....	313
08. Biofotónica. Fotónica aplicada a los materiales biológicos y la medicina	318
8.1. A novel biosensing transducer for real-time detection of biomolecules in biological samples	319
8.2. Etched Few-mode fiber interferometer biosensor for Staphylococcus aureus detection.....	325

8.3. Modelado de ruido de una cámara para lectura de biosensores fotónicos multiplexados.	329
8.4. Mueller matrix polarimeter and birefringence imaging.	335
09. Láseres: sus aplicaciones industriales, médicas y de procesado de materiales.	341
9.1. Guías de onda superficiales con perfil modal optimizado para aplicaciones de detección en Nd:YAG: diseño y fabricación con pulsos láser de femtosegundos.	342
9.2. High-frequency photothermal processing of commercial polymers under femtosecond laser irradiation for waveguide writing.	348
9.3. Numerical simulation study of multi-pulsed femtosecond laser ablation on aluminum.	354
9.4. The role of surface roughness on the regularity of LIPSS generated in metals with femtosecond lasers.	360
10. Inteligencia artificial aplicada a la fotónica.	366
10.1. Determination of Fat Content in Tomato Sauce by means of Optical Spectroscopy in the Visible and Near Infrared Regions assisted with Neural Networks Classification.	367
10.2. Prevención de accidentes en obra mediante visión 3D e inteligencia artificial.	373
12. Aplicaciones industriales de la fotónica.	379
12.1. Design of a solar simulator using a Genetic Algorithm: a case study.	380
12.2. Fabricación de prototipos de concentrador solar luminiscente basados en fibras.	386
12.3. Lentes difractivas permeables.	391
12.4. Machine learning based photonic dry/curing system of industrial coating deposition process's images for its quality management.	395
12.5. Sistema de monitorización basado en FBGs para la detección de incidencias en rodamientos industriales.	400

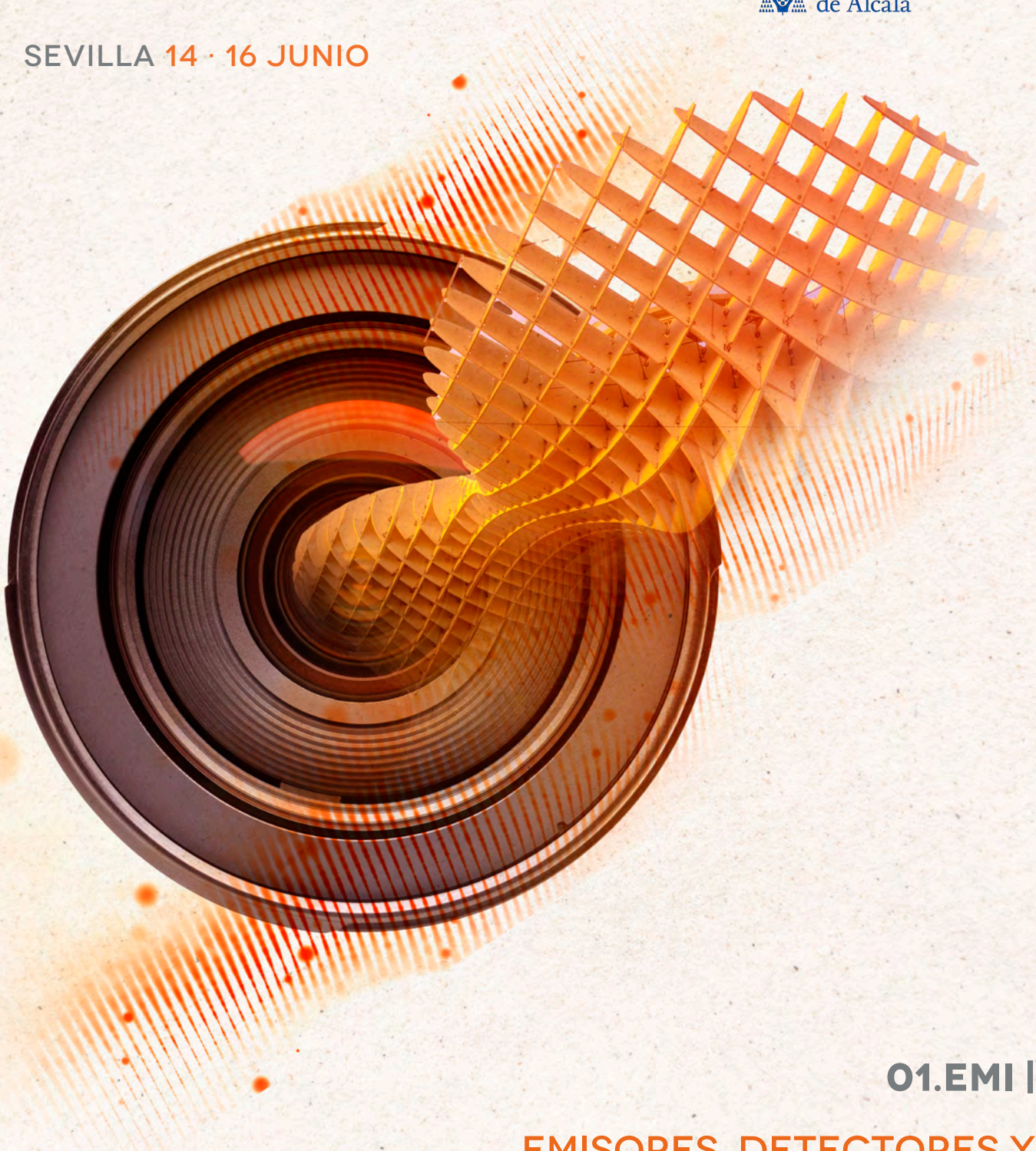
12.6. Sistema de posicionamiento de 4 cuadrantes basado en láser semi-activo pulsado de alta energía.	406
13. Nuevas teorías, efectos, técnicas y tecnologías para la fotónica	411
13.1. Caracterización de ventanas con doble acristalamiento y Superficies Selectivas en Frecuencia (FSS)	412
13.2. Finite energy Airy surface-plasmon polaritons at a lossy interface	417
13.3. Inferencia Bayesiana aplicada a simulaciones numéricas de polarimetría Mueller Full Poincaré	422
13.4. Light switch based on a nanoparticle chain and on the optomechanically generated field enhancement	428
13.5. Nonplanar partially coherent sources	434
13.6. Validación del modelo de índice efectivo como alternativa viable en el diseño de metasuperficies.	438

OPTOEL
2023

XIII REUNION OPTOELECTRONICA

SEVILLA 14 · 16 JUNIO

WWW.OPTOEL2023.ES



01.EMI |

**EMISORES, DETECTORES Y
AMPLIFICADORES DE RADIACIÓN
ÓPTICA (INCLUIDOS LOS THZ)**

Células solares de nanocolumnas de nitruro de indio sobre silicio amorfo depositadas por pulverización catódica

Indium nitride nanocolumns on amorphous silicon solar cells deposited by sputtering

Michael SUN⁽¹⁾, Rubén G. CORNEJO⁽¹⁾, J. OLEA⁽²⁾, Sirona VALDUEZA-FELIP⁽¹⁾ and Fernando B. NARANJO⁽¹⁾

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá, 28871, Alcalá de Henares, España.
2. Departamento de Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, España.

Persona de contacto: Michael SUN (michael.sun@uah.es)

RESUMEN:

En este trabajo, presentamos una estrategia de optimización de dispositivos de heterounión InN/Si(100) mediante la introducción de una capa buffer de silicio amorfo (a-Si). Estudiamos la influencia del espesor de este buffer en la calidad del material a través de sus propiedades estructurales, morfológicas y ópticas, y la calidad del dispositivo. Las capas de InN y a-Si se depositaron mediante sputtering RF y DC, respectivamente. Las muestras se procesaron posteriormente en células solares de $\sim 1 \text{ cm}^2$ y se caracterizaron eléctricamente en oscuridad y bajo iluminación de 1 sol. Por un lado, se observa un ligero aumento tanto de la resistencia en serie como en paralelo con el espesor de la capa buffer hasta 15 nm. Por otro lado, se produce un aumento de la J_{SC} hasta $\sim 20 \text{ mA/cm}^2$ para la capa buffer de 4 nm y en la V_{OC} hasta $\sim 0.37 \text{ V}$ para la capa buffer de 15 nm. Esto se traduce en una mejora del FF de hasta el 35.5% y un aumento de la eficiencia del 1.13% al 2.27%.

Palabras clave: InN, pulverización catódica, Si amorfo, buffer, célula solar

ABSTRACT:

In this work, we present an optimization strategy for InN/Si(100) heterojunction devices, by the introduction of an amorphous silicon (a-Si) buffer layer. We study the influence of different thickness of the amorphous silicon buffer on the material quality through its structural, morphological, and optical properties, and the device quality. The InN and a-Si layers were deposited by RF and DC sputtering, respectively. Samples were later processed into $\sim 1 \text{ cm}^2$ solar cells and were electrically characterized in the dark and under 1 sun illumination. On one hand, there was a slightly increase on both the series and shunt resistances with the buffer thickness up to 15 nm. On the other hand, there was an increase of the J_{SC} up to $\sim 20 \text{ mA/cm}^2$ for 4 nm buffer and of the V_{OC} up to $\sim 0.37 \text{ V}$ for 15 nm buffer. This leads to a FF improvement up to 35.5% and an efficiency increase from 1.13% to 2.27%.

Key words: InN, sputtering, amorphous Si, buffer, solar cell

1.- Introducción

La tecnología fotovoltaica es crucial en la transición hacia una realidad energética sosten-

nible. Dado que la población mundial y la demanda energética siguen creciendo, es cada vez más importante desarrollar fuentes de energía que sean limpias, eficientes y renova-

bles. La energía solar tiene el potencial de satisfacer una parte significativa de nuestras necesidades energéticas.

Los nitruros del grupo III son una familia de materiales semiconductores con aplicaciones comerciales de éxito en la producción de LEDs y láseres [1]. Además, poseen excelentes propiedades para su aplicación en otras áreas de la optoelectrónica, como la fotovoltaica. Su gap directo sintonizable en el espectro solar visible, su elevado coeficiente de absorción y su alta movilidad de electrones pueden convertir eficazmente la energía solar en electricidad. Además, poseen una excelente estabilidad térmica y química, haciéndolos resistentes a entornos hostiles. Así pues, explorar el potencial de los nitruros para aplicaciones fotovoltaicas podría conducir a avances significativos en la tecnología de la energía solar y a un futuro más sostenible.

El InN ha captado mucha atención en las últimas décadas debido a sus interesantes propiedades [2,3]. Aunque el InN de buena calidad es difícil de obtener debido a su baja temperatura de disociación, ha habido una gran actividad en la producción de láminas delgadas de InN depositadas por metal-orgánicos [4], epitaxia de haces moleculares [5] y pulverización catódica (sputtering) [6-9]. Sin embargo, la presencia de defectos estructurales en las capas limita considerablemente el rendimiento de los dispositivos de lámina delgada. Es por ello que se han dedicado grandes esfuerzos a explorar el crecimiento de nanohilos [10-13] y nanocolumnas [14-16], estructuras con, a priori, una menor densidad de defectos.

Nuestro grupo de investigación tiene experiencia en el crecimiento de capas de (Al)InN mediante sputtering RF sobre zafiro y Si(100 y 111), obteniendo capas de calidad y con buenas propiedades eléctricas en dispositivos de heterounión nitruro/Si [17,18]. Con el objetivo de mejorar el rendimiento fotovoltaico de estos dispositivos, en este trabajo se estudia la influencia de introducir una capa intermedia de silicio amorfo, como potencial capa pasivante superficial del Si [19], en las propiedades de las heterouniones InN/Si(100).

El estudio consta de dos partes: primeramente, se estudia el crecimiento de silicio mediante sputtering DC; posteriormente, esta capa se

añade a los dispositivos InN/Si fabricados mediante sputtering RF.

2.- Medidas experimentales

Las capas de silicio e InN se depositaron sobre Si(100) dopado tipo p de 375 μm de espesor (resistividad $\sim 1\text{-}10 \Omega \cdot \text{cm}$) utilizando un sistema de sputtering reactivo. Más detalles de este sistema se pueden encontrar en [20,21].

Las capas de silicio se depositaron en una atmósfera de Ar puro con un flujo de 2 sccm y una presión de cámara de 0.47 Pa. El tiempo de depósito se fijó en 120 min con una temperatura de sustrato de 550°C y diferentes potencias DC (30, 40, 50 y 60 W). Dichas condiciones de depósito dieron lugar a un Si compacto y amorfo, el cual se empleó posteriormente en las heterouniones InN/a-Si/Si.

Las capas de InN se depositaron en atmósfera de N₂ puro con un flujo de 14 sccm y una presión de 0.47 Pa. El tiempo de depósito se fijó en 150 min con una temperatura de sustrato de 550°C y una potencia de RF aplicada al blanco de In de 30 W. Las capas de InN crecidas bajo estas condiciones muestran un alto dopaje tipo n ($n \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) [18]. El espesor de la capa amortiguadora (buffer) de a-Si se fijó en 0, 4, 15 y 25 nm, dando lugar a las muestras B0, B4, B15 y B25. Estas capas de a-Si se depositaron a 30 W DC.

La orientación cristalina y la mosaicidad de las capas se evaluaron mediante difracción de rayos X de alta resolución (HRXRD). El espesor y la morfología de las mismas se estudió mediante microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM). Se realizaron medidas de transmisión óptica en muestras crecidas simultáneamente sobre zafiro para evaluar su energía de gap.

Finalmente, se procesaron dispositivos con un área de $\sim 1 \text{ cm}^2$ utilizando máscaras sólidas para los contactos delantero y trasero, formados por $\sim 120 \text{ nm}$ de Al depositado por sputtering DC a RT. Los dispositivos se caracterizaron mediante curvas de corriente-voltaje utilizando una estación de 2 puntas acoplada a una SMU en condiciones de oscuridad y bajo 1 sol (1 kW/m^2) de iluminación AM1.5G. Por último, se utilizaron diodos láser emitiendo a 518 y 637 nm con una potencia de 0.87 mW

para medir la corriente fotogenerada en función de la potencia óptica de entrada.

3.- Resultados y discusión

3.1.- Caracterización de las capas de silicio

La calidad estructural de las capas de Si se estudió sobre sustratos de zafiro mediante HRXRD, cuyos resultados se presentan en [20]. Los difractogramas $2\theta/\omega$ de rayos X no mostraron ningún pico asociado al silicio cristalino. Sin embargo, medidas adicionales de dispersión de energía de rayos X realizadas en estas muestras (mostradas en [20]) confirmaron la presencia de silicio en ellas. Por lo tanto, podemos concluir que estamos depositando una fase amorfa de Si (a-Si).

El espesor, la morfología y la rugosidad superficial del Si amorfo depositado sobre sustratos de Si(100) se investigaron mediante FESEM y AFM (Figura 1). En todos los casos, se crece una película compacta de Si independientemente de la potencia aplicada al blanco (30-60 W). Se obtuvieron resultados similares en películas de a-Si depositadas sobre sustratos de zafiro, incluso a temperatura ambiente [20]. Además, la rugosidad superficial rms obtenida a partir de imágenes de AFM es siempre inferior a 0.7 nm. Por último, la velocidad de depósito pasa de unos 80 nm/h para una potencia de 40 W a 120 nm/h para una potencia de 50 W, obteniéndose similares velocidades de crecimiento sobre sustratos de zafiro [20].

Los resultados anteriores demuestran la posibilidad de depositar capas de a-Si compactas y con muy baja rugosidad mediante sputtering DC sobre sustratos de Si(100) bajo diferentes condiciones. Con los resultados de nuestro artículo anterior [20] y el análisis previo, optimizamos las condiciones de depósito para la capa buffer de a-Si utilizada en la segunda parte de este estudio.

3.1.- Caracterización de las capas InN con buffer de a-Si

Para estudiar la calidad estructural de las capas de InN/a-Si, se realizaron medidas HRXRD en muestras crecidas sobre Si(100) y zafiro. Los resultados del difractograma $2\theta/\omega$ se muestran en las Figuras 2(a) y (b), respectivamente. Las medidas muestran una estructura wurtzita orientada a lo largo del eje *c* para

todas las muestras. El FWHM del pico (0002) del InN permanece inalterado por la introducción del buffer de a-Si, lo que indica que el InN posee la misma calidad estructural con y sin capa buffer de Si. Por otro lado, el FWHM de la *rocking curve* de (0002) del InN, que está asociado a su mosaicidad, permanece $\sim 7.7^\circ$ independientemente del espesor de la capa intermedia de Si.

Para estudiar la morfología de las muestras, se realizaron medidas de FESEM. La Figura 3 muestra imágenes de las muestras de InN con 0 y 15 nm de buffer de a-Si depositadas sobre Si(100). Ambas poseen una morfología columnar, ya observada en InN depositado por sputtering a estas temperaturas, como se ha reportado en trabajos previos [22], independientemente de la introducción de la capa buffer.

Las propiedades ópticas de las capas se estudiaron en primer lugar mediante medidas de transmitancia a temperatura ambiente realizadas en las capas depositadas simultáneamente sobre zafiro.

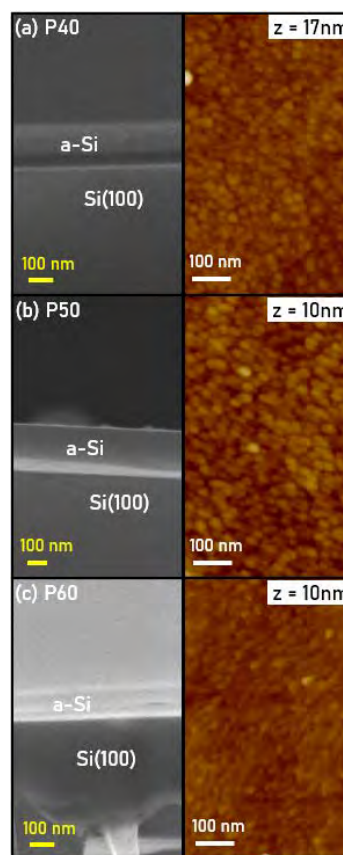


Fig. 1: Imágenes SEM y AFM de a-Si depositadas sobre Si(100) a diferentes potencias DC.

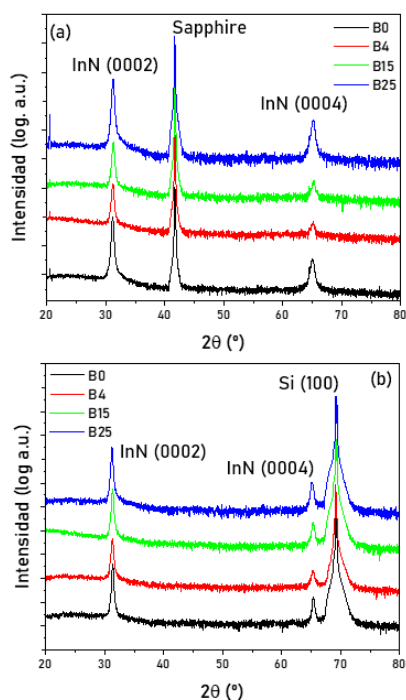


Fig. 2: Difractograma $2\theta/\omega$ de las estructuras de InN sobre (a) zafiro y (b) Si(100) con diferentes espesores de capas buffer.

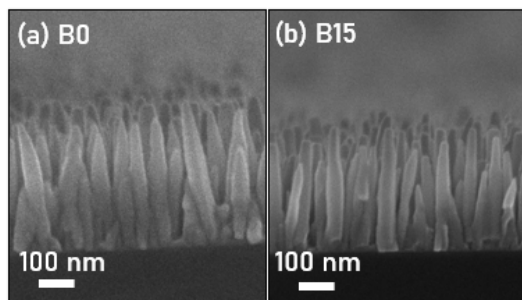


Fig. 3: Imágenes SEM de muestras InN sobre Si(100) con (a) 0 nm y (b) 15 nm de buffer de a-Si.

En la Figura 4 se muestran los espectros de transmitancia de todas las muestras estudiadas. La absorción de las capas puede deducirse de los espectros de transmitancia siguiendo la relación $\alpha(E) \propto -\ln(T)$, sin considerar las pérdidas ópticas por dispersión y reflexión. Las muestras poseen una energía de gap

aparente de ≈ 1.73 eV (729 nm) para el InN sin capa buffer, lo que concuerda con la alta concentración de portadores residuales esperada y el efecto Burstein-Moss [23], mostrando un desplazamiento de la energía de gap hacia el azul al introducir la capa buffer, hasta $\approx 1.9 \pm 0.5$ eV (652 nm).

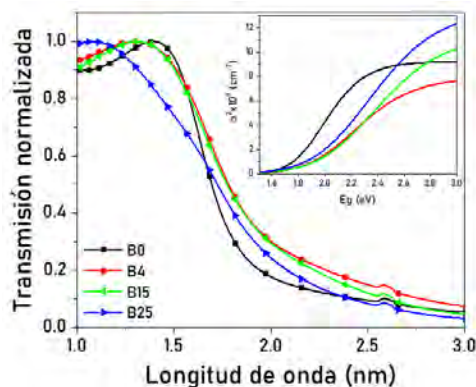


Fig. 4: Espectros de transmitancia frente a la longitud de onda. En el recuadro: coeficiente de absorción al cuadrado (α^2) vs energía, extraídas de la aproximación sigmoideal

3.2.- Caracterización eléctrica de dispositivos InN sobre Si(100) con capa buffer

La Figura 5 muestra las medidas de densidad de corriente-voltaje (J-V) de los dispositivos InN/a-Si/Si(100) en función del espesor del buffer de a-Si (a) en oscuridad y (b) bajo 1 sol de iluminación AM 1.5G. Las curvas J-V en oscuridad se analizaron utilizando el modelo de un diodo para extraer las resistencias serie y paralelo (R_S , R_{SH}), la densidad de corriente de saturación inversa (J_0) y el factor de idealidad (η); mientras que las curvas J-V iluminadas sirvieron para evaluar las características fotovoltaicas de los dispositivos en términos de voltaje de circuito abierto (V_{OC}), densidad de corriente de cortocircuito (J_{SC}), factor de forma (FF) y eficiencia. Todos los resultados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de las características eléctricas de los dispositivos InN/a-Si/Si(100). El área se calculó teniendo en cuenta la sombra del contacto superior (~ 0.13 cm²).

Sample	Área (cm ²)	R_S ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{SH} ($k\Omega \cdot \text{cm}^2$)	J_0 (A/cm ²)	η	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF (%)	Eff. (%)
B0	0.84	5.3	3.4	1.15×10^{-7}	1.7	0.28	12.82	31.40	1.13
B4	0.99	4.3	3.3	4.4×10^{-6}	1.7	0.32	19.93	32.14	2.05
B15	0.59	6.0	6.7	9×10^{-11}	1.8	0.37	17.16	35.50	2.27
B25	0.75	1.9k	48.0	1.6×10^{-6}	2.6	0.29	3.30	28.75	0.27

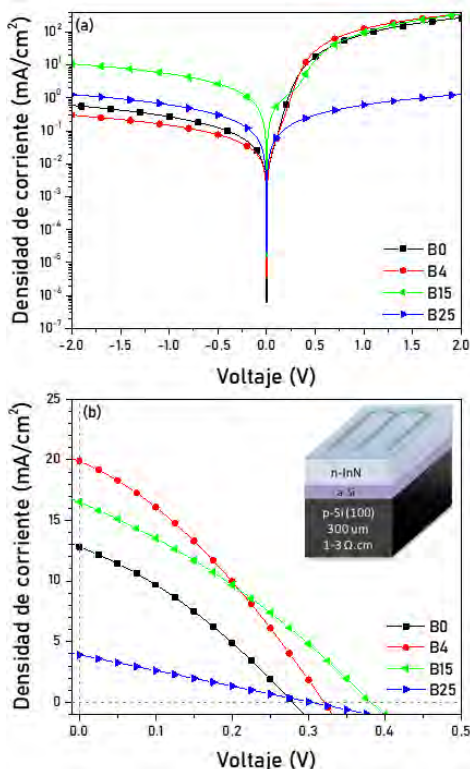


Fig. 5: Medidas J-V de dispositivos InN/a-Si/Si(100) en función del espesor del buffer de a-Si (a) en oscuridad y (b) bajo 1 sol de iluminación AM 1.5G. Recuadro: esquema del dispositivo.

La resistencia serie en una célula solar tiene dos causas principales: el movimiento de la corriente a través de la estructura y las resistencias de los contactos superior e inferior, que en nuestro caso son iguales para todas las muestras estudiadas. En los dispositivos desarrollados, la resistencia serie aumenta ligeramente hasta un espesor del buffer de 15 nm, aumentando 3 órdenes de magnitud para 25 nm, lo que conduce a un considerable empeoramiento de las propiedades eléctricas de la célula. Dicho aumento de la resistencia serie observado se relaciona con la formación de una barrera que dificulta la extracción de las cargas [24].

La resistencia paralelo aumenta sólo un orden de magnitud entre las muestras B0 y B25. Una resistencia paralelo baja suele causar pérdidas de potencia en las células solares al proporcionar una vía de corriente alternativa para la corriente generada por la luz, reduciendo por tanto la densidad de corriente que fluye a través de la unión y por ende el voltaje en circuito abierto de la célula solar. En nuestro

caso, esta mejora no se observa debido al mayor aumento en la resistencia serie que empeora las propiedades significativamente.

El análisis de las curvas J-V en iluminación revela un aumento del V_{OC} de 0.28 V a 0.37 V de las muestras B0 a B15, respectivamente; mientras que la J_{SC} muestra un máximo de ~ 20 mA/cm² para la muestra de InN con 4 nm de buffer de a-Si. El FF es del 35.5% para el dispositivo con 15 nm de buffer de a-Si (muestra B15) llevando a la máxima eficiencia de la serie, 2.27%. Estas mejoras en los parámetros de los dispositivos pueden deberse a un efecto de pasivación de la capa buffer de a-Si. Sin embargo, para espesores del buffer mayores a 15 nm se degrada la característica eléctrica de la heterounión tanto en oscuridad como bajo iluminación (ver Tabla 1) debido a la barrera de potencial que se forma en la intercara. Cabe destacar que los resultados de rendimiento obtenidos en estos dispositivos nanocolumnares de InN sobre Si(100) depositados por sputtering superan los obtenidos en estructuras similares depositadas por epitaxia de haces moleculares [12].

Por último, la responsividad medida en la muestra sin buffer (B0), es de 80.4 mA/W y 203.7 mA/W para las longitudes de onda de 518 nm (verde) y 637 nm (rojo), respectivamente.

4.- Conclusión

Se ha analizado el efecto de la introducción de una capa buffer de a-Si sobre la calidad del material y las propiedades fotovoltaicas de las células solares de heterounión de n-InN sobre p-Si(100). No se observaron cambios en la estructura del material ni en la morfología. Sin embargo, se encontró un aumento en la energía de gap desde 1.73 eV hasta 1.92 eV con la introducción del buffer.

El rendimiento fotovoltaico de los dispositivos se estudió mediante su curva J-V en oscuridad y bajo iluminación de 1 sol AM 1.5G. De estas medidas se puede concluir que la introducción de la capa buffer produce un aumento tanto de la resistencia serie como paralelo del dispositivo, incrementándose con el espesor del buffer de a-Si. Además, el buffer produce un aumento de la J_{SC} hasta ~ 20 mA/cm² y del V_{OC} hasta ~ 0.37 V para 4 nm y

15 nm de buffer. Sin embargo, para espesores elevados de buffer (25 nm) la heterounión se deteriora y su rendimiento se vuelve despreciable. Lo anterior apunta a un efecto pasivante de la capa buffer de a-Si empleada. En concreto, los mejores resultados se obtienen para una capa de 15 nm de espesor, resultando en un aumento hasta del doble en la eficiencia de conversión comparado con heterouniones sin buffer (desde 1.13% al 2.27%).

Agradecimientos. Se agradece la financiación económica de los siguientes proyectos: SINFOTON2 (CMP2018/NMT4326), GRISA (CM/JIN/202-021) y CAM-Project (EPU-DPTO/2020/012).

Referencias

- [1] Md Zunaid Baten, et. al., “III-nitride light-emitting devices”, *Photonics*, 8(10), 430, **2021**.
- [2] J. Wu et. al., “Superior radiation resistance of $In_{1-x}Ga_xN$ alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system”, *J. Appl. Phys.*, 94, 6477, **2003**.
- [3] E. Trybus et. al., “InN: A material with photovoltaic promise and challenges”, *Journal of Crystal Growth*, 288, 218-224, **2006**.
- [4] A. Jain et. al., “Evolution of surface morphology and film stress during MOCVD growth of InN on sapphire substrates”, *Journal of Crystal Growth*, 269, 128-133, **2004**.
- [5] P. Specht et. al., “The influence of structural properties on conductivity and luminescence of MBE grown InN”, *Journal of Crystal Growth*, 269, 111-118, **2004**.
- [6] T.J. Kistenmacher, et. al., “Characterization of rf sputtered InN films and AlN/InN bilayers on (0001) sapphire by the X-ray precession method”, *Journal of Applied Physics*, 68, 1541, **1990**.
- [7] N. Saito and Y. Igasaki, “Electrical and optical properties of InN films prepared by reactive sputtering”, *Applied Surface Science*, 169-170, 349-352, **2001**.
- [8] Motlan, E.M. Goldys and T.L. Tansley, “Optical and electrical properties of InN grown by radio-frequency reactive sputtering”, *Journal of Crystal Growth*, 241, 165-170, **2002**.
- [9] H. Shinoda and N. Mutsukura, “Structural and optical properties of InN films prepared by radio frequency magnetron sputtering”, *Thin Solid Films*, 503, 8-12, **2006**.
- [10] J. Zhang, et. al., “Fabrication and photoluminescence of ordered GaN nanowire arrays”, *J. Chem. Phys.*, 115, 5714, **2001**.
- [11] J. Zhang, et. al., “Micro-raman investigation of GaN nanowires prepared by direct reaction Ga with NH_3 ”, *Chemical Physics Letters*, 345, 372-376, **2001**.
- [12] M. He, et. al., “Growth of GaN nanowires by direct reaction of Ga with NH_3 ”, *Journal of Crystal Growth*, 231, 357-365, **2001**.
- [13] H.P. Trung Nguyen, et. al., “InN p-i-n nanowire solar cells on Si”, *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 17, 4, **2011**.
- [14] J. Grandal, et. al., “Accommodation mechanism of InN nanocolumns grown on Si(111) substrates by molecular beam epitaxy”, *Applied Physics Letters*, 91, 021902, **2007**.
- [15] S. Nishikawa, et. al., “Growth of InN nanocolumns by RF-MBE”, *Journal of Crystal Growth*, 301-302, 490-495, **2007**.
- [16] J. Segura-Ruiz, et. al., “Optical studies of MBE-grown InN nanocolumns: Evidence of surface electron accumulation”, *Physical review B*, 79, 115305, **2009**.
- [17] R. Blasco, et. al., “Low-to-mid Al content ($x = 0-0.56$) $Al_xIn_{1-x}N$ layers deposited on Si(100) by radio-frequency sputtering”, *Physica Status Solidi B*, 1900575, **2020**.
- [18] S. Valdueza-Felip, et. al., “ $Al_xIn_{1-x}N$ on Si(100) solar cells ($x = 0-0.56$) deposited by RF sputtering”, *Materials*, 13, 2336, **2020**.
- [19] R.S. Bonilla, et. al., “Dielectric surface passivation for silicon solar cells: A review”, *Phys. Status Solidi A*, 214, No. 7, 1700293, **2017**.
- [20] M. Sun, et. al., “Amorphous silicon films and nanocolumns deposited on sapphire and GaN by DC sputtering”, *Phys. Status Solidi b*, 2200578, **2023**.
- [21] M. Sun, et. al., “Comparison of the Material Quality of $Al_xIn_{1-x}N$ ($x=0-0.50$) Films Deposited on Si(100) and Si(111) at Low Temperature by Reactive RF Sputtering”, *Materials*, 15, 7373, **2022**.
- [22] L. Monteagudo-Lerma, et. al., “Morphology and arrangement of InN nanocolumns deposited by radio-frequency sputtering: Effect of the buffer layer”, *Journal of Crystal Growth*, 434, 13-18, **2016**.
- [23] H. He, et. al., “Band gap energy and bowing parameter of In-rich InAlN films grown by magnetron sputtering”, *Applied Surface Science*, 256, 1812-1816, **2010**.
- [24] R. Saive, “S-shaped current-voltage characteristics in solar cells: a review”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, **2019**.

Densificación electroóptica de alta densidad de peines de frecuencias ópticas generados por láseres semiconductores de conmutación de ganancia inyectados ópticamente

High-density electro-optical densification of optical frequency combs generated by optically injected gain-switched semiconductor lasers.

Alejandro ROSADO⁽¹⁾, María R. FERNÁNDEZ-RUIZ⁽²⁾, Pedro CORREDERA⁽³⁾, Jose Manuel TIJERO⁽¹⁾, Ignacio ESQUIVIAS⁽¹⁾

1. CEMDATIC- E.T.S.I Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España.
2. Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, Edificio Politécnico Superior, 28805 Alcalá de Henares, España
3. Instituto de Óptica 'Daza de Valdes', IO-CSIC, 28006 Madrid, España.

Persona de contacto: Alejandro Rosado (alejandro.rosado@upm.es).

RESUMEN:

En este trabajo se describe la generación de peines ópticos de frecuencias (OFCs) en un láser de semiconductor, empleando una combinación de conmutación de ganancia (GS) con pulsos eléctricos e inyección óptica externa (OI). En una segunda etapa, la fase de los pulsos ópticos resultantes se modula con una secuencia de bits pseudoaleatoria (PRBS) mediante un modulador electroóptico. En el dominio de la frecuencia, se produce una densificación del peine original, llegando a tener 135.000 tonos con una separación de 488 kHz. Aunque el método de densificación no se ha llevado al límite todavía, estos resultados mejoran en un factor de 200 el número de tonos conseguido en un OFC generado mediante un láser de semiconductor conmutado en ganancia inyectado y densificados mediante otras técnicas.

Palabras clave: Láseres de semiconductor, peines de frecuencia ópticos, conmutación de ganancia, inyección óptica, modulación electroóptica.

ABSTRACT:

We report on the generation of broad and flat optical frequency combs (OFC) from a laser diode by employing a combination of gain-switching (GS) with electrical pulses and optical injection (OI). The combs are subsequently densified by modulating the phase of the generated optical pulses with an electro-optical modulator driven by a pseudo-random bit sequence (PRBS). The resulting combs have 135,000 tones within 10 dB separated by an ultra-low free spectral range of 488 kHz. Although the densification method has not been pushed to its limit, these results improve by a factor of 200 the number of tones achieved in OFCs generated from laser diodes and densified by other techniques.

Key words: Optical Frequency Combs, Gain Switching, Optical Injection, Semiconductor lasers, Electro-optic modulation.

1.- Introducción

Un peine óptico de frecuencia es un grupo de tonos ópticos (también denominados líneas, picos o portadoras) espaciados uniformemente. Estas señales son coherentes entre sí, es decir, están altamente correlacionadas en fase, y surgen generalmente a partir de un tren de pulsos estrechos, cuya correspondencia en el dominio de frecuencias es un conjunto de tonos mutuamente coherentes. Durante las últimas décadas, este tipo de señales han encontrado numerosos campos de aplicación, tales como la metrología [1], las comunicaciones ópticas [2], astronomía [3], espectroscopia molecular [4] y LIDAR [5], entre otros.

En los últimos años, los láseres semiconductores se han convertido en uno de los recursos más eficaces para la generación de OFCs, debido a sus características inherentes, tales como su bajo coste, tamaño reducido y potencial de integración en circuitería fotónica.

La generación de OFCs en láseres de semiconductor se puede lograr utilizando diferentes técnicas. Entre las más habituales se encuentran: la conmutación de ganancia (GS) [6], el bloqueo de modo [7] o la modulación electroóptica externa [8]. En el pasado, se consiguió generar OFCs de muy alta calidad empleando únicamente una combinación de inyección óptica y conmutación de ganancia,

donde el dispositivo semiconductor se alimentaba usando una superposición de una corriente de polarización y una corriente de radiofrecuencia (RF) de gran amplitud [9,10]. El principal problema de esta técnica radica en el hecho de que, para frecuencias inferiores a las oscilaciones de relajación, los peines resultantes son de baja calidad para su uso en aplicaciones que requieren OFCs a estas frecuencias. Algunos de estos problemas se pudieron mitigar enormemente sustituyendo la corriente sinusoidal de RF por pulsos eléctricos de bajo ciclo de trabajo [11]. Sin embargo, algunas de estas aplicaciones, como el láser ranging o la generación de señales de microondas, requieren OFCs bien resueltos con tasas de repetición inferiores a 100 MHz, y, por lo tanto, demandan el uso de pulsos eléctricos con ciclos de trabajo extremadamente bajos, lo que deriva en trenes de pulsos ópticos muy poca potencia media. Esto hace que a su vez este enfoque sea poco práctico para espaciamientos de línea por debajo de unas pocas decenas de MHz.

Para solventar este problema, se han empleado varias técnicas de densificado para reducir el espaciado entre líneas del peine sin perder potencia en el proceso. Una de las más populares (y de las más exitosas), es la utilizada en [12], en la que un OFC generado en un láser de modo bloqueado se densifica hasta

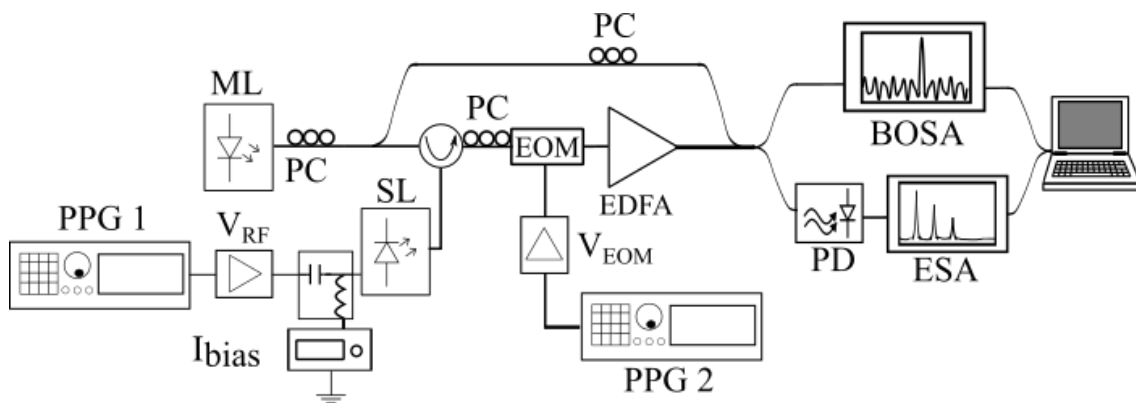


Figura 1. Montaje experimental para la generación y densificación de peines de frecuencia. ML: láser maestro, SL: laser esclavo, EOM: modulador electroóptico, PC: controlador de polarización, EDFA: amplificador de fibra dopada con erbio, BOSA: analizador de espectros ópticos basado en efecto Brillouin PD: fotodetector, ESA: analizador de espectros eléctricos, PPG: generador de tramas

un factor de 127 (de 100 MHz a 787 kHz) empleando un modulador de fase externo alimentado por una secuencia de bits pseudoaleatoria (PRBS). En este trabajo se combinan ambos conceptos, es decir, la generación de OFC en láseres de semiconductor conmutados en ganancia e inyectados externamente y la modulación de fase externa usando una señal PRBS. La combinación de estas técnicas nos permite generar OFC densificados de tasa de repetición ultra baja con prestaciones superiores mediante una arquitectura sencilla, de bajo coste y potencialmente integrable con factores de densificación superiores a 2000.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2, se mostrará el montaje experimental empleado para generar y densificar los OFCs. Los resultados experimentales se describirán y analizarán en la sección 3. Las conclusiones se presentarán en la sección 4.

2.- Montaje experimental

El montaje experimental se muestra en la Fig. 1. El generador de peines está constituido por una arquitectura maestro-esclavo típica. Este tipo de arquitecturas permiten la inyección de luz, mediante el uso de un láser externo o maestro, al láser que está conmutado en ganancia, también conocido como láser esclavo. El láser maestro es un láser de semiconductor cuya longitud de onda es sintonizable en toda la banda C. Además, tiene ancho de línea muy estrecho (inferior a 100 kHz).

El láser esclavo, un láser de modo discreto (DML), se conmuta por ganancia utilizando una combinación de corriente continua y pulsos eléctricos provenientes de un generador de tramas (PPG). Los pulsos eléctricos se han amplificado hasta alcanzar un valor pico a pico de 2,5 V con una frecuencia de repetición de 500 MHz. Tras esto, el peine resultante es densificado externamente con un modulador electroóptico (EOM), cuyo $V\pi = 4,55$ V. Para ello, el modulador es alimentado por una secuencia PRBS de longitud máxima, generada a su vez por un segundo generador de tramas. La tasa binaria del PRBS es de 0,5 Gb/s y la longitud de secuencia es de 1023. Es importante remarcar que los pulsos ópticos y la tasa binaria de la PRBS deben sincronizarse para

producir las transiciones de fase en el tiempo entre pulsos ópticos consecutivos. Por lo tanto, la tasa de bit de la PRBS se ha fijado para que coincida con la tasa de repetición de los pulsos.

Posteriormente, la señal óptica se amplifica mediante un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) y luego se divide en dos caminos diferentes. El análisis del espectro óptico se realiza mediante un analizador de espectros ópticos basado en el efecto Brillouin (BOSA), y permite caracterizarlo con una resolución de 10 MHz. El otro camino es para las medidas heterodinas, ya que la resolución del BOSA constituye una limitación importante para un análisis en profundidad de cada línea del peine densificado. Se emplean varios controladores de polarización (PC) para maximizar la alineación de polarización de las señales ópticas.

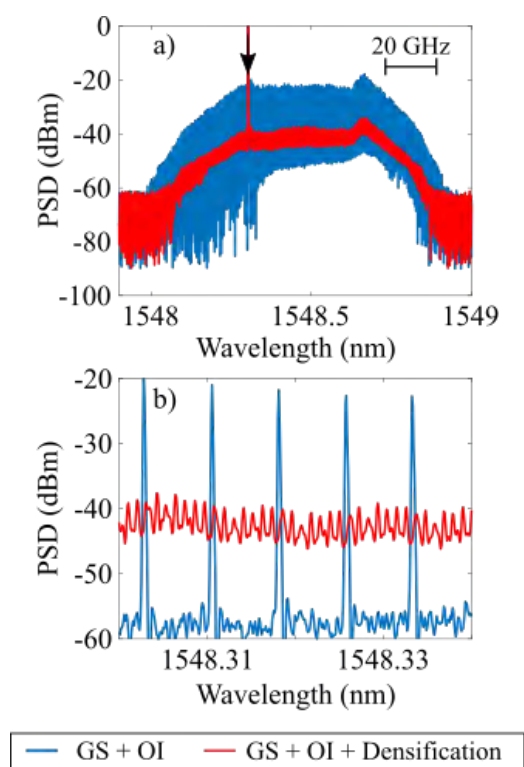


Figura 2. Espectro óptico de la luz emitida por el láser bajo excitación eléctrica pulsada a 0,5 GHz (véanse en el texto las condiciones de conducción) sin (trazo azul) y con densificación (línea roja). Fig.2(b) es una región ampliada de Fig. 2(a). La flecha indica la inyección óptica.

3.- Resultados experimentales y discusión

Para la validación experimental de esta técnica, los OFCs fueron generados mediante GS con excitación pulsada en combinación con inyección óptica. La calidad de los OFCs se puede determinar mediante el cálculo de dos parámetros: la anchura espectral a 10 dB (δf_{10}) y la relación portadora/ruido (CNR), tal y como vienen definidos en [10]. El peine resultante muestra unas altas prestaciones a una frecuencia de repetición de 500 MHz, como se detallará más adelante.

Posteriormente, la densificación del OFC se llevó a cabo implementando una etapa adicional que involucra al EOM, tal y como se muestra en la Fig. 1. Las condiciones de medida para el peine generado por GS y OI fueron: $I_{bias} = 12,5$ mA, $V_{RF} = 2,5$ V, $P_{inj} = 7$ dBm, y $\lambda_{inj} = 1548,26$ nm. La señal aplicada al modulador tenía $N = 1023$ bits a 500 Mbit/s y $V_{PRBS} = 4,9$ V. El valor óptimo de V_{PRBS} tiene que ser necesariamente muy próximo al valor de $V\pi$ del modulador.

La Fig. 2 muestra los espectros ópticos del láser generados por GS y OI sin (azul traza) y con densificación (traza roja). Como se reportó anteriormente en [11,13], el uso combinado de pulsos eléctricos con inyección óptica conduce a la generación de OFCs con unas altas prestaciones, tal y como se puede observar claramente en la Fig. 2(a). En estas condiciones, la CNR es de 34 dB y δf_{10} es de 70 GHz (correspondiente a 142 tonos). Cuando el peine original se densifica hasta frecuencias inferiores a la resolución del BOSA, el espectro óptico se convierte en una envolvente incoherente (sin presencia aparente de tonos, excepto el de la inyección) con una anchura similar a la del peine original. Además, la amplitud de este se ha visto disminuida más de 20 dB. Esto se debe a dos fenómenos respectivamente: el primero, a la resolución limitada del BOSA para OFCs cuyos tonos estén separados 488 kHz, y el segundo, a la distribución de la potencia de los tonos originales a los nuevos tonos surgidos debido a la densificación. Debido al efecto de ambos fenómenos, los tonos del espectro original se han suprimido casi por completo, como puede obser-

varse en la Fig. 2(b). Por lo tanto, para solventar el problema de la resolución se aplicó la técnica de la detección heterodina. El objetivo de esta es el de medir OFC mapeándolo en la región de las radiofrecuencias, donde puede analizarse con mayor resolución que con el BOSA (Fig. 2). El mapeo se obtiene combinando el peine densificado con el láser maestro, que actúa como oscilador local, haciendo que el batido entre líneas sea completamente coherente.

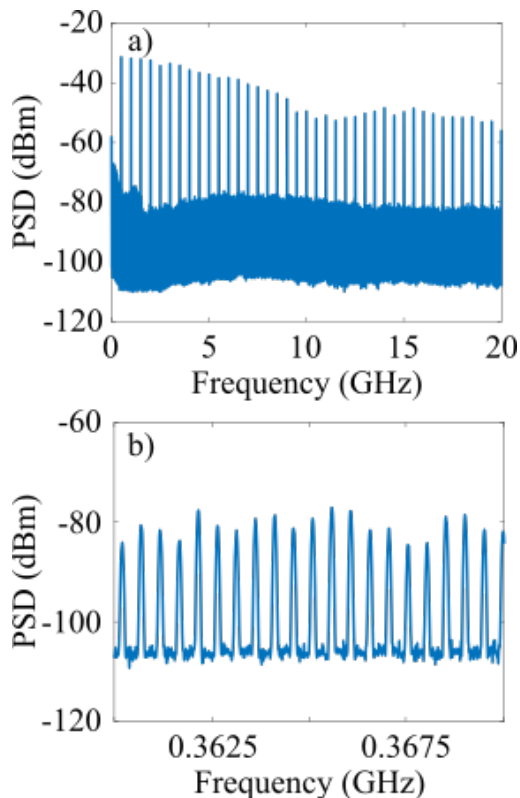


Figura 3. Espectro experimental de radiofrecuencia de la señal de batido de un peine generado a 500 MHz y densificado hasta 488 kHz. El panel (b) es una ampliación del panel (a). Esta medida se tomó en las mismas condiciones de operación en la Fig. 2. Los parámetros del ESA fueron RBW = 51 kHz; Numero de medidas = 20

La Fig. 3(a) muestra el espectro eléctrico resultante de la medida heterodina. Dicho espectro está formado principalmente por líneas que están asociadas a diferentes contribuciones: (i) términos de detección directa correspondientes a la modulación en intensidad del láser, los cuales tienen gran amplitud a múltiplos de la frecuencia de repetición (es decir, aquellos tonos con mayor amplitud en la Fig.

3(a)); y los picos del espectro densificado, que tienen menor amplitud y están separados 488 kHz (véase la Fig. 3(b)), que se deben principalmente al batido entre los tonos del peine densificado y el oscilador local. Estas líneas, aparte de tener menor amplitud, tienen una separación correspondiente a la frecuencia del densificado, es decir, $500 \text{ MHz} / 1023 = 488 \text{ kHz}$.

Estas líneas presentan una CNR de alrededor de 22 dB, casi constante en todo el espectro, y con una alta planitud, lo que indica un proceso de densificación muy eficiente. Es importante mencionar que, como el ESA sólo muestra valores positivos de la frecuencia, el espectro RF corresponde al espectro eléctrico plegado del batido entre el OFC y la emisión de onda continua, es decir, en la Fig. 3 los picos corresponden a la superposición de tonos con frecuencias negativas y positivas.

Además, obtuvimos resultados experimentales similares empleando diferentes combinaciones de la frecuencia de repetición del peine, tasa binaria, y longitudes de la PRBS. Por ejemplo, utilizando una frecuencia de repetición de 500 MHz, con una tasa binaria de 500 Mbit/s y una longitud de $N = 2047$, obtuvimos un peine densificado con una separación entre tonos de 244 kHz, con unas altas prestaciones en términos de planitud, CNR y anchura espectral. Estos resultados demuestran la versatilidad de esta técnica para seleccionar la frecuencia resolución alcanzada por los peines sin reducir la potencia media.

4.- Conclusiones

En resumen, los OFC generados por GS y OI en láseres de semiconductor pueden ser eficientemente densificados mediante la modulación de la fase de manera externa usando señales PRBS. Esto permite obtener OFCs con una separación entre líneas por debajo del megahercio, sin pérdida aparente de potencia óptica. Una combinación adecuada de frecuencia de repetición, tasa binaria y longitud de la señal PRBS, permite un ajuste bastante flexible del espaciado entre líneas. Aunque en estos experimentos, la técnica de densificado no se ha llevado al límite de operación, hemos obtenido peines de frecuencia con una tasa de repetición ultra baja (488 kHz), con más de

135.000 líneas en 70 GHz y un rango dinámico relativamente alto.

En conclusión, los resultados de este trabajo contribuirán a reducir la brecha entre las fuentes de peines de frecuencia simples y potencialmente integrables y sus aplicaciones, abriendo nuevos horizontes para incorporar soluciones rentables en aplicaciones que se benefician de que la separación de líneas entre los tonos de un peine esté en el rango de los kilohercios, como la espectroscopía, el láser ranging o la generación de señales de microondas.

Referencias

- [1] T. ROSENBAND, D. B. HUME, P. O. SCHMIDT, C. W. CHOU, A. BRUSCH, L. LORINI, W. H. OSKAY, R. E. DRULLINGER, T. M. Fortier, J. E. STALNAKER, S. A. DIDDAMS, W. C. SWANN, N. R. NEWBURY, W. M. ITANO, D. J. WINELAND, and J. C. BERGQUIST *Frequency ratio of Al⁺ and Hg⁺ single-ion optical clocks; metrology at the 17th decimal place*. Science, 319(5871), 1808-1812. (2008).
- [2] P. MARIN-PALOMO, J.N. KEMAL, M. KARPOV, A. KORDTS, J. PFEIFLE, M.H.P. PFEIFFER, P. TROCHA, S. WOLF, V. BRASCH, M.H. ANDERSON, R. ROSENBERGER, K. VIJAYAN, W. FREUDE, T.J. KIPPENBERG and C. KOOS, *Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications*, Nature 546 (7657) (2017) 274–279.
- [3] E. OBRZUD, M. RAINER, A. HARUTYUNYAN, M.H. ANDERSON, J. LIU, M. GEISELMANN, B. CHAZELAS, S. KUNDERMANN, S. LECOMTE, M. CECCONI, A. GHEDINA, E. MOLINARI, F. PEPE, F. WILDI, F. BOUCHY, T.J. KIPPENBERG and T. HERR, *A microphotonic astrocomb*, Nat. Photonics 13 (1) (2018) 31–35.
- [4] C. QUEVEDO-GALÁN, V. DURÁN, A. ROSADO, A. PÉREZ-SERRANO, J.M.G. TIJERO and I. ESQUIVIAS, *Gain-switched semiconductor lasers with pulsed excitation and optical injection for dual-comb spectroscopy*, Opt. Express 28 (22) (2020) 33307.
- [5] I. CODDINGTON, W.C. SWANN, L. NENADOVIC and N.R. NEWBURY, *Rapid and precise absolute distance measurements*

- at long range, *Nat. Photonics* 3 (6) (2009) 351–356.
- [6] M. IMRAN, P.M. ANANDARAJAH, A. KASZUBOWSKA-ANANDARAJAH, N. SAMBO and L. POTI, *A survey of optical carrier generation techniques for terabit capacity elastic optical networks*, *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 20 (1) (2018) 211–263.
- [7] J.YE and S.T. CUNDIFF. *Femtosecond optical frequency comb: principle, operation and applications*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [8] M. FUJIWARA, M. TESHIMA, J.KANI, H. SUZUKI, N. TAKACHIO and K. IWATSUKI. *Optical carrier supply module using flattened optical multicarrier generation based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation*. *Journal of lightwave technology*, 21(11), 2705, 2003
- [9] A. ROSADO, A. PEREZ-SERRANO, J.M.G. TIJERO, A.VALLE, L. PESQUERA and I. ESQUIVIAS, *Numerical and experimental analysis of optical frequency comb generation in gain-switched semiconductor lasers*, *IEEE J. Quantum Electron.* 55 (6) (2019) 1–12.
- [10] A. ROSADO, A. PÉREZ-SERRANO, J.M.G. TIJERO, Á. VALLE, L. PESQUERA and I. ESQUIVIAS, *Experimental study of optical frequency comb generation in gain-switched semiconductor lasers*, *Opt. Laser Technol.* 108 (2018) 542–550.
- [11] A. ROSADO, A. PÉREZ-SERRANO, J.M.G. TIJERO, Á. VALLE, L. PESQUERA and I. ESQUIVIAS, *Enhanced optical frequency comb generation by pulsed gain-switching of optically injected semiconductor lasers*, *Opt. Express* 27 (6) (2019) 9155.
- [12] N.B. HÉBERT, V. MICHAUD-BELLEAU, S. MAGNAN-SAUCIER, J.-D. DESCHÊNES and J. GENEST, *Dual-comb spectroscopy with a phase-modulated probe comb for sub-MHz spectral sampling*, *Opt. Lett.* 41 (10) (2016) 2282
- [13] A. ROSADO, E.P. MARTIN, A. PÉREZ-SERRANO, J.M.G. TIJERO, I. ESQUIVIAS and P.M. ANANDARAJAH, *Optical frequency comb generation via pulsed gain-switching in externally-injected semiconductor lasers using step-recovery diodes*, *Opt. Laser Technol.* 131 (2020) 106392.

Detección de chirps en láseres con realimentación de frecuencia desplazada

Chirp detection in frequency-shifted feedback lasers

Miguel CUENCA, Haroldo MAESTRE, Germán TORREGROSA y
Carlos R. FERNÁNDEZ-POUSA

Instituto de Investigación en Ingeniería I3E, Universidad Miguel Hernández,
Av. Universidad s/n, 03202 Elche

Persona de contacto: M. Cuenca (miguel.cuenca02@goumh.umh.es).

RESUMEN:

La emisión en láseres con realimentación de frecuencia desplazada puede ser entendida en base a modos de la cavidad pasiva con frecuencia progresiva (*chirp*), generados por emisión espontánea. La detección de estos *chirps*, que solamente ha sido realizada a bajos desplazamientos de frecuencia, se extiende en este trabajo al régimen de grandes desplazamientos mediante detección heterodina y correlación digital. Adicionalmente, se identifica la recuperación de un espectro óptico discreto a subarmónicos de la FSR en cavidades resonantes debido a la existencia de correlaciones entre modos de tipo *chirp* y al efecto Talbot en el dominio espectral.

Palabras clave: Láseres, desplazamiento de frecuencia, acusto-óptica, modo, chirp, efecto Talbot espectral.

ABSTRACT:

The emission of frequency-shifted feedback lasers can be understood on the basis of chirped cavity modes generated by spontaneous emission. The detection of these chirps, which has only been realized for small frequency shifts, is here extended to large shifts by use of heterodyne detection and digital correlation. It is also identified the recovery of a discrete optical spectrum at subharmonics of the FSR in resonant cavities due to the existence of correlations between chirped modes and to the spectral Talbot effect.

Key words: Lasers, frequency shifting, acousto-optics, modes chirp, spectral Talbot effect.

1.- Introducción

Los láseres con realimentación de frecuencia desplazada (*frequency-shifted feedback lasers, FSFL*) se basan en la introducción en la cavidad láser de un elemento que traslada la frecuencia de la radiación recirculante. Conocidos desde los albores de la teoría láser [1, 2] y ampliamente estudiados a finales del pasado siglo [3-6], están recibiendo creciente interés debido a que presentan emisión tanto en onda continua (CW) como pulsada de manera espontánea, en este caso en forma de pulsos *Q-switched* (QS) o *modelocked* (ML). Esta

característica los hace atractivos en diversas bandas, en particular en infrarrojo medio [7], donde los métodos usuales de generación de emisión ML pueden resultar difíciles de implementar.

Desde el punto de vista teórico los FSFL desafían, en cierta medida, la imagen estándar de los láseres convencionales. En estos, la emisión se entiende en función de los modos en frecuencia de la cavidad pasiva. En los FSFL, por el contrario, el propio concepto de modo monocromático debe ser reelaborado, puesto que una frecuencia generada dentro del

resonador cambia de valor en cada recirculación. Este hecho previene la existencia de modos de frecuencia análogos a los de las cavidades de Fabry-Pérot o en anillo, y así el espectro de los FSFL aparece continuo en la salida del espectrómetro y no espaciado a intervalos del rango espectral libre (FSR) de la cavidad [1,3].

El concepto análogo de modo de una cavidad con desplazamiento de frecuencia, entendido como la distribución de campo que resulta invariante tras una recirculación sin pérdidas, es el de una onda de frecuencia progresiva o *chirp* lineal [1]. El valor del *chirp* está dado por el cociente entre el desplazamiento de frecuencia f_s y el tiempo de recirculación en la cavidad, $\tau_c = 1/FSR$. Desde este punto de vista, la emisión CW se entiende como la generación de estos *chirps* de forma sostenida a partir de emisión espontánea. Los *chirps* recorren la banda de amplificación de la cavidad activa en la dirección del desplazamiento de frecuencia, produciendo un pico en el límite espectral donde ganancia iguala a pérdidas y presentan, por tanto, un espectro continuo [1, 3-5]. El régimen QS de los FSFL, por su parte, puede ser entendido de manera análoga, con la única salvedad de que la generación de *chirps* a partir de emisión espontánea está conmutada por oscilaciones de relajación sostenidas del medio activo [5].

Sin embargo, y por motivos que se detallan a continuación, la detección de estos *chirps* por métodos convencionales (filtrado óptico y posterior detección) solamente es posible en el llamado régimen de bajo desplazamiento de frecuencia, $f_s\tau_c < 1$, como así ha sido demostrado experimentalmente [4]. Por su parte, el concepto de modo *chirp* en un FSFL en el límite de altos desplazamientos ($f_s\tau_c > 1$) ha sido discutido, precisamente, por su falta de evidencia experimental [8].

En este trabajo se presenta, por primera vez hasta nuestro conocimiento, la detección experimental de *chirps* en el límite de altos desplazamientos de frecuencia en un FSFL de fibra a 1550 nm. Esta detección se basa en la recepción heterodina de un FSFL operando en régimen QS y su posterior procesado digital. Se presentan dos evidencias, la primera basada de detección por correlación y la segunda

por la identificación de un fenómeno de efecto Talbot espectral [9, 10] en cavidades resonantes, esto es, en aquellas para las que $f_s\tau_c = p/q$, siendo p y q índices enteros. Este efecto, en particular, requiere la presencia del factor de *chirp* buscado y es de particular relevancia puesto que evidencia la aparición de un espectro discreto diferente a las usuales estructuras continua y de Fabry-Pérot. Este trabajo es una extensión de un estudio previo sobre los efectos de la recirculación de la emisión espontánea en el mismo sistema experimental [11].

2.- Modos *chirp* de un FSFL

La relación entre el campo inicial $E(t)$ y final $E'(t)$ tras una recirculación en una cavidad en anillo con desplazamiento de frecuencia y sin pérdidas ni dispersión está dada por:

$$E'(t) = e^{2\pi j f_s t} E(t - \tau_c) \quad (1)$$

Las distribuciones de campo invariantes ante esta transformación son *chirps* de constante f_s/τ_c y frecuencia $\nu_k = k FSR + f_s/2$ [1]:

$$E_k(t) = A_k e^{\pi j \frac{f_s}{\tau_c} t^2} e^{2\pi j \left(\frac{k}{\tau_c} + \frac{f_s}{2}\right) t} \quad (2)$$

donde A_k es una amplitud compleja arbitraria y k es un índice entero. Un campo general se describe por tanto como:

$$E(t) = e^{\pi j \frac{f_s}{\tau_c} t^2} e^{\pi j f_s t} \sum_k A_k e^{2\pi j \frac{k}{\tau_c} t} \quad (3)$$

Nótese que el límite $f_s \rightarrow 0$ remite a la estructura de Fabry-Pérot de una cavidad en anillo sin desplazamiento de frecuencia.

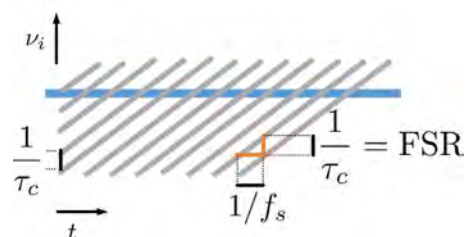


Fig. 1: Representación en el plano tiempo-frecuencia del campo descrito por la ecuación (3). La banda azul de frecuencias representa la sección sondeada por un filtro estrecho.

La frecuencia instantánea de (2) está dada por $\nu_i(t) = f_s t/\tau_c + kFSR + f_s/2$. Si fijamos una frecuencia de observación, $\nu_i = cte.$, sucesivos *chirps* se observan a intervalos $1/f_s$, mientras que a un tiempo dado éstos difieren en una frecuencia $1/\tau_c = FSR$. La imagen

resultante, representada en la Figura 1, es el llamado modelo de peine en movimiento (*moving comb model*) de la emisión de un FSFL [4, 6, 8] ya que, como muestra (3), el campo es un peine de frecuencias que se van desplazando de acuerdo al factor de *chirp*.

La detección de estos *chirps* se realiza de forma habitual mediante el filtrado de una banda muy estrecha de frecuencia seguida de detección directa [4]. Lo que se observa es el esperado tren de pulsos separados por un intervalo $1/f_s$, como muestra la banda azul de la Figura 1. Sin embargo, esta detección sólo es posible en el régimen de bajo desplazamiento de frecuencia [4, 8]. En efecto, un espectrómetro de resolución $\Delta\nu < FSR$ requiere la integración de una señal temporal de duración $T \sim 1/\Delta\nu$. Por otra parte, para que *chirps* sucesivos queden resueltos en el tiempo se precisa que $T < 1/f_s$, de modo que:

$$\tau_c = \frac{1}{FSR} < \frac{1}{\Delta\nu} \sim T < \frac{1}{f_s} \quad (4)$$

lo cual implica que $f_s \tau_c < 1$.

3.- Sistema experimental

El FSFL está constituido, como se muestra en la Figura 2, por una cavidad de fibra en anillo donde la recirculación unidireccional queda asegurada por la presencia de un aislador. La sección de ganancia es un EDFA construido en nuestro laboratorio a partir de una longitud de 60 cm de fibra altamente dopada (Liekki Er80/8), seguido por una red de Bragg sobre fibra (FBG, Technica T10) de perfil aproximadamente gaussiano, reflectividad en pico del 51% y anchura 1.63 nm (FWHM) alrededor de 1550 nm que sirve para controlar la anchura espectral de la emisión. El desplazamiento de frecuencia se realiza a través de un modulador acusto-óptico conectado a fibra (AA Optoelectronic) que produce desplazamientos positivos de frecuencia en el rango 80 ± 5 MHz. La FSR del lazo es de 9.216 MHz, ($\tau_c = 108.51$ ns); el rango de productos $f_s \tau_c$ alcanzables es por tanto 8.1 – 9.2.

Las pérdidas del lazo se controlan mediante la aplicación de distintas potencias de radiofrecuencia en el modulador, mientras que el EDFA opera a una ganancia constante de 17 dB. Con pérdidas decrecientes, el lazo pasa de un régimen de baja recirculación, debajo del

umbral, a un régimen CW por encima del mismo. Si las pérdidas se hacen aún menores, el FSFL entra en régimen QS debido a la saturación dinámica del EDFA. Para pérdidas aún menores, con una ganancia en exceso en el pico de la FBG de unos 2 dB por encima del umbral, se obtiene espontáneamente emisión ML para el caso de cavidades resonantes [11].

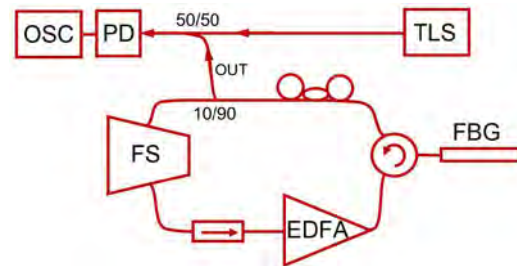


Fig. 2: Esquema del Sistema experimental: FS, desplazador acusto-óptico de frecuencia; TLS, fuente láser sintonizable; PD, fotodiodo rápido (40 GHz BW), y OSC, osciloscopio.

La detección de *chirps* se realiza a partir de un receptor heterodino basado en un láser sintonizable (TLS, Keysight N7711A, 10 kHz de anchura espectral) centrado en el pico de emisión del FSFL. La detección se realiza en régimen QS para maximizar la SNR de la señal heterodina. Un ejemplo de un pulso QS típico puede observarse en la Figura 3. Las trazas de intensidad y de señal heterodina se digitalizan con un osciloscopio de muestreo (Lecroy SD6000) de 6 GHz de ancho de banda.

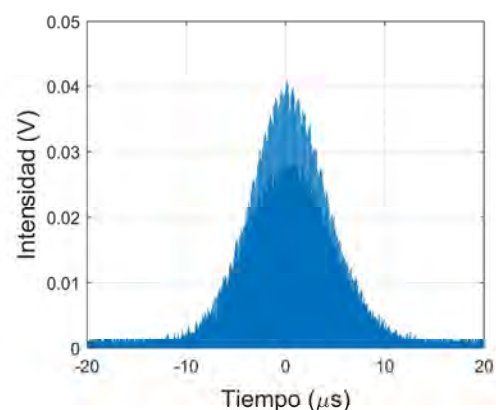


Fig. 3: Intensidad de un pulso QS típico.

4.- Intensidad y señal heterodina

En primer lugar, se procedió a la caracterización de la intensidad de la emisión del FSFL para diversos valores de producto $f_s \tau_c$. En la

Figura 4 se representan, de arriba hacia abajo, la intensidad en el pico de QS con (a) $f_s = 80$ MHz, describiendo una situación donde el producto $f_s \tau_c$ es aproximadamente irracional, y en (b) y (c) en cavidades resonantes de productos respectivos 9 y 17/2.

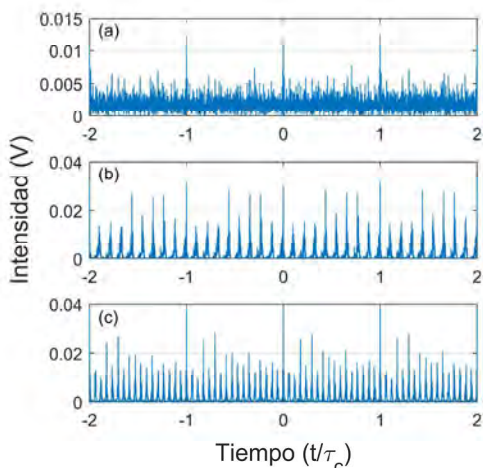


Fig. 4: Intensidad en el pico de emisión QS del FSFL para distintos valores del producto $f_s \tau_c$: (a) $f_s = 80$ MHz, (b) $f_s \tau_c = 9$ y (c) $f_s \tau_c = 17/2$.

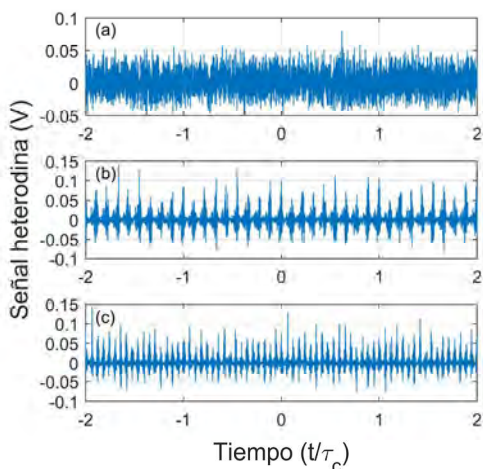


Fig. 5: Señal heterodina en el pico de QS del FSFL para los tres valores del producto $f_s \tau_c$ citados en la Fig. 4.

Se observa que, en el primer caso, la intensidad tiene una estructura aleatoria pero cuasi-periódica, con periodo igual a τ_c , debido a la recirculación de la emisión espontánea generada en el EDFA [11]. En los casos resonantes se produce la organización de la recirculación de la emisión espontánea en pequeños pulsos separados temporalmente por $\tau_c/p = 1/ql_f$.

Esta estructura evidencia la existencia de correlaciones entre las amplitudes A_k en (3), las cuales se achacan al efecto Kerr [11] que también es responsable de la emisión ML [5]. Las respectivas trazas de señal heterodina se presentan en la Figura 5, donde en (b) y (c) se observa la presencia de pulsos de emisión espontánea, ausente en (a).

5.- Detección por correlación digital

La señal heterodina con el oscilador local (LO) a frecuencia ν_0 está dada por:

$$s(t) = |E_{LO} e^{2\pi j \nu_0 t} + E(t)|^2 \quad (5)$$

de modo que contiene, además de las intensidades del LO y del FSFL, un término de mezcla de la forma $E_{LO}^* E(t)$. Este término, de acuerdo a (3), contiene *chirps* de frecuencia creciente, mientras que su complejo conjugado contiene *chirps* de frecuencia decreciente. La correlación se presenta con respecto a los primeros, de modo que $s(t)$, una vez digitalizada, se correla con un *chirp* del tipo $\exp(-\pi j f_s t^2 / \tau_c)$ definido en el intervalo de tiempo correspondiente a los ± 6 GHz de ancho de banda disponible.

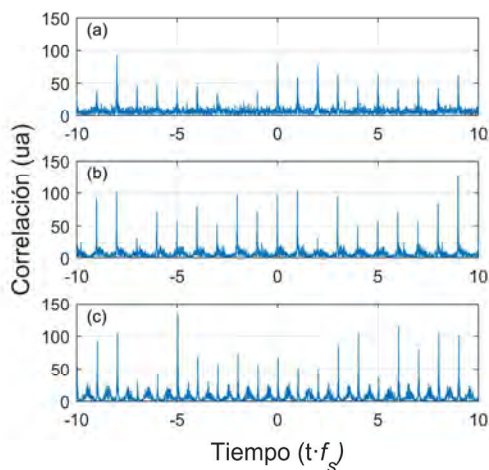


Fig. 6: Detección de chirps por correlación digital en la señal heterodina para los tres valores del producto $f_s \tau_c$ citados.

La contribución a la correlación de la intensidad del LO se evita mediante la sustracción del nivel en continua de $s(t)$. La contribución de la intensidad del FSFL es muy baja y está centrada, en el caso de cavidades resonantes, en los centros de los pulsos de emisión espontánea. Finalmente, la correlación con la señal

propuesta del conjunto de *chirps* de frecuencia decreciente es despreciable al resultar en la integración de un *chirp* de constante doble.

Los resultados de la correlación se representan en la Figura 6, donde se observa, en todos los casos, la presencia de una alta correlación a intervalos de tiempo $1/f_s$, como corresponde a la cadencia esperada de los *chirps* en (3). Su población, no obstante, no es uniforme, como era también esperable debido a su generación a partir de eventos de emisión espontánea.

6.- Efecto Talbot espectral

La aparición de una estructura temporal en la intensidad de la salida del FSFL en cavidades resonantes representa una traza de la existencia de correlaciones entre distintas amplitudes A_k de los *chirps* en (3). Estas correlaciones, o ajustes parciales de fase entre modos, se reflejan en el espectro obtenido mediante FFT de la señal heterodina (5) de cada pulso QS. En función de la transformada de Fourier del campo, $\hat{E}(v)$, el espectro de $s(t)$ está dado por $E_{LO}^* \hat{E}(v_0 + f) + E_{LO} \hat{E}^*(v_0 - f)$ además del espectro de la intensidad del FSFL, y es por tanto un espectro óptico plegado sobre la frecuencia del LO.

Los espectros de las tres situaciones bajo análisis se presentan en la Figura 7. En el primer caso, correspondiente a una cavidad no resonante, se obtiene el espectro continuo típico de los FSFL. En cavidades resonantes la situación es distinta. En primer lugar, se observan en ambos casos componentes estrechas a frecuencia $qf_s = pFSR$ y a sus armónicos. Estas componentes, que son las únicas que sobreviven si el LO se apaga, constituyen el espectro de la intensidad del FSFL y se corresponden con los pulsos con separación $1/qf_s$ en la intensidad de la Figura 4. Además, el espectro presenta una serie de bandas equiespaciadas en frecuencia una cantidad FSR/q , esto es, separadas por una FSR (9.2153 MHz) para $f_s \tau_c = 9$ y por $FSR/2$ para $f_s \tau_c = 17/2$. Surge por tanto una estructura de bandas equiespaciadas en frecuencia que está ausente fuera de las condiciones resonantes y que es, en general, distinta a la de un Fabry-Pérot.

Conviene mencionar que en nuestro experimento la estructura de bandas fluctúa y aparecen desdoblada en dos series con el mismo

espaciado, las cuales corresponden a la superposición de los espectros por encima y por debajo de la portadora. La Figura 7 corresponde a una situación donde la portadora está sobre una banda y las dos series se superponen.

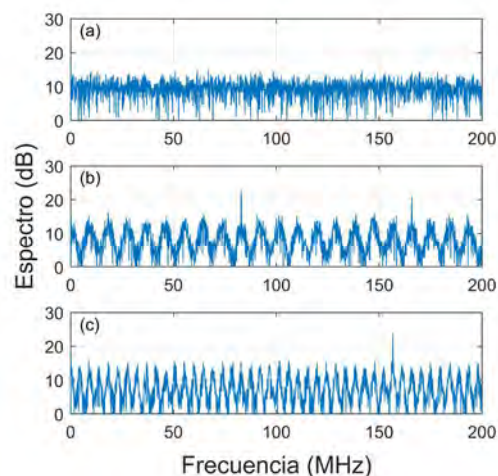


Fig. 7: Espectro FFT de la señal heterodina restringida a los 10 μ s centrales del pulso QS, para los tres valores del producto $f_s \tau_c$ en estudio: (a) $f_s = 80$ MHz, (b) $f_s = 82.9405$ MHz, y (c) $f_s = 78.336$ MHz.

Para explicar la casuística reflejada en la Figura 7, nos referimos a la transformada de Fourier de la señal (3), que se presenta como:

$$\hat{E}(v) \propto e^{-\pi j \frac{\tau_c v^2}{f_s}} * \sum_k A_k \delta\left(v - \frac{k}{\tau_c} - \frac{f_s}{2}\right) \quad (6)$$

donde el asterisco representa la convolución. En condiciones generales, esto es, para valores genéricos de frecuencia de desplazamiento y de FSR, y para emisión de *chirps* incorrelados, el espectro óptico que surge de esta expresión es una suma incoherente de los espectros continuos de cada uno de los *chirps*. Esta es la situación observada en la Figura 7(a).

En cavidades resonantes, donde $f_s \tau_c = p/q$, el espectro puede interpretarse como resultado del efecto Talbot fraccionario en el dominio espectral. En efecto, la estructura de (6) describe una disposición periódica de objetos, en este caso líneas espectrales separadas por una FSR, que son conformados por un núcleo u operador de Fresnel. Se comprueba, además, que la condición de Talbot fraccionario es equivalente a la condición de cavidad resonante. Si las amplitudes A_k son iguales para todos los índices k la analogía con el efecto

Talbot fraccionario es completa, y el espectro del sumatorio en (6) se reproduce en condiciones Talbot enteras, como en la Figura 7(b), o produce dos líneas por FSR en condiciones semienteras, como en la 7(c).

Este argumento, no obstante, debe ser matizado en tanto que las amplitudes A_k no son uniformes y, en principio, no debe existir correlación entre ellas al estar generadas por eventos de emisión espontánea. A este respecto, la interpretación de los espectros como resultado de un efecto Talbot espectral requiere, como ya implicaba la existencia de patrones periódicos en la intensidad, de correlaciones entre las amplitudes A_k , esto es, de un ajuste al menos parcial entre las fases de los distintos *chirps* en la ecuación (3). La observación de bandas en el espectro se justifica entonces por las conocidas propiedades del efecto Talbot de reproducción de patrones con imperfecciones en su periodicidad.

7.- Conclusión

En este trabajo se ha demostrado la pertinencia del modelo de emisión de los FSFL en modos de tipo *chirp*, o modelo del peine en movimiento, para grandes valores del desplazamiento de frecuencia. La demostración se ha realizado tanto en cavidades resonantes como no resonantes para emisión QS, donde el campo está constituido por emisión espontánea recirculante. En las cavidades resonantes, en particular, la existencia de correlaciones entre modos de tipo *chirp* origina el agrupamiento de la intensidad en patrones periódicos de pulsos y, en el espectro, en la recuperación de un espectro de bandas resultado del efecto Talbot espectral. Estos resultados representan, hasta nuestro conocimiento, la primera detección de los modos *chirp* en FSFL a grandes desplazamientos de frecuencia, así como la recuperación de un espectro óptico discreto debido a efecto Talbot espectral.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Estatal de Investigación (PID2020-120404GB-I00). M. C. agradece el apoyo del Ministerio de Universidades (FPU21/05449).

Referencias

- [1] W. STREIFER y J. R. WHINNERY, "Analysis of a dye laser tuned by acousto-optic filter", *Appl. Phys. Lett.* 17(8), 335-337 (1970).
- [2] D. J. TAYLOR, S. E. HARRIS, y S. T. K NIEH, "Electronic tuning of a dye using the acousto-optic filter", *Appl. Phys. Lett.*, 19(8), 269-271 (1971).
- [3] F. V. KOWALSKI, P. D. HALLE y S. J. SHATTIL, "Broadband continuous-wave laser", *Opt. Lett.* 13(8), 622-624 (1988).
- [4] S. BALLE, I. C. LITTLER, K. BERGMANN y F. V. KOWALSKI, "Frequency shifted feedback dye laser operating at a small shift frequency", *Opt. Commun.*, 102(1-2), 166-174 (1993).
- [5] H. SABERT y E. BRINKMEYER, "Pulse generation in fiber lasers with frequency shifted feedback", *J. Lightw. Technol.*, 12(8), 1360-1368 (1994).
- [6] K. NAKAMURA, T. MIYAHARA y H. ITO, "Observation of a highly phase-correlated chirped frequency comb output from frequency-shifted feedback laser", *Appl. Phys. Lett.*, 72(21), 2631-2633 (1998).
- [7] S. JACKSON, R. VALLEE, y M. BERNIER, "Mid-Infrared Fiber Photonics" (Woodhead Publishing, 2021).
- [8] H. GUILLET DE CHATELLUS, E. LACOT, W. GLASTRE, O. JACQUIN, y O. HUGON, "The hypothesis of the moving comb in frequency shifted feedback lasers", *Opt. Commun.*, 284(20), 4965-4970 (2011).
- [9] J. AZAÑA y M. A. MURIEL, "Temporal self-imaging effects: theory and applications for multiplying pulse repetition rates". *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 7(4), 728-744 (2001).
- [10] J. AZAÑA, S. WANG y L. R. CHEN, "Spectral self-imaging phenomena in sampled Bragg gratings", *J. Opt. Soc. Am. B.* 22(9), 1829-1841 (2005).
- [11] M. CUENCA, H. MAESTRE, G. TORREGROSA, H. GUILLET DE CHATELLUS y C. R. FERNÁNDEZ-POUSA, "ASE recirculation effects in pulsed frequency shifted feedback lasers at large frequency shifts", *Opt. Express*, 31(10), 15615-15636 (2023).